



**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE
RESIDENCIA DE LAS AGUAS EN
LOS HUMEDALES ARTIFICIALES
DE FLUJO VERTICAL**

ERIK FERNANDO MAÑARA LOZANO

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
INGENIERÍA CIVIL
TRABAJO DE GRADO**



**CARTAGENA DE INDIAS
NOVIEMBRE 2015**

**DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LAS
AGUAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO
VERTICAL**

**Línea de investigación
SANEAMIENTO AMBIENTAL**

**Grupo de investigación
MODELACIÓN AMBIENTAL**

**Director:
EDGAR QUIÑONES BOLAÑOS, M.Sc., PhD.**

**Investigador
ERICK FERNANDO MAÑARA LOZANO**

**UNIVERSIDAD DE CARTAGENA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA INGENIERÍA CIVIL
CARTAGENA DE INDIAS D T Y C.
2014**

Cartagena, 09 de Diciembre de 2015

Comité

INVESTIGACION Y PROYECTOS DE GRADO
Facultad de Ingeniería
Programa de Ingeniería Civil

Cordial Saludo.

Remitiendo a ustedes mi Proyecto de Grado titulado DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LAS AGUAS EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO VERTICAL, para su respectiva evaluación.

Esperando la comunicación pronta de su respuesta.

Atentamente,

ERIK FERNANDO MAÑARA LOZANO
Código. 0211111001

NOTA DE ACEPTACIÓN

Firma del Presidente Jurado

Firma del jurado

Firma del jurado

DEDICATORIA

A la gloria del excelente y gran ingeniero y arquitecto del universo por dejar vislumbrar los pálidos destellos de esperanzas.

... A ellas por ser las heroínas tras del telón, sin las cuales el triunfo no sería triunfo

A Javier & Wilver Lozano por haber sido un baluarte en la tempestad.

A mi familia y todos aquellos por medio de los cuales hoy doy esta meta por cumplida.

AGRADECIMIENTOS

Docentes.

Edgar Quiñones Bolaños, Ph. D. Director de tesis

Mónica Eljaiek Ursola, M. Sc. Docente Ingeniería civil

Javier Mouthon Bello, Ph. D. Docente Ingeniería civil

Dalia Moreno Egel, M. Sc. Docente Ingeniería civil

Familiares y Amigos...

Índice

RESUMEN.....	14
ABSTRACT.....	15
1. INTRODUCCIÓN	16
2. OBJETIVOS.....	20
2.1. General.....	20
2.2. Específicos.....	20
3. ALCANCE	21
4. MARCO REFERENCIAL	23
4.1. Marco Teórico	23
4.1.1. Humedales	23
4.1.2. Tiempo de Retención Hidráulico de los humedales artificiales (TRH).....	32
4.1.3. Distribución de Tiempos de Residencia (DTR).....	33
4.1.4. Método de Wolf Resnick	37
4.1.5. Índice de Morril.	39
4.1.6. Eficiencia Hidráulica	40
4.1.7. Trazadores.....	42
4.2. Marco Legal.....	45
4.3. Antecedentes.....	46
4.4. Estado del Arte	48
5. METODOLOGÍA	52
5.1. Localización.....	54
5.2. Descripción de la planta.	55
5.3. Recolección de Datos.	59
5.4. Generalidades del estudio.....	60
5.5. Análisis y determinación de escenarios.....	62
5.6. Adecuación de la planta piloto.	65
5.7. Volumen de la sustancia trazadora y forma de ingreso al flujo.	66
5.7.1. Ingreso del afluente	67

5.8. Calibración de equipo de medición	68
5.9. Medición.....	70
5.10. Muestras	70
5.11. Determinación de la influencia del trazador en el estudio de tiempos de residencia.	71
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	73
6.1. Resultados para 1.28 días de retención teórica.....	73
6.1.1. Evaluación de resultados por el método de tendencia central	74
6.1.2. Evaluación por Índice Morril	75
6.1.3. Evaluación con Formulas de Wolf Reisnick.....	77
6.2. Resultados para dos días de TRH teórico.....	82
6.2.1. Evaluación por el Método de Tendencia Central.....	83
6.2.2. Evaluación por el Método del Índice Morril.....	85
6.2.3. Evaluación por método de Wolf Resnick	86
6.3. Resultados para ensayo de dos días de retención teórica y flujo continuo	88
6.3.1. Evaluación de resultados por el método de tendencia central.	90
6.3.2. Evaluación por el Método del Índice Morril.....	92
6.3.3. Evaluación por el Método de Wolf Resnick	93
6.4. Discusión	95
6.4.1. Características hidráulicas de los reactores.....	96
6.4.2. Influencia de la sal como trazador en los estudios de determinación de tiempos de residencia.....	99
6.4.3. Eficiencias hidráulicas de los reactores	100
7. CONCLUSIONES	103
8. RECOMENDACIONES	106
REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS	108
ANEXO.....	112

Listado de tablas

Tabla 1. Principales mecanismos de eliminación y tratamiento de los HA.	25
Tabla 2. Relaciones en los tiempos experimentales y tiempos teóricos	37
Tabla 3. Variables consideradas en la investigación.	52
Tabla 4: características de los sustratos	59
Tabla 5. Parámetros del diseño original del Humedal Artificial a estudiar.....	60
Tabla 6. Caudales calculados para cada TRH asumido.....	61
Tabla 7. Caudales a estudiar de acuerdo al tiempo de retención.	63
Tabla 8. Coeficiente de remoción de primer Orden de acuerdo al número de semanas	64
Tabla 9. Ingreso de pulsos del afluente al reactor por distribución de tiempo	67
Tabla 10. Datos de ensayo de calibración de equipo.....	69
Tabla 11. Resultados de muestreo con conductivímetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de 1,28 días	73
Tabla 12: valores de los parámetros y criterios para cada reactor estudiado	75
Tabla 13: Procedimientos para el cálculo de conductividades en los reactores	77
Tabla 14: Resultados y cálculos para reactor 1	78
Tabla 15: Predominios de flujo y porcentaje de zonas muertas	81
Tabla 16. Resultados de muestreo con conductivímetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de 2 días	82
Tabla 17: valores de parámetros y criterios para cada reactor según plantación	84
Tabla 18: % de Flujos y zonas muertas por reactor.....	87
Tabla 19. Resultados de muestreo con conductivímetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de 2 días y flujo continuo.....	88
Tabla 20. Valores de parámetros y criterios de evaluación para cada reactor.....	91
Tabla 21. % de flujos y zonas muertas por cada reactor	95
Tabla 21. Tiempo de retención obtenidos experimentalmente y Eficiencias hidráulicas de cada reactor por ensayo realizado.....	101

Listado de imágenes

Imagen 1. Humedal de flujo vertical.	24
Imagen 2. Sección transversal de un HA de flujo libre	28
Imagen 3. Sección transversal de un HA de flujo sub superficial.....	28
Imagen 4: sección de un HA de flujo vertical	29
Imagen 5. Esquema del proceso estímulo-respuesta	34
Imagen 6. DTR característica y ajuste de modelo a trazador en HA de Ginebra.	35
Imagen 7. Curva de distribución del trazador.....	36
Imagen 8: Curva de $1 - F(t)$	39
Imagen 9. HA FS en construcción en Bayawan, Filipinas	47
Imagen 10. Localización del Humedal Artificial.	55
Imagen 11. Dimensiones y estratos del Humedal Artificial (HA) usado en el experimento	56
Imagen 12. Sistema de tratamiento y medición en planta piloto.....	58
Imagen 13. Punto de inyección del trazador y punto de recolección de muestras	67

Listado de gráficas

Grafico 1. Esquema de Metodología seguida.....	54
Grafico 1. Curva de ajuste para equipo usado (Consort C5010).....	69
Grafico 2. Concentración del efluente en función del tiempo.....	74
Grafico 3: Índice Morril, de los reactores 1,2 y3.....	76
Grafico 4: Curvas 1 - F(t) para (a) Enea, (b) Mangle, (c) Reactor biológico.....	80
Grafico 5: Concentración de NaCl en función del tiempo, para los reactores estudiados con un tiempo teórico de retención de 2 días.....	83
Grafico 6: Curvas F(t) para cada reactor.....	85
Grafico 7. % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 1.....	86
Grafico 8. % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 2.....	87
Grafico 9. % de Trazador retenido (Curvas F(t)) para reactor 3.....	87
Gráfico 10. Concentración de cloruro de Sodio en función del tiempo para cada reactor...	91
Gráfico 11. % de trazador que sale de los reactores en función del tiempo de ensayo.....	92
Grafico 12: % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 1.....	93
Grafico 13: % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 2.....	94
Grafico 14: % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 3.....	94

Listado de Fotografías

Fotografía 2: Reactor #2 con flora Tapya.....	65
Fotografía 1: filtro biológico y reactor #1	65
Fotografía 3: Muestras iniciales	71
Fotografía 4: Muestras y rótulos de frascos.....	71

Listado de Anexos

Anexo 1: Resultados y cálculos para el reactor 2 en el primer ensayo	112
Anexo 2. Resultados y cálculos para reactor 3 en el primer ensayo	113
Anexo 3. Resultados y cálculos para reactor 1 en el segundo ensayo.....	114
Anexo 4. Resultados y cálculos para reactor 2 en el segundo ensayo.....	115
Anexo 5. Resultados y cálculos para reactor 3 en el segundo ensayo.....	116
Anexo 6. Resultados y cálculos para reactor 1 en el tercer ensayo	117
Anexo 7. Resultados y cálculos para reactor 2 en el tercer ensayo	118
Anexo 8. Resultados y cálculos para reactor 3 en el tercer ensayo	119

RESUMEN

El presente trabajo se enfocó específicamente en determinar el tiempo de retención de los reactores de humedales artificiales de flujo vertical de la planta piloto de la Universidad de Cartagena, sede Piedra de Bolívar. El procedimiento utilizado para determinar el tiempo de retención de los reactores se obtuvo por medio de la aplicación de Cloruro de Sodio NaCl o sal común como sustancia trazadora, la cual fue aplicada a la entrada de los reactores con una concentración conocida y medida en la salida con un conductivímetro cada tres horas hasta la salida del trazador completamente.

La investigación se basó en el estudio de tres reactores, cada reactor con una vegetación diferente, los cuales se les dieron las mismas características de configuración con excepción del tipo de vegetación; para el reactor 1 fue asignada una vegetación de Enea, para el reactor 2 una de Mangle rojo y en el reactor 3 no se plantó ninguna clase de vegetación. El estudio se realizó en tres ensayos por cada reactor los cuales diferían en el tiempo teórico de retención a evaluar y el modo de ingreso del afluente (por pulsos y continuo).

Los valores obtenidos de concentraciones fueron procesados y graficados en función del tiempo transcurrido, y utilizando modelos matemáticos de Análisis de la curva de tendencia, fórmulas de Wolf y Reisnick y el Índice de Morril, se obtuvieron las características hidráulicas de los reactores, determinando tipo de flujo, zonas muertas, y cortocircuitos.

Con la prueba de trazadores se obtuvo que el tiempo de retención experimental se aproxima al tiempo de retención teórico cuando el afluente es ingresado en un caudal continuo; esto mismo sucede con el comportamiento hidrodinámico de los reactores, el cual mejora a medida que el ingreso de los pulsos (si se usa un flujo Bach) se hacen con intervalos de tiempo cortos y volúmenes pequeños. Comparando estos resultados con los valores de tiempos de retención teóricos y modelos de flujo de diseño, se tiene que el tiempo de retención con el cual operan los reactores es menor el tiempo teórico de retención, el modelo de flujo de operación de los reactores es mixto con altas tendencias de flujo pistón para ingreso continuo de caudal y con tendencia de flujo mezclado para ingreso de afluente por pulsos.

En cuanto a la biomasa de configuración de los reactores, la Enea proporciona características que mejoran la eficiencia hidráulica en los reactores, mientras que el Mangle causa efectos negativos en esta.

Palabras claves: Humedal artificial de flujo vertical, tiempo de retención, eficiencia hidráulica, curvas de tiempos de residencia, trazadores.

ABSTRACT

The present work focused specifically in determining the time of retention of the reactors of artificial wetlands of vertical flow of the pilot plant(floor) of the University of Cartagena, headquarters Stone of Bolivar. The procedure used to determine the time of retention of the reactors was obtained by means of the application of Chloride of Sodium NaCl or common salt as substance trazadora, which(who) was applied at the entry of you reactors by a concentration known and measured in the exit with a conductivimetro every 3 up to the exit of the tracer completely.

The research was based on the study of three reactors which gave to them the same characteristics of configuration with exception of the type of planted vegetation; for the reactor 1 was assigned Enea's vegetation, for the reactor 2 one of red Mangrove and the reactor 3 no class of vegetation reached. It is a study it was realized in three essays which were differing in the theoretical time of retention to evaluating and the way of revenue of the tributary (for pulses and continuo).

The values obtained of concentrations were tried and graficados depending on the passed time, and using mathematical models of Analysis of the curve of trend, formulae of Wolf and Reisnick and Morril's Index, the hydraulic characteristics of the reactors are obtained, determining type of flow, dead zones, and short circuits.

With the test of tracers there was obtained that the time of experimental retention comes closer the theoretical time of retention when the tributary is deposited in a flow continuo; this itself happens with the hydrodynamic behavior of the reactors, which improves as the revenue of the pulses (if Bach uses a flow) they are done by short intervals of time and small volumes. Comparing these results with the values of theoretical times of retention and models of flow of design, there is had that the time of retention with which they operate on the reactors is minor the theoretical time of retention, the model of flow of operation of the reactors is mixed with high trends of slug flow for constant revenue.

In contrast with the biomass of configuration of the reactors, Enea provides characteristics that improve the hydraulic efficiency in the reactors, whereas the Mangrove causes negative effects in this one.

Key words: artificial Wetland of vertical flow, time of retention, hydraulic efficiency, curves of times of residence, tracers.

1. INTRODUCCIÓN

La preservación de las fuentes hídricas de las cuales nos abastecemos de agua o sirven para actividades humanas, está ligada íntimamente a la forma en como las usamos, es así como un cuerpo de agua al cual se le mantenga regulaciones rigurosas de actividades de uso tendrá mejores condiciones de calidad que aquel al cual no se le haga, y por ende tendrá mayor longevidad es por ello que apuntar a la prevenir la polución de las fuentes ha sido uno de los grandes enfoques de las sociedades modernas. Uno de los mayores provisos de contaminación son los vertimiento de residuos líquidos en los cauces, lo que da como resultado altas concentraciones de contaminantes en los cuerpos de, es por ello que para mitigar este caso de polución se han encomendado responsabilidades a entidades nacionales o estatales que mediante la imputación de leyes controlen los vertimientos a los causes; para el caso de Colombia, se tiene el decreto emitido por la presidencia de la república como decreto ley 3930 del año 2010, en el cual se establecen las calidades de las aguas de los efluentes que se pueden verter en los cuerpos de aguas, estas calidades están en función de la cantidad de contaminantes contenidos, ya sea la carga másica, la cantidad de coliformes, el número total de nitrógeno, entre otros.

En aras de hacer cumplimiento a lo establecido en las leyes se hace uso de los sistemas depuradores, los cuales pueden constar de una, dos o más partes, a decir, sistema de lagunas, sistemas anóxicos, lodos activados, humedales, etc. Cada sistema es diseñado con la firme intención de disminuir la carga orgánica y depurar las aguas residuales de una cantidad considerable de patógenos. La mayor parte de estos sistemas, efectúan el procesos de depuración mediante procesos biológicos, en el cual bacterias, hongos y enzimas se encargan de degradar y digerir la materia orgánica y demás contaminantes, y transformarla en otras sustancias (Metano y dióxido de carbono), sin embargo, para llevar a cabo este procesos depurativo, es necesario que las bacterias y enzimas estén en contacto con los contaminantes del agua en un tiempo tal que garantice el efecto de digestión; este tiempo se le conoce como tiempo de retención hidráulica (TRH), es por ello que la mayoría de estos sistemas son diseñados de acuerdo a este parámetro; tener en cuenta este parámetro entonces es de suma importancia, ya que cuando los sistemas tienden a tener problemas de

disminución de capacidad con el tiempo, lo que cambia el porcentaje de remoción del sistema, de modo que sabiendo el TRH, se pueden hacer ajustes; otro punto de importancia de este tema radica desde su parte teórica puesto que técnicamente el TRH en la ingeniería es entendido como el tiempo en que una partícula cualesquiera de un fluido demora en atravesar todo el sistema como tal, lo cual no es aplicable sino solamente a un sistema ideal, donde el flujo se comporta de forma única bajo un modelo de flujo que nunca es igual a la realidad, dado que casi siempre se presentan problemas de zonas muertas o flujos de inercias, lo que hace que unas partículas viajen a través del sistema más rápidamente que otras, por lo que es necesario el estudio del TRH para determinar el modelo de flujo bajo el cual opera el sistema, el tiempo real que posee el sistema, si existen zonas muertas y así poder tomar decisiones sobre el caso.

Dentro de los sistemas depuradores, en los últimos años, se ha desarrollado una técnica de tratamiento de aguas residuales mediante sistemas fitodepuradores llamados como humedales artificiales, estos sistemas de depuración constituidos por lagunas o canales poco profundos (de menos de 1 m) plantados con vegetación propia de las zonas húmedas y en los que los procesos de descontaminación tienen lugar mediante las interacciones entre el agua, el sustrato sólido, los microorganismos, la vegetación e incluso la fauna; inicialmente el mecanismo utilizado fue denominado humedales artificiales de flujo horizontal ya que el agua a tratar fluía de forma libre a través de los estratos recorriendo una determinada trayectoria horizontal, el comportamiento de circulación de fluido es parecido a un canal donde el agua circula a través del medio poroso de sustratos contenidos en ellos; esto inicialmente representó el boom de las investigaciones en la ingeniería ambiental; pero las exigencias de área del sistema eran parecidas y a veces mayores a las que se le pueden dar a los sistemas convencionales de lagunaje. Hacia los años 80's se desarrolló una alternativa en la cual el flujo no viajaría entre los sustratos en un trayecto horizontal como si fuese un canal, sino de forma vertical como si fuese un filtro biológico, a esto llamaron humedal artificial de flujo vertical. Para ambos tipos de humedales, el diseño se basa en tres parámetros importantes, el tiempo de retención hidráulica (TRH), el coeficiente cinético de remoción de primer orden y el porcentaje de remoción que se desea obtener. El coeficiente cinemático de remoción varía de acuerdo al contaminante que se

quiera remover; para el caso de remociones de DBO, la expresión de Arrhenius supone un ajuste a este desde un valor base fijo de 1.1 d^{-1} para una temperatura de 20°C (Otálora, 2011). La remoción tal como se dijo en párrafos anteriores depende del tiempo de los procesos biológicos en el sistema, lo cual nos deja solo con una gran componente, el TRH. A pesar que este tiempo de retención se podría considerar el pilar en el diseño de los humedales artificiales, ha sido un tema poco estudiado, la mayoría de las investigaciones han sido hechas alrededor de optimizaciones en la remoción, modelaciones, comparaciones entre sistemas, mas son escasos los estudios hidrodinámicos y las investigaciones sobre el TRH, antes y no siendo coherentes con la importancia de este parámetro, al momento de diseñar HA, el TRH se ha asumido mediante el empleo de modelos matemáticos, que tal como se dijo anteriormente, corresponde a situaciones ideales y pueden diferir de la realidad puesto que el TRH está ligado a las condiciones climáticas del lugar

En razón de lo anterior el objetivo planteado en esta investigación fue determinar las curvas de distribución de los tiempos de residencia (DTR) de un humedal artificial de flujo vertical (HA-FV), para con ellas establecer el TRH y determinar el modelo de flujo al que mejor se ajusta el humedal, si existen zonas muertas y así poder determinar parámetros que sirvan para realizar optimizaciones desde el punto de vista hidráulico, puesto que el estudio de TRH se realiza con la tecnología de trazadores, en esta se usó como trazador sal común, con la cual el DTR se obtuvo mediante la medición de la conductividad que presentaron las muestras extraídas del efluente de los HA-FV estudiados. Esta investigación fue desarrollada en las instalaciones de la universidad de Cartagena (sede Piedra de Bolívar), donde se cuenta con una planta piloto de humedales artificiales implementada en el año 2010 y modificada en el año 2011, la cual corresponden al diseño uno de un humedal de flujo horizontal y tres reactores de humedales artificiales de flujo vertical, ambos sistemas fueron diseñados bajo la condición de flujo pistón. Uno de los puntos por el cual se realiza esta investigación radica en que el diseño se realizó asumiendo una remoción de DBO, resumiendo todos los procesos biológicos, hidráulicos, físicos y químicos en un solo parámetros asumido, dando un tiempo de retención de las aguas de 1,28 días; lo cual deja una pregunta sobre la cual se encaminó esta investigación, teniendo como pregunta de

investigación si el modelo de flujo a pistón y el tiempo de retención son los óptimos para el sistema.

La investigación descrita se encuentra dentro del macro proyecto de investigación denominado EVALUACION DE UN HUMEDAL ARTIFICIAL VERTICAL PARA LA REMOCION DE MATERIA ORGÁNICA, liderado por el grupo de investigación de modelación ambiental (GIMA) de la universidad de Cartagena, propuesta cuya finalidad es estudiar procesos alternativos para el tratamiento de aguas residuales que sean de bajo costo de operación, adquisición y mantenimiento, que representen una alternativa atractiva y funcional para la región caribe, al tiempo que se aporta a la literatura científica datos que extiendan el conocimiento acerca de los humedales de flujo vertical para que ya no sean vistos solo como “Cajas Negras” en el área de la ingeniería

2. OBJETIVOS

2.1. General.

Determinar curvas de distribución de los tiempos de retención hidráulica en un humedal artificial de flujo vertical (HA-FV), mediante la metodología de estímulo-respuesta, usando como sustancia trazadora sal común, para poder proponer ajustes que permitan optimizar los HA-FV desde el punto de vista hidráulico.

2.2. Específicos.

- Caracterizar el comportamiento hidráulico de los humedales artificiales en función del tipo de vegetación.
- Determinar la influencia del trazador NaCl en los ensayos de determinación de las curvas de residencia de un reactor
- Plantear recomendaciones técnicas sobre el mejoramiento del funcionamiento de los humedales de flujo vertical, en base a la distribución de los tiempos de residencia y teniendo en cuenta las condiciones teóricas de presencias de zonas muertas.

3. ALCANCE

La planta experimental, objeto de estudio durante la realización de este trabajo, se encuentra situada a la margen izquierda de la entrada a la sede piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena en Colombia, en las coordenadas 10.24°,11',20" al norte y 75°30'20.09" al este.

La localización geográfica corresponde a un clima típicamente tropical seco, caracterizado por altas temperaturas en tiempos de verano promediadas en aproximadamente 36.7 °C y temperaturas medias que varían entre 19 °C y 25.1 °C en tiempos de invierno, con escasas oscilaciones térmicas en el día, presenta altas precipitaciones en las temporadas de lluvias correspondientes a los meses de agosto a noviembre, con precipitaciones leves en los meses comprendidos entre abril y julio. (Centro de investigación oceanográfica e hidrográfica, Colombia. 2010)

La investigación descrita en este documento, se basó en el estudio del desempeño de los humedales artificiales de flujo vertical en relación a los tiempos de retención hidráulica y las diferencias que se pueden presentar en la caracterización de este al momento de decidir si se construyen los humedales con flora o no.

Este estudio se limitó a la determinación de la distribución de tiempos de residencia hidráulica que presenta un humedal existente diseñado bajo condiciones de flujo pistón con características fijas de los estratos, tomando decisiones sobre el análisis a tres caudales y la evaluación de la condición positiva o negativa que ejerce la implementación de vegetación en la medida de los tiempos. Lo anterior, fue realizado a nivel laboratorio en una planta piloto ubicada en la sede Piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena como trabajo investigativo con el cual se optó al título de ingeniero civil, los ensayos realizados en la investigación fueron inicialmente programados a cinco meses; pero por sucesos acaecidos en las instalaciones de la universidad fue reprogramado a cuatro meses.

Los resultados obtenidos se presentan en la parte final de este documento donde se detalla la incidencia de los parámetros anteriormente expuesto en la determinación de la distribución de tiempos de residencia, los cuales pueden ser de utilidad al momento de

hacer una caracterización hidráulica de un humedal, medir la eficiencia de remoción de materia orgánica de éste o en el diseño de los mismos.

En el presente trabajo no fue objetivo dar respuesta a la eficiencia de trazadores, ni un diseño hidrodinámico; se estudió la incidencia de la plantación en el uso del trazador NaCl, puesto que esto incide de forma directa en los resultados que se puedan obtener para la formación de la curva de distribución, dado que si la plantación absorbe trazador o reacciona ante este, tendrían que tenerse en cuenta este hecho al momento del estudio con Sal como trazador y no errar en los resultados que se puedan proponer. Tampoco se midieron eficiencias de remoción o tratamiento.

4. MARCO REFERENCIAL

4.1.Marco Teórico

Las descargas de aguas residuales se han convertido últimamente en uno de los problemas ambientales más críticos, ya que éste aumenta a la par con el crecimiento poblacional. En Colombia, la infraestructura disponible en materia de aguas residuales hasta el años 2013 solo era de 562 sistemas, (Superintendencia de servicios públicos domiciliarios, 2013).

Después de inspeccionar 333 sistemas de tratamiento de aguas residuales en 278 municipios del país, la Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios encontró que Colombia se raja en este proceso. El resultado de las visitas realizadas señala que las empresas prestadoras del servicio incumplen las normas de vertimiento de aguas residuales, desconocen el protocolo de operación, no hacen el mantenimiento adecuado a la infraestructura y son vulnerables a fenómenos naturales. A esto se suman las deficiencias técnicas y operativas de los sistemas, lo que generan un impacto negativo en lo social y ambiental en las comunidades, especialmente en las más pobres. Uno de los aspectos más críticos es que se están alterando las fuentes hídricas en municipios que no cuentan con sistemas de tratamiento de aguas residuales (El Universal, 2013).

Entre las distintas tecnologías para el tratamiento de aguas residuales que existen, los sistemas de humedales artificiales están experimentando un mayor grado de desarrollo e implantación, resultando una opción viable a la hora de obtener agua con una mejor calidad, debido principalmente a su elevada eficiencia en la disminución de materia orgánica, nutrientes y patógenos, reduciéndose los posibles efectos adversos de los vertimientos sobre los medios receptores (Llagas y Guadalupe, 2006).

4.1.1. Humedales

Los humedales son medios semiterrestres con un elevado grado de humedad y una profusa vegetación, que reúnen ciertas características biológicas, físicas y químicas, que les confieren un elevado potencial autodepurador. Los humedales naturales pueden alcanzar gran complejidad, con un mosaico de lámina de agua, vegetación sumergida, vegetación flotante, vegetación emergente y zonas con nivel freático más o menos cercano a la

superficie (Otálora, 2011). “Se ha definido de igual modo un humedal artificial como un sistema de ingeniería diseñado y construido para tomar las funciones naturales del suelo, las plantas y su población microbiana para el tratamiento de contaminantes en aguas superficiales, subterráneas o flujos con residuos” (Hoffmann *et al*, 2013, p. 9).

Actualmente los mecanismos de humedales artificiales constituyen una alternativa económicamente viable y técnicamente realizable para el tratamiento de aguas residuales domesticas en países en vía de desarrollo que no cuentan con presupuesto disponible para invertir en tecnología de punta para el tratamiento de las aguas que serán vertidas, ya que para su construcción, operación y mantenimiento se requiere mano de obra poco calificada y por ende menores costos (Curiel, 2012).

Los humedales artificiales consisten en el diseño sistemático de una cubeta o tanque, en cuyo interior existan materiales granulares porosos organizados de forma estratificada, los cuales generalmente son grava, arenas y sustrato. La mayoría de los humedales utilizan plantaciones con características fijas.

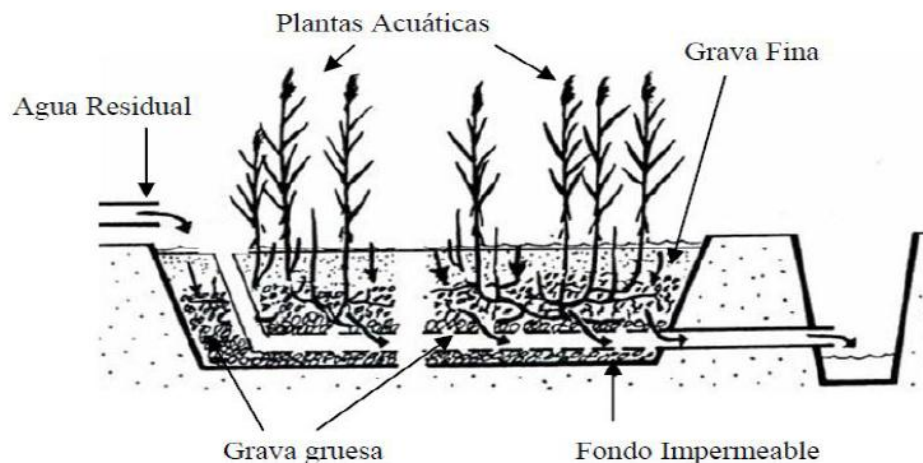


Imagen 1. Humedal de flujo vertical.
Fuente: Mena Javier *et al*. (2008).

Los procesos de depuración y tratamiento de las aguas residuales en un sistema de humedales artificiales comprenden una serie de procesos químicos, físicos y microbiológicos

Tabla 1. Principales mecanismos de eliminación y tratamiento de los HA.

Contaminantes	Mecanismo de eliminación
Material en suspensión (MES)	Sedimentación
	Filtración
Materia orgánica biodegradable (DBO)	Degradación microbiana aerobia.
	Degradación microbiana anaerobia.
Nitrógeno	Amonificación seguida por nitrificación
	Microbiana y des nitrificación.
	Asimilación por parte de las plantas
	Volatilización del amoniaco.
Fósforo	Adsorción por parte del lecho.
	Asimilación por parte de las plantas.
Metales	Asimilación por parte de las plantas.
	Intercambio iónico
Patógenos	Sedimentación
	Filtración
	Muerte natural
	Irradiación ultravioleta (UV)

Fuente (Mena *et al*, 2008)

Dentro de las propiedades que hacen de los humedales artificiales una tecnología de interés se encuentran los aspectos de tratamiento y los económicos, teniendo como aspectos favorables los siguientes:

- Proporcionan un eficaz tratamiento, eliminando de las aguas una cantidad considerable de contaminantes, de los cuales su mayor efectividad está basada en la excelente depuración orgánica y sólidos en suspensión que poseen las aguas residuales (Salgot, 2008).
- En comparación al sistema tradicional de tratamientos de aguas residuales, los costos de operación, mantenimiento e inversión son considerablemente bajos, con una explotación simple (Salgot, 2008; Yalcuk, 2009).
- Su consumo energético es casi nulo ya que el aporte de oxígeno es espontáneo (Mena et al., 2008).

Muy a pesar de las grandes virtudes y ventajas que poseen los sistemas de humedales artificiales frente a los sistemas tradicionales de tratamiento de aguas, los HA poseen sus limitaciones e inconvenientes que han de ser tenidos en cuenta si se quiere contar con un óptimo desempeño del mismo; uno de los mayores problemas generados al momento de la operación de los sistemas de HA está en relación al mantenimiento del suelo parcialmente aireado, ya que al sobrecargarse con elementos con grandes demanda de oxígeno, los sedimentos adquieren una condición reductora dando como resultado una disminución en la demanda biológica de oxígeno y una sobrecarga hidráulica. El aspecto climatológico ha de ser tenido en cuenta como un parámetro fundamental en el diseño de este sistema, dado que bajo ciertas condiciones ambientales la eficiencia de remoción se ve altamente disminuida, sobre todo en la eliminación del nitrógeno, es por ello que no es recomendable la implementación de estos sistemas en zonas de climatologías extremas con heladas frecuentes. Sumado a lo anterior y visto como una de las mayores desventajas de este sistema, se encuentra la limitación del tipo de aguas que esta puede depurar, limitada para aquellas que poseen una gran carga de materia orgánica, por lo que es necesario un pre tratamiento (Salgot & Torrens, 2008).

Existen varios tipos de humedales artificiales que trabajan como tratamientos secundarios de aguas residuales y cuyo modo de actuación es el mismo, humedales artificiales de flujo superficial y humedales artificiales de flujo sub superficial vertical u horizontal.

4.1.1.1.Sistema de flujo libre o superficial

En este el nivel del agua se encuentra sobre la superficie del medio de soporte, el flujo pasa a través de gravas y de la vegetación, este sistema está constituido por una serie de canales paralelos con un suelo impermeable, la lámina de agua sobre el lecho del canal es poco profunda de 0.1 m a 0.6 m aproximadamente. Estos sistemas son menos eficaces que los de flujo sub superficial porque no tienen medio de soporte que participe en los mecanismos de depuración y, además, su funcionamiento se ve más afectado por las condiciones climáticas (Salgot y Torrens, 2008). La exposición del agua a la atmósfera hace que el diseño adecuado de estos sistemas sea crucial para evitar problemas derivados de una posible sobrecarga del sistema, tales como la aparición de olores y plagas de insectos (Mena et al., 2008).

4.1.1.2.Sistema de flujo sub superficial:

En este sistema el agua a tratar circula por un medio poroso y de soporte el cual está constituido generalmente por grava, arena y otros materiales finos, a diferencia que en el sistema libre, se evitan olores, plagas y en zonas de climatologías poco extremas aportan mayor protección térmica, ya que la circulación del fluido se realiza bajo el nivel de superficie; En el medio granular ocurren múltiples procesos como la retención y sedimentación de la materia en suspensión, la degradación de la materia orgánica, la transformación y asimilación de los nutrientes y la inactivación de los microorganismos patógenos (García & Corzo, 2008). Cuanto mayor sea la superficie susceptible de ser ocupada por la biopelícula, mayor será la densidad de microorganismos y mayor el rendimiento del sistema (Mena et al., 2008).

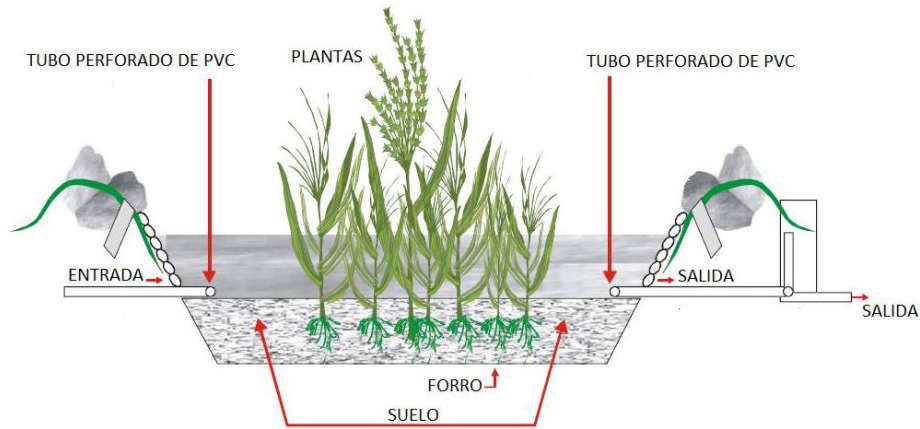


Imagen 2. Sección transversal de un HA de flujo libre
Fuente: Llagas et al., 2006

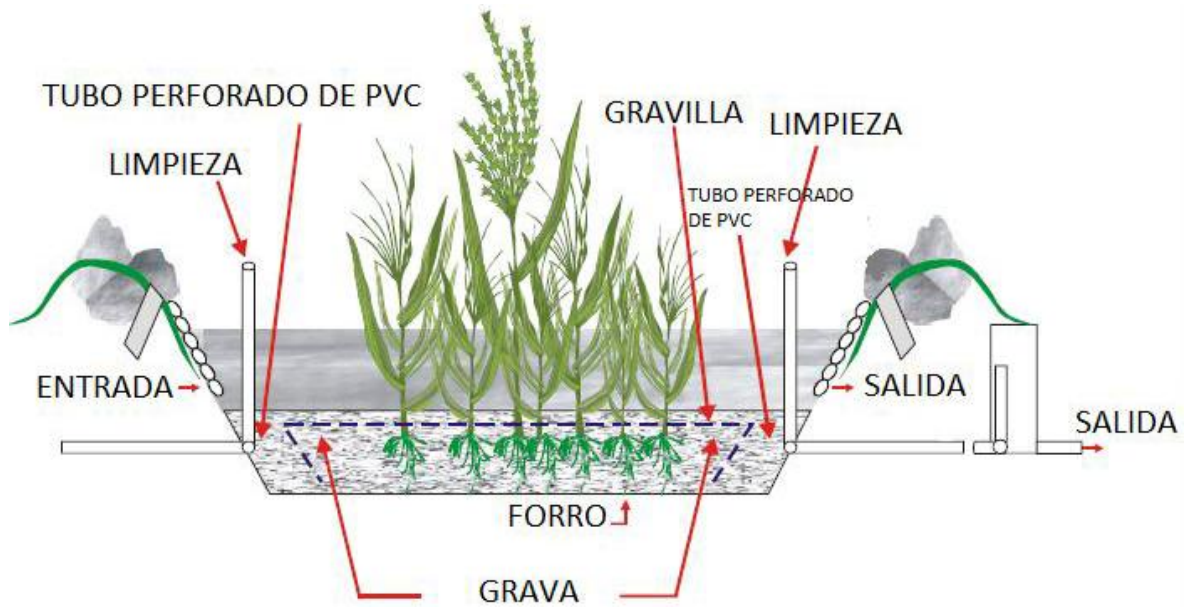


Imagen 3. Sección transversal de un HA de flujo sub superficial
Fuente: Llagas et al., 2006

Los humedales de flujo sub superficial están a su vez divididos en dos tipos, clasificados de acuerdo a la dirección del flujo, esto son; humedales de flujo horizontal y humedales de flujo vertical

4.1.1.3. Humedales de flujo vertical:

Este fue desarrollado en los países europeos como una alternativa a los humedales de flujo horizontal para obtener efluentes con índices de nitratos (García, 2008). El agua fluye a través del medio poroso experimentando un tratamiento físico (filtración), químico (oxidación) y biológico (fijación de la biomasa) y se recoge en una red de drenaje situada en el fondo del lecho (Salgot & Torrens, 2008); la profundidad efectiva del medio filtrantes es de alrededor de 1 m y preferiblemente se debe hacer un pre -tratamiento ya sea en un sedimentador primario o un tanque séptico.

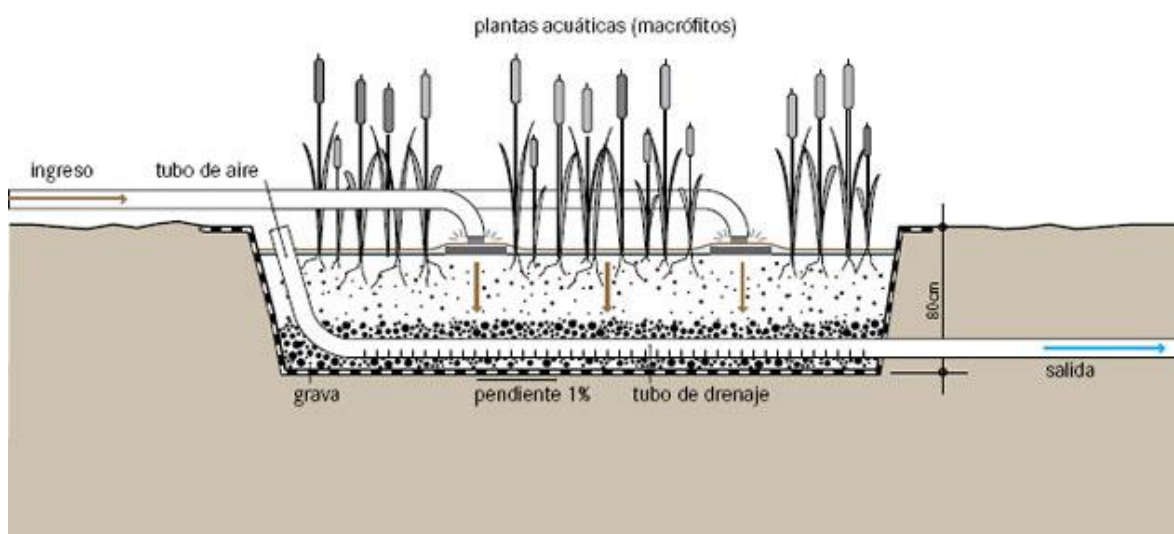


Imagen 4: sección de un HA de flujo vertical
Fuente: Alianza por el agua

Los humedales artificiales de flujo vertical son más eficaces que los de flujo horizontal, ya que éstos requieren de una menor área para tratar una carga orgánica, aunque este mismo criterio los hace susceptibles a un mayor riesgo de colmatación, su mayor discrepancia en cuanto a utilidades radica en un elevado costo de operación en comparación de aquellos de flujo horizontal y en que éstos no han sido tan estudiados como su homólogo horizontal.

Los sistemas de flujo sub-superficial pueden ser operados en el modo de flujo vertical, pero ese modo tiene muchas variantes. Estas son:

- ❖ Flujo Descendente Intermitente. Esta opción implica la aplicación de inundación del agua en la parte superior del lecho por breves períodos de tiempo. Este modo operacional es seleccionado para optimizar el transporte de oxígeno hacia el lecho. Este tipo es preferido en muchos países europeos. Este fue adelantado como parte del sistema original del Instituto Max Planck desarrollado en los años de 1960. Cuando no son usadas plantas, estos son denominados filtros de arena intermitente. (Curiel 2011)
- ❖ Flujo Descendente no Saturado. Esta variante comprende la distribución de agua a través de la parte superior de un medio granular. El agua entonces gotea a través del medio en flujo no saturado. La distribución de la tubería puede ser localizada arriba del sistema; o en climas fríos, enterradas dentro del lecho del medio granular. El sistema puede ser configurado en un modo de un solo paso o de forma más común: empleando la recirculación del flujo, lo que hace que el agua pase a través del lecho muchas veces (Simancas Páez & Herrera Romero, 2011).
- ❖ Flujo Descendente o Saturados. Son aquellos sistemas que utilizan un flujo saturado continuo de agua a través de la zona de raíces. Las configuraciones de flujo descendente son usadas en el tratamiento de aguas resultantes de la actividad minera, donde son llamados “humedales anaeróbicos o sistemas de producción de alcalinidad”. El flujo ascendente saturado es deseable cuando la pureza del agua debe ser de alta calidad, para minimizar el contacto con contaminantes o el contacto con la zona de raíz se desea maximizar. Estos sistemas han sido empleados en los laboratorios como reactores anaeróbicos para proveer deshalogenación reductiva de disolvente clorados (Simancas Páez & Herrera Romero, 2011).

Uno de los componentes más representativos de los humedales artificiales es la capa vegetal o las plantas, cuya función principal es el oxigenar el medio a través de sus raíces y ayudar al desarrollo de los microorganismos, las plantas usadas en los diferentes tipos de humedales se conocen como helófitos o plantas emergentes, por tener la capacidad de enraizar en lugares encharcados, aparte de ello, éstas sirven como estabilizador para los sustratos

Las plantas acuáticas que crecen en los humedales de flujo sub superficial se supone que actúan como canales de transporte de gases hacia la atmósfera y de oxígeno hacia el relleno (Mena et al., 2008).

Enrique Azcoitia (2012) en su investigación sobre los efectos de la carga hidráulica en el rendimiento de humedales recopila toda un bloque de información sobre las funciones y características que tienen y ejercen las plantas en un HA. Obteniendo lo siguiente:

- La presencia de plantas mejora el flujo del agua residual creando conexiones entre la superficie y la rizosfera (Chazarenc et al., 2003).
- Las plantas contribuyen a estabilizar el cauce (Brix, 1997), ayudan a mantener a largo plazo la conductividad hidráulica del lecho filtrante (Salgot y Torrens, 2008), distribuyen y ralentizan la velocidad del agua, lo que favorece la sedimentación de los sólidos suspendidos, reduce el riesgo de re suspensión (Brix, 1997) y aumenta el tiempo de contacto entre el agua y la vegetación (Mena et al., 2008).
- Toman el carbono, nutrientes y elementos de traza y los incorporan a los tejidos de la planta (Mena et al., 2008 y García y Corzo, 2008).
- La influencia de las raíces de las plantas es bastante grande (Brix, 1997). Alrededor de las raíces existen gradientes de muchas de las especies químicas presentes en el agua (Kadlec y Knight, 1995).
- Compactan el lecho dotándolo de estabilidad (Mena et al., 2008), sobre todo en los humedales verticales (Brix, 1997).
- Ejercen de medio de soporte de la biopelícula (Salgot y Torrens, 2008). Las raíces actúan como superficie para la fijación de microorganismos aumentando así la superficie de biopelícula (Kadlec y Knight, 1995).

- Minimizan el gradiente de temperatura dentro del relleno, protegiéndolo del frío en invierno (Brix, 1997; Salgot y Torrens, 2008; García y Corzo, 2008) y evitando flujos indeseables por diferencia de temperaturas (Mena et al., 2008). (p. 28)

Todos los procesos que se presentan en un humedal, está condicionado por el comportamiento del flujo que pasa a través de los estratos que lo componen, lo cual mejora o afecta la eficiencia del sistema, son numerosos los problemas de desempeño que se le pueden atribuir a las malas consideraciones de las características hidráulicas del sistema (Sabas 2011), estas caracterizaciones hidrodinámicas están estrechamente relacionadas al tiempo de residencia, medidos en la distribución de éstos tiempos.

4.1.2. Tiempo de Retención Hidráulico de los humedales artificiales (TRH)

Se basa en la premisa de que toda el agua contenida en el humedal forma parte del flujo, motivo por el cual no tiene por qué representar realmente el tiempo de residencia hidráulico. Este hecho puede llevar a medir tiempos de retención hidráulicos menores a los calculados mediante las ecuaciones pertinentes (Kadlec y Knight, 1995). El tiempo que el agua permanece en el sistema se conoce como el tiempo de retención hidráulico (TRH). Este TRH se asocia con el tiempo necesario para que se lleven a cabo los procesos necesarios para garantizar un tratamiento adecuado. El TRH bajo condiciones de flujo de ideal, conocido como TRH nominal (τ), puede ser definido por la ecuación (1), mediante la relación entre el volumen de agua útil (V), cuyo resultado es el producto de la profundidad (h), el ancho (W) y la longitud (L) afectados por la porosidad del medio (ϵ); dividido por el caudal de agua (Q) (Kadlec y Wallace, 2009):

$$\tau = V / Q = \epsilon (LWh) / Q \quad \text{Ecuación. 1}$$

La carga hidráulica y el consecuente tiempo de retención hidráulico son importantes en los procesos de depuración de los humedales. A bajas cargas hidráulicas el tiempo de retención es elevado, mientras que a altas cargas el agua pasa rápidamente hasta la salida del humedal, reduciendo el tiempo de contacto entre el agua residual y los

microorganismos del humedal encargados de los procesos de degradación (Ngo Thuy *et al.* 2009).

Los humedales suelen necesitar una baja carga hidráulica y un elevado tiempo de retención hidráulico, motivo por el cual necesitan mucha superficie para alcanzar unos buenos rendimientos en el tratamiento. Existe la posibilidad de que se pueda reducir la superficie necesaria aumentando la carga hidráulica (Fountoulakis *et al.*, 2009), aunque no hay que olvidar que con cargas hidráulicas muy elevadas se puede llegar a exceder la capacidad de los humedales para llevar a cabo el proceso de nitrificación-desnitrificación (Ngo Thuy *et al.*, 2009).

4.1.3. Distribución de Tiempos de Residencia (DTR).

La distribución de los tiempos de residencia de un reactor, corresponde a la función de densidad probabilística para el tiempo de residencia del agua dentro un sistema. Debe tenerse en cuenta que cada humedal presenta un DTR particular y su correspondiente análisis hidráulico se hace generalmente mediante estudios de caracterización hidrodinámica, conocidos como ensayos de trazador (Sandoval, 2007). Las distribución de tiempos de residencia de varios sistemas de HA han sido estudiados en diversos modos, variando variables de control como es el caso de los sustratos, la calidad del agua, tipo de vegetación, generando ejemplos de las curvas características de éstos; los patrones de flujo observados son usualmente descritos mediante el modelo matemático de flujo clásico a pistón

Para determinar el comportamiento hidrodinámico de un sistema o reactor, se debe conocer cuánto tiempo permanece cada una de las partículas o moléculas dentro del sistema, o más exactamente su distribución de tiempos de residencia (DTR). La información de la DTR se determina de manera fácil y directa por métodos experimentales conocidos como estímulo-respuesta o estudios de dispersión utilizando trazadores, lo cual consiste en añadir a al corriente del flujo d agua una cantidad conocida de sustancia trazadora y monitorear la salida de esta sustancia en el tiempo, tal como se muestra en la imagen 5 y en la imagen 6. En estas prácticas, el sistema objeto de estudio es perturbado en algún instante de tiempo por la adición de un compuesto con una propiedad de fácil detección, (i.e., color, absorción

de luz, radioactividad, conductividad, etc.), conservativo e inerte denominado trazador, que no sean perturbados por los procesos para así poder obtener respuestas fieles.

La representación gráfica de la curva DTR, obtenida como respuesta del trazador, es un reflejo del comportamiento del flujo en el interior del reactor y representa el tiempo que las partículas de agua permanecen en el (Levenspiel, 2004; Kadlec y Wallace, 2009).

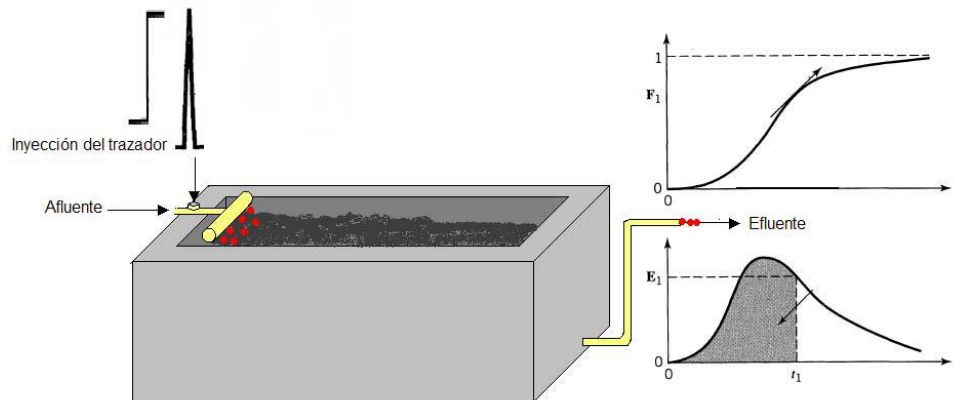


Imagen 5. Esquema del proceso estímulo-respuesta
Fuente: Carlos Sabas, 2011

La precisión en la estimación de parámetros hidráulicos a partir de las curvas de DTR está sujeta a que los datos obtenidos experimentalmente sean representativos del rango completo de una distribución; sin embargo, en la práctica las DTR determinadas experimentalmente serán en mayor o menor grado incompletas debido a problemas de recuperación del trazador utilizado, los límites de detección de los equipos empleados en su medición y factores de tiempo que gobiernan la toma sistemática de datos de campo (Wang y Jawitz, 2006; Kadlec y Wallace, 2009).

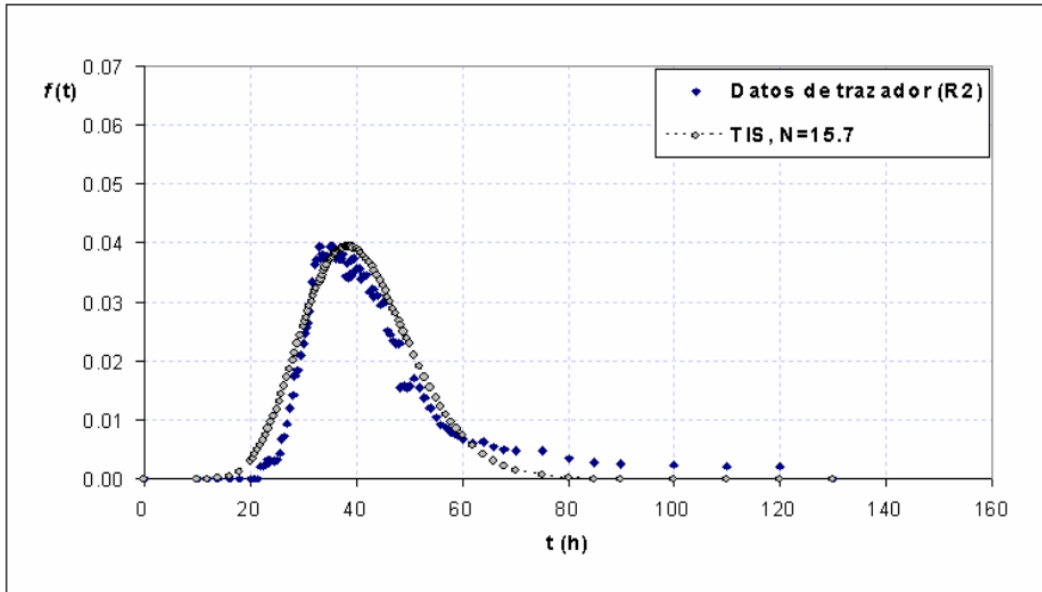


Imagen 6. DTR característica y ajuste de modelo a trazador en HA de Ginebra.
 Fuente: Sandobal & Peña 2007

Dentro del análisis de las curvas de distribución, se tiene el de tendencia de la concentración del trazador para la identificación de zonas muertas, cortocircuitos y tipo de flujo del reactor; estas conclusiones de estados son tomadas en base a los resultados de los tiempos de salida del trazador, en la imagen 7 y la tabla 2, se muestran los parámetros usados para determinar las relaciones en base a las cuales determinar el estado hidrodinámico de los reactores

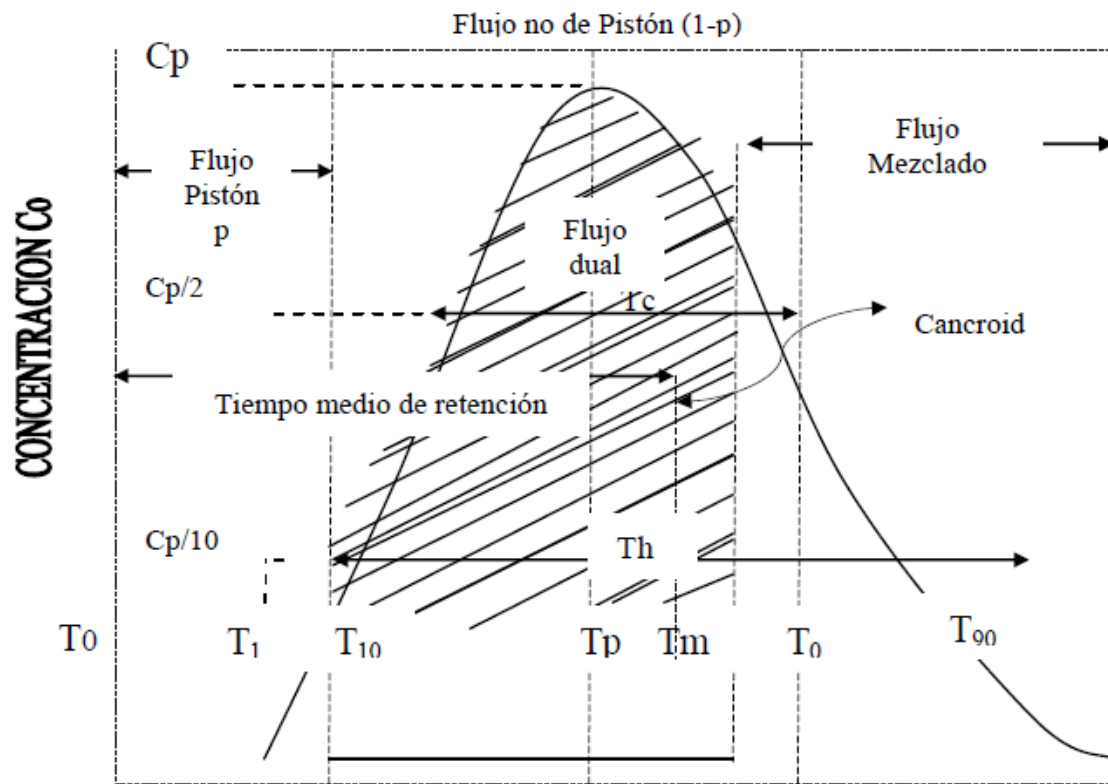


Imagen 7. Curva de distribución del trazador
Fuente: Torres & Much, 2011

Tabla 2. Relaciones en los tiempos experimentales y tiempos teóricos

PARAMETRO	RELACIONES		
T1= Tiempo inicial desde que se aplica el trazador hasta que aparece en el efluente	t_i / t_0	$> 0,3$	Indica cortocircuitos
T10= Tiempo correspondiente al paso del 10% de la cantidad total del trazador.		$= 1$	Flujo pistón
TP= Tiempo modal, correspondiente a la presentación de la máxima concentración.		$= 0$	Flujo mezclado
Tm= Tiempo mediano, correspondiente al paso del 50% de la cantidad total de trazador.	t_m / t_0	< 1	Indica cortocircuitos
T0= Tiempo medio de retención, o tiempo teórico de retención = V/Q.		> 1	Indica zonas muertas
T90= Tiempo correspondiente al paso del 90% de la cantidad total del trazador.	t_p / t_0	≈ 0	Predomina el flujo mezclado
Tf= tiempo que transcurre hasta que atraviesa la totalidad del trazador en el reactor.		≈ 1 y $t/t_0 > 0.5$	Predomina el flujo pistón
Tc= Tiempo en que la concentración es mayor que la mitad de la concentración máxima	t_c / t_0	Para un reactor completamente mezclado esta relación es mayor o igual a 0,693	
Co= concentración inicial	t_{10} / t_0	Para un reactor flujo pistón se aproximará al tiempo de inyección y para flujo mezclado será de orden 2.3	
Cp= Concentración máxima			

Fuente: Autor

4.1.4. Método de Wolf Resnick

El modelo matemático permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón (P), Mezcla completa (M), y zonas muertas (m), que se presentan en la operación normal del reactor a partir de parámetros como θ y $Tan\alpha$.

Flujo de pistón, que podríamos definir como “aquel que existe cuando las láminas líquidas de espesor (dl) que entran al reactor se desplazan paralelas a sí mismas y perpendicularmente en el sentido del flujo, sin mezclarse; por contraposición, el flujo totalmente mezclado es aquel que existe cuando la composición del efluente en cualquier instante es idéntica al de toda la masa líquida.”¹

Las sumatorias de los porcentajes del tipo de flujo siempre deberán ser igual a la unidad, por lo cual el modelo se simplifica en dos partes; cuando existen zonas muertas y cuando no existen zonas muertas. Si se asume que no existen zonas muertas entonces se debe cumplir que el porcentaje flujo pistón más el porcentaje de flujo no pistón es igual a la unidad, tal como se establece en la ecuación 2.

$$P + (1 - p) = 1 \quad \text{Ecuación 2}$$

Cuando hay espacios muertos, si m es la fracción del volumen considerado como espacio muerto, la fracción que no tiene espacios muertos será igual a (1-m) y por lo tanto, la sumatoria estaría dada por:

$$[p(1 - m)] + [(1 - p)(1 - m)] + m = 1 \quad \text{Ecuación 3}$$

¹ Optimización del proceso de floculación y coagulación de la planta potabilizadora de la junta de agua potable de bayas. Calle Leonardo & Zambrano César, Cuenca Ecuador, 2015

El postulado inicial de David Wolf y William Resnick consistía en que si en un reactor se presentaban flujos pistón y no pistos acompañados de zonas muertas, luego la ecuación que describiría un modelo de diseño para este sería:

$$\frac{C}{C_0} = e^{\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left(\frac{1}{t_0} - p(1-m)\right)} \quad \text{Ecuación 4}$$

Si tomamos que la fracción de trazador que ha salido de un reactor a un tiempo (t) está dada por $F(t) = 1 - \frac{C}{C_0}$ entonces reemplazando este valor en la ecuación 4 se tiene que:

$$F(t) = 1 - e^{\frac{1}{(1-p)(1-m)}\left(\frac{1}{t_0} - p(1-m)\right)} \quad \text{Ecuación 5}$$

Tomando logaritmos en ambos lados y reordenando la expresión, queda que:

$$\text{Log}(1 - F(t)) = \frac{\log(e)}{(1-p)(1-m)}\left(\frac{1}{t_0} - p(1-m)\right) \quad \text{Ecuación 6}$$

Esta ecuación corresponde a una línea recta cuya pendiente estaría dada $\text{Tang}(\alpha) = \frac{\log(e)}{(1-p)(1-m)}$, al dividir y multiplicar por p, nos queda:

$$\theta = p(1-m) \quad \text{Ecuación 7}$$

$$\text{Tang}(\alpha) = \frac{0,435p}{\theta(1-p)} \quad \text{Ecuación 8}$$

De la ecuación 7 se obtiene que el porcentaje de flujo pistón que posee un reactor, estado dado por θ y la pendiente $\text{Tang}(\alpha)$.

$$p = \frac{\theta \text{Tang}(\alpha)}{0,435 + \theta \text{Tang}(\alpha)} \quad \text{Ecuación 9}$$

Una manera de obtener a θ y la pendiente $\text{Tang}(\alpha)$ es haciendo uso del método simplificado de Wolf Resnick, el se basa en graficar los valores de t/t_0 y $1-F(t)$ en escalas aritméticas-logarítmicas respectivamente, se traza la línea tangente en el punto donde la curva se empieza a volver vertical. Para trazar la línea tangente en el mejor punto, es necesario evaluar la tendencia lineal de los últimos valores y a partir del coeficiente de correlación, seleccionar el punto en el que verdaderamente empieza a comportarse linealmente la parte final de la curva. Si esta línea empezara antes a volverse vertical el valor de $\tan\alpha$ sería menor porque aumentaría la diferencia entre los puntos de corte ($Y=1$ e $Y=0,1$). Así mismo si se trazara la línea tangente en puntos donde es más evidente la tendencia vertical, el valor de $\tan\alpha$ podría aumentar demasiado, tal como se muestra en la imagen 8. (Wolf & Resnick 1963) (Galvis 1984).

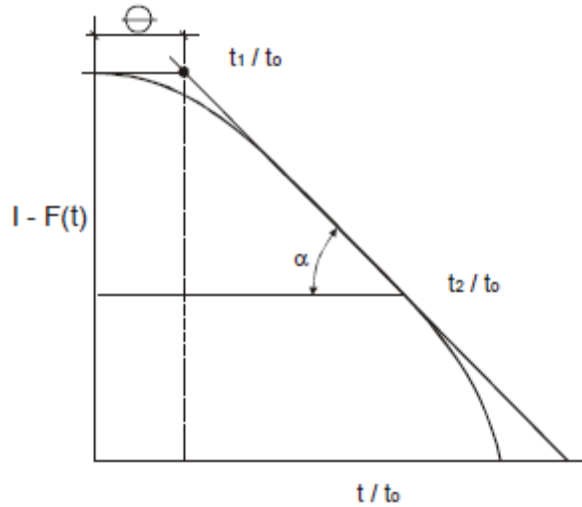


Imagen 8: Curva de $1 - F(t)$
Fuente: CEPIS (2004)

Los valores de θ y $Tang(\alpha)$ se obtienen de la curva con los intersejos de la recta y las horizontales de $1 - F(1) = 1$ y $1 - F(t) = 0,1$

$$\theta = \frac{T_1}{T_0} \quad \text{Ecuación 10}$$

$$Tang(\alpha) = \frac{1}{\frac{T_2 - T_1}{T_0 - T_0}} \quad \text{Ecuación 11}$$

De acuerdo a la ecuación 7, tenemos entonces que el porcentaje de zonas muertas que presenta un reactor se puede deducir mediante la siguiente expresión:

$$m = 1 - \frac{\theta}{p} \quad \text{Ecuación 12}$$

El porcentaje de flujo mezclado (M) se toma como la parte de flujo no pistón que se presenta en el reactor y se deduce mediante la expresión siguiente:

$$M = 1 - p \quad \text{Ecuación 13}$$

4.1.5. Índice de Morril.

El índice de Morril mide mediante una gráfica el tipo de flujo bajo el cual trabaja un reactor; se encuentra al acumular los datos de paso del trazador (en porcentaje) y dibujarlos en papel en las abscisas y en las ordenadas el tiempo en una escala logarítmica, se debe

obtener una línea recta, puesto que el segmento que comprende el paso del 10% y del 90% del trazador es el más representativo en un estudio de trazadores, Morril toma la relación como un indicativo de dispersión de modo que:

$$\text{índice Morril (IM)} = \frac{\text{tiempo de paso del 90\% del trazador}}{\text{tiempo de paso del 10\% del trazador}} \quad \text{Ecuación 14}$$

Si el comportamiento del reactor fuese bajo flujo fuera de pistón, el índice de Morril tomaría un valor de 1 y la curva logarítmica de Morril fuera horizontal, pues el trazador saldría en el tiempo $t=t_0$ y nada saldría antes. En cambio, a medida que hay más proporción de flujo mezclado, se aumenta el Angulo que la curva hace con la horizontal, pues hay una distribución más amplia del tiempo de retención.

4.1.6. Eficiencia Hidráulica

La eficiencia hidráulica representa la habilidad de un reactor para distribuir el flujo uniformemente en su volumen útil, maximizando el tiempo de contacto de los contaminantes en el sistema y optimizando la remoción de los mismos, siendo ampliamente utilizada en evaluación hidrodinámica de reactores (Stamou, 2008).

Es una práctica común establecer la eficiencia hidráulica de un reactor analizando la tendencia de la curva de concentración de trazador y relacionar sus diferentes parámetros con las condiciones de flujo; generalmente, la forma que toma la curva de concentración da una primera indicación del comportamiento hidrodinámico del reactor. A partir de esta curva puede obtenerse la función de distribución del tiempo de residencia conocida como DRT que a su vez permite determinar el TRH real y la aplicación de diferentes modelos matemáticos para analizar el comportamiento del reactor.

Existen diferentes formas para medir la eficiencia hidráulica, inicialmente Thackston et al (1987) aplicaron este concepto en el estudio hidrodinámico para calcular la posición relativa del centroide en la curva DTR, siendo este una medida del tiempo de residencia promedio, lo cual representa el valor real del tiempo de retención. En condiciones ideales,

los tiempos de retención real y teórico deberían ser equivalentes y su determinación corresponde al volumen del sistema y al caudal. Esta eficiencia hidráulica se define como el cociente entre el tiempo de retención actual o real. (Cano, 2010, p. 12).

En muchos reactores se presentan problemas con la eficiencia hidráulica, debido al efecto de los diseños de entrada y de salida; ya sea que estos reactores trabajen a flujo pistón, flujo no ideal o mezcla completa, se pueden presentar casos en que una parte del flujo tiende a tener una velocidad exageradamente mayor en comparación de la masa restante, de modo que su tiempo de retención es casi nulo por presentarse un paso directo, este fenómeno es conocido como CORTOCIRCUITO, en los humedales se cree que este problema es generado por varias razones entre las cuales se encuentran las raíces de las vegetación que al profundizar en los estratos, crean un camino de libre circulación para el agua de modo que esta atraviesa por el medio poroso y por ende tiende a tener una velocidad superior a la que tendría el resto del agua en el reactor; otra razón se debe cuando se tiene en los humedales se configuran los estratos con materiales muy gruesos, de modo que por el tamaño del material se forman espacios tan grandes que al no ser llenados dan libre paso al agua.

Las zonas de mezcla reducida o nulas en el interior de un HA, conocidas como zonas muertas, influyen significativamente en bajas eficiencias hidráulicas (Holland *et al.*, 2004). De la misma manera, los flujos preferenciales causan reducción del tiempo de retención real y por ende afectan la eficiencia hidráulica (Kadlec y Wallace, 2009).

4.1.6.1. Factores que afectan la Eficiencia Hidráulica

Algunas zonas, conocidas como zonas muertas, tienen una relevancia muy grande en la estimación y evaluación de la eficiencia hidráulica, ya que es en esta zona, donde se presenta una reducción en las mezclas, en estas zonas los agentes contaminantes son poco vulnerables al efecto del humedal, disminuyendo así el volumen efectivo y por consecuente la eficiencia hidráulica; a continuación se presentan ítems, contemplados como factores que alteran ya sea de forma positiva o negativa la eficiencia hidráulica.

- Medio filtrante: su incidencia en la eficiencia hidráulica está básicamente dada por la porosidad y la permeabilidad del estrato que compone el medio filtrante, pues son

estos los que determinan la conductividad hidráulica. En estudios realizados sobre este parámetro, se han encontrado que inicialmente los menores diámetros del medio producen mejores eficiencias de remoción, pero con el tiempo se colmatan más fácilmente y representan un colapso hidráulico, por lo cual, se recomienda utilizar grava como medio de soporte (Sabas, 2011).

- Geometría: la relación de la geometría a la eficiencia hidráulica y al tiempo de residencia, radica en la abundancia y la localización del fluido, presentándose en muchos casos flujos preferenciales y en otros estancamientos, siendo ambos, negativos en el desempeño hidrodinámico de un humedal.
- Distribución y recolección del flujo en el humedal: La forma de introducir y recolectar el flujo también afecta la eficiencia hidráulica, es así, como se han desarrollado análisis de las curvas DTR para optimizar las estructuras de entrada y salida con objeto de maximizar dicha eficiencia (Shilton y Prasad, 1996; Suliman et al., 2006b; Stamou, 2008).
- Biomasa en el medio filtrante: esto se ve reflejado en la cantidad de sólidos suspendidos que al momento de pasar por el medio filtrante, producen una colmatación de éste, generando reducciones en la conductividad hidráulica.
- Vegetación: hasta el momento las plantas han sido identificadas dentro de los parámetros favorables a la difusión del fluido; sin embargo dada la complejidad del sistema que compone un humedal, esto es aun objeto de estudio, de modo que se pueda determinar la influencia de éstas tanto de remoción como hidrodinámicas.

4.1.7. Trazadores

Castany y Margat (1977), definen el trazador en carácter específico, como aquella sustancia solidaria en un cuerpo en movimiento, que permite identificar y describir el movimiento de éste; esta sustancia puede estar de forma natural o puede ser incorporada al cuerpo en movimiento.

Los trazadores han sido usados en diversos sistemas de tratamiento biológico para determinar la hidráulica y los patrones de flujo: en reactores anaerobios de flujo ascendente a escala de laboratorio, para evaluar el comportamiento hidráulico en lagunas de estabilización. Un buen trazador debe ser de fácil detección, conservativo e inerte, pero pocos compuestos cumplen con estas características. El aspecto más negativo que se puede encontrar cuando se emplean trazadores en los estudios de determinación de tiempos de residencia, es la pérdida del mismo por infiltraciones o falencias en el sistema. Los colorantes han sido usados como trazadores conservativos, pero varias investigaciones han revelado que estas sustancias pueden ser adsorbidas por sedimentos, por lodo anaerobio, por contacto con grava y por degradación fotoquímica o biológica. (Pérez *et al.*, 2011, p. 58)

En el caso del cloruro de sodio, éste ha sido poco utilizado debido a su presencia y a la variación natural de su concentración en las aguas. El porcentaje de recuperación es un indicador de lo conservativo de un trazador. Aldana & Col (1995) reportaron una recuperación del 80% de cloruro en una investigación en Lagunas de maduración, aunque este dato a primera impresión parezca algo no muy bueno, es necesario aclarar que la no recuperación total del trazador no se debió que la sustancia reaccionara con los elementos del agua de la laguna, sino a una falla en los elementos de impermeabilización de la laguna como tal, pues esta tenía algunos agujeros en la membrana de impermeabilización, permitiendo que el agua se infiltrara y por ende se perdiera trazador en el proceso, aun con ello, los investigadores concluyen su investigación de forma exitosa, abonando que este problema no representó un error ni en el modelo de investigación ni en los resultados obtenidos. Es necesario manifestar también que en la investigación realizada por Aldana & col, muy a pesar que el sistema utiliza o permite el uso de plantaciones, no se reportó ningún dato a cerca de la acción de éstos en el proceso de uso del trazador, por lo que no se tiene certeza si las plantas pudieron haber tenido algún participación en cuanto a la pérdida del trazador, por lo que es necesario tener en cuenta este detalle al momento de usar la sal como trazador en presencia de plantaciones y verificar como altera las mediciones de la distribución de los tiempos de residencia al momento de emplearlo en el caso en que la plantación manifieste absorción del trazador.

Basados en unos estudios realizados alrededor de los años 80's en Europa, algunos investigadores propusieron que las raíces de las plantas alteraban considerablemente la conductividad del agua, pues al incrustarse las raíces sobre los lechos del humedal, abrían senderos por donde el agua fluía más libremente, en estudios recientes, se manifestó que en efecto las raíces tiene un efecto negativo sobre la conductividad hidráulica, influenciando de forma directa el TRH y aportando a la formación de zonas muertas; pero, puesto que las plantas juegan un papel importante en la degradación de contaminantes, se sugiere usar plantaciones que no se arraiguen tan profundamente en los estratos de los humedales, pues entre más profundas estén las raíces en los estrato, más es la incidencia en el comportamiento hidráulico negativo (Jorge *et al.*, 2000, De Shon *et al.*, 1995, Sanford *et al.*, 1995a y 1995b, Breen y Polluelo, 1995).

Existen experiencias con NaCl (Schmid *et al.*, 2004), Rodamina WT (RWT) (Shilton y Prasad, 1996; Stern *et al.*, 2001; Holland *et al.*, 2004), Bromuro de Potasio (KBr) (García *et al.*, 2004), Cloruro de Litio (LiCl) (King *et al.*, 1997), sustancias radioactivas (Harden *et al.*, 2003) y más recientemente bio trazadores (Hodgson *et al.*, 2004).

Las sales tienden a incrementar la densidad del fluido en proporción a la cantidad de sal disuelta, y si se aplican en altas concentraciones tienden a irse al fondo ocasionando menor recuperación del trazador y así las curvas DTR generadas a partir de esta información pueden presentar grandes distorsiones respecto al comportamiento real. (Kadlec & Wallace, 2009).

Como trazadores para llevar a cabo análisis hidrodinámicos a través de la DTR, se pueden utilizar: colorantes, ácidos, bases, sales, isótopos radiactivos, entre otros (Kadlec y Wallace, 2009). La forma de analizarlos en el flujo de salida, dependerá del tipo de trazador utilizado, haciendo de métodos y equipos para determinar la absorbancia, pH, conductividad eléctrica, fluorescencia, etc. Existen experiencias con NaCl (Schmid *et al.*, 2004), Cloruro de Litio (LiCl) (King *et al.*, 1997

La forma de ingreso del trazador en el fluido se conoce como inyección; existen dos métodos de inyección conocidos como método de inyección continua y método de inyección de integración; ambos métodos conducen a buenos resultados solamente

discrepan en su forma de aplicación y la cantidad de trazador usado. El procedimiento de la inyección continua se usa regularmente en flujos lentos, exige el empleo de una bomba peristáltica dosificadora con la capacidad de inyectar en el fluido el trazador a caudal constante, el trazador a verter debe ser diluido y preparado en sitio; el método de inyección de integración se basa en verter el trazador de “una sola vez” o en un tiempo corto, este método es recomendable siempre que se tenga un caudal elevado, no es aconsejable en caudales menores a 1l/s (Morales et al., 1989)

Para el cálculo de la cantidad de sustancia trazadora (sal) a usar, se partirá de la necesidad que la concentración del volumen de masa de agua con trazador, debe ser mayor que la concentración inicial del agua contenida en el humedal; En la dosificación instantánea la concentración C_0 que se escoja debe ser tal que se pueda determinar con facilidad en el agua, en la ecuación 2. Se muestra un modelo que permite calcular el peso de material trazador a usar de acuerdo al volumen sobre el cual se va a suministrar y una concentración inicial.

$$P = VKC_0 \quad \text{Ecuación 15.}$$

Dónde:

P= Peso del Cloruro de Sodio (kg)

K= factor de corrección para Cloruros = 1.659

C_0 = Concentración inicial del trazador

4.2. Marco Legal

En contraste a la situación actual sobre los vertimientos de aguas provenientes de los sistemas de alcantarillados de las poblaciones y la poca infraestructura existente para el tratamiento de estas aguas.

Una de los mayores efectos ambientales son los causados por la gran carga de contaminantes generados en el sector industrial, los cuales se aumentan a medida que una empresa aumenta su tasa de producción; esto no solo es aplicable al sector industrial sino también al crecimiento poblacional, a medida que se desarrolla una población, la carga de contaminantes crece con ella. Con el fin de disminuir estas tasas de contaminación y preservar el crecimiento económico, los países han apuntado a mecanismos de control

enfanzados en restricciones, penalizaciones y multas, imposiciones de valores de vertimientos y calidad mínima del volumen a verter. En Colombia existe el reglamento de Acueducto y saneamiento (RAS) en el cual se plasman algunas consideraciones a tener presentes al momento de diseñar un sistema de alcantarillado, plantas de tratamientos y las condiciones bajo las cuales se debería hacer el vertimiento o disposición final de las aguas tratadas. En conjunto a lo anterior se determina también una tasa retributiva para el control de la contaminación causada por quien o quienes usen las aguas del país como lugar donde disponer sus aguas residuales; esta tasa está contemplada en la ley 901 de 1997.

El documento CONPES 3177 del 15 de julio de 2002, por el cual se establecieron los lineamientos y se definieron las acciones prioritarias para elaborar el PLAN NACIONAL DE MANEJO DE AGUAS RESIDUALES – PMAR, constituye la guía para el desarrollo de las actividades municipales y regionales dirigidas a la adecuada planeación, formulación, ejecución y seguimiento del manejo de las aguas residuales, sean de origen industrial, agrícola, pecuario, o doméstico. El decreto 1594 el año 1984 determina los parámetros de calidad mínimos que se deben cumplir al momento de efectuar el vertimiento de aguas servidas a una fuente hídrica, dentro de estos parámetros de calidad encontramos la remoción de materia orgánica, nitrógeno, fósforo y material suspendido, cuya remoción está directamente ligada al tiempo de eclosión de las aguas a tratar en el sistema depurador. En el reglamento técnico de agua potable y saneamiento (RAS 2000) en el título E, se fijan algunos criterios básicos y requisitos mínimos que deben ser tenidos presentes al momento del diseño de un sistema de tratamiento de aguas residuales.

Muy a pesar que los sistemas de humedales artificiales son de poco uso como sistemas de tratamiento en el territorio nacional, el reglamento técnico en su numeral E.3.5.3 fija algunas especificaciones para quienes quieran implementar dicho sistema teniendo en consideración especial el sector hidráulico contemplado en la conductividad hidráulica que debe poseer los materiales que componen el sistema, la granulometría y la condición de flujo bajo el cual se aconseja la implementación de dicho sistema

4.3. Antecedentes.

Los datos históricos que registran el uso de humedales artificiales e investigaciones sobre sus características de operación, data desde el año 1960. La primera investigación sobre la posibilidad de tratar aguas residuales en plantas de humedales fueron realizadas por el Dr. Seidel en 1952 en el Instituto Max Planck de Plön, Alemania (Seidel, 1965). Desde entonces se han adelantado estudios sobre optimización, modelación y la medición de eficiencia de los humedales artificiales, como alternativa de tratamiento de aguas residuales tanto domesticas como industriales. (Von Münch, 2009)

Los humedales han sido implementados desde entonces por una gran cantidad de países como una forma eficiente y económica de tratamiento de las aguas residuales residenciales, la utilización de los tipos de humedales varían de acuerdo a cada país y a las situaciones endémicas del lugar donde éste se va a implementar.



Imagen 9. HA FS en construcción en Bayawan, Filipinas
(Fuente: J. Boorsma, 2009)

En Colombia los humedales artificiales representan un sistema atractivo en la ingeniería moderna, pues muchos de los estudios realizados para el tratamiento de aguas residuales residenciales y la disminución de contaminación en los cauces de ríos, el centro de investigaciones de tecnología (CUC) construyó un HA de flujo horizontal para verificar la eficiencia y las ventajas de este sistema en las condiciones climáticas propias de los trópicos, proponiendo luego el sistema como opción para el tratamiento de las aguas residuales en los municipios de la costa colombiana, el HA fue construido en un área de 8 m² con implantaciones de *Typha* sp. Por ser especies nativas de la región, dentro de los resultados obtenidos, se encontró que el tiempo de retención hidráulico fue de 6 días

En la Universidad de Cartagena sede Piedra de Bolívar entre los meses de septiembre del año 2010 y Febrero del 2011 se implementaron dos humedales artificiales, uno vertical y otro horizontal para el tratamiento de aguas residuales, sin embargo, fueron diseñados utilizando flujo pistón. El problema en este sentido radica en que el diseño asume una remoción de DBO, resumiendo todos los procesos (físicos, químicos y biológicos) en solo

parámetro; la constante de reacción de primer orden, esto hace que los resultados experimentales al final del estudio difieran respecto a los asumidos teóricamente. (Ardila & Ramos, 2011, p. 4)

La investigación que dio como resultado el diseño del humedal que será usado fue realizada dentro del proyecto “Evaluación de un humedal artificial vertical, para la remoción de materia orgánica”, liderada por el grupo de investigación GIMA de la facultad de ingeniería de la Universidad de Cartagena, en el cual se buscaba determinar los procesos internos relacionados con el transporte de nutrientes en un medio parcialmente saturado.

Las investigaciones presentadas sobre HA en la Universidad de Cartagena han sido enfocadas a la optimización del sistema desde el punto de vista de remoción de contaminantes, midiendo DBO₅, remoción de fósforo y nitrógeno, dentro de estas investigaciones, se han realizado estimados para los tiempos de residencias, tomando como dato de base tres días (Delia Curiel. 2011, Quiñones Edgar, Simancas & Herrero).

Hasta hoy, el grupo GIMA desarrolla investigaciones sobre eficiencia en humedales verticales, cuya investigación actual se basa en la hipótesis de poder usar mangle rojo como vegetación para la optimización de remoción de materia orgánica y contaminantes.

4.4. Estado del Arte

Existe una significativa fuente de datos sobre estudios realizados en base a la caracterización hidrodinámica de sistemas de humedales, optimización de humedales y modelación de tiempos de retención hidráulica; pese a que la mayoría de las investigaciones encontradas en las bases de datos pertenecen a estudios sobre humedales de flujo horizontal, en los últimos años se ha acrecentado las investigaciones sobre modelaciones y optimización del sistema vertical como una mejora al sistema clásico horizontal.

Vymazal, Kadlec y Peng *et al* 2009. En sus investigaciones sobre la eficiencia de los humedales artificiales en los años 2007, 2008 y 2014 respectivamente, concluyen que éstos pueden eliminar fácilmente tanto los sólidos en suspensión como los contaminantes

orgánicos y los nutrientes de las aguas residuales, representándose a sí como un sistema sustituto de las plantas de tratamientos clásicas de sistemas de alcantarillados

Chazarenc *et al.* (2003) observaron una reducción del número de tanques en serie (NTIS) en un sistema HF plantado debido a la alta evapotranspiración (13-40% del flujo de entrada). Seeger *et al.* (2013) notaron diferente comportamiento hidráulico entre plantada (NTIS 11.3) y sin plantar (NTIS 4.6) los humedales de alta frecuencia, que daría lugar a un efecto negativo de las plantas, de la mezcla de los humedales. Kadlec y Wallace (2009) , así como Rash y Liehr (1999) estado que pueden existir vías preferentes de flujo por debajo de la zona de raíces en sistemas HF plantados. Esto puede ocurrir en los humedales de flujo vertical insaturados así, y podría resultar en una reducción de la eficiencia hidráulica y la mezcla.(Boog *et al.* 20014, p. 23) ²

Prochaska (2007) en su estudio sobre la eficiencia de los humedales verticales, analiza la afección de los sustratos y de la carga hidráulica y concluye que la carga hidráulica y las condiciones climáticas tienen un efecto significativo sobre la eliminación de material. La carga hidráulica reducido aplicado produjo valores medios inferiores de concentración de efluente, debido al mayor tiempo de retención en este caso.

Platzer, *et al.* (2007), determinó mediante experiencias con aguas residuales pre tratadas que la carga hidráulica para humedales de flujo vertical (HFV) en el climas fríos no debe superar los 100-120 mm/d teniendo que el factor clave en climas cálidos se encuentra en dimensionar con la disponibilidad de oxígeno.

Investigaciones hechas en sistemas sin plantas, con baja y alta presencia de sólidos en el agua residual afluente, encontraron, que se ocasiona una colmatación del medio poroso debido a la proliferación de biomasa en los intersticios, produciendo una reducción de la porosidad útil que representa disminuciones en los tiempos de detención hidráulico (TDH) reales entre un 10- 20% para baja presencia de sólidos, y entre 50-60% para alta concentración de sólidos (Tanner y Sukias, 1995; Suliman *et al.*, 2006). Estos resultados

² La traducción de la información fue propia por parte del investigador

también han sido documentados en filtros anaerobios, reportando similares disminuciones en el TDH real respecto al TDH teórico (Sabas, 2011, p. 3)

Ngo Thuy et al. (2009), sostienen que las cargas hidráulicas y los tiempos de retención son de gran relevancia en los procesos de depuración de las aguas, concluyendo que a medida que tenemos bajas cargas hidráulicas, los tiempos de retención se hacen elevados, de modo que si se tiene una gran carga hidráulica, el tiempo de retención puede ser tal que el tiempo de contacto entre el agua y los microorganismos del humedal encargados de la degradación sea tan bajo que no garantice el tratamiento efectivo del líquido.

En cuanto al papel de las plantas, se observa que en los ensayos con mayor carga hidráulica disminuyó la eliminación tanto del nitrógeno como del fósforo; este hecho se agudiza más en los humedales carentes de vegetación, llegando incluso a caer hasta una tercera parte de la eliminación obtenida en humedales plantados para idéntica carga hidráulica (Tanner et al., 1994). Algunos estudios han tratado de cuantificar el máximo de carga hidráulica soportable por un humedal hasta que su rendimiento se ve comprometido (Azcoitia, et al., 2012, p. 41).

Con el desarrollo de las investigaciones, surgieron los ajustes de los diseños a modelos matemáticos que estimaban de forma aproximada el comportamiento de las características dinámicas e hidráulicas de los humedales, inicialmente se proponen diseños de ecuaciones simples basadas en el comportamiento de un flujo a pistón modelado a ecuaciones de primer orden, hasta que en el año 2007 fueron publicadas por Sandoval et al. 2008, las limitaciones de estos modelos, quienes desde este momento, se adelantan investigaciones sobre una nueva metodología de simulación matemática, optando por un flujo con características estacionarias, unas características invariables de remoción de primer orden y un patrón de flujo ideal a pistón para predecir las remociones de materia orgánica en un humedal. (Ardila et al., 2011)

Con el avance de investigaciones sobre las modelaciones matemáticas y sobre las deficiencias de estos al momento de compararlos a datos reales experimentales, surgen nuevos modelos como el k-c diseñado por Kadlec y Knight 2009, este modelo incorpora un nuevo parámetro asociado a la generación de materia orgánica dentro del humedal bajo la

concepción de tanto la materia orgánica como la materia vegetal se descomponen (Ardila et al., 2011).

Un estudio con trazadores en un humedal artificial con diferentes materiales de filtración y diferentes secciones largo-ancho 1:1, 1.5:1 y 2:1 fue llevado a cabo para evaluar la eficiencia de los sistemas en relación a las secciones geométricas de los reactores. El estudio utilizó modelos de flujo no ideal como el flujo de pistón con dispersión y tanques de reactores completamente en serie (García et al., 2004). Los reactores completamente mezclados en serie (CSTRs) presenta mayor precisión en los datos cuando se compara con el modelo flujo pistón de dispersión (García et al., 2004). La principal conclusión de su estudio fue que la construcción de un humedal artificial de alta frecuencia con una longitud mayor que su anchura y medio más fino mejora el comportamiento hidráulico del sistema y reduce la dispersión interna. (Ardila & Ramos, 2011)

A nivel nacional la implementación de los humedales ha sido un avance importante en las evaluaciones hechas a los sistemas de tratamientos de aguas domésticas y en el tratamiento de afluentes naturales.

Rodríguez & Ospina hacia el año 2005 adelantaron investigaciones sobre la capacidad de reducción de compuestos orgánicos e inorgánicos en un humedal de flujo vertical a escala piloto, como mecanismo para la mejorar la calidad del agua del río Bogotá. Los resultados que se obtuvieron permitieron determinar reducciones de DBO = 37%, DQO = 10%, CT = 49%, ST = 16%, SST = 27% , NO₂ = 83%, NO₃ = 30% De lo anterior se concluye que a escala laboratorio el humedal artificial de flujo vertical mejora la calidad del agua del río Bogotá a la altura del campus “Río Grande” en Cajica.

5. METODOLOGÍA

Este proyecto se desarrolló bajo el contexto de una investigación de tipo mixta (descriptiva y experimental). La primera comprende la descripción, el registro, análisis e interpretación del comportamiento del humedal frente a situaciones variables (caudales y vegetación).

Las variables presentes en este estudio corresponden a los sustratos, los caudales, la vegetación, entrada del flujo, tipo de trazador, espesores y tipos del medio filtrante, los cuales fueron se mantuvieron en condiciones controladas con características fijas, de las cuales se harán mención más adelante; la variable dependiente de respuesta para este estudio, corresponde la distribución del TRH, cuyo comportamiento depende de la configuración que se le dé al humedal (caudal, vegetación, sustratos, temperatura, condiciones climáticas) y que fue el objeto de estudio en para esta investigación. Una variable que se mantuvo como no controlada aun cuando se le hizo seguimientos fueron las condiciones climáticas y de temperatura, las cuales influyen de forma directa en la evaporación o a la contribución de aguas al humedal y por consiguiente en la alteración del TRH, se trató por tanto de efectuar los ensayos realizados bajo los mínimo criterios de control para no tener alteraciones bruscas, tales como la protección de los reactores ante las precipitaciones y la radiación solar directa, la relación de variables dependientes, de respuesta y as no controladas se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Variables consideradas en la investigación.

Variables no controladas	Variables controladas	Variable respuesta
<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura • pH • Precipitaciones 	<ul style="list-style-type: none"> • Sustratos • Flujo • Trazador • Presencia de Biomasa • Calidad del agua • Configuración de medio filtrante 	<p>Concentración en el tiempo para construcción de curvas DTR, a partir de las cuales obtener indicadores del desempeño hidrodinámico</p>

La investigación experimental se presenta mediante los ensayos de mediciones de tiempos de residencia hidráulica y de la determinación de las curvas de retención hidráulica, con el fin de describir de qué modo o por qué causa se produce una situación o acontecimiento particular y llegar a una hipótesis general sobre ello.

En el desarrollo de esta investigación, se realizaron ensayos con trazadores, usando como trazador sal común de mesa (NaCl) debido a las limitaciones de adquisición de equipos, estos ensayos fueron realizados con el objeto de obtener las curvas de distribución de tiempos de residencia de un humedal artificial de flujo vertical (DTR en HA-FV), basándose en la medición de la conductancia del fluido efluente cuando es inyectado un pulso conocido de trazador con una concentración conocida. Puesto que la conductividad del agua puede ser alterada por múltiples condiciones de reacciones que se puedan presentar en ella, todos los ensayos fueron realizados con agua potable y con sustratos de tipo calcáreo que garantizaran mínimas posibilidades de reacciones internas en los reactores.

Los pasos seguidos para la ejecución de este estudio se presenta en el gráfico 1.

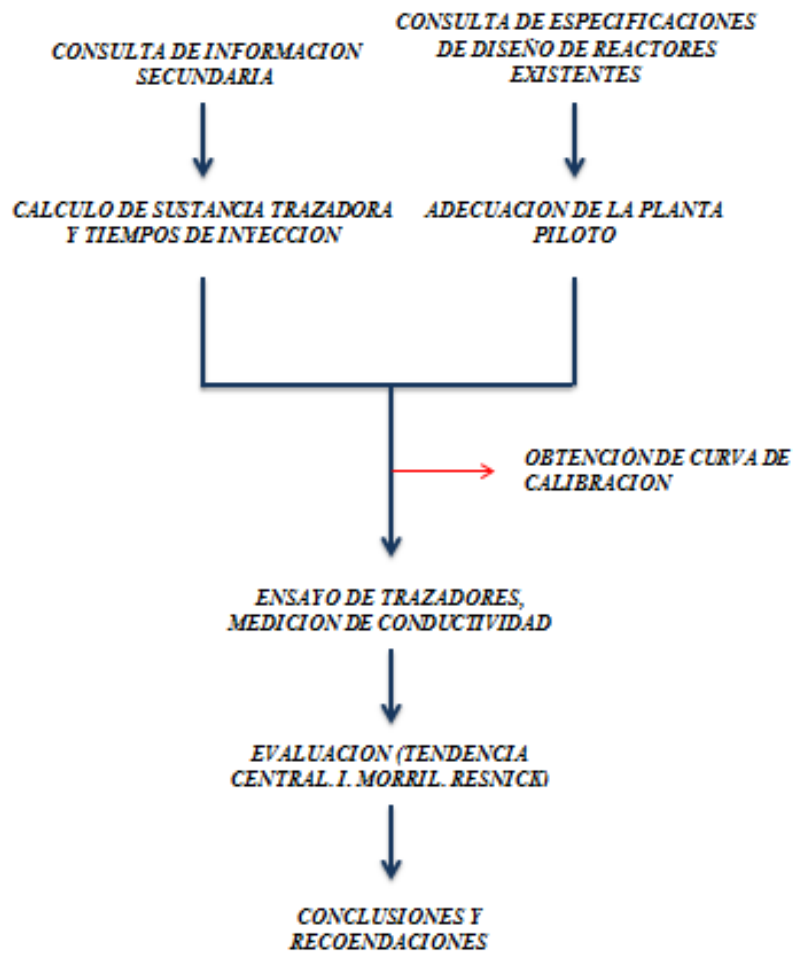


Grafico 1. Esquema de Metodología seguida

5.1. Localización

La planta experimental, objeto de este estudio durante la realización de este trabajo, se encuentra situada a la margen izquierda de la entrada a la sede piedra de Bolívar de la Universidad de Cartagena en Colombia, en las coordenadas 10.24°,11',20" al norte y 75°30'20.09" al este, haciendo uso de aproximadamente 16 m² de los terrenos de la universidad.



Imagen 10. Localización del Humedal Artificial.
Fuente: Google Earth

La localización geográfica corresponde a un clima típicamente tropical seco, caracterizado por altas temperaturas en tiempos de verano promediadas en aproximadamente $36.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ y temperaturas medias que varían entre $19\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $25.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ en tiempos de invierno, con escasas oscilaciones térmicas en el día, presenta altas precipitaciones en las temporadas de lluvias correspondientes a los meses de agosto a noviembre, con precipitaciones leves en los meses comprendidos entre abril y julio. (Centro de investigación oceanográfica e hidrográfica, Colombia.).

5.2. Descripción de la planta.

La planta a describir fue el resultado de la investigación “Determinación de la eficiencia de una Planta Piloto de Humedal de Flujo Vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas” (Simancas Páez & Herrera Romero, 2011), que consistió en el diseño y construcción de la planta piloto y posterior evaluación de la eficiencia de la misma.

El sistema de tratamiento de las descargas del campus universitario está conformado por un tanque de almacenamiento, un tanque séptico, un humedal artificial de flujo vertical y una unidad de referencia implementada o blanco de comparación que no contenía vegetación.

La flora utilizada en el humedal es *Typha Latifolia* y el medio filtrante de las tres unidades de tratamiento consta de dos capas de grava y una de tierra negra. (Curiel & Palomino, 2011, p. 67), tal como se muestra en la Imagen 11.

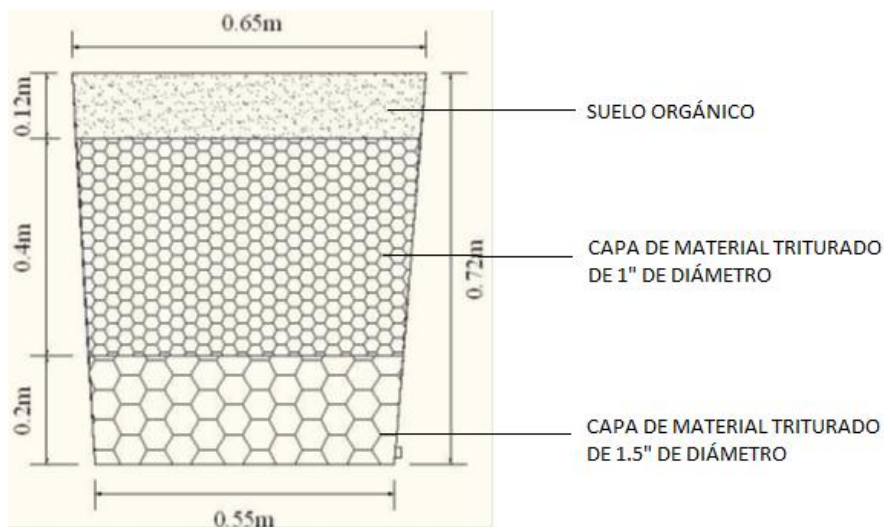


Imagen 11. Dimensiones y estratos del Humedal Artificial (HA) usado en el experimento
Fuente: Ardila & Ramos (2011)

El tanque de almacenamiento, cuenta con una capacidad de 1000 litros, y es el encargado de recibir y almacenar el agua a tratar proveniente de un registro sanitario utilizando una bomba sumergible, que corresponde al diseño original del sistema para el tratamiento de aguas cloacales. Para este estudio no se hizo uso del sistema de abastecimiento de agua desde el registro sanitario sino directamente de las redes de agua potable. Antes del llenado del tanque fue necesario realizar el lavado y la desinfección del mismo para borrar rastros de salinidad que pudiese haber tenido el tanque.

El tanque séptico, diseñado para recibir las descargas producidas por 2 o 4 personas y retenerlas por un (1) día, es un tanque Imhoff ovoide, con una capacidad de 1000 litros, el tiempo de limpieza del tanque se realiza entre medio (0.5) año y un (1) año o en el tiempo en que la altura de lodos sea igual a un tercio de la altura del tanque, en este tanque se realiza la sedimentación primaria y una breve descomposición bacteriana.

El humedal artificial de flujo vertical fue diseñado como un tratamiento secundario a las aguas provenientes del tanque séptico, consta de dos tanques de 60 cm de diámetro y un

metro de profundidad; el estrato filtrante consta de tres (3) capas siendo la superficial un estrato orgánico, el estrato intermedio un estrato de gravas de 1" de diámetro, y el estrato final o profundo, una capa de grava de una pulgada y media 1.5", tal como se muestra en la Imagen 11.

El proceso de tratamiento y/o medición, comienza con el direccionamiento del flujo desde tuberías de ½", transportadas a gravedad desde el tanque de almacenamiento hasta el tanque séptico, donde de tratarse de aguas residuales tendría que cumplirse un tiempo de retención de un día; pero dado que el fluido a manejar es agua limpia potable, no se hará el tiempo de residencia en éste. Del almacenaje en el tanque séptico, el fluido es transportado hasta el humedal por una serie de tuberías ramificadas que distribuyan el flujo en las celdas del humedal. Cada ramificación termina en una tubería en forma de espina de pescado con orificios sobre la superficie del lecho filtrante para una mejor distribución del flujo. Las aguas infiltradas por el humedal y con las cuales se tomaron las curvas de distribución hidráulica, pasarán del humedal a un tanque colector y de éste último hasta un registro sanitario donde se hará la disposición final de las aguas (ver Imagen 12).

Para controlar el caudal de entrada a las celdas, fue necesaria la realización de aforos en la red por medio del ajuste de las válvulas de globo y de cierre rápido que se encuentran a la entrada y a la salida de cada unidad de tratamiento, así como establecer la altura de la columna de agua que se debía tener al suministrar cada uno de los pulsos y que se apreciaba a través de mangueras instaladas en el fondo de los tanques que funcionan por el principio de vasos comunicantes.



Imagen 12. Esquema de procesos usados en medición en planta piloto
Fuente: Autor

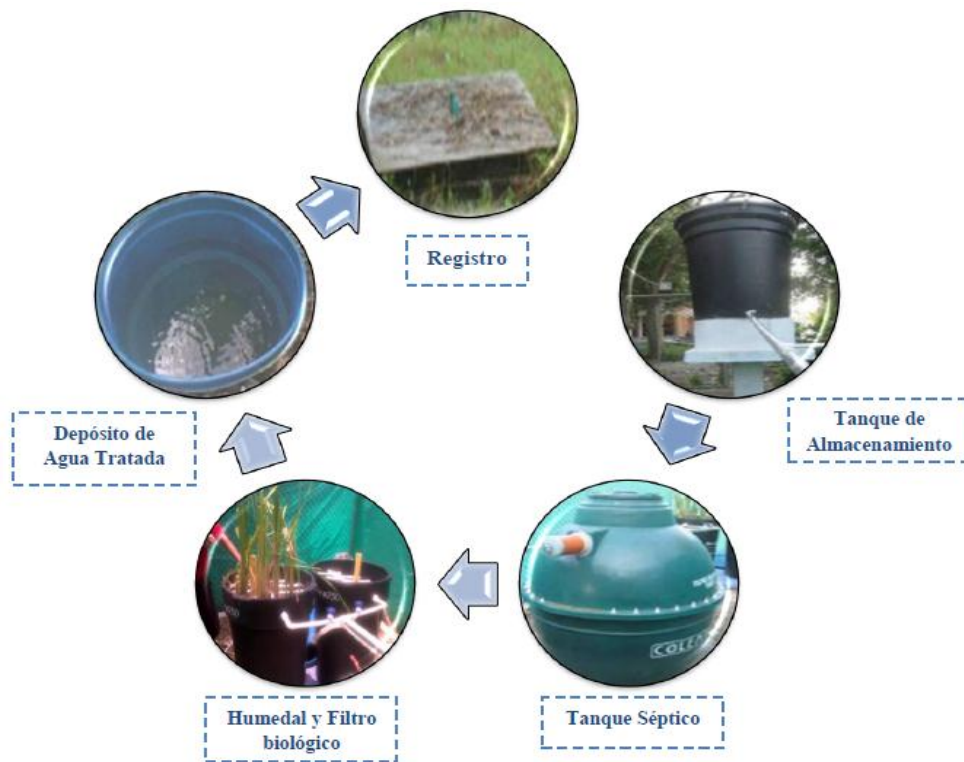


Imagen 12. Sistema de tratamiento y medición en planta piloto
Fuente: Curiel Delia, 2011

5.3.Recolección de Datos.

En la ejecución de esta investigación fue necesario identificar algunas variables que aunque son independientes a los ensayos realizados, son necesarias para dar un mejor enfoque a los resultados obtenidos, dichas variables se tomaron del estudio de investigación Evaluación de la eficiencia con el sistema de humedal de flujo vertical de una planta piloto para el tratamiento de aguas residuales domésticas (Herrera & Simancas, 2010), en el cual se midieron las características de los estratos a usar en el humedal estudiado, estos datos corresponden a: porosidad (n), conductividad hidráulica (k), humedad (w), granulometría, límites de Atterberg, gravedad específica (Gs), y coeficiente de permeabilidad, estos datos por ser propios del humedal estudiado, fueron impuestos tal cual lo estipularon los autores de la anterior investigación en mención al momento del diseño del reactor, en la Tabla 4 se presentan las características de los estratos con los cuales fue diseñado el humedal Artificial (HA) y los cuales se realizó la adecuación de los reactores al momento de cambiar los sustratos que poseía.

Tabla 4: características de los sustratos

Estrato	Kzz / Khh	Sat. khh	Ss	Porosidad
Grava 1.5"	1	174.93	4.96E-5	0.08
Grava 1"	1	105.76	4.99E-5	0.089
Suelo Orgánico	1	2,9	0.049	0.51

Fuente: Ardila & Ramos, 2011

La información sobre las investigaciones relacionadas al uso del trazador empleadas, se tomaron de tesis y artículos científicos encontrados en bases de datos universitarias, lo cual fue útil como un soporte secundario para la correcta implementación de la metodología de trazadores y la correcta forma de realizar las evaluaciones con los datos obtenidos en los ensayos de trazadores. Las técnicas empleadas para la recolección de datos tanto primarios como secundarios, se basaron en la observación, la medición y el análisis de documentos.

5.4. Generalidades del estudio

El estudio fue realizado con tres reactores, dos con vegetación y otro como un filtro biológico; la vegetación usada fue mangle rojo y enea. En cada reactor se efectuaron 3 mediciones, una medición por caudal o modo de ingreso de afluente, con lo cual se obtuvieron datos de tres experiencias a caudales diferentes y formas de ingreso de caudales diferentes; con estos datos se construyeron curvas de DTR tal cómo se mostrará más adelante.

La evaluación de los tiempos de retención hidráulica se realizó bajo la condición de flujo por pulsos y flujo continuo; para esto se tomaron datos de los caudales de estudio de investigaciones realizadas por Curiel & Palomino (2012) y Ardila & Ramos (2011), los cuales estudiaron la remoción y la optimización de remociones de los reactores mediante la evaluación de la eficiencia que presentaban los reactores al cambiar los caudales y los tiempos de retención, los datos tomados se especifican en la Tabla 5 y 6

Tabla 5. Parámetros del diseño original del Humedal Artificial estudiado

Tiempo de retención (t)	1.28 días
Concentración de DBO del Afluente (C_0)	210 mg DBO/L
Concentración de DBO del Efluente (C_e)	42 mg DBO/L
Constante de Remoción de DBO (K_T)	1.897 d ⁻¹
Constante de Remoción de DBO para T=20 °C (K_{20})	1.1 d ⁻¹
Θ	1.056
Temperatura (T)	30 °C
Caudal (Q)	72 L/d
Área Superficial (A_s)	0.32 m ²
Profundidad del Lecho Filtrante (d)	0.8 m
Porosidad del Lecho Filtrante (α)	0.36

Fuente: Ardila & Ramos, 2011

Tabla 6. Caudales calculados para cada TRH asumido

Tiempo de retención (t)	Caudal (L/día)	
	Humedal	Filtro biológico
2 días	46.080	46.080
3 días	30.720	30.720
4 días	23.040	23.040

Fuente: Curiel & Palomino, 2012

Es de conocimiento que los humedales FV usualmente trabajan como reactor por lotes, pero en esta investigación, las mediciones fueron realizadas bajo el régimen de ingreso por pulsos y flujo continuo, para el caso del ingreso por pulsos, se ingresaron a los reactores volúmenes de agua en intervalos iguales de tiempo para estudiar el comportamiento de los reactores ante el ingreso intermitente del afluente y estudiar a su vez el comportamiento de las plantaciones usadas. Para las experiencias realizadas se tomaron tres caudales de los anteriormente descritos en las tablas 5 y 6. El reactor sin vegetación se tomó como un testigo en las experiencias con el cual se pudo determinar la acción positiva o negativa que ejercen el tipo de vegetación estudiada sobre los tiempos de retención y sobre las características hidrodinámicas en los reactores.

Los estudios fueron realizados mediante tres ensayos a cada reactor, donde se evaluó el comportamiento de éstos de acuerdo al modo de ingreso de los caudales; inicialmente se efectuó un ensayo para un tiempo teórico de retención de 1,28 días durante el cual el afluente se ingresó mediante pulsos de 7,17 litros cada tres horas; agotado el tiempo del ensayo (tres días), se varió el tiempo teórico de retención a dos días, manteniendo la forma de ingreso del caudal (pulsos); para este caso, fueron ingresados al reactor pulsos de 4,6 litros cada tres horas. Para el último caso de estudio, se mantuvo el tiempo de retención teórico de dos días variando la condición de entrada del afluente, esta experiencia fue realizada bajo la condición de flujo continuo en un caudal de 36.77 litros por día; inicialmente esta última experiencia fue esbozada para realizarse con un tiempo teórico de tres días y un caudal de ingreso continuo de 24.5 días, pero se presentaron dificultades para

mantener este caudal puesto que las válvulas con las que cuentan las redes del sistema no controlaban un caudal tan pequeño, por lo cual el tiempo de retención teórica fue cambiado a dos días. Los datos de ingreso de afluente correspondiente a estos se estudios, se muestran en las tablas 7 y 9.

5.5. Análisis y determinación de escenarios

Posterior al estudio de la conformación de la planta piloto y de los procesos que en ella se ejecutan, al igual que los medios mediante los cuales se llevan a cabo dichos procesos, se estudiaron los resultados de las anteriores investigaciones realizadas en la planta piloto del HA, realizadas por Simancas & Herrera (2010), Ardila & Ramos (2011), Curiel & Palomino (2012), Caballero & Osorio (2015) en las cuales se establecen los parámetros usados en este proyecto, los cuales fueron descritos anteriormente, tales como clase y espesor de estratos, porosidad, conductividad hidráulica, geometría de los reactores y tipo de flujo.

Tomando los datos sobre tipo de vegetación, sustratos, caudales y tiempos teóricos de retención de los estudios realizados por los autores anteriormente mencionados, se establecieron los escenarios bajo los cuales se efectuaron las mediciones de los tiempos de retención hidráulica, tales escenarios corresponden al tipo de plantación a usar y los caudales a tener en cuenta. La vegetación escogida para este caso corresponde a la usada por Curiel & Palomino, los cuales estudiaron la acción depuradora de la Typha (Enea); y la flora escogida por Caballero & Osorio, quienes estudiaron la remoción que se puede obtener al usar mangle rojo en un HA-FV.

Los caudales con los cuales se realizó el estudio corresponden al calculado mediante el despeje de la Ecuación 1, para lo cual fue necesario el cálculo previo del volumen del reactor.

$$V = A * d * n \qquad \text{Ecuación 16}$$

Donde V (en m³) corresponde al volumen efectivo del reactor, d (en m) es la profundidad de los estratos, A representa el área superficial (en m²) y n corresponde a la porosidad.

En función a la ecuación 16, y tomando los datos usados por Ardila y Ramos, tal como se muestra en la Tabla 4, el volumen que corresponde al reactor es de 0.08294 m³ (82,94 L). Dado que el volumen calculado se hizo en función de un área superficial que no es del todo precisa por tener los reactores una forma cónica y no cuadrada o circular, fue necesario recalcular el volumen efectivo del reactor para tener plena certidumbre del volumen efectivo del reactor. La ecuación 17 y 18 representan el cálculo del volumen de un recipiente con forma de tronco de cono que representa la forma real de los reactores estudiados.

$$Ve = V * n \quad \text{Ecuación 17}$$

$$V = \frac{1}{3}\pi d(R^2 + r^2 + Rr) \quad \text{Ecuación 18}$$

Ve (m³) corresponde al volumen efectivo del reactor, V (m³) corresponde al volumen de un tronco de cono (forma que tiene el reactor), n la porosidad, d (m) la profundidad de los estratos, R (m) el radio mayor del tanque (reactor), r (m) radio menor.

Aplicando la ecuación 18 y tomando un espesor de estratos de 0.72 m, un radio menor de 0.275 m y un radio mayor de 0.325 m, se calculó el volumen del tronco de cono correspondiente al volumen del reactor sin estratos, dando un volumen de 0.204 m³. Obtenido este dato se hizo el cálculo del volumen efectivo del reactor mediante la Ecuación 17, dando como resultado un volumen de 0.073 m³ o bien 73, 46 L Puesto que los resultados son distintos con un margen de diferencia del 12.6%, se decidió trabajar con el segundo cálculo del volumen efectivo.

Los tiempos de retención estimados por los anteriores investigadores que se escogieron para ser estudiados en esta investigación y bajo los cuales fueron calculados los caudales de entrada corresponden al del diseño original de 1.28 días, y el estudiado por Curiel & Palomino de 2 días, empleando la ecuación 1, se efectuó el cálculo de los caudales, tal como se muestra en la tabla 7.

Tabla 7. Caudales a estudiar de acuerdo al tiempo de retención.

Tiempo teórico de Retención (en días)	CAUDAL (Q) (L/día)
1.28	57.39

2	36.77
---	-------

Fuente: Autor

Al estudiar los rendimientos de remoción Curiel & Palomino encontraron que usando como dato de coeficiente de remoción primaria la establecida por Ramos & Ardila (ver Tabla 4), no eran consecuentes los resultados obtenidos mediante la ecuación 19 y los obtenidos experimentalmente, por lo cual hicieron ajuste a su trabajo asumiendo que la constante de remoción variaba de acuerdo a la semana de ensayo tal como se muestra en la tabla 8.

$$\frac{C}{C_o} = e^{-tk_T} \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde C (mg/L DBO5) corresponde a la concentración del efluente, Co (mg/L DBO5) la concentración del afluente, t (días) el tiempo de retención y K_T (d^{-1}) el coeficiente primario de remoción.

Este dato sobre el coeficiente aunque puede ser una respuesta a la diferencia entre las remociones teóricas y las remociones experimentales obtenidas por Curiel & Palomino, deben ser estudiadas y corroboradas de forma experimental para dar más certeza a la información y establecer junto a los datos que aquí se determinen como respuesta final de un modelo completo de reactores de humedales artificiales de flujo vertical.

Tabla 8. Coeficiente de remoción de primer Orden de acuerdo al número de semanas

	Semana 1	Semana 2	Semana 3	Semana 4	Semana 5	Promedio
K_T Humedal (d^{-1})	0.670	0.941	1.165	0.766	1.322	0.973
K_T Filtro biológico (d^{-1})	0.740	0.898	1.083	0.668	1.278	0.934

Fuente: Curiel & Palomino (2011)

5.6. Adecuación de la planta piloto.

Siendo la planta piloto usada por diversas personas desde los años 2011 hasta la fecha, fue necesario adecuarla para la investigación dado que la vegetación ya había muerto, los sustratos se encontraban colmatados, algunas tuberías presentaban fugas. Se realizó por tanto la limpieza de los tanques tanto el de almacenamiento como los tanques que sirven de reactores de forma que no tuvieran rastros de salinidad alguna de las antiguas investigaciones hechas en ellas, fue necesario el cambio de sustratos, por lo que se buscó material que poseyera características iguales o parecidas a las planteadas en las investigaciones predecesoras, diferente al diseño original, fue necesaria incorporar a los reactores una pequeña capa de material granular de 3/8" con un espesor de 2 cm, para la protección del sustrato de suelo orgánico, dado que al momento de ingresar el afluente este era removido por la energía del agua y era arrastrado hacia el fondo del reactor; en aras de evitar que las precipitaciones en el ambiente incorporaran un caudal externo que pudiese alterar las mediciones, se opta por proteger los tanques reactores bajo el amparo de una lona que sirviera como cubierta colectora de las aguas lluvias y las alejara de los reactores. Luego de la adecuación, la planta piloto quedó tal como se muestra en la fotografía 1 y fotografía 2



Fotografía 1: filtro biológico y reactor #1



Fotografía 2: Reactor #2 con flora Tapya

5.7. Volumen de la sustancia trazadora y forma de ingreso al flujo.

Para el cálculo de la cantidad de sustancia trazadora (sal) usada, se partió de la necesidad que la concentración del volumen de masa de sustancia trazadora usada debía poseer mayor concentración o registrar una conductancia 10 veces mayor que la conductancia registrada en el agua contenida en los reactores para garantizar que la sustancia trazadora pueda ser reconocida en la salida (efluente). La dosificación escogida fue calculada mediante el uso de la Ecuación 15 la cual corresponde a un modelo que permite calcular el peso de material trazador usado de acuerdo al volumen sobre el cual se suministró el trazador, asumiendo como dato de cálculo una concentración; previniendo que el trazador no se decantara en el fondo y que pudiese alterar la conductancia del agua contenida en los contenedores, la concentración escogida fue de 400 mg/L la cual es mayor que la concentración del agua de los contenedores (menor de 0.5 g/L) y menor que la concentración de límite de solubilidad (359 g/L).

La sustancia trazadora fue incorporada al flujo de ingreso de los reactores de forma instantánea, que es lo recomendable cuando se utilizan de cloruros (CEPIS, 2004), en la cual se aplica un volumen de sustancia trazadora a la entrada del reactor en un tiempo inferior a un treintavo ($1/30$) del tiempo teórico de retención. Para este estudio se diluyeron 97 gramos de sal en un litro de agua el cual fue incorporado al reactor luego del primer pulso de cada caso estudiado ver Imagen 13.

Los tiempos de aplicación para cada caso a estudiar (magnitud de caudal y tiempo de retención), fueron: para 1,28 días, el tiempo de inyección fue menor de 1.24 horas, para el caso de 2 días se inyectó la sustancia en un tiempo menor a 1.6 horas y para el caso de tres días de retención fue aplicada en un lapso menor a 2.4 horas

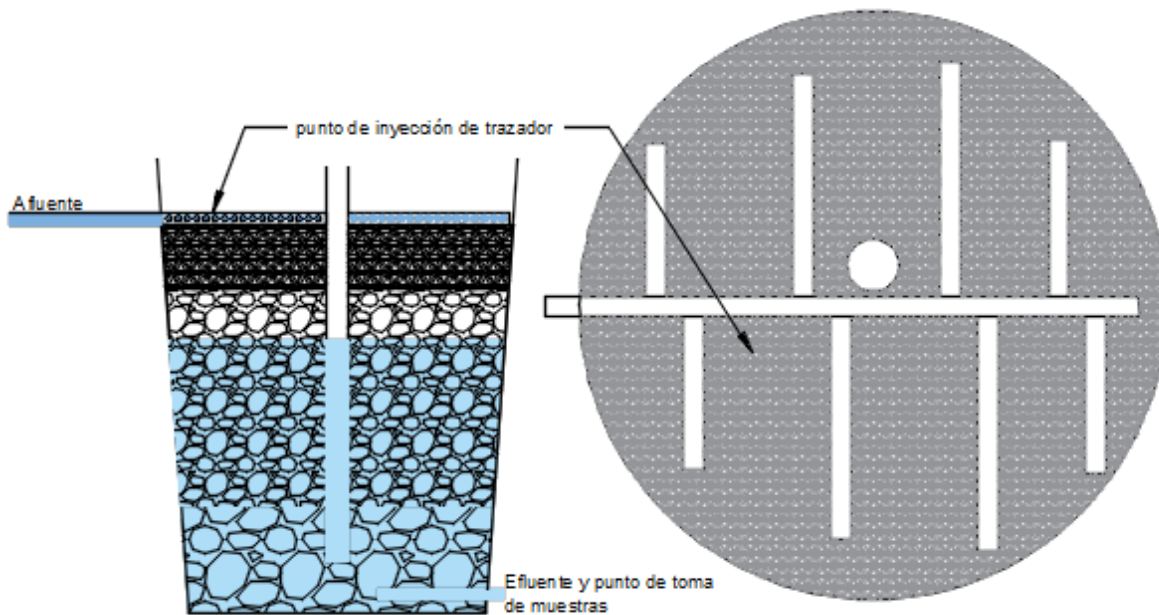


Imagen 13. Punto de inyección del trazador y punto de recolección de muestras

5.7.1. Ingreso del afluente

Tal como se mencionó anteriormente el caudal fue incorporado al reactor mediante pulsos, los cuales fueron repartidos en un tiempo tal que permitiera la aireación de los sustratos del humedal para simular así el proceso hidráulico real de los humedales de flujo vertical, se mantendrá una parte del reactor saturado correspondiente al sustrato inferior y el 80% del sustrato intermedio con el objeto que en cada pulso se pudiese completar el volumen efectivo del reactor; los ingresos de los pulsos se calcularon de acuerdo al tiempo teórico de retención y el caudal de ingreso, de tal forma que entre en cada intervalo de reposo (tiempo sin ingreso de flujo) saliese la misma cantidad de flujo que fue ingresada. Para cada caso estudiado los pulsos y la forma de ingreso se muestra en la Tablas 9.

Tabla 9. Ingreso de pulsos del afluente al reactor por distribución de tiempo

Tiempo (h)	pulso (1, 28d) en litros	pulso (2d) en litros	Ingreso (3d) en litros
0	14.35	4.6	Flujo continuo
3	0	4.6	Flujo continuo
6	5.17	4.6	Flujo continuo
9	7.17	4.6	Flujo continuo

12	7.17	4.6	Flujo continuo
15	7.17	4.6	Flujo continuo
18	7.17	4.6	Flujo continuo
21	7.17	4.6	Flujo continuo
24	7.17	4.6	Flujo continuo
27	7.17	4.6	Flujo continuo
30	7.17	4.6	Flujo continuo
33	7.17	4.6	Flujo continuo
36	0	4.6	Flujo continuo
39	0	4.6	Flujo continuo
42	0	4.6	Flujo continuo
45	0	4.6	Flujo continuo
48	0	4.6	Flujo continuo
51	0	4.6	Flujo continuo
54	0	4.6	Flujo continuo
57	0	4.6	Flujo continuo
60	0	4.6	Flujo continuo
63	0	4.6	Flujo continuo
66	0	4.6	Flujo continuo
69	0	4.6	Flujo continuo
72	0	4.6	Flujo continuo

Para el caso del tiempo de retención de 1.28 días, se efectuaron ocho pulsos de 7.17 l por día con intervalos de pulsos cada tres horas; para los casos iniciales el primer pulso se efectuó para control y monitoreo del caudal del efluente; para el caso del tiempo de dos días, se efectuaron 12 pulsos por día cada pulso de 4,6 l con intervalos entre pulsos de tres horas.

Previo a cada caso estudiado se monitoreó el cumplimiento de salida e ingreso de los pulsos para calibración de las válvulas de paso y control y así tener certeza que el caudal del afluente fuese el mismo en el efluente; este chequeo se realizó una vez por ensayo mediante la medición del volumen en los tiempos de reposo y verificar el cumplimiento de la hipótesis (pulso ingresado es igual al volumen colectado en tiempo de reposo).

5.8. Calibración de equipo de medición

Puesto que la unidad medida en los estudios fue la conductancia que presentaba la masa de una muestra tomada al contener concentraciones de sal (trazador), se prepararon varias muestras a concentraciones diferentes (todas conocidas) a las cuales se les midió la

conductancia que presentaban con el fin de obtener una curva de ajuste del equipo usado y poder convertir la conductancia medida en las muestras tomadas en los reactores y saber a qué concentración de NaCl correspondía cada dato de conductancia.

Este ensayo se realizó tres veces para tener más certidumbre de la curva de ajuste, los datos obtenidos fueron promediados para obtener una curva general; el error de dispersión que se presentó en los datos fue de 14,4%; adjunta a la curva se realizó una regresión de datos usando el programa Excel y así obtener la ecuación con la cual poder calcular las concentraciones para un dato de conductancia conocido, en la Grafica 1 y en la tabla 10, se presentan los resultados de la curva de ajuste con su respectiva ecuación.

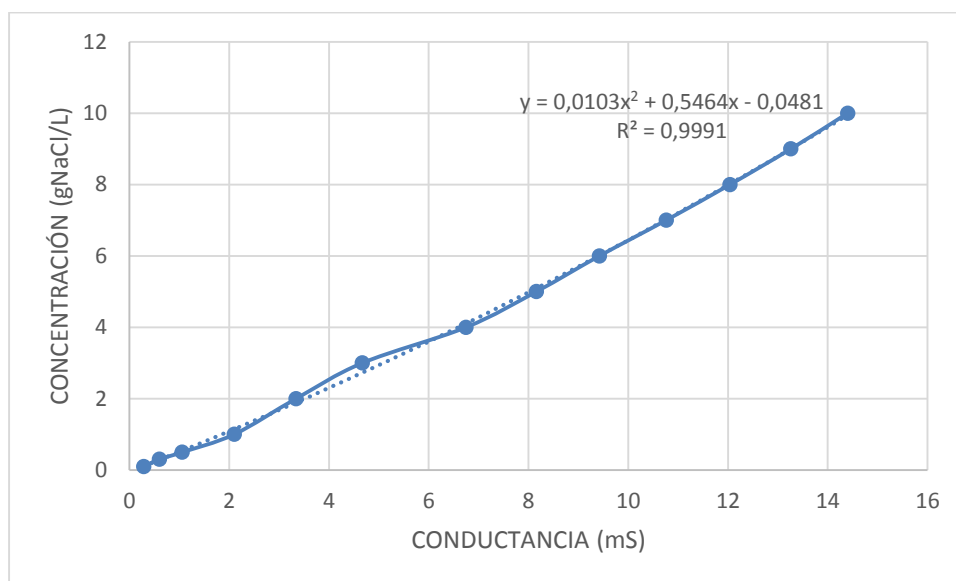


Grafico 1. Curva de ajuste para equipo usado (Consort C5010)

Tabla 10. Datos de ensayo de calibración de equipo

CONCENTRACIÓN (g NaCl/L)	CONDUCTANCIA (mS)	CORRECCIÓN	ERROR
10	14.4	9.96	0.44%
9	13.26	9.01	0.12%
8	12.04	8.03	0.31%
7	10.76	7.02	0.35%
6	9.42	6.01	0.24%
5	8.16	5.10	1.93%
4	6.75	4.11	2.73%
3	4.67	2.73	9.06%
2	3.34	1.89	5.41%
1	2.1	1.14	14.48%
0.5	1.06	0.54	8.53%

0.3	0.6	0.28	5.52%
0.1	0.29	0.11	11.22%

La curva obtenida que relaciona la salinidad con la conductividad para el equipo usado puede ser descrita mediante el trazo de la ecuación 20.

$$\text{Concent.} \left(\frac{\text{g.NaCl}}{\text{L}} \right) = 0,0103(\text{conduct. (mS)})^2 + 0,5464(\text{conduct. (mS)}) - 0,0481 \quad \text{Ecuación 20}$$

5.9. Medición.

Para el muestreo se efectuó inicialmente la incorporación de la sustancia trazadora en el sistema tal como se muestra en la Imagen 13, este proceso se realizó disolviendo la cantidad de sal calculada en un litro de agua y se inyectó al sistema, primeramente se midió la conductividad registrada por el volumen de agua del reactor antes de incorporar la sustancia trazadora; el muestreo se tomó en la salida única existente del efluente de cada reactor (ver Imagen 13); este muestreo se efectuó inicialmente a 15 minutos de la inyección, luego a 30 minutos, a una hora, a dos horas, posteriormente a tres horas, tiempo después del cual todas las muestras se tomaron cada tres horas.

Para mantener certeza de la cantidad volumétrica del efluente, se chequeó el caudal en cada instante de toma de muestra, este chequeo se realizó de forma manual mediante el uso de una probeta graduada, cerciorándose que las mediciones fuesen de 38cm³/min para el primer caso de estudio y 25,53 cm³/min. Para el segundo y tercer caso estudiado.

5.10. Muestras

Las muestras tomadas de los efluentes de cada reactor se efectuó desde los primeros 5 minutos después de la inyección del trazador tal como se mencionó anteriormente, aumentando el intervalo de toma hasta alcanzar un intervalo estable de 3 horas entre toma de muestras; los ensayos de trazadores (inyección y toma de muestras) se iniciaron en las horas de la mañana para disminuir el tiempo de muestreo nocturno.

Aun cuando la programación de los ensayos se realizó para que cada ensayo durara 2.5 veces el tiempo teórico de retención, las muestras se tomaron hasta que el efluente tuviese una concentración igual a la inicial que posee el fluido de los reactores (sin trazador).

Las muestras correspondientes a las primeras 3 horas iniciado el proceso de medición, se les midió la conductancia en el sitio ya que su intervalo de tiempo por toma era relativamente pequeño tal como se muestra en la Fotografía 1, el resto de muestras fueron tomados y almacenadas en frascos plásticos los cuales se rotularon según el reactor del cual se tomó y la hora de toma, para su posterior medición (Ver Fotografía 2); para la toma de valores, se realizó la medición de la conductancia que presentaban las muestras, mediante el uso de un analizador multiparámetro Consort C5010, el cual mide conductancia en mili Siemens (mS) y micro Siemens (μ S)



Fotografía 3: Muestras iniciales



Fotografía 4: Muestras y rótulos de frascos

5.11. Determinación de la influencia del trazador en el estudio de tiempos de residencia.

Tal como se dijo en el alcance de este documento, el objetivo principal de este estudio no es determinar la eficiencia del trazador en sí; pero si busca establecer la influencia del trazador; es decir determinar si el trazador tiene una influencia adversa en los resultados obtenidos en las muestras. Para dar solución a este interrogante se procedió a consultar estudios anteriormente realizados sobre uso de trazadores, en los cuales se halla comparado la eficiencia de la sal como trazador frente a otros trazadores; de igual forma se relacionaron los datos obtenidos de estudios de trazadores realizados en humedales artificiales o cualquier otro sistema que involucre en su estudio vegetación y tomar datos sobre los resultados del comportamiento de la sal como trazador ante estudios de aforos en presencia de vegetación, para así determinar si esta es asimilada por la vegetación en el estudio realizado.

La razón de determinar la influencia del trazador en el estudio de tiempos de residencia radica en el interrogante si la sal puede ser absorbida por la vegetación, puesto que de ser así, los datos obtenidos no serían los apropiados para determinar las curvas de residencia por haber absorción del trazador.

Para constancia o relación con los estudios usados como información secundaria, se calculó la concentración de salinidad obtenida en el efluente mediante la integración de la curva de salida de trazador contra tiempo; con este dato se calculó la cantidad total de trazador recuperado y así determinar que tanto trazador fue consumido en el sistema.

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de este estudio es determinar el tiempo de retención para un sistema de reactores de humedales artificiales de flujo vertical, usando cloruro de sodio como trazador, aplicando en la unidad de ingreso del agua cruda en cada reactor y midiendo cada tres horas la conductividad eléctrica desde que se obtiene una variación de en la conductividad inicial hasta que vuelve a estabilizarse en su estado inicial.

Las siguientes tablas muestran cada uno de los valores obtenidos durante el proceso de toma de muestras y medición de la conductividad eléctrica que se realizaron en un intervalo de 4 semanas aproximadamente, distribuidos de acuerdo al tipo de medición a realizar. Estos valores son la ase para el cálculo y obtención de datos sobre el comportamiento hidráulico de los reactores, que dará paso a las comparaciones entre el tipo de sistema usado (usando plantación ya sea mangle o Enea, o sin plantación) para analizar las diferencias entre cada sistema y su comportamiento ante cada situación de ingreso de afluente.

6.1.Resultados para 1.28 días de retención teórica

Este ensayo fue realizado bajo la condición de flujo por pulsos, el ingreso del afluente se realizó cada tres horas, tal como se muestra en la Tabla 9 del capítulo 4, los valores obtenidos en el ensayo de muestras son los siguientes.

Tabla11. Resultados de muestreo con conductivimetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de 1.28 días

TIEMPO (En Horas)	CONDUCTIVIDAD (En mS)		
	CON ENEA	CON MANGLE	SIN PLANTA
0	033	0.399	0.419
0.5	0.34	6.02	4.2
1	3.88	5.58	5.24
2.98	3.75	4.91	4.85
3.1	3.69	4.72	4.66
5.9	3.2	4.18	3.6
6.1	3.18	4.02	3.42
8.9	2.81	3.55	3.44
9.1	2.75	3.54	3.38
12.9	2.48	2.81	3.06
13.1	2.39	2.78	2.9
14.9	2.49	2.15	2.85
15.1	2.48	2.05	2.78
20.95	2.43	1.92	1.41

21.05	2.39	1.82	1.3
23.92	2.34	1.34	1.28
24.05	2.21	1.2	1.16
26.9	2.31	1.26	0.95
27.05	2.17	0.87	1.01
29.95	2.27	1.27	0.89
30.05	2.24	0.75	0.83
32.95	2.18	1.33	0.95
33.05	2.11	0.99	0.81
35.95	1.62	0.95	1.13
36.05	1.34	0.93	1.07
41.95	1.03	0.79	0.58
42.05	0.99	0.69	0.45
44.95	0.67	1.14	0.93
45.05	0.58	0.98	0.84
47.95	0.33	0.75	0.64
48.05	0.33	0.54	0.39

6.1.1. Evaluación de resultados por el método de tendencia central

Con los valores obtenidos de conductancia eléctrica de las muestras de agua tomadas en la salida de cada reactor, se realizaron cálculos de los parámetros de evaluación de eficiencia hidráulica, tal como se muestra en la tabla 12 y a su vez se obtuvieron las curvas de tiempo de residencia para cada reactor tal como se representa en la Gráfica 2.

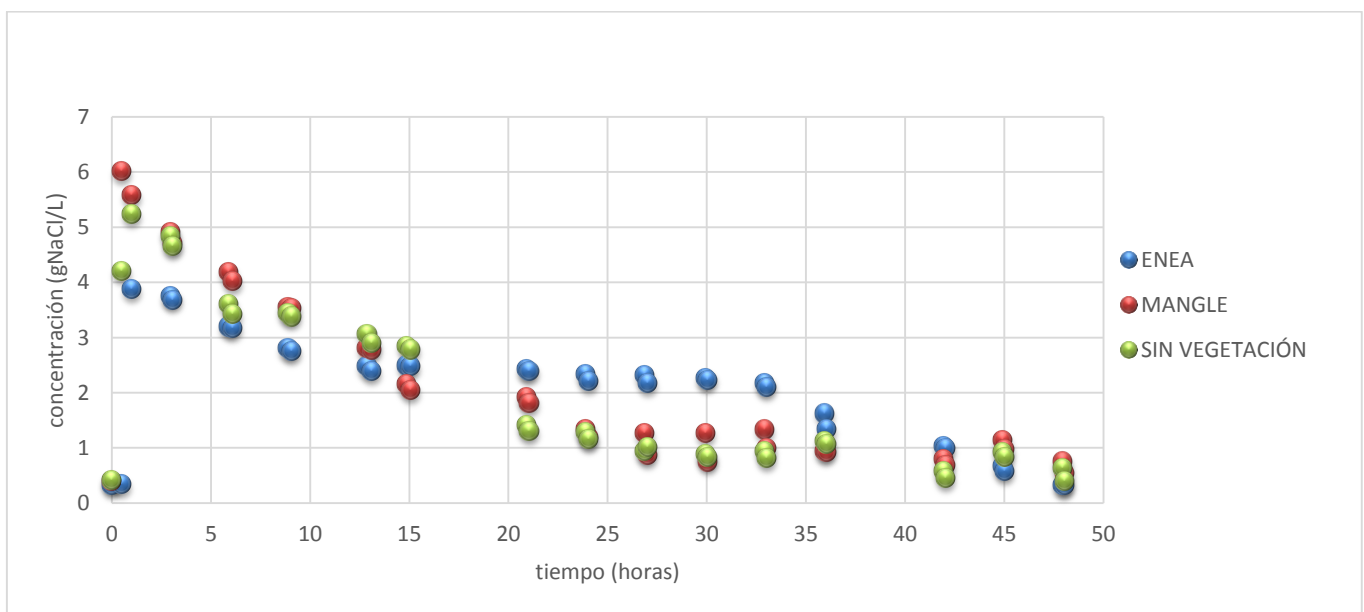


Gráfico 2. Curva DTR para reactores 1, 2 y 3 con un tiempo teórico de 1.28 días

De la Gráfica 2 se aprecia que la salida del trazador (% de concentración) ocurrió en los primeros 5 minutos en cada uno de los reactores; sin embargo, la mayor salida fue registrada en el reactor N° 2 (Vegetación de mangle), las mayores concentraciones se registraron en un periodo muy cercano al tiempo de inyección del trazador y fue bajando en cantidad de concentración a lo largo del ensayo, lo cual implica la presencia de una fuerte dilución de la sustancia trazadora, en la Tabla 12 se aprecian los valores de los parámetros utilizados para el cálculo de los criterios con los cuales nos podemos dar una idea del comportamiento hidrodinámico de los reactores, estos parámetros corresponden a los tiempos de salida de la sustancia trazadora y de las concentraciones de salida tal como se especifica en el capítulo 3 numeral 3.1.3 (teoría sobre curvas de retención).

Tabla 12: valores de los parámetros y criterios para cada reactor estudiado

PARAMETRO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOL.				
t1	0,5	0,3	0,4	CRITERIO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOLOGIC.
t10	2	0,6	0,5	t1/t0	0,016	0,010	0,013
tp	1,2	0,5	1	tm/t0	0,456	0,195	0,212
tm	14	6	6,5	tp/t0	0,039	0,016	0,033
to	30,72	30,72	30,72	t10/t90	0,061	0,020	0,019
t90	33	30	27	e	1,415	1,541	1,508
cp	3,88	6,02	5,24				

El porcentaje de flujo pistón puede considerarse casi nulo para cada reactor, dado que la relación $tp/t0$ es muy cercana a cero para los tres casos, lo que representa una tendencia hacia un flujo completamente mezclado; puesto que los valores de la relación $ti/t0$ para los tres reactores son menores a 0,3 se puede afirmar que en los reactores se presenta un paso directo del flujo, con presencia de un cortocircuito considerable, lo cual se puede corroborar al analizar los valores de la relación $tm/t0$ los cuales oscilan entre 0,1 y 0,4. Los valores registrados de la excentricidad, corrobora la información de la tendencia del sistema a un modelo de flujo de mezcla ideal y no una tendencia a un flujo completamente pistón como ha sido considerada la actividad hidrodinámica en los anteriores estudios realizados al reactor por Curiel & Palomino y Ardila & Ramos, quienes en su investigaciones asumieron un régimen de flujo pistos para poder dar una optimización a los reactores de humedales artificiales de flujo vertical; sería conveniente por tanto efectuar una modificación a estos estudios de optimización teniendo en cuenta la tendencia de flujo que poseen los reactores y así obtener una información más integral que ayuden a optimizar los reactores tanto desde el punto de vista de remociones como desde la parte hidrodinámica, que se pueda adaptar a condiciones reales y no apoyadas sobre teorías ideales.

6.1.2. Evaluación por Índice Morril

En esta metodología se evalúa el sistema de acuerdo al segmento de tiempo comprendido entre la salida del 10% del total del trazador y el 90% de la salida del mismo tal como se

muestra en la ecuación 2; al graficar el tiempo transcurrido contra el porcentaje de trazador que sale del sistema, se obtienen las siguientes gráficas.

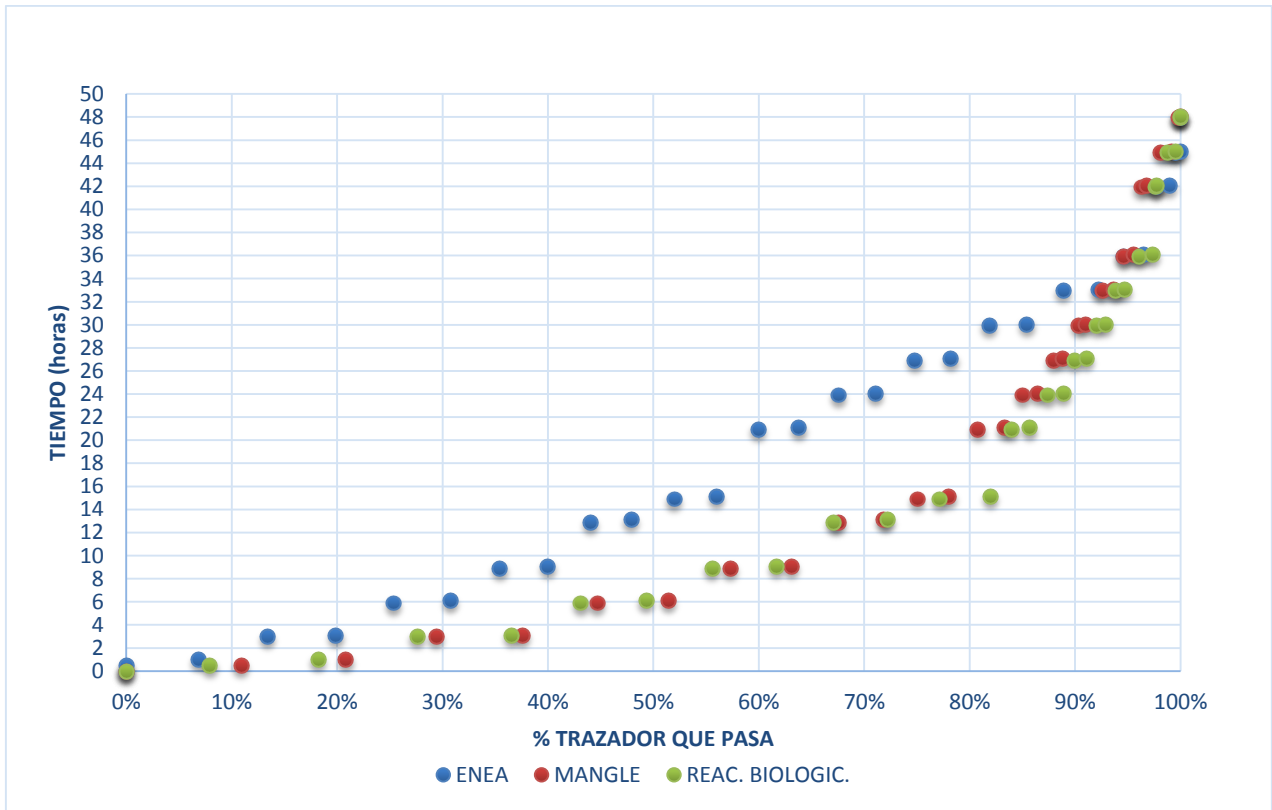


Gráfico 3: Índice Morril, de los reactores 1, 2 y 3 con un tiempo teórico de retención de 1,28 días

Del Gráfico 3 y la tabla 11, encontramos que los valores de los índices de Morril se encuentran en valores muy superiores a la unidad, al analizar las curvas de concentraciones que salen de los reactores encontramos que los reactores 2 y 3 poseen una característica hidrodinámica parecida con tasas elevadas de salida de trazador con la presencia de altos niveles de tendencias de flujo mezclado y un considerable cortocircuito hidráulico representado en la salida del más del 50% del trazador en las primeras 8 horas. En el reactor 1 aunque inicialmente presenta características de un flujo mezclado con la participación de cortocircuitos, representados en la salida del 20% del trazador en las primeras 3 horas, a partir de esta hora (hora tercera) toma un comportamiento de flujo mixto con un porcentaje de flujo pistón más elevado que la de los reactores 2 y 3, lo cual se puede apreciar en la tendencia de su curva a formar un ángulo mayor con la horizontal que el Angulo formado por las curvas de los reactores 2 y 3.

6.1.3. Evaluación con Formulas de Wolf Reisnick

Este método nos brinda información para determinar los valores porcentuales la cantidad de modo de flujo que se presenta en los reactores, dando una idea del volumen que pasa por el sistema y las condiciones bajo las cuales pasa.

El modelo de Reisnick establece que de presentarse variaciones en los modos del flujo o combinaciones en este, las relaciones de las curvas de los porcentajes del trazador que pasan en función del tiempo que reside el volumen del fluido en el sistema está dado por la expresión $\log(1 - F(t)) = \frac{-\log(e)}{(1-p)(1-m)} \left(\frac{t}{t_0} - p(1 - m) \right)$ en la cual $F(t)$ representa el porcentaje de volumen muerto del sistema, p el porcentaje de flujo pistón y $(1-p)$ representa el porcentaje de flujo no pistón.

Al dibujar en escala semilogaritmica los valores de $(1-F(t))$ representados en la tabla 12, 13 y 14 contra la relación $\frac{t}{t_0}$ encontrada en las mismas, se obtiene la gráfica con la cual hallar los parámetros anteriormente mencionados; al trazar una línea tangente justo en el punto donde la curva tienda a ser vertical y medir el ángulo de dicha línea con la horizontal y el punto de intersección con la horizontal del máximo, obtenemos los parámetros del modelo simplificado de Wolf Reisnick tal como se muestran en las ecuaciones 13.

Tabla 13: Procedimientos para el cálculo de conductividades en los reactores

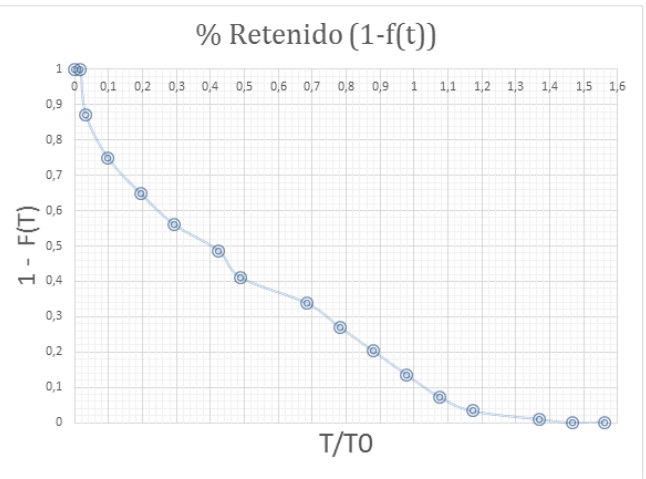
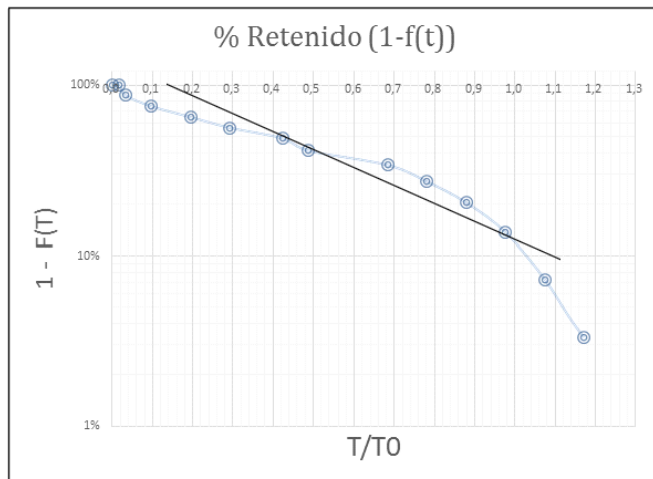
COLUMNA 1	Tiempo acumulado en horas	t
COLUMNA 2	valor de la concentración medida en gNaCl/L	C
COLUMNA 3	Valor de la concentración medida menos la concentración registrada inicialmente sin verter el trazador	C - Ci
COLUMNA 4	Valor de la concentración neta acumulada	$\sum(C - Ci)$
COLUMNA 5	Valor de la concentración medida entre la concentración total acumulada, expresada en %	F(t), %
COLUMNA 6	Valor de la relación entre el tiempo de toma de muestra y el tiempo teórico de retención	t/t ₀
COLUMNA 7	100 - columna 5	1- F(t) en %

En la tabla 14 se presentan los cálculos realizados para el reactor 1 mediante los cuales se obtuvieron los datos con los cuales evaluar los resultados del ensayo de trazador mediante la evaluación de Wolf Resnick, los cálculos para los reactores 2 y 3 se encuentran en las Tablas 1 y 2 de los anexos.

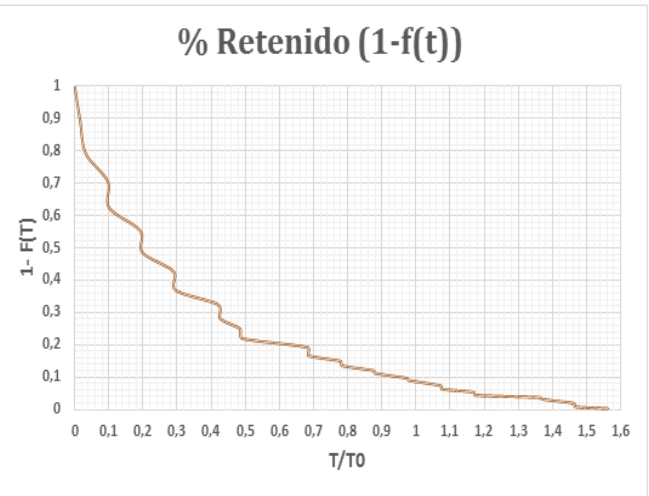
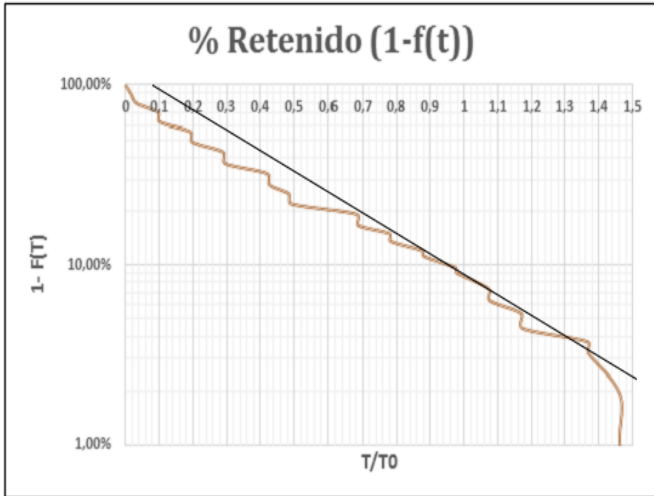
Tabla 14: Resultados y cálculos para reactor 1

Tiempo (Hora)	Concentración C (g.NaCl/L)	Concentración Neta (g.NaCl/L)	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0.13333367	0	0	0.00%	0	100.00%
0,5	0.13886668	0.0553301	0.00553301	0.02%	0.016276042	99.98%
1	2.22699232	2.09365865	2.09919166	6.85%	0.032552083	93.15%
2,98	2.14574375	2.01241008	4.11160174	13.42%	0.097005208	86.58%
3,1	2.10836183	1.97502816	6.0866299	19.87%	0.100911458	80.13%
5,9	1.805852	1.67251833	7.75914823	25.33%	0.192057292	74.67%
6,1	1.79360972	1.66027605	9.41942428	30.75%	0.198567708	69.25%
8,9	1.56861383	1.43528016	10.85470444	35.43%	0.289713542	64.57%
9,1	1.53239375	1.39906008	12.25376452	40.00%	0.296223958	60.00%
12,9	1.37032112	1.23698745	13.49075197	44.04%	0.419921875	55.96%
13,1	1.31663063	1.18329696	14.67404893	47.90%	0.426432292	52.10%
14,9	1.37629703	1.24296336	15.91701229	51.96%	0.485026042	48.04%
15,1	1.37032112	1.23698745	17.15399974	55.99%	0.491536458	44.01%
20,95	1.34047247	1.2071388	18.36113854	59.93%	0.681966146	40.07%
21,05	1.31663063	1.18329696	19.5444355	63.80%	0.685221354	36.20%
23,92	1.28687468	1.15354101	20.69797651	67.56%	0.778645833	32.44%
24,05	1.20975023	1.07641656	21.77439307	71.08%	0.782877604	28.92%
26,9	1.26904583	1.13571216	22.91010523	74.78%	0.875651042	25.22%
27,05	1.18608967	1.052756	23.96286123	78.22%	0.880533854	21.78%
29,95	1.24530287	1.1119692	25.07483043	81.85%	0.974934896	18.15%
30,05	1.22751728	1.09418361	26.16901404	85.42%	0.978190104	14.58%
32,95	1.19200172	1.05866805	27.22768209	88.88%	1.072591146	11.12%

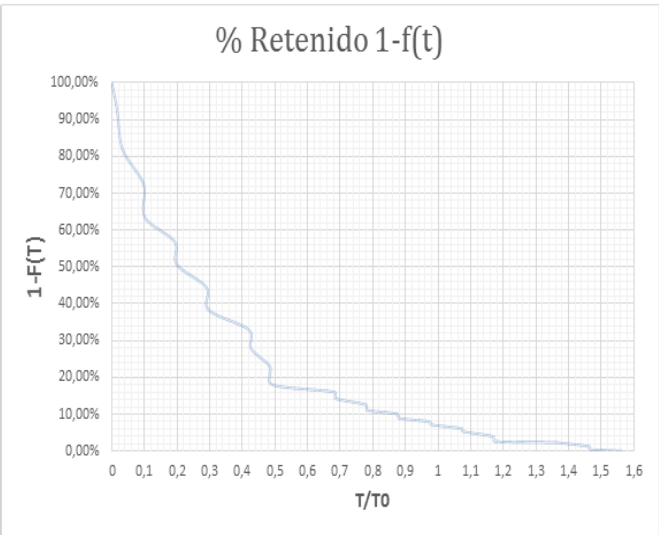
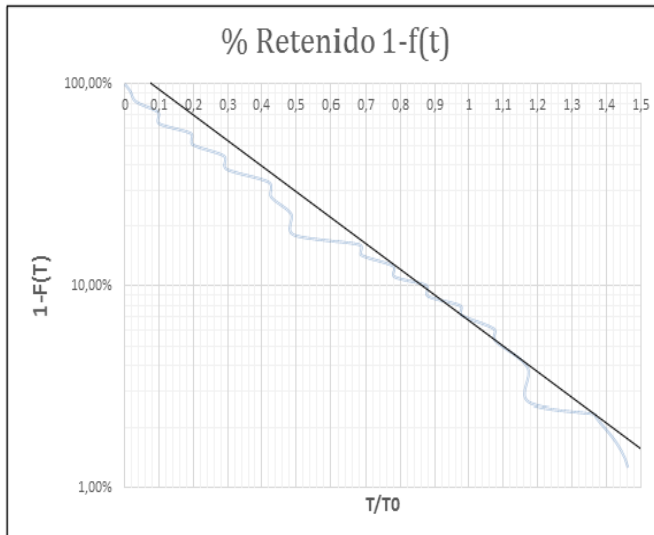
33,05	1.15066063	1.01732696	28.24500905	92.20%	1.075846354	7.80%
35,95	0.86409932	0.73076565	28.9757747	94.58%	1.170247396	5.42%
36,05	0.70257068	0.56923701	29.54501171	96.44%	1.173502604	3.56%
41,95	0.52561927	0.3922856	29.93729731	97.72%	1.365559896	2.28%
42,05	0.50293103	0.36959736	30.30689467	98.93%	1.368815104	1.07%
44,95	0.32261167	0.189278	30.49617267	99.55%	1.463216146	0.45%
45,05	0.27227692	0.13894325	30.63511592	100.00%	1.466471354	0.00%
47,95	0.13333367	0	30.63511592	100,00%	1.560872396	0.00%
48,05	0.13333367	0	30.63511592	100,00%	1.564127604	0.00%



A



B



C

Grafico 4: Curvas 1 - F(t), evaluación de Wolf Resnick para (a) Enea, (b) Mangle, (c) Reactor biológico

Obtenidas las gráficas, se tomaron los diferentes datos de t/t_0 para calcular los porcentajes de flujo pistón, mezclado y zonas muertas; estos datos fueron tabulados en la tabla 15.

Tabla 15: Predominios de flujo y porcentaje de zonas muertas

Relación	REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3
T1/T0	0,14	0,08	0,09
T2/T0	1,09	0,96	0,89
θ	0,14	0,08	0,09
Tan(α)	1,05263158	1,13636364	1,25
P	25,31%	17,29%	20,55%
M	74,69%	82,71%	79,45%
m	25,32%	20,79%	27,75%

Al analizar la tabla anterior se puede observar que los reactores poseen un flujo mixto entre partes de flujo pistón (P) oscilando entre el 17,29% y el 25,31%, siendo el porcentaje menor perteneciente al reactor #2 (reactor con vegetación de Mangle) y el mayor porcentaje al reactor 1 (reactor con vegetación de Enea); el tipo de flujo predominante para los tres reactores es el flujo mezclado con más del 74,69%, corroborando la información obtenida en las evaluaciones anteriores; el porcentaje de zona muerta calculado, corresponde a porcentaje de volumen muerto en relación al volumen efectivo de cada reactor; es así como se podría decir que de los 73,46 litros que corresponden al volumen efectivo de los tres reactores, en el primer reactor 18,6 litros hacen referencia a volumen muerto cuyo tiempo de retención tiende a ser infinito.

Con esta evaluación comprobamos entonces los errores cometidos en antiguas investigaciones hechas en el reactor (ver antecedentes) en donde se implementó el modelo de flujo pistón de Reed en el cual se considera una operación plena bajo flujo pistón sin presencia de zonas muertas; este mismo modelo fue usado al momento de calcular las remociones teóricas para comprobar las experimentales, dando como resultado una diferencia notable entre las remociones obtenidas experimentalmente por los investigadores y las calculadas. En relación a ellos se aprecian en la tabla 15 los valores del porcentaje de flujo pistón que presentaron los reactores, lo cual al comparar con la consideración de los modelos usados arrojan errores de hasta un 74% en el modelo de operación de los reactores.

6.2.Resultados para dos días de TRH teórico.

Realizada la experiencia la experiencia con 1.28 días de retención teórica, se dejaron descansar los reactores por un lapso de tres días, en los cuales se les añadió un pulso de 20 litros cada 12 horas con el fin de estabilizarlos.

Para la realización de la experiencia con dos días de retención teórica se hizo un cambio en el caudal, pasando de 57.39 lpd a 36.77 lpd; a diferencia de la experiencia anterior, este ensayo se realizó usando el volumen total útil de los reactores en vez de un volumen de control, los resultados obtenidos en las mediciones se presentan en la tabla 16.

Tabla 16. Resultados de muestreo con conductivimetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de 2 días

TIEMPO (horas)	CONDUCTIVIDAD (mS)		
	ENEA	MANGLE	SIN PLANTA
0	0.528	0.665	1.07
0,25	0.529	0.664	1.07
1	0.648	1.04	1.32
2	0.879	1.98	1.45
5	1.89	2.56	1.68
6	2.98	3.02	1.95
9	3.04	3.51	2.04
15	3.06	3.55	1.99
18	1.76	3.29	2.05
21	3.3	3.64	2.3
26	2.36	2.2	3.24
32	2.95	4.18	3.25
38	3.56	3.75	3.4
44	2.88	3.2	3.2
47	2.48	2.75	2.03

53	2.91	2.55	1.77
59	2.45	2.94	1.99
65	1.54	2.67	1.78
71	1.38	2.5	1.66
74	1.13	2.48	1.63
80	1.01	1.26	1.29
83	0.978	1.12	1.16
86	0.746	1.05	1.09
89	0.528	0.871	1.07
92	0.528	0.789	1.07
93	0.528	0.669	1.07
94	0.528	0.665	1.07

6.2.1. Evaluación por el Método de Tendencia Central

Con los datos contenidos en la tabla 16, se graficaron las curvas C para cada reactor y se calcularon los parámetros de tendencia con los cuales evaluar el comportamiento de los reactores, los datos obtenidos se muestran en el Gráfico 5 y en la tabla 17.

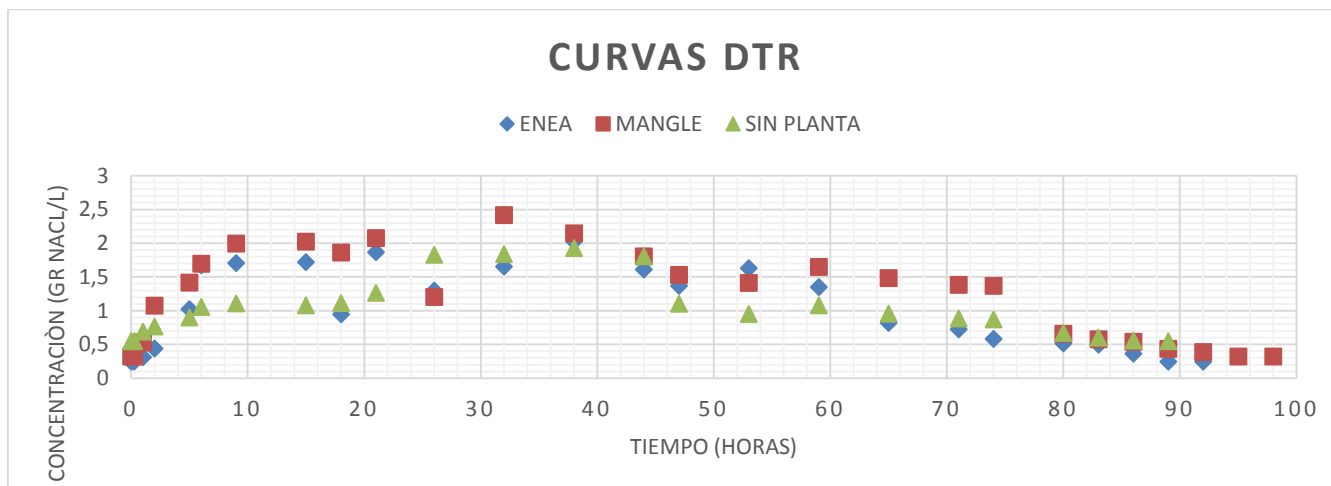


Gráfico 5: Concentración de NaCl en función del tiempo, para los reactores estudiados con un tiempo teórico de retención de 2 días

De la Tabla 16 y el Gráfico 5 se puede notar que la salida apreciable del trazador se registró pasada una hora después de la inyección; al analizar las gráficas se puede observar que en el reactor 1 sucedieron fluctuaciones un poco abruptas en las concentraciones de salida, que sucedieron con menos frecuencia en el reactor 2 y casi sin mucha presencia en reactor 3, estas fluctuaciones indican el descenso del trazador por varios caminos lo que implicaría que este posee cavidades por donde el agua fluye con mayor intensidad en comparación del resto de volumen del reactor.

Las mayores concentraciones se registraron a las 38 horas para el reactor 1 y 3 y a las 33 horas aproximadamente en el reactor 2 con valores que oscilan entre 1,93 y 2,45 gNaCl/l; siendo la mayor concentración registrada en el reactor 2 y la menor en el reactor 3. Es notable que aunque el reactor 2 tiene los registros mayores de salida es este mismo quien posee un tiempo final más amplio, esto se debe a una fuga que se presentó en los reactores 1 y 3, siendo el reactor 2 el único sin presentar fugas en este ensayo, por lo cual el trazador que pudiese bajar por flujo convectivo o por diferencia de densidades no sale en las fugas y puede ser mezclado con los nuevos pulsos que ingresan al reactor, lo que hace que la curva tome una forma alargada más que las curvas descritas por los otros reactores.

De la Grafica 5 juntamente con los datos obtenidos en la tabla 16, se tomaron los tiempos de pasos de los diferentes porcentajes de salida de trazador para calcular los criterios de tendencia central, tal como se muestra en la tabla 17.

Tabla 17: valores de parámetros y criterios para cada reactor según plantación

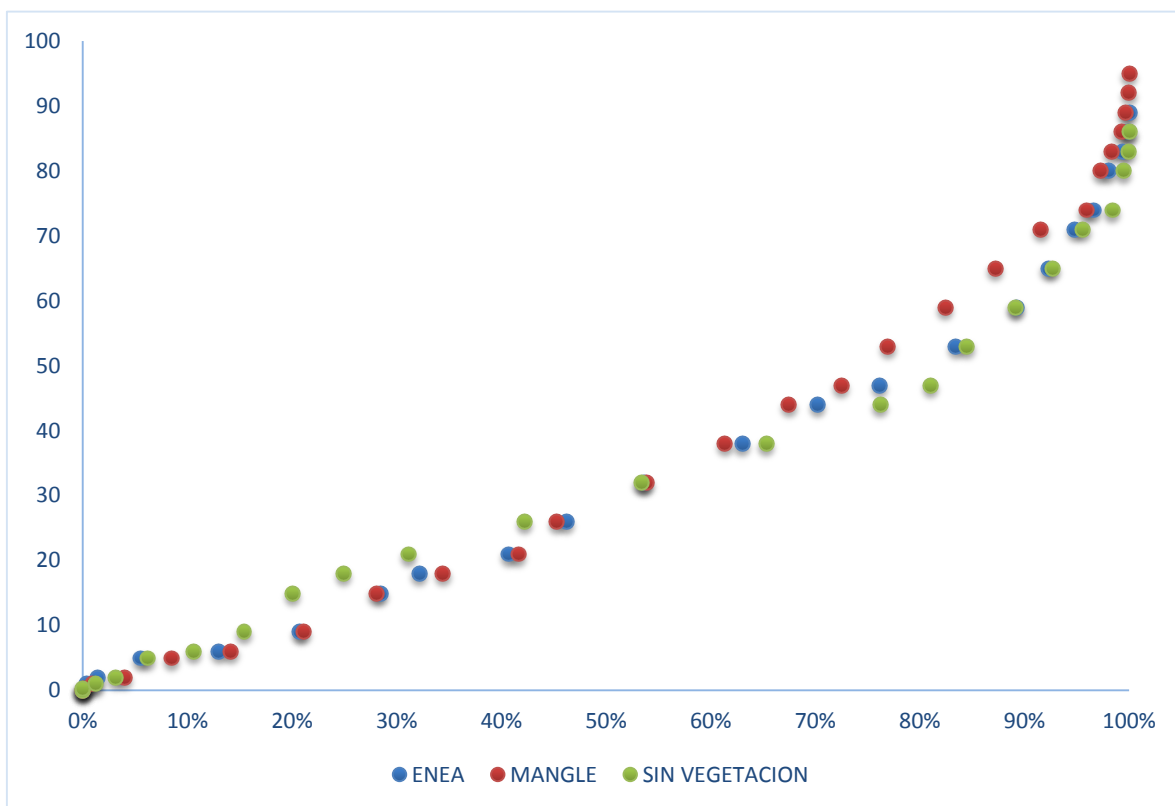
PARAMETRO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOL.				
t1	1	0,7	1	CRITERIO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOLOGIC.
t10	5,8	6,6	6	t1/t0	0,172	0,106	0,167
tp	38	32,5	38	tm/t0	0,604	0,604	0,625
tm	29	29	30	tp/t0	0,792	0,677	0,792
to	48	48	48	t10/t90	0,097	0,096	0,100
t90	60	68,9	60,05	e	0,354	0,577	0,354
cp	2,03	2,45	1,93				

Puesto que la relación $t1/t0$ es menor que 0.3 y tienden a cero, indica que existen cortocircuitos en los reactores y una baja tendencia de flujo único, estos valores son próximos a 0.2 por lo que los cortocircuitos no son tan grandes con excepción del reactor 2 que presenta el menor valor de la relación para un indicativo de mayor cortocircuito; del criterio de relación de tiempo mediano de salida con el tiempo teórico ($tm/t0$), en la que se aprecia un mayor valor de la relación para el reactor 3 (testigo) y menor para el reactor 2 lo que corrobora la deducción que se infiere del criterio anterior y decir que el reactor 2 posee mayores cortocircuitos que los reactores 1 y 3. Los valores obtenidos del tercer criterio ($tp/t0$) indican la prevalencia del flujo pistón en cada reactor siendo el de menor sesgo el reactor 2 y el más inclinado a un flujo pistón el reactor 1; los valores de excentricidad nos da una idea de la dispersión del flujo, para los reactores 1 y 3 esta dispersión se encuentra

en valores próximos a 35% lo que afirma el predominio de un tipo de flujo, mientras que para el reactor 2 el valor de excentricidad supera el 50% en lo que se puede concretar la idea de un flujo mixto.

6.2.2. Evaluación por el Método del Índice Morril

Al igual que en el ensayo para 1,28 días de tiempo teórico de retención, se graficó el porcentaje de trazador que sale de los reactores contra el tiempo de ensayo y se evaluó el segmento comprendido entre el paso del 10% y el del 90%; estas gráficas fueron obtenidas al trazar curvas con los datos de la columna 1 y 5 de las tablas de cálculo. (Las tablas de



cálculo referenciadas se encuentran en los anexos con los numerales de tabla 3, 4 y 5)

Gráfico 6: Curvas F(t) para cada reactor

En base a la gráfica anterior y al criterio 4 de la tabla 17 (t_{10}/t_{90}), se indica la presencia de un predominio de flujo pistón al existir una tendencia de salida no tan dispersa y por tener las curvas un ángulo casi de 45° con la horizontal (eje X positivo), pero indica la presencia de flujo no pistón tal como se puede evaluar con los valores del criterio t_{10}/t_{90} , los cuales

son 10 veces mayor a la unidad; en esta evaluación los tres reactores poseen un comportamiento casi similar con pequeñas dispersiones comparativas.

Se evalúa que el comportamiento inicial de los reactores 1 y 2 son similares en las primeras 32 horas, tiempo después del cual el reactor 1 toma una leve tendencia hacia un flujo mezclado, mientras que el reactor 2 continua con la misma tendencia de flujo mixto casi que equilibrado. El reactor 3 presenta variaciones en sus tasas de salida de trazador por lo que no posee una tendencia constante hacia algún modelo de flujo.

6.2.3. Evaluación por método de Wolf Resnick

Con los datos de la columna 6 y 7 de las tablas 3, 4 y 5 mostradas en los anexos, se graficó el porcentaje de trazador que permanece en los reactores durante los tiempos de ensayo, se trazó al gráfico semi logarítmico una recta tangente en el punto donde la curva tuviese tendencia vertical, estos puntos fueron obtenidos mediante un análisis de segmentos y se tomó el segmento en cuya línea de tendencia el R^2 fuese lo más cercano a 1, las gráficas obtenidas se muestran a continuación.

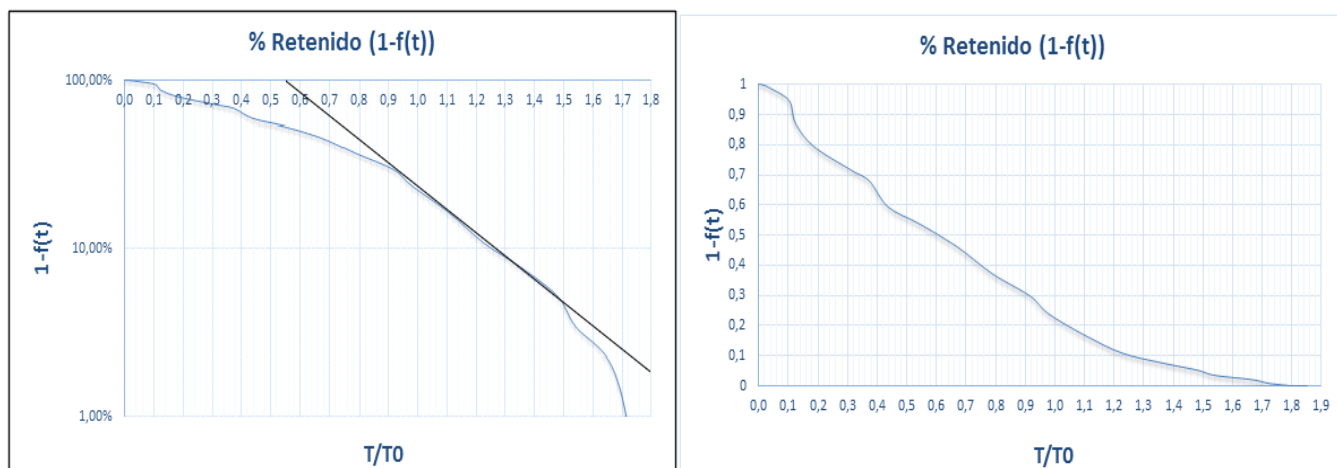


Grafico 7. % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 1

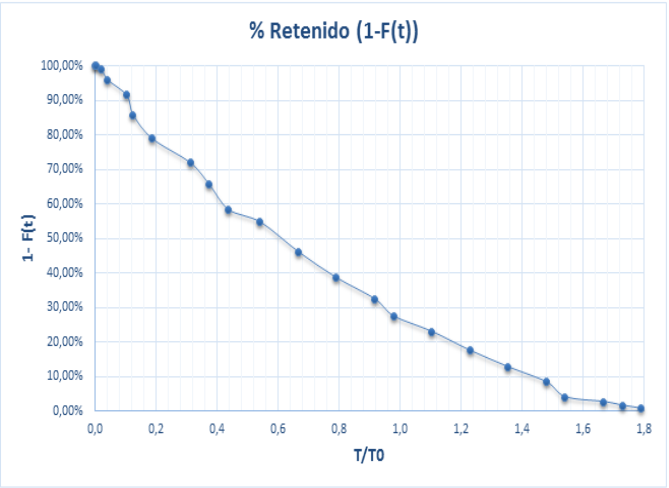
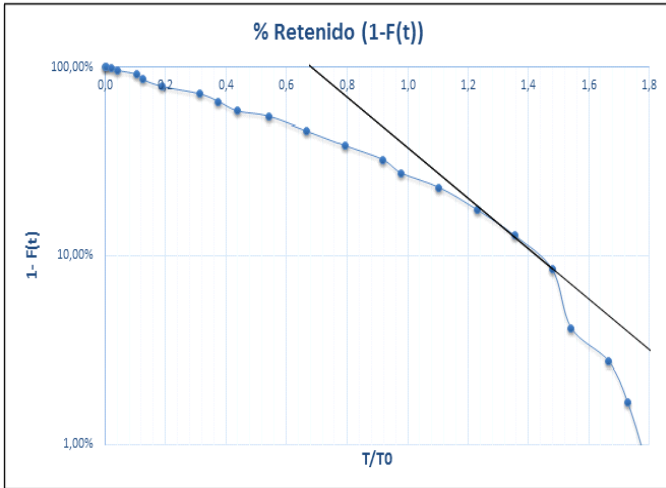


Gráfico 8. % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 2

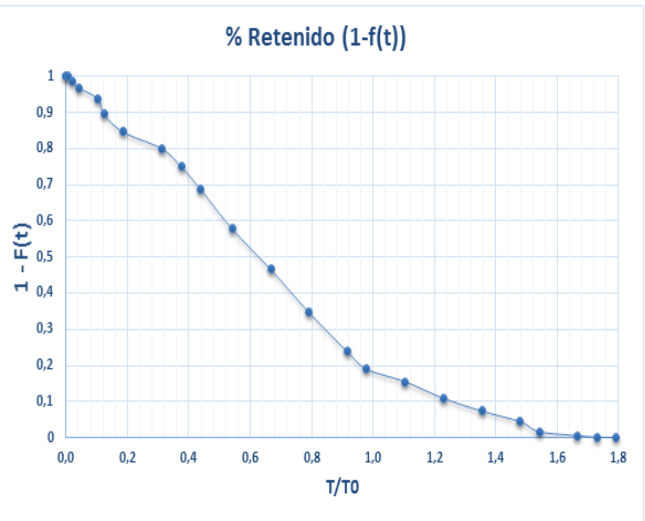
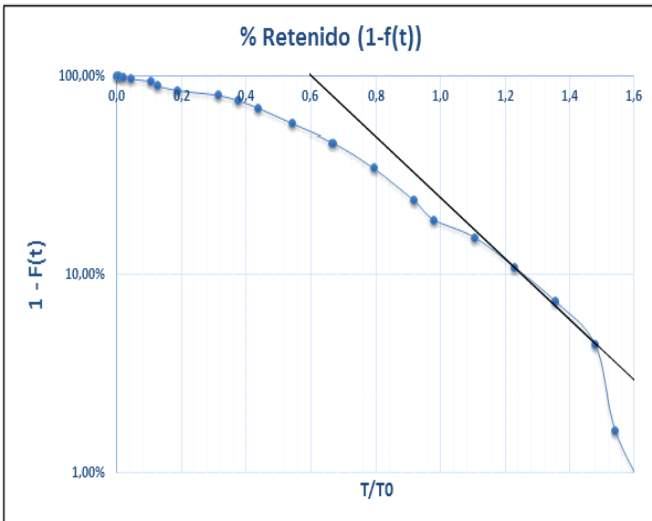


Gráfico 9. % de Trazador retenido (Curvas F(t)) para reactor 3

Al igual que en el ensayo de 1,28 días de retención, se calcularon los parámetros de evaluación de Resnick los cuales se tabularon en la tabla 18.

Tabla 18: % de Flujos y zonas muertas por reactor
Reactor 1 Reactor 2 Reactor 3

$T1/T0$	0,550	0,620	0,600
$T2/T0$	1,270	1,440	1,230
θ	0,550	0,620	0,600

$Tan(\alpha)$	1,389	1,220	1,587
P	64%	63%	69%
M	36%	37%	31%
m	14%	2%	13%

Los predomios de flujo corresponden en su mayoría al flujo pistón; los porcentajes de flujo pistón son de 64%, 63% y 69% para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente. Tal como se evaluó en los puntos anteriores, los reactores poseen características de comportamiento parecidas con índices de estilos de flujo cercanos, de ellos en el reactor 2 se presentó la mayor dispersión de flujo, presentando un índice del 37% de porcentaje de flujo mezclado; en cuanto a zonas muertas se puede apreciar que el reactor 2 posee la menor cantidad de zonas muertas mientras que el mayor volumen muerto se registra en el reactor 1.

6.3. Resultados para ensayo de dos días de retención teórica y flujo continuo

El último muestreo se tomó para el ensayo realizado a dos días de retención teórica cambiando el modo de ingreso del caudal afluyente de pulsos a continuo; para la realización de este ensayo fue necesario dar reposo al humedal de una semana, tiempo en el cual se hizo fluir un caudal constante de 36,77 lpd para que los reactores evacuaran rastros de salinidad de los ensayos anteriores. En la tabla 19 se presentan los resultados de la medición de la conductancia en el afluyente de los reactores para la última toma de muestras de esta investigación.

Tabla 19. Resultados de muestreo con conductivimetro en los 3 reactores para un tiempo teórico de retención de dos días y flujo continuo

TIEMPO (HORAS)	CONDUCTIVIDAD (mS)		
	ENEA	MANGLE	SIN PLANTA
0	0.435	0.45	0.423
0,25	0.435	0.45	0.423
0,5	0.435	0.45	0.423
1	0.446	0.875	0.43

2	0.497	0.912	0.485
3	0.672	0.918	0.723
6	1.07	0.967	0.897
9	0.978	0.954	0.798
15	1.12	1.2	1.12
18	1.23	1.35	1.28
21	1.34	1.47	1.42
24	1.25	1.49	1.29
27	1.76	1.53	1.38
30	1.89	1.94	1.69
33	1.75	1.98	2.014
36	2.01	2.21	1.96
39	2.12	2.93	2.24
42	2.28	2.89	2.58
45	2.45	2.81	2.56
48	2.37	2.85	2.45
51	2.4	2.72	2.23
54	2.28	2.61	2.36
57	2.01	2.54	2.12
60	2.1	2.32	2.03
63	1.87	2.25	2.09
66	1.74	2.16	1.89
69	1.62	2.09	1.54
72	1.45	1.76	1.32
75	1.5	1.79	1.09

78	1.33	1.65	0.76
81	1.01	1.43	0.64
84	0.78	1.25	0.51
87	0.68	1.31	0.55
90	0.55	1.14	0.445
93	0.48	1.02	0.423
96	0.435	0.87	0.423
99	0.435	0.64	0.52
102	0.435	0.51	0.423
105	0.435	0.47	0.423
108	0.435	0.45	0.423

6.3.1. Evaluación de resultados por el método de tendencia central.

Con los datos de mediciones presentados en la tabla 19, y los datos obtenidos en la curva de calibración representada en el Gráfico 1, se realizó la curva de concentraciones vs tiempo, para obtener los datos de la DTR, los cuales se presentan en el Gráfico10, la cual contiene la información de la salida del trazador en el tiempo.

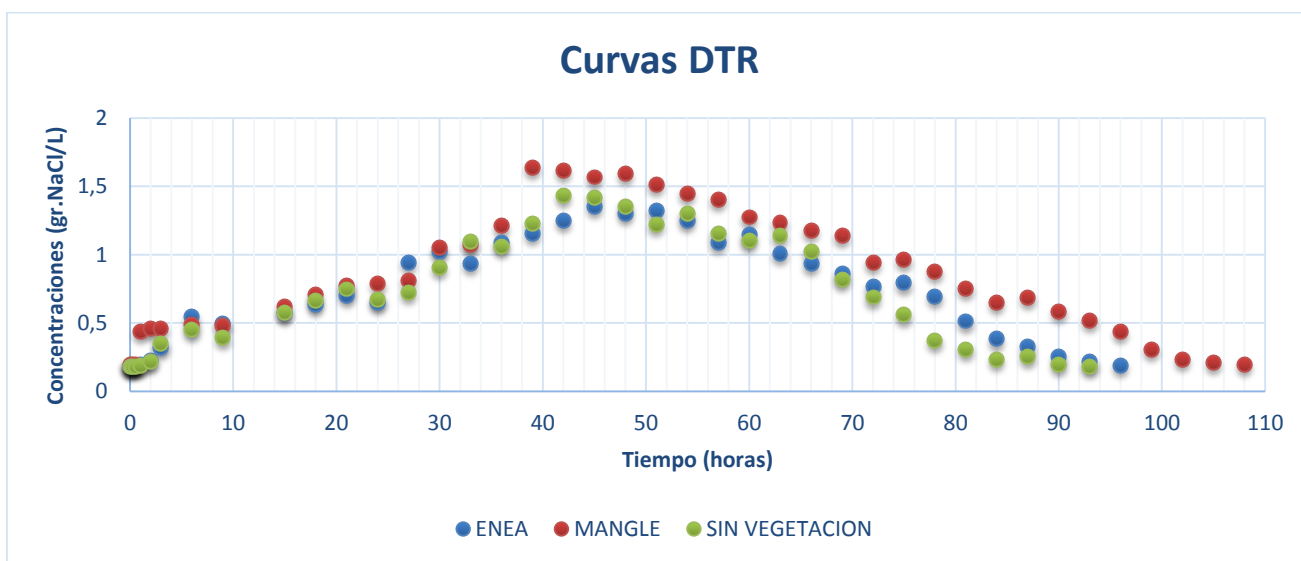


Gráfico 10. Concentración de cloruro de Sodio en función del tiempo para cada reactor

Las salidas apreciable del trazador se registraron pasada 1,5 hora después de la inyección en el reactor 2 , pasadas dos horas en el reactor 3 y pasadas tres horas en el reactor 1; el reactor 2 presenta mayores salidas de trazador en un corto tiempo lo cual induce a una idea de un cortocircuito. Las tendencias de salida de concentraciones para los reactores 1 y 2 son muy parecidas aun cuando el reactor 2 presentara la mayor salida de concentraciones de trazador en referencia al reactor 1 y este a su vez tiene una prolongación un poco mayor en el tiempo de salida lo que da una idea de una aparente mayor dispersión y mayores zonas muertas.

Las mayores concentraciones se registraron a las 45 horas para el reactor 1, a las 42,5 horas para el reactor 3 y a las 40 horas aproximadamente en el reactor 2 con valores que oscilan entre 1,35 y 1,64, siendo la mayor concentración registrada en el reactor 2. Es notable que aunque el reactor 2 tiene los registros mayores de salida es este mismo quien posee un tiempo final más amplio, lo cual es posible cuando el reactor pose zonas muertas en donde el trazador queda estancado y va saliendo a medida que se presentan mezclas de flujos en el reactor, lo que hace que la curva tome una forma alargada más que las curvas descritas por los otros reactores.

Los criterios de tendencia central se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20. Valores de parámetros y criterios de evaluación para cada reactor

PARAMETRO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOL.	CRITERIO	ENEA	MANGLE	REAC. BIOLOGIC.
t1	3	1.5	2				
t10	19	18.7	19	t1/t0	0.158	0.080	0.105
tp	45	40	42.5	tm/t0	0.969	1.010	0.927
tm	46,5	48.5	44.5	tp/t0	0.938	0.833	0.885
to	48	48	48	t10/t90	0.264	0.239	0.286
t90	72	78.4	66.5	e	0.188	0.615	0.208

En esta evaluación se puede considerar una tendencia bastante marcada hacia un flujo pistón pues la relación $tp/t0$ es bastante próxima a uno para los tres reactores, sin embargo el dar una totalidad de modelo pistón al sistema sería un error puesto que la relación no es

completamente la unidad por lo cual se afirma un flujo mixto con alto predominio de flujo pistón, a pesar del hecho de existir una tendencia hacia el flujo pistón, siguen presentándose cortocircuitos considerables los cuales se pueden apreciar en los valores de la relación del tiempo de salida inicia contra el tiempo teórico de retención, cuyos vares son menores a 0,3; sin embargo es de considerar que para el reactor 1 las condiciones de cortocircuitos son menos críticas que para el caso del reactor 2, quien posee un alto cortocircuito, lo cual se puede ver reflejado en la curva DTR del reactor 2 quien posee las mayores salidas y una dispersión mayor de flujo a razón de la existencia de pasos directos del afluente hacia el efluente. La relación del tiempo mediano contra el tiempo teórico es el indicativo que reafirma las deducciones de los indicativos anteriores para el caso de los reactores 1 y 3 cuyo indicativos son próximos a uno pero menores que uno indican la presencia de leves cortocircuitos con una tendencia al flujo pistón y una porción no muy grande de zonas muertas; para el caso del reactor 2 cuyo valor de relación es cercano a uno pero mayor a la unidad expresa la existencia de un flujo mixto con tendencias a flujo mixto pero con existencia de cortocircuitos considerables y porciones de volúmenes muertos.

6.3.2. Evaluación por el Método del Índice Morril

Siguiendo la metodología de las evaluaciones de los ensayos anteriores, se graficó el porcentaje de trazador que sale en función del tiempo y se evaluó el segmento de la curva comprendida entre la salida del 10% del trazador y la salida del 90%, tal como se muestra en el Gráfico 11.

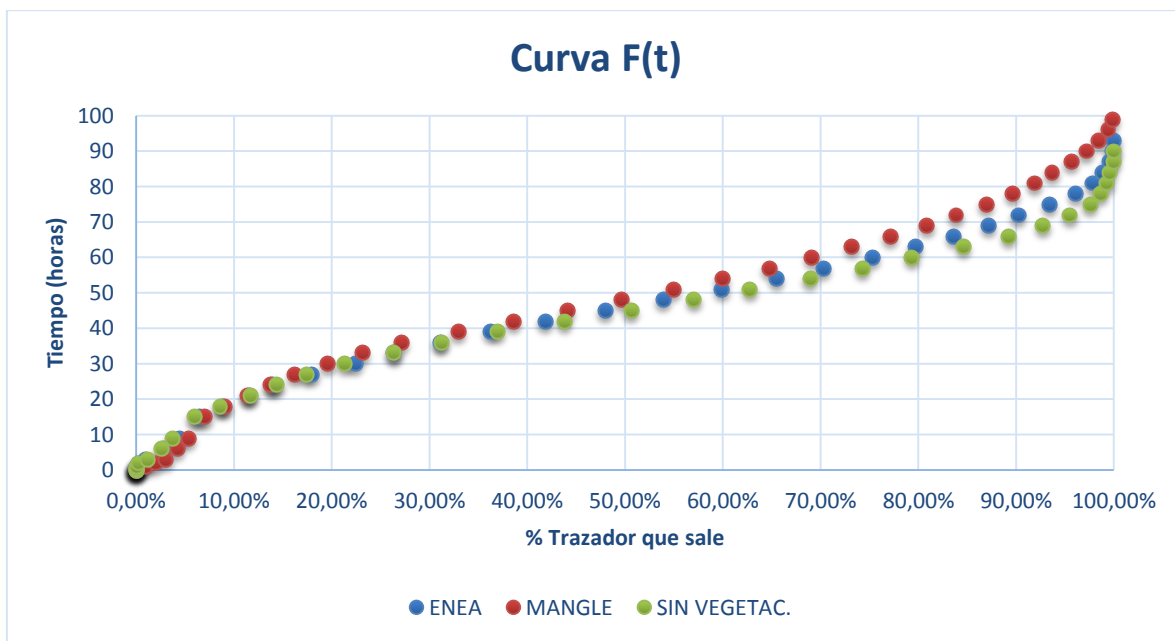


Gráfico 11. % de trazador que sale de los reactores en función del tiempo de ensayo

En complemento al índice matemático de Morril contenido en la Tabla 20 (t_{90}/t_{10}), en el gráfico 11 se puede analizar que los reactores poseen una tendencia muy similar, en las primeras 35 horas se puede afirmar que el comportamiento hidrodinámico de los 3 reactores fue casi el mismo, de este tiempo hasta el tiempo final de ensayo los reactores presentaron un comportamiento de tendencia de flujo mixto al poseer un punto de inflexión en la hora 40 y pasar de una curva cóncava a una convexa dando un porcentaje mayor al flujo de mezcla en los reactores.

6.3.3. Evaluación por el Método de Wolf Resnick

Las gráficas tomadas para esta evaluación se hicieron en base a los datos mostrados en las tablas 6, 7 y 8 de los anexos, las gráficas semilogarítmica de este modelo de evaluación corresponden a los Gráficos 12, 13 y 14.

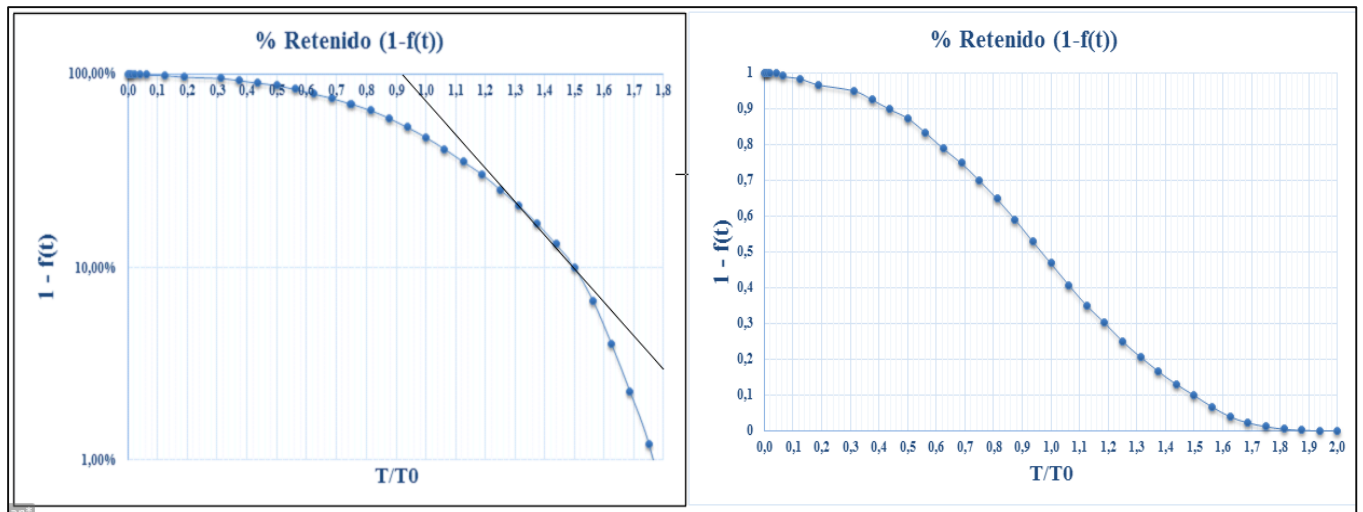


Grafico 12: % de Trazador retenido (Curvas 1- F(t)) para reactor 1

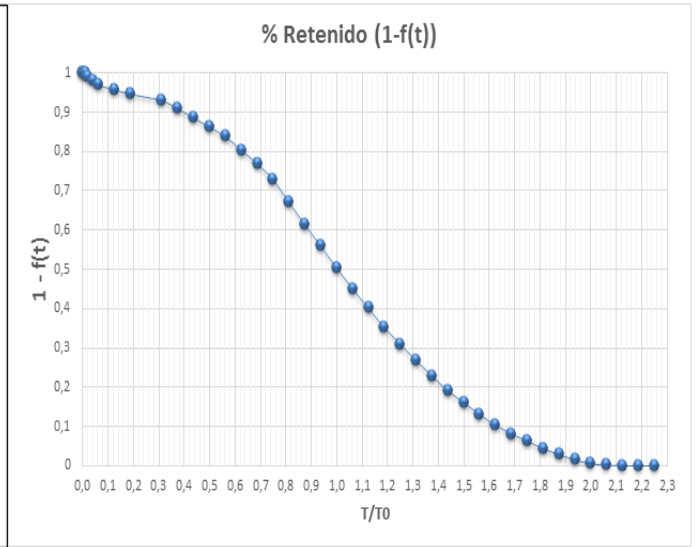
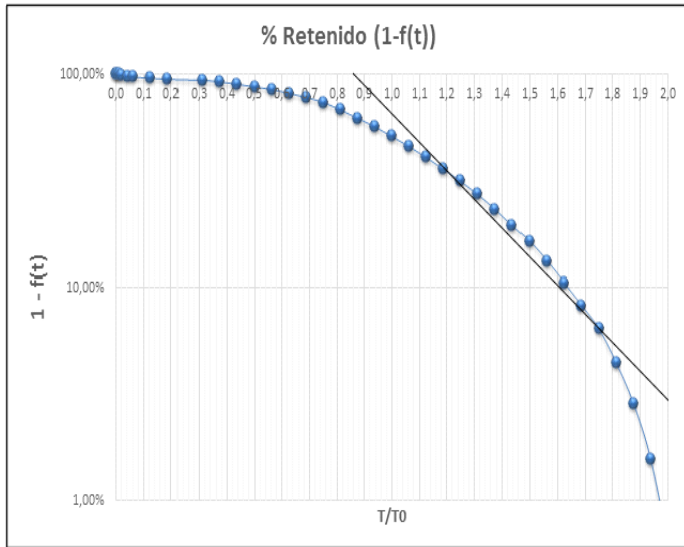


Grafico 13: % de Trazador retenido (Curvas $1 - F(t)$) para reactor 2

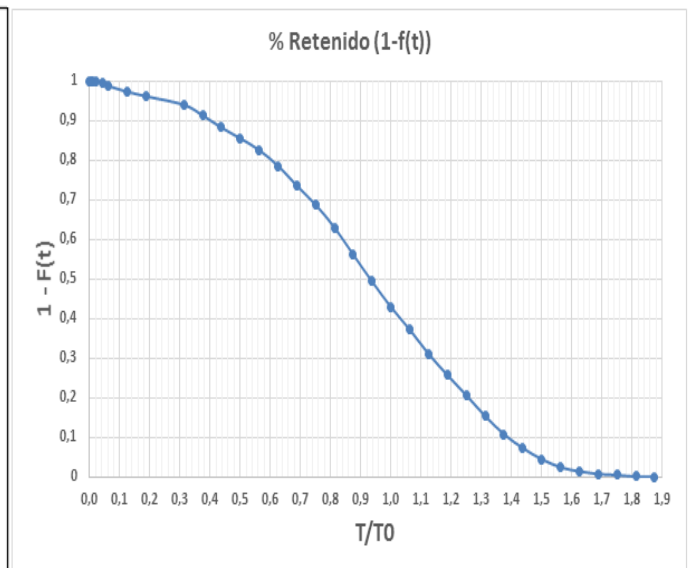
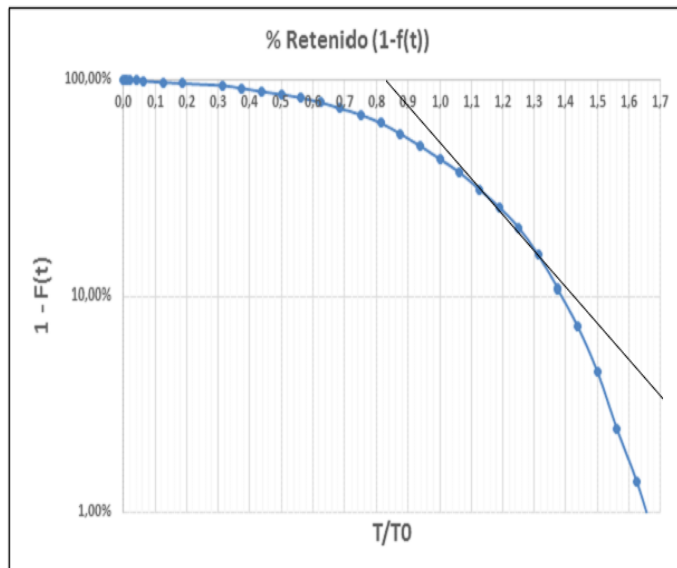


Grafico 14: % de Trazador retenido (Curvas $1 - F(t)$) para reactor 3

Los parámetros de indicadores de flujo se tomaron de las curvas $1 - F(t)$ representadas en los Gráficos 12, 13 y 14 para cada reactor respectivo, los datos corresponden a los puntos de intersección de la línea tangente al punto donde la curva tomara una tendencia vertical

contra los ejes del 100% de retención y el 10% retenido, estos resultados se presentan en la Tabla 21.

Tabla 21. % de flujos y zonas muertas por cada reactor

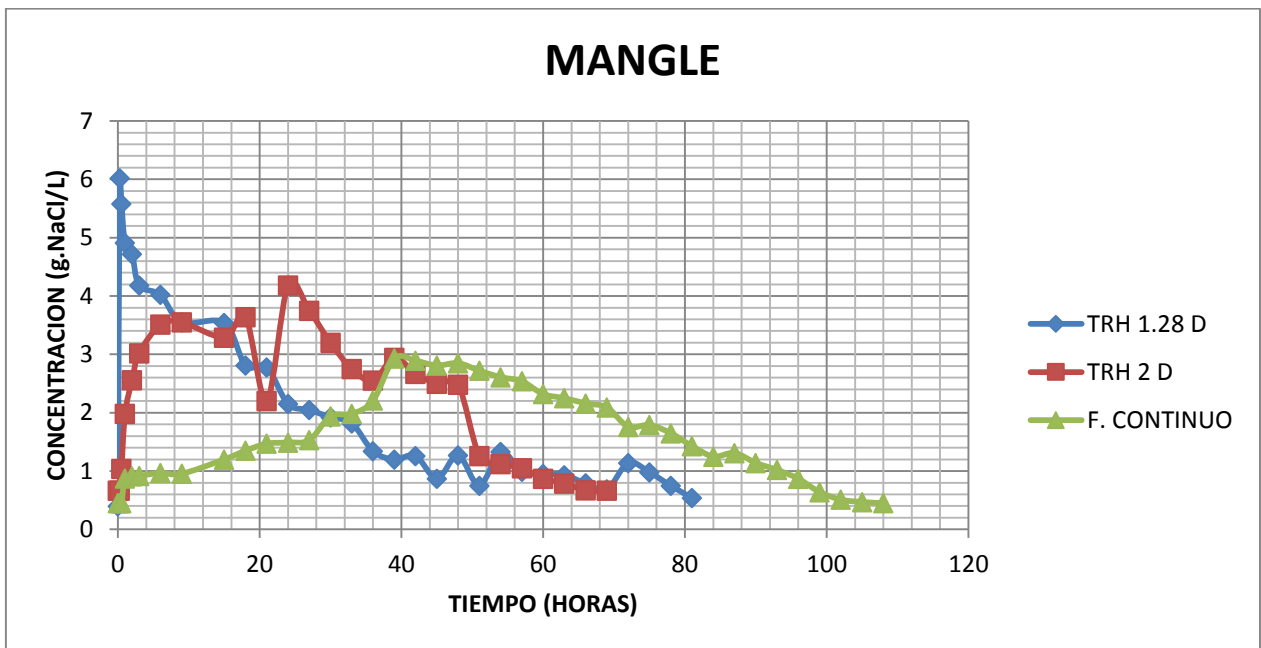
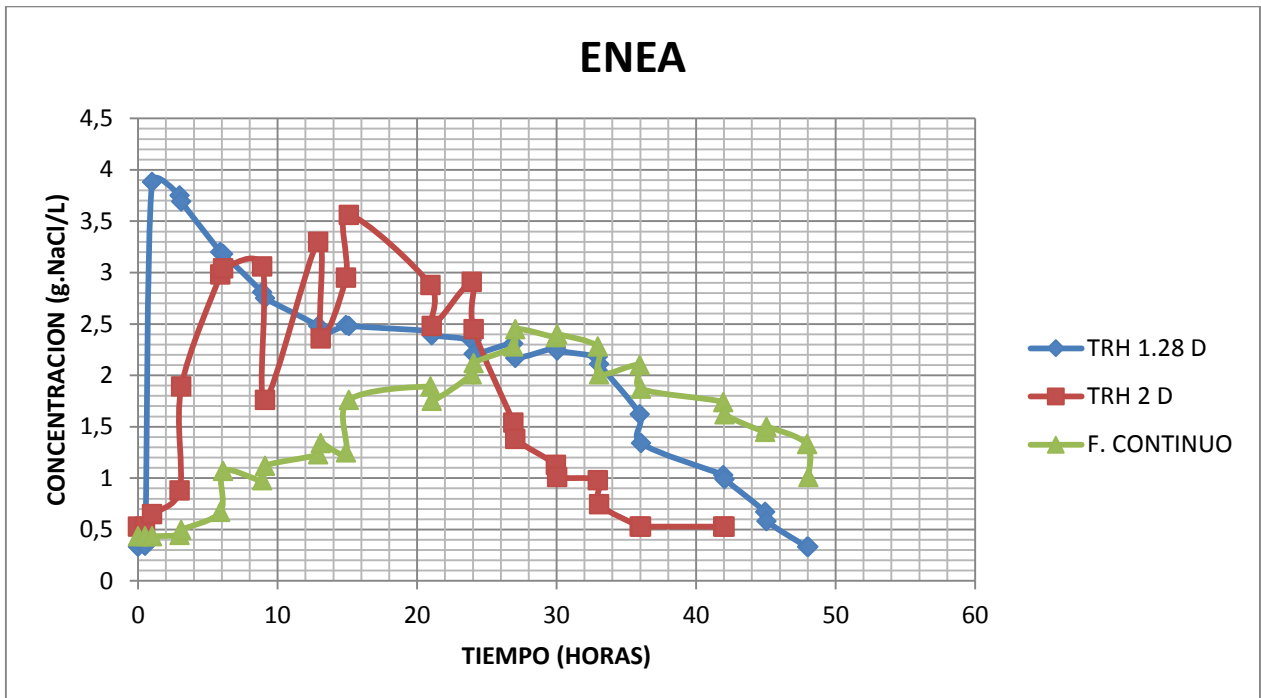
	REACTOR 1	REACTOR 2	REACTOR 3
T1/T0	0,920	0,880	0,830
T2/T0	1,500	1,600	1,440
θ	0,920	0,880	0,830
Tan(α)	1,724	1,389	1,639
P	78%	74%	76%
M	22%	26%	24%
m	17%	19%	10%

El predominio del flujo en los tres reactores corresponde al flujo pistón (P) con porcentajes mayores al 74% en los reactores, los porcentajes presentados por los reactores son casi iguales con una diferencia marginal de solo el 6% en porcentaje a valores de datos, es de aceptar que a pesar de ser el reactor 1 el segundo con mayor zonas muertas (m), es el que mejor califica al modelo de diseño original del reactor pues posee un tiempo de retención más cercano al teórico y tiene mayor porción de flujo pistón, seguido por el reactor 3 quien posee el menor volumen muerto y un porcentaje de flujo pistón del 76%. El reactor 2 es quien posee la mayor porción de flujo mixto y el mayor registro de zonas muertas poseyendo mayores dispersiones y una lejanía mayor al tiempo teórico de retención.

6.4. Discusión

En los ensayos anteriormente realizados cuya meta principal era encontrar las curvas de distribución de tiempos de residencia se obtuvieron resultados para tres tipos de reactores cada uno equipado con las mismas características y diferenciados solamente por el tipo de vegetación utilizada. De los resultados obtenidos se encontraron algunos puntos sobre los cuales es necesario hacer un análisis y mirar las diferencias entre el comportamiento de los reactores.

6.4.1. Características hidráulicas de los reactores.



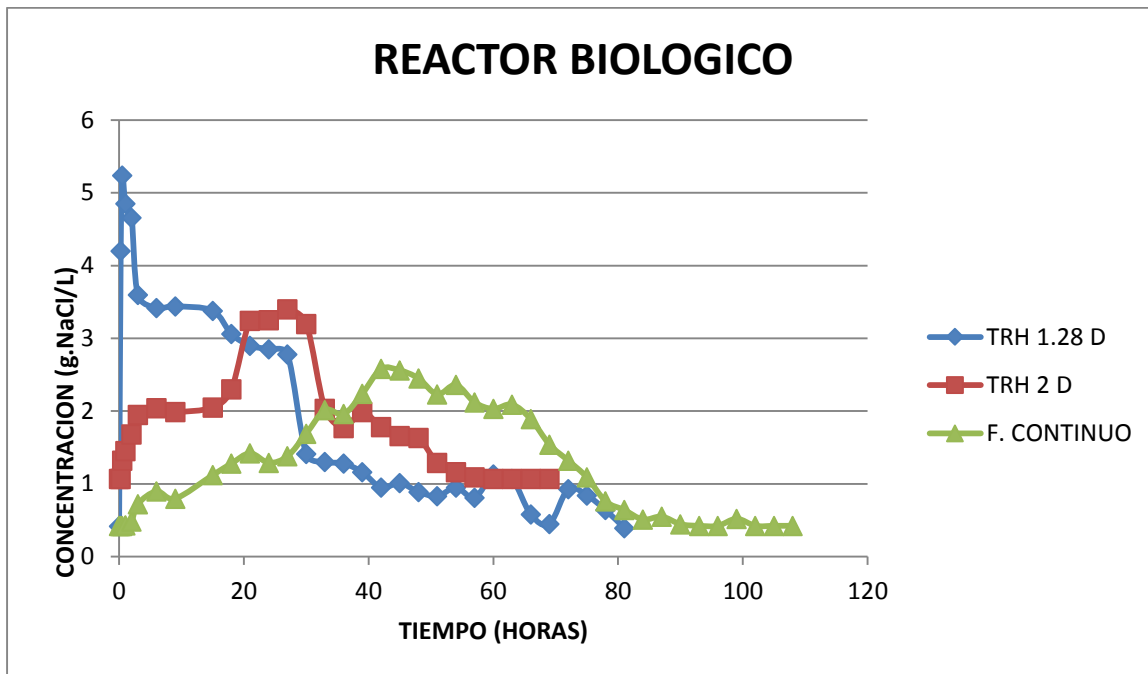


Gráfico 15: comparativo de curvas de DTR de los ensayos realizados

Tal como se puede observar en el gráfico 15, es evidente que en cada ensayo que el reactor 2 (mangle) fue quien obtuvo el mayor porcentaje de dispersión y el menor lo obtuvo el reactor 1 (Enea) lo cual se ve reflejado en cada evaluación, una característica que podría causar esto es la forma de las raíces de cada planta y su modo de crecimiento. Para el caso del mangle que posee una raíz leñosa y gruesa de tipo adventicias penetrantes, el crecimiento de estas raíces que puede atravesar diferentes estratos del humedal, crea un camino por donde el flujo del agua es mayor que en los demás casos estudiados (otros tipos de vegetación usado en el estudio), produciendo corto circuitos hidráulicos tal como se ve reflejado en los ensayos de trazador donde para el reactor 2 se obtuvieron las mayores concentraciones en menores tiempos. Por otro lado la enea aun cuando posee una raíz principal penetrante, posee también una raíz densa ramificada que trata de compactarse en la zona del reactor; este tipo de raíz retiene el flujo por un tiempo mayor a lo que lo retiene inclusive el filtro biológico, lo cual genera a su vez un sistema de amortización en la energía con la que los pulsos ingresan a los reactores, estabilizando el flujo y permitiendo que este posea una característica menos turbulenta, tal como se puede ver reflejado en los resultados al ser el reactor 1 quien posee los registros de porcentaje mayores en flujo pistón.

Para el caso del primer y segundo ensayo puesto que el modo de ingreso del flujo fue por pulsos, el volumen bajo el cual trabajaron los reactores no corresponde al volumen total que se creía efectivo de cada reactor, puesto que el volumen para el caso del segundo ensayo (tiempo teórico de 2 días) el volumen total era obtenido al ingresar cada pulso; por lo que

este flujo variaba entonces con la salida del efluente y volvía a ser completado en el ingreso del siguiente pulso. Para el caso del primer ensayo (tiempo teórico de 1,28 días) es más agudo el impase, pues aquí se tomó un volumen de control de aproximadamente 60 litros los cuales se mantenían de constantes. Esto marca una diferencia rotunda en cada ensayo pues tal cómo se expresa en la Ecuación 1 el tiempo de retención es directamente proporcional al volumen del reactor y si este varía, el tiempo de retención varía con él, por lo que es recomendable efectuar los ensayos buscando mecanismos en que las variaciones de volumen que se presentan en la forma del flujo por pulso no agudicen y representen un minúsculo error.

En la evaluación de tendencia central mucho de los puntos de criterios fueron tomados mediante interpolación de los datos obtenidos, asumiendo que entre segmentos de puntos el comportamiento era lineal, para lo cual se obtuvieron algunos datos semejantes en los reactores ya que los datos eran tomados al mismo tiempo y con la misma frecuencia; se sugiere que la mejor alternativa para acoplar los datos a una mejor realidad sería implementar un mecanismo donde los datos pudiesen ser obtenidos en intervalos menores a los implementados en este estudio en lo cual se obtendrán datos más exactos al comportamiento real.

Al interpretar los resultados obtenidos, se puede analizar un cambio en las eficiencias y características hidráulicas de los reactores entre ensayos. Estas diferencias no se deben en sí al cambio de caudal o implementación de otro tiempo residente, sino a la forma de ingreso del afluente y al volumen establecido como efectivo y de control, puesto que cuando se ingresan volúmenes por pulsos, la energía de entrada causa turbulencias en el reactor y ya que este es medianamente pequeño, estas turbulencias son causantes de fuertes diluciones provocando una inclinación a un flujo mezclado lo cual se agudiza con la proporción del pulso y el tiempo de reposo. Es notable que en el segundo ensayo la tendencia a un flujo mezclado disminuye, esto es debido a que por ser los pulsos más pequeños y en periodos más cortos el comportamiento del afluente es a un flujo semi continuo lo que provoca una inclinación a un flujo ideal, tal como sucede en un flujo continuo sin mezcla interna en el reactor.

Es evidente que al inclinar el afluente hacia un modelo de entrada de flujo continuo las características hidrodinámicas mejoran, esto se debe en muchos aspectos a la energía de entrada del fluido; cuando se ingresan pulsos a los reactores estos por tener que ser ingresados en cortos periodos la energía con la que ingresan causan alteraciones en la dinámica de los fluidos presentes en los reactores sumando a ello que las temperaturas de masas son diferentes por lo que es fácil que se pueda presentar flujo convectivo al interactuar la energía de entrada con la diferencias de temperaturas.

Algo a tener presente y que es fácilmente apreciable en los tres ensayos es la no existencia de un flujo único; en términos generales, las curvas DTR obtenidas son similares a las encontradas en estudios que se han llevado a cabo para analizar humedales construidos, donde se aprecia un primer comportamiento asociado a flujo pistón, seguido de una tendencia de mezcla completa (Rousseau et al., 2004; Marsili-Libelli y Checchi, 2005; Chazarenc et al., 2006; Kadlec y Wallace, 2009). Es por ello que se debe considerar en futuros estudios que se quieran realizar en los reactores la implantación de un modelo de flujo pistón con dispersiones, asumiendo de entrada la posibilidad de existencias de zonas muertas, de modo que pueda adoptar en el modelo situaciones no tan idealizadas.

6.4.2. Influencia de la sal como trazador en los estudios de determinación de tiempos de residencia.

A pesar de la característica del mangle de absorber salinidad y retenerla en su tallo, en esta experiencia se obtuvo que la recuperación del trazador fue mayor en el reactor 2 y menor en el reactor 1 con proporciones del 97%, 92% y 83% para cada reactor respectivamente; una pregunta que podría surgir de ello es el por qué el reactor 3 siendo de control tiene la menor recuperación de trazador; esto podría responderse al analizar los porcentajes de volumen muerto de cada reactor donde es el reactor 3 quien posee el mayor volumen muerto lo cual evidencia la retención de una cantidad de trazador que fue expulsado en lentamente después del ensayo inicial, por lo cual en el segundo ensayo se registra para el reactor 3 una conductividad inicial mucho mayor en comparación a la que normalmente podría poseer el agua en los reactores (hasta 0,8 mS).

En los análisis hechos en los tres ensayos a las curvas de DTR en donde existían fluctuaciones en las salidas de los datos, se toma la determinación del suceso debido a posible presencia de flujo de convección, sin embargo puesto que la medida de toma de muestras era de conductancia y no de salinidad, es posible que esto se produzca por el cambio de la conductancia del fluido inducido por el cambio de pH o de temperatura sin la presencia de un flujo convectivo, por lo que sería más eficiente el estudio con el trazador NaCl midiendo salinidad o concentraciones y no conductancia.

La sal como sustancia trazadora tiene un largo recorrido, siendo esta el trazador más antiguo usado en los afluentes kársticos, sin embargo, para su correcto uso es necesario tener en cuenta que el uso en proporciones superiores o cercanos al valor de saturación (por cada 100 g de agua, se disuelven 37,5 g de sal) por lo cual se recomienda su uso en pequeñas proporciones ya que esta es detectable desde los 10 ppm. Para el uso de la sal como trazador se debe garantizar que la solución a inyectar en el afluente tenga una concentración mayor a la concentración natural del afluente; es necesario tener presente que al disolver sal en agua se altera la densidad normal de ésta, y si se tienen valores de disoluciones altas, podrían presentarse corrientes cinéticas en los reactores causadas por estas diferencias de densidades, por lo cual se ha estimado que el uso del trazador se haga en reactores

pequeños donde la concentración de salinidad del agua no sea muy grande (contenido de cloruros entre 50 y 100 ppm) (Antigüedad et. al.)(Lesser 1987). Por tanto, el límite de uso de la sal como trazador es la cantidad que se emplea para aumentar la conductividad del agua natural del sistema y poder registrar el pico de la curva de flujo, lo cual está ligado al nivel bajo de registro de conductividad, si esta es inferior a 100 micro siemens, se puede añadir una pequeña cantidad por metro cubico sobrepasando los 10 ppm; pero cuando la conductividad del agua natural del sistema es mayor a 500 micro siemens, se deben añadir como mínimo 5 kg de sustancia trazadora por cada 1000 litros de agua; para los casos en que la conductividad del agua natural sistema se aproxime a un siemens, se recomienda no usar sal como sustancia trazadora, pues la cantidad requerida para aumentar la conductividad de agua natural del sistema puede provocar flujos de difusión al poseer el volumen con trazador a incorporar de mayor densidad y menor temperatura que el afluente del sistema (C. Comina, et al.)(Dann Moore, 2004). En los humedales artificiales, por lo general, los flujos encontrados se caracterizan por bajos números de Reynolds, a veces incluso dentro del régimen de flujo laminar; en tales condiciones la inyección de la sal puede causar efectos de densidad fuertes, amenazando así la utilidad de las curvas de distribución de tiempos de residencia, pero manteniendo controladas las variables de temperatura, y concentraciones, los datos obtenidos en los ensayos de trazadores con sal común, son muy eficientes y confiables (Bernhard Schmid, et al., 2004)

Muchos de los ensayos con trazadores realizados para comparar la eficiencia entre los diferentes tipos de trazadores, se ha determinado que la forma de medición de los trazadores iónicos es la conductividad y resistividad; sin embargo es de vital importancia tener presente que este parámetro de medida puede ser alterado por la temperatura, pues al aumentar la temperatura disminuye la solubilidad de los gases y aumenta la de las sales, aumentando a su vez la conductividad, pues El flujo de electrones entre los electrodos en una solución de electrolitos varía con la temperatura de la solución (UNAD, 2010).

Para este estudio se calcularon cantidades de trazador de tal forma que las concentraciones de la solución inyectada al efluente fuesen bajas en relación del límite de saturación, aplicando 1,4g de sal por cada litro de agua (solución máxima aplicada) de modo que los datos obtenidos tuviesen el menor error posible a causa de la propagación rápida del trazador en el reactor causada por flujo convectivo.

6.4.3. Eficiencias hidráulicas de los reactores

Las eficiencias hidráulicas de los reactores dependen de la forma de ingreso del fluente, puesto que es esta quien determina el comportamiento hidráulico haciendo efecto directo sobre el tiempo de retención; el comportamiento hidráulico está dado por el factor de relación entre el tiempo experimental de retención y el tiempo teórico de retención; el tiempo de retención teórico puede tomarse como el tiempo se salida de concentración máxima cuando en el ensayo la DTR pertenece a un modelo de flujo ideal, pero cuando el

comportamiento tiende a una mezcla perfecta tal como se ve reflejado en el primer ensayo de trazador, Yelgoankar, 2002 establece que el tiempo mediano de retención puede ser calculado mediante las relaciones del tiempo teórico de retención con el porcentaje de zonas muertas, tal como se establece en la Ecuación 21.

$$\% Vol. muerto = \left(1 - \frac{\text{Tiempo de retención experimental}}{\text{Tiempo teórico de retención}}\right) * 100 \quad \text{Ecuación 21}$$

En la Tabla 21 se muestran los tiempos de retención experimentales obtenidos para cada ensayo con su respectiva eficiencia hidráulica de acuerdo a cada reactor.

Tabla 21. Tiempo de retención obtenidos experimentalmente y Eficiencias hidráulicas de cada reactor por ensayo realizado

	Tiempos de retención experimentales de acuerdo a cada ensayo realizado (en días)			Eficiencias hidráulicas de acuerdo al tiempo teórico de retención de cada ensayo realizado		
	1,28 D	2 D	2 D (F. Con.)	1,28 D	2 D	2 D (F. Con.)
ENEA	0.71	1.6	1.88	35.50%	80.00%	94.00%
MANGLE	0.59	1.35	1.67	46.09%	67.50%	83.50%
REAC. BIOL.	0.56	1.6	1.77	43.75%	80.00%	88.50%

Tal como se aprecia en la tabla el mejor comportamiento de eficiencia hidráulica se presenta cuando el reactor opera bajo condiciones de flujo continuo siendo su eficiencia mayor al 83%.

Este estudio que implicó la utilización de material bibliográfico que se respaldara en investigaciones similares con humedales artificiales de tipo vertical, además de basarse en mejorar un diseño ya existente e investigaciones previas de optimización (Simancas & Herrera, 2011; Curiel & Palomino, 2012; Caballero & Osorio, 20115), se puede considerar como un aporte investigativo muy valioso gracias a que muestra el comportamiento que puede tener el reactor al implementar un tipo de flujo (Bach o continuo), que permiten llevar a mejores desempeños un sistema de tratamiento de aguas residuales mediante un humedal de flujo sub superficial, dando información complementaria sobre comparaciones entre vegetaciones usadas con anterioridad, lo cual representa en muchos casos un ahorro económico considerable. Asimismo, dentro del estado del arte en el que se sitúa este proyecto de grado, no es común encontrar estudios sobre comportamiento hidrodinámico en un humedal artificial netamente vertical.

En cuanto a las limitaciones que de alguna manera influyeron en el proceso de la investigación, una de las más evidentes fue encontrar un equipo para mediciones de concentraciones que diera mayor respaldo a los resultados obtenidos y la baja posibilidad de tomar muestras en tiempos menores a los establecidos. Además el deterioro de las

tuberías, válvulas y llaves y la falta de mantenimiento requirieron de una intervención preliminar al trabajo experimental que estaba por realizarse, lo que generó una mayor extensión en el tiempo programado para la realización de este proyecto investigativo.

7. CONCLUSIONES

Con la realización del proceso investigativo se pudo llegar a las siguientes conclusiones acerca de la optimización del desempeño del humedal artificial vertical y una serie de recomendaciones para futuros estudios similares a este.

De los resultados obtenidos en cada uno de los tres ensayos realizados se puede concluir que las eficiencias hidráulicas de los reactores varía de acuerdo a la forma de ingreso del afluente, la eficiencia hidráulica obtenida para el ensayo de 1,28 días de tiempo teórico de retención fue de 0.71 días, 0.59 días y 0.56 días para los reactores 1, 2 y 3 respectivamente; es evidente que el tiempo obtenido en este ensayo para los reactores 2 y 3 no corresponden ni a la mitad del tiempo teórico de retención lo que infiere a una pobre eficiencia hidráulica. Los tiempos de retención registrados por los reactores 1, 2 y 3 para el segundo ensayo de 2 días de tiempo teórico de retención e ingreso de afluente por pulsos fueron de 1.6 días, 1.35 días y 1.6 días, respectivamente, obteniendo eficiencias mayores del 80% para los reactores 1 y 3 y una eficiencia de solo 67.6% para el reactor 2. Para el último ensayo de trazador realizado para un tiempo de retención teórica de dos días con afluente de ingreso continuo, los tiempos obtenidos en el ensayo fueron de 1.88 días, 1.67 días y 1.77 días para los reactores respectivos, la eficiencia encontrada para el reactor 1 es bastante aceptable en modelos de sistemas de reactores, el cual obtuvo una eficiencia mayores al 90%, entre tanto que las eficiencias registradas para los reactores 2 y 3 fueron del 83% y el 88%.

Teniendo en cuenta la meta principal de este proyecto investigativo de determinar las curvas de distribución de tiempos de residencia para proponer ajustes desde el punto de vista hidráulico, se puede contrastar con las investigaciones previas a esta, realizadas en el sistema de humedales de flujo vertical estudiado donde los estudios realizados se hicieron bajo la consideraciones hidrodinámicas de un flujo pistón sin presencia de zonas muertas, que los modelos usados han sido inapropiados para el estudio de los reactores, pues aunque el modelo de flujo de operación ha sido por cochadas (tipo Batch), al existir entradas repentinas de volúmenes de fluido al sistema causan grandes perturbaciones que hacen que el sistema opere casi a un modelo completamente mezclado y no por flujo pistón, sumando a esto que los tiempos de ingreso de pulsos son tan cercanos que se podría promediar incluso un pulso equivalente total en un tiempo t muy cercano al tiempo de inicio del estudio lo que combinado con la existencias de zonas muertas generan un volumen que no eclosiona en el sistema dando como resultado una menor remoción de la que se puede obtener al optimizar el sistema disminuyendo este tipo de zonas.

El comportamiento hidrodinámico de los reactores corresponde a un modelo de flujo mixto, donde el porcentaje de flujo pistón y mezclado dependen de la forma de entrada del afluente, de modo que si el afluente es ingresado en grandes pulsos ya sea en periodos pequeño o grandes el porcentaje de flujo pistón es tan pequeño que el comportamiento

hidrodinámico tiende al de un sistema de mezcla completa puesto que por ser la salida una magnitud de caudal pequeña (si se tiene una salida continua) o si se sostiene un modelo de operación por cochadas, en el reactor se presentan flujos convectivo que hacen que el agua contenida en los reactores equilibren sus propiedades (pH, temperatura, concentraciones de sales, etc.) a medida que el afluente tiende a ser el de un flujo continuo ya sea por flujo intermitente o por pequeños pulsos ingresados en intervalos de tiempos pequeños, el comportamiento hidrodinámico del sistema tiende a acrecentar el porcentaje de flujo pistón con dispersiones de flujo.

Dado el diseño geométrico de los reactores, estos poseen una pequeña zona muerta que no depende de la configuración de los reactores en cuanto a estratos o plantación sino a la posición del orificio de salida del efluente, por lo cual las investigaciones que se realicen en él, deben adoptar un modelo de flujo mixto con presencia de zonas muertas para poder obtener resultados más acordes a los que se pudiesen obtener si se comparan con los arrojados por un modelo (experimento vs teoría). Por lo que se enmarca la relevancia de tener conciencia del comportamiento hidrodinámico real que posee un reactor al momento de querer realizar investigaciones en él, y no asumir un estado ideal que casi nunca es conseguido en ninguno de ellos.

El análisis comparativo de la vegetación usada en este estudio arroja que la planta de mejor comportamiento ante la caracterización hidrodinámica corresponde a la vegetación de Enea, esto se concluye de los resultados arrojados por los ensayos realizados, donde se aprecia que este tipo de vegetación no solo posee mejores remociones (ver estudios realizados por Curiel & Palomino y Caballero & Osorio), sino que da al sistema una cercanía a la de un modelo de flujo pistón, con una dispersión de datos de solo el 16% y un porcentaje de flujo pistón mayor al 70%, esto se cree debido a la naturaleza de sus raíces las cuales por ser de forma radial hacen que el suelo orgánico quede un poco más compacto logrando hacer un efecto de retardo en el gradiente hidráulico y por ende permitiendo que el agua tenga la posibilidad de depurarse en este sustrato y no pasar por el solamente. A diferencia de la Enea, el Mangle ejerce una acción adversa a la caracterización hidrodinámica pues dado que sus raíces crecen de forma acelerada y son gruesas, al tener dicha naturaleza atraviesan fácilmente los estratos de configuración del humedal permitiendo un paso directo del fluido entrante hacia los estratos inferiores, ocasionando cortocircuitos hidráulicos y disminuyendo por ende el tiempo de retención del sistema; al permitir un paso directo del fluido a los estratos inferiores causa una mezcla internamente, lo cual se ve reflejado en los estudios mostrados en donde el reactor 2 cuya vegetación fue el Mangle, posee el mayor porcentaje de flujo mezclado y los mayores cortocircuitos. Estos resultados son homologados con los resultados obtenidos por Curiel & Palomino, quienes establecen que la mejor vegetación para un humedal artificial de flujo vertical es Enea (*Typha Litifolia*).

En cuanto a la metodología de evaluación de tiempos de residencias, el mejor procedimiento de evaluación se obtiene bajo la operación bajo flujo continuo y un análisis por el modelo de Wolf Resnick, el cual permite obtener datos más concretos que los otros modelos de evaluación.

En lo que respecta al uso del trazador, tal como se discutió en el capítulo anterior su uso aunque muy amplio en los estudios con trazadores, está restringido con las concentraciones del afluente. En este estudio se encontró que el uso de sal como trazador arroja resultados confiables por tener una recuperación considerablemente buena (mayor al 85%), las pérdidas de trazador que se presentaron en el estudio corresponden a filtraciones en los reactores. Asociado a esto la vegetación estudiada no presentó captaciones considerables de trazador, lo que da respaldo al uso de sal como trazador y de los resultados obtenidos en este estudio.

8. RECOMENDACIONES

Luego de obtener los resultados y cálculos y antes de dar una conclusión final a cerca de los ensayos, es necesario tener en cuenta los siguientes criterios.

- a) La variación de la temperatura del medio ambiente o del agua ocasiona variaciones en los resultados al producir corrientes térmicas, cuyos efectos se deben considerar.
- b) A pesar que los reactores responden a un flujo vertical con sustratos cuyo gradiente hidráulico se encuentra entre los rangos normales de diseño, se puede observar en los estudios realizados y mostrados anteriormente, un porcentaje considerable de espacios muertos; un gran porcentaje de este volumen muerto corresponde al volumen contenido en la zona inferior de los reactores, puesto que en el diseño de los reactores se hicieron las perforaciones de salida a unos 8 cm por encima del fondo de los reactores, lo que efectúa una zona de estancamiento donde el flujo es menor en comparación con los puntos restantes de los reactores; por lo que se recomienda tener en cuenta esta parte como referente al momento de analizar las zonas muertas
- c) Al momento de tomar las medidas iniciales de fluido (antes de la aplicación del trazador) se encontraron que este presentaba algunas variaciones, por lo que es necesario efectuar una estabilización a los reactores ya sea aplicando constantemente una pequeña cantidad de trazador durante un periodo considerable que garantice la estabilización (2 veces el tiempo del ensayo) o con descargas constantes de agua cuya concentración sea la misma para toda la masa a descargar en los reactores.
- d) En referencia al capítulo 6 y 7 sobre el uso de sal como trazador, se recomienda el uso de medidores de salinidad y no de conductividad al momento de efectuar ensayos con trazadores con sal común o efectuar mediciones con intervalos de recolección cercanos (cada 10 min), manteniendo controlada en lo máximo la temperatura del agua en los reactores.
- e) Con el fin de poseer una información más compacta a cerca de los reactores, se recomienda efectuar estudios en los tiempos de residencia y remociones cambiando el tipo de estratos a estratos con menores diámetros y a su vez analizar los resultados obtenidos al intercalar los sustratos rocosos con pequeñas capas de arena.

- f) En proporción al punto D, es recomendable efectuar mediciones de los coeficientes cinéticos de remoción de primer orden para determinar si estos varían o si las diferencias entre las remociones experimentales encontradas por Curiel y Palomino y las teóricas se deben al cambio de estos coeficientes o a alguna otra causa.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Antigüedad I, Ibarra V, Morales T

Tracers in the karstic hydrogeology: Methodology of the use and explanation of the tracing results

MUNIBE vol. 41, pp. 31-45, 1990

C. Comina, M. Lasagna, D. A. De Luca, L. Sambuelli²

Discharge measurement with salt dilution method in irrigation canals: direct sampling and geophysical controls

Hydrology and earth system sciences, vol. 10, 2013

CA Prochaska, AI Zouboulis, KM Eskridge

Performance of pilot-scale vertical-flow constructed wetlands, as affected by season, substrate, hydraulic load and frequency of application of simulated urban sewage

Ecol, Ing., 31 (2007), pp. 57-66

Cano Luz Piedad

Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio.

Trabajo de grado, universidad Tecnológica de Pereira 2010, pp. 12

Carlos Andrés Sabas

Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio.

Trabajo de grado. Universidad tecnológica de Pereira (2011)

Delia Curiel, R. Julio Palomino.

Optimización de una planta piloto de humedal artificial de flujo vertical para el tratamiento de las aguas residuales de la universidad de Cartagena sede piedra de Bolívar.

Trabajo de tesis, universidad de Cartagena (2012)

Enrique de Azcoitia Toribio, Joan García Serrano

Efecto de sobrecargas hidráulicas en el rendimiento de humedales construidos para la depuración de aguas

Trabajo de tesis (especialización), universidad Politécnica de Cataluña, saneamiento ambiental (2012).

Galvis Gerardo

Consideraciones sobre la aplicación del modelo simplificado de Wolf y Resnick.
XXVII congreso nacional de Ingeniería Sanitaria y Ambiental. Barranquilla (1984)

Harden H., Chanton J., Rose J., Jhon D., Hooks M.

Comparison of sulphur hexafluoride, fluorescein and rodhamine dyes and the bacteriophage PRD-1 in tracing subsurface flow

Journal of hidrology. Vol. 277, 100-115

Heike Hoffmann, Christoph Platzer, Martina Winker, Elisabeth von Muench. (Febrero, 2011). **Technology Review of Constructed Wetlands Subsurface flow constructed wetlands for greywater and domestic wastewater treatment.**

Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ), 1, 9.

Johannes Boog, Jaime Nivala, Thomas Aubron, Scott Wallace, Manfred van Afferden, Roland Arno Müller

Caracterización hidráulica y la optimización de la eliminación total de nitrógeno en un humedal de tratamiento de flujo sumergido vertical aireado

Bio. Tec., 162 (2014), pp. 166-174

José Alejandro Ardila Sánchez, Jairo Andrés Ramos Romero

Modelación del proceso de remoción de nutrientes en un humedal artificial vertical en el tratamiento de aguas residuales domesticas

Trabajo de grado, universidad de Cartagena 2011.

J. Vymazal

La eliminación de nutrientes en los distintos tipos de humedales artificiales

Ciencia. Total Environ., 380 (2007), pp. 48-65

Kadlec R.H. and S.D. Wallace (2009).

Treatment wetlands second edition.

Taylor and Francis Group, Boca Raton, USA. ISBN 978-1-56670-526-4.

L. Peng, Y. Hua, J. Cai, J. Zhao, W. Zhou, D. Zhu

Efectos de las plantas y la temperatura sobre la eliminación de nitrógeno y microbiología en un humedal de flujo vertical, integrado a escala piloto que tratan las aguas residuales domésticas primaria

Ecol. Ing., 64 (2014), pp. 285-290

Lesser Juan Manuel

El uso y aplicación de trazadores de agua subterránea

Bol. Soc. Geol. Mexicana, Tomo XXXIX N° 2 p,p 71-76, 1978

Morales, T., Auzmendi, I. A., & Lozano, V. I. (1989).

Los trazadores en la hidrogeología Kárstica: metodología de su uso e interpretación de los ensayos de trazado.

Munibe Ciencias Naturales. Natur zientziak, (41), 31-45.

Pérez Johnny, Rincón Nancy, Bracho Nibis,

Evaluación de la adsorción de rodamina WT, litio y cloruro en reactores por carga inoculados con lodo anaerobio,

Revista ingeniería universidad de Antioquia, junio 2011, #58

Quiñones Edgar

Evaluación de un Sistema de Humedal Artificial con Flujo Vertical como sistema de tratamiento de Aguas Residuales Domésticas.

Cartagena, 2011. 35 p. Proyecto de Investigación (Ingeniería Civil). Universidad de Cartagena. Facultad de Ingenierías.

R.D. Moore

Introduction to Salt Dilution Gauging for Streamflow Measurement: Part 1

Departments of Geography and Forest Resources Management, University of British Columbia, 2004

R.H. Kadlec

The effects of wetland vegetation and morphology on nitrogen processing

Ecol. Eng., 33 (2008), pp. 126–141

Reglamento Técnico del sector de agua potable y saneamiento básico RAS – 2000.

Bogotá: Ministerio de Desarrollo Económico. Dirección de Agua Potable y Saneamiento Básico, 2000. (TÍTULO E).

Redacción Negocios. (2013).

Colombia se raja en el tratamiento de aguas residuales.

El Universal, 8 Feb 2013. p. 12.

Schmid, B. H., Hengl, M. A. y Stephan, U. (2004).

Salt tracer experiments in constructed wetlands ponds with emergent vegetation: laboratory study on the formation of density layers and its influence on breakthrough curve analysis.

Water Research, vol 38, pág. 2095-2102

Simancas Páez, Edwin, & Herrero Romero, Juan.

Determinación de la eficiencia de una planta piloto de humedal de flujo vertical para el tratamiento de aguas residuales domésticas.

Trabajo de grado (Ingeniero Civil). Universidad de Cartagena. Programa de Ingeniería Civil. Cartagena, 2011.

Wolf David & William Resnick.

Residence Time Distribution in Real Systems.

Haifa, Israel. Institute of Technology, Chemical Engineering Dept., 1963

Von Münch Elisabeth

Humedales Artificiales para el tratamiento de aguas grises y aguas residuales domésticas en países en desarrollo

Saneamiento sustentable, Agencia de la Cooperación Técnica Alemana (GTZ) (2009).

ANEXO

Anexo 1: Resultados y cálculos para el reactor 2 en el primer ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta (gr.NaCl/L)	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,17155337	0	0	0,00%	0	100,00%
0,5	3,61450412	3,44295075	3,44295075	10,88%	0,016276042	89,12%
1	3,32151692	3,14996355	6,592914299	20,83%	0,032552083	79,17%
2,98	2,88303743	2,71148406	9,304398359	29,40%	0,097005208	70,60%
3,1	2,76037552	2,58882215	11,89322051	37,58%	0,100911458	62,42%
5,9	2,41581772	2,24426435	14,13748486	44,67%	0,192057292	55,33%
6,1	2,31488012	2,14332675	16,28081161	51,44%	0,198567708	48,56%
8,9	2,02142575	1,84987238	18,13068399	57,28%	0,289713542	42,72%
9,1	2,01523148	1,84367811	19,9743621	63,11%	0,296223958	36,89%
12,9	1,56861383	1,39706046	21,37142256	67,52%	0,419921875	32,48%
13,1	1,55049452	1,37894115	22,75036371	71,88%	0,426432292	28,12%
14,9	1,17427175	1,00271838	23,75308209	75,05%	0,485026042	24,95%
15,1	1,11530575	0,94375238	24,69683447	78,03%	0,491536458	21,97%
20,95	1,03895792	0,86740455	25,56423902	80,77%	0,681966146	19,23%
21,05	0,98046572	0,80891235	26,37315137	83,33%	0,685221354	16,67%
23,92	0,70257068	0,53101731	26,90416868	85,00%	0,778645833	15,00%
24,05	0,622412	0,45085863	27,35502731	86,43%	0,782877604	13,57%
26,9	0,65671628	0,48516291	27,84019021	87,96%	0,875651042	12,04%
27,05	0,43506407	0,2635107	28,10370091	88,79%	0,880533854	11,21%
29,95	0,66244087	0,4908875	28,59458841	90,34%	0,974934896	9,66%
30,05	0,36749375	0,19594038	28,79052879	90,96%	0,978190104	9,04%
32,95	0,69683167	0,5252783	29,31580709	92,62%	1,072591146	7,38%
33,05	0,50293103	0,33137766	29,64718475	93,67%	1,075846354	6,33%
35,95	0,48027575	0,30872238	29,95590713	94,65%	1,170247396	5,35%
36,05	0,46896047	0,2974071	30,25331423	95,58%	1,173502604	4,42%
41,95	0,38998423	0,21843086	30,47174509	96,28%	1,365559896	3,72%
42,05	0,33381983	0,16226646	30,63401155	96,79%	1,368815104	3,21%
44,95	0,58818188	0,41662851	31,05064006	98,10%	1,463216146	1,90%
45,05	0,49726412	0,32571075	31,37635081	99,13%	1,466471354	0,87%
47,95	0,36749375	0,19594038	31,57229119	99,75%	1,560872396	0,25%
48,05	0,24995948	0,07840611	31,6506973	100,00%	1,564127604	0,00%

Anexo 2. Resultados y cálculos para reactor 3 en el primer ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,182649878	0	0	0,00%	0	100,00%
0,5	2,428472	2,245822122	2,245822122	7,92%	0,01627604	92,08%
1	3,09784928	2,915199402	5,161021523	18,19%	0,03255208	81,81%
2,98	2,84422175	2,661571872	7,822593395	27,58%	0,09700521	72,42%
3,1	2,72179468	2,539144802	10,3617382	36,53%	0,10091146	63,47%
5,9	2,052428	1,869778122	12,23151632	43,12%	0,19205729	56,88%
6,1	1,94106092	1,758411042	13,98992736	49,32%	0,19856771	50,68%
8,9	1,95340208	1,770752202	15,76067956	55,56%	0,28971354	44,44%
9,1	1,91640332	1,733753442	17,494433	61,67%	0,29622396	38,33%
12,9	1,72032908	1,537679202	19,03211221	67,09%	0,41992188	32,91%
13,1	1,623083	1,440433122	20,47254533	72,17%	0,42643229	27,83%
14,9	1,59280175	1,410151872	21,8826972	77,14%	0,48502604	22,86%
15,1	1,55049452	1,367844642	23,25054184	81,96%	0,49153646	18,04%
20,95	0,74280143	0,560151552	23,81069339	83,94%	0,68196615	16,06%
21,05	0,679627	0,496977122	24,30767051	85,69%	0,68522135	14,31%
23,92	0,66816752	0,485517642	24,79318816	87,40%	0,77864583	12,60%
24,05	0,59958368	0,416933802	25,21012196	88,87%	0,7828776	11,13%
26,9	0,48027575	0,297625872	25,50774783	89,92%	0,87565104	10,08%
27,05	0,51427103	0,331621152	25,83936898	91,09%	0,88053385	8,91%
29,95	0,44635463	0,263704752	26,10307373	92,02%	0,9749349	7,98%
30,05	0,41250767	0,229857792	26,33293152	92,83%	0,9781901	7,17%
32,95	0,48027575	0,297625872	26,6305574	93,88%	1,07259115	6,12%
33,05	0,40124183	0,218591952	26,84914935	94,65%	1,07584635	5,35%
35,95	0,58248407	0,399834192	27,24898354	96,06%	1,1702474	3,94%
36,05	0,54834047	0,365690592	27,61467413	97,35%	1,1735026	2,65%
41,95	0,27227692	0,089627042	27,70430117	97,67%	1,3655599	2,33%
42,05	0,19986575	0,017215872	27,72151704	97,73%	1,3688151	2,27%
44,95	0,46896047	0,286310592	28,00782764	98,74%	1,46321615	1,26%
45,05	0,41814368	0,235493802	28,24332144	99,57%	1,46647135	0,43%
47,95	0,30581488	0,123165002	28,36648644	100,00%	1,5608724	0,00%
48,05	0,182649878	0	28,36648644	100,00%	1,5641276	0,00%

Anexo 3. Resultados y cálculos para reactor 1 en el segundo ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta (gr.NaCl/L)	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,243	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,244	0,001	0,001	0,00%	0,005	100,00%
1	0,310	0,067	0,068	0,36%	0,021	99,64%
2	0,440	0,197	0,264	1,39%	0,042	98,61%
5	1,021	0,778	1,043	5,48%	0,104	94,52%
6	1,672	1,428	2,471	12,99%	0,125	87,01%
9	1,708	1,465	3,936	20,69%	0,188	79,31%
15	1,720	1,477	5,413	28,45%	0,313	71,55%
18	0,945	0,702	6,115	32,15%	0,375	67,85%
21	1,867	1,624	7,739	40,68%	0,438	59,32%
26	1,299	1,056	8,794	46,23%	0,542	53,77%
32	1,653	1,410	10,205	53,64%	0,667	46,36%
38	2,028	1,784	11,989	63,02%	0,792	36,98%
44	1,611	1,368	13,357	70,21%	0,917	29,79%
47	1,370	1,127	14,484	76,14%	0,979	23,86%
53	1,629	1,386	15,870	83,42%	1,104	16,58%
59	1,352	1,109	16,979	89,25%	1,229	10,75%
65	0,818	0,575	17,553	92,27%	1,354	7,73%
71	0,726	0,482	18,036	94,81%	1,479	5,19%
74	0,582	0,339	18,375	96,59%	1,542	3,41%
80	0,514	0,271	18,646	98,02%	1,667	1,98%
83	0,496	0,253	18,899	99,35%	1,729	0,65%
86	0,365	0,122	19,021	99,99%	1,792	0,01%
89	0,245	0,002	19,023	100,00%	1,854	0,00%
92	0,243	0,000	19,023	100,00%	1,917	0,00%

Anexo 4. Resultados y cálculos para reactor 2 en el segundo ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta (gr.NaCl/L)	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,320	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,321	0,002	0,002	0,01%	0,005	99,99%
1	0,531	0,211	0,213	0,88%	0,021	99,12%
2	1,074	0,754	0,968	3,98%	0,042	96,02%
5	1,418	1,098	2,066	8,49%	0,104	91,51%
6	1,696	1,376	3,442	14,15%	0,125	85,85%
9	1,997	1,677	5,119	21,05%	0,188	78,95%
15	2,021	1,702	6,821	28,05%	0,313	71,95%
18	1,861	1,541	8,362	34,38%	0,375	65,62%
21	2,077	1,757	10,119	41,61%	0,438	58,39%
26	1,204	0,884	11,003	45,24%	0,542	54,76%
32	2,416	2,096	13,099	53,86%	0,667	46,14%
38	2,146	1,826	14,925	61,37%	0,792	38,63%
44	1,806	1,486	16,411	67,48%	0,917	32,52%
47	1,532	1,213	17,624	72,47%	0,979	27,53%
53	1,412	1,092	18,716	76,96%	1,104	23,04%
59	1,647	1,328	20,044	82,42%	1,229	17,58%
65	1,484	1,164	21,208	87,21%	1,354	12,79%
71	1,382	1,062	22,271	91,57%	1,479	8,43%
74	1,370	1,051	23,321	95,89%	1,542	4,11%
80	0,657	0,337	23,658	97,28%	1,667	2,72%
83	0,577	0,257	23,915	98,34%	1,729	1,66%
86	0,537	0,217	24,132	99,23%	1,792	0,77%
89	0,436	0,116	24,248	99,70%	1,854	0,30%
92	0,389	0,070	24,318	99,99%	1,917	0,01%
95	0,322	0,002	24,320	100,00%	1,979	0,00%
98	0,320	0,000	24,320	100,00%	2,042	0,00%

Anexo 5. Resultados y cálculos para reactor 3 en el segundo ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentraci3n Neta (gr.NaCl/L)	Concentraci3n Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,548	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,548	0,000	0,000	0,00%	0,005	100,00%
1	0,691	0,143	0,143	1,24%	0,021	98,76%
2	0,766	0,217	0,360	3,12%	0,042	96,88%
5	0,899	0,351	0,711	6,15%	0,104	93,85%
6	1,057	0,508	1,219	10,56%	0,125	89,44%
9	1,109	0,561	1,780	15,41%	0,188	84,59%
15	1,080	0,532	2,312	20,02%	0,313	79,98%
18	1,115	0,567	2,879	24,93%	0,375	75,07%
21	1,263	0,715	3,594	31,12%	0,438	68,88%
26	1,830	1,282	4,876	42,22%	0,542	57,78%
32	1,836	1,288	6,164	53,37%	0,667	46,63%
38	1,929	1,380	7,544	65,32%	0,792	34,68%
44	1,806	1,258	8,802	76,21%	0,917	23,79%
47	1,104	0,555	9,357	81,02%	0,979	18,98%
53	0,951	0,403	9,760	84,51%	1,104	15,49%
59	1,080	0,532	10,291	89,11%	1,229	10,89%
65	0,957	0,409	10,700	92,65%	1,354	7,35%
71	0,887	0,339	11,039	95,59%	1,479	4,41%
74	0,870	0,322	11,361	98,37%	1,542	1,63%
80	0,674	0,126	11,486	99,46%	1,667	0,54%
83	0,600	0,051	11,538	99,90%	1,729	0,10%
86	0,560	0,011	11,549	100,00%	1,792	0,00%
89	0,548	0,000	11,549	100,00%	1,854	0,00%
92	0,548	0,000	11,549	100,00%	1,917	0,00%

Anexo 6. Resultados y cálculos para reactor 1 en el tercer ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,192	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,192	0,000	0,000	0,00%	0,005	100,00%
0,5	0,192	0,000	0,000	0,00%	0,010	100,00%
1	0,198	0,006	0,006	0,03%	0,021	99,97%
2	0,226	0,034	0,041	0,22%	0,042	99,78%
3	0,324	0,132	0,173	0,92%	0,063	99,08%
6	0,548	0,357	0,530	2,81%	0,125	97,19%
9	0,496	0,305	0,834	4,42%	0,188	95,58%
15	0,577	0,385	1,219	6,46%	0,313	93,54%
18	0,640	0,448	1,667	8,84%	0,375	91,16%
21	0,703	0,511	2,179	11,54%	0,438	88,46%
24	0,651	0,459	2,638	13,98%	0,500	86,02%
27	0,945	0,754	3,392	17,97%	0,563	82,03%
30	1,021	0,830	4,222	22,37%	0,625	77,63%
33	0,940	0,748	4,970	26,34%	0,688	73,66%
36	1,092	0,900	5,870	31,11%	0,750	68,89%
39	1,157	0,965	6,835	36,22%	0,813	63,78%
42	1,251	1,060	7,895	41,84%	0,875	58,16%
45	1,352	1,161	9,056	47,99%	0,938	52,01%
48	1,305	1,113	10,169	53,89%	1,000	46,11%
51	1,323	1,131	11,300	59,88%	1,063	40,12%
54	1,251	1,060	12,360	65,50%	1,125	34,50%
57	1,092	0,900	13,260	70,27%	1,188	29,73%
60	1,145	0,953	14,213	75,32%	1,250	24,68%
63	1,010	0,818	15,031	79,66%	1,313	20,34%
66	0,934	0,742	15,774	83,59%	1,375	16,41%
69	0,864	0,673	16,446	87,15%	1,438	12,85%
72	0,766	0,574	17,020	90,20%	1,500	9,80%
75	0,795	0,603	17,624	93,39%	1,563	6,61%
78	0,697	0,505	18,129	96,07%	1,625	3,93%
81	0,514	0,323	18,452	97,78%	1,688	2,22%
84	0,384	0,193	18,644	98,80%	1,750	1,20%
87	0,328	0,137	18,781	99,53%	1,813	0,47%
90	0,256	0,064	18,845	99,87%	1,875	0,13%
93	0,217	0,025	18,870	100,00%	1,938	0,00%
96	0,192	0,000	18,870	100,00%	2,000	0,00%

Anexo 7. Resultados y cálculos para reactor 2 en el tercer ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,200	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,200	0,000	0,000	0,00%	0,005	100,00%
0,5	0,200	0,000	0,000	0,00%	0,010	100,00%
1	0,438	0,238	0,238	0,95%	0,021	99,05%
2	0,459	0,259	0,497	1,99%	0,042	98,01%
3	0,462	0,262	0,759	3,04%	0,063	96,96%
6	0,490	0,290	1,049	4,20%	0,125	95,80%
9	0,483	0,283	1,332	5,33%	0,188	94,67%
15	0,622	0,423	1,755	7,03%	0,313	92,97%
18	0,708	0,508	2,263	9,06%	0,375	90,94%
21	0,777	0,577	2,840	11,38%	0,438	88,62%
24	0,789	0,589	3,429	13,73%	0,500	86,27%
27	0,812	0,612	4,042	16,19%	0,563	83,81%
30	1,051	0,851	4,892	19,59%	0,625	80,41%
33	1,074	0,874	5,767	23,10%	0,688	76,90%
36	1,210	1,010	6,777	27,14%	0,750	72,86%
39	1,641	1,441	8,218	32,91%	0,813	67,09%
42	1,617	1,417	9,635	38,59%	0,875	61,41%
45	1,569	1,369	11,004	44,07%	0,938	55,93%
48	1,593	1,393	12,397	49,65%	1,000	50,35%
51	1,514	1,314	13,711	54,91%	1,063	45,09%
54	1,448	1,248	14,960	59,91%	1,125	40,09%
57	1,406	1,206	16,166	64,74%	1,188	35,26%
60	1,275	1,075	17,241	69,05%	1,250	30,95%
63	1,233	1,034	18,275	73,19%	1,313	26,81%
66	1,180	0,980	19,255	77,11%	1,375	22,89%
69	1,139	0,939	20,194	80,87%	1,438	19,13%
72	0,945	0,746	20,940	83,86%	1,500	16,14%
75	0,963	0,763	21,703	86,92%	1,563	13,08%
78	0,882	0,682	22,384	89,65%	1,625	10,35%
81	0,754	0,554	22,939	91,87%	1,688	8,13%
84	0,651	0,451	23,390	93,67%	1,750	6,33%
87	0,685	0,485	23,875	95,62%	1,813	4,38%
90	0,588	0,388	24,264	97,17%	1,875	2,83%
93	0,520	0,320	24,584	98,46%	1,938	1,54%
96	0,435	0,235	24,819	99,40%	2,000	0,60%
99	0,306	0,106	24,925	99,82%	2,063	0,18%
102	0,233	0,033	24,958	99,96%	2,125	0,04%
105	0,211	0,011	24,969	100,00%	2,188	0,00%
108	0,200	0,000	24,969	100,00%	2,250	0,00%

Anexo 8. Resultados y cálculos para reactor 3 en el tercer ensayo

Tiempo (Hr)	Concentración C (gr.NaCl/L)	Cocentración Neta	Concentración Neta acumulada	% que pasa (F(f))	t/t0 (t0=1,28 días)	% Retenido (1-f(t))
0	0,185	0,000	0,000	0,00%	0,000	100,00%
0,25	0,185	0,000	0,000	0,00%	0,005	100,00%
0,5	0,185	0,000	0,000	0,00%	0,010	100,00%
1	0,189	0,004	0,004	0,02%	0,021	99,98%
2	0,219	0,034	0,038	0,21%	0,042	99,79%
3	0,352	0,167	0,206	1,14%	0,063	98,86%
6	0,450	0,265	0,471	2,60%	0,125	97,40%
9	0,394	0,210	0,681	3,76%	0,188	96,24%
15	0,577	0,392	1,073	5,92%	0,313	94,08%
18	0,668	0,483	1,556	8,58%	0,375	91,42%
21	0,749	0,564	2,120	11,69%	0,438	88,31%
24	0,674	0,489	2,609	14,39%	0,500	85,61%
27	0,726	0,541	3,149	17,37%	0,563	82,63%
30	0,905	0,720	3,869	21,34%	0,625	78,66%
33	1,094	0,909	4,779	26,36%	0,688	73,64%
36	1,062	0,878	5,656	31,20%	0,750	68,80%
39	1,228	1,043	6,699	36,95%	0,813	63,05%
42	1,430	1,245	7,944	43,82%	0,875	56,18%
45	1,418	1,233	9,177	50,62%	0,938	49,38%
48	1,352	1,168	10,345	57,06%	1,000	42,94%
51	1,222	1,037	11,382	62,78%	1,063	37,22%
54	1,299	1,114	12,496	68,92%	1,125	31,08%
57	1,157	0,972	13,467	74,28%	1,188	25,72%
60	1,104	0,919	14,386	79,34%	1,250	20,66%
63	1,139	0,954	15,340	84,61%	1,313	15,39%
66	1,021	0,837	16,176	89,22%	1,375	10,78%
69	0,818	0,633	16,809	92,71%	1,438	7,29%
72	0,691	0,506	17,316	95,50%	1,500	4,50%
75	0,560	0,375	17,690	97,57%	1,563	2,43%
78	0,373	0,188	17,879	98,61%	1,625	1,39%
81	0,306	0,121	18,000	99,28%	1,688	0,72%
84	0,233	0,048	18,048	99,54%	1,750	0,46%
87	0,256	0,071	18,119	99,93%	1,813	0,07%
90	0,197	0,012	18,131	100,00%	1,875	0,00%
93	0,185	0,000	18,131	100,00%	1,938	0,00%