

**DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA
MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL
SUBSUPERFICIAL. ESTUDIO DE LA LÍNEA BASE HIDRÁULICA.**

**VANESSA NICOLE BOLÍVAR MUÑOZ
EDWIN ARTURO CARRILLO PEDRAZA**



**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

**DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA
MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL
SUBSUPERFICIAL. ESTUDIO DE LA LÍNEA BASE HIDRÁULICA.**

**VANESSA NICOLE BOLÍVAR MUÑOZ
EDWIN ARTURO CARRILLO PEDRAZA**

**Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de Ingeniero
Civil**

Directora:

**ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ
Ingeniera Civil. PhD candidata.**

Co-director:

**ÁLVARO VIVIESCAS JAIMES
Ingeniero Civil. PhD.**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍA FÍSICO-MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA CIVIL
BUCARAMANGA**

2015

DEDICATORIA

Agradezco inmensamente a Dios, porque sé que sin Él nada hubiera sido posible.

A mis padres, Alonso Bolívar y Blanca Muñoz, quienes con tanto esfuerzo y sacrificio lo han dado todo por mí.

A mi hermanos Angélica y Freddy por sus enseñanzas y su apoyo incondicional.

A Juan David Carvajal por permanecer en todos mis logros y derrotas, gracias por su amor, motivación y confianza.

A Edwin Carrillo por haber compartido todo este camino conmigo, por su amistad y su puntualidad.

A nuestra directora la Ing. Angélica Corzo por todo el apoyo brindado. A todos mis amigos que de una u otra forma hicieron este sueño posible.

Nicole Bolívar Muñoz.

DEDICATORIA

*Agradezco a Dios todo poderoso
que sin Él nada de esto hubiese sido posible.*

*A mi hermosa familia que me brindó su amor y apoyo
incondicional.*

*A mi compañera y amiga Nicole Bolívar por tenerme
paciencia.*

*Y a todos mis amigos que de una u otra forma fueron
fundamentales
para hacer realidad este sueño.*

ARTURO CARRILLO.

AGRADECIMIENTOS

Los resultados de este proyecto están dedicados a todas aquellas personas que de alguna forma, son parte de su culminación, a nuestra directora la Ingeniera Angélica Corzo por su orientación, confianza y apoyo en esta investigación, y a las demás personas que contribuyeron para llevar a cabo este proceso.

CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	16
1. ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS <i>IN SITU</i> DE MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.	21
2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.	35
3. USO DE TRAZADORES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y PATRÓN DE FLUJO.	37
3.1 OBTENCIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RETENCIÓN (FDTR).	37
3.2 MODELO DE FLUJO PISTÓN CON DISPERSIÓN (DPFR).	41
3.2 EFICIENCIA HIDRÁULICA.	43
3.3 OBTENCIÓN DEL VOLUMEN ÚTIL	44
4. MEDICIONES EN CAMPO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.	45
4.1 ENSAYO DE LEFRANC CON NIVEL VARIABLE.	45
5. MATERIALES Y MÉTODOS	48
5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO	48
5.1.1 El lecho	49
5.1.2 El medio de soporte	50
5.1.3 El medio de vegetal	50
5.1.4 Preparación de los afluentes y alimentación de los humedales	51
5.2 ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.	51
5.2.1 Preparación del ensayo	51
5.2.2 Ejecución del ensayo	53
5.2.3 Tratamiento de datos	53

5.3 ENSAYO DE TRAZADORES.	54
5.3.1 Preparación del ensayo	54
5.3.2 Ejecución del ensayo	55
5.3.3 Tratamiento de datos	55
6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.	57
6.1 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA	57
6.2 ENSAYO DE TRAZADORES	59
6.2.1 Tiempo de retención hidráulico	61
6.2.2 Índices de Eficiencia Hidráulica	62
6.2.3 Volumen Útil	62
7. CONCLUSIONES	64
8. RECOMENDACIONES	65
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
BIBLIOGRAFÍA	72
ANEXOS	78

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Esquema de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal	17
Figura 2 Representación Filtro Percolador	18
Figura 3. Aplicación de trazadores a un humedal [28].	37
Figura 4. Transformación de la curva <i>Cimpulso</i> en una función E (t).	39
Figura 5. Modelo normalizados de curva E (t) para PFR y CSTR.	40
Figura 6. Esquema del montaje para la determinación <i>in situ</i> de la conductividad hidráulica basado en el test de Lefranc de carga variable .	46
Figura 7. Vista general del modelo experimental.	48
Figura 8. Vista en planta del modelo experimental.	49
Figura 9. Contenedor que sirve de lecho impermeable.	50
Figura 10. (a) Papiro, (b) Heliconia y (c) Cartucho.	51
Figura 11. (a) Detalle del tubo y el globo en el proceso de llenado, (b) Inserción del tubo de PVC en el MSP.	52
Figura 12. (a) Acoplador HOBO U-DTW-1, (b) Registro de datos: sonda y acoplador.	53
Figura 13. (a) Conductivímetro PCE-PHD1, (b) Toma de una muestra del efluente.	56
Figura 14. Concentración Vs tiempo en los ensayos de los días 0 y 15.	59
Figura 15. Curvas <i>EθDV</i> s θ para los ensayos de los días 0 y 15.	61
Figura 16. Comportamiento de las concentraciones de los ensayos de los días 0 y 15.	63

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Conductividad hidráulica k en función del tipo de material granular utilizado como medio en un humedal construido de flujo subsuperficial	20
Tabla 2. Características de los sistemas para el tratamiento de agua residual.	25
Tabla 3. Rangos de la conductividad hidráulica.	29
Tabla 4. Métodos para la medición de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial.	31
Tabla 5. Dimensiones del contenedor H022401.	49
Tabla 6. Conductividad hidráulica en estudio.	57
Tabla 7. Módulo de dispersión en el tiempo de estudio.	60
Tabla 8. Tiempos de retención hidráulicos reales	61
Tabla 9. Valores de λ_t .	62
Tabla 10. Valores de λ_p .	62
Tabla 11. Volumen útil de las líneas de tratamiento.	63

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO A. Representación gráfica para diferentes valores de dispersión	78
ANEXO B. Tendencia de los valores de concentración de NaCl vs Conductividad eléctrica para agua potable.	79
ANEXO C. Conductividad	80
ANEXO D. Ensayo de trazadores	83
ANEXO E. Concentraciones de trazador en el ensayo	87

RESUMEN

TÍTULO: DEPURACIÓN DE AGUAS RESIDUALES DE ALTA CARGA ORGÁNICA MEDIANTE HUMEDALES ARTIFICIALES DE FLUJO HORIZONTAL SUBSUPERFICIAL. ESTUDIO DE LA LÍNEA BASE HIDRÁULICA*

AUTORES: VANESSA NICOLE BOLÍVAR MUÑOZ**
EDWIN ARTURO CARRILLO PEDRAZA

PALABRAS CLAVE: Humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, conductividad hidráulica, tiempo de retención hidráulico, línea base hidráulica.

DESCRIPCIÓN

Los humedales artificiales de alta tasa que emplean medios de soporte plástico reciclado (MSP) son una excelente opción para el tratamiento de aguas residuales agroindustriales de alta carga orgánica. El funcionamiento hidráulico de estos sistemas de tratamiento se encuentra aún en evaluación, en efecto esta investigación se fundamenta en el estudio de la línea base hidráulica. En este sentido, se estudiaron tres líneas de tratamiento (línea 1 línea 2 y línea 3) plantadas con una especie distinta de macrófita (*Cyperus papyrus*, *Heliconia burlena*, *Zantedeschia aethiopica* respectivamente) antes y después de plantación. Las conductividades hidráulicas durante el periodo de estudio oscilaron entre [3200 -6500] m/d comportándose como gravas finas posiblemente por la configuración del MSP, los tiempos de retención reales fueron mayores al tiempo de retención teórico debido a la retención de trazador en el primer reactor de todas las líneas, dentro del rango de [2.6- 4.9] días. Además el estudio hidrodinámico describió un modelo de flujo pistón con dispersiones altas. Adicionalmente, se recomienda utilizar métodos alternativos para determinar la conductividad hidráulica cuando el sistema se encuentre en tratamiento, debido al desarrollo de la zona radicular. En consecuencia, el comportamiento hidráulico de la línea base de tres HAAT no es el esperado, ya que se obtienen retenciones indeseadas de trazador y altas dispersiones en todos los sistemas de tratamiento, en este sentido se concluye que este sistema tiene bajas eficiencias en la remoción de contaminantes.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil. Directora: Angélica Corzo Hernández, Ingeniera Civil. PhD candidata. Co-director: Álvaro Viviescas Jaimes, Ingeniero Civil. PhD.

ABSTRACT

TÍTULO: TREATMENT OF HIGH LOAD ORGANIC WASTEWATER THROUGH ARTIFICIAL WETLANDS OF HORIZONTAL SUBSURFACE FLOW. STUDY OF HYDRAULIC BASELINE*

AUTHORS: VANESSA NICOLE BOLÍVAR MUÑOZ**
EDWIN ARTURO CARRILLO PEDRAZA

KEYWORDS: Artificial wetlands of subsurface horizontal flow, hydraulic conductivity, hydraulic retention time, hydraulic baseline.

DESCRIPTION

Artificial wetlands of High rate that use recycled plastic support media (MSP) are an excellent option for treatment of agro-industrial wastewater with high organic load. The hydraulic operation of these systems of treatment is on evaluation, in fact, this research is based on the study of hydraulic baseline. In this way, three lines of treatment (Line 1, line 2 and line 3) planted with a different specie of macrophyte (*Cyperus papyrus*, *Heliconia burleana*, *Zantedeschia aethiopica*, respectively) were studied before and after planting. During the period of study, hydraulic conductivities fluctuated between [3200-6500] m/d by behaving as fine gravel possibly by MSP configuration, actual retention times were greater than theoretical due to the retention of tracer in the first reactor of all lines, within the range of [2.6- 4.9] days. In addition, the hydrodynamic study described a plug flow model with high dispersions. Additionally, it is recommended to use alternative methods to determine hydraulic conductivity when the system is in treatment, due to the development of the root zone. Consequently, the hydraulic behavior of the baseline of three HAAT is not the expected, since unwanted tracer retention are obtained and high dispersions on all treatment systems, in this sense it is concluded that this system has low efficiency in removing contaminant.

* Degree work

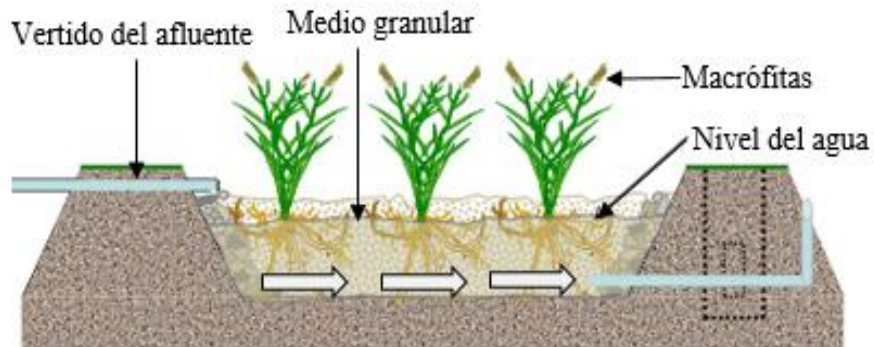
** School of Physics and Mechanical Engineering. School of Civil Engineering. Director: Angelica Hernandez Corzo, Civil Engineer. PhD candidate. Co-director: Álvaro Viviescas Jaimes, Civil Engineer. PhD.

INTRODUCCIÓN

Los humedales artificiales (HA) son sistemas para depuración de aguas residuales, que reproducen las condiciones propias de los humedales naturales, aprovechando sus procesos físicos, químicos y biológicos para eliminación de contaminantes. Esta tecnología resulta altamente atractiva para ser aplicada en el tratamiento de una amplia gama de aguas residuales, como pueden ser domésticas, urbanas, drenaje agrícola, lixiviados de vertederos y algunos tipos de aguas industriales, debido a su alta eficiencia de remoción de contaminantes y a su bajo costo de operación y mantenimiento. Sin embargo, son sistemas que requieren una inversión alta en su construcción debido a la necesidad de extensas áreas para su implementación.

Dependiendo si el agua se encuentra en contacto o no con la atmósfera, los humedales artificiales se clasifican en “de flujo superficial o de flujo sub-superficial” [15]. A su vez los humedales de flujo sub-superficial se clasifican según el sentido de circulación del agua en horizontales o verticales [10]. Esta investigación estará enfocada en los humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal FSSH (Figura 1).

Figura 1. Esquema de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal



Fuente: GARCÍA, J y CORZO, A. "Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial," Barcelona, España, Dpto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña 2008.

El funcionamiento de los humedales artificiales se fundamenta en tres principios: la actividad bioquímica de los microorganismos, el aporte de oxígeno a través de las plantas macrófitas y los procesos de filtración a través del medio granular [20]. La finalidad del tratamiento de los HA es la remoción de contaminantes tales como materia orgánica, sólidos, nitrógeno, fósforo, metales pesados y patógenos. El medio granular comúnmente utilizado es grava, caracterizado por tener porosidades máximas del 40-45%, la cual va disminuyendo con el paso del tiempo por colmatación con sólidos de diversa tipología, tanto presentes en el agua residual como generados dentro del mismo humedal.

Los materiales plásticos (MP) como medio granular se han empleado para el tratamiento de aguas residuales en otros tipos de tecnologías. Un ejemplo de su uso son los filtros percoladores utilizados en Sevilla, España [5]. Un filtro percolador (Figura 2) es un sistema de lechos filtrantes compuesto por un medio plástico sobre el cual se vierte el agua residual de forma continua o intermitente, utilizando brazos de distribución fijos o móviles, manteniendo condiciones aeróbicas mediante tuberías de aireación. Durante su descenso, el agua forma de

manera gradual una biopelícula sobre el medio degradando así la materia orgánica. Es el sistema de depuración idóneo para grupos de población de hasta 30.000 habitantes.

Figura 2. Representación Filtro Percolador



Fuente: Ecodena Especialistas en Tratamiento de Aguas. Filtros Percoladores. Disponible: <http://www.ecodena.com/filtros-biologicos-y-percoladores.html> [citado 05 de Febrero de 2015]

La aplicación de MSP en humedales artificiales inició en Colombia en el año 2004, con el uso de un prototipo desarrollado por Sanabria [35] y su grupo de investigación de la Universidad Nacional de Colombia sede Bogotá, implementado en el sistema HUMEDAR-I® [34].

Esta tecnología en desarrollo surge en respuesta al problema de la colmatación en HA cuando se usan medios de soporte tipo grava, pues presenta una porosidad superior a la convencional (93% vs 40-45%), mayor área de superficie de contacto por unidad de volumen y bajo peso. Su aplicación en humedales artificiales resulta ser competitiva con los demás sistemas convencionales de depuración de aguas residuales (lodos activados, filtros percoladores o lagunas de estabilización), porque permite tratar aguas residuales tanto domésticas como de alta carga orgánica.

El uso de materiales plásticos como medio de soporte en HA en la actualidad no se ha documentado en su totalidad y algunos parámetros del funcionamiento de esta variante de los humedales artificiales aún se encuentran en evaluación, por ejemplo su evolución hidráulica.

Esta investigación surge con el fin de determinar la línea base del comportamiento hidráulico de tres humedales artificiales de alta tasa ante el mismo vertido de agua. Este comportamiento hidráulico será analizado mediante la variación del volumen útil estimado a partir del cálculo del tiempo de retención hidráulico (prueba de trazadores) y el estudio de la conductividad hidráulica (test de Lefranc con nivel variable).

El tiempo de retención caracteriza el comportamiento hidráulico del sistema, y se define como el tiempo promedio que tardaría una partícula cualquiera del fluido en entrar y salir del humedal. Lo anterior aplica si todas las partículas del fluido evolucionan en la misma forma, es decir, siempre y cuando corresponda a un flujo ideal. En la práctica resulta difícil mantener estas condiciones, por esta razón en esta investigación se emplea el ensayo de trazadores para determinar principalmente los tiempos reales de retención, además de que es posible analizar otras condiciones hidráulicas del flujo tales como el tipo de flujo, dispersión y cortos circuitos.

La capacidad que tiene el medio granular para retener y transmitir agua se denomina conductividad hidráulica, o también llamada **constante de permeabilidad**. Este parámetro depende de las características del medio filtrante (tabla 1): porosidad, tamaño efectivo de los granos, coeficiente de uniformidad (C_u), y puede ser determinado tanto en laboratorio como en campo. En laboratorio la determinación se realiza mediante el uso de un permeámetro de carga constante o carga variable, dependiendo del suelo granular [13]. Debido a que esta capacidad se pierde en la vida útil del humedal es necesario medirlo en

campo, por ello en esta investigación se implementa el método in situ de medida basado en el test de Lefranc con nivel variable.

Tabla 1. Conductividad hidráulica k en función del tipo de material granular utilizado como medio en un humedal construido de flujo subsuperficial

Tipo de sustrato	Tamaño efectivo D_{10} (mm)	Porosidad %	Conductividad K (m^3/m^2d)
Arenas Gradadas	2	28-32	100-1000
Arenas Gravasas	8	30-35	500-5000
Gravas Finas	16	35-38	1000-10000
Gravas Medias	32	36-40	10000-50000
Rocas Pequeñas	128	38-45	50000-250000

Fuente: REED, S.C., CRITES, R.W. y Middlebrooks, E.J. Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill, 1995, 433 pp

* D_{10} es el tamaño del tamiz por el que pasa el 10% de una muestra.

1. ESTADO DEL ARTE DE LAS METODOLOGÍAS *IN SITU* DE MEDIDA DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

Los métodos para la cuantificación de la conductividad hidráulica *in situ* proporcionan información acerca del estado del humedal de FSS. Estos resultados junto con las pruebas de trazador son formas de medir el alcance y el impacto de la colmatación en medios porosos.

Fisher (1990) [7], evaluó el comportamiento hidráulico de humedales construidos de flujo subsuperficial horizontal usados para el tratamiento de aguas residuales domésticas en Richmond, NSW, Australia. El sistema estaba compuesto por dos humedales de control sin plantas, uno de los cuales contenía agua y el otro grava; un humedal plantado con la macrófita emergente *Scirpus validus* (junco), y otro con la especie *Typha orientalis* (cumbungi). Todos los humedales construidos usaron un medio de soporte tipo grava de río (porosidad del 45%) con un diámetro nominal de 5 a 10 [mm], sin embargo, se presentaba un volumen (aproximadamente 20%) de grava de 3 a 5 [mm] de diámetro. Los humedales funcionaron con tiempos de retención hidráulico que variaban de 2 a 10 días, correspondientes a una carga hidráulica de 0.1-1.8 ml/hab-d respectivamente.

Los gradientes hidráulicos observados en los humedales construidos en Richmond se emplearon para estimar la conductividad hidráulica utilizando la ecuación de Darcy:

$$Q = k * A * i \quad (1)$$

Donde:

Q : Caudal $m^3 s^{-1}$.

k : Conductividad hidráulica m s^{-1} .

A : Área de sección transversal m^2 .

i : Gradiente hidráulico m m^{-1} .

Para su medición fueron ubicados tres puntos intermedios de muestreo transversalmente, cada uno a 20 [m] de distancia. Los resultados de conductividad hidráulica indicaron el comportamiento del humedal diferenciando dos zonas: una zona que se caracterizaba por la alta acumulación de sólidos y baja conductividad; y una zona que se caracterizaba por baja acumulación de sólidos y conductividad hidráulica estable. En la zona de entrada se evidenció una disminución marcada de la conductividad hidráulica, debido a la alta acumulación de sólidos, la cual se estabilizó después de 12 meses de operación. Así mismo se concluyó que los sistemas plantados y no plantados (control) presentaban regímenes de flujo con cierta dispersión longitudinal.

Se consideró que un flujo no Darciano se presentaba cuando el número de Reynolds (**Re**) variaba entre [1-10]. El **Re** para las condiciones de flujo presentadas en los humedales en Richmond varía entre [0.6-2.8], lo que significa que el régimen de flujo no es totalmente laminar en todo el período de estudio y en consecuencia, la ecuación de Darcy pudo no haber sido del todo aplicable.

Drury-Mainzhausen (2000) [4], evaluaron la eficiencia de un sistema mixto de depuración de aguas residuales, consistente por una laguna de sedimentación seguida de tres humedales de flujo horizontal subsuperficial y uno de flujo subsuperficial vertical en paralelo, finalizando en serie con dos humedales de flujo superficial. El material de soporte en los HCFSS varió así, en el humedal 1 se usó grava de río y piedra caliza, para los humedales 2 y 3 se usaron los mismos materiales además de compost. Las pruebas se llevaron a cabo en un periodo de 2.5 años donde se registraron mediciones mensuales de la conductividad hidráulica, pero con excepción de la temporada de invierno donde el hielo obstruía

los tubos donde se medía la cabeza de altura de nivel de agua. El método empleado se basaba en el cálculo de la ley de Darcy. Los resultados del estudio mostraron una mayor colmatación o pérdida de la porosidad en la zona de entrada del humedal, atribuido al uso de una tela de filtro en el humedal para la obstrucción de partículas de hierro. La disminución de la conductividad hidráulica durante los 2.5 años fue de aproximadamente del 90% en las entradas de los humedales, mientras que en las zonas de salida no hubo mayor variación. Adicionalmente, se observó que los humedales con mayor contenido de compost presentaron una mayor pérdida de la porosidad.

Kadlec-Watson (1993) [17], comprobaron que no es correcto usar la ley de Darcy debido al no paralelismo de las líneas de flujo y a la influencia de la evapotranspiración en la línea de tratamiento, para establecer la conductividad hidráulica. Por ello plantean que es necesario utilizar una conductividad hidráulica que varíe según la distancia longitudinal del humedal como se muestra a continuación:

$$-KW\delta \frac{d(S+\delta)}{dx} = Q_0 - eWx \quad (2)$$

Donde (e) es la tasa de evapotranspiración, W es el ancho del humedal y S es la altura de la capa de arcilla en el fondo del humedal. En esta investigación se utilizaron tubos de grandímetro con gravas gruesas y finas para realizar las mediciones de la conductividad hidráulica y posteriormente comprobar la incidencia de las variables mencionadas, por medio de la Ec. (2) integrando la variable W y calculando la superficie de agua, de esta forma se compara con la superficie medida en campo y se realiza la comparación de estos dos valores.

Sanford et al. (1995) [36], caracterizó el comportamiento del flujo del agua residual en FSSH, en un sistema utilizado para descontaminación de lixiviados de vertederos, empleando *Phragmites australis* como vegetación. Estas plantas

causan problemas en el flujo dentro del humedal debido a la obstrucción del medio de soporte, haciéndose más considerable si el medio es de tierra o arena, generando flujo superficial [3]. La conductividad hidráulica se calculó mediante la ley de Darcy, basada en profundidades del agua en la entrada y salida del humedal. Se observó que durante un estudio de 26 meses la arena y la grava estaban colmatadas, resultando en una disminución considerable de la conductividad hidráulica, alcanzando un valor mínimo de 604.8 [m/d] que sin embargo permitía mantener el flujo subsuperficial.

Caselles-Osorio et al. (2007) [2], en este estudio se evaluó la cantidad de sólidos acumulados y, por otra parte la conductividad hidráulica del medio granular. Los experimentos se llevaron a cabo en seis humedales artificiales de flujo subsuperficial horizontal a gran escala (ver tabla 2) y plantados con *Phragmites australis* (caña común), ubicados en la planta de tratamiento de aguas residuales de pequeñas ciudades de Cataluña (España).

Las mediciones de conductividad hidráulica fueron registradas para cada uno de los humedales y estimadas mediante el método de ensayo de cabeza variable [23]. En éste, se inserta un tubo (0.7 [m] de longitud y 0.2 [m] de diámetro interno) a una profundidad de 0.25 [m] en la grava, se llena de agua en un pulso y la disminución en el nivel del agua es detectada por una sonda de presión conectada a un ordenador por medio de un registrador de datos. Los valores de conductividad hidráulica fueron significativamente más bajos cerca de la zona de entrada, con excepción de *Verdú 2*, los demás humedales al menos uno de los valores de k observados cerca de la entrada son ≤ 3.0 m/d. Estos valores son consistentes debido a que en las zonas de entrada se presentaba una alta acumulación de sólidos y afloramiento de agua a nivel superficial.

Tabla 2. Características de los sistemas para el tratamiento de agua residual.

Sistema	Componentes del sistema	Puntos de muestreo
<i>Verdú</i>	Tres fosas sépticas ($50 m^3$), cuatro humedales en paralelo, dos estanques de maduración, dos estanques más pequeños para finalizar el tratamiento.	<i>Verdú 1</i> (localizado después de las fosas sépticas) y <i>Verdú 2</i> (localizado después de uno de los estanques de maduración).
<i>Alfés</i>	Una fosa séptica ($40 m^3$), dos humedales de FSSH	Primer humedal
<i>Corbins</i>	Un tanque Imhoff, seguido de dos humedales paralelos de FSSH, tres estanques en serie (dos facultativas y una anaeróbica), un humedal de FSSH y tres filtros de arena.	Uno de los dos humedales en paralelo de FSSH.
<i>Almatret N</i>	Una fosa séptica ($30 m^3$), un humedal de FSSH y un estanque aeróbico en serie.	Humedal de FSSH.
<i>Almatret S</i>	Una fosa séptica ($50 m^3$), dos humedales en paralelo de FSSH y tres estanques aeróbicos.	Uno de los dos humedales en paralelo de FSSH.

Fuente: CASELLES-OSORIO A., PUIGAGUT, J., SEGU, E., VAELO, N., GRANÉS, F., GARCÍA, D., GARCIA, J., Solid accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. Water Research, Vol.41, January 2007, pp. 1388-1398

Pedescoll et al. (2009) [26], evaluaron la acumulación de sólidos presentes en los humedales artificiales de *Verdú 1* y *Corbins* en la provincia de Lleida, Cataluña, España. En este estudio se relaciona directamente la medición de la conductividad hidráulica con el grado de colmatación en humedales FSSH. La conductividad hidráulica fué calculada utilizando el método de cabeza variable mencionado en [1 y 2]. Los resultados de este trabajo demostraron que existen grandes diferencias en los valores de conductividad a lo ancho del humedal debido a flujos preferenciales, además se confirmó la notable disminución de la conductividad hidráulica en la entrada del humedal. Se demostró una relación inversa entre la

cantidad de sólidos totales (ST) y la conductividad hidráulica, aunque en los puntos donde se midió la menor cantidad de ST no se obtuvo la mayor conductividad hidráulica.

Knowles-Davies (2009) [19], desarrollan un permeámetro de nivel constante adaptado a campo que permite estudiar el perfil de la conductividad hidráulica en humedales rellenos de gravas altamente permeables, a diferentes profundidades y posiciones sobre el humedal. La exactitud del método se evaluó mediante la medición de la conductividad hidráulica de una arena de sílice, en laboratorio con el permeámetro de nivel constante (27.91 [m/d]) y en campo con el método propuesto (27.13 [m/d]). Estos valores son cercanos a los citados en la literatura (8.64- 86.4 m/d) [6, 11,30]. A escala real se evaluaron dos humedales de flujo horizontal subsuperficial empleados como tratamiento terciario en la planta de tratamiento de Moreton Morrell (MM) de 15 años de antigüedad, y en Fenny Compton (FC) con 1 año de operación. En ambos sistemas se emplea grava porosa y macrófitas *Phragmites australis* (caña común).

El método se basa en la combinación de dos principios aplicados *in situ* que recrean el permeámetro de cabeza constante: el principio del sifón de Mariotte, utilizado para mantener un nivel constante de un depósito de agua (con un tubo de medición graduado), y el ensayo de permeabilidad de carga constante empleando un permeámetro sumergido con 4 tubos piezométricos. Este método implementa un dispositivo similar al permeámetro de Guelph [32], adaptado a gravas de conductividad alta (86.4 m/d a 86400 [m/d]). La conductividad hidráulica se calcula a través de la Ley de Darcy, registrando el tiempo de la descarga requerido para mantener la carga constante. Calculados los perfiles verticales de conductividad hidráulica se puede obtener la conductividad hidráulica horizontal mediante su interpolación entre puntos de muestreo.

Los resultados de sus pruebas preliminares permitieron establecer que el sistema más joven presentó trayectorias de flujo preferencial a una profundidad de 0.2 [m] (profundidad total 0.6 [m]), que corresponde a la transición entre grava más gruesa y capas de grava menos gruesa (6-12 [mm] y 3-6 [mm] respectivamente). La conductividad aumentó a lo largo de ambos humedales, encontrando valores bajos en la zona de entrada correspondientes con alta acumulación de sólidos. Un grado de incertidumbre de $\pm 30\%$ se asoció al efecto de la variación en los diámetros de grava, y la obstrucción durante la inserción del tubo en la grava. Esta incertidumbre produce variaciones de la conductividad hidráulica de 4 órdenes de magnitud.

Knowles et al. (2010) [18], en este estudio se utiliza el instrumento para medir la conductividad hidráulica empleado en [19], para analizar cuatro humedales idénticos de flujo horizontal subsuperficial usados como tratamiento terciario en la planta depuradora de Moreton Morrell (MM), Reino Unido. Estos humedales están en funcionamiento desde el año 1994, y utilizan la macrófita *Phragmites australis*. En este ensayo también se controla la descarga de un nivel constante de agua a través de un tubo de PVC; de tal manera, que el nivel de agua en el ensayo se mantiene constante por medio de la técnica del Sifón de Mariotte.

Para analizar con precisión el grado de colmatación del sistema es necesario realizar el muestreo en varios puntos y a diferentes profundidades (0.20 y 0.40 [m]), con el fin de crear perfiles de conductividad hidráulica (horizontal y vertical). Este parámetro varió en las dos direcciones, en regiones de menor conductividad hidráulica (mayor colmatación) y en regiones de mayor conductividad (menor colmatación). El valor mínimo de conductividad 0.1 [m/d] se midió en el punto de entrada y el máximo de 1550 [m/d] fue medido en el punto de salida. La conductividad hidráulica del sistema generalmente disminuye en la entrada y aumenta hacia a la salida.

Pedescoll et al. (2010) [25], el objetivo de este estudio consistió en verificar la fiabilidad y precisión del método de carga variable usado en Pedescoll et al. (2009) [26] bajo condiciones de laboratorio y su posible aplicabilidad en humedales contruidos de flujo subsuperficial en campo. Para este estudio se consideraron dos modelos de humedales (0.95 [m] de largo, 0.70 [m] de ancho y 0.45 [m] de profundidad), uno se encontraba altamente colmatados y otro no colmatado, usando arena y grava limpia respectivamente como material granular. En cada modelo se midió la conductividad hidráulica mediante el método de carga constante y variable para establecer diferencias entre los dos métodos de medición.

Según este estudio, la aplicación del test de Lefranc es una técnica adecuada para la evaluación de la colmatación en humedales de FSS, ya que es bastante sensible al registrar diferencias significativas entre las medidas de conductividad hidráulicas dependiendo del material (grava 330 a 365 [m/día] y arena (4.0 a 6.0 [m/día])). Estos valores de conductividad hidráulica están en el rango de los descritos para los diferentes materiales granulométricos [38]. También es un procedimiento confiable debido a que presenta pequeñas variaciones cuando se realizan mediciones repetitivas (menos del 10%). En consecuencia, los resultados muestran desviaciones de medición del 20% cuando se compara con un método de carga constante para condiciones de laboratorio. En conclusión, este trabajo demuestra que el ensayo de cabeza variable basado en el test de Lefranc es lo suficientemente preciso para ser aplicado a humedales contruidos a gran escala.

Knowles and P. Davies et al. (2011) [24], en este estudio la distribución vertical y horizontal de la conductividad hidráulica fue evaluada en campo, en los humedales que se utilizaron en la investigación del mismo autor [19]. Desde 1993 los humedales de la depuradora de Moreton Morrell han estado en operación, renovándose en el año 2008 la capa superficial, de 0.2 [m] de profundidad, debido a problemas de colmatación. Los humedales en MM atienden a una población más

o menos el doble de la FC (1500vs.800 Hab). En esta investigación se compararon dos metodologías *in situ* para medir la conductividad hidráulica, las cuales están referidas al ensayo de carga variable basado en el test de Lefranc [26] y el permeámetro de carga constante empleado en [18]. Ambos métodos han sido demostrados en [25] y [19] respectivamente y desarrollados específicamente para medir altas conductividades hidráulicas asociadas a gravas en los humedales FSS. Cabe resaltar que la validez del método de cabeza variable usado en [26] hasta el momento solo había sido demostrada en laboratorio; en este sentido se determina la precisión en campo en este estudio.

Los rangos de conductividad hidráulica horizontal hallados corresponden a cilindros que cubren toda la altura del medio 0.4 [m] de grava y los valores de conductividad hidráulica vertical dependen del método empleado tanto para los primeros 0.2 [m] como para los siguientes 0.20 [m] (Ver tabla 3).

Tabla 3. Rangos de la conductividad hidráulica

Ubicación	Metodología	Conductividad Perfil Horizontal [m/d]	Conductividad Perfil Vertical [m/d]
Fenny compton	Carga variable	0-70	65- 450 0.05-95
	Carga constante	0-70	0-90 0-190
Moreton Morrell	Carga variable	0-35	0.97-11.75 0.01-6.07
	Carga constante	0-35	0.05-17.4 0.15-100

Fuente: PEDESCOLL, A., KNOWLES, P.R., DAVIES, P., GARCÍA, J., PUIGAGUT, J. "A comparison of in situ constant and falling head permeameter tests to assess the distribution of clogging within horizontal subsurface flow constructed wetlands," *Water, Air and Soil Pollution, Journal of Hazardous Materials*, Vol.223, 2012, pp. 2263-2275

A pesar de las diferencias de las magnitudes registradas en los perfiles horizontales de ambos métodos, se presentó una distribución similar de la colmatación. Para los perfiles verticales la conductividad hidráulica, el método de

carga variable produce resultados más lógicos en FC (conductividad hidráulica mayor en la capa superior de 0.2 [m] recientemente sustituido), mientras que el método de carga constante produce resultados más lógicos en MM (conductividad hidráulica menor en la capa superior de grava por acumulación de sólidos que allí se produce). Los perfiles horizontales mostraron que ambos métodos correlacionan por una función de potencia ($FH = CH \cdot 0.7821$, $R^2 = 0.76$) en un rango de conductividades hidráulicas (0-70 [m/día]), donde carga variable (FH) y carga constante (CH). Ambos métodos son útiles para identificar la distribución de la colmatación en el humedal.

Todas las metodologías *in situ* de medida de la conductividad hidráulica se resumen en la tabla 4 que van desde el uso de la ley de Darcy hasta sus aplicaciones (carga variable y constante). Aunque el método propuesto en [19] es innovador y podría usarse en investigación debido a su aplicación en medios de alta conductividad, sus mediciones tienen $\pm 30\%$ grado de incertidumbre. Por otro lado, siguiendo con uno de los objetivos de esta investigación se presenta el *Ensayo de Lefranc con carga variable* usado en [26] y comprobado en [25], es una técnica lo suficientemente confiable para la evaluar la colmatación en humedales construidos de FSSH.

Tabla 4. Métodos para la medición de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial.

Estudio	Sistema	L/B [m/m]	Tipo de Humedal	Medio de Soporte	Tiempo de operación	Metodología	Rango de k [m/d]		Comentarios
Fisher (1990)	Control	100/4	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava D_{10} =5-10mm y un 20% de 3-5mm.	2 años	Ecuación de Darcy	1700	32000	Los resultados evidenciaron una zona de alta acumulación de sólidos (k baja) y una zona de baja acumulación (k estable). El régimen de flujo pudo no haber sido totalmente laminar en todo el período de estudio ya que $0.6 < Re < 2.8$.
	Scirpus						3000	21600	
	Typa						2200	15600	
Kadlec and Watson (1993)	Benton 3	330/120	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava Comun	1 Año	Estudio de Dupuit	1000	27000	Se evidenció la incidencia de la Evapotranspiración al momento de calcular la conductividad hidráulica ya que hace cambiar el régimen de flujo lo que invalida la aplicación de la ecuación de Darcy.
Sanford (1995 b)	Caña (Phragmites australis)	33/3	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava gruesa Gravilla Arena	2 años y 2 meses	Ecuación de Darcy	25.92	4925	Al final de los 26 meses de estudio se observó una colmatación en la arena y la grava obteniendo un valor de conductividad de 604.8 [m/d] que solamente permitía que el flujo siguiera siendo subsuperficial.
						Ecuación de Drenaje	17.3	3456	
Drury and Maizhaus en (2000)	Celda 1	33/33	Humedal Artificial de Flujo Subsuperficial Horizontal	80% Grava de Rio 20% Caliza	2 Años	Ecuación de Darcy	3	6000	Se comprobó que existe mayor pérdida de la conductividad hidráulica en la entrada del humedal disminuyendo casi un 90%.
	Celda 1	16/28		60% Grava de Rio 20% Caliza 20% Compost			5	3200	

Tabla 4. Métodos para la medición de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial. (Continuación).

Estudio	Sistema	L/B [m/m]	Tipo de Humedal	Medio de Soporte	Tiempo de operación	Metodología	Rango de k [m/d]		Comentarios
Caselles-Osorio (2007)	Verdú 1	30/33	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava(D_{10} =5 mm)	4 años	Cabeza Variable	2	12	Los valores de conductividad hidráulica fueron más bajos cerca de la zona de entrada, excepto Verdú 2 los demás humedales al menos uno de los valores de k observados cerca de la entrada son ≤ 3.0 m/d. Estos valores son consistentes debido a que en las zonas de entrada se presentaba una acumulación de agua a nivel superficial.
	Verdú 2	16/32		Grava(D_{10} =5 mm)			25	61	
	Alfés	37/34		Grava(D_{10} =4 mm)			1	19	
	Corbins	35/35		Grava(D_{10} =5 mm)			2	200	
	Almatret N	20/24		Grava(D_{10} =5 mm)	5 años		1	87	
	Almatret S	22/22		Grava(D_{10} =5 mm)	3		82		
Knowles and Davies (2009)	Moreton Morrell	15/15	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava (D_{10} =3-9 mm)	15 años	Cabeza Constante	0,9	1230	Los resultados en la práctica tienen un $\pm 30\%$ grado de incertidumbre asociado al efecto de la variación en los diámetros de grava, y la obstrucción durante la inserción del tubo en la grava.
	Fenny Compton	12/40		Grava (D_{10} =6-12 mm a 0.2 m de profundidad)	1 Año	Cabeza Constante	0	8640	Presentó trayectorias de flujo preferencial a una profundidad de 0.2 m (profundidad total 0.6 m), que corresponde a la transición entre grava más gruesa y capas de grava menos gruesa.
				Grava (D_{10} =3-6 mm a 0.4 m de profundidad)					

Tabla 4. Métodos para la medición de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial. (Continuación).

Estudio	Sistema	L/B [m/m]	Tipo de Humedal	Medio de Soporte	Tiempo de operación	Metodología	Rango de k [m/d]		Comentarios
Pedescoll et al. (2009)	Verdú 1	30/33	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava Común	6 Años	Cabeza Variable	0	650	Se demostró una relación proporcional no directa entre la conductividad hidráulica y los sólidos totales retenidos en el humedal, además con la forma de medición usada se logró observar las zonas de flujo preferencial del agua en el humedal.
	Corbins	35/35					0	810	
Knowles et al. (2010)	Moreton Morrell	15/15	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava (Diámetro 3-9 mm)	15 años	Cabeza Constante	0,1	1550	El valor mínimo de 0.1 m/d se midió en el punto de entrada y el máximo de 1550 m/d medido en el punto de salida. La conductividad hidráulica del sistema generalmente disminuye en la entrada y aumenta hacia a la salida, pues en la entrada hay mayor acumulación de sólidos.
Pedescoll et al. (2010)	Tanque 1 (Colmatado)	0.95/0.	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial	Arena ($\epsilon=31\%$)	1 mes	Cabeza Variable	4	6	Los valores de conductividad hidráulica están en el rango de los descritos para los diferentes materiales granulométricos, es un método fiable pues registra las diferencias encontradas por las condiciones de colmatación presentada.
	Tanque 2 (No Colmatado)	70		Grava ($\epsilon=39\%$)			330	365	

Tabla 4. Métodos para la medición de la conductividad hidráulica en humedales artificiales de flujo subsuperficial. (Continuación).

Estudio	Sistema	L/B [m/m]	Tipo de Humedal	Medio de Soporte	Tiempo de operación	Metodología	Rango de k [m/d]		Comentarios
Knowles and P. Davies et al. (2011)	Moreton Morrell	15/15	Humedales Artificiales de Flujo Subsuperficial Horizontal	Grava (D_{10} =3-9 mm)	17 años	Cabeza Constante	0	35	Los perfiles horizontales mostraron que ambos métodos correlacionan por una función de potencia en un rango de conductividades hidráulicas (0-70 m / día). Los dos métodos son útiles para identificar la distribución de la colmatación en el humedal y sobre todo, las áreas en donde se presenta flujo superficial.
						Cabeza Variable	0	35	
	Fenny Compton	12.5/36	Grava (D_{10} =6-12 mm a 0.2 m de profundidad)	18 años	Cabeza Constante	0	70		
					Grava (D_{10} =3-6 mm a 0.4 m de profundidad)	Cabeza Variable	0	70	

* Los rangos de k fueron empleados para construir los perfiles horizontales de la conductividad hidráulica.

* ϵ corresponde a la porosidad del medio granular.

2. COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO.

En este estudio se plantea evaluar la línea base hidráulica, para ello se parte de los conceptos hidráulicos de los humedales construidos tradicionales y del flujo en medios porosos.

Para un humedal de flujo horizontal el tiempo de retención teórico está definido por:

$$\tau = \frac{V}{Q} \quad (3)$$

Donde:

τ : Tiempo de retención teórico [s].

V : Volumen del reactor disponible para el agua en el humedal m^3 .

Q : Caudal que entra al humedal $m^3 s$.

La velocidad superficial está relacionada en la siguiente ecuación:

$$v = \frac{Q}{A_t} \quad (4)$$

Donde:

v : Velocidad superficial m/d .

Q : Caudal $m^3 d$.

A_t : Área perpendicular al flujo m^2 .

Todos los modelos usados actualmente en los humedales construidos asumen inicialmente un comportamiento hidráulico bajo condiciones uniformes de flujo a pistón, es decir, no existe difusión longitudinal ni mezcla, la dispersión es nula, todos los elementos del sistema viajan a la misma velocidad, las partículas retienen su identidad y permanecen en el humedal durante un tiempo igual al tiempo teórico de retención [33]. El patrón real de flujo se identifica a partir del ensayo de trazadores.

Para estudiar el límite de validez de la ley de Darcy (Ec. 1) se calcula el número de Reynolds aplicado a lechos empacados [14] (Figura 2), como se describe en la Ec. 5.

$$Re = \frac{D_p v \rho}{(1 - \varepsilon) \mu} \quad (5)$$

Donde:

ρ : Densidad del fluido $Kg \ m^3$.

v : Velocidad superficial $m \ d$.

D_p : Diámetro efectivo del medio $6 \ a_v \ m$.

a_v : Superficie específica $m^2 \ m^3$.

μ : Viscosidad dinámica $Kg \ md$.

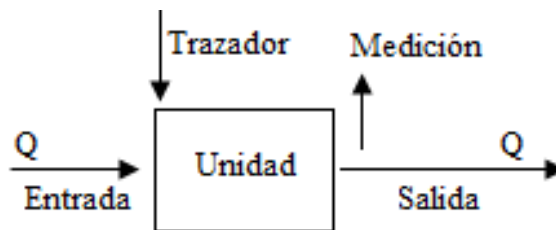
ε : Porosidad del medio $m^3 \ m^3$.

Existe flujo laminar cuando el número de Reynolds (**Re**) es menor a 1, y es válida la ley de Darcy (Ec. 1). Cuando **Re** varía entre 1 y 10 no se garantiza totalmente flujo laminar pero si la aplicabilidad de esta ley, pues la contribución del régimen turbulento en este rango puede ser ignorada bajo un pequeño error de medida [8].

3. USO DE TRAZADORES PARA DETERMINAR EL TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICO Y PATRÓN DE FLUJO.

Un ensayo de trazadores se utiliza para determinar el tiempo de permanencia hidráulica y evaluar el comportamiento del flujo dentro del humedal, esto se conoce como evaluación hidrodinámica. Consiste en agregar una concentración conocida de una sustancia trazadora que no reaccione con el medio en el afluente del humedal, y realizando mediciones de tiempo y concentración del trazador en el fluido como se muestra en la Figura 3, hasta que la concentración sea aproximadamente igual a la registrada antes de aplicar el trazador.

Figura 3. Aplicación de trazadores a un humedal



Fuente: PÉREZ CARRIÓN, J.M. "Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención", Manual de evaluación. Tomo II, Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS/OPS, 1992

3.1 OBTENCIÓN DE LAS FUNCIONES DE DISTRIBUCIÓN DE TIEMPOS DE RETENCIÓN (FDTR).

Los humedales de flujo subsuperficial se diseñan para que sigan condiciones de flujo ideal (en pistón) como se menciona en el Cap. 3. En la práctica el comportamiento del flujo dentro del humedal es incierto porque dentro de este

pueden presentarse zonas de inundación, zonas de sombra y zonas muertas que alteran las condiciones ideales de flujo presentándose estancamientos.

Según como se inyecte el trazador se pueden obtener funciones de distribución de tiempos de residencia (FDTR), la curva E (inyección instantánea del trazador) y la curva F (inyección en escalón). En esta investigación el estímulo introducido se realiza en un solo impulso de trazador, por tal razón se calcula la función E (t).

La función E (t) representa la concentración de trazador en cada instante de tiempo respecto de la cantidad inicial de trazador que se introduce al humedal y se determina a partir de la siguiente ecuación:

$$E = \frac{C_{impulso}}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i} \quad (6)$$

Donde:

E : Función E $1/s$.

$C_{impulso}$: Curva que relaciona las concentraciones medidas a la salida en función del tiempo de medida.

Q : Flujo volumétrico Lt/s .

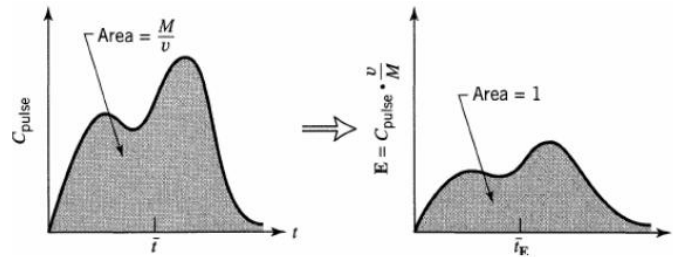
M : Masa de trazador inyectada gr .

La relación M/Q es igual al área bajo la curva $C_{impulso}$ como se demuestra en la Ec. 7:

$$A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i = \frac{M}{Q} = \frac{gr * s}{Lt} \quad (7)$$

En la Figura 4 se muestra la transformación de la curva $C_{impulso}$ en una función E (t).

Figura 4. Transformación de la curva $C_{impulso}$ en una función $E(t)$ [21].



Fuente: LEVESPIEL O. Ingeniería de las reacciones químicas, third ed. Limusa Wiley, Ciudad de México, México, 2004. P. 257-292

El objetivo de la evaluación hidrodinámica del humedal es comparar la curva E normalizada (E_{θ}) con curvas E normalizadas para diferentes modelos de flujo. La normalización de la curva $E(t)$ se realiza a partir de la siguiente ecuación:

$$E_{\theta} = \tau * E \quad (8)$$

Donde:

E_{θ} : E normalizada, adimensional.

τ : Tiempo real de retención s .

El tiempo real de retención en s no necesariamente coincide con el tiempo de retención teórico (Ec. 3) y se calcula a partir de la curva $C_{impulso}$ como se muestra en la Ec. 9:

$$\tau = \frac{\sum_{i=1}^n t_i * C_i * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i} \quad (9)$$

La curva E normalizada (E_{θ}) se grafica respecto al tiempo normalizado θ como se muestra en la Ec. 10:

$$\theta = \frac{t}{\tau} \quad (10)$$

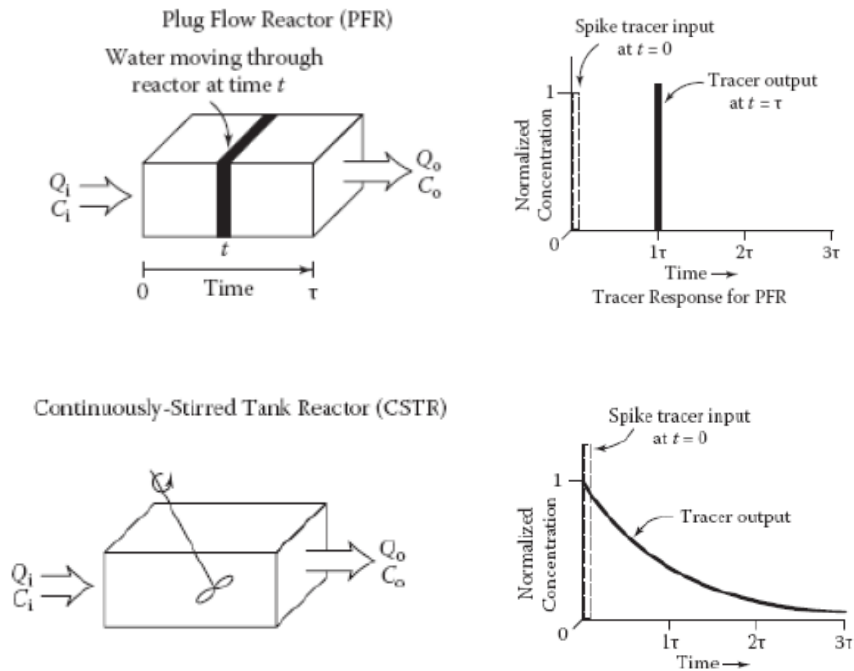
Donde:

t: Tiempo transcurrido después de haber inyectado el trazador s .

τ : Tiempo teórico de retención s .

Dependiendo de la tendencia de la curva E_θ a los modelos de flujo ideal (Figura 5), el comportamiento dentro del reactor podría ser de flujo pistón (Plug Flow Reactor o PFR) o reactor de mezcla completa (Completed Stirred Tank Reactor o CSTR).

Figura 5. Modelo normalizados de curva E (t) para PFR y CSTR. [16].



Fuente. KADLEC, R. H. y WALLACE, S. D. Treatment Wetlands, Second ed. Taylor & Francis Group Publishers, Boca Raton, Florida USA, 2009, p. 967

3.2 MODELO DE FLUJO PISTÓN CON DISPERSIÓN (DPFR).

Se considera el modelo de flujo pistón con dispersión cuando se superpone el modelo PFR con cierto grado de diseminación longitudinal, e implica considerar que este fenómeno ocurre por el efecto de zonas muertas, desviaciones o cortocircuitos. Para aplicar este modelo se debe utilizar la Ec.11, con la cual se halla la curva $E_{\theta D}$ para el modelo DPFR [16]:

$$E_{\theta D} = \frac{1}{2 \pi D vL} e^{-\frac{1-\theta^2}{4 D vL}} \quad (11)$$

Donde:

$D vL$: Módulo de dispersión longitudinal al flujo dentro del humedal, adimensional.

L : Distancia desde la entrada hasta la salida [m].

D : Coeficiente de dispersión (Ec.12) $m^2 s$.

El grado de dispersión longitudinal se verifica mediante la gráfica obtenida de $E_{\theta D}$ vs θ , la cual tiene las siguientes características (Gráfica 1- Anexo 1):

- $D vL \rightarrow 0$ dispersión insignificante, por lo que hay flujo pistón.
- $D vL \rightarrow \infty$ gran dispersión, por lo que hay reactor de mezcla completa.
- $D vL = 0.002$ dispersión pequeña.
- $D vL = 0.025$ dispersión intermedia.
- $D vL = 0.2$ dispersión grande.

$$D = \frac{1}{Pe} \quad (12)$$

Donde:

Pe : Número de Péclet.

Para hallar Pe es necesario normalizar la varianza mediante la Ec. 13:

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\sigma^2}{\tau^2} \quad (13)$$

La varianza σ^2 s^2 representa el cuadrado de la dispersión de la distribución conforme el trazador pasa por la salida del humedal [21], el cálculo de este parámetro se efectúa a partir de la Ec. 14:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^n t_i^2 * E_i * C_i \Delta t_i}{\sum_{i=0}^n E_i * C_i \Delta t_i} - \tau^2 \quad (14)$$

Donde:

σ^2_{θ} : Varianza normalizada, adimensional.

τ^2 : Tiempo real de retención s^2 .

σ^2 : Varianza s^2 .

Cuando se obtiene la varianza normalizada el siguiente paso es calcular el número de Péclet por medio de la Ec. 15 y finalmente obtener la curva $E_{\theta D}$ vs θ :

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{2}{Pe} - \frac{2}{Pe} (1 - e^{-Pe}) \quad (15)$$

3.2 EFICIENCIA HIDRÁULICA.

La eficiencia hidráulica es la capacidad que tiene un reactor para distribuir el flujo uniformemente en su volumen útil, aumentando el tiempo de contacto de los contaminantes en el sistema y optimizando su remoción dentro de los humedales de flujo subsuperficial [9].

Existen términos para determinar la eficiencia hidráulica como λ_t y λ_p que evalúan las características del volumen útil [29] y la utilización de este [37] respectivamente, estos índices son calculados a partir de las Ec. 16 y 17:

$$\lambda_t = \frac{\tau}{\tau} \quad (16)$$

$$\lambda_p = \frac{T_p}{\tau} \quad (17)$$

Donde:

T_p = Tiempo Correspondiente al máximo de concentración de Trazador a la salida del Humedal.

Cuando λ_t es igual a 1 significa que el volumen total del reactor es igual al volumen útil, pero si este es menor o mayor a 1 indican que la distribución del flujo en el reactor no es uniforme. Cuando $\lambda_t < 1$ indican presencia de espacios muertos o reducciones del volumen útil [16], de lo contrario indica retenciones indeseadas de trazador [27].

Cuando $\lambda_p=0$ predomina el flujo en mezcla completa, si es >1 la distribución del flujo no es uniforme y si es próximo a 1 se puede afirmar que predomina el flujo pistón [29].

3.3 OBTENCIÓN DEL VOLUMEN ÚTIL

El volumen útil es posible hallarlo usando la Ec. 3, en este caso se emplea τ . Los resultados de este se pueden analizar según los índices de eficiencia hidráulica mencionados en el Cap. 4.3.

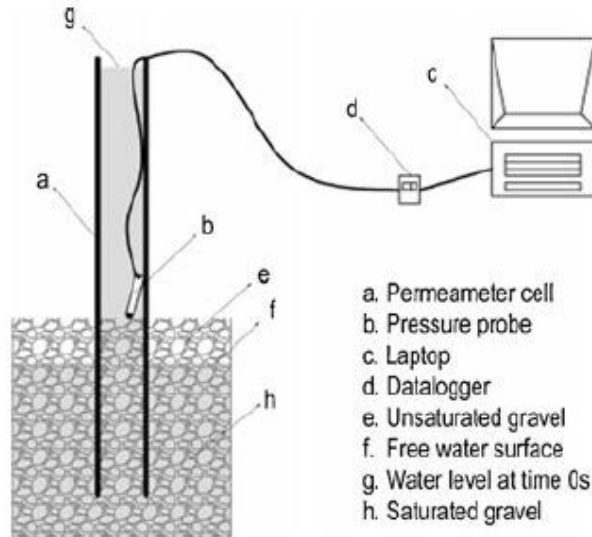
4. MEDICIONES EN CAMPO DE LA CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

Las medidas puntuales de permeabilidad normalmente se realizan en geotecnia y pueden ser tanto de nivel constante como de nivel variable. En este estudio se emplea el test de Lefranc de carga variable, el cual está sustentado mediante la revisión de las metodologías de medida. Es una técnica suficientemente precisa para la evaluación de la colmatación en humedales construidos de FSSH a gran escala y permitirá en este estudio determinar la conductividad hidráulica base de un sistema HAAT en investigación.

4.1 ENSAYO DE LEFRANC CON NIVEL VARIABLE.

El permeámetro de cabeza variable basado en el test de Lefranc [23] se utiliza para medir la conductividad hidráulica saturada de humedales artificiales [26]. Un esquema del montaje experimental se muestra en la Figura 6. La prueba consiste en una columna de temporización (Figura 6 [a]) en la que se registra la caída del nivel del agua, esta columna o tubo se encuentra agujereada en la parte que se sumerge en el medio de soporte. El tubo es anclado en el medio hasta que se alcanza la profundidad deseada. Una sonda de presión (Figura 6 [b]) se ubica dentro del tubo y se utiliza para medir el nivel del agua dentro del mismo mediante un registrador de datos (Figura 6 [d]).

Figura 6. Esquema del montaje para la determinación *in situ* de la conductividad hidráulica basado en el test de Lefranc de carga variable



Fuente: PEDESCOLL, A., KNOWLES, P.R., DAVIES, P., GARCÍA, J., PUIGAGUT, J. "A comparison of in situ constant and falling head permeameter tests to assess the distribution of clogging within horizontal subsurface flow constructed wetlands," *Water, Air and Soil Pollution, Journal of Hazardous Materials*, Vol.223, 2012, pp. 2263-2275

Es recomendable tomar valores de la conductividad cada segundo o más, dependiendo del valor esperado, dando lugar a una curva exponencial negativa entre el nivel de agua y el tiempo. El modelo matemático descrito en la Ec. (18) se obtiene mediante la combinación del principio de conservación de la masa y la ley de Darcy, con el cual se estima el valor de la conductividad hidráulica:

$$k = \frac{d^2 \ln 2L_s}{8L_s t} \ln \frac{h_1}{h_2} \quad (18)$$

Donde:

k : Conductividad Hidráulica $m s^{-1}$.

h_1 : Nivel de agua inicial t_i m .

h_2 : Nivel de agua en el tiempo t_{i+1} m .

d : Diámetro del tubo m .

L_s : Longitud sumergida del tubo m .

t : Tiempo s .

5. MATERIALES Y MÉTODOS

5.1 DESCRIPCIÓN DE LOS SISTEMAS EMPLEADOS PARA EL ESTUDIO

La planta piloto consta de tres humedales construidos de flujo horizontal subsuperficial de alta tasa con igual configuración (relación largo-ancho, profundidad del lecho y de la lámina de agua) como se muestra en la Figura 8. A cada sistema le pertenece una especie distinta de macrófita (nativas de la zona), todos los humedales recibirán al mismo tiempo el mismo vertido de agua. Los modelos experimentales están ubicados en el Centro de Caracterización de Materiales de la Universidad Industrial de Santander (Figura 7).

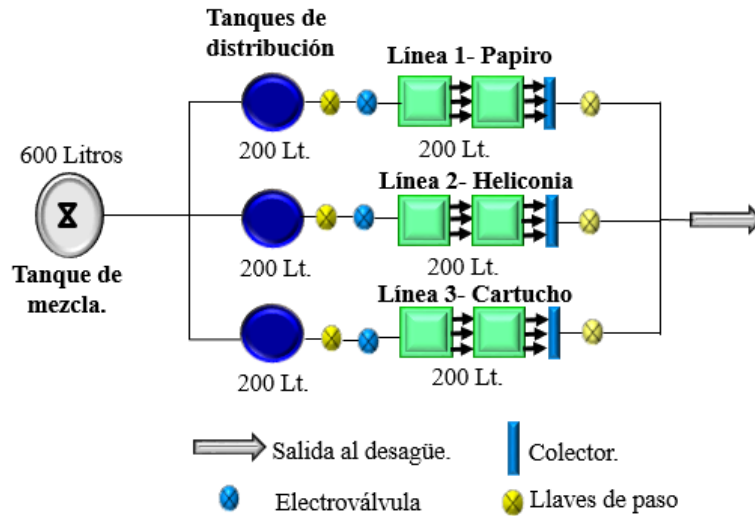
Figura 7. Vista general del modelo experimental.



Con el fin de determinar la línea base del comportamiento hidráulico de los humedales construidos se realiza un seguimiento tanto de la conductividad hidráulica como del tiempo de retención. En la primera etapa de seguimiento el

sistema se encuentra sin plantas y alimentado con agua potable, y en la segunda etapa se encuentra con vegetación. Las mediciones se llevaron a cabo entre Marzo- Abril de 2015.

Figura 8. Vista en planta del modelo experimental.



5.1.1 El lecho. El lecho impermeable de cada uno de los humedales está compuesto por dos reactores H022401 (polietileno de alta densidad), un desagüe para el efluente (tubo PVC de 3" de diámetro), cuya función es controlar la altura de la lámina de agua en el efluente (0.30 m), el volumen de agua para ambos reactores es de 200 litros. En la Figura 9 se muestra el esquema del lecho y en la tabla 5 su correspondiente dimensionamiento.

Tabla 5. Dimensiones del contenedor H022401.

Capacidad [m ³]	Largo A[m]	Largo B[m]
0.24	0.94	0.7
Alto C[m]	Ancho D[m]	Ancho E[m]
0.61	0.65	0.44

Figura 9. Contenedor que sirve de lecho impermeable.

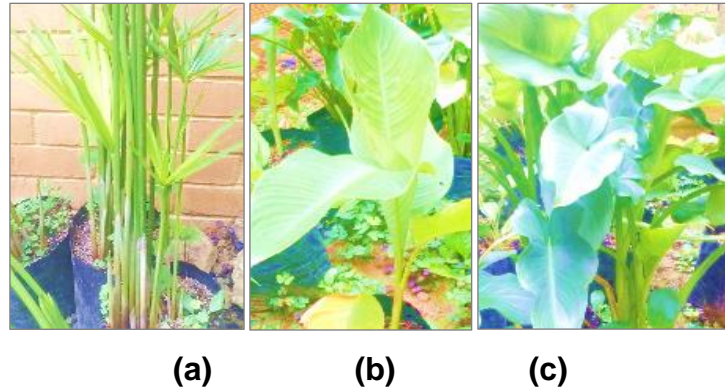


5.1.2 El medio de soporte. Se emplea un medio filtrante (MSP) desarrollado por Sanabria [35], aplicado a humedales artificiales de alta tasa. Este medio es esférico con ranuras a los costados y plano en los polos, posee una superficie específica de $310 \text{ m}^2 \text{ m}^{-3}$ y se encuentra a 0.35 [m] del fondo del humedal.

5.1.3 El medio de vegetal. En la Figura 10 se muestra la vegetación que se utiliza en este sistema de tratamiento, se distribuye en tres líneas según su especie: Línea 1 (*Cyperus alternifolius*, nombre común "Papiro"), Línea 2 (*Heliconia burleana*, nombre común "Platanillo") y Línea 3 (*Zantedeschia aethiopica*, nombre común "Cartucho").

Debido a que era necesario el estudio sin vegetación, la línea 1 fué plantada una semana después de las líneas 2 y 3. Posteriormente se realizaron los ensayos hidrodinámicos del sistema plantado.

Figura 10. (a) Papiro, (b) Heliconia y (c) Cartucho.



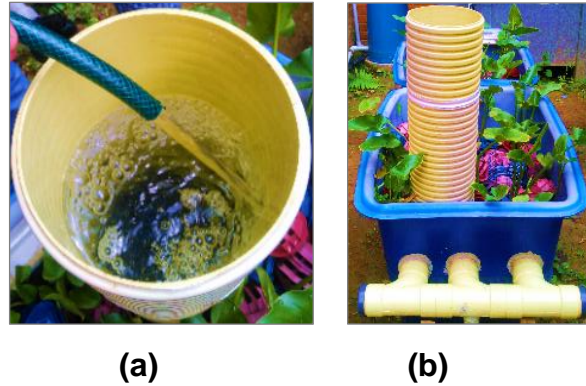
5.1.4 Preparación de los afluentes y alimentación de los humedales. El afluente que se introduce en cada humedal artificial corresponde a un caudal de 200 *Lt d* y cada 4 horas se realiza una descarga de agua que corresponde a un volumen de 33.33 litros. En esta investigación solo se tiene en cuenta el agua sin carga orgánica para determinar la línea base del comportamiento hidráulico.

5.2 ENSAYO DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.

Mediante este ensayo se determina la conductividad hidráulica base de los humedales FSS de alta carga orgánica. Es imposible extraer un testigo representativo para analizar sus características hidráulicas del medio, por lo que se opta por realizar un ensayo “in situ” basado en un ensayo Lefranc de carga variable (Cap. 5.1).

5.2.1 Preparación del ensayo. Se dispone de un tubo de PVC de 1 [m] de longitud y 8 pulgadas de diámetro interno, se inserta en el medio de soporte (MSP) hasta alcanzar los 0.3 [m] de profundidad (Figura 11 [b]). El tubo se hince de tal forma el sistema no se afecte.

Figura 11. (a) Detalle del tubo y el globo en el proceso de llenado, (b) Inserción del tubo de PVC en el MSP.



Adicionalmente, se introduce la sonda de presión HOB0® U20-001-01 sobre el medio de soporte, la cual registra el descenso del nivel del agua cada segundo. Para mantener un nivel de agua inicial dentro del tubo es necesario emplear un globo lleno de agua que obstruye el paso en su interior [Figura 11 [a]]. Dicha sonda registra presión absoluta (KPa), que más tarde se convierte en lecturas de nivel del agua en m.c.a (software). En este programa la presión absoluta incluye la presión atmosférica y la altura de agua, es recomendable verificar la presión atmosférica local (medida por la sonda). Los datos se registran en un computador mediante un acoplador HOB0® U-DTW-1 (Figura 12 [a] y[b]), obteniendo así un registro periódico de los valores de altura cuando desciende el agua.

Figura 12. (a) Acoplador HOBO U-DTW-1, (b) Registro de datos: sonda y acoplador.



(a)



(b)

5.2.2 Ejecución del ensayo. Inicialmente se configura el software con la sonda conectada, especificando su hora de inicio y cada cuanto realiza la medición. Una vez introducida la sonda se introduce un volumen conocido en el interior del tubo y se observa la evolución de la columna de agua a lo largo del tiempo, obteniendo valores o lecturas del nivel del agua cada segundo. Se concluye hasta recuperar el nivel anterior al vertido de agua, este ensayo se realiza al inicio y al final de cada humedal.

5.2.3 Tratamiento de datos. Se emplea un método de ajuste por mínimos cuadrados con el fin de minimizar el error existente entre los datos de h_1 observados y h_2 calculados por la función de ajuste ($f x_i$ Ec.19):

$$E_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_i - f x_i)^2 \quad (19)$$

Donde:

E_i^2 : Diferencia entre el valor esperado y observado m .

y_i : Altura h_1 observada m .

$f x_i$: Altura h_2 esperada m . Calculada con la Ec.20.

Mediante un proceso iterativo de k realizado en MS EXCEL™ se ajustan los valores observados a los esperados de las alturas del nivel del agua, de tal forma que la sumatoria E_i^2 tienda a cero.

5.3 ENSAYO DE TRAZADORES.

Se ha realizado un ensayo de trazadores mediante un pulso de Cloruro de Sodio (NaCl) con el fin de estimar el tiempo de retención hidráulico y la variación del volumen útil de los humedales construidos durante el tiempo de estudio especificado (Cap. 4).

Este ensayo se basa en la medida de la conductividad eléctrica en $\mu s/cm$ de los efluentes por medio de un conductivímetro de campo PCE-PHD 1 [Figura 13[a)]. Este parámetro depende de la temperatura y es una medida indirecta de las sales disueltas en el agua, basada en la capacidad de estas de conducir la corriente eléctrica.

5.3.1 Preparación del ensayo. Para la determinación del tiempo de retención hidráulico a través del ensayo de trazadores, inicialmente es necesario estimar la función que relaciona la concentración y conductividad eléctrica. Este proceso se realiza adicionando cantidades de sal en un litro de solvente y registrando los valores de conductividad eléctrica. Se obtuvo una gráfica con su respectiva regresión lineal (Gráfica 2-Anexo 2). Este proceso es útil para obtener los valores de concentración durante el ensayo de trazadores.

El segundo paso consiste en determinar la cantidad de trazador a administrar (inyección instantánea), el cual no debe precipitarse en el interior del humedal y debe ser un valor suficiente para que la variación de la conductividad eléctrica a la

salida sea registrada. La dosificación de NaCl necesaria se obtiene por medio de la Ec. 20:

$$P = V_T * f * C_o \quad (20)$$

Donde:

P : Peso del cloruro de sodio *gr* .

V_T : Volumen del humedal incluyendo la solución salina (valor constante de 210) *Lt* .

f : Factor de corrección para cloruros (1.65) [28].

C_o : Concentración inicial de trazador *gr Lt* .

Para hallar la cantidad de NaCl se asumió C_o de 0.3 [gr/Lt]. Según [12] la concentración de cloruros en el agua potable es alrededor de 0.25 [gr/Lt], en este caso el valor de P es igual 103.95 [gr].

5.3.2 Ejecución del ensayo. Inicialmente se disuelve la cantidad de NaCl correspondiente en 10 litros de solución y se introduce al vertedero en una dosis instantánea, en un tiempo inferior a 1/30 del tiempo de retención teórico, es decir, $\tau=1$ día [28]. Seguidamente se registran mediciones de conductividad eléctrica tras el paso del trazador, es decir, al final de cada reactor que compone el sistema (Figura 13 [a]), las mediciones se suspenden cuando la conductividad eléctrica sea aproximadamente igual a la registrada sin trazador.

5.3.3 Tratamiento de datos. Es necesario registrar 3 muestras por humedal [Figura 13 [b)] con el fin disminuir el error en la medición. A partir de las conductividades eléctricas registradas en los t_i se determinan las concentraciones en *gr Lt* por medio de la función que las relaciona (Anexo 2), para finalmente graficar C *gr Lt* vs t *s* y obtener la curva $C_{impulso}$.

Por medio de esta curva es posible calcular el tiempo de retención hidráulico mediante la Ec.9. Para determinar el patrón de flujo es necesario obtener la FDTR y comparar con curvas E normalizadas para diferentes modelos de flujo.

Figura 13. (a) Conductivímetro PCE-PHD1, (b) Toma de una muestra del efluente.



(a)

(b)

6. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.

6.1 CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA

Realizando la metodología descrita en el Cap. 6.2.3 se obtiene las conductividades hidráulicas de la línea base de este sistema de tratamiento (tabla 6). Los cálculos de la línea base comprenden: la línea sin plantar (Cuadro 1 - Anexo 3), y las líneas 1, 2,3 ensayo del día 15 (Cuadro 2, 3 y 4 - Anexo 3).

Tabla 6. Conductividad hidráulica en estudio.

Dias de estudio	Linea de tratamiento	Conductividad hidráulica [m/d]	
		Reactor 1	Reactor 2
0	Linea sin plantar	6480	
15	Linea 1	5140.8	5227.2
	Linea 2	3686.7	3741.1
	Linea 3	3844.8	3283.2

La conductividad hidráulica obtenida para la línea sin plantar es mayor si se compara con las líneas 1,2 y 3 del ensayo del día 15, lo que se infería inicialmente. Los resultados obtenidos en el estudio de las líneas plantadas muestran una disminución de la conductividad hidráulica respecto al sistema sin plantar de aproximadamente 40% en las líneas 2 y 3. Por el Contrario la línea 1, (papiro) puesta a punto días después de las demás, muestra un descenso del 16% comparado con el sistema inicial.

Dentro de la revisión de las metodologías de medida de la conductividad hidráulica (medios granulares), se menciona en [19] un sistema joven (1 año de operación) cuya medida fue de [0-8640] [m/d] por carga constante. En esta investigación se emplea la metodología descrita en [26] (carga variable), donde los valores obtenidos fueron menores y en un tiempo inferior, comparado el rango obtenido en [19]. En [26] se concluye que el método es lo suficientemente preciso como para ser aplicado a humedales construidos a gran escala y en [19] se argumenta que los resultados pueden presentar errores de 4 órdenes de magnitud. Lo anterior implica que los valores obtenidos (tabla 6) son consistentes según el tiempo de operación y tipo de medio filtrante.

La variación de la medida de la conductividad hidráulica depende del método aplicado, según el estudio [24] la conductividad hidráulica empleada para construir perfiles horizontales (caso en estudio) por los ensayos de carga variable basado en el test de Lefranc [26] y el permeámetro de carga constante empleado en [19], muestran diferencias en magnitud pero ambos métodos presentan similitud en la distribución de la colmatación.

Es necesario verificar la validez de la ley de Darcy en esta investigación, dado que el modelo matemático empleado (Ec. 18) se obtiene mediante la aplicación de esta. Calculando la Ec. 5 el valor para este estudio es:

$$Re= 4.83.$$

Donde:

$$\rho= 997 \text{ [Kg/m}^3\text{]}.$$

$$v=1.35 \text{ [m/d]}$$

$$D_p = 0.0194 \text{ m}$$

$$\mu=76.896 \text{ [Kg/md]} \text{ a } 25^\circ\text{C}.$$

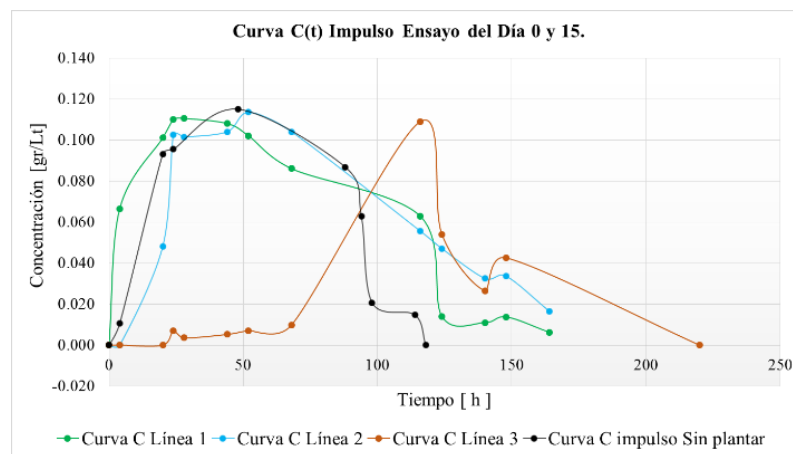
$$\varepsilon=0.93 \text{ [m}^3\text{/m}^3\text{]}.$$

Este valor obtenido de **Re** no garantiza totalmente flujo laminar pero si la aplicabilidad de la ley de Darcy (Cap. 3). En el estudio [7] había cierta incertidumbre en su uso para el rango de [1-10], pero en [8] se ratifica su validez pues el régimen turbulento en este rango se puede ignorar bajo un pequeño error en el cálculo de la conductividad hidráulica. La viscosidad dinámica empleada según [22] a 25°C y la porosidad del MSP se obtuvo en laboratorio, a partir del cociente entre el Vol. Vacíos=18 litros y el Vol. Total=19.39 litros, este valor no representa variación significativa durante la línea base hidráulica.

6.2 ENSAYO DE TRAZADORES

La curva $C_{impulso}$ para el ensayo del día 15 (Figura 14) se compara con ensayo del día cero del tiempo de estudio. Las líneas 1 y 2 junto con la línea sin plantar presentaron un ascenso y un descenso paulatino, mientras que en la línea 3 el incremento de la concentración fue repentino (Anexo 4-Cuadro 5-8).

Figura 14. Concentración Vs tiempo en los ensayos de los días 0 y 15.



Para el ensayo del día 15 se observó que la concentración de trazador en el fondo del reactor 1 de las líneas 2 y 3 fue más significativa (Figura 16), tuvo una menor variación y a la terminación del ensayo se encontraba una concentración residual considerable, comparado con la línea 1 que presentó un mejor comportamiento en el fondo del humedal (Anexo 5- Cuadro 9-16). Sin embargo, todas las líneas a la profundidad de 0.15 [m] no presentaron retenciones de trazador durante el tiempo de estudio.

Los datos registrados demuestran que el patrón de flujo para la línea sin plantar, las líneas de tratamiento y en todo el tiempo de estudio sigue un modelo de flujo pistón con dispersión (DPFR). Lo anterior se verifica mediante el cálculo del módulo de dispersión longitudinal dentro del humedal (tabla 7).

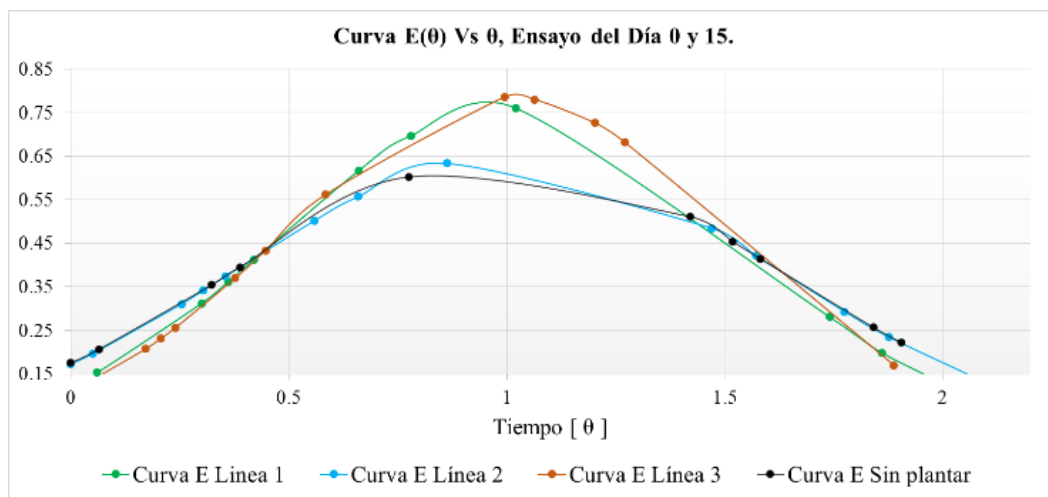
Tabla 7. Módulo de dispersión en el tiempo de estudio.

Linea	Modulo de Disperción Horizontal D/L			
	Sin Plantar	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Día 0 sin vegetación	0.192	Papiro	Heliconia	Cartucho
Día 15 con vegetación	--	0.137	0.189	0.129

Los humedales artificiales de flujo subsuperficial son diseñados teóricamente para satisfacer un flujo ideal, (flujo en pistón) pero existen factores como las zonas muertas y flujos preferenciales que causan alteraciones a las condiciones ideales, la terminología para estas alteraciones se denomina *dispersión* y se debe a una diseminación del flujo. Estudiando los valores de la tabla 7 y los rangos mencionados en la Cap. 4.2 observamos que las líneas aun en el rango de flujo pistón, presentan dispersión elevada, debida posiblemente a retenciones (Tabla 9) causadas en el reactor uno de las diferentes líneas de tratamiento estudiadas.

Las curvas $E_{\theta D}$ vs θ (Anexo 4- Cuadro 5-8) obtenidas para el ensayo del día 15 se comparan con la curva del ensayo del día 0. Los módulos de dispersión hallados describen una dispersión grande (Gráfica 1- Anexo 1), la línea sin plantar y la línea 2 presentan mayor dispersión (las curvas son más planas y tienden al eje de las abscisas) que las líneas 1 y 3 como se muestra en la Figura 15.

Figura 15. Curvas $E_{\theta D}$ Vs θ para los ensayos de los días 0 y 15.



6.2.1 Tiempo de retención hidráulico. En la tabla 8 se observa un aumento en los τ comparados con él τ , este aumento se pudo presentar debido a una retención del trazador en el fondo del reactor 1, causando una salida lenta y con alta dispersión [37], como se observa en las Figura 16. Los cálculos se encuentran en el Anexo 4- Cuadro 8-16.

Tabla 8. Tiempos de retención hidráulicos reales

Linea	Tiempo de Retencion Hidraulico Real [d]			
	Sin Plantar	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Día 0 sin vegetación	2.581	Papiro	Heliconia	Cartucho
Día 15 con vegetación	--	2.777	3.287	4.855

6.2.2 Índices de Eficiencia Hidráulica. Los índices de eficiencia hidráulica obtenidos (tabla 9 y 10) indican que la distribución del flujo dentro del reactor no es uniforme para las líneas de tratamiento. Además, como se observa en la tabla 9 la línea 3 presenta mayor acumulación de trazador, este resultado se refleja en la Figura 16.

Tabla 9. Valores de λ_t .

Línea	λ_t			
	Sin Plantar	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Día 0 (Sin Plantar)	2.581	Papiro	Heliconia	Cartucho
Día 15 (Sin Plantar)	-	2.777	3.287	4.855

Tabla 10. Valores de λ_p .

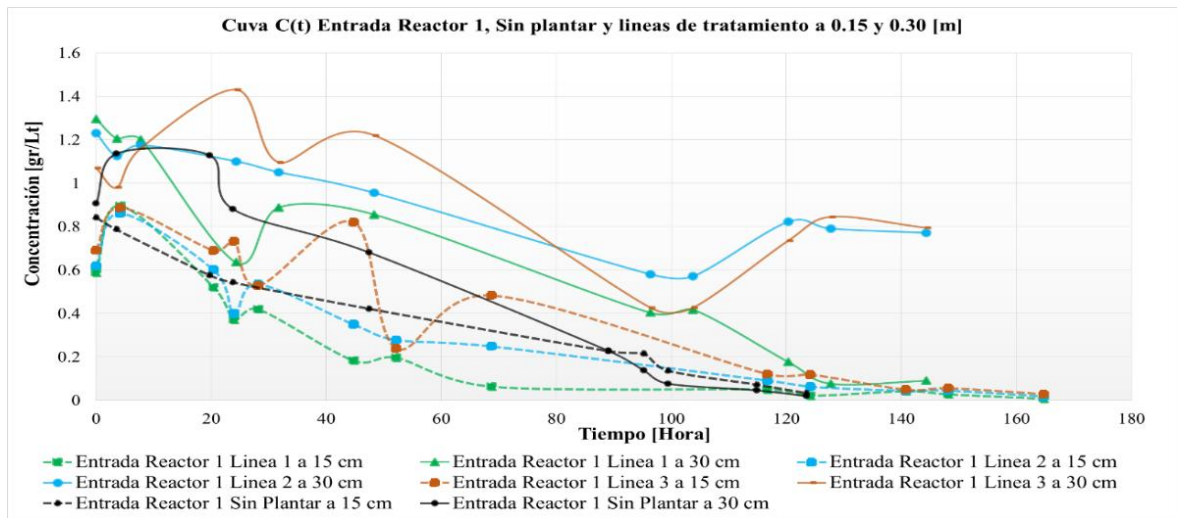
Línea	λ_p			
	Sin Plantar	Línea 1	Línea 2	Línea 3
Día 0 (Sin Plantar)	2.000	Papiro	Heliconia	Cartucho
Día 15 (Sin Plantar)	-	1.167	2.167	4.833

6.2.3 Volumen Útil. El volumen útil calculado a partir de los tiempos de retención reales da como resultado valores superiores al volumen total del humedal (tabla 11), lo que se debe a la acumulación de trazador en el fondo del reactor 1 (Figura 16) de cada línea de tratamiento, y por ende un aumento considerable en los τ . Por esta razón, el volumen útil será calculado hasta la altura útil del fluido (200 Lts).

Tabla 11. Volumen útil de las líneas de tratamiento.

Volumen Util [Lt]			
Sin Plantar	Línea 1	Línea 2	Línea 3
516.151	555.335	657.311	970.982

Figura 16. Comportamiento de las concentraciones de los ensayos de los días 0 y 15.



7. CONCLUSIONES

- Los rangos de conductividad hidráulica hallados para el MSP y el diámetro efectivo del medio describen un comportamiento hidráulico similar al de la grava fina, la orientación de los elementos interviene en los resultados del ensayo.
- La presencia de raíces influye en los parámetros hidráulicos en estudio debido a la resistencia al flujo del agua. La línea 3 presentaba mayor zona radicular comparada con las demás líneas de tratamiento por ende menor conductividad hidráulica, y mayor tiempo de retención real.
- En términos generales las curvas FDTR fueron similares a las encontradas en estudios llevados a cabo en humedales construidos, donde se determinó un comportamiento asociado a flujo pistón con dispersión.
- Los tiempos de retención reales obtenidos en todas las líneas de tratamiento fueron mayores al tiempo de retención teórico debido a la retención del trazador en el reactor 1, por esta razón los volúmenes útiles calculados son superiores al volumen real de los reactores (200lt), es de esperar que al desarrollarse la biomasa en los humedales los tiempos de retención reales y volúmenes útiles disminuyan.

8. RECOMENDACIONES

El test de Lefranc con carga variable es aplicable solamente durante el estudio de la línea base por la dificultad que se presenta al insertar el tubo en el sistema, debido a la presencia de raíces y al tamaño del MSP. Cuando el sistema ya se encuentre en tratamiento el aumento de la zona radicular dificultará el ensayo, además de alterar las condiciones del medio, por ello se sugiere utilizar métodos alternativos para determinar la conductividad hidráulica de humedales artificiales de alta carga.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] CASELLES-OSORIO, A., GARCÍA, J; Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter. Castelldefels, Barcelona, Spain: University of Catalonia, 2006.
- [2] CASELLES-OSORIO A., PUIGAGUT, J., SEGU, E., VAELLO, N., GRANÉS, F., GARCÍA, D., GARCÍA, J., Solid accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, Vol.41, January 2007, pp. 1388-1398.
- [3] COOPER, P.F., JOB, G.D., GREEN, M.B., SHUTES, R.B.E. "Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment," WRc Swindon, 1996 pp. 184.
- [4] DRURY, W.J., MAINZHAUSEN, K., 2000. "Hydraulic characteristics of subsurface flow wetlands," Billings Reclamation Symposium. Billings, MT March 2000, pp. 20-24
- [5] Ecodena Especialistas en Tratamiento de Aguas. Filtros Percoladores. Disponible: <http://www.ecodena.com/filtros-biologicos-y-percoladores.html> [citado 05 de Febrero de 2015].
- [6] E. Smith, R. Gordon, A. Madani and g. Stratton, Cold climate hydrological flow characteristics of constructed wetlands. *Canadian Biosystems Engineering/Le Genie des biosystems au Canada*, 2005.
- [7] FISHER A. (1990). "Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond NSW, Australia," *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, editors P.F. Cooper, B.C Findlater, Pergamon Prees, Oxford, 1990 p 21-31.

[8] FONDER, N; Hydraulic and removal efficiencies of horizontal flow treatment wetlands, [Tesis de Doctorado]; University of Liège, Belgium. 2010.

[9] GARCÍA, J., CHIVA, J., AGUIRRE, P., ÁLVAREZ, E., SIERRA, J. P. y MUJERIEGO, R.” Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size”. Ecological Engineering, Vol 23, 2004, pp 177-187.

[10] GARCÍA, J y CORZO, A. “Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial,” Barcelona, España, Dpto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña 2008.

[11] G.E. Barnes, Soil Mechanics: Principles and Practice, Second ed. Macmillan, Basingstoke, UK, 2000, p. 493.

[12] ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 813, Normas oficiales para la calidad del agua en Colombia. Disponible en: https://www.imta.gob.mx/cotennser/images/docs/NOI/Normas_oficiales_para_la_calidad_del_agua_colombia.pdf [citado 27 de Marzo de 2015].

[13] INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. NORMA INVE –130–07. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante). Disponible en: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf [citado 20 de Enero de 2015].

[14] JIA. Y, LI. Y, Hlavka. D,” Flow through packed beds”, University-of-Rochester, 2009, New York, USA, pp 16-18.

- [15] KADLEC R.H., KNIGHT R.L., VYMAZAL J., BRIX H., COOPER P. y HABERL, R. "Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation," IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, Scientific and Technical Report No.8, 2000, IWA Publishing, 156 pp.
- [16] KADLEC, R. H. y WALLACE, S. D. Treatment Wetlands, Second ed. Taylor & Francis Group Publishers, Boca Raton, Florida USA, 2009, p. 967.
- [17] KADLEC, R.H., WATSON, J.T. "Hydraulics and solids accumulation in a gravel bed treatment wetland," Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers, 1993, pp. 227-235.
- [18] KNOWLES, P.R., GRIFFIN, P., DAVIES, P.A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. Water Research. Vol.44 No.1, January 2010, pp 320-330.
- [19] KNOWLES, P.R., DAVIES, P.A., 2009. "A method for the in-situ determination of the hydraulic conductivity of gravels as used in constructed wetlands for wastewater treatment," Desalination and Water Treatment, Vol.5, No.3, May 2009, pp 257-266.
- [20] KOLB, P. 1998. Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur, pp 30.
- [21] LEVESPIEL O. Ingeniería de las reacciones químicas, third ed. Limusa Wiley, Ciudad de México, México, 2004. P. 257-292.
- [22] METCALF & Eddy. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización, 3ª Ed, McGraw-Hill, 1995.

[23] NAVFAC, 1986. Soil Mechanics. Design Manual 7.01. Naval Facilities Engineering Command. Alexandria, Virginia, USA, 389pp.

[24] PEDESCOLL, A., KNOWLES, P.R., DAVIES, P., GARCÍA, J., PUIGAGUT, J. "A comparison of in situ constant and falling head permeameter tests to assess the distribution of clogging within horizontal subsurface flow constructed wetlands," Water, Air and Soil Pollution, Journal of Hazardous Materials, Vol.223, 2012, pp. 2263-2275.

[25] PEDESCOLL, A., SAMSÓ, R., Romero, E., PUIGAGUT, J., & GARCÍA, J. "Reliability, accuracy and repeatability of the falling head method for hydraulic conductivity measurements under laboratory conditions," Ecological Engineering, Vol.37, No.5, 2011, pp. 754–757.

[26] PEDESCOLL, A., UGGETTI, E., LLORENS, E., GRANÉS, F., GARCÍA, D., GARCÍA, J. "Practical method based on hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands," Ecological Engineering, Vol.35, No.8, 2009, pp. 1216-1224.

[27] PÉREZ, A. y TORRES, P. "Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo". Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia, Vol. 45, 2008, pp. 27-40.

[28] PÉREZ CARRIÓN, J.M. "Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención", Manual de evaluación. Tomo II, Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano. Lima, CEPIS/OPS, 1992.

[29] PERSSON J, SOMES N L G & WONG T H F. (1999), "Hydraulic Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds," Water, Science & Technology, Vol. 40, No. 3, 1999, pp 291-300.

[30] R.F. Craig, Craig's Soil Mechanics, 7th ed., Taylor & Francis, Abingdon, UK, 2004, p. 447.

[31] REED, S.C., CRITES, R.W. y Middlebrooks, E.J. Natural Systems for Waste Management and Treatment. Second edition. McGraw Hill, 1995, 433 pp.

[32] REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E. "A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship," Ground Water Monitoring and Remediation Review Vol.6, No.1, March 1986, pp84-95.

[33] ROMERO, J. "Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño," Escuela Colombiana de Ingeniería, Primera Edición, Bogotá D.C, Colombia. 2001.

[34] SANABRIA, O. HUMEDAR-I®, GEEKO ENERGY S.A.S. Bogotá, Colombia. 2003.

[35] SANABRIA, O. "Innovative alternative of low cost to purify wastewater in countries in via of development". Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo, Vol 1, 2006, p. 84-91.

[36] SANFORD, W.E., STEENHUIS, T.S., SURFACE, J.M., PEVERLY, J.H. "Flow characteristics of rock-reed filters for treatment of landfill leachate," The Role of Vegetation in created and restored wetlands, Ecological Engineering Vol.5, No.1, October 1995, pp 37-50.

[37] THACKSTON E L, Shields F D, & Schroeder P R. "Residence time distributions of shallow basins," Journal of Environmental Engineering, Vol 113, No. 5, 1987, pp 1319–1332.

[38] WILSON, M.A., HOFF, W.D., BROWN, R.J.E., CARTER, M.A., 2000. "A falling head permeameter for the measurement of the hydraulic conductivity of granular solids," Rev. Sci. Instrum, Vol.71, No.10, pp 3942–3946.

BIBLIOGRAFÍA

CASELLES-OSORIO, A., GARCÍA, J; Performance of experimental horizontal subsurface flow constructed wetlands fed with dissolved or particulate organic matter. Castelldefels, Barcelona, Spain: University of Catalonia, 2006.

CASELLES-OSORIO A., PUIGAGUT, J., SEGU, E., VAELO, N., GRANÉS, F., GARCÍA, D., GARCÍA, J., Solid accumulation in six full-scale subsurface flow constructed wetlands. *Water Research*, Vol.41, January 2007, pp. 1388-1398.

COOPER, P.F., JOB, G.D., GREEN, M.B., SHUTES, R.B.E. "Reed Beds and Constructed Wetlands for Wastewater Treatment," WRc Swindon, 1996 pp. 184.

DRURY, W.J., MAINZHAUSEN, K., 2000. "Hydraulic characteristics of subsurface flow wetlands," Billings Reclamation Symposium. Billings, MT March 2000, pp. 20-24

Ecodena Especialistas en Tratamiento de Aguas. Filtros Percoladores. Disponible: <http://www.ecodena.com/filtros-biologicos-y-percoladores.html> [citado 05 de Febrero de 2015].

E. Smith, R. Gordon, A. Madani and g. Stratton, Cold climate hydrological flow characteristics of constructed wetlands. *Canadian Biosystems Engineering/Le Genie des biosystems au Canada*, 2005.

FISHER A. (1990). "Hydraulic characteristics of constructed wetlands at Richmond NSW, Australia," *Constructed Wetlands in Water Pollution Control*, editors P.F. Cooper, B.C Findlater, Pergamon Prees, Oxford, 1990 p 21-31.

FONDER, N; Hydraulic and removal efficiencies of horizontal flow treatment wetlands, [Tesis de Doctorado]; University of Liège, Belgium. 2010.

GARCÍA, J., CHIVA, J., AGUIRRE, P., ÁLVAREZ, E., SIERRA, J. P. y MUJERIEGO, R.” Hydraulic behaviour of horizontal subsurface flow constructed wetlands with different aspect ratio and granular medium size”. Ecological Engineering, Vol 23, 2004, pp 177-187.

GARCÍA, J y CORZO, A. “Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial,” Barcelona, España, Dpto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental, Universidad Politécnica de Cataluña 2008.

G.E. Barnes, Soil Mechanics: Principles and Practice, Second ed. Macmillan, Basingstoke, UK, 2000, p. 493.

ICONTEC. Norma Técnica Colombiana 813, Normas oficiales para la calidad del agua en Colombia. Disponible en: https://www.imta.gob.mx/cotennser/images/docs/NOI/Normas_oficiales_para_la_calidad_del_agua_colombia.pdf [citado 27 de Marzo de 2015].

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS. NORMA INVE –130–07. Permeabilidad de suelos granulares (cabeza constante). Disponible en: ftp://ftp.unicauca.edu.co/Facultades/FIC/IngCivil/Especificaciones_Normas_INV-07/Normas/Norma%20INV%20E-130-07.pdf [citado 20 de Enero de 2015].

JIA. Y, LI. Y, HLAVKA. D,” Flow through packed beds”, University-of-Rochester, 2009, New York, USA, pp 16-18.

KADLEC R.H., KNIGHT R.L., VYMAZAL J., BRIX H., COOPER P. y HABERL, R. "Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation," IWA Specialist Group on use of Macrophytes in Water Pollution Control, Scientific and Technical Report No.8, 2000, IWA Publishing, 156 pp.

KADLEC, R. H. y WALLACE, S. D. Treatment Wetlands, Second ed. Taylor & Francis Group Publishers, Boca Raton, Florida USA, 2009, p. 967.

KADLEC, R.H., WATSON, J.T. "Hydraulics and solids accumulation in a gravel bed treatment wetland," Constructed Wetlands for Water Quality Improvement. Lewis Publishers, 1993, pp. 227-235.

KNOWLES, P.R., GRIFFIN, P., DAVIES, P.A. Complementary methods to investigate the development of clogging within a horizontal sub-surface flow tertiary treatment wetland. Water Research. Vol.44 No.1, January 2010, pp 320-330.

KNOWLES, P.R., DAVIES, P.A., 2009. "A method for the in-situ determination of the hydraulic conductivity of gravels as used in constructed wetlands for wastewater treatment," Desalination and Water Treatment, Vol.5, No.3, May 2009, pp 257-266.

KOLB, P.1998. Design of a constructed wetland (pilot plant) for the reclamation of the river Besós, Diplomarbeit zur Erlangung des akademischen Grades Diplomingenieur, Universität für Bodenkultur, pp 30.

LEVESPIEL O. Ingeniería de las reacciones químicas, third ed. Limusa Wiley, Ciudad de México, México, 2004. P. 257-292.

METCALF & Eddy. Ingeniería de aguas residuales: Tratamiento, vertido y reutilización, 3ª Ed, McGraw-Hill, 1995.

NAVFAC, 1986. Soil Mechanics. Design Manual 7.01. Naval Facilities Engineering Command. Alexandria, Virginia, USA, 389pp.

PEDESCOLL, A., KNOWLES, P.R., DAVIES, P., GARCÍA, J., PUIGAGUT, J. “A comparison of in situ constant and falling head permeameter tests to assess the distribution of clogging within horizontal subsurface flow constructed wetlands,” *Water, Air and Soil Pollution, Journal of Hazardous Materials*, Vol.223, 2012, pp. 2263-2275.

PEDESCOLL, A., SAMSÓ, R., ROMERO, E., PUIGAGUT, J., & GARCÍA, J. “Reliability, accuracy and repeatability of the falling head method for hydraulic conductivity measurements under laboratory conditions,” *Ecological Engineering*, Vol.37, No.5, 2011, pp. 754–757.

PEDESCOLL, A., UGGETTI, E., LLORENS, E., GRANÉS, F., GARCÍA, D., GARCÍA, J. “Practical method based on hydraulic conductivity used to assess clogging in subsurface flow constructed wetlands,” *Ecological Engineering*, Vol.35, No.8, 2009, pp. 1216-1224.

PÉREZ, A. y TORRES, P. “Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo”. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*, Vol. 45, 2008, pp. 27-40.

PÉREZ CARRIÓN, J.M. “Análisis de flujos y factores que determinan los periodos de retención”, *Manual de evaluación. Tomo II, Programa Regional HPE/OPS/CEPIS de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*. Lima, CEPIS/OPS, 1992.

PERSSON J, SOMES N L G & WONG T H F. (1999), "Hydraulic Efficiency of Constructed Wetlands and Ponds," *Water, Science & Technology*, Vol. 40, No. 3, 1999, pp 291-300.

R.F. Craig, *Craig's Soil Mechanics*, 7th ed., Taylor & Francis, Abingdon, UK, 2004, p. 447.

REED, S.C., CRITES, R.W. y MIDDLEBROOKS, E.J. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Second edition. McGraw Hill, 1995, 433 pp.

REYNOLDS, W.D., ELRICK, D.E. "A method for simultaneous in situ measurement in the vadose zone of field-saturated hydraulic conductivity, sorptivity and the conductivity-pressure head relationship," *Ground Water Monitoring and Remediation Review* Vol.6, No.1, March 1986, pp84–95.

ROMERO, J. "Tratamiento de Aguas Residuales: Teoría y Principio de Diseño," *Escuela Colombiana de Ingeniería*, Primera Edición, Bogotá D.C, Colombia. 2001.

SANABRIA, O. HUMEDAR-, GEEKO ENERGY S.A.S. Bogotá, Colombia. 2003.

SANABRIA, O. "Innovative alternative of low cost to purify wastewater in countries in via of development". *Revista Ambiental Agua, Aire y Suelo*, Vol 1, 2006, p. 84-91.

SANFORD, W.E., STEENHUIS, T.S., SURFACE, J.M., PEVERLY, J.H. "Flow characteristics of rock-reed filters for treatment of landfill leachate," *The Role of Vegetation in created and restored wetlands*, *Ecological Engineering* Vol.5, No.1, October 1995, pp 37-50.

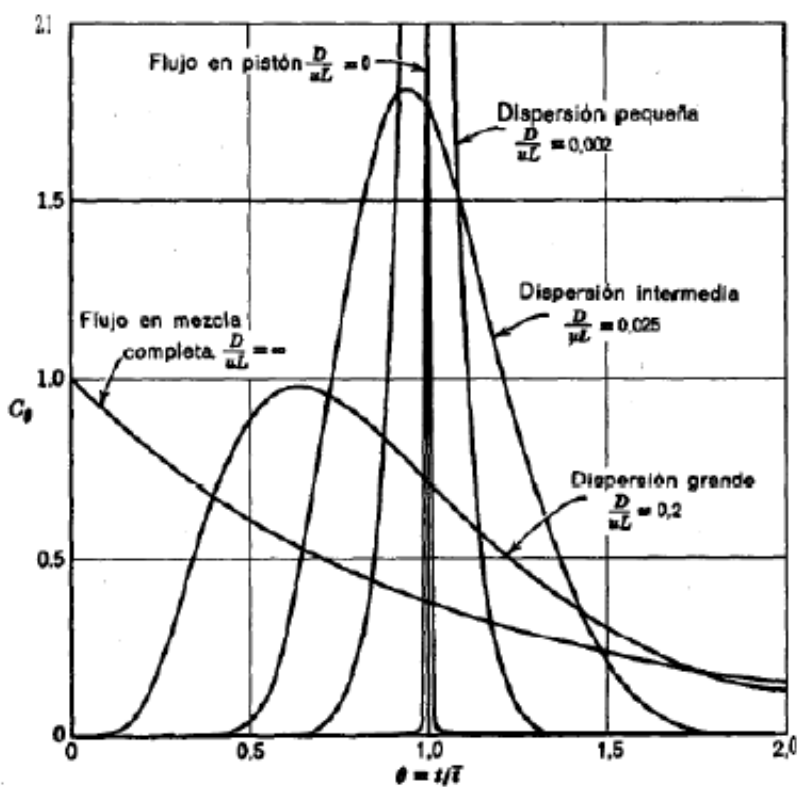
THACKSTON E L, Shields F D, & Schroeder P R. "Residence time distributions of shallow basins," *Journal of Environmental Engineering*, Vol 113, No. 5, 1987, pp 1319–1332.

WILSON, M.A., HOFF, W.D., BROWN, R.J.E., CARTER, M.A., 2000. "A falling head permeameter for the measurement of the hydraulic conductivity of granular solids," *Rev. Sci. Instrum*, Vol.71, No.10, pp 3942–3946.

ANEXOS

ANEXO A. Representación gráfica para diferentes valores de dispersión

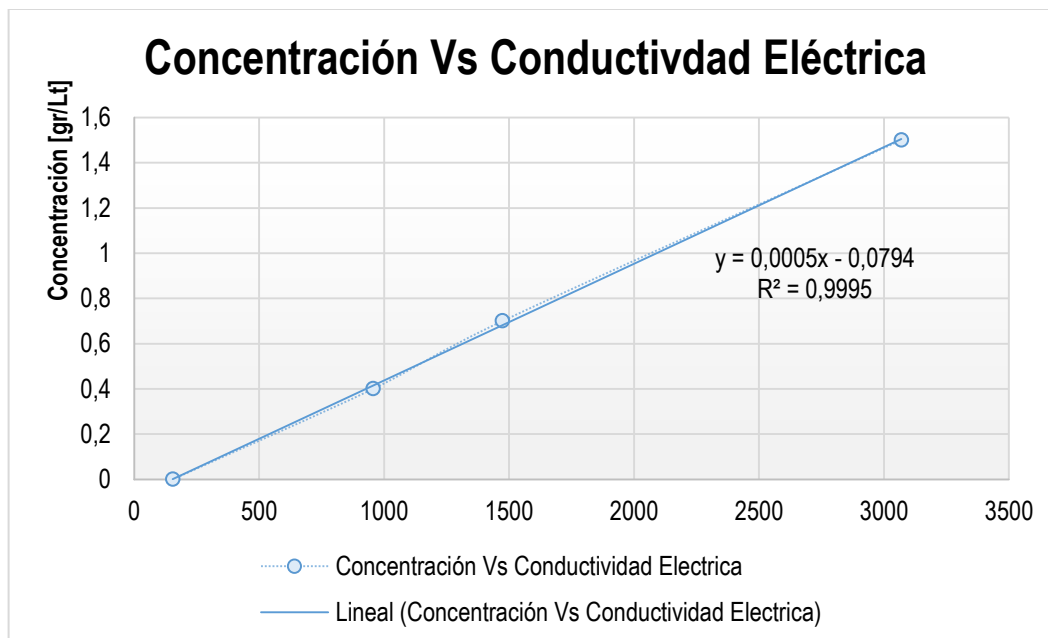
Gráfica 1. Representación gráfica para diferentes valores de dispersión.



Fuente: Levespiel O. Ingeniería de las reacciones químicas, third ed. Limusa Wiley, Ciudad de México, México, 2004. P. 257-292

ANEXO B. Tendencia de los valores de concentración de NaCl vs Conductividad eléctrica para agua potable.

Gráfica 2. Tendencia de los valores de concentración de NaCl Vs. Conductividad eléctrica para agua potable.



ANEXO C. Conductividad

Cuadro 1. Conductividad hidráulica en el ensayo del día 0 de la línea sin plantar.

Ensayo Tubo largo Sin Plantas					Ensayo Tubo Corto Sin plantas					
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.059	Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.091	
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		0.0003680071	Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		0.0000003817	
		K [m/d]		5097.6			K [m/d]		7862.4	
Tiempo [s]	h_1 Observado	h_2	Esperado	Residuo	Tiempo [s]	h_1 Observado	h_2	Esperado	Residuo	
0	0.498		0.498		0	0.377		0.377		
1	0.039		0.0199	0.0003666	1	0.002		0.0026	0.0000004	
1.085	0		0.0012	0.0000014	1.005	0		0.0025	0.0000065	
									K [m/d]	6480

Cuadro 2. Conductividad hidráulica en el ensayo del día 15 de la línea 1.

Ensayo 1, Reactor 1 Papiro					Ensayo 2, Reactor 1 Papiro					
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.058	Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.061	
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		0.0005819	Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		6.26E-05	
		K [m/d]		5011.2			K [m/d]		5270.4	
Tiempo [s]	h_1	Observado	h_2 Esperado	Residuo	Tiempo	h_1	Observado	h_2 Esperado	Residuo	
0		0.306	0.306		0		0.222	0.222		
1		0.037	0.0129	0.0005816	1		0.005	0.0079	8.61E-06	
2		0	0.0005	2.942E-07	1.023		0	0.0073	5.399E-05	
									K [m/d]	5140.8

Ensayo 1, Reactor 2 Papiro					Ensayo 2, Reactor 2 Papiro					
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.059	Diámetro [m]	0.2	K [m/s]		0.062	
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		5.92E-05	Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados		0.0012257	
		K [m/d]		5097.6			K [m/d]		5356.8	
Tiempo [s]	h_1	Observado	h_2 Esperado	Residuo	Tiempo	h_1	Observado	h_2 Esperado	Residuo	
0		0.193	0.193		0		0.31	0.31		
1		0	0.0077	5.92E-05	1		0.045	0.0105	0.0011909	
					1.170		0	0.0059	3.485E-05	
									K [m/d]	5227.2

Cuadro 3. Conductividad hidráulica en el ensayo del día 15 de la línea 2.

Ensayo 1, Reactor 1 Heliconia					Ensayo 2, Reactor 1 Heliconia						
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.046		Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.03934			
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.0003482		Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.0008898			
		K [m/d]	3974.4				K [m/d]	3398.9772			
Tiempo [s]	h_1	Observado	h_2	Esperado	Residuo	Tiempo	h_1	Observado	h_2	Esperado	Residuo
0		0.288		0.2880		0		0.276		0.2760	
1		0.03		0.0234	4.419E-05	1		0.02		0.0322	0.000149
1.116		0		0.0174	0.000304	1.078		0		0.0272	0.000741
										K [m/d]	3686.7

Ensayo 1, Reactor 2 Heliconia					Ensayo 2, Reactor 2 Heliconia						
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.0426		Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.044			
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.0037479		Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.000187			
		K [m/d]	3680.64				K [m/d]	3801.6			
Tiempo [s]	h_1	Observado	h_2	Esperado	Residuo	Tiempo	h_1	Observado	h_2	Esperado	Residuo
0		0.408		0.408		0		0.29		0.29	
1		0.098		0.0398	0.0033834	1		0.025		0.0262	1.509E-06
1.316		0		0.0191	0.0003645	1.273		0		0.0136	0.0001855
										K [m/d]	3741.12

Cuadro 4. Conductividad hidráulica en el ensayo del día 15 de la línea 3.

Ensayo 1, Reactor 1 Cartucho				Ensayo 2, Reactor 1 Cartucho				
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.045	Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.044	
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.000952528	Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.0007861	
		K [m/d]	3888			K [m/d]	3801.6	
Tiempo [s]	h_1 Observado	h_2 Esperado	Residuo	Tiempo	h_1 Observado	h_2 Esperado	Residuo	
0	0.342	0.342		0	0.31	0.31		
1	0.06	0.0293	0.00094325	1	0	0.0280	0.0007861	
1.213	0	0.0030	9.27749E-06					
							K [m/d]	3844.8

Ensayo 1, Reactor 2 Cartucho				Ensayo 2, Reactor 2 Cartucho				
Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.044	Diámetro [m]	0.2	K [m/s]	0.032	
Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.000321565	Longitud sumergida [m]	0.3	Suma. Cuadrados	0.0016297	
		K [m/d]	3801.6			K [m/d]	2764.8	
Tiempo [s]	h_1 Observado	h_2 Esperado	Residuo	Tiempo	h_1 Observado	h_2 Esperado	Residuo	
0	0.222	0.222		0	0.35	0.35		
1	0.032	0.0201	0.0001421	1	0.075	0.0610	0.000197	
1.168	0	0.0134	0.0001794	1.273	0	0.0379	0.0014326	
							K [m/d]	3283.2

ANEXO D. Ensayo de trazadores

Cuadro 5. Ensayo de trazadores día cero del tiempo de estudio.

ENSAYO DE TRAZADORES SIN PLANTAR										
Conductividad eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo θ	$t_i^2 * E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/vL)}}$
154.800	0.000	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.175438191
180.000	0.011	4	4	152.64	3.32788E-07	2198016	0.064580549	10533.22616	5.07968E-05	0.206361452
345.000	0.093	20	16	5362.56	2.92289E-06	386104320	0.322902745	81254802.76	0.015674152	0.354482547
350.000	0.096	24	4	1376.64	3.00137E-06	118941696	0.387483294	30843806.07	0.004131811	0.394978598
389.000	0.115	48	24	9944.64	3.61358E-06	1718433792	0.774966589	1073035445	0.03593574	0.60205719
332.500	0.087	88	40	12506.40	2.72667E-06	3962027520	1.420772079	3422430879	0.034100782	0.51089668
284.800	0.063	94	6	1360.80	1.97789E-06	460494720	1.517642903	308217831.8	0.002691517	0.453999631
200.300	0.021	98	4	298.80	6.51449E-07	105416640	1.582223452	24228027.02	0.000194653	0.413989203
188.300	0.015	114	16	849.60	4.63078E-07	348675840	1.840545648	66264882.23	0.000393431	0.256845298
155.800	0.000	118	4	0.00	0	0	1.905126197	0	0	0.221860203
			Σci*Δti	31852.08	ΣE(t)*Δti	7102292544	Σ	5006286207	0.093172883	

T.retencion [s]	222977.3548	Varianza θ Nor	0.080896
T.retencion [d]	2.580756422	Pe	2.352329791
Varianza σ [S2]	4012250100	D	0.42511046
Varianza θ Nor	0.080698689	D/vL	0.192479607

v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

Cuadro 6. Ensayo de trazadores en el día 15 de la línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1										
Conductividad eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo θ	$t_i^2 * E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/vL)}} * e^{[-\frac{(1-\theta)^2}{4(D/vL)}}$
125.10	0.000	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.123475082
292.00	0.067	4	4	959.04	1.83052E-06	13810176	0.0600238	364029.8114	0.001755545	0.152592531
361.00	0.101	20	16	5823.36	2.77877E-06	419281920	0.300119	83886254.48	0.016181762	0.31221021
379.00	0.110	24	4	1585.44	3.02614E-06	136982016	0.3601428	35815055.72	0.004797756	0.361368303
380.00	0.111	28	4	1592.64	3.03988E-06	160538112	0.4201666	49192039.23	0.004841431	0.41282198
375.00	0.108	44	16	6226.56	2.97116E-06	986287104	0.6602618	464178736.4	0.018500135	0.616753804
363.00	0.102	52	8	2940.48	2.80625E-06	550457856	0.7803095	289172291.7	0.00825173	0.696859378
331.00	0.086	68	16	4959.36	2.36649E-06	1214051328	1.0204047	703319452.5	0.011736262	0.760202641
284.50	0.063	116	48	10860.48	1.72745E-06	4535336448	1.7406903	3271721276	0.018760971	0.280558126
186.90	0.014	124	8	404.64	3.86169E-07	180631296	1.8607379	31138273.16	0.000156259	0.197792111
180.80	0.011	140	16	633.60	3.02339E-07	319334400	2.1008331	48659757.78	0.000191562	0.084003773
186.40	0.014	148	8	397.44	3.79298E-07	211756032	2.2208808	42793726.72	0.000150748	0.050606058
171.40	0.006	164	16	362.88	1.73158E-07	214244352	2.460976	21902681.91	6.28354E-05	0.015693779
			Σci*Δti	36383.04	Σci*ti*Δti	8728466688	Σ	5020240894	0.085324161	

T.retencion [s]	239904.8207
T.retencion [d]	2.776676166
Varianza σ [S2]	1282949344
Varianza θ Nor	0.022291103

Varianza θ Nor	0.022554
Pe	3.293131784
D	0.303662309
D/vL	0.137490858

v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

Cuadro 7. Ensayo de trazadores en el día 15 de la línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2										
Conductividad eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo θ	$t_i^2 * E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/vL)}} * e^{[\frac{(1-\theta)^2}{4(D/vL)}}$
125.3	0.000	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.172545395
137.4	0.000	4	4	0.00	0	0	0.0507116	0	0	0.196705558
255	0.048	20	16	2770.56	1.3458E-06	199480320	0.2535582	19329176.86	0.003728622	0.310353873
364	0.103	24	4	1477.44	2.87067E-06	127650816	0.3042698	31660693.93	0.004241241	0.341951238
362	0.102	28	4	1463.04	2.84269E-06	147474432	0.3549815	42257782.45	0.004158969	0.374205306
367	0.104	44	16	5996.16	2.91264E-06	949791744	0.557828	438197633.4	0.017464641	0.501280133
386	0.114	52	8	3271.68	3.17844E-06	612458496	0.6592513	364415272.7	0.01039884	0.556926997
367	0.104	68	16	5996.16	2.91264E-06	1467859968	0.8620979	1046604265	0.017464641	0.633430301
270	0.056	116	48	9607.68	1.55565E-06	4012167168	1.4706375	2606453804	0.01494614	0.484306809
253	0.047	124	8	1356.48	1.31782E-06	605532672	1.5720608	356220086.4	0.001787599	0.420952771
224	0.033	140	16	1877.76	9.12123E-07	946391040	1.7749073	435065341.1	0.001712748	0.293038022
226	0.034	148	8	967.68	9.40102E-07	515579904	1.8763306	258246952.7	0.000909718	0.234693887
192	0.017	164	16	956.16	4.64455E-07	564516864	2.0791772	154798621.1	0.000444093	0.138714669
			Σci*Δti	35740.80		Σci*ti*Δti	10148903424	Σ	5753249630	0.077257252

T.retencion [s]	283958.4851
T.retencion [d]	3.28655654
Varianza σ [S2]	-6163689007
Varianza θ Nor	-0.07644182

Varianza θ Nor	0.075494
Pe	2.400978829
D	0.4164968
D/vL	0.188579553

v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

Cuadro 8. Ensayo de trazadores en el día 15 de la línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3										
Conductividad eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo θ	$t_i^2 * E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{2\sqrt{\pi(D/vL)}} * e^{[\frac{(1-\theta)^2}{4(D/vL)}}$
121.8	0.000	0	0	0.00	0	0	0	0	0	0.1127
129.1	0.000	4	4	0.00	0	0	0.0343295	0	0	0.1285
157.1	0.000	20	16	0.00	0	0	0.1716474	0	0	0.2074
172.7	0.007	24	4	100.08	2.84886E-07	8646912	0.2059769	212836.0714	2.85113E-05	0.2310
166	0.004	28	4	51.84	1.47567E-07	5225472	0.2403064	77727.41162	7.64985E-06	0.2563
169.3	0.005	44	16	302.40	2.15201E-07	47900160	0.3776244	1632815.418	6.50769E-05	0.3705
173	0.007	52	8	204.48	2.91034E-07	38278656	0.4462834	2085482.365	5.95107E-05	0.4335
178.5	0.010	68	16	567.36	4.03759E-07	138889728	0.5836013	13727878.26	0.000229077	0.5615
377	0.109	116	48	18852.48	4.47209E-06	7872795648	0.9955552	14702793820	0.084309961	0.7863
267	0.054	124	8	1558.08	2.2176E-06	695526912	1.0642142	688527098.6	0.003455196	0.7801
212	0.027	140	16	1532.16	1.09035E-06	772208640	1.2015321	424358081.5	0.001670596	0.7267
244	0.043	148	8	1226.88	1.74621E-06	653681664	1.2701911	608171082.1	0.002142384	0.6824
157.4	0.000	220	72	0.00	0	0	1.8881219	0	0	0.1699
			Σci*Δti	24395.76	Σci*ti*Δti	10233153792	Σ	16441586822	0.091967962	

T.retencion [s]	419464.4394
T.retencion [d]	4.854912493
Varianza σ [S2]	2824741199
Varianza θ Nor	0.016054189

Varianza θ Nor	0.016854
Pe	3.518330228
D	0.284225736
D/vL	0.128690454

v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

ANEXO E. Concentraciones de trazador en el ensayo

Cuadro 9. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.15 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea sin plantar.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.15 [m]														
Día	Reactor 1 [$\mu\text{s/cm}$]		Concentracion [gr/Lt]		Día		Reactor 2 [$\mu\text{s/cm}$]		Concentracion [gr/Lt]		Día		Tiempo	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas		
Jueves	1845	1913	0.8431	0.8771	26/03/2015	0	167.8	160.3	0.0045	0.00075	26/03/2015	0		
	1734	1834	0.7876	0.8376	26/03/2015	3.50	198.3	197.3	0.01975	0.01925	26/03/2015	3.50		
Viernes	1312	1613	0.5766	0.7271	27/03/2015	19.73	376.1	379.4	0.10865	0.1103	27/03/2015	19.73		
	1245	1423	0.5431	0.6321	27/03/2015	23.80	398.3	416.6	0.11975	0.1289	27/03/2015	23.80		
Sábado	1002	1217	0.4216	0.5291	28/03/2015	47.50	412.6	498.5	0.1269	0.16985	28/03/2015	47.50		
Lunes	612	816.4	0.2266	0.3288	30/03/2015	89.07	379.5	389.3	0.11035	0.11525	30/03/2015	89.07		
	589	657	0.2151	0.2491	30/03/2015	95.17	323.8	278.9	0.0825	0.06005	30/03/2015	95.17		
	432	452.8	0.1366	0.147	30/03/2015	99.40	245.5	223.4	0.04335	0.0323	30/03/2015	99.40		
Martes	301.7	258.9	0.07145	0.05005	31/03/2015	114.90	254.3	189.6	0.04775	0.0154	31/03/2015	114.90		
	224	194.7	0.0326	0.01795	31/03/2015	123.50	196.7	154.5	0.01895	-0.00215	31/03/2015	123.50		

Cuadro 10. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.15 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 1.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.15 [m]												
Día	Reactor 1 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día	Tiempo	Reactor 2 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día	Tiempo
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas
Miercoles	1331	1623	0.5861	0.7321	08/04/2015	0	190.8	128.1	0.016	-0.01535	08/04/2015	0
	1950	2240	0.8956	1.0406	08/04/2015	4.17	315	278	0.0781	0.0596	08/04/2015	4.02
Jueves	1200	1155	0.5206	0.4981	09/04/2015	20.40	348	361	0.0946	0.1011	09/04/2015	20.22
	899	812	0.3701	0.3266	09/04/2015	24.00	381	400	0.1111	0.1206	09/04/2015	24.00
	997	920	0.4191	0.3806	09/04/2015	28.17	399	400	0.1201	0.1206	09/04/2015	28.02
Viernes	523	588	0.1821	0.2146	10/04/2015	44.73	359	364	0.1001	0.1026	10/04/2015	44.60
	550	391	0.1956	0.1161	10/04/2015	52.17	362	363	0.1016	0.1021	10/04/2015	52.02
Sábado	283	272	0.0621	0.0566	11/04/2015	68.73	306	309	0.0736	0.0751	11/04/2015	68.60
Lunes	254	218	0.0476	0.0296	13/04/2015	116.73	208	213	0.0246	0.0271	13/04/2015	116.60
	199	182	0.0201	0.0116	13/04/2015	124.17	182.6	189	0.0119	0.0151	13/04/2015	124.02
Martes	240	170	0.0406	0.0056	14/04/2015	140.73	175	185	0.0081	0.0131	14/04/2015	140.60
	212	194.7	0.0266	0.01795	14/04/2015	148.17	184.5	186.4	0.01285	0.0138	14/04/2015	148.02
Miercoles	171	164	0.0061	0.0026	15/04/2015	164.73	172.9	174.8	0.00705	0.008	15/04/2015	164.60

Cuadro 11. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.15 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 2.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.15 [m]														
Día	Reactor 1 [μs/cm]		Concentración [gr/Lt]		Día		Reactor 2 [μs/cm]		Concentración [gr/Lt]		Día		Tiempo	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Hora	Entrada	Salida
Miércoles	1397	1822	0.6191	0.8316	08/04/2015	0.00	186.3	123.9	0.01375	-0.01745	08/04/2015	0.00		
	1880	2040	0.8606	0.9406	08/04/2015	4.17	270	139.7	0.0556	-0.00955	08/04/2015	4.02		
Jueves	1360	1525	0.6006	0.6831	09/04/2015	20.40	319	290	0.0801	0.0656	09/04/2015	20.22		
	958	1040	0.3996	0.4406	09/04/2015	24.00	434	363	0.1376	0.1021	09/04/2015	24.00		
	1228	1090	0.5346	0.4656	09/04/2015	28.17	468	370	0.1546	0.1056	09/04/2015	28.02		
Viernes	859	634	0.3501	0.2376	10/04/2015	44.73	347	371	0.0941	0.1061	10/04/2015	44.60		
	715	579	0.2781	0.2101	10/04/2015	52.17	420	389	0.1306	0.1151	10/04/2015	52.02		
Sábado	656	467	0.2486	0.1541	11/04/2015	68.73	311	354	0.0761	0.0976	11/04/2015	68.60		
Lunes	341	284	0.0911	0.0626	13/04/2015	116.73	259	270	0.0501	0.0556	13/04/2015	116.60		
	285	290	0.0631	0.0656	13/04/2015	124.17	257	259	0.0491	0.0501	13/04/2015	124.02		
Martes	247	270	0.0441	0.0556	14/04/2015	140.73	240	235	0.0406	0.0381	14/04/2015	140.60		
	249	234	0.0451	0.0376	14/04/2015	148.17	225	229	0.0331	0.0351	14/04/2015	148.02		
Miércoles	195.6	177.9	0.0184	0.00955	15/04/2015	164.73	199	210	0.0201	0.0256	15/04/2015	164.60		

Cuadro 12. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.15 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 3.

Conductividad Eléctrica y Concentracion profundidad de 0.15 [m]													
Día	Reactor 1 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día		Reactor 2 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día		Tiempo
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas	
Miercoles	1543	1626	0.6921	0.7336	08/04/2015	0	152.8	134.4	-0.003	-0.0122	08/04/2015	0	
	1933	2060	0.8871	0.9506	08/04/2015	4.2	169	137.7	0.0051	-0.01055	08/04/2015	4.02	
Jueves	1540	1910	0.6906	0.8756	09/04/2015	20.4	165.7	158.6	0.00345	-0.0001	09/04/2015	20.22	
	1626	1350	0.7336	0.5956	09/04/2015	24.0	168	163.1	0.0046	0.00215	09/04/2015	24.00	
	1215	1470	0.5281	0.6556	09/04/2015	28.2	181.5	170.6	0.01135	0.0059	09/04/2015	28.02	
Viernes	1802	1636	0.8216	0.7386	10/04/2015	44.7	168.1	163.6	0.00465	0.0024	10/04/2015	44.60	
	637	742	0.2391	0.2916	10/04/2015	52.2	193.7	178.2	0.01745	0.0097	10/04/2015	52.02	
Sábado	1125	1690	0.4831	0.7656	11/04/2015	68.7	186.6	181.1	0.0139	0.01115	11/04/2015	68.60	
Lunes	400	383	0.1206	0.1121	13/04/2015	116.7	370	385	0.1056	0.1131	13/04/2015	116.60	
	396	301	0.1186	0.0711	13/04/2015	124.2	385	330	0.1131	0.0856	13/04/2015	124.02	
Martes	257	275	0.0491	0.0581	14/04/2015	140.7	330	231	0.0856	0.0361	14/04/2015	140.60	
	270	253	0.0556	0.0471	14/04/2015	148.2	213	232	0.0271	0.0366	14/04/2015	148.02	
Miercoles	216	243	0.0286	0.0421	15/04/2015	164.7	183.7	178.3	0.01245	0.00975	15/04/2015	164.60	

Cuadro 13. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.30 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea sin plantar.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.30[m]												
Día	Reactor 1 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día	Tiempo	Reactor 2 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día	Tiempo
	Entrada	Salida	Entrada	Salida			Fecha/ Hora	Horas	Entrada	Salida		
Jueves	1970	1623	0.9056	0.7321	26/03/2015	0	162.4	159.4	0.0018	0.0003	26/03/2015	0
	2430	1869	1.1356	0.8551	26/03/2015	3.50	193.4	190.3	0.0173	0.01575	26/03/2015	3.50
Viernes	2415	2145	1.1281	0.9931	27/03/2015	19.73	364.5	353.4	0.10285	0.0973	27/03/2015	19.73
	1919	1356	0.8801	0.5986	27/03/2015	23.80	370.3	359.6	0.10575	0.1004	27/03/2015	23.80
Sábado	1520	1620	0.6806	0.7306	28/03/2015	47.50	423.6	402	0.1324	0.1216	28/03/2015	47.50
Lunes	614	937	0.2276	0.3891	30/03/2015	89.07	364.3	345	0.10275	0.0931	30/03/2015	89.07
	435	712	0.1381	0.2766	30/03/2015	95.17	303.7	291.3	0.07245	0.06625	30/03/2015	95.17
	312	385.5	0.0766	0.11335	30/03/2015	99.40	218	210.8	0.0296	0.026	30/03/2015	99.40
Martes	250	245.3	0.0456	0.04325	31/03/2015	114.90	200.2	190.4	0.0207	0.0158	31/03/2015	114.90
	198	201.4	0.0196	0.0213	31/03/2015	123.50	160.1	158.6	0.00065	-0.0001	31/03/2015	123.50

Cuadro 14. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.30 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 1.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.30[m]												
Día	Reactor 1 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día		Reactor 2 [μs/cm]		Concentracion [gr/Lt]		Día	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Horas
Jueves	2750	2570	1.2956	1.2056	09/04/2015	0	370	379	0.1056	0.1101	09/04/2015	0
	2570	2760	1.2056	1.3006	09/04/2015	3.60	373	365	0.1071	0.1031	09/04/2015	3.78
	2560	2770	1.2006	1.3056	09/04/2015	7.77	382	381	0.1116	0.1111	09/04/2015	7.80
Viernes	1429	2160	0.6351	1.0006	10/04/2015	24.33	368	370	0.1046	0.1056	10/04/2015	24.38
	1935	2160	0.8881	1.0006	10/04/2015	31.77	365	370	0.1031	0.1056	10/04/2015	31.80
Sábado	1870	1792	0.8556	0.8166	11/04/2015	48.33	329	333	0.0851	0.0871	11/04/2015	48.38
Lunes	965	495	0.4031	0.1681	13/04/2015	96.33	218	219	0.0296	0.0301	13/04/2015	96.38
	994	986	0.4176	0.4136	13/04/2015	103.77	193.7	209	0.01745	0.0251	13/04/2015	103.80
Martes	511	450	0.1761	0.1456	14/04/2015	120.33	205	192	0.0231	0.0166	14/04/2015	120.38
	311	349	0.0761	0.0951	14/04/2015	127.77	184.9	186.6	0.01305	0.0139	14/04/2015	127.80
Miércoles	339	304	0.0901	0.0726	15/04/2015	144.33	179.9	181.4	0.01055	0.0113	15/04/2015	144.38

Cuadro 15. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.30 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 2.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.30[m]														
Día	Reactor 1 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]		Concentración [gr/Lt]		Día		Reactor 2 [$\mu\text{s}/\text{cm}$]		Concentración [gr/Lt]		Día		Tiempo	
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Fecha/ Hora	Hora	Entrada	Salida
Jueves	2620	2520	1.2306	1.1806	09/04/2015	0.00	327	299	0.0841	0.0701	09/04/2015	0.00		
	2410	2530	1.1256	1.1856	09/04/2015	3.60	404	344	0.1226	0.0926	09/04/2015	3.78		
	2510	2420	1.1756	1.1306	09/04/2015	7.77	448	375	0.1446	0.1081	09/04/2015	7.80		
Viernes	2360	2370	1.1006	1.1056	10/04/2015	24.33	400	403	0.1206	0.1221	10/04/2015	24.38		
	2260	2110	1.0506	0.9756	10/04/2015	31.77	387	390	0.1141	0.1156	10/04/2015	31.80		
Sábado	2070	2140	0.9556	0.9906	11/04/2015	48.33	336	370	0.0886	0.1056	11/04/2015	48.38		
Lunes	1320	1782	0.5806	0.8116	13/04/2015	96.33	261	272	0.0511	0.0566	13/04/2015	96.38		
	1301	1525	0.5711	0.6831	13/04/2015	103.77	262	266	0.0516	0.0536	13/04/2015	103.80		
Martes	1804	1450	0.8226	0.6456	14/04/2015	120.33	240	245	0.0406	0.0431	14/04/2015	120.38		
	1740	1625	0.7906	0.7331	14/04/2015	127.77	224	229	0.0326	0.0351	14/04/2015	127.80		
Miércoles	1702	1635	0.7716	0.7381	15/04/2015	144.33	213	220	0.0271	0.0306	15/04/2015	144.38		

Cuadro 16. Concentraciones de trazador en el ensayo del día 15 a 0.30 [m] de profundidad del reactor 1 de la línea 3.

Conductividad Eléctrica una profundidad de 0.30[m]												
Día	Reactor 1 [$\mu\text{s/cm}$]		Concentracion [gr/Lt]		Tiempo	Día	Reactor 2 [$\mu\text{s/cm}$]		Concentracion [gr/Lt]		Tiempo	Día
	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Hora	Fecha/ Hora	Entrada	Salida	Entrada	Salida	Horas	Fecha/ Hora
Jueves	2300	2970	1.0706	1.4056	0.0	09/04/2015	170.5	161.1	0.00585	0.00115	09/04/2015	0.00
	2120	2170	0.9806	1.0056	3.6	09/04/2015	165	157.4	0.0031	-0.0007	09/04/2015	3.78
	2480	2970	1.1606	1.4056	7.8	09/04/2015	168.7	164	0.00495	0.0026	09/04/2015	7.80
Viernes	3020	2990	1.4306	1.4156	24.3	10/04/2015	172.3	167.5	0.00675	0.00435	10/04/2015	24.38
	2350	2450	1.0956	1.1456	31.8	10/04/2015	180.3	172.8	0.01075	0.007	10/04/2015	31.80
Sábado	2600	2590	1.2206	1.2156	48.3	11/04/2015	187.4	183.4	0.0143	0.0123	11/04/2015	48.38
Lunes	1012	2210	0.4266	1.0256	96.3	13/04/2015	391	396	0.1161	0.1186	13/04/2015	96.38
	1012	2060	0.4266	0.9506	103.8	13/04/2015	379	390	0.1101	0.1156	13/04/2015	103.80
Martes	1630	1800	0.7356	0.8206	120.3	14/04/2015	358	367	0.0996	0.1041	14/04/2015	120.38
	1849	1895	0.8451	0.8681	127.8	14/04/2015	213	237	0.0271	0.0391	14/04/2015	127.80
Miercoles	1747	1810	0.7941	0.8256	144.3	15/04/2015	210	199.2	0.0256	0.0202	15/04/2015	144.38