

**ESTUDIO HIDRÁULICO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ALTA TASA
UTILIZANDO MEDIO DE SOPORTE PLÁSTICO RECICLADO COMO
MATERIAL DE RELLENO.**

**JORGE LEONARDO DÍAZ CRISTANCHO
JHON GERMAN QUIROGA PINZÓN**



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

2016

**ESTUDIO HIDRÁULICO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ALTA TASA
UTILIZANDO MEDIO DE SOPORTE PLÁSTICO RECICLADO COMO
MATERIAL DE RELLENO.**

**JORGE LEONARDO DÍAZ CRISTANCHO
JHON GERMAN QUIROGA PINZÓN**

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

Directora:

**ANGÉLICA CORZO HERNÁNDEZ
Ingeniera Civil. Candidata a Doctorado.**

Co-director:

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

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

2016

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por su infinita sabiduría.

A mis padres por su comprensión e incondicional apoyo.

A nuestra directora por su dirección y consejo.

A Jhon por su ayuda y dedicación.

A mi familia, amigos y allegados por sus oraciones y buenos deseos.

*A la vida por su grandeza y perfección porque en ella podemos
hacer lo que deseemos con el corazón.*

Jorge Leonardo Díaz

DEDICATORIA

Agradezco a Dios por haberme permitido llegar hasta este punto y haberme dado salud y sabiduría para lograr esta meta.

A mi madre Dolores Pinzón y a mis hermanas por haberme apoyado en los buenos y malos momentos, por sus consejos, sus valores, sus oraciones, por la motivación constante que me ha permitido ser una persona de bien, pero más que nada, por su amor.

A nuestra directora la Ingeniera Angélica Corzo por su orientación, confianza y apoyo.

A mi compañero y amigo Jorge por su esfuerzo y dedicación en esta etapa de formación profesional que compartimos.

A mis amigos y demás personas que de una u otra manera me brindaron su apoyo y motivación para cumplir este sueño.

Gracias a la VIDA que me ha dado tanto, en especial por haberme permitido formarme como Ingeniero Civil.

Jhon Quíroga Pinzón

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo de investigación está dedicado a todas aquellas personas que de una u otra manera nos brindaron su apoyo para culminar con satisfacción este proyecto, especialmente a nuestra directora la Ingeniera Angélica Corzo por su orientación, confianza y apoyo.

CONTENIDO

	pág.
1. MARCO TEÓRICO	19
1.1 HUMEDALES ARTIFICIALES	19
1.2 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO	21
1.2.1 Balance de material para el trazador	25
1.2.1.1 Análisis de parámetros hidráulicos del reactor.	26
1.2.1.2 Metodología de Wolf-Resnick.	26
1.2.1.3 Índices de eficiencia hidráulica.	28
1.2.1.4 Índice de Morril.	29
1.2.1.5 Obtención del volumen útil.	29
1.2.2 Modelos matemáticos de flujo no ideal	30
1.2.2.1 Modelo de Flujo Pistón con Dispersión (FPD).	30
1.2.2.2 Modelo de Tanques en Serie (TS).	32
2. MATERIALES Y MÉTODOS	33
2.1 Descripción del sistema de humedales artificiales (Planta Piloto)	33
2.2 Descripción del montaje experimental a escala laboratorio	37
2.3 Ensayo de trazadores en planta piloto y en el montaje a escala laboratorio	39
2.3.1 Preparación del ensayo	39
2.3.2 Ejecución del ensayo	41
2.4 Pruebas de visualización	41
2.5 Tratamiento de datos	42
2.5.1 Ajuste por mínimos cuadrados	43

2.5.2 Análisis estadístico (ANOVA)	44
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	45
3.1 Comportamiento hidráulico en la planta piloto	45
3.1.1 Índices de eficiencia hidráulica e índice de Morril	51
3.1.2 Patrón real de flujo en la planta piloto	52
3.1.3 Modelación hidrodinámica en la planta piloto	54
3.2 Comportamiento hidráulico en el montaje experimental a escala laboratorio	60
3.2.1 Modelación hidrodinámica en el montaje a escala laboratorio	66
3.2.2 Pruebas de visualización	69
4. CONCLUSIONES	71
5. RECOMENDACIONES	73
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
BIBLIOGRAFÍA	79
ANEXOS	84

LISTA DE FIGURA

	pág.
Figura 1. Esquema de un humedal construido de flujo subsuperficial horizontal.	20
Figura 2. Aplicación de trazadores a un humedal.	22
Figura 3. Representación gráfica para diferentes valores de dispersión.	30
Figura 4. Curvas DTR normalizadas, correspondientes a diferentes números de tanques en serie (N).	32
Figura 5. Modelo experimental a escala piloto.	33
Figura 6. Vista en planta del modelo experimental a escala piloto.	34
Figura 7. (a) Vista lateral, y (b) frontal del contenedor.	35
Figura 8. Medio de soporte plástico (MSP).	36
Figura 9. Ensayos de trazadores realizados en el sistema de humedales artificiales (Planta Piloto).	36
Figura 10. Esquema del montaje experimental a escala laboratorio.	37
Figura 11. Ensayos de trazadores y pruebas de visualización realizados en el montaje a escala laboratorio.	38
Figura 12. (a) Conductivímetro PCE-PHD1, (b) Toma de una muestra del efluente.	39
Figura 13. Tendencia de los valores de concentración de NaCl Vs conductividad eléctrica para agua potable.	40
Figura 14. Concentración vs tiempo del primer ensayo de trazadores en la planta piloto.	45
Figura 15. Concentración vs tiempo del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto.	46
Figura 16. Concentración vs tiempo del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto.	46
Figura 17. Curva DTR del primer ensayo de trazadores en la planta piloto.	48
Figura 18. Curva DTR del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto.	48

Figura 19. Curva DTR del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto.	49
Figura 20. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).	56
Figura 21. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).	56
Figura 22. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).	57
Figura 23. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).	57
Figura 24. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).	58
Figura 25. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).	58
Figura 26. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).	59
Figura 27. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).	59
Figura 28. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).	60
Figura 29. Curvas Cimpulso de los ensayos de trazadores en el reactor a escala laboratorio.	61
Figura 30. Curvas DTR de los ensayos de trazadores en el reactor a escala laboratorio.	62
Figura 31. Modelación hidrodinámica del primer ensayo de trazadores.	67
Figura 32. Modelación hidrodinámica del segundo ensayo de trazadores.	67
Figura 33. Modelación hidrodinámica del tercer ensayo de trazadores	68
Figura 34. Modelación hidrodinámica del cuarto ensayo de trazadores.	68
Figura 35. Pruebas de visualización con colorante.	69

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Criterios de los índices de eficiencia hidráulica.	28
Tabla 2. Resultados del estudio hidrodinámico a partir de trazadores en la planta piloto.	53
Tabla 3. Resultados del estudio hidrodinámico a partir de trazadores en el reactor a escala laboratorio.	65

LISTA DE ANEXOS

	pág.
ANEXO A. Ensayo de trazadores en la planta piloto.	84
ANEXO B. Cálculo del Índice de Morril en la planta piloto.	93
ANEXO C. Aplicación de la metodología de Wolf-Resnick en la planta piloto.	98
ANEXO D. Ensayo de trazadores en el montaje a escala laboratorio.	116
ANEXO E. Cálculo del Índice de Morril en el montaje a escala laboratorio.	124
ANEXO F. Aplicación de la metodología de Wolf-Resnick en el montaje a escala laboratorio.	126

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO HIDRÁULICO DE HUMEDALES ARTIFICIALES DE ALTA TASA UTILIZANDO MEDIO DE SOPORTE PLÁSTICO RECICLADO COMO MATERIAL DE RELLENO*

AUTORES: JORGE LEONARDO DÍAZ CRISTANCHO**
JHON GERMAN QUIROGA PINZÓN

PALABRAS CLAVE: Humedales artificiales, trazadores, tiempo de retención hidráulico, modelos matemáticos.

DESCRIPCIÓN

En este proyecto de investigación se determinó el comportamiento hidráulico de humedales artificiales de alta tasa (HAAT), utilizando un medio de soporte plástico (MSP). La metodología de evaluación consistió en el análisis de las curvas de distribución temporal y acumulada de concentración obtenidas mediante pruebas de trazadores en reactores tanto a escala piloto como en laboratorio, a través de las cuales se determinaron los tiempos de retención y las características concomitantes como los tipos de flujo, cortos circuitos y las zonas muertas, para posteriormente hacer ajustes con dos modelos de flujo no ideal (tanques en serie, flujo pistón con dispersión). Los resultados evidencian un régimen de flujo dual (pistón y mezcla completa con predominio del primero pero con alta dispersión), presencia de zonas de recirculación interna (cortos circuitos), zonas de estancamiento principalmente el fondo del primer reactor y tiempos de retención reales mayores a los teóricos. Se evidenció que la configuración aleatoria del MSP, el crecimiento de los rizomas y raíces de las plantas, así como la biopelícula producto de la carga orgánica son factores que incrementan la dispersión del flujo en HAAT. El tipo de alimentación con flujo intermitente presentó mejores resultados en el comportamiento hidráulico de los humedales.

* 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

TITLE: HYDRAULIC STUDY OF HIGH-RATE WETLANDS USING PLASTIC RECYCLED SUPPORT MEDIA AS BACKFILL *

AUTHORS: JORGE LEONARDO DÍAZ CRISTANCHO**
JHON GERMAN QUIROGA PINZÓN

KEYWORDS: Artificial wetlands, tracers, hydraulic retention time, mathematical models.

DESCRIPTION

In this research project was determined the hydraulic behavior of high-rate constructed wetlands, filled with plastic support media. The assessment methodology included: analysis of residence time distributions obtained by tracer tests in reactors both at laboratory and pilot scale, and determination of concomitant features (flow rates, short-circuiting and dead zone). Which permitted to make adjustments with two non-ideal flow models (tanks-in-series model, and dispersed plug flow model. The results show a dual flow regime (plug and completely mixed flow with predominance of the first, but with high dispersion), presence of internal recirculation zones and short-circuiting, stagnant areas on the bottom of the first reactor, and real retention times higher than theoretical values. It was evident that random packed of the support media, the growth of rhizomes and plant roots, as well as the biofilm are factors that increase the dispersion in the wetlands. The intermittent feeding showed better results in the hydraulic behavior of wetlands.

* 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

Con el aumento de la demanda global del recurso hídrico, el inadecuado uso y la falta de tratamiento de aguas residuales, el impacto al ambiente cada vez es más severo. En Santander tan solo 14 municipios cuentan con plantas de tratamiento de aguas residuales, el resto incumplen con las normas de vertimiento de líquidos contaminados [1]. Sumado a lo anterior, con el cambio de la normatividad (Resolución No. 0631 del 17 de marzo de 2015 [2]) que regula los vertimientos de aguas a los cauces, los diferentes sectores de la industria tendrán que buscar alternativas para tratar el agua residual producto de sus actividades comerciales.

Los humedales artificiales surgen como una alternativa económica y ambientalmente sustentable para solucionar el problema de las aguas residuales domésticas en poblaciones inferiores a 2000 habitantes [3], y su diseño puede potenciarse para tratar aguas con altos contenidos de material orgánico como el de las aguas residuales agroindustriales. Nuevas variantes de esta tecnología incluyen modificaciones, tales como la sustitución de la grava por medios de soporte plástico, dando lugar a un nuevo tipo de humedales conocido como humedales artificiales de alta tasa. Esta nueva variante no ha sido estudiada dentro de su área, por ello es necesario para su diseño e implementación conocer su comportamiento hidráulico, para asegurar que el proceso sea eficiente y sostenible [4].

En este sentido, el presente trabajo de investigación evalúa a escala piloto el comportamiento hidráulico de un sistema de humedales artificiales de alta tasa (HAAT) plantados con *Cyperus Alternifolius* (papiro) y sin vegetación. Se determinan aspectos hidráulicos tales como tiempos de retención reales, patrón de flujo, volumen efectivo y eficiencias hidráulicas por medio de ensayos de trazadores.

Paralelamente se determina la influencia del arreglo del medio de soporte y del tipo de flujo en la hidráulica de un HAAT a escala laboratorio sin vegetación.

1. MARCO TEÓRICO

1.1 HUMEDALES ARTIFICIALES

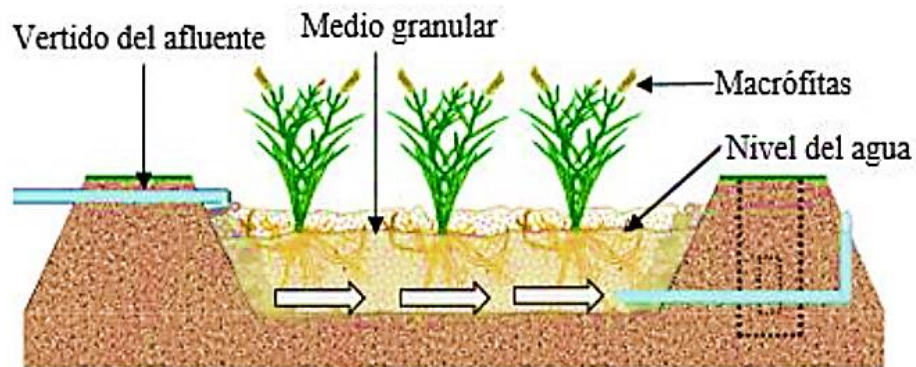
Los humedales artificiales (HA) son sistemas de fitodepuración de aguas residuales, constituidos por lagunas o canales de poca profundidad (de menos de 1 m). El proceso de depuración del agua se genera por la acción de tres componentes: las macrófitas que hacen posible una serie de interacciones (físicas, químicas y biológicas), la actividad bioquímica de una película bacteriana y el apoyo físico de un lecho inerte que sirve como medio de soporte para las plantas y la biopelícula, además de funcionar como material filtrante [5]. De esta forma se reducen una amplia gama de contaminantes del agua tales como: materia orgánica, nutrientes como el nitrógeno y el fósforo, organismos patógenos y sólidos en suspensión [6].

Esta investigación se enfoca en los humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial (FSSH). Esta clase de humedales se caracteriza porque la circulación del agua es de tipo subterráneo a través del medio de soporte y en contacto con las raíces y rizomas de las plantas (Figura 1). Estos humedales son más eficientes ya que tienen mayor capacidad de tratamiento, al admitir mayor carga orgánica. Además, evitan problemas como posibles plagas de insectos y malos olores [5].

La falta de distribución equitativa del caudal, las raíces de las plantas, el tamaño del medio y la acumulación de sólidos en los humedales artificiales pueden generar una serie de problemas como zonas muertas, cortocircuitos y la posibilidad de riesgo de colmatación que afectan el proceso de depuración del agua. La colmatación es la pérdida de volumen de poros entre partículas del medio granular, este fenómeno

ocasiona la salida del flujo a nivel superficial, la reducción de la conductividad hidráulica, del tiempo de residencia, del volumen útil y la filtración. Cuando el grado de colmatación es alto puede llegar a ser necesario el cambio en gran parte o en su totalidad del material granular. Para evitar estos inconvenientes se ha desarrollado un medio de soporte plástico (MSP) que genera al sistema mayor grado de porosidad frente a la grava convencional (94% Vs 40-45%) y una superficie específica de $320 \text{ (m}^2/\text{m}^3)$ (Patente SIC, Resolución 37697 de junio 16 de 2016) [7]. Los humedales que utilizan este tipo de medio de soporte se les denominan humedales artificiales de alta tasa (HAAT) y se caracterizan por su capacidad de tratamiento de aguas de alta carga orgánica e hidráulica [8].

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



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

1.2 COMPORTAMIENTO HIDRÁULICO

En un sistema de tratamiento biológico es importante el contacto que el agua residual tenga con los microorganismos depuradores y que el tiempo de permanencia sea suficiente para garantizar la eficiencia de remoción de materia orgánica [4]. El tiempo que el agua permanece en un reactor se conoce como el tiempo de retención hidráulico (TRH). El TRH bajo condiciones de flujo ideal, conocido como TRH teórico (τ), puede ser definido por la ecuación 1, mediante la relación entre el volumen útil (V), cuyo resultado es el producto de la profundidad (h), el ancho (W) y la longitud (L) afectados por la porosidad del medio (ε); dividido por el caudal de agua (Q) [9]:

$$\tau = \frac{V}{Q} = \frac{\varepsilon (LWh)}{Q} \quad (1)$$

A menudo, los diseñadores de sistemas de tratamiento limitan sus diseños bajo el supuesto de que el flujo en los reactores es de dos tipos: en pistón y en mezcla completa [4]. En flujo pistón ideal el perfil de velocidad con respecto al área transversal de flujo es uniforme, es decir, las partículas de fluido que ingresan al sistema en un tiempo dado se mueven todas a la misma velocidad hasta abandonar el sistema. Por el contrario, el modelo de mezcla completa ideal presupone la interacción de la totalidad de las partículas en el interior del reactor [9].

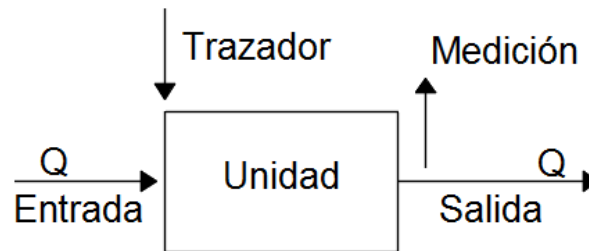
En condiciones reales un reactor se aleja del comportamiento ideal, debido a factores tales como: condiciones ambientales, las características hidráulicas de las estructuras de entrada y salida, la batimetría, la presencia de sólidos; el tipo,

densidad y distribución espacial de la vegetación [9]. Por esta razón es necesario realizar ensayos de trazadores para identificar el patrón real de flujo.

Los ensayos de trazadores en humedales artificiales permiten determinar los tiempos reales de retención y sus principales características concomitantes: tipos de flujo, espacios muertos y cortocircuitos hidráulicos.

Un ensayo de trazadores consiste en agregar una concentración conocida de una sustancia no reactiva en la zona de entrada del humedal, de manera que permita realizar mediciones de tiempo y concentración del trazador en el fluido efluente, hasta que la concentración sea aproximadamente igual a la registrada antes de aplicar el trazador [10].

Figura 2. 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.

Al graficar los datos de concentración de trazador vs tiempo se obtiene la curva $C_{impulso}$. A partir de esta es posible calcular el tiempo de retención real del reactor como se estipula en la ecuación 2.

$$\tau_R = \frac{\sum_{i=1}^n t_i * C_i * \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i} \quad (2)$$

Donde:

C_i : Concentración de trazador en cada instante de tiempo.

Δt_i : Intervalo de tiempo entre cada medición.

La concentración de trazador en cada instante de tiempo respecto de la cantidad inicial de trazador que se introduce al humedal constituye la función $E(t)$ o función de distribución de tiempos de residencia (DTR), esta se determina a partir de la ecuación 3.

$$E = \frac{C_{impulso}}{\sum_{i=1}^n C_i * \Delta t_i} \quad (3)$$

Donde:

E : Función E [1/s].

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

Para encontrar la curva E a partir de la curva $C_{impulso}$ se cambia la escala de concentración de forma que el área bajo la curva sea la unidad. Así, simplemente se dividen las lecturas de concentración por M/Q . En la ecuación 4 se demuestra que la relación M/Q es igual al área bajo la curva $C_{impulso}$.

$$A = \int_0^{\infty} C dt \cong \sum_{i=1}^n C_i \Delta t_i = \frac{M}{Q} = \left[\frac{g * s}{L} \right] \quad (4)$$

Donde:

Q : Flujo volumétrico [L/s].

M : Masa de trazador inyectada [g].

La normalización de la curva $E(t)$ se realiza con el fin de compararla con curvas E normalizadas de diferentes modelos matemáticos y de esta manera determinar el patrón real de flujo.

$$E_{\theta} = \tau_R * E \quad (5)$$

Donde:

E_{θ} : E normalizada, adimensional.

τ_R : Tiempo real de retención [s].

Para realizar la gráfica E_{θ} es necesario realizar la normalización del tiempo mediante la ecuación 6.

$$\theta = \frac{t}{\tau_R} \quad (6)$$

Donde:

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

τ_R : Tiempo real de retención [s].

La varianza $\sigma^2[s^2]$ representa el cuadrado de la dispersión de la distribución conforme el trazador pasa por la salida del humedal [11], el cálculo de este parámetro se efectúa a partir de la ecuación 7:

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=0}^n t_i^2 * E_i * C_i \Delta t_i}{\sum_{i=0}^n E_i * C_i \Delta t_i} - \tau_R^2 \quad (7)$$

Donde:

σ^2 : Varianza [s^2].

τ_R^2 : Tiempo real de retención [s^2].

La varianza puede ser normalizada σ^2_θ , haciendo adimensional su medida, al dividir por el cuadrado del tiempo de retención real, según la ecuación 8:

$$\sigma^2_\theta = \frac{\sigma^2}{\tau_R^2} \quad (8)$$

1.2.1 Balance de material para el trazador

Para un elemento de trazador, el balance de masa está dado por:

$$\text{Entrada} = \text{Salida} + \text{Acumulación} \quad (9)$$

Por medio de este balance se llega a la ecuación 10 que representa el porcentaje de trazador recuperado (%TR) durante el ensayo de trazadores [12].

$$\%TR = \frac{\sum_{i=1}^n Q C_i \Delta t_i}{C_0} \quad (10)$$

Donde:

C_0 : Concentración inicial de trazador [g].

Q : Caudal de agua [L/s].

1.2.1.1 Análisis de parámetros hidráulicos del reactor. Existen varios índices y modelos que permiten caracterizar el comportamiento hidráulico de reactores. Su análisis en conjunto permite establecer con mayor exactitud el funcionamiento hidráulico del sistema.

1.2.1.2 Metodología de Wolf-Resnick. Esta metodología permite cuantificar el porcentaje de flujo pistón (**P**), mezcla completa (**M**) y zonas muertas (**m**), que se presentan en la operación normal del reactor [12].

La función $F(t)$, describe la concentración, en forma acumulada, de una sustancia a la salida del reactor, en función de su concentración inicial. Esta función se calcula por medio de la ecuación 11.

$$F(t) = \frac{\sum_{i=1}^n (C - C_0)_i}{\sum (C - C_0)_{Total}} \quad (11)$$

Donde:

C_0 : Concentración inicial en el reactor.

Para encontrar los parámetros antes mencionados, se construye la gráfica de $1 - F(t)$ en escala semilogaritmica y en función del tiempo adimensional (t/τ) [10].

Luego se traza una línea tangente en el punto donde la curva cambia a comportamiento lineal. Para trazar la línea tangente en el mejor punto, es necesario evaluar la tendencia lineal de los últimos valores y a partir del coeficiente de correlación, seleccionar el punto en el que verdaderamente empieza a comportarse linealmente la parte final de la curva [12]. Se llamará α al ángulo comprendido entre

la recta tangente y la horizontal, y Θ al intercepto de la recta con el eje de las abscisas.

La pendiente de la recta ajustada para un ciclo logarítmico de datos ($\text{Tan}\alpha$) se calcula según la ecuación 12.

$$\text{Tan}\alpha = \frac{1}{\left(\frac{t_1}{\tau} - \frac{t_2}{\tau}\right)} \quad (12)$$

Donde:

τ : Tiempo teórico de retención [s].

$\frac{t_1}{\tau}$: Tiempo en que la línea tangente a la curva corta con $1 - F(t)$ en el valor de 100 en escala semilogarítmica, adimensional.

$\frac{t_2}{\tau}$: Tiempo en que la línea tangente a la curva corta con $1 - F(t)$ en el valor de 10 en escala semilogarítmica, adimensional.

Teniendo en cuenta el valor de $\text{Tan}\alpha$ se calcula el porcentaje de flujo a pistón (P) a partir de la ecuación 13, donde $\theta = \frac{t_1}{\tau}$.

$$P = \frac{\theta * \text{Tan}\alpha}{0.435 + (\theta * \text{Tan}\alpha)} \quad (13)$$

El porcentaje de flujo mezclado y el porcentaje de espacios muertos se determinan por medio de las ecuaciones 14 y 15 respectivamente.

$$M = 1 - P \quad (14)$$

$$m = 1 - \frac{\theta}{P} \quad (15)$$

1.2.1.3 Índices de 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 humedales de flujo subsuperficial [8]. Existen diferentes maneras de determinar la eficiencia hidráulica en reactores, la forma más común en humedales artificiales de flujo subsuperficial es a través de los índices de Thackston (λ_t) y Persson (λ_p) que permiten evaluar las características del volumen útil y la utilización de este, calculándose por medio de las ecuaciones 16 y 17 respectivamente.

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

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

Donde:

τ_R : Tiempo real de retención [s].

τ : Tiempo de retención teórico [s].

T_p : Tiempo de máxima concentración [s].

Tabla 1. Criterios de los índices de eficiencia hidráulica [8] [13].

ÍNDICES DE EFICIENCIA HIDRÁULICA	
$\lambda_t = 1$	El volumen total del reactor está siendo aprovechado.
$1 < \lambda_t < 1$	Distribución del flujo en el reactor no es uniforme.
$\lambda_t < 1$	Presencia de espacios muertos o reducciones del volumen efectivo del reactor.
$\lambda_t > 1$	Acumulaciones indeseadas de trazador, o errores durante el ensayo.
$\lambda_p = 0$	Predomina el flujo en mezcla completa en el reactor.
$\lambda_p > 1$	Distribución del flujo en el reactor no es uniforme.
$\lambda_p \approx 1$	Predomina en el reactor el flujo pistón.

1.2.1.4 Índice de Morril. El índice de Morril (IM) es una relación entre el tiempo en que sale el 90% y el 10% del trazador. Permite determinar el patrón real de flujo y la presencia de zonas muertas en el reactor. Su cálculo es posible por medio de la ecuación 18.

$$IM = \frac{T_{90}}{T_{10}} \quad (18)$$

Donde:

T_{10} : Tiempo en que pasa el 10% del trazador [s].

T_{90} : Tiempo en que pasa el 90% del trazador [s].

Para determinar los tiempos en que pasa el 10% y 90% del trazador, se construye la gráfica de tiempo vs porcentaje de trazador que pasa, donde las abscisas estén en escala de probabilidades y las ordenadas tengan escala logarítmica. En la gráfica se ubican estos valores [14]. Si el índice de Morril es mayor a 1 existe flujo mezclado y zonas muertas, por el contrario si tiende a 1 existe flujo pistón [9].

1.2.1.5 Obtención del volumen útil. El volumen útil se determina al despejar esta variable de la ecuación 1, en este caso se emplea el tiempo de retención real y la porosidad del medio de soporte plástico del humedal artificial. Los resultados de este parámetro se analizan según los índices de eficiencia hidráulica mencionados en el Cap. 1.2.2.2.

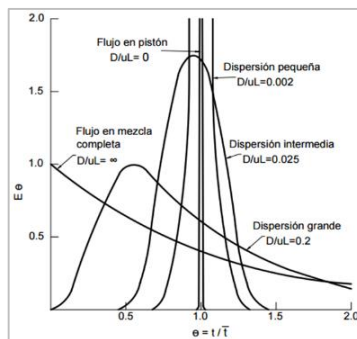
1.2.2 Modelos matemáticos de flujo no ideal

1.2.2.1 Modelo de Flujo Pistón con Dispersión (FPD). Se considera el modelo de flujo pistón con dispersión cuando se superpone cierto grado de diseminación longitudinal en el flujo, e implica considerar el efecto de zonas muertas, desviaciones o cortocircuitos [13].

El módulo de dispersión (D/vL) representa este proceso de dispersión en todo el recipiente y se determina mediante la función $E_{\theta D}$ vs θ para el modelo FPD, la cual tiene las siguientes características (Figura 3):

- $D/vL \rightarrow 0$ 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.

Figura 3. Representación gráfica para diferentes valores de dispersión.



Fuente: LEVENSPIEL O. Ingeniería de las reacciones químicas, 3ª Ed. Limusa Wiley, Ciudad de México, México, 2004, p. 257-292.

Según Levenspiel [11] para recipientes abiertos-abiertos y con módulo de dispersión mayor a 0.01, se debe utilizar la ecuación 19, con la cual se halla la curva $E_{\theta D}$ para el modelo FPD [11].

$$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi(D/vL)\theta}} * e^{\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}\right]} \quad (19)$$

Donde:

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

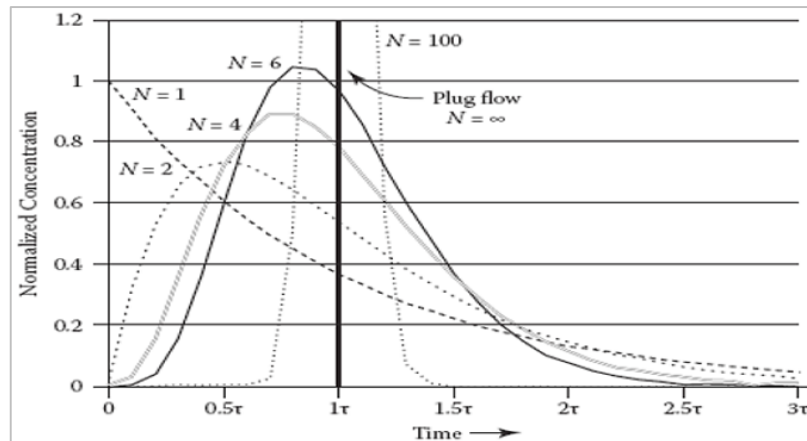
θ : Tiempo normalizado, adimensional.

En esta investigación el módulo de dispersión fue mayor a 0.01, por tal razón es correcto aplicar la ecuación 19, pero no obstante se observó que los datos experimentales de la DTR adimensional no se ajustaron de la mejor manera. Al consultar otros estudios se encontró que Pérez, et al [15] solucionaron la ecuación diferencial de FPD encontrando que en Levenspiel el valor de θ del radical, fue presentado de forma lineal (ver ecuación 19), debiendo ser θ^3 [15]. La ecuación 20 se ha empleado en la evaluación del comportamiento hidráulico de sistemas de tratamiento de aguas residuales como en [16]. Teniendo en cuenta lo anterior en este estudio se aplicó esta ecuación para el modelo FPD, logrando mayor grado de ajuste de los datos experimentales de la DTR adimensional.

$$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi(D/vL)\theta^3}} * e^{\left[-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}\right]} \quad (20)$$

1.2.2.2 Modelo de Tanques en Serie (TS). Este modelo supone que el reactor se puede representar por varios tanques de mezcla completa ideales del mismo tamaño conectados en serie y con un único parámetro: “número de tanques en serie (N)”. Si el número de tanques es grande, el flujo será más aproximado a un flujo pistón. Por el contrario, si el número de tanques es pequeño, la respuesta se aparta considerablemente de dicho flujo y se inclina más hacia mezcla completa [12] (Figura 4).

Figura 4. Curvas DTR normalizadas, correspondientes a diferentes números de tanques en serie (N).



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

La función de distribución de tiempos de residencia para este modelo se determina con la ecuación 21.

$$E_{\theta TS} = \frac{N(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta} \quad (21)$$

Donde:

N : Numero de tanques en serie, adimensional.

θ : Tiempo normalizado, adimensional.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Descripción del sistema de humedales artificiales (Planta Piloto)

Figura 5. Modelo experimental a escala piloto.

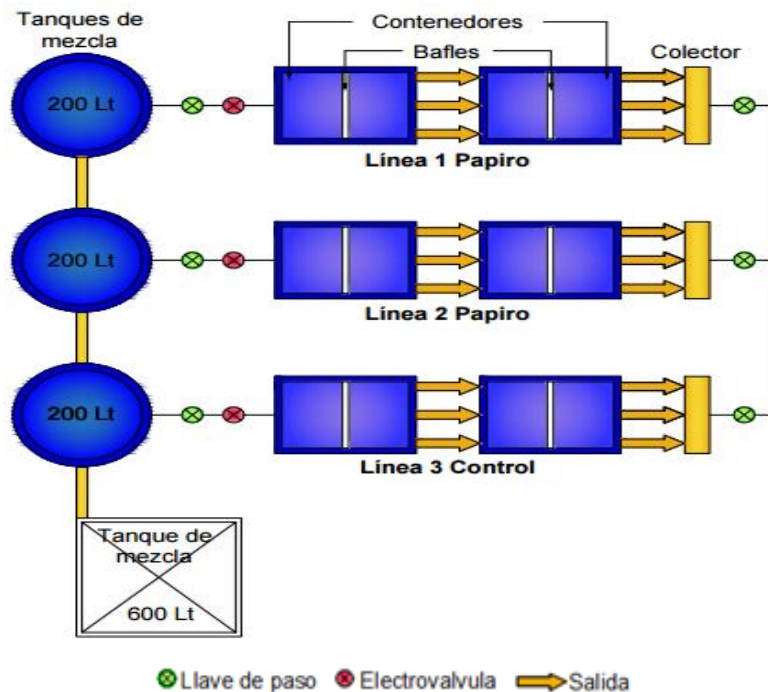


Este trabajo de investigación hace parte del proyecto de investigación doctoral “Viabilidad del uso de Medios de Soporte Plástico (MSP) en Humedales Artificiales de Alta Tasa (HAAT) para la depuración de efluentes industriales”, desarrollado por Corzo y Sanabria [17]. En dicha investigación se emplea una planta piloto, ubicada en la parte posterior del edificio Álvaro Beltrán de la Universidad Industrial de Santander. El sistema estuvo compuesto por tres líneas de HAAT en paralelo, con igual configuración (relación largo-ancho, profundidad del lecho y de la lámina de agua). Dos líneas fueron plantadas con *Cyperus Alternifolius*, nombre común “Papiro” y una permaneció sin vegetación como control del experimento (Figura 5).

El sistema se alimentó con agua residual sintética, preparada en un tanque de 600 litros, seguido de una electrobomba para impulsión del agua a los tanques de

distribución (200 litros) de cada línea de tratamiento. Posteriormente, el sistema contaba con una llave de paso y una electroválvula que controlaba las seis descargas ocurridas en el transcurso del día; seguido de dos HAAT en serie. En la entrada de los HAAT se ubicó un vertedero que se encargaba de repartir el afluente de manera uniforme en el primer reactor. La conexión y la salida entre los reactores estaba compuesta por tres tubos PVC de 3" de diámetro ubicados a treinta centímetros del fondo permitiendo controlar la altura de la lámina de agua en el efluente (0.30 m). Por último los tubos concurrían en un colector seguido de un desagüe como se muestra en la Figura 6.

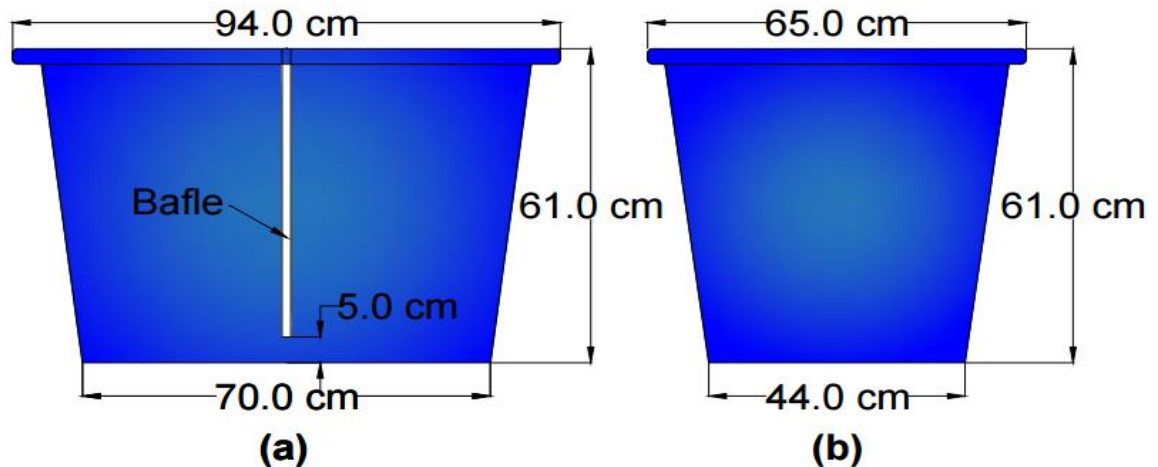
Figura 6. Vista en planta del modelo experimental a escala piloto.



Cada línea de humedales estaba compuesta por dos reactores de polietileno de alta densidad que contenían el medio de soporte plástico, las plantas y los

microorganismos. El volumen de agua en cada línea fue de 200 litros. En la Figura 7 se muestra el esquema y dimensiones del lecho.

Figura 7. (a) Vista lateral, y (b) frontal del contenedor.



En la mitad de cada contenedor se ubicó un baffle a cinco centímetros del fondo para mejorar la distribución del flujo en los HAAT y reducir el tiempo de retención acercándose al tiempo de retención de diseño.

El medio de soporte fue desarrollado por Sanabria y Corzo para crear los humedales artificiales de alta tasa [7]. Este medio está conformado por miles de unidades de un dispositivo con forma de rombo cuboctaedro, con ranuras a los costados y plano en los polos, cuenta con una superficie específica de $320 [m^2/m^3]$ y mayor grado de porosidad frente a la grava convencional (94% Vs 40-45%). Se ubicó hasta una altura de $0.35 [m]$ desde el fondo de los humedales.

Figura 8. Medio de soporte plástico (MSP).

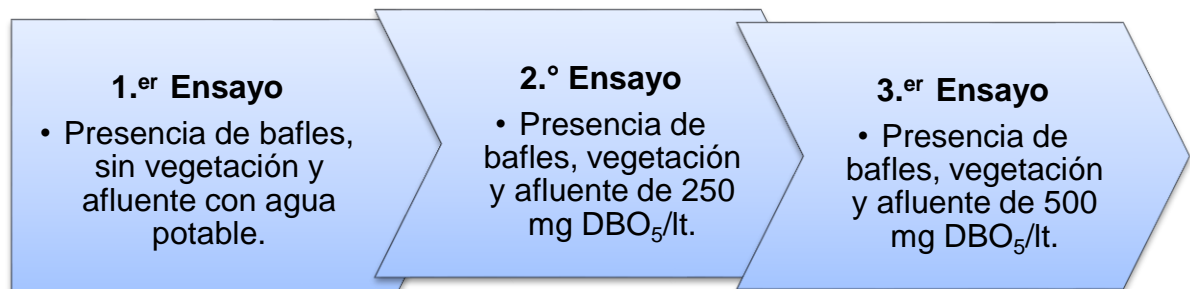


Fuente: CORZO, A., y SANABRIA, O. Modelo de utilidad: Portador para el crecimiento bacteriano en reactores biológicos de cultivos fijo de configuración poliédrica-rombocuboctaedro. Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Clasificación IPC: C 02F 3/10, 3/02; B 01 J 19/30. Resolución 37697, 16 de junio, 2016.

El afluente en cada línea correspondió a un caudal de 200 [L/d]. Cada 4 horas se realizó una descarga de agua de 33.33 [L]. Inicialmente se utilizó agua potable en el sistema, posteriormente se introdujo dos cargas orgánicas de 250 [mg DBO₅/l] y 500 [mg DBO₅/l].

Se llevaron a cabo 3 ensayos de trazadores en diferentes etapas de desarrollo de los HAAT, con características específicas como se indica en la figura 9.

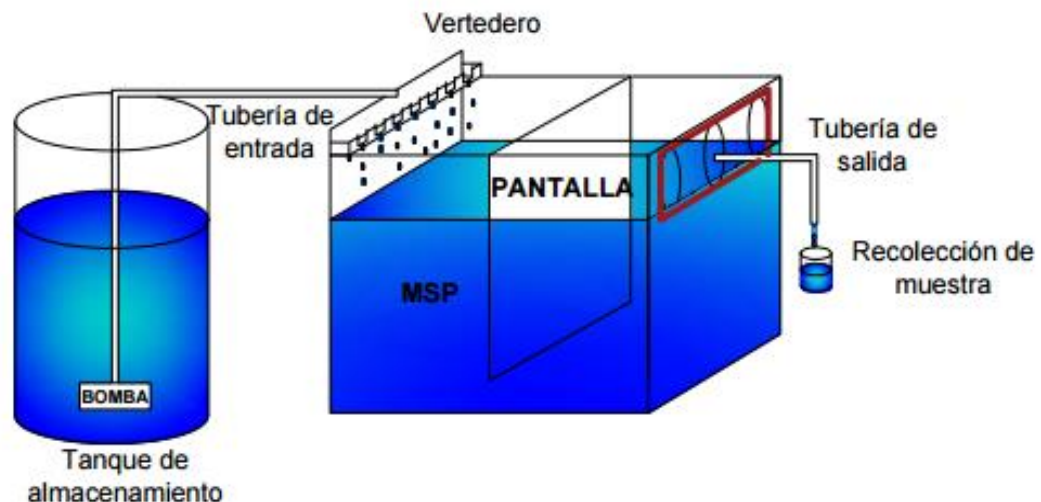
Figura 9. Ensayos de trazadores realizados en el sistema de humedales artificiales (Planta Piloto).



2.2 Descripción del montaje experimental a escala laboratorio

Para las pruebas en laboratorio, se utilizó un montaje (Figura 10) que incluyó un depósito de 50 [Lt] para almacenar el agua afluyente, seguido de un HAAT a escala laboratorio fabricado en vidrio de 0.6 [cm] de espesor y con las siguientes dimensiones: 0.5[m] x 0.35[m] x 0.4[m], capacidad de 52.5 litros. En la entrada de este se ubicó un vertedero para repartir el afluyente de manera uniforme. En el interior del HAAT se ubicó un bafle en el centro a una altura de 5 [cm] del fondo. La configuración de salida estaba compuesta por tres tubos PVC de 1¹/₂" de diámetro ubicados a 30 centímetros del fondo, permitiendo controlar la altura de la lámina de agua en el reactor (30 cm). Por último los tubos concurrían en un colector seguido de un desagüe.

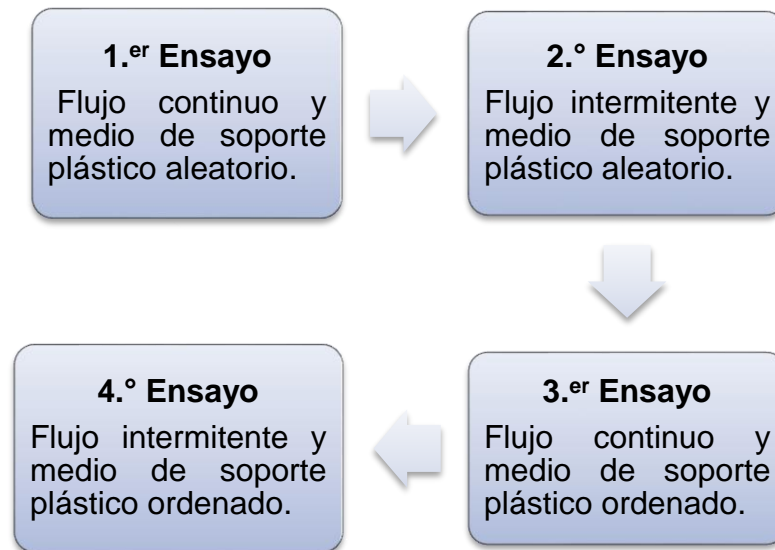
Figura 10. Esquema del montaje experimental a escala laboratorio.



En los experimentos con flujo continuo se vertió un caudal de 8.333 [L/h]. En los ensayos con flujo intermitente el reactor fue alimentado cada 30 minutos con un

volumen de agua de 8.333 [L] por descarga, durante el tiempo de duración del experimento. Se utilizó agua potable para ambos casos, con flujo regulado mediante una bomba sumergible.

Figura 11. Ensayos de trazadores y pruebas de visualización realizados en el montaje a escala laboratorio.



En este montaje se llevaron a cabo 4 ensayos de trazadores y visualización con colorante. Las pruebas se realizaron con flujo continuo e intermitente, teniendo en cuenta la configuración geométrica y la disposición del MSP dentro del reactor (Aleatorio vs Ordenado) como se indica en la figura 11. Para el ensayo ordenado, el medio de soporte se arregló de manera que permitiera el flujo del agua con mayor facilidad, debido a que éste posee planos que dificultan el flujo.

2.3 Ensayo de trazadores en la planta piloto y en el montaje a escala laboratorio

El ensayo de trazadores se basa en la medida de la conductividad eléctrica en [$\mu\text{s}/\text{cm}$] de los efluentes por medio de un conductivímetro de campo PCE-PHD 1 (Figura 12[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 [8]. Como sustancia trazadora se utilizó Cloruro de Sodio (NaCl).

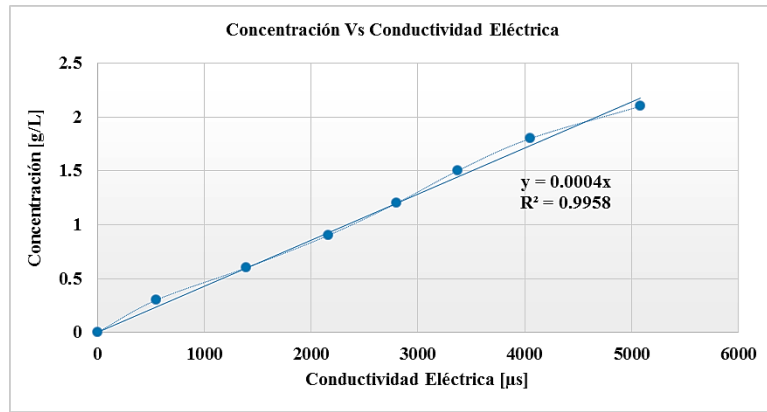
Figura 12. (a) Conductivímetro PCE-PHD1, (b) Toma de una muestra del efluente.



2.3.1 Preparación del ensayo

Para determinar los valores de concentración de trazador a partir de los datos de conductividad eléctrica del ensayo fue necesario estimar inicialmente la función que relaciona estos dos parámetros. Este proceso se realizó adicionando cantidades de sal en un litro de agua y registrando los valores de conductividad eléctrica. Se obtuvo una gráfica con su respectiva regresión lineal (Figura 13).

Figura 13. Tendencia de los valores de concentración de NaCl Vs conductividad eléctrica para agua potable.



El segundo paso consistió en determinar la cantidad de trazador a administrar con inyección instantánea. Los ensayos de trazadores en la planta piloto se realizaron con agua residual, este tipo de aguas presentan mayor concentración de sales en comparación con el agua potable, por tal motivo fue necesario inicialmente conocer la conductividad eléctrica en el sistema para calcular la cantidad de sal a utilizar, de tal forma que la cantidad de trazador fuese suficiente para que la variación de la conductividad eléctrica a la salida fuera registrada. La dosificación de NaCl necesaria se obtuvo por medio de la ecuación 22:

$$P = V_T * f * C_0 \quad (22)$$

Donde:

P : Peso del cloruro de sodio [gr].

V_T : Volumen del humedal incluyendo la solución salina [Lt].

f : Factor de corrección para cloruros (1.65) [10].

C_0 : Concentración inicial de trazador [gr/Lt].

Según [18] la concentración de cloruros en el agua potable es alrededor de 0.25, por ello para hallar la cantidad de NaCl se tomó C_0 de 0.3 [gr/Lt] y 0.25 [gr/Lt], para los ensayos en la planta piloto y en el montaje a escala laboratorio respectivamente. La dosificación de NaCl para los ensayos en el sistema a escala laboratorio fue de 22.7 [gr], en la planta piloto la cantidad de sal fue 103,95 [gr], 500 [gr] y 207.9 [gr] para el primero, segundo y tercer ensayo respectivamente.

2.3.2 Ejecución del ensayo

Inicialmente se preparó la solución salina, se disolvió la cantidad de NaCl correspondiente en 10 litros de agua para los ensayos en la planta piloto y en 2.5 litros de agua en el montaje a escala laboratorio. Posteriormente se introdujo al vertedero una dosis instantánea, en un tiempo inferior a 1/30 del tiempo de retención teórico, es decir, $\tau = 1 \text{ día}$ (Planta piloto) y $\tau = 6 \text{ horas}$ (montaje a escala laboratorio) [10]. Seguidamente se realizaron mediciones de conductividad eléctrica en los efluentes, suspendiéndose cuando la conductividad eléctrica fuese aproximadamente igual a la registrada sin trazador.

2.4 Pruebas de visualización

Simultáneamente a los ensayos de trazadores en el montaje a escala laboratorio se llevaron a cabo pruebas de visualización con colorante líquido rojo de tipo alimentario. Se agregó una cantidad de este a la solución salina, suficiente para ser visible en las imágenes, y luego se adicionó en conjunto en el reactor. Para capturar las imágenes del paso del trazador de color por el sistema en intervalos de 5

minutos, se utilizó una cámara digital Panasonic Lumix DMC-GH3K 16.05 MP y un trípode de fotografía MANFROTO BE FREE.

2.5 Tratamiento de datos

A escala piloto se tomaron 5 muestras del efluente por cada descarga y línea (Figura 12 [b]). En el montaje a escala laboratorio se tomaron 5 muestras en los ensayos con flujo intermitente y una muestra cada 10 minutos en los ensayos con flujo continuo. A partir de las conductividades eléctricas registradas en los t_i se determinaron las concentraciones en $[gr/Lt]$ por medio de la función que las relaciona (Figura 13), para finalmente graficar $C [gr/Lt]$ vs $t[s]$ y obtener la curva $C_{impulso}$ [8]. Por medio de esta curva se calculó el tiempo real de retención hidráulico mediante la ecuación 2. Para determinar el patrón real de flujo fue necesario obtener la DTR experimental normalizada y comparar con curvas E normalizadas para diferentes modelos de flujo.

Para procesar las imágenes tomadas de los ensayos se utilizó el software libre ImageJ [19], que permite filtrar la información contenida en cada fotografía y segmentarla en tres imágenes independientes de acuerdo a cada banda de color: azul, verde y rojo. Se utilizó la banda roja porque el contraste entre el colorante rojo y el resto de la imagen era más notorio que en las bandas verde y azul. Gracias al contraste entre el colorante y el resto de la imagen se buscó el umbral para obtener una representación de la fotografía en blanco y negro con un contraste muy alto. Donde el color blanco representa el colorante y el negro los demás colores presentes en la foto. Con la imagen procesada se analizó el comportamiento del

flujo y la presencia de zonas activas cualitativamente según el procedimiento de [20].

2.5.1 Ajuste por mínimos cuadrados

Se empleó el método de ajuste por mínimos cuadrados con el fin de minimizar el error existente entre los datos de la función $E(\theta)$ experimental y la $E(\theta)$ calculada por cada modelo matemático de flujo no ideal (FPD y TS), este ajuste se realizó por medio de la ecuación 23:

$$\sum_{i=1}^n E_i^2 = \sum_{i=1}^N (E(\theta)_{Exp_i} - E(\theta)_{Mod_i})^2 \quad (23)$$

Donde:

E_i^2 : Diferencia entre el valor teórico y el experimental, adimensional.

$E(\theta)_{Exp}$: $E(\theta)$ experimental, adimensional.

$E(\theta)_{Mod}$: $E(\theta)$ de los modelos matemáticos, adimensional. Calculada con la ecuación 20 y 21.

Mediante un proceso iterativo de k realizado en MS EXCEL se ajustaron los valores experimentales a los teóricos, de tal forma que la sumatoria E_i^2 se aproximara a cero. De esta manera fueron determinados los índices de modelación $\left(\frac{D}{vL}\right)$ y (N) , para los modelos de FPD y TS respectivamente.

2.5.2 Análisis estadístico (ANOVA)

Para establecer diferencias significativas entre las tres líneas de tratamiento de los humedales artificiales, así como entre tipos de alimentación y de arreglo del medio de soporte, se realizó análisis estadístico de varianza con un factor (ANOVA) [9] [21], utilizando MS EXCEL.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Comportamiento hidráulico en la planta piloto

En las figuras 14, 15 y 16 se muestran las curvas que describen la variación de concentración del trazador en función del tiempo, de los tres ensayos de trazadores llevados a cabo en cada línea de tratamiento de los humedales artificiales.

Figura 14. Concentración vs tiempo del primer ensayo de trazadores en la planta piloto.

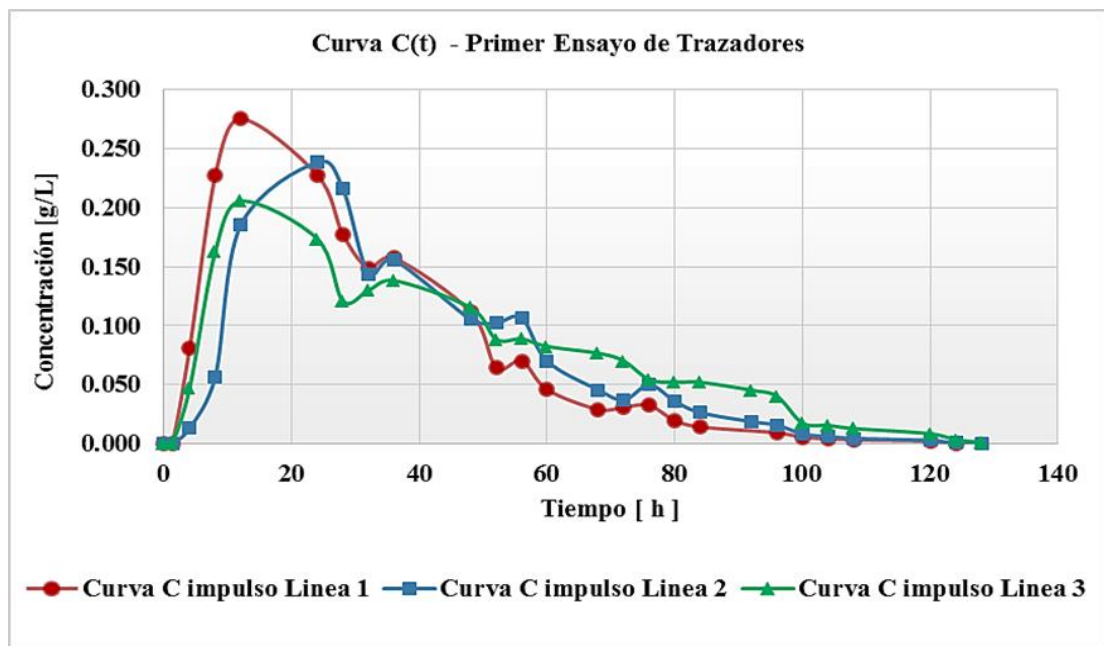


Figura 15. Concentración vs tiempo del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto.

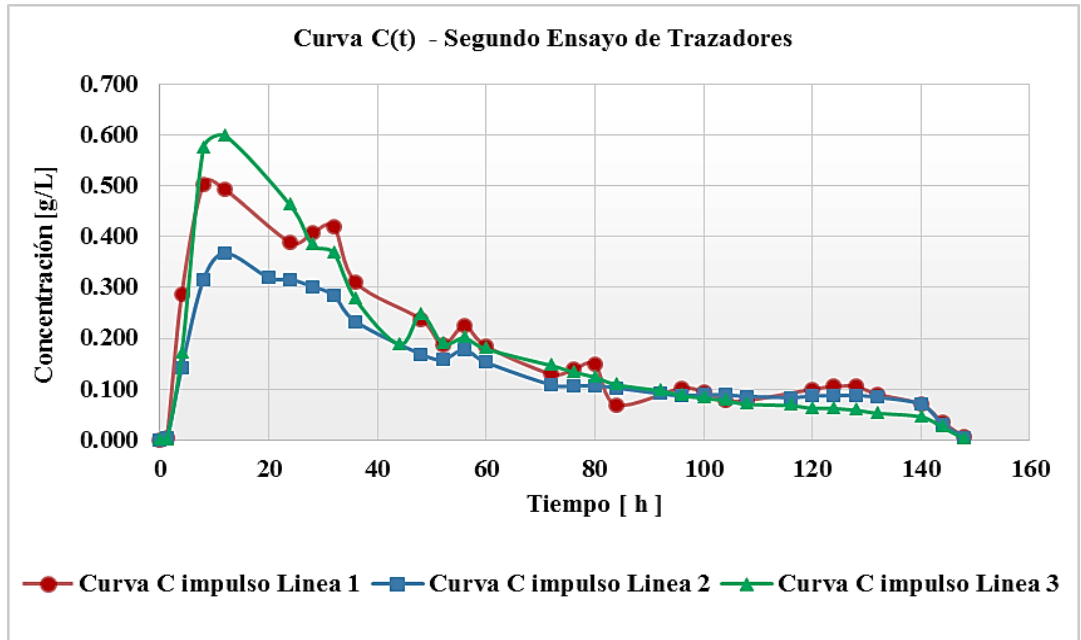
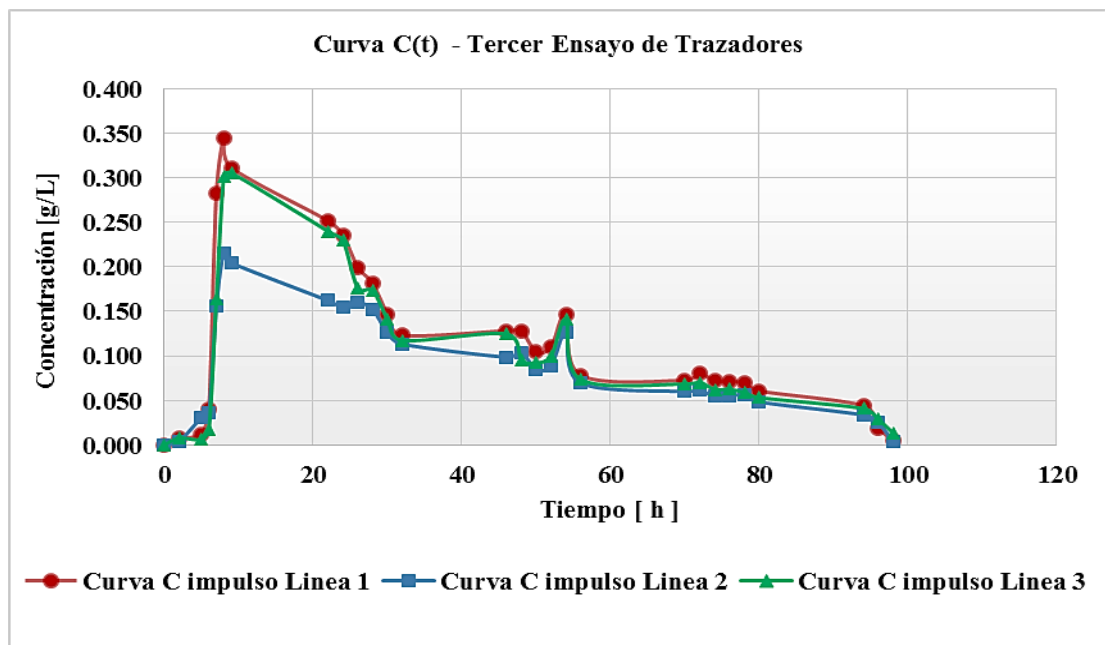


Figura 16. Concentración vs tiempo del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto.



Se puede observar como la concentración de trazador crece a medida que pasa el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo y luego comienza a decrecer exponencialmente. Este comportamiento es característico de un reactor real que presenta una combinación de flujo pistón y mezcla completa [12] [4]. No obstante se presentan ciertas variaciones o pequeños picos de valores de concentración, siendo estos más pronunciados en la gráfica del tercer ensayo. Este fenómeno puede ser producto de la presencia de los baffles o de cortos circuitos en el sistema [12] [13].

La concentración máxima de trazador se obtiene rápidamente y mucho antes de cumplirse los tiempos de residencia teóricos, esto podría generarse debido a la presencia de flujos preferenciales en el reactor [13].

Realizando la metodología descrita en el Cap. 1.2 se obtuvieron las curvas DTR a partir de la curva $C_{impulso}$ para cada uno de los ensayos de trazadores como se muestra en las figuras 17, 18 y 19. Los cálculos respectivos se encuentran en el Anexo A - Cuadro 1-9.

Figura 17. Curva DTR del primer ensayo de trazadores en la planta piloto.

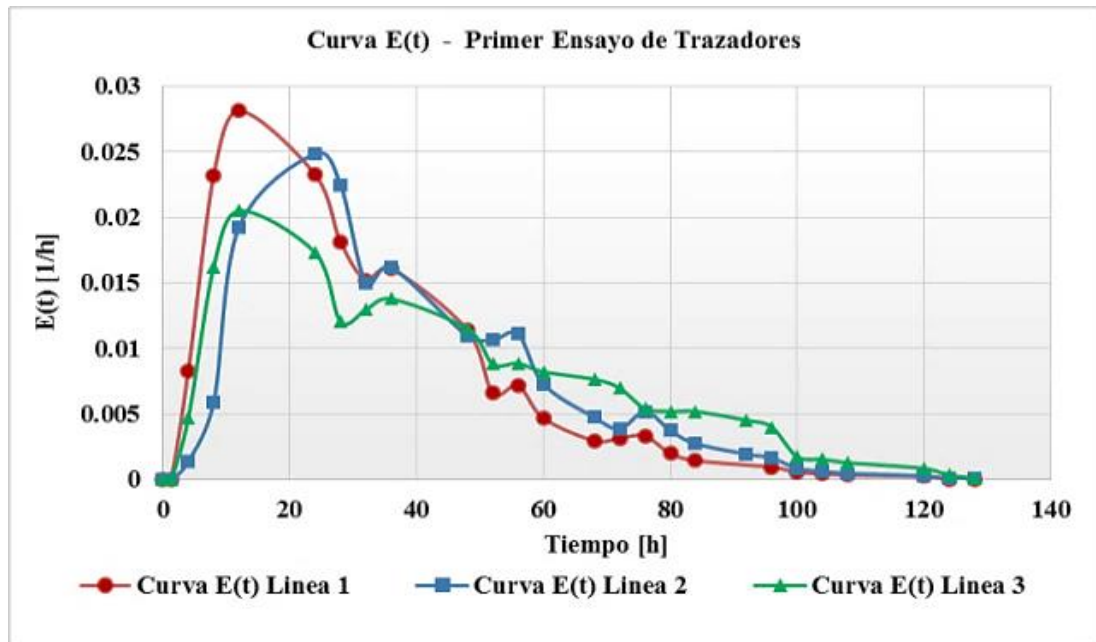


Figura 18. Curva DTR del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto.

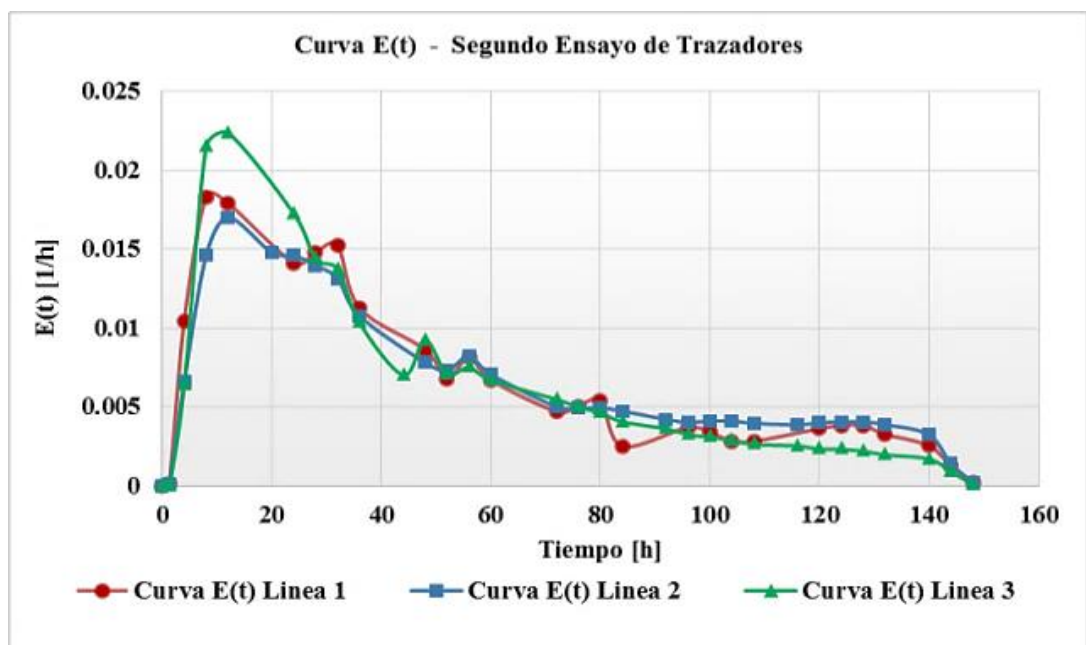
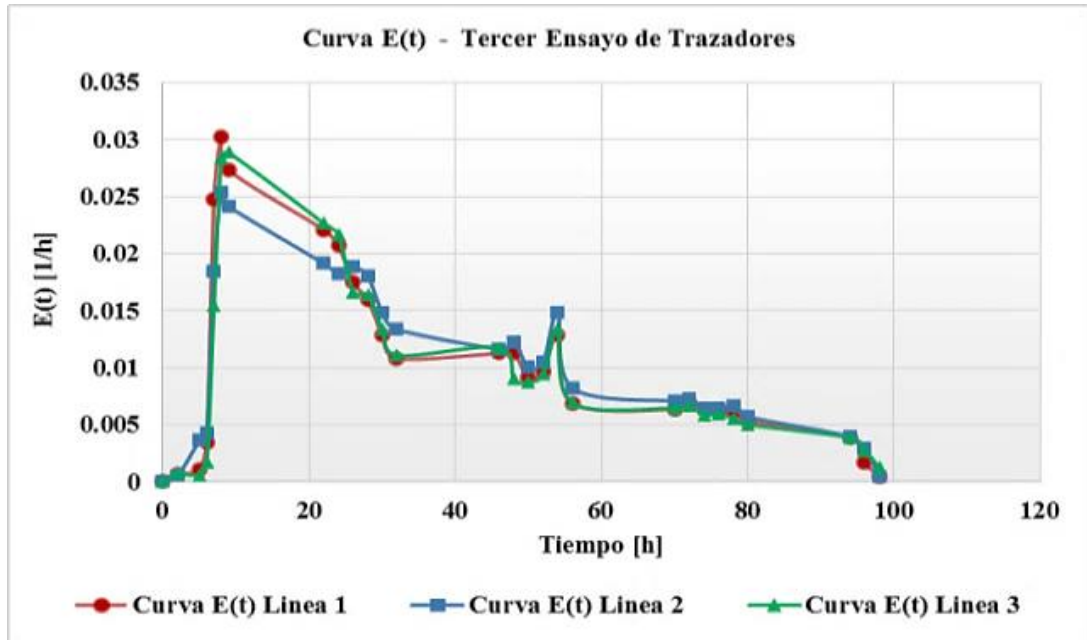


Figura 19. Curva DTR del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto.



En términos generales, las DTR de cada uno de los ensayos presentaron una clara similitud con tendencia hacia la forma de campana Gaussiana asimétrica que remata en una cola alargada, fenómeno observado por otros investigadores en ensayos de trazadores adelantados en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. La presencia de estas colas que se alargan y desplazan hacia la derecha puede deberse a la presencia de zonas muertas o estancamientos, o eventualmente retroflujos [11] [22]. Los elementos de fluido que han sido atrapados en esta zona tienen tiempos de residencia mayores, presentando una cola en la región posterior al tiempo medio de residencia como se refleja en la DTR [23].

Otra característica que se observa en las gráficas es la rapidez en la que aparece el trazador por primera vez en el efluente [t_i] y el punto en el que se registra la

máxima concentración [t_p], respecto del tiempo teórico de retención [τ], esto podría deberse a que una porción del fluido se mueve a través de canalizaciones formadas al interior del medio de soporte [22].

En la Tabla 2 se indican los tiempos de retención hidráulicos reales en días [d] para cada línea de tratamiento del sistema, calculados a partir de la ecuación 2. Los cálculos se encuentran en el Anexo A - Cuadro 1-9.

En todos los ensayos se destaca que los tiempos de retención hidráulicos reales (τ_R) son mayores al tiempo de retención teórico ($\tau = 1$ día), para el primer ensayo se observa un aumento moderado puesto que el sistema estaba sin vegetación y con agua potable, mientras que en el segundo el tiempo de retención llegó a duplicarse en comparación al teórico lo que podría atribuirse a la disminución de la porosidad del medio a causa del crecimiento de los rizomas y raíces de las plantas, así como de la biopelícula. Lo que generaría que se formasen zonas dentro del medio de soporte donde el trazador es retenido, principalmente en el fondo del primer reactor de cada línea de tratamiento. Esto se puede evidenciar claramente en el porcentaje de trazador recuperado del sistema que varió en un rango entre 53 - 75 % como se muestra en la tabla 2. Estas pérdidas de trazador se pueden atribuir principalmente a que se puede tener una absorción del trazador por parte del medio vegetal o un estancamiento del trazador en alguna zona del humedal como se explicó anteriormente [23].

Esto explicaría las prolongadas colas descendentes en las curvas DTR. Este comportamiento ha sido observado en muchos estudios de trazadores realizados en HA lo que se traduce en curvas de DTR con tiempos de retención hidráulicos reales tres o más veces mayores al tiempo de retención hidráulico teórico [22]. El

tiempo de retención hidráulico real para el tercer ensayo disminuyó en comparación al segundo ensayo, esto podría deberse a las modificaciones realizadas al sistema, como el cambio de alimentación con tubería y la disminución de la altura del bafle, ya que era de esperarse un mayor tiempo de retención debido al aumento de carga orgánica de 500 [$mg\ DBO_5/lt$] y por tanto de la biopelícula.

3.1.1 Índices de eficiencia hidráulica e índice de Morril

En la Tabla 2 se encuentran los índices de eficiencia hidráulica y de Morril para cada ensayo, obtenidos aplicando la metodología descrita en el capítulo 1.2.2.2 y 1.2.2.3, los cuales muestran que la distribución del flujo dentro del reactor no es uniforme, hay acumulaciones indeseadas de trazador y predominio de flujo pistón en cada línea de tratamiento. Las gráficas de tiempo vs porcentaje de trazador que pasa, que permiten calcular el índice de Morril se pueden evidenciar en el Anexo B - Gráfica 1-9.

El volumen útil calculado a partir de los tiempos de retención reales da como resultado valores superiores al volumen total del humedal (200 L), lo que se debe a acumulación de trazador en el fondo del reactor 1 de cada línea de tratamiento, y por ende un aumento considerable en los τ_R [8]. Por esta razón, no es preciso determinar este parámetro a partir de ensayos de trazadores.

3.1.2 Patrón real de flujo en la planta piloto

Los resultados de la aplicación de esta metodología se muestran en la Tabla 2 y los respectivos cálculos en el Anexo C - Cuadro 10-18 y Gráfica 10-18. Se puede visualizar que en general todas las líneas de tratamiento presentan un régimen hidráulico de flujo dual: flujo a pistón y mezcla completa con un predominio mayormente del primero, lo que coincide con los análisis realizados anteriormente con la DTR y los índices de eficiencia hidráulica. Por otra parte indica que no existe presencia de zonas muertas en ningún humedal, pero no obstante a partir de las curvas DTR y las pruebas de visualización se logró evidenciar la presencia de una zona de estancamiento principalmente en el fondo del primer reactor de las líneas de tratamiento, esta inconsistencia se puede atribuir a que esta metodología es muy subjetiva al momento de trazar la línea tangente en el punto donde la curva $1 - F(t)$ cambia a comportamiento lineal.

Tabla 2. Resultados del estudio hidrodinámico a partir de trazadores en la planta piloto.

ENSAYOS DE TRAZADORES EN LOS HUMEDALES ARTIFICIALES (PLANTA PILOTO)														
N° de Ensayo	Línea de Tratamiento	Metodología de Wolf-Resnick					Indicadores de Modelación		Indicadores de Eficiencia			Indicadores Complementarios		
		θ	α	Porcentaje de Flujo Pistón (P)	Porcentaje de Flujo Mezclado (M)	Porcentaje de Zonas Muertas (m)	Módulo de Dispersión $\left(\frac{D}{uL}\right)$	Número de Tanques en Serie (N)	Tiempo de Retención Hidráulico real [d]	Eficiencia Hidráulica Thackston (λ_t)	Eficiencia Hidráulica Persson (λ_p)	Índice de Morril (IM)	Volumen Útil [L]	Porcentaje de Trazador Recuperado
1	Línea 1	1.42	36.9	70.95	29.05	0.00	0.35	2.14	1.36	1.36	0.50	0.10	255.22	72.69
	Línea 2	1.8	37.9	76.33	23.67	0.00	0.24	2.99	1.61	1.61	1.00	0.14	302.54	71.58
	Línea 3	2.5	46.2	85.71	14.29	0.00	0.44	2.07	1.81	1.81	0.50	0.09	340.33	74.68
2	Línea 1	3.17	32.3	82.14	17.86	0.00	0.64	1.49	2.14	2.14	0.33	0.05	401.65	62.83
	Línea 2	3	28.6	79.00	21.00	0.00	0.58	1.69	2.26	2.26	0.50	0.07	425.27	49.55
	Línea 3	3	35.2	82.96	17.04	0.00	0.59	1.67	1.93	1.93	0.50	0.06	362.94	61.18
3	Línea 1	1.17	28.6	59.41	40.59	0.00	0.47	2.00	1.67	1.67	0.33	0.10	314.24	71.45
	Línea 2	1.25	29.2	61.60	38.40	0.00	0.45	1.79	1.74	1.74	0.33	0.10	326.64	53.52
	Línea 3	1.29	29.7	62.92	37.08	0.00	0.44	2.04	1.69	1.69	0.38	0.10	317.07	66.53

3.1.3 Modelación hidrodinámica en la planta piloto

En la Tabla 2 se encuentran los índices de modelación de FPD y TS. El valor hallado para el módulo de dispersión D/vL en todos los ensayos, se ajusta de forma correcta al modelo de flujo pistón con dispersión por tener valores inferiores a 1. Mediante los valores de dispersión obtenidos se puede sustentar el por qué las curvas DTR para todos los ensayos son de forma asimétrica, debido a que son valores superiores a 0,01. Con valores inferiores a 0,01 es de esperarse que sea una curva con una forma de campana definida y simétrica [23] (Figura 3).

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 [8]. Estudiando los valores de la Tabla 2 y los rangos mencionados en el capítulo 1.2.3.1 se observó que las líneas de tratamiento aun en el rango de flujo pistón, presentan dispersión elevada y más evidente a medida que se aumenta la carga orgánica en el sistema, lo que confirma la presencia combinada de flujo pistón y mezcla completa [24]. Esta dispersión también es producto de la disposición aleatoria del MSP, el crecimiento de los rizomas y raíces de las plantas, así como de la biopelícula [25]. Puesto que el conjunto de estos factores ocasionan obstrucción en el paso normal del flujo, desencadenan la dispersión del mismo, y por consiguiente la presencia de zonas de flujo mezclado.

El número de tanques en serie (N) se muestra en la Tabla 2, este parámetro nos indica que las líneas de tratamiento presentan un comportamiento con tendencia a

2 reactores completamente mezclados en serie aproximadamente, en todos los ensayos realizados.

Si el número de tanques es grande, el flujo será más aproximado a un flujo pistón. Por el contrario, si el número de tanques es pequeño, la respuesta se aparta considerablemente de dicho flujo y se inclina más hacia mezcla completa [12] [11]. En este estudio los valores de (N) fueron pequeños, lo que confirma que en algunas zonas del sistema existe la presencia de flujo en mezcla completa.

Con el fin de determinar o confirmar el patrón real de flujo se realizó la modelación hidrodinámica en la cual se compararon las curvas experimentales $E(\theta)$ obtenidas en cada uno de los ensayos y las curvas $E(\theta)$ teóricas calculadas por los modelos matemáticos FPD y TS (Figuras 20 a 28). Previamente se aplicó el método de ajuste por mínimos cuadrados con el fin de minimizar el error existente entre los datos de la función $E(\theta)$ experimental y teórica. En las gráficas se puede observar que los dos modelos se ajustan en gran manera a la curva $E(\theta)$ experimental, ratificando la presencia de flujo pistón y mezcla completa. Sin embargo el modelo FPD se ajusta mayormente a la descripción del comportamiento hidráulico real de las líneas tratamiento, lo que confirma el predominio de este flujo en el sistema. Esto se puede evidenciar del análisis de la sumatoria de los cuadrados de los residuos E_i^2 , si este valor es más cercano a cero mayor ajuste tendrán la curva experimental con la teórica.

Figura 20. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).

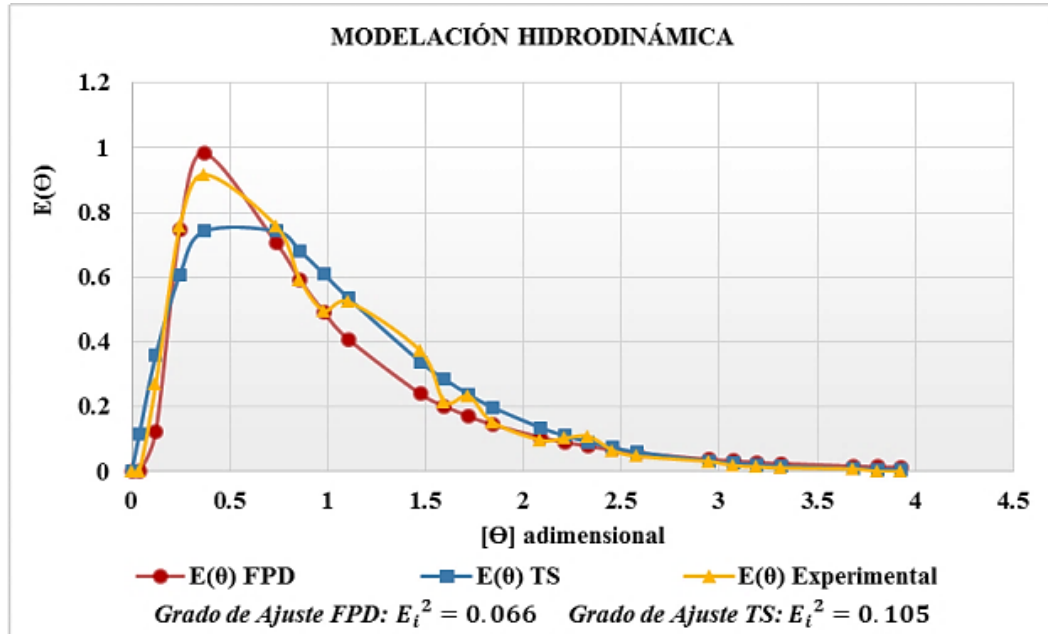


Figura 21. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).

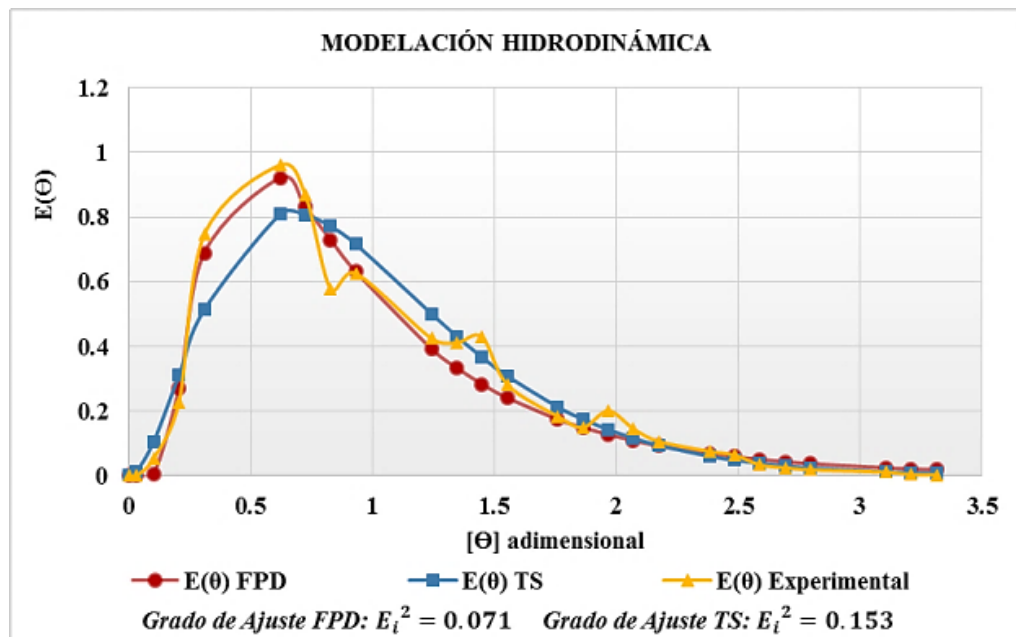


Figura 22. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del primer ensayo de trazadores (planta piloto).

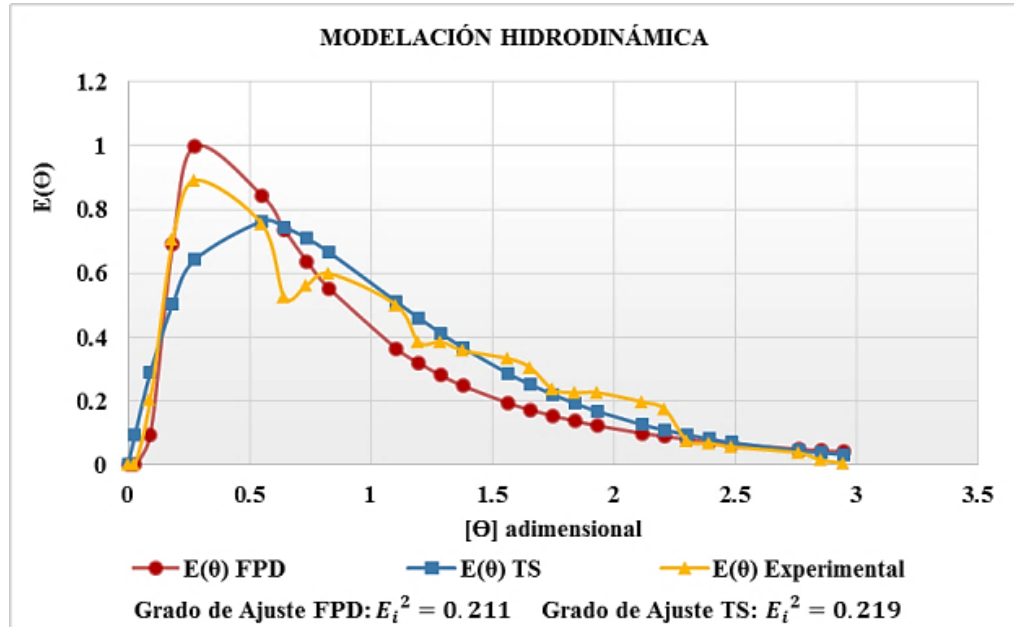


Figura 23. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).

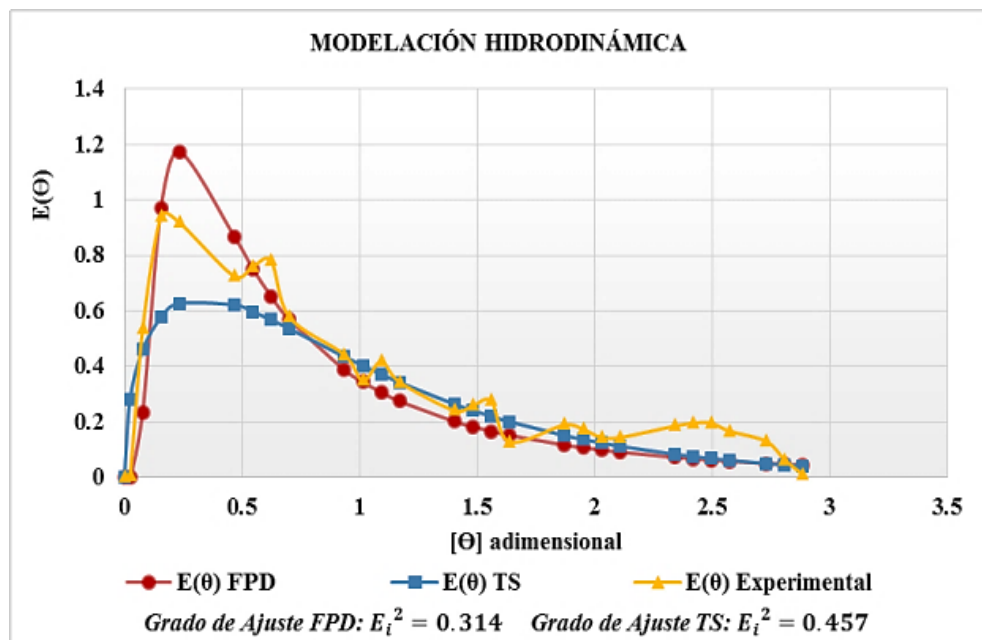


Figura 24. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).

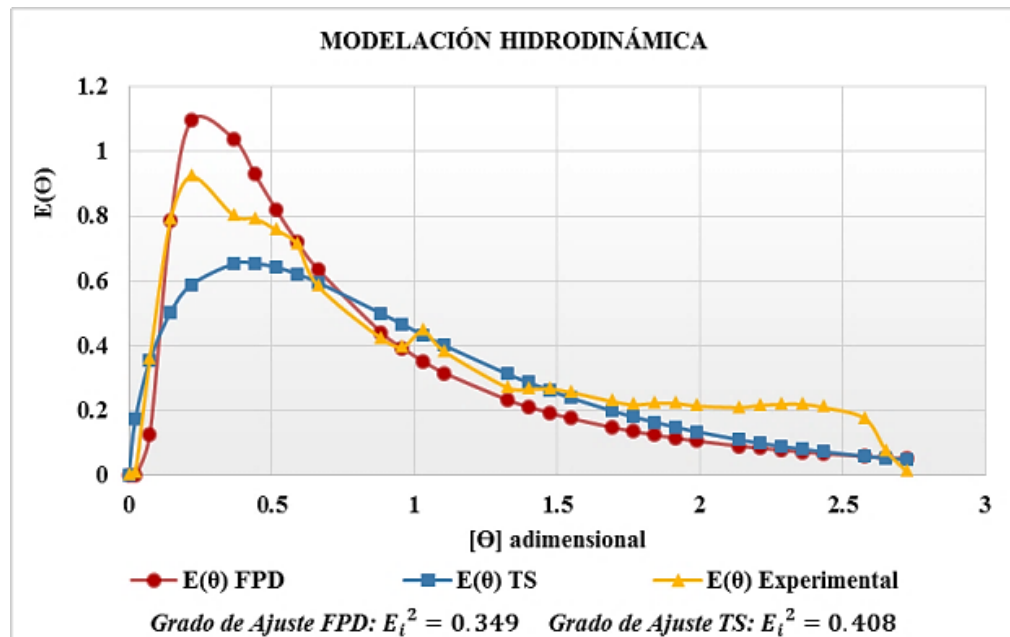


Figura 25. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del segundo ensayo de trazadores (planta piloto).

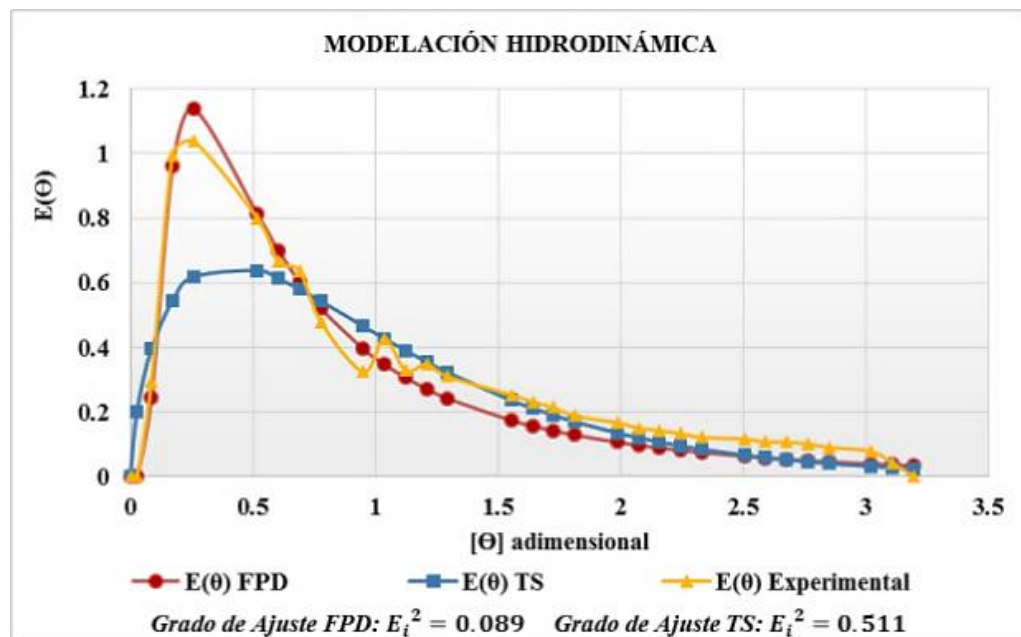


Figura 26. Modelación hidrodinámica de la línea 1 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).

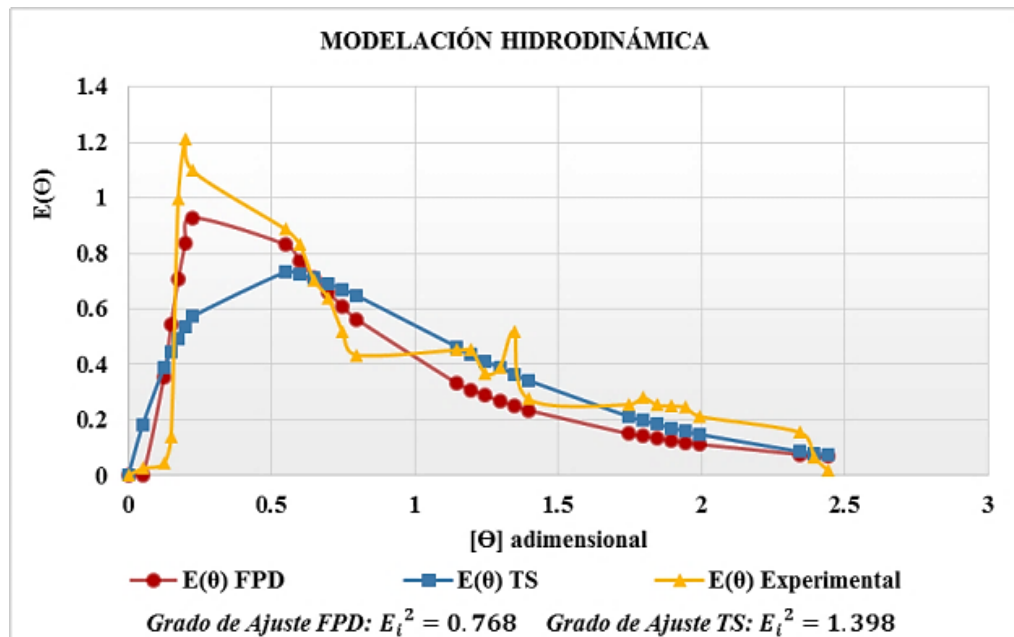


Figura 27. Modelación hidrodinámica de la línea 2 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).

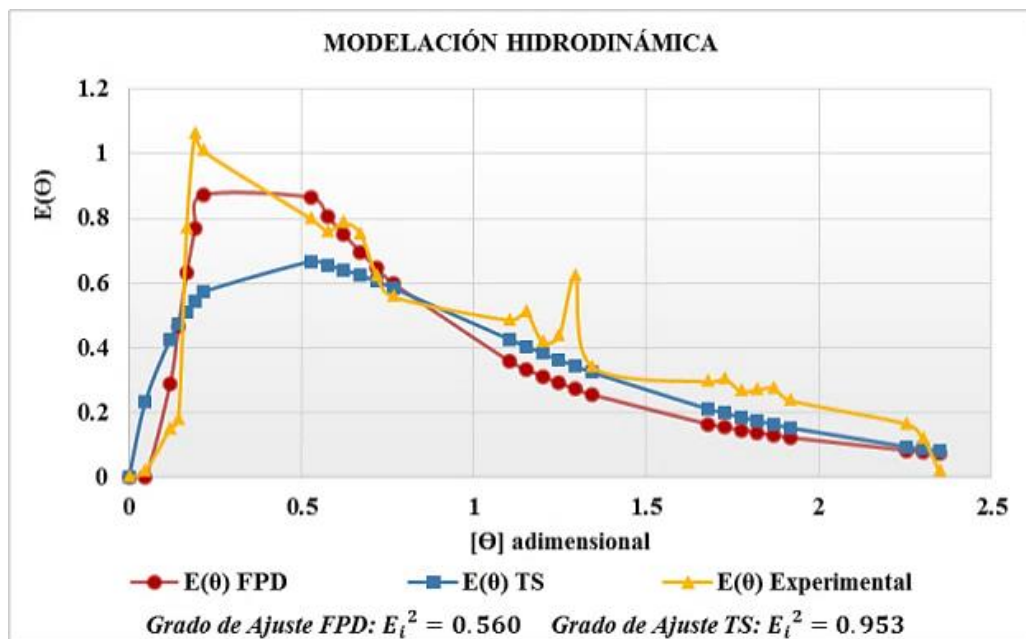
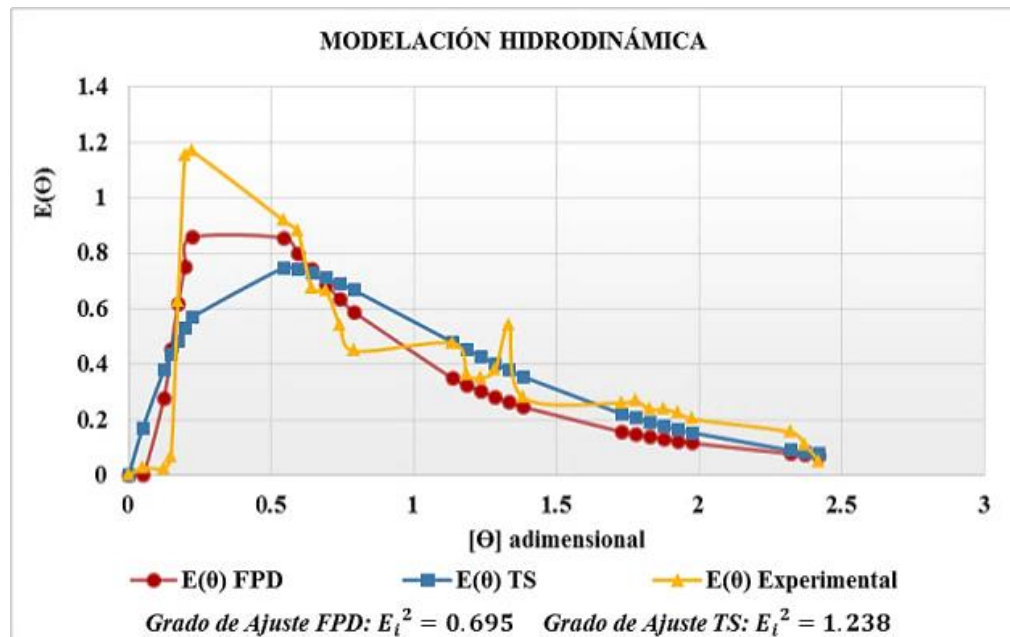


Figura 28. Modelación hidrodinámica de la línea 3 del tercer ensayo de trazadores (planta piloto).



El análisis estadístico de la varianza con un factor (ANOVA) no mostró diferencias estadísticas significativas entre los valores de las curvas DTR experimentales de las tres líneas de tratamiento de los humedales artificiales, esta tendencia se evidenció en cada uno de los ensayos.

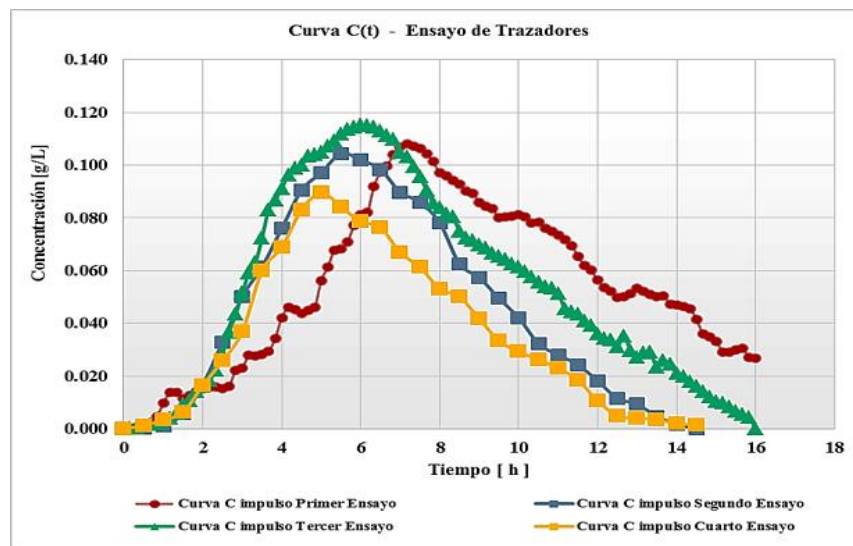
3.2 Comportamiento hidráulico en el montaje experimental a escala laboratorio

Generalmente, la forma que toma la curva $C_{impulso}$ da una primera indicación del comportamiento hidráulico en el reactor. En la figura 29 se muestran las curvas que describen la variación de concentración del trazador en función del tiempo obtenidas

en los ensayos de trazadores realizados en el montaje experimental a escala laboratorio.

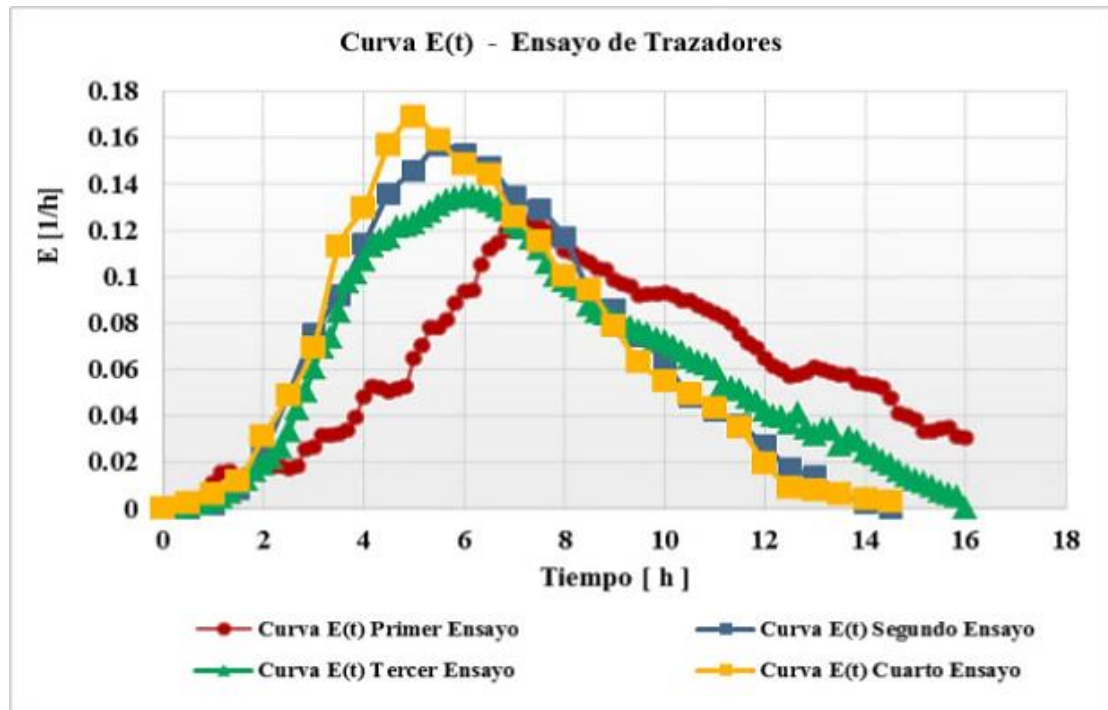
Se puede observar como la concentración de trazador crece a medida que pasa el tiempo, hasta alcanzar un valor máximo y luego comienza a decrecer paulatinamente. Las curvas del segundo y cuarto ensayo que se realizaron con flujo intermitente presentan cierta similitud, en ellas se observa cierta simetría aunque el pico de máxima concentración de trazador se da antes de cumplirse el tiempo de retención teórico, lo que indica posible presencia de canalizaciones del flujo y regiones estancadas en el reactor [11]. Por otra parte la curva del tercer ensayo presentó un mejor desempeño ya que el pico de máxima concentración de trazador se dio alrededor de las 6 horas que era el tiempo de retención teórico, pero no se visualiza simetría. Por último la gráfica del primer ensayo muestra que el trazador aparece después del tiempo esperado lo cual indica posibles retenciones de trazador en algunas zonas del reactor [11].

Figura 29. Curvas $C_{impulso}$ de los ensayos de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



En la figura 30 se visualizan las curvas DTR para cada uno de los ensayos de trazadores. Los cálculos respectivos se encuentran en el Anexo D - Cuadro 19-22. Se observa que las curvas DTR de cada uno de los ensayos presentaron una clara similitud con tendencia hacia la forma de campana Gaussiana simétrica pero con ciertas desviaciones en algunas de ellas. La DTR que presentó mejor comportamiento fue la obtenida del tercer ensayo ya que se observa que el pico de máxima concentración de trazador aparece aproximadamente en el tiempo esperado (tiempo de retención teórico) lo que indica presencia de un flujo con pocas desviaciones, lo que genera una primera presunción de que el medio de soporte ordenado mejora el comportamiento hidráulico del sistema. A diferencia de las curvas del primer y cuarto ensayo en las que se observa que el trazador aparece antes y después del tiempo esperado respectivamente, indicando problemas hidráulicos como los mencionados anteriormente a partir de la curva $C_{impulso}$.

Figura 30. Curvas DTR de los ensayos de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



En la Tabla 3 se observa que los tiempos de retención hidráulicos reales (τ_R) son mayores al tiempo de retención teórico ($\tau = 6 \text{ horas}$), esta tendencia se observó en todos los ensayos, lo que podría atribuirse a retenciones indeseadas de trazador en algunas regiones del reactor. Lo anterior se puede evidenciar en el porcentaje de trazador recuperado que osciló entre 65-90%. Por otra parte se observa que los ensayos con flujo intermitente presentaron menores tiempos de retención en comparación con los de flujo continuo, a su vez los ensayos con medio de soporte ordenado presentaron una gran diferencia significativa en comparación con el MSP aleatorio. Los cálculos respectivos para obtener los τ_R se encuentran en el Anexo D - Cuadro 19-22.

A partir de los índices de eficiencia hidráulica y Morril se evidenció que la distribución del flujo dentro del reactor no es uniforme, hay acumulaciones indeseadas de trazador y predominio de flujo pistón en cada uno de los ensayos (ver Tabla 3). Las gráficas respectivas para el cálculo del índice de Morril se observan en el Anexo E - Gráfica 19-22.

El volumen útil calculado a partir de los tiempos de retención reales varió en un rango entre 50-70 litros, mostrando valores superiores al volumen total del reactor (52.5 L), lo que se debe a posibles acumulación de trazador en el fondo, y por ende un aumento considerable en los τ_R [8].

Según la metodología de Wolf-Resnick se determinó que todos los ensayos presentan un régimen hidráulico de flujo dual: flujo a pistón y mezcla completa, con predominio del primero. Esta metodología indica ausencias de zonas muertas en el reactor para todos los ensayos, pero se presenta la misma inconsistencia descrita anteriormente en los ensayos en la planta piloto, puesto que se visualiza una zona

de estancamiento del trazador en el fondo del reactor. Los resultados de la aplicación de esta metodología se observan en la tabla 3 y los respectivos cálculos en el Anexo F - Cuadro 23-26 y Gráfica 23-26.

Tabla 3. Resultados del estudio hidrodinámico a partir de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYOS DE TRAZADORES EN EL REACTOR A ESCALA LABORATORIO													
N° de Ensayo	Metodología de Wolf-Resnick					Indicadores de Modelación		Indicadores de Eficiencia			Indicadores Complementarios		
	θ	α	Porcentaje de Flujo Pistón (P)	Porcentaje de Flujo Mezclado (M)	Porcentaje de Zonas Muertas (m)	Módulo de Dispersión $\left(\frac{D}{uL}\right)$	Número de Tanques en Serie (N)	Tiempo de Retención Hidráulico real [h]	Eficiencia Hidráulica Thackston (λ_t)	Eficiencia Hidráulica Persson (λ_p)	Índice de Morril (IM)	Volumen Útil (L)	Porcentaje de Trazador Recuperado
1	1.81	64.71	89.78	10.22	0.00	0.12	7.07	8.86	1.48	1.19	0.33	69.39	89.46
2	1.29	67.36	87.68	12.32	0.00	0.11	3.13	6.64	1.11	0.92	0.32	52.02	69.33
3	1.83	72.98	93.23	6.77	0.00	0.11	3.11	7.37	1.23	1.03	0.30	57.76	89.92
4	1.27	67.36	87.51	12.49	0.00	0.09	3.14	6.41	1.07	0.83	0.32	50.23	65.73

3.2.1 Modelación hidrodinámica en el montaje a escala laboratorio

El módulo de dispersión D/vL , en todos los ensayos tomó valores menores a la unidad, lo cual indica que el comportamiento hidráulico del reactor se ajusta de forma adecuada al modelo de flujo pistón con dispersión. Se observa que los ensayos aún en el rango de flujo pistón, presentan dispersión elevada y más evidente en los ensayos con medio de soporte aleatorio, esto es debido a que el MSP no está ubicado de una forma ordenada lo que podría generar zonas en las que el medio obstaculiza el paso uniforme del flujo ocasionando de esta forma la dispersión del mismo. A diferencia de los ensayos llevados a cabo con MSP ordenado los cuales presentaron un menor grado de dispersión.

Se puede observar en la Tabla 3 que el valor del número de tanques en serie (N) fue pequeño para todos los ensayos, lo que confirma que en algunas zonas del reactor existe la presencia de flujo en mezcla completa.

A partir de la modelación hidrodinámica (Fig. 31-34) se pudo evidenciar que los dos modelos se ajustan adecuadamente a la curva $E(\theta)$ experimental, ratificando la presencia de flujo pistón y mezcla completa. Sin embargo según el grado de ajuste, el modelo FPD se asemeja a la descripción del comportamiento hidráulico real del reactor en todos los ensayos, lo que confirma el predominio de este tipo de flujo y a su vez lo predicho por la metodología de Wolf-Resnick.

A partir del análisis estadístico (ANOVA) se evidenció que existen diferencias estadísticas significativas entre los valores de las curvas DTR experimentales del

primer y tercer ensayo, los cuales se llevaron a cabo con flujo continuo y MSP aleatorio y ordenado respectivamente.

Figura 31. Modelación hidrodinámica del primer ensayo de trazadores.

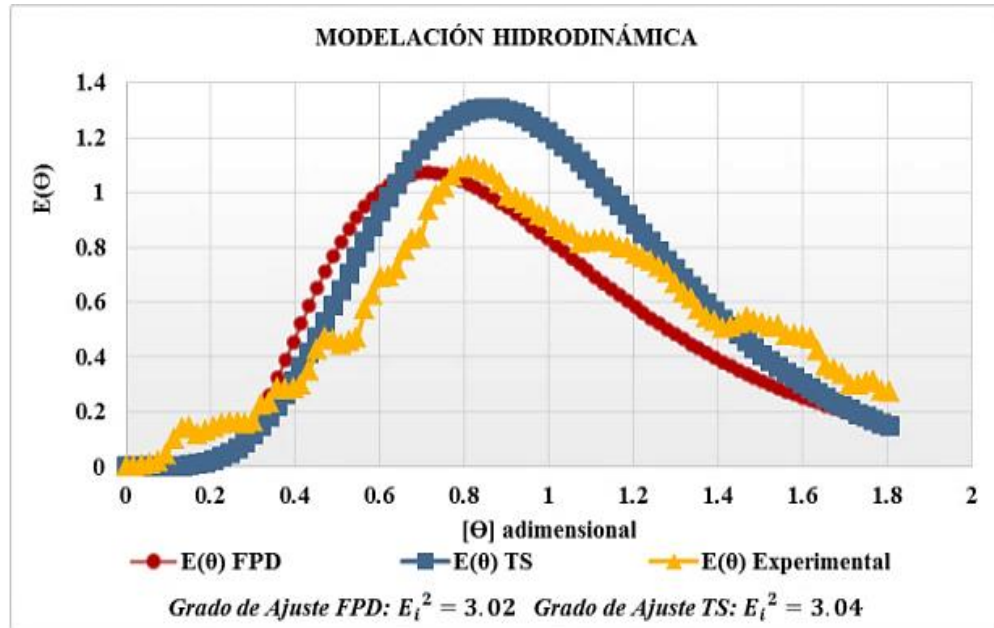


Figura 32. Modelación hidrodinámica del segundo ensayo de trazadores.

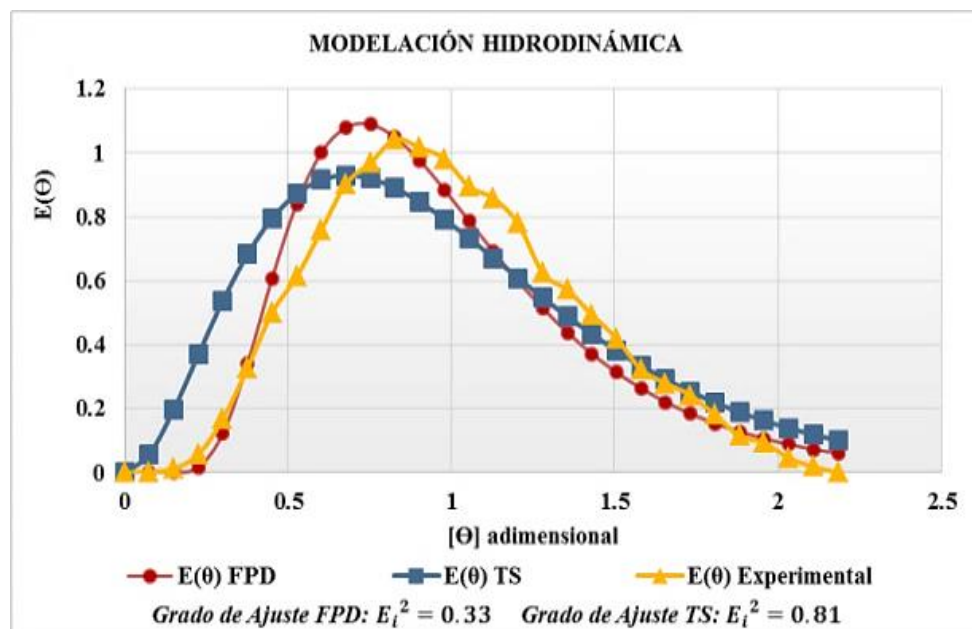


Figura 33. Modelación hidrodinámica del tercer ensayo de trazadores.

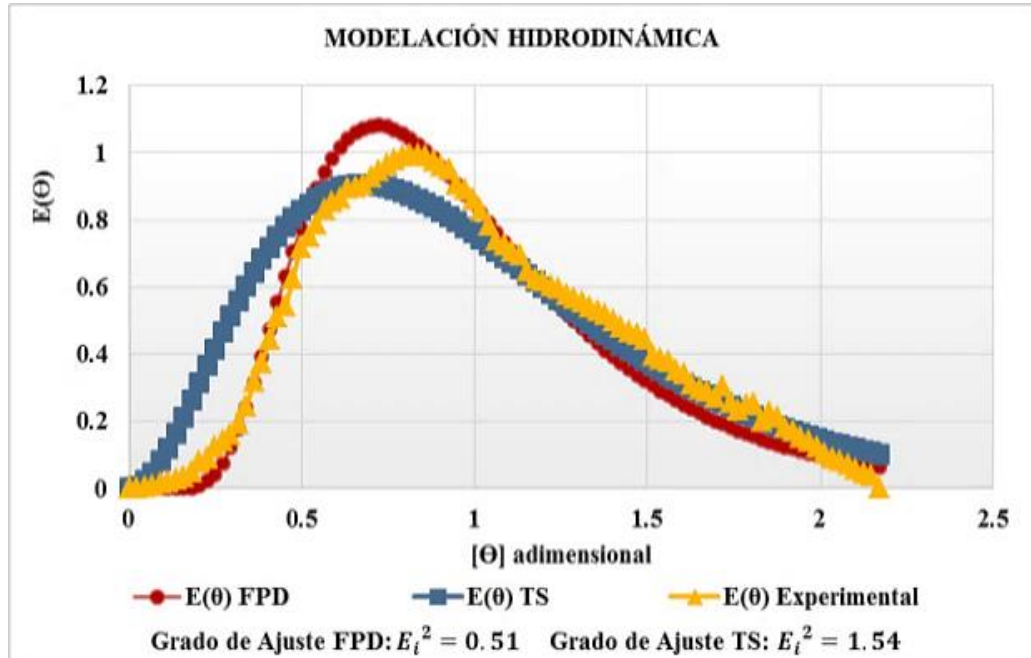
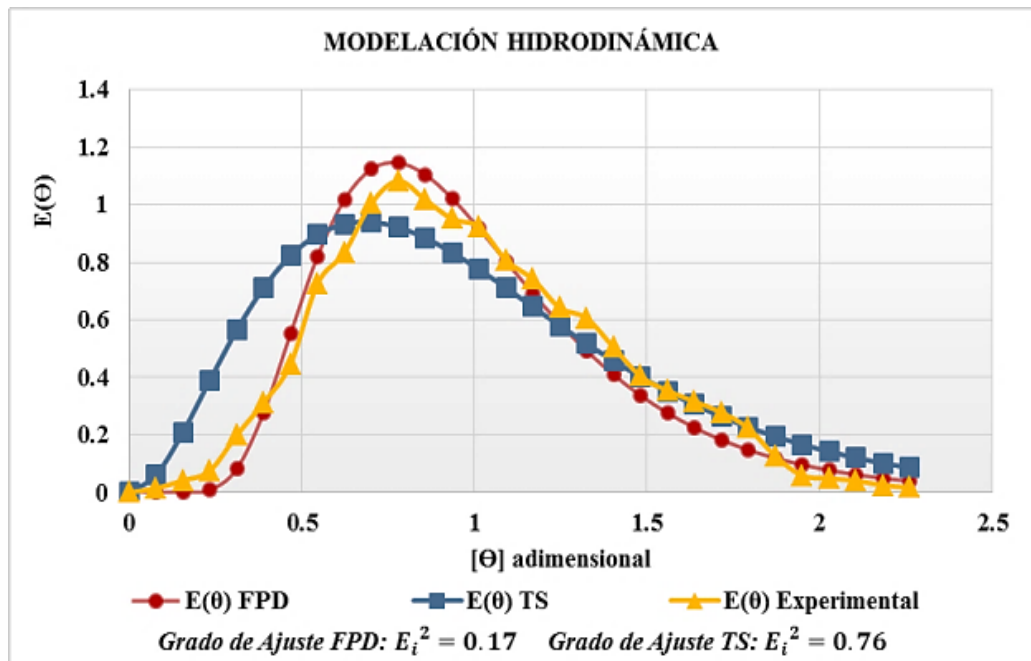


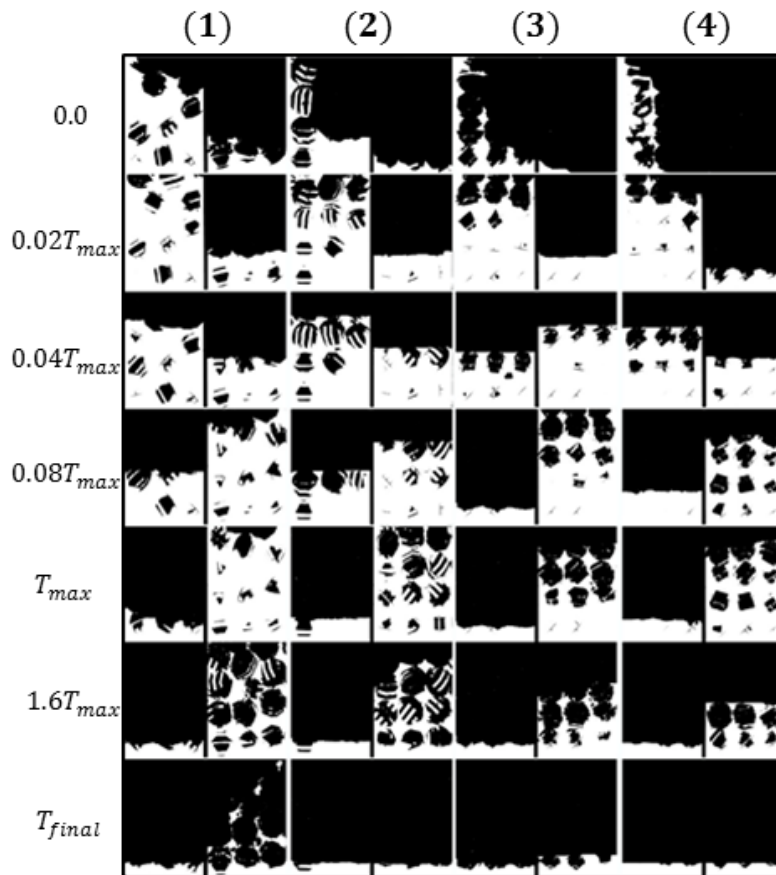
Figura 34. Modelación hidrodinámica del cuarto ensayo de trazadores.



3.2.2 Pruebas de visualización

En la figura 35 se muestran las imágenes procesadas y ordenadas en orden descendente de cuatro ensayos de visualización llevados a cabo en el reactor a escala laboratorio. El color blanco en las imágenes indica el paso del colorante en el sistema y el negro obedece al resto del reactor.

Figura 35. Pruebas de visualización con colorante. (1) F. Continuo y MSP aleatorio, (2) F. Intermitente y MSP aleatorio, (3) F. Continuo y MSP ordenado, (4) F. Intermitente y MSP ordenado.



Se puede observar que con el MSP ordenado el medio permitía un flujo en forma de flujo pistón. Sin embargo debido a la configuración del sistema hay un punto alrededor de $0.08T_{max}$ en el que el paso del colorante se detiene y la mezcla en el reactor se hace evidente. El trazador empieza a salir de forma diluida hasta que queda cierta cantidad en el fondo del reactor a una altura similar a la de la pantalla (baffle), evidenciando la retención del trazador similar a la que se presumía en el sistema a escala piloto.

No se evidencia la presencia de zonas muertas ya que el colorante llega a cada parte del reactor. Sin embargo, se logra observar en la primera imagen de los cuatro ensayos que el colorante desciende perpendicular al vertedero hasta el fondo del reactor generando una región en la parte superior sin presencia del trazador en los primeros minutos de cada ensayo hasta que se mezclaba completamente en toda la zona como se logra evidenciar en la segunda imagen. Por otra parte se presenta una zona de estancamiento de trazador en el fondo del reactor, este fenómeno se observó en todos los ensayos.

La salida del trazador del sistema se hace de forma diluida, esto quiere decir que a medida que transcurría el tiempo la tonalidad del color iba disminuyendo paulatinamente. Se evidenció que la salida de los dos trazadores fue simultánea, ya que estaban mezclados y las muestras con bajas conductividades contenían poco colorante mientras que las muestras con conductividades altas mostraban un mayor grado de color.

4. CONCLUSIONES

- En términos generales las curvas DTR se asemejan a las encontradas en estudios llevados a cabo en humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial, donde se determinó un comportamiento de predominio de flujo pistón con gran dispersión.
- Los estudios hidrodinámicos de esta investigación indican que cada línea de tratamiento del sistema además de presentar un régimen de flujo dual (pistón y mezcla completa con predominio del primero pero con alta dispersión), hay presencia de zonas de recirculación interna (cortos circuitos) y zonas de estancamiento en el fondo del primer reactor.
- Con el aumento de la carga orgánica al sistema se presenta mayor grado de dispersión del flujo y tiempos de retención reales mayores al tiempo de retención teórico. Esto debido a la disposición aleatoria del MSP en el HAAT, la disminución de la porosidad del medio a causa del crecimiento de los rizomas y raíces de las plantas, así como de la biopelícula. Dando origen a zonas dentro del medio de soporte donde el trazador es retenido, principalmente en el fondo del primer reactor de cada línea de tratamiento.
- Los volúmenes útiles calculados son superiores al volumen real de los reactores (200lt), debido a que los tiempos de retención reales obtenidos en todas las líneas de tratamiento son mayores al tiempo de retención teórico, producto de retenciones indeseadas de trazador en el reactor 1. Por esta razón, no es preciso ni confiable determinar este parámetro a partir de ensayos de trazadores.

- La configuración aleatoria del MSP influye negativamente en la hidráulica del sistema, puesto que en algunas regiones del HA se obstaculiza el paso libre del flujo provocando la dispersión del mismo, dando como resultado la formación de zonas de flujo en mezcla completa.
- El tipo de alimentación con flujo intermitente es el que presenta mejores resultados en el comportamiento hidráulico de los humedales.

5. RECOMENDACIONES

- Al aplicar pruebas de trazadores con NaCl es conveniente monitorear la conductividad dentro de los reactores a diferentes profundidades, de esta forma se pueden encontrar zonas con concentraciones altas de trazador y monitorearlas de forma constante para evaluar si obedecen a zonas de estancamiento.
- Las pruebas de colorante a escala de laboratorio fueron concluyentes a la hora de verificar la hidráulica de los HA. Es un método visual e interactivo que permite evaluar el funcionamiento de la hidráulica del sistema y es susceptible a modificaciones que luego se puedan implementar en los sistemas a escala real para mejorar la hidráulica.
- Al establecer la clara ventaja de utilizar el medio de soporte ordenado es recomendable en el proceso de fabricación acoplarlos en bloques modulares, de tal forma que para futuras implementaciones de este medio de soporte sea fácil de acoplar tal como si fuesen fichas de lego y de esta manera garantizar el predominio de flujo pistón que es lo adecuado para estos tipos de humedales.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] CASTELLANOS, Francy Milena y JAIMES, Yurley Patricia; Evaluación técnica y ambiental de la aplicación de humedales construidos de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales en Santander. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2013.

[2] COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 0631 (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1993.62 p.

[3] VILLAREAL, German y ZAFRA, Carlos. Tratamiento de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de Postgrado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2003.

[4] SANCHEZ MOLINA, Joany. Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Maestría Ingeniero Recursos Hidráulicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2010.

[5] GARCÍA, Joan y CORZO, Angelica. Depuración con humedales construidos, Guía práctica de diseño, construcción y explotación de sistemas de humedales de flujo subsuperficial. Barcelona Dpto. de Ing. Hidráulica, Marítima y Ambiental: Universidad Politécnica de Cataluña, 2008.

[6] ESPINOZA ORTIZ, Camilo. Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. Tesis de Maestría Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014.

[7] CORZO, Angelica., y SANABRIA, Otoniel. Modelo de utilidad: Portador para el crecimiento bacteriano en reactores biológicos de cultivos fijo de configuración poliédrica-rombocuboctaedro. Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Clasificación IPC: C 02F 3/10, 3/02; B 01 J 19/30. Resolución 37697, 16 de junio, 2016.

[8] BOLIVAR MUÑOZ, Vanessa Nicole y CARRILLO PEDRAZA, Edwin Arturo. Depuración de aguas residuales de alta carga orgánica mediante humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. Estudio de la línea base hidráulica. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2015.

[9] SABAS RAMÍREZ, Carlos. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. Tesis de Maestría Ecotecnólogo. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales, 2011.

[10] 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.

[11] LEVENSPIEL, Octave. Ingeniería de las reacciones químicas, 3 ed. México: Limusa Wiley, 2004, p. 257-292.

[12] ARROYAVE, Diana; GONZÁLEZ, Maribel y GALLEGO, Darío. Evaluación del comportamiento hidráulico un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Pregrado Ingeniero Civil. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin. Facultad de Minas, 2004.

[13] CANO Castillo, Luz. Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio. Tesis de Pregrado Tecnólogo Químico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología, 2010.

[14] HERNÁNDEZ RAMÍREZ, Erik Fernando. Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”. Tesis de Pregrado. Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2003.

[15] PÉREZ, Jhonny; ALDANA, Gerardo y ARGUELLO, Gabriel; “Modelo de Dispersión Axial para Sistemas de Flujo Continuo Ajustado a las Condiciones de Borde”. *Centro de Informacion Tecnologica*, 2016, vol. 27, fasc. 1, pp. 169-180.

[16] RINCÓN, Nancy; GALINDO, Andres y PÉREZ, Jhonny; “Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor anaerobio de doble cámara (RADCA)”. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 2001, N.º 61, pp. 53-63.

[17] CORZO, Angelica., y SANABRIA, Otoniel. Viabilidad del uso de Medios de Soporte Plástico (MSP) en Humedales Artificiales de Alta Tasa (HAAT) para la depuración de efluentes industriales. Propuesta de Tesis de Doctorado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2015.

[18] ICONTEC. Normas oficiales para la calidad del agua en Colombia. NTC 813. Bogotá: ICONTEC, 1994.

[19] IMAGE J. Image Processing and Analysis in Java [Software para procesamiento de imágenes]. Versión 1.4. Requerimientos del sistema: Windows bundled with 64-bit Java 1.6.0_24 (37MB), bundled with 32-bit Java 1.6.0_24 (44MB) or bundled with 64-bit Java 1.8.0_77 (70MB). Disponible para la descarga en <https://imagej.nih.gov/ij/>.

[20] RUI-HUA Niu, YU-HUI Wang, XIN-SHAN Song & WEI-DONG Liao; “Hydraulic performance evaluation on horizontal constructed wetland using tracer test”. *Environment, Energy and Sustainable Development*, 2014. pp. 271-273.

[21] DEVORE J. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, 7 ed. México: Cengage Learning, 2008, p. 742.

[22] SANDOVAL, J., y PEÑA, M. Análisis del desempeño de un humedal artificial de flujo sub-superficial en zonas tropicales basado en modelos hidráulicos y una cinética de primer orden. 1 ed. Cali, Colombia: LITOCENCOA, 2008, p. 96 – 110.

[23] GARCÍA, Diego; SOLARTE, Efraín; SANDOVAL, John; TORO, Andrés ASCUNTAR, Daniel y PEÑA, Miguel. “Caracterización de humedales artificiales por fluorescencia inducida por láser”. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* Universidad de Pamplona. 2011, vol. 9(1), pp. 77-82.

[24] PÉREZ, Andrea y TORRES, Patricia. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2008, N.º 45, pp. 27-40.

[25] FERRER, Gabriela; MORÁN, Claudia; ALDANA, Gerardo y PÉREZ, Jhonny; “Determinación del tiempo retención hidráulico en humedales construidos de flujo horizontal usando un trazador químico”. *Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia*. 2013, Vol. 36, N° 3, pp. 262-271.

BIBLIOGRAFÍA

ARROYAVE, Diana; GONZÁLEZ, Maribel y GALLEGO, Darío. Evaluación del comportamiento hidráulico un reactor UASB utilizado para el tratamiento de aguas residuales. Tesis de Pregrado Ingeniero Civil. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellin. Facultad de Minas, 2004.

BOLIVAR MUÑOZ, Vanessa Nicole y CARRILLO PEDRAZA, Edwin Arturo. Depuración de aguas residuales de alta carga orgánica mediante humedales artificiales de flujo horizontal subsuperficial. Estudio de la línea base hidráulica. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2015.

CANO Castillo, Luz. Influencia de la geometría, presencia de baffles y sustancias trazadoras, en la hidrodinámica de reactores a escala de laboratorio. Tesis de Pregrado Tecnólogo Químico. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Tecnología, 2010.

CASTELLANOS, Francy Milena y JAIMES, Yurley Patricia; Evaluación técnica y ambiental de la aplicación de humedales construidos de flujo subsuperficial para tratamiento de aguas residuales en Santander. Trabajo de grado Ingeniero Civil. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Civil, 2013.

COLOMBIA. MINISTERIO DE AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE. Resolución No. 0631 (17, marzo, 2015). Por la cual se establecen los parámetros y los valores máximos permisibles en los vertimientos puntuales a cuerpos de aguas superficiales y a los sistemas de alcantarillado público y se dictan otras disposiciones. Bogotá D.C.: El Ministerio, 1993.62 p.

CORZO, Angelica., y SANABRIA, Otoniel. Modelo de utilidad: Portador para el crecimiento bacteriano en reactores biológicos de cultivos fijo de configuración poliédrica-rombocuboctaedro. Superintendencia de Industria y Comercio de Colombia. Clasificación IPC: C 02F 3/10, 3/02; B 01 J 19/30. Resolución 37697, 16 de junio, 2016.

CORZO, Angelica., y SANABRIA, Otoniel. Viabilidad del uso de Medios de Soporte Plástico (MSP) en Humedales Artificiales de Alta Tasa (HAAT) para la depuración de efluentes industriales. Propuesta de Tesis de Doctorado. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Ingeniería, 2015.

DEVORE J. Probabilidad y Estadística para Ingeniería y Ciencias, 7 ed. México: Cengage Learning, 2008, p. 742.

ESPINOZA ORTIZ, Camilo. Factibilidad del diseño de un humedal de flujo subsuperficial para el tratamiento de aguas residuales municipales de 30.000 habitantes. Tesis de Maestría Ingeniero Civil. Bogotá D.C.: Escuela Colombiana de Ingeniería Julio Garavito, 2014.

FERRER, Gabriela; MORÁN, Claudia; ALDANA, Gerardo y PÉREZ, Jhonny; “Determinación del tiempo retención hidráulico en humedales construidos de flujo horizontal usando un trazador químico”. *Rev. Téc. Ing. Universidad del Zulia*. 2013, Vol. 36, Nº 3, pp. 262-271.

GARCÍA, Diego; SOLARTE, Efraín; SANDOVAL, John; TORO, Andrés ASCUNTAR, Daniel y PEÑA, Miguel. “Caracterización de humedales artificiales por fluorescencia inducida por láser”. *Revista de la Facultad de Ciencias Básicas* Universidad de Pamplona. 2011, vol. 9(1), pp. 77-82.

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

HERNÁNDEZ RAMÍREZ, Erik Fernando. Análisis por medio de ensayos del tiempo de retención y gradiente hidráulico del proceso de floculación de la planta de tratamiento de agua potable “Lo de Coy”. Tesis de Pregrado. Ciudad de Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala. Facultad de Ingeniería, 2003.

ICONTEC. Normas oficiales para la calidad del agua en Colombia. NTC 813. Bogotá: ICONTEC, 1994

IMAGE J. Image Processing and Analysis in Java [Software para procesamiento de imágenes]. Versión 1.4. Requerimientos del sistema: Windows bundled with 64-bit Java 1.6.0_24 (37MB), bundled with 32-bit Java 1.6.0_24 (44MB) or bundled

with 64-bit Java 1.8.0_77 (70MB). Disponible para la descarga en <https://imagej.nih.gov/ij/>.

LEVENSPIEL, Octave. Ingeniería de las reacciones químicas, 3 ed. México: Limusa Wiley, 2004, p. 257-292.

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.

PÉREZ, Andrea y TORRES, Patricia. Evaluación del comportamiento hidrodinámico como herramienta para optimización de reactores anaerobios de crecimiento en medio fijo. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*. 2008, N.º 45, pp. 27-40.

PÉREZ, Jhonny; ALDANA, Gerardo y ARGUELLO, Gabriel; “Modelo de Dispersión Axial para Sistemas de Flujo Continuo Ajustado a las Condiciones de Borde”. *Centro de Informacion Tecnologica*, 2016, vol. 27, fasc. 1, pp. 169-180.

RINCÓN, Nancy; GALINDO, Andres y PÉREZ, Jhonny; “Evaluación del comportamiento hidráulico en un reactor anaerobio de doble cámara (RADCA)”. *Rev. Fac. Ing. Univ. Antioquia*. 2001, N.º 61, pp. 53-63.

RUI-HUA Niu, YU-HUI Wang, XIN-SHAN Song & WEI-DONG Liao; “Hydraulic performance evaluation on horizontal constructed wetland using tracer test”. *Environment, Energy and Sustainable Development*, 2014. pp. 271-273.

SABAS RAMÍREZ, Carlos. Evaluación hidrodinámica de humedales construidos a escala de laboratorio. Tesis de Maestría Ecotecnólogo. Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira. Facultad de Ciencias Ambientales, 2011.

SANCHEZ MOLINA, Joany. Modelamiento de las condiciones hidráulicas de una planta compacta para el tratamiento de aguas residuales domésticas. Tesis de Maestría Ingeniero Recursos Hidráulicos. Medellín: Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín. Facultad de Minas. Escuela de Geociencias y Medio Ambiente, 2010.

SANDOVAL, J., y PEÑA, M. Análisis del desempeño de un humedal artificial de flujo sub-superficial en zonas tropicales basado en modelos hidráulicos y una cinética de primer orden. 1 ed. Cali, Colombia: LITOCENCOA, 2008, p. 96 – 110.

VILLAREAL, German y ZAFRA, Carlos. Tratamiento de aguas residuales municipales con humedales artificiales. Tesis de Postgrado Ingeniero Químico. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Químicas. Escuela de Ingeniería Química, 2003.

ANEXOS

ANEXO A. Ensayo de trazadores en la planta piloto

Cuadro 1: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta FPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
-0.938	0.000	1.25	1	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.06633
202.563	0.081	4	3	802.15	2E-06	0.27	11550924	0.1	8.49248E+12	0.001846092	0.00011	0.31158
567.563	0.227	8	4	3269.16	6E-06	0.76	94151808	0.2	2.56014E+13	0.021080937	0.07606	0.65295
688.163	0.275	12	4	3963.82	8E-06	0.92	171236851	0.4	2.1761E+13	0.030991638	0.43940	0.88561
568.963	0.228	24	12	9831.67	6E-06	0.76	849456461	0.7	9.38374E+12	0.063555197	1.03080	1.00149
443.363	0.177	28	4	2553.77	5E-06	0.59	257419814	0.9	6.94759E+11	0.012864131	0.93731	0.92884
372.363	0.149	32	4	2144.81	4E-06	0.50	247081882	1.0	9404766877	0.009073909	0.80120	0.83501
393.563	0.157	36	4	2266.92	4E-06	0.52	293792832	1.1	3.43296E+11	0.010136545	0.65918	0.73300
279.363	0.112	48	12	4827.38	3E-06	0.37	834171955	1.5	1.48728E+13	0.01532216	0.32628	0.44895
161.563	0.065	52	4	930.60	2E-06	0.22	174208320	1.6	4.5477E+12	0.001708219	0.25283	0.37223
175.363	0.070	56	4	1010.09	2E-06	0.23	203633741	1.7	7.1792E+12	0.0020125	0.19487	0.30587
114.763	0.046	60	4	661.03	1E-06	0.15	142782912	1.8	6.44035E+12	0.000861911	0.14963	0.24940
72.763	0.029	68	8	838.22	8E-07	0.10	205197235	2.1	1.36277E+13	0.000692959	0.08762	0.16263
77.763	0.031	72	4	447.91	9E-07	0.10	116098790	2.2	9.01974E+12	0.000395734	0.06691	0.13025
81.363	0.033	76	4	468.65	9E-07	0.11	128222093	2.3	1.14498E+13	0.000433223	0.05106	0.10384
48.983	0.020	80	4	282.14	6E-07	0.07	81256090	2.5	8.22169E+12	0.000157016	0.03894	0.08243
35.583	0.014	84	4	204.96	4E-07	0.05	61978452	2.6	7.02263E+12	8.28582E-05	0.02970	0.06519
23.383	0.009	96	12	404.05	3E-07	0.03	139639542	2.9	2.10605E+13	0.000107341	0.01319	0.03162
13.783	0.006	100	4	79.39	2E-07	0.02	28579392	3.1	4.6764E+12	1.24314E-05	0.01006	0.02471
11.163	0.004	104	4	64.30	1E-07	0.01	24072422	3.2	4.25019E+12	8.15428E-06	0.00769	0.01926
8.703	0.003	108	4	50.13	1E-07	0.01	19489144	3.3	3.69509E+12	4.95622E-06	0.00587	0.01498
5.897	0.002	120	12	101.89	7E-08	0.01	44017137	3.7	1.00913E+13	6.8261E-06	0.00263	0.00696
0.563	0.000	124	4	3.24	6E-09	0.00	1446336	3.8	3.50927E+11	2.07065E-08	0.00201	0.00538
-0.157	0.000	128	4	0.00	0	0.00	0	3.9	0	0	0.00154	0.00414
Σ	1.739		Σci*Δti	35206.26		Σci*ti*Δti	4.129E+09	Σ	1.92792E+14	0.171354759		

T. Retención [s]	117294.0151
T. Retención [d]	1.36
Varianza σ ² [S ²]	5476074427
Varianza σ ² Nor	0.3980316770

Varianza σ ² Nor	0.39802
Pe	7.65173
D	0.2886
D/vL	0.13069

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

λt	1.36
λp	0.5

Volumen Útil [L]	255.2230884
% Trazador Recuperado	72.69779309

Cuadro 2: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO													
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Δti [g*s²/l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta FPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$	
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000	
0.205	0.000	1.25	1	0.37	2E-09	0.00	1660.5	0.0	6679380950	8.75377E-10	0.00000	0.00917	
33.085	0.013	4	3	131.02	4E-07	0.05	1886639	0.1	2.0354E+12	5.01617E-05	0.00000	0.10008	
141.325	0.057	8	4	814.03	2E-06	0.23	23444122	0.2	9.89301E+12	0.001331298	0.00784	0.34074	
462.925	0.185	12	4	2666.45	5E-06	0.74	115190554	0.3	2.44927E+13	0.014284292	0.14171	0.60664	
596.725	0.239	24	12	10311.41	7E-06	0.96	890905651	0.6	2.85738E+13	0.071204456	1.02721	1.05273	
539.725	0.216	28	4	3108.82	6E-06	0.87	313368653	0.7	4.54627E+12	0.019417017	1.09359	1.06377	
359.525	0.144	32	4	2070.86	4E-06	0.58	238563533	0.8	1.17707E+12	0.008615801	1.05056	1.02612	
388.725	0.155	36	4	2239.06	4E-06	0.63	290181658	0.9	1.99576E+11	0.010072155	0.94524	0.95528	
263.725	0.105	48	12	4557.17	3E-06	0.42	787478630	1.2	5.19364E+12	0.013907892	0.55618	0.66477	
255.725	0.102	52	4	1472.98	3E-06	0.41	275741107	1.3	3.41625E+12	0.004358969	0.44769	0.56842	
266.525	0.107	56	4	1535.18	3E-06	0.43	309493094	1.4	6.00812E+12	0.004734928	0.35618	0.47957	
175.125	0.070	60	4	1008.72	2E-06	0.28	217883520	1.6	5.97432E+12	0.002044249	0.28090	0.39998	
114.125	0.046	68	8	1314.72	1E-06	0.18	321843456	1.8	1.47051E+13	0.001736317	0.17150	0.27030	
92.725	0.037	72	4	534.10	1E-06	0.15	138437683	1.9	7.71137E+12	0.000573101	0.13314	0.21951	
124.725	0.050	76	4	718.42	1E-06	0.20	196558618	2.0	1.30077E+13	0.001036918	0.10303	0.17702	
90.125	0.036	80	4	519.12	1E-06	0.15	149506560	2.1	1.15186E+13	0.000541412	0.07954	0.14187	
66.125	0.026	84	4	380.88	8E-07	0.11	115178112	2.2	1.01642E+13	0.000291453	0.06129	0.11306	
46.925	0.019	92	8	540.58	5E-07	0.08	179038771	2.4	1.99608E+13	0.000293546	0.03625	0.07074	
39.685	0.016	96	4	228.59	5E-07	0.06	78999183	2.5	9.75297E+12	0.000104976	0.02784	0.05558	
20.885	0.008	100	4	120.30	2E-07	0.03	43307136	2.6	5.87327E+12	2.90741E-05	0.02136	0.04351	
15.325	0.006	104	4	88.27	2E-07	0.02	33049037	2.7	4.88972E+12	1.56545E-05	0.01639	0.03393	
11.445	0.005	108	4	65.92	1E-07	0.02	25630940	2.8	4.11226E+12	8.7311E-06	0.01257	0.02638	
6.805	0.003	120	12	117.59	8E-08	0.01	50799053	3.1	1.00922E+13	9.26008E-06	0.00566	0.01217	
2.165	0.001	124	4	12.47	3E-08	0.00	5566786.6	3.2	1.17807E+12	3.1243E-07	0.00434	0.00935	
1.505	0.001	128	4	8.67	2E-08	0.00	3994583	3.3	8.9747E+11	1.50977E-07	0.00333	0.00717	
Σ	1.646		Σci*Δti	34565.67		Σci*ti*Δti	4.806E+09	Σ	2.05381E+14	0.154662126			

T. Retención [s]	139041.0844
T. Retención [d]	1.61
Varianza σ² [S²]	5941748776
Varianza σ² Nor	0.3073463027

Varianza σ² Nor	0.30737
Pe	9.30411
D	0.2374
D/vL	0.10748

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

λt	1.61
λp	1

Volumen Útil [L]	302.5431003
% Trazador Recuperado	71.5854926

Cuadro 3: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL												
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta FPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
0.195	0.000	1.25	1	0.35	2E-09	0.00	1579.5	0.0	8099823022	7.5874E-10	0.00000	0.03602
117.575	0.047	4	3	465.60	1E-06	0.20	6704596.8	0.1	9.38952E+12	0.00060684	0.00000	0.20408
406.375	0.163	8	4	2340.72	5E-06	0.70	67412736	0.2	3.81166E+13	0.01054457	0.00777	0.49718
513.775	0.206	12	4	2959.34	6E-06	0.89	127843661	0.3	3.79279E+13	0.0168547	0.12748	0.75685
433.975	0.174	24	12	7499.09	5E-06	0.75	647921203	0.6	3.67552E+13	0.03607661	0.94277	1.13515
302.375	0.121	28	4	1741.68	3E-06	0.52	175561344	0.6	5.38595E+12	0.00583804	1.04075	1.14589
324.775	0.130	32	4	1870.70	4E-06	0.56	215505101	0.7	3.17683E+12	0.00673504	1.04248	1.11839
345.575	0.138	36	4	1990.51	4E-06	0.60	257970355	0.8	1.43065E+12	0.00762535	0.98162	1.06382
288.375	0.115	48	12	4983.12	3E-06	0.50	861083136	1.1	1.33875E+12	0.01592984	0.67066	0.82237
221.375	0.089	52	4	1275.12	2E-06	0.38	238702464	1.2	1.2089E+12	0.00312919	0.56891	0.73544
222.175	0.089	56	4	1279.73	2E-06	0.39	257993165	1.3	2.61347E+12	0.00315185	0.47740	0.65135
206.175	0.082	60	4	1187.57	2E-06	0.36	256514688	1.4	4.21712E+12	0.00271423	0.39739	0.57207
191.775	0.077	68	8	2209.25	2E-06	0.33	540823910	1.6	1.72607E+13	0.00469666	0.27071	0.43214
175.175	0.070	72	4	1009.01	2E-06	0.30	261534874	1.7	1.06611E+13	0.00195938	0.22212	0.37227
135.975	0.054	76	4	783.22	2E-06	0.24	214287898	1.7	1.07564E+13	0.00118057	0.18174	0.31908
130.375	0.052	80	4	750.96	1E-06	0.23	216276480	1.8	1.30037E+13	0.00108533	0.14839	0.27225
130.175	0.052	84	4	749.81	1E-06	0.23	226741939	1.9	1.59809E+13	0.00108201	0.12095	0.23135
113.575	0.045	92	8	1308.38	1E-06	0.20	433336781	2.1	3.99735E+13	0.00164729	0.08009	0.16526
100.375	0.040	96	4	578.16	1E-06	0.17	199812096	2.2	2.06942E+13	0.00064332	0.06509	0.13901
43.835	0.018	100	4	252.49	5E-07	0.08	90896256	2.3	1.04655E+13	0.00012269	0.05288	0.11659
38.975	0.016	104	4	224.50	4E-07	0.07	84051302	2.4	1.0668E+13	9.6995E-05	0.04294	0.09754
32.415	0.013	108	4	186.71	4E-07	0.06	72593004	2.5	1.00834E+13	6.7091E-05	0.03486	0.08140
21.395	0.009	120	12	369.71	2E-07	0.04	159712819	2.8	2.80792E+13	8.7684E-05	0.01865	0.04671
8.335	0.003	124	4	48.01	9E-08	0.01	21431485	2.9	4.03735E+12	4.4359E-06	0.01514	0.03867
3.415	0.001	128	4	19.67	4E-08	0.01	9064120.3	2.9	1.82254E+12	7.4466E-07	0.01229	0.03195
Σ	1.803		Σci*Δti	36083.40		Σci*ti*Δti	5.644E+09	Σ	3.35056E+14	0.12188048		

T. Retención [s]	156409.2455
T. Retención [d]	1.81
Varianza σ ² [S ²]	9285588425
Varianza σ ² Nor	0.3795636270

Varianza σ ² Nor	0.37955
Pe	7.92802
D	0.2786
D/vL	0.12613

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

λt	1.81
λp	0.5

Volumen Útil [L]	340.334932
% Trazador Recuperado	74.6830401

Cuadro 4: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO													
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$	
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000	
10.075	0.004	1.25	1	18.14	4.1E-08	0.01	81607.5	0.0	5.88138E+11	7.37589E-07	0.00000	0.13050	
718.275	0.287	4	3	2844.37	2.9E-06	0.54	40958913.6	0.1	8.23827E+13	0.00824762	0.00000	0.31307	
1260.475	0.504	8	4	7260.34	5.1E-06	0.94	209097676.8	0.2	1.76204E+14	0.036943913	0.01084	0.48460	
1231.475	0.493	12	4	7093.30	5E-06	0.92	306430387.2	0.2	1.41796E+14	0.035263517	0.13537	0.58958	
972.075	0.389	24	12	16797.46	3.9E-06	0.72	1451300198	0.5	1.61937E+14	0.065916665	0.86612	0.68518	
1018.875	0.408	28	4	5868.72	4.1E-06	0.76	591566976	0.5	4.11994E+13	0.024138831	0.97128	0.67546	
1046.675	0.419	32	4	6028.85	4.2E-06	0.78	694523289.6	0.6	2.90258E+13	0.025474057	1.00024	0.65449	
774.875	0.310	36	4	4463.28	3.1E-06	0.58	578441088	0.7	1.34948E+13	0.013961681	0.97611	0.62586	
593.275	0.237	48	12	10251.79	2.4E-06	0.44	1771509658	0.9	1.42418E+12	0.024553181	0.76341	0.51801	
467.075	0.187	52	4	2690.35	1.9E-06	0.35	503633894.4	1.0	18376996212	0.005072799	0.68134	0.47995	
561.275	0.225	56	4	3232.94	2.3E-06	0.42	651761510.4	1.1	9.35812E+11	0.007325307	0.60267	0.44249	
461.275	0.185	60	4	2656.94	1.9E-06	0.34	573899904	1.2	2.6219E+12	0.004947596	0.52956	0.40620	
323.475	0.129	72	12	5589.65	1.3E-06	0.24	1448836762	1.4	3.11186E+13	0.007299231	0.35041	0.30782	
347.075	0.139	76	4	1999.15	1.4E-06	0.26	546967987.2	1.5	1.58401E+13	0.002801051	0.30378	0.27907	
369.875	0.148	80	4	2130.48	1.5E-06	0.28	613578240	1.6	2.27841E+13	0.003181152	0.26295	0.25242	
171.875	0.069	84	4	990.00	6.9E-07	0.13	299376000	1.6	1.37412E+13	0.00068691	0.22735	0.22783	
254.875	0.102	96	12	4404.24	1E-06	0.19	1522105344	1.9	1.14182E+14	0.004531585	0.14637	0.16574	
233.275	0.093	100	4	1343.66	9.4E-07	0.17	483719040	2.0	4.13444E+13	0.00126535	0.12630	0.14861	
193.475	0.077	104	4	1114.42	7.8E-07	0.14	417237350.4	2.0	4.01515E+13	0.000870411	0.10897	0.13306	
193.075	0.077	108	4	1112.11	7.8E-07	0.14	432389145.6	2.1	4.63786E+13	0.000866815	0.09402	0.11900	
248.675	0.099	120	12	4297.10	1E-06	0.19	1856348928	2.3	2.63041E+14	0.004313799	0.06043	0.08455	
263.075	0.105	124	4	1515.31	1.1E-06	0.20	676435276.8	2.4	1.03869E+14	0.001609287	0.05217	0.07530	
262.475	0.105	128	4	1511.86	1.1E-06	0.20	696663244.8	2.5	1.15345E+14	0.001601955	0.04505	0.06700	
224.275	0.090	132	4	1291.82	9.1E-07	0.17	613874764.8	2.6	1.09103E+14	0.001169597	0.03892	0.05957	
174.475	0.070	140	8	2009.95	7E-07	0.13	1013015808	2.7	2.05065E+14	0.001415699	0.02906	0.04698	
85.075	0.034	144	4	490.03	3.4E-07	0.06	254032588.8	2.8	5.4605E+13	0.000168298	0.02513	0.04168	
13.675	0.005	148	4	78.77	5.5E-08	0.01	41967590.4	2.9	9.55083E+12	4.3484E-06	0.02173	0.03696	
Σ	4.990		Σci*Ati	99085.03		ΣE(t)	18289753174	Σ	1.83775E+15	0.283631393			

T. Retención [s]	184586.4386
T. Retención [d]	2.14
Varianza σ ² [S ²]	18547173605
Varianza σ ² Nor	0.5443499105

Varianza σ ² Nor	0.544278
Pe	6.088649
D	0.3627
D/vL	0.16424

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

λt	2.14
λp	0.333333333

Volumen Útil [L]	401.6464173
% Trazador Recuperado	62.83747052

Cuadro 5: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Δti [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Δti [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 + C_i * Δt_i$	$E_i * C_i * Δt_i$	$E_{θD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{θTS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
7.450	0.003	1.25	1	13.41	4E-08	0.01	60345	0.0	4.88928E+11	5.13096E-07	0.00000	0.09808
356.850	0.143	4	3	1413.13	2E-06	0.36	20349014	0.1	4.63184E+13	0.002589885	0.00000	0.26781
789.650	0.316	8	4	4548.38	4E-06	0.79	130993459	0.1	1.26311E+14	0.018446144	0.00498	0.44771
919.650	0.368	12	4	5297.18	5E-06	0.92	228838349	0.2	1.22781E+14	0.025019664	0.08752	0.56972
798.850	0.320	20	8	9202.75	4E-06	0.80	662598144	0.4	1.40237E+14	0.037756941	0.56966	0.69403
789.650	0.316	24	4	4548.38	4E-06	0.79	392980378	0.4	5.40838E+13	0.018446144	0.79071	0.71471
755.250	0.302	28	4	4350.24	4E-06	0.76	438504192	0.5	3.89679E+13	0.01687399	0.93246	0.71660
710.050	0.284	32	4	4089.89	4E-06	0.71	471155098	0.6	2.63358E+13	0.014914688	0.99762	0.70458
582.250	0.233	36	4	3353.76	3E-06	0.58	434647296	0.7	1.45404E+13	0.010028947	1.00328	0.68250
421.650	0.169	48	12	7286.11	2E-06	0.42	1.259E+09	0.9	3.73624E+12	0.015778357	0.83478	0.58285
394.250	0.158	52	4	2270.88	2E-06	0.40	425108736	1.0	1.54369E+11	0.004598114	0.75617	0.54473
444.250	0.178	56	4	2558.88	2E-06	0.45	515870208	1.0	96944929564	0.005838364	0.67758	0.50625
381.250	0.153	60	4	2196.00	2E-06	0.38	474336000	1.1	9.2784E+11	0.004299877	0.60225	0.46820
270.250	0.108	72	12	4669.92	1E-06	0.27	1.21E+09	1.3	1.89819E+13	0.006481701	0.40981	0.36182
265.250	0.106	76	4	1527.84	1E-06	0.27	418017024	1.4	9.33239E+12	0.00208136	0.35803	0.32993
266.450	0.107	80	4	1534.75	1E-06	0.27	442008576	1.5	1.31474E+13	0.002100234	0.31212	0.30005
255.650	0.102	84	4	1472.54	1E-06	0.26	445297306	1.5	1.6845E+13	0.001933428	0.27166	0.27224
227.450	0.091	92	8	2620.22	1E-06	0.23	867818189	1.7	4.82893E+13	0.003060823	0.20507	0.22271
217.250	0.087	96	4	1251.36	1E-06	0.22	432470016	1.8	2.82139E+13	0.001396227	0.17796	0.20087
221.850	0.089	100	4	1277.86	1E-06	0.22	460028160	1.8	3.46023E+13	0.001455979	0.15435	0.18088
221.650	0.089	104	4	1276.70	1E-06	0.22	477997978	1.9	4.08864E+13	0.001453355	0.13383	0.16263
213.850	0.086	108	4	1231.78	1E-06	0.21	478914509	2.0	4.60514E+13	0.001352866	0.11601	0.14601
208.850	0.084	116	8	2405.95	1E-06	0.21	1.005E+09	2.1	1.18741E+14	0.002580687	0.08715	0.11726
215.850	0.086	120	4	1243.30	1E-06	0.22	537103872	2.2	6.95728E+13	0.001378289	0.07553	0.10489
218.650	0.087	124	4	1259.42	1E-06	0.22	562206874	2.3	7.93166E+13	0.00141428	0.06546	0.09374
218.850	0.088	128	4	1260.58	1E-06	0.22	580873421	2.4	8.87614E+13	0.001416868	0.05675	0.08368
209.250	0.084	132	4	1205.28	1E-06	0.21	572749056	2.4	9.43288E+13	0.001295291	0.04920	0.07464
174.850	0.070	140	8	2014.27	9E-07	0.18	1.015E+09	2.6	1.91771E+14	0.001808829	0.03700	0.05923
75.850	0.030	144	4	436.90	4E-07	0.08	226486886	2.7	4.55683E+13	0.000170195	0.03210	0.05270
11.450	0.005	148	4	65.95	6E-08	0.01	35139226	2.7	7.5059E+12	3.87835E-06	0.02785	0.04685
Σ	4.333		Σci*Δti	77883.62		ΣE(θ)	Σci*ti*Δti	1.522E+10	Σ	1.5269E+15	0.205975919	

T. Retención [s]	195444.8649
T. Retención [d]	2.26
Varianza σ ² [S ²]	19604832316
Varianza σ ² Nor	0.5132330360

Varianza σ ² Nor	0.513223
Pe	6.351228
D	0.3477
D/vL	0.15745

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

λt	2.26
λp	0.5

Volumen Útil [L]	425.2735486
% Trazador Recuperado	49.54919637

Cuadro 6: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL													
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t _i [h]	Ati [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta RS} = \frac{N \cdot (N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$	
0	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000	
-13.825	0.000	1.25	1	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.15312	
424.575	0.170	4	3	1681.32	2E-06	0.29	24210964.8	0.1	3.90486E+13	0.00296462	0.00001	0.34816	
1435.375	0.574	8	4	8267.76	6E-06	0.99	238111488	0.2	1.57446E+14	0.049285394	0.02528	0.51830	
1496.375	0.599	12	4	8619.12	6E-06	1.04	372345984	0.3	1.31669E+14	0.053563428	0.21838	0.61331	
1153.975	0.462	24	12	19940.69	5E-06	0.80	1722875443	0.5	1.28892E+14	0.095565587	0.94591	0.66935	
960.575	0.384	28	4	5532.91	4E-06	0.67	557717530	0.6	2.40996E+13	0.022072424	0.99717	0.64813	
917.775	0.367	32	4	5286.38	4E-06	0.64	608991437	0.7	1.4074E+13	0.020149298	0.97776	0.61734	
690.775	0.276	36	4	3978.86	3E-06	0.48	515660774	0.8	5.5054E+12	0.0114146	0.91629	0.58067	
469.175	0.188	44	8	5404.90	2E-06	0.33	856135526	0.9	3.81151E+11	0.010531426	0.74343	0.49963	
616.975	0.247	48	4	3553.78	3E-06	0.43	614092493	1.0	1.28039E+11	0.009105894	0.65386	0.45856	
473.775	0.190	52	4	2728.94	2E-06	0.33	510858317	1.1	1.13595E+12	0.005369474	0.56947	0.41852	
501.375	0.201	56	4	2887.92	2E-06	0.35	582204672	1.2	3.49787E+12	0.006013299	0.49252	0.38018	
446.775	0.179	60	4	2573.42	2E-06	0.31	555859584	1.3	6.22994E+12	0.00477491	0.42383	0.34394	
364.975	0.146	72	12	6306.77	2E-06	0.25	1634714266	1.6	5.38485E+13	0.009559495	0.26521	0.24971	
333.375	0.133	76	4	1920.24	1E-06	0.23	525377664	1.6	2.19037E+13	0.002658603	0.22606	0.22323	
308.175	0.123	80	4	1775.09	1E-06	0.21	511225344	1.7	2.60761E+13	0.002271864	0.19251	0.19912	
270.975	0.108	84	4	1560.82	1E-06	0.19	471990758	1.8	2.87003E+13	0.001756491	0.16384	0.17726	
240.975	0.096	92	8	2776.03	1E-06	0.17	919421798	2.0	7.5031E+13	0.002778187	0.11857	0.13974	
216.575	0.087	96	4	1247.47	9E-07	0.15	431126323	2.1	3.98821E+13	0.001122029	0.10086	0.12378	
205.775	0.082	100	4	1185.26	9E-07	0.14	426695040	2.2	4.42426E+13	0.001012914	0.08580	0.10949	
192.175	0.077	104	4	1106.93	8E-07	0.13	414433843	2.2	4.77072E+13	0.000883449	0.07300	0.09673	
175.175	0.070	108	4	1009.01	7E-07	0.12	392302310	2.3	4.9729E+13	0.00073406	0.06213	0.08536	
167.975	0.067	116	8	1935.07	7E-07	0.12	808086067	2.5	1.2172E+14	0.001349916	0.04504	0.06625	
154.775	0.062	120	4	891.50	6E-07	0.11	385129728	2.6	6.27015E+13	0.000573045	0.03837	0.05828	
153.975	0.062	124	4	886.90	6E-07	0.11	395910374	2.7	6.93353E+13	0.000567137	0.03270	0.05122	
145.775	0.058	128	4	839.66	6E-07	0.10	386917171	2.8	7.25784E+13	0.000508339	0.02787	0.04498	
130.775	0.052	132	4	753.26	5E-07	0.09	357951053	2.8	7.16445E+13	0.000409107	0.02377	0.03947	
112.775	0.045	140	8	1299.17	5E-07	0.08	654780672	3.0	1.47723E+14	0.000608476	0.01732	0.03033	
60.375	0.024	144	4	347.76	3E-07	0.04	180278784	3.1	4.29916E+13	8.7197E-05	0.01479	0.02656	
3.175	0.001	148	4	18.29	1E-08	0.00	9743846.4	3.2	2.44982E+12	2.41143E-07	0.01263	0.02324	
Σ	5.130		Σci*Ati	96315.24		ΣEi*ti*Ati	1.6065E+10	Σ	1.49037E+15	0.317690907			

T. Retención [s]	166797.5884
T. Retención [d]	1.93
Varianza σ ² [S ²]	15473884758
Varianza σ ² Nor	0.5561857066

Varianza σ ² Nor	0.556071
Pe	5.996026
D	0.3683
D/vL	0.166777

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

λt	1.93
λp	0.5

Volumen Útil [L]	362.9391969
% Trazador Recuperado	61.1886952

Cuadro 7: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Ati [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta RS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
18.000	0.007	2	2	51.84	2E-07	0.03	373248	0.0	9.76083E+11	9.09793E-06	0.00000	0.06677
30.200	0.012	5	3	130.46	3E-07	0.04	2348352	0.1	2.08501E+12	3.84152E-05	0.00005	0.29435
99.400	0.040	6	1	143.14	1E-06	0.14	3091737.6	0.1	2.1591E+12	0.00013872	0.00054	0.38426
706.200	0.282	7	1	1016.93	7E-06	0.99	25626586	0.2	1.44535E+13	0.007002014	0.00305	0.47613
861.200	0.344	8	1	1240.13	8E-06	1.21	35715686	0.2	1.65774E+13	0.010412993	0.01069	0.56786
779.400	0.312	9	1	1122.34	8E-06	1.10	36363686	0.2	1.40831E+13	0.008528808	0.02742	0.65780
629.600	0.252	22	13	11786.11	6E-06	0.89	933460070	0.5	5.01308E+13	0.072350299	0.92173	1.36639
590.200	0.236	24	2	1699.78	6E-06	0.83	146860646	0.6	5.72158E+12	0.009781286	1.00261	1.39253
499.600	0.200	26	2	1438.85	5E-06	0.70	134676173	0.6	3.71577E+12	0.00700878	1.04920	1.40098
454.200	0.182	28	2	1308.10	4E-06	0.64	131856077	0.7	2.48868E+12	0.005792844	1.06582	1.39407
367.400	0.147	30	2	1058.11	4E-06	0.52	114276096	0.7	1.40334E+12	0.00379032	1.05785	1.37412
308.000	0.123	32	2	887.04	3E-06	0.43	102187008	0.8	7.57255E+11	0.002663784	1.03078	1.34332
320.800	0.128	46	14	6467.33	3E-06	0.45	1.071E+09	1.1	2.90176E+12	0.020228529	0.64043	0.97232
320.800	0.128	48	2	923.90	3E-06	0.45	159650611	1.2	7.44244E+11	0.00288979	0.58399	0.91262
260.600	0.104	50	2	750.53	3E-06	0.37	135095040	1.2	9.50232E+11	0.001906981	0.53066	0.85384
275.600	0.110	52	2	793.73	3E-06	0.39	148585882	1.3	1.45277E+12	0.002132829	0.48075	0.79647
367.400	0.147	54	2	1058.11	4E-06	0.52	205696973	1.3	2.64338E+12	0.00379032	0.43442	0.74093
195.600	0.078	56	2	563.33	2E-06	0.28	113566925	1.4	1.84196E+12	0.001074324	0.39167	0.68750
181.200	0.072	70	14	3652.99	2E-06	0.26	920553984	1.7	4.22794E+13	0.006453747	0.18186	0.38415
199.600	0.080	72	2	574.85	2E-06	0.28	149000602	1.8	7.57358E+12	0.001118713	0.16234	0.35109
180.200	0.072	74	2	518.98	2E-06	0.25	138255206	1.8	7.72217E+12	0.000911816	0.14481	0.32041
177.800	0.071	76	2	512.06	2E-06	0.25	140100710	1.9	8.54533E+12	0.000887689	0.12910	0.29201
174.000	0.070	78	2	501.12	2E-06	0.25	140714496	1.9	9.32087E+12	0.000850151	0.11504	0.26579
151.400	0.061	80	2	436.03	1E-06	0.21	125577216	2.0	8.98915E+12	0.000643649	0.10247	0.24163
110.000	0.044	94	14	2217.60	1E-06	0.15	750435840	2.3	8.34462E+13	0.002378378	0.04520	0.12040
47.600	0.019	96	2	137.09	5E-07	0.07	47377613	2.4	5.54853E+12	6.36226E-05	0.04018	0.10859
12.200	0.005	98	2	35.14	1E-07	0.02	12395981	2.4	1.52571E+12	4.17943E-06	0.03571	0.09787
Σ	3.327			Σci*Ati 41025.60			Σci*ti*Ati 5.925E+09	Σ	3.00037E+14	0.172852078		

T. Retención [s]	144417.9235
T. Retención [d]	1.67
Varianza σ ² [S ²]	7313405717
Varianza σ ² Nor	0.3506529319

Varianza σ ² Nor	0.350996
Pe	8.408647
D	0.2627
D/vL	0.118925

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

λt	1.67
λp	0.333333333

Volumen Útil [L]	314.2427039
% Trazador Recuperado	71.45006771

Cuadro 8: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO												
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(0) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 + C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
10.550	0.004	2	2	30.38	1.4E-07	0.02	218764.8	0.0	6.20597E+11	4.204E-06	0.00000	0.02577
76.550	0.031	5	3	330.70	1E-06	0.15	5952528	0.1	5.77222E+12	0.000332	0.00001	0.13466
91.150	0.036	6	1	131.26	1.2E-06	0.18	2835129.6	0.1	2.16789E+12	0.00015691	0.00020	0.18170
390.950	0.156	7	1	562.97	5.1E-06	0.77	14186794	0.2	8.78463E+12	0.00288652	0.00134	0.23145
537.950	0.215	8	1	774.65	7.1E-06	1.06	22309862	0.2	1.1401E+13	0.00546532	0.00541	0.28267
511.550	0.205	9	1	736.63	6.7E-06	1.01	23866877	0.2	1.02076E+13	0.00494206	0.01545	0.33428
405.350	0.162	22	13	7588.15	5.3E-06	0.80	600981638	0.5	3.8162E+13	0.04033998	0.85951	0.80408
385.550	0.154	24	2	1110.38	5.1E-06	0.76	95937178	0.6	4.50793E+12	0.00561466	0.96183	0.83009
398.950	0.160	26	2	1148.98	5.2E-06	0.79	107544154	0.6	3.66996E+12	0.00601172	1.03078	0.84482
381.550	0.153	28	2	1098.86	5E-06	0.75	110765491	0.7	2.67257E+12	0.00549876	1.06852	0.84945
314.750	0.126	30	2	906.48	4.1E-06	0.62	97899840	0.7	1.60791E+12	0.00374191	1.07914	0.84522
282.950	0.113	32	2	814.90	3.7E-06	0.56	93876019	0.8	9.93491E+11	0.003024	1.06750	0.83340
246.550	0.099	46	14	4970.45	3.2E-06	0.49	823106189	1.1	1.19161E+12	0.016072	0.70850	0.62973
258.950	0.104	48	2	745.78	3.4E-06	0.51	128870093	1.2	3.83732E+11	0.00253276	0.64989	0.59365
212.350	0.085	50	2	611.57	2.8E-06	0.42	110082240	1.2	5.46144E+11	0.0017032	0.59370	0.55765
221.550	0.089	52	2	638.06	2.9E-06	0.44	119445581	1.2	8.77456E+11	0.00185398	0.54047	0.52212
314.750	0.126	54	2	906.48	4.1E-06	0.62	176219712	1.3	1.77763E+12	0.00374191	0.49053	0.48738
173.950	0.070	56	2	500.98	2.3E-06	0.34	100996762	1.3	1.32786E+12	0.00114291	0.44404	0.45368
149.750	0.060	70	14	3018.96	2E-06	0.29	760777920	1.7	3.13375E+13	0.00592917	0.21029	0.25764
154.150	0.062	72	2	443.95	2E-06	0.30	115072358	1.7	5.28268E+12	0.00089753	0.18807	0.23584
135.550	0.054	74	2	390.38	1.8E-06	0.27	103998298	1.8	5.27871E+12	0.000694	0.16806	0.21554
137.350	0.055	76	2	395.57	1.8E-06	0.27	108227405	1.8	6.03169E+12	0.00071256	0.15008	0.19670
139.950	0.056	78	2	403.06	1.8E-06	0.28	113178125	1.9	6.88346E+12	0.00073979	0.13393	0.17925
120.550	0.048	80	2	347.18	1.6E-06	0.24	99988992	1.9	6.60061E+12	0.0005489	0.11945	0.16313
83.750	0.034	94	14	1688.40	1.1E-06	0.16	571354560	2.3	5.98549E+13	0.00185451	0.05303	0.08164
61.550	0.025	96	2	177.26	8.1E-07	0.12	61262438	2.3	6.77393E+12	0.00014309	0.04717	0.07365
9.350	0.004	98	2	26.93	1.2E-07	0.02	9500198.4	2.4	1.10622E+12	3.3021E-06	0.04194	0.06639
Σ	2.483			Σci*Ati	30499.34		Σci*ti*Ati	4.578E+09	Σ	2.25822E+14	0.11658767	

T. Retención [s]	150116.5122
T. Retención [d]	1.74
Varianza σ ² [S ²]	7404160515
Varianza σ ² Nor	0.3285631808

Varianza σ ² Nor	0.328774
Pe	8.836789
D	0.2499
D/vL	0.113163

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

λt	1.74
λp	0.33333333

Volumen Útil [L]	326.642411
% Trazador Recuperado	53.518212

Cuadro 9: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(0) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{0D} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
18.575	0.007	2	2	53.50	2E-07	0.03	385171.2	0.0	1.02645E+12	1.04199E-05	0.00000	0.06108
14.975	0.006	5	3	64.69	2E-07	0.02	1164456	0.1	1.05526E+12	1.01585E-05	0.00003	0.28713
43.375	0.017	6	1	62.46	5E-07	0.07	1349136	0.1	9.62222E+11	2.84089E-05	0.00040	0.37947
409.775	0.164	7	1	590.08	4E-06	0.63	14869915	0.2	8.57068E+12	0.002535517	0.00238	0.47503
753.375	0.301	8	1	1084.86	8E-06	1.15	31243968	0.2	1.483E+13	0.008570339	0.00869	0.57150
764.375	0.306	9	1	1100.70	8E-06	1.17	35662680	0.2	1.41342E+13	0.008822436	0.02307	0.66701
600.575	0.240	22	13	11242.76	6E-06	0.92	890426909	0.5	4.9746E+13	0.070803288	0.90610	1.45752
574.975	0.230	24	2	1655.93	6E-06	0.88	143072179	0.6	5.82669E+12	0.009983975	0.99378	1.49144
440.575	0.176	26	2	1268.86	5E-06	0.67	118764922	0.6	3.44664E+12	0.005861993	1.04705	1.50580
434.575	0.174	28	2	1251.58	5E-06	0.66	126158861	0.7	2.52527E+12	0.005703416	1.06967	1.50303
353.375	0.141	30	2	1017.72	4E-06	0.54	109913760	0.7	1.4479E+12	0.00377118	1.06673	1.48555
293.575	0.117	32	2	845.50	3E-06	0.45	97401139	0.8	7.87477E+11	0.002602817	1.04360	1.45573
311.775	0.125	46	14	6285.38	3E-06	0.48	1.041E+09	1.1	2.48445E+12	0.020548787	0.65849	1.06443
238.175	0.095	48	2	685.94	2E-06	0.36	118531123	1.2	5.03076E+11	0.00171316	0.60110	0.99984
230.175	0.092	50	2	662.90	2E-06	0.35	119322720	1.2	7.79059E+11	0.001600007	0.54670	0.93602
248.975	0.100	52	2	717.05	3E-06	0.38	134231386	1.3	1.23383E+12	0.001872048	0.49565	0.87359
353.375	0.141	54	2	1017.72	4E-06	0.54	197844768	1.3	2.41188E+12	0.00377118	0.44815	0.81299
183.175	0.073	56	2	527.54	2E-06	0.28	106352870	1.4	1.64738E+12	0.0010133	0.40424	0.75460
170.775	0.068	70	14	3442.82	2E-06	0.26	867591648	1.7	3.88893E+13	0.006165271	0.18783	0.42156
175.975	0.070	72	2	506.81	2E-06	0.27	131364634	1.8	6.5267E+12	0.000935207	0.16763	0.38515
155.575	0.062	74	2	448.06	2E-06	0.24	119362118	1.8	6.5255E+12	0.000730946	0.14949	0.35137
156.375	0.063	76	2	450.36	2E-06	0.24	123218496	1.9	7.36504E+12	0.000738483	0.13324	0.32010
146.775	0.059	78	2	422.71	2E-06	0.22	118697530	1.9	7.71323E+12	0.000650594	0.11869	0.29122
132.775	0.053	80	2	382.39	1E-06	0.20	110128896	2.0	7.74115E+12	0.0005324	0.10567	0.26462
101.975	0.041	94	14	2055.82	1E-06	0.16	695688134	2.3	7.63245E+13	0.002198321	0.04644	0.13122
71.775	0.029	96	2	206.71	8E-07	0.11	71439667	2.4	8.25868E+12	0.000155579	0.04126	0.11826
32.975	0.013	98	2	94.97	3E-07	0.05	33504710	2.4	4.07249E+12	3.28379E-05	0.03665	0.10649
Σ	2.965			Σci*Ati 38145.82			Σci*ti*Ati 5.559E+09	Σ	2.76835E+14	0.161362067		

T. Retención [s]	145718.5078
T. Retención [d]	1.69
Varianza σ ² [S ²]	7257284741
Varianza σ ² Nor	0.3417784944

Varianza σ ² Nor	0.341801
Pe	8.579445
D	0.2574
D/vL	0.116558

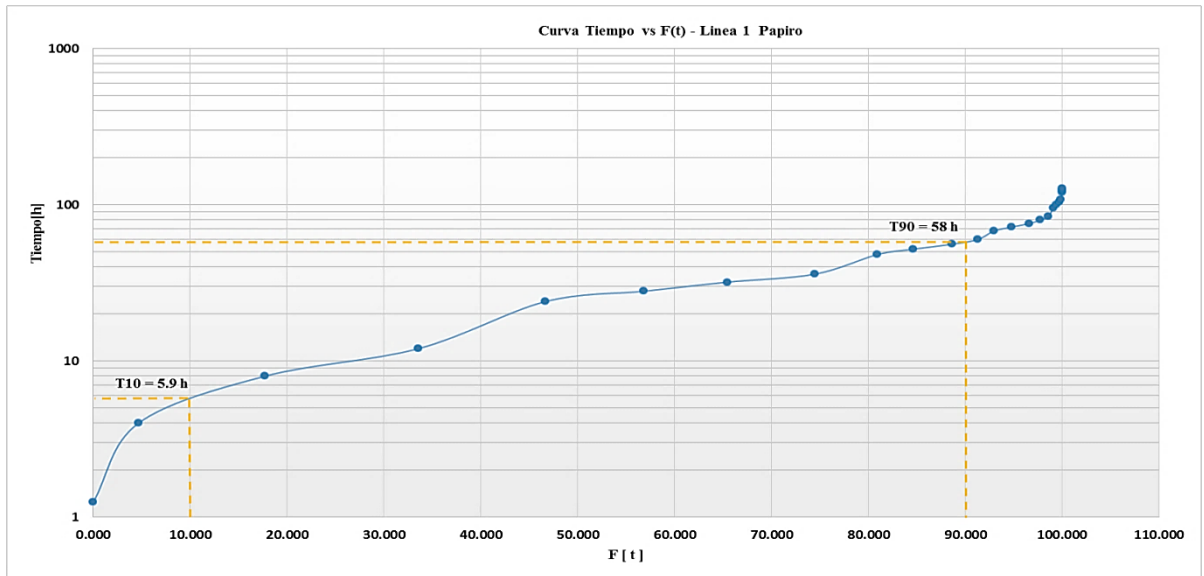
v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

λt	1.69
λp	0.375

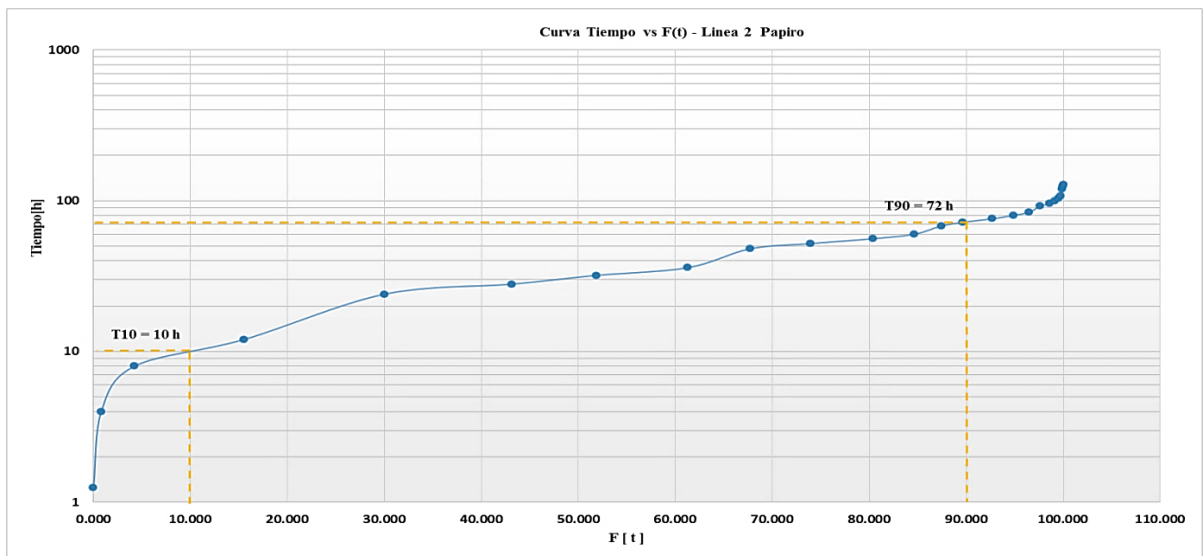
Volumen Útil [L]	317.0726791
% Trazador Recuperado	66.53016632

ANEXO B. Cálculo del Índice de Morril en la planta piloto

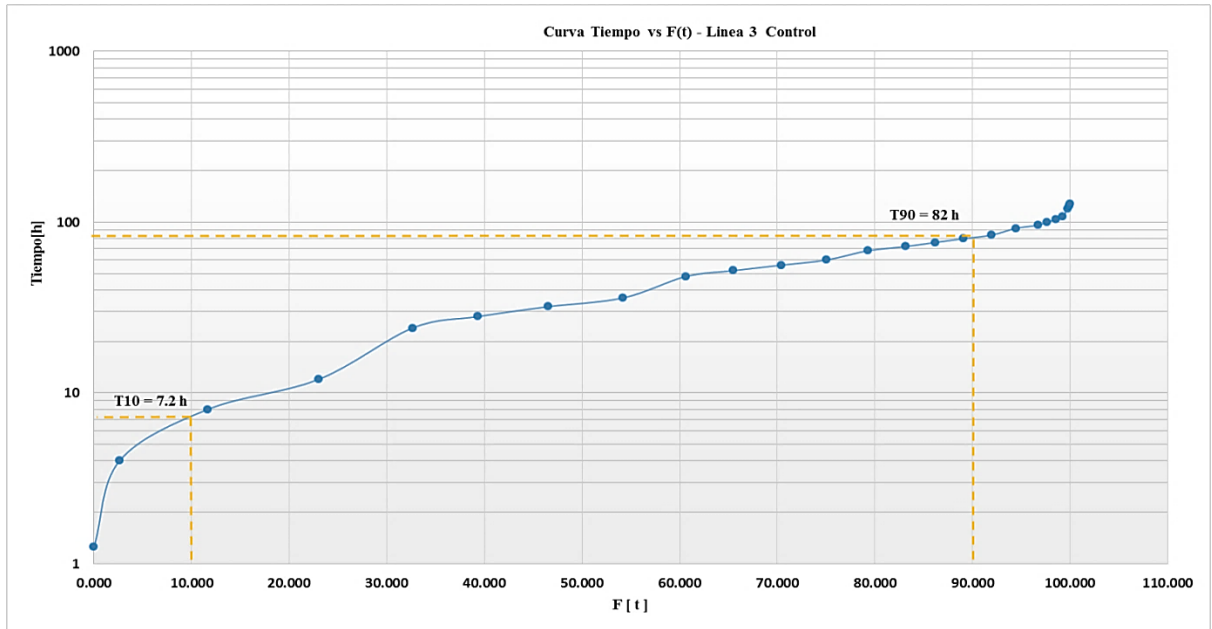
Gráfica 1: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del primer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 1.



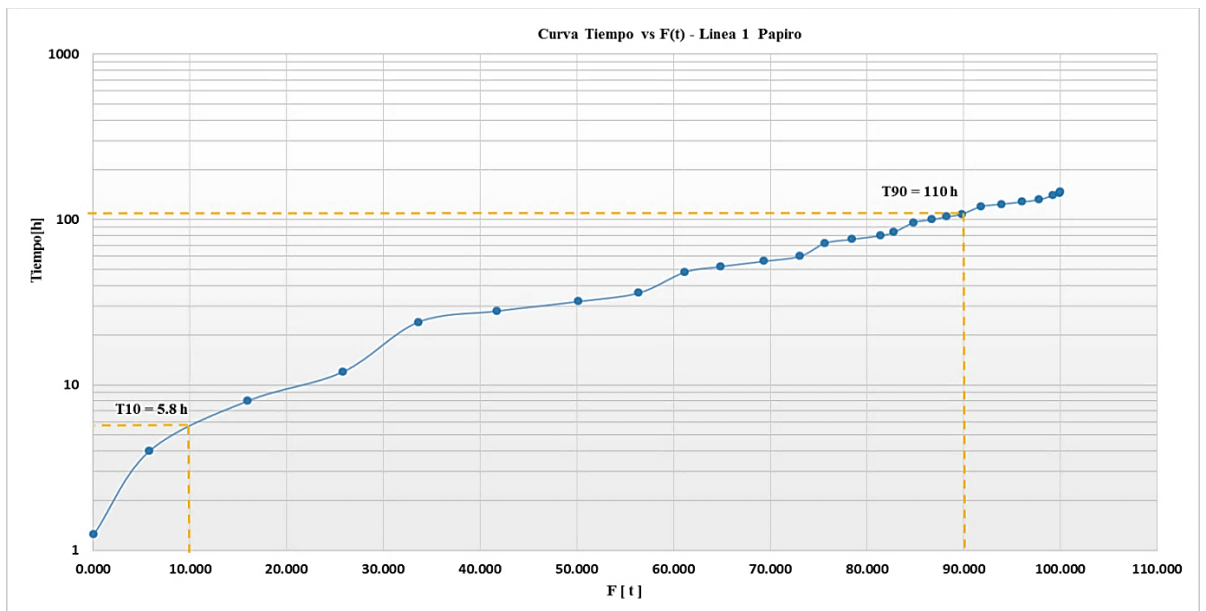
Gráfica 2: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del primer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 2.



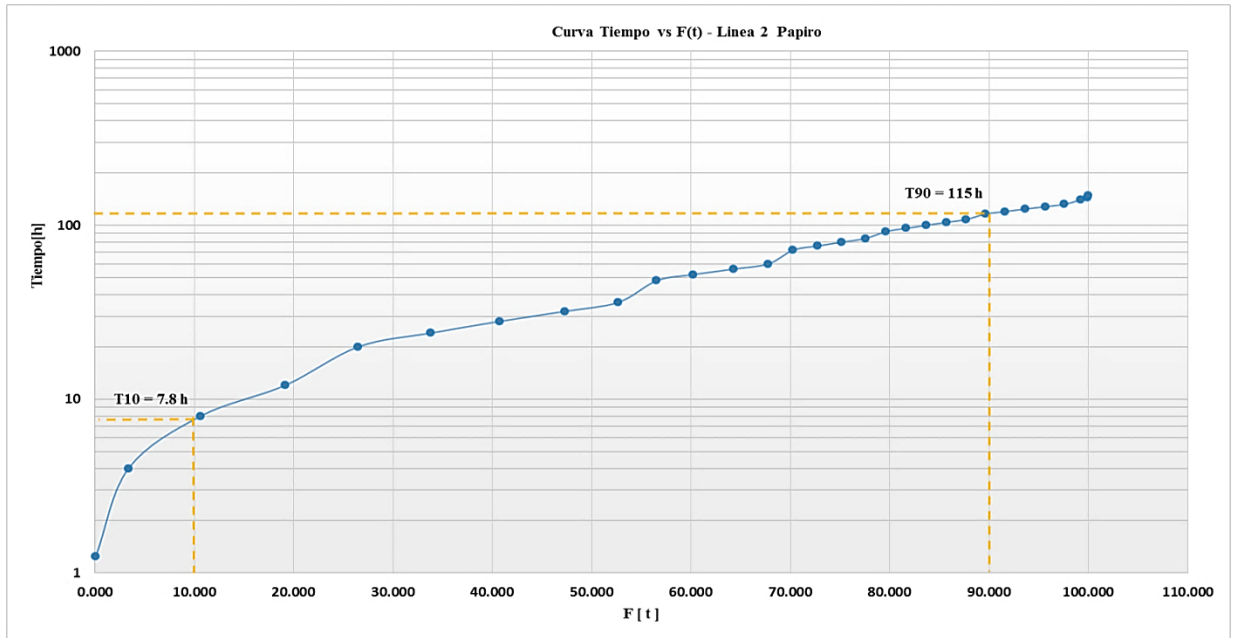
Gráfica 3: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del primer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 3.



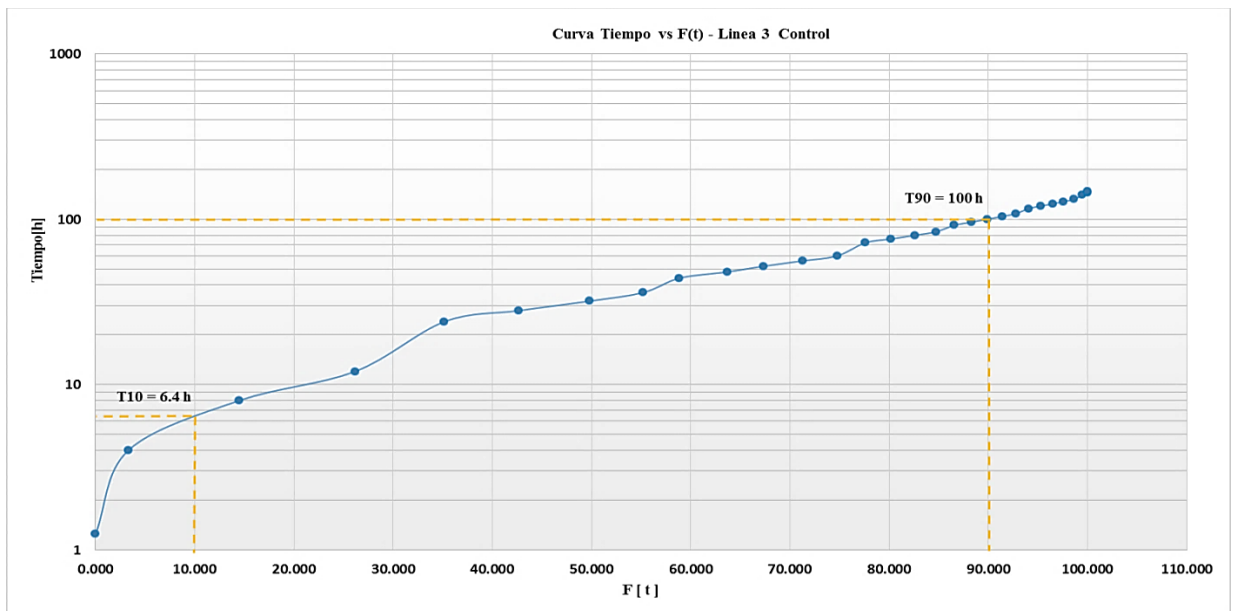
Gráfica 4: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 1.



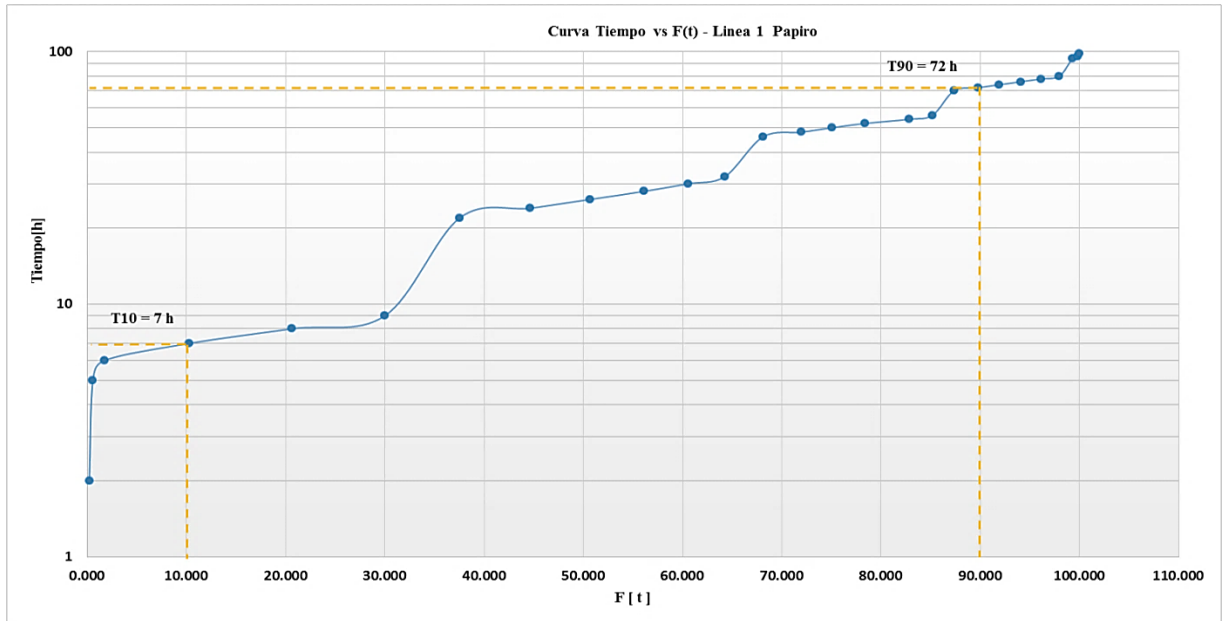
Gráfica 5: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 2.



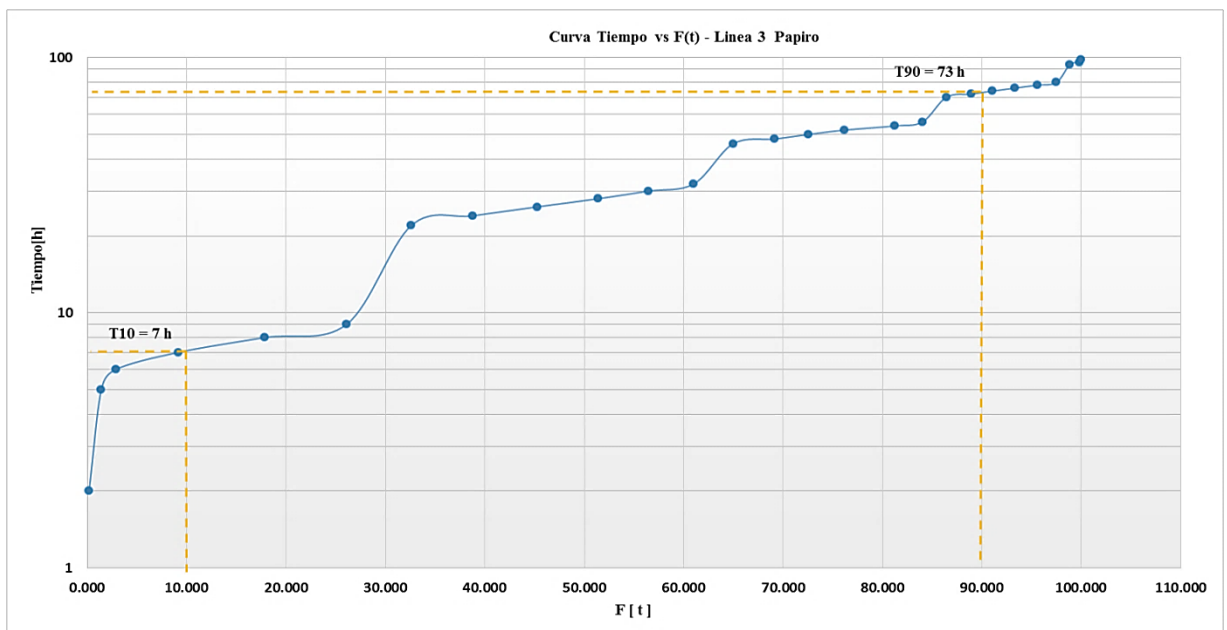
Gráfica 6: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 3.



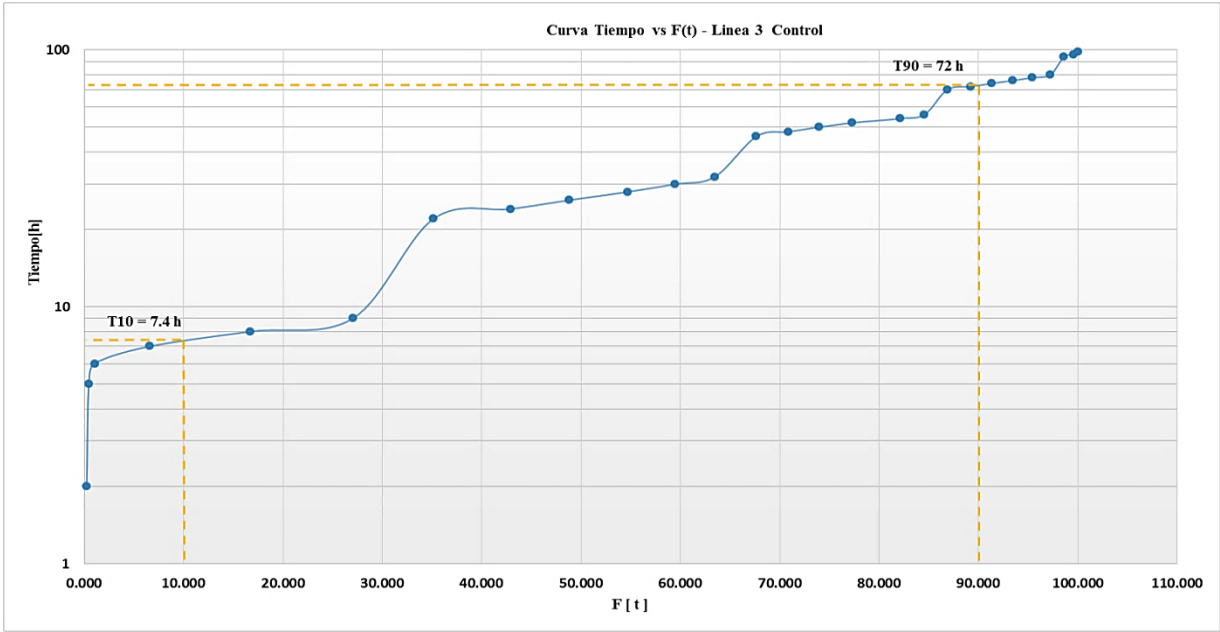
Gráfica 7: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 1.



Gráfica 8: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 2.



Gráfica 9: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto – Línea 3.

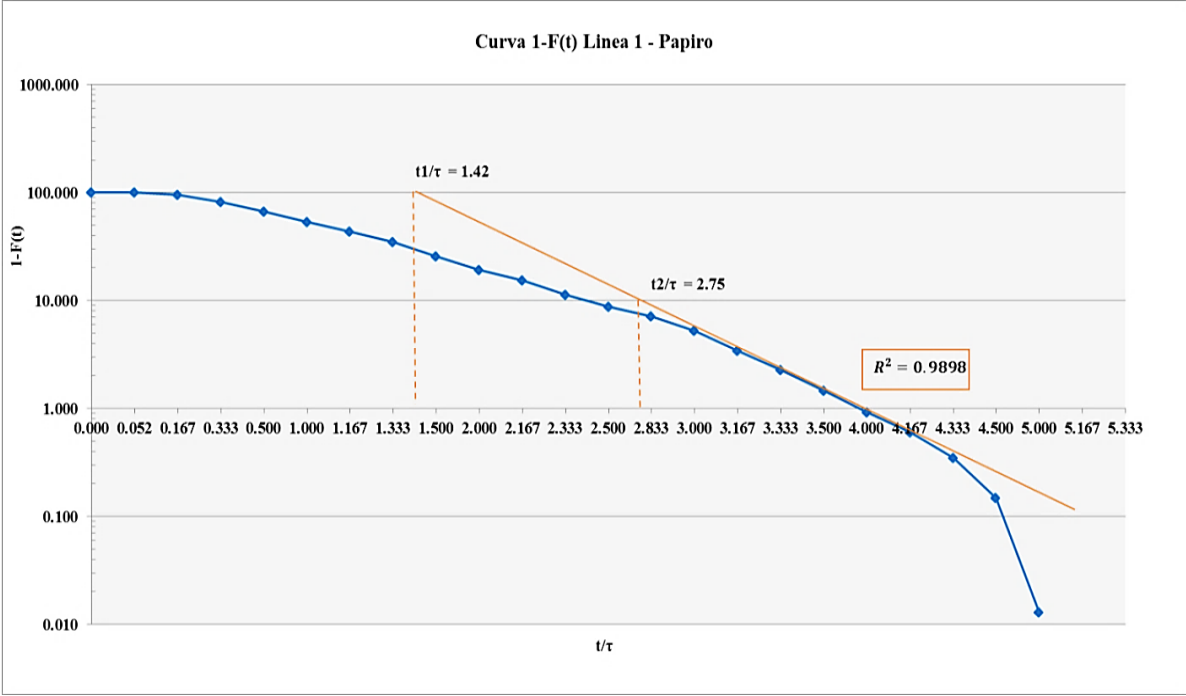


ANEXO C. Aplicación de la metodología de Wolf-Resnick en la planta piloto

Cuadro 10: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
-0.938	0.000	1.25	0.052	0.000	0.000	0.000	100.000
202.563	0.081	4	0.167	0.081	0.081	4.659	95.341
567.563	0.227	8	0.333	0.227	0.308	17.714	82.286
688.163	0.275	12	0.500	0.275	0.583	33.543	66.457
568.963	0.228	24	1.000	0.228	0.811	46.630	53.370
443.363	0.177	28	1.167	0.177	0.988	56.828	43.172
372.363	0.149	32	1.333	0.149	1.137	65.393	34.607
393.563	0.157	36	1.500	0.157	1.295	74.445	25.555
279.363	0.112	48	2.000	0.112	1.406	80.871	19.129
161.563	0.065	52	2.167	0.065	1.471	84.587	15.413
175.363	0.070	56	2.333	0.070	1.541	88.621	11.379
114.763	0.046	60	2.500	0.046	1.587	91.261	8.739
72.763	0.029	68	2.833	0.029	1.616	92.934	7.066
77.763	0.031	72	3.000	0.031	1.647	94.723	5.277
81.363	0.033	76	3.167	0.033	1.680	96.595	3.405
48.983	0.020	80	3.333	0.020	1.699	97.721	2.279
35.583	0.014	84	3.500	0.014	1.714	98.540	1.460
23.383	0.009	96	4.000	0.009	1.723	99.077	0.923
13.783	0.006	100	4.167	0.006	1.728	99.395	0.605
11.163	0.004	104	4.333	0.004	1.733	99.651	0.349
8.703	0.003	108	4.500	0.003	1.736	99.851	0.149
5.897	0.002	120	5.000	0.002	1.739	99.987	0.013
0.563	0.000	124	5.167	0.000	1.739	100.000	0.000
-0.157	0.000	128	5.333	0.000	1.739	100.000	0.000

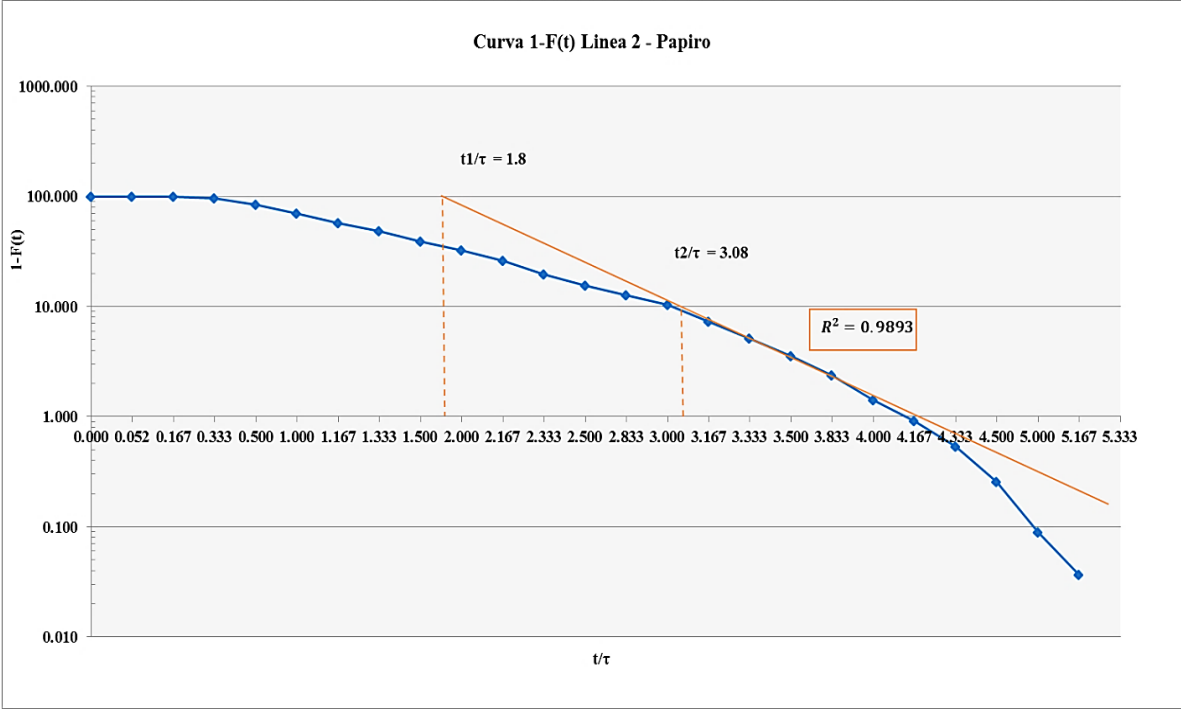
Gráfica 10: Curva 1-F(t) vs t/τ del primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.



Cuadro 11: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
0.205	0.000	1.25	0.052	0.000	0.000	0.005	99.995
33.085	0.013	4	0.167	0.013	0.013	0.809	99.191
141.325	0.057	8	0.333	0.057	0.070	4.242	95.758
462.925	0.185	12	0.500	0.185	0.255	15.490	84.510
596.725	0.239	24	1.000	0.239	0.494	29.988	70.012
539.725	0.216	28	1.167	0.216	0.710	43.101	56.899
359.525	0.144	32	1.333	0.144	0.853	51.836	48.164
388.725	0.155	36	1.500	0.155	1.009	61.280	38.720
263.725	0.105	48	2.000	0.105	1.114	67.688	32.312
255.725	0.102	52	2.167	0.102	1.217	73.901	26.099
266.525	0.107	56	2.333	0.107	1.323	80.376	19.624
175.125	0.070	60	2.500	0.070	1.393	84.631	15.369
114.125	0.046	68	2.833	0.046	1.439	87.404	12.596
92.725	0.037	72	3.000	0.037	1.476	89.657	10.343
124.725	0.050	76	3.167	0.050	1.526	92.687	7.313
90.125	0.036	80	3.333	0.036	1.562	94.877	5.123
66.125	0.026	84	3.500	0.026	1.588	96.483	3.517
46.925	0.019	92	3.833	0.019	1.607	97.623	2.377
39.685	0.016	96	4.000	0.016	1.623	98.588	1.412
20.885	0.008	100	4.167	0.008	1.631	99.095	0.905
15.325	0.006	104	4.333	0.006	1.638	99.467	0.533
11.445	0.005	108	4.500	0.005	1.642	99.745	0.255
6.805	0.003	120	5.000	0.003	1.645	99.911	0.089
2.165	0.001	124	5.167	0.001	1.646	99.963	0.037
1.505	0.001	128	5.333	0.001	1.646	100.000	0.000

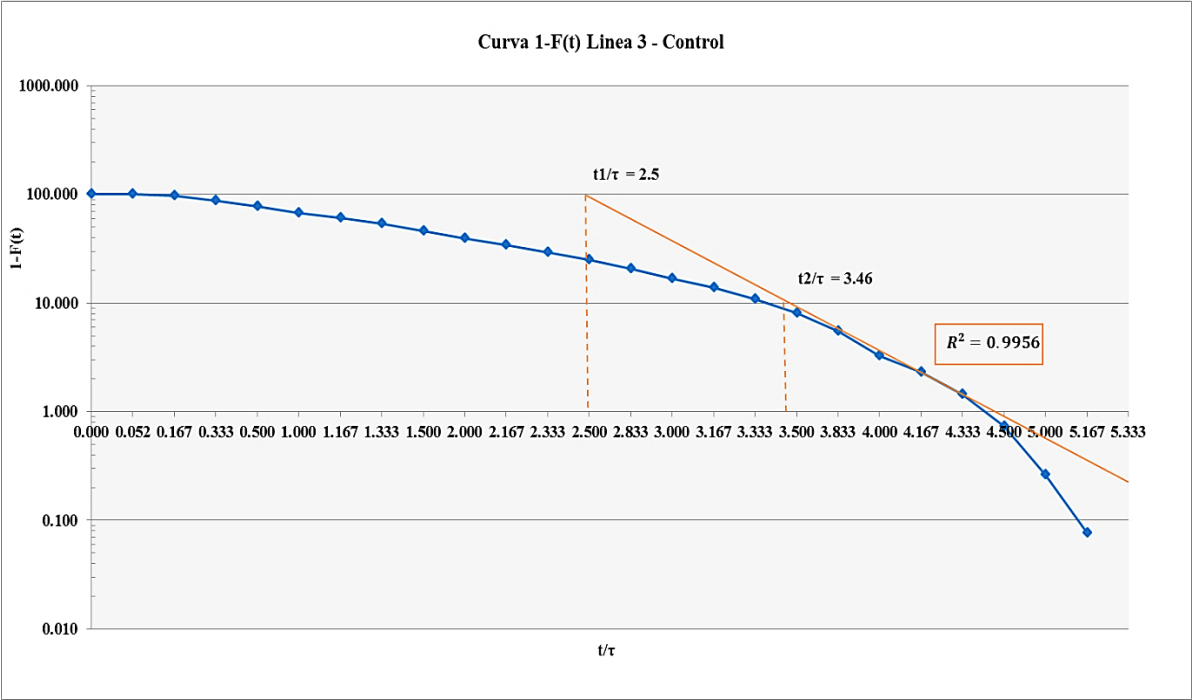
Gráfica 11: Curva 1-F(t) vs t/τ del primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.



Cuadro 12: Primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(c-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
0.195	0.000	1.25	0.052	0.000	0.000	0.004	99.996
117.575	0.047	4	0.167	0.047	0.047	2.612	97.388
406.375	0.163	8	0.333	0.163	0.210	11.626	88.374
513.775	0.206	12	0.500	0.206	0.415	23.021	76.979
433.975	0.174	24	1.000	0.174	0.589	32.647	67.353
302.375	0.121	28	1.167	0.121	0.710	39.354	60.646
324.775	0.130	32	1.333	0.130	0.840	46.557	53.443
345.575	0.138	36	1.500	0.138	0.978	54.222	45.778
288.375	0.115	48	2.000	0.115	1.093	60.619	39.381
221.375	0.089	52	2.167	0.089	1.182	65.529	34.471
222.175	0.089	56	2.333	0.089	1.271	70.457	29.543
206.175	0.082	60	2.500	0.082	1.353	75.030	24.970
191.775	0.077	68	2.833	0.077	1.430	79.283	20.717
175.175	0.070	72	3.000	0.070	1.500	83.169	16.831
135.975	0.054	76	3.167	0.054	1.554	86.185	13.815
130.375	0.052	80	3.333	0.052	1.606	89.076	10.924
130.175	0.052	84	3.500	0.052	1.658	91.964	8.036
113.575	0.045	92	3.833	0.045	1.704	94.483	5.517
100.375	0.040	96	4.000	0.040	1.744	96.709	3.291
43.835	0.018	100	4.167	0.018	1.762	97.681	2.319
38.975	0.016	104	4.333	0.016	1.777	98.546	1.454
32.415	0.013	108	4.500	0.013	1.790	99.265	0.735
21.395	0.009	120	5.000	0.009	1.799	99.739	0.261
8.335	0.003	124	5.167	0.003	1.802	99.924	0.076
3.415	0.001	128	5.333	0.001	1.803	100.000	0.000

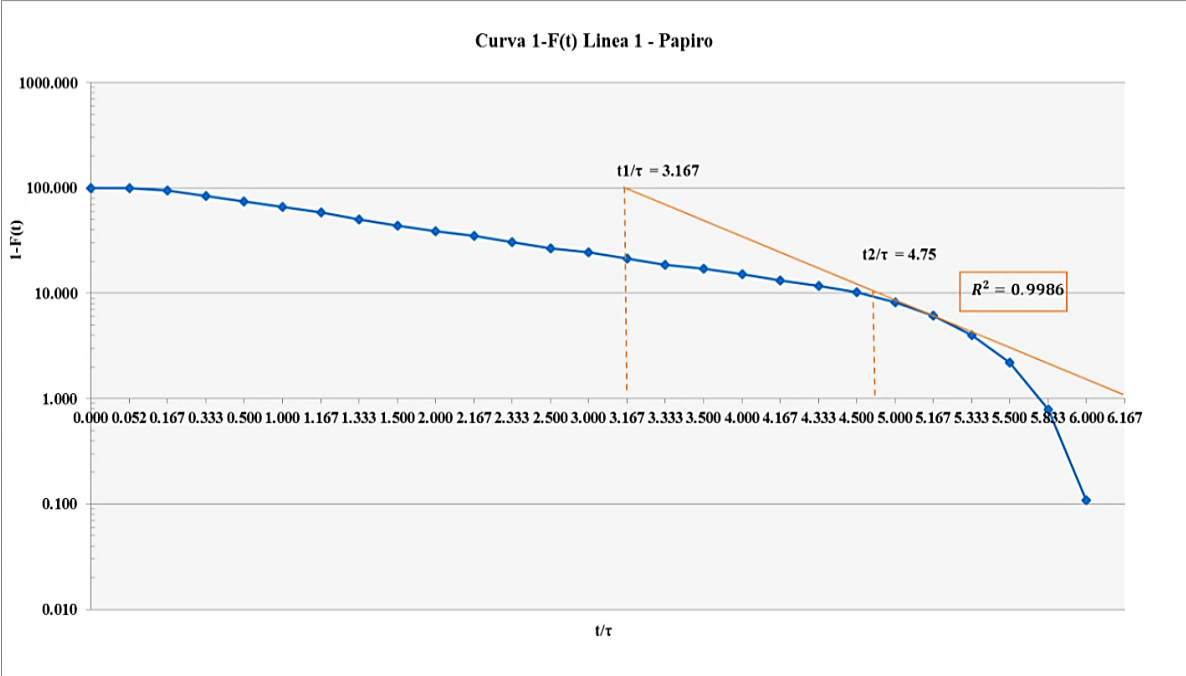
Gráfica 12: Curva 1-F(t) vs t/τ del primer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.



Cuadro 13: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(c-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
10.075	0.004	1.25	0.052	0.004	0.004	0.081	99.919
718.275	0.287	4	0.167	0.287	0.291	5.839	94.161
1260.475	0.504	8	0.333	0.504	0.796	15.943	84.057
1231.475	0.493	12	0.500	0.493	1.288	25.815	74.185
972.075	0.389	24	1.000	0.389	1.677	33.608	66.392
1018.875	0.408	28	1.167	0.408	2.085	41.775	58.225
1046.675	0.419	32	1.333	0.419	2.503	50.166	49.834
774.875	0.310	36	1.500	0.310	2.813	56.378	43.622
593.275	0.237	48	2.000	0.237	3.050	61.134	38.866
467.075	0.187	52	2.167	0.187	3.237	64.878	35.122
561.275	0.225	56	2.333	0.225	3.462	69.377	30.623
461.275	0.185	60	2.500	0.185	3.646	73.075	26.925
323.475	0.129	72	3.000	0.129	3.776	75.668	24.332
347.075	0.139	76	3.167	0.139	3.915	78.451	21.549
369.875	0.148	80	3.333	0.148	4.062	81.416	18.584
171.875	0.069	84	3.500	0.069	4.131	82.793	17.207
254.875	0.102	96	4.000	0.102	4.233	84.837	15.163
233.275	0.093	100	4.167	0.093	4.326	86.707	13.293
193.475	0.077	104	4.333	0.077	4.404	88.258	11.742
193.075	0.077	108	4.500	0.077	4.481	89.805	10.195
248.675	0.099	120	5.000	0.099	4.581	91.799	8.201
263.075	0.105	124	5.167	0.105	4.686	93.908	6.092
262.475	0.105	128	5.333	0.105	4.791	96.012	3.988
224.275	0.090	132	5.500	0.090	4.880	97.810	2.190
174.475	0.070	140	5.833	0.070	4.950	99.208	0.792
85.075	0.034	144	6.000	0.034	4.984	99.890	0.110
13.675	0.005	148	6.167	0.005	4.990	100.000	0.000

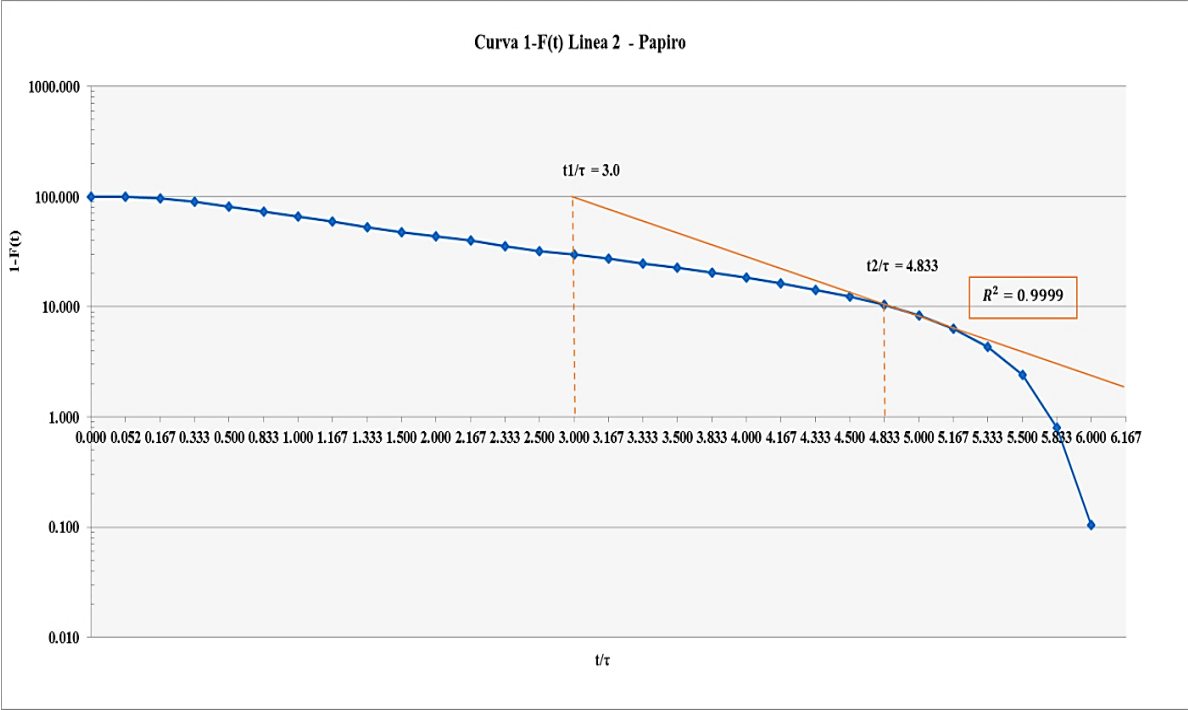
Gráfica 13: Curva 1-F(t) vs t/τ del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.



Cuadro 14: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
7.450	0.003	1.25	0.052	0.003	0.003	0.069	99.931
356.850	0.143	4	0.167	0.143	0.146	3.359	96.641
789.650	0.316	8	0.333	0.316	0.462	10.641	89.359
919.650	0.368	12	0.500	0.368	0.829	19.122	80.878
798.850	0.320	20	0.833	0.320	1.149	26.488	73.512
789.650	0.316	24	1.000	0.316	1.465	33.770	66.230
755.250	0.302	28	1.167	0.302	1.767	40.734	59.266
710.050	0.284	32	1.333	0.284	2.051	47.282	52.718
582.250	0.233	36	1.500	0.233	2.284	52.651	47.349
421.650	0.169	48	2.000	0.169	2.453	56.539	43.461
394.250	0.158	52	2.167	0.158	2.610	60.175	39.825
444.250	0.178	56	2.333	0.178	2.788	64.272	35.728
381.250	0.153	60	2.500	0.153	2.940	67.787	32.213
270.250	0.108	72	3.000	0.108	3.049	70.279	29.721
265.250	0.106	76	3.167	0.106	3.155	72.725	27.275
266.450	0.107	80	3.333	0.107	3.261	75.182	24.818
255.650	0.102	84	3.500	0.102	3.363	77.540	22.460
227.450	0.091	92	3.833	0.091	3.454	79.637	20.363
217.250	0.087	96	4.000	0.087	3.541	81.641	18.359
221.850	0.089	100	4.167	0.089	3.630	83.686	16.314
221.650	0.089	104	4.333	0.089	3.719	85.730	14.270
213.850	0.086	108	4.500	0.086	3.804	87.702	12.298
208.850	0.084	116	4.833	0.084	3.888	89.628	10.372
215.850	0.086	120	5.000	0.086	3.974	91.619	8.381
218.650	0.087	124	5.167	0.087	4.062	93.635	6.365
218.850	0.088	128	5.333	0.088	4.149	95.653	4.347
209.250	0.084	132	5.500	0.084	4.233	97.583	2.417
174.850	0.070	140	5.833	0.070	4.303	99.195	0.805
75.850	0.030	144	6.000	0.030	4.333	99.894	0.106
11.450	0.005	148	6.167	0.005	4.338	100.000	0.000

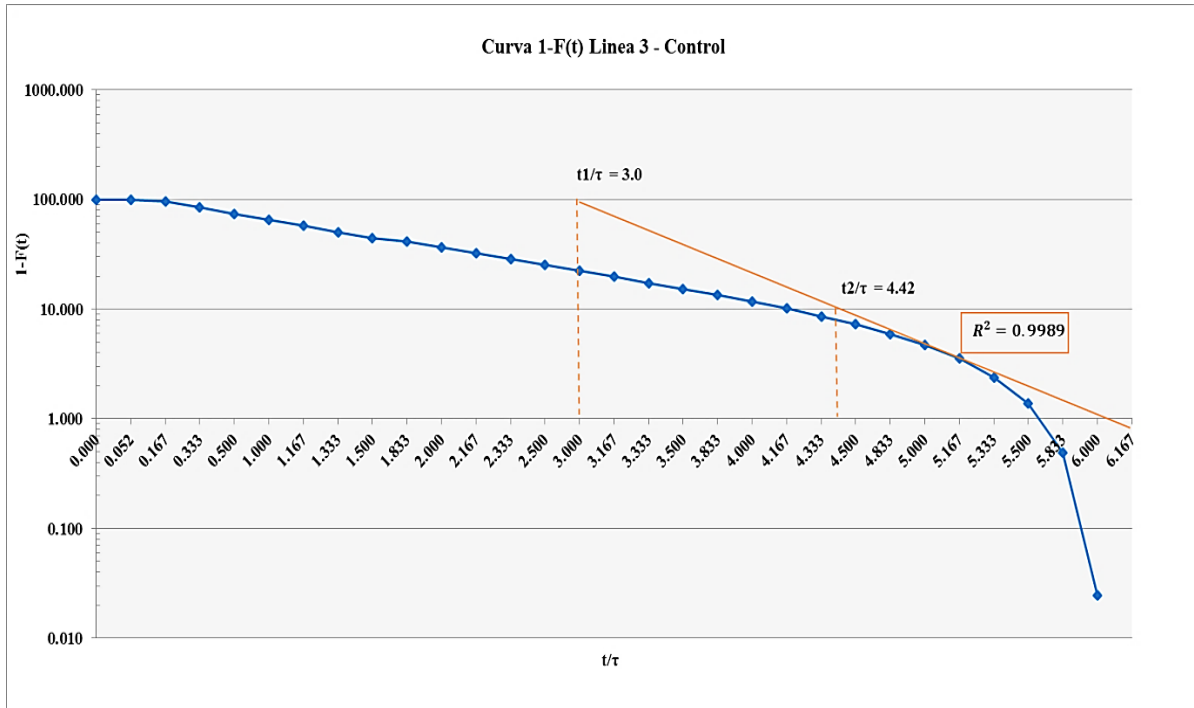
Gráfica 14: Curva 1-F(t) vs t/τ del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.



Cuadro 15: Segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo ti [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(\text{C-Co})$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
-13.825	0.000	1.25	0.052	0.000	0.000	0.000	100.000
424.575	0.170	4	0.167	0.170	0.170	3.310	96.690
1435.375	0.574	8	0.333	0.574	0.744	14.502	85.498
1496.375	0.599	12	0.500	0.599	1.343	26.170	73.830
1153.975	0.462	24	1.000	0.462	1.804	35.167	64.833
960.575	0.384	28	1.167	0.384	2.188	42.657	57.343
917.775	0.367	32	1.333	0.367	2.555	49.813	50.187
690.775	0.276	36	1.500	0.276	2.832	55.199	44.801
469.175	0.188	44	1.833	0.188	3.019	58.857	41.143
616.975	0.247	48	2.000	0.247	3.266	63.668	36.332
473.775	0.190	52	2.167	0.190	3.456	67.362	32.638
501.375	0.201	56	2.333	0.201	3.656	71.271	28.729
446.775	0.179	60	2.500	0.179	3.835	74.755	25.245
364.975	0.146	72	3.000	0.146	3.981	77.600	22.400
333.375	0.133	76	3.167	0.133	4.114	80.200	19.800
308.175	0.123	80	3.333	0.123	4.238	82.603	17.397
270.975	0.108	84	3.500	0.108	4.346	84.716	15.284
240.975	0.096	92	3.833	0.096	4.442	86.594	13.406
216.575	0.087	96	4.000	0.087	4.529	88.283	11.717
205.775	0.082	100	4.167	0.082	4.611	89.888	10.112
192.175	0.077	104	4.333	0.077	4.688	91.386	8.614
175.175	0.070	108	4.500	0.070	4.758	92.752	7.248
167.975	0.067	116	4.833	0.067	4.825	94.062	5.938
154.775	0.062	120	5.000	0.062	4.887	95.268	4.732
153.975	0.062	124	5.167	0.062	4.949	96.469	3.531
145.775	0.058	128	5.333	0.058	5.007	97.606	2.394
130.775	0.052	132	5.500	0.052	5.060	98.625	1.375
112.775	0.045	140	5.833	0.045	5.105	99.504	0.496
60.375	0.024	144	6.000	0.024	5.129	99.975	0.025
3.175	0.001	148	6.167	0.001	5.130	100.000	0.000

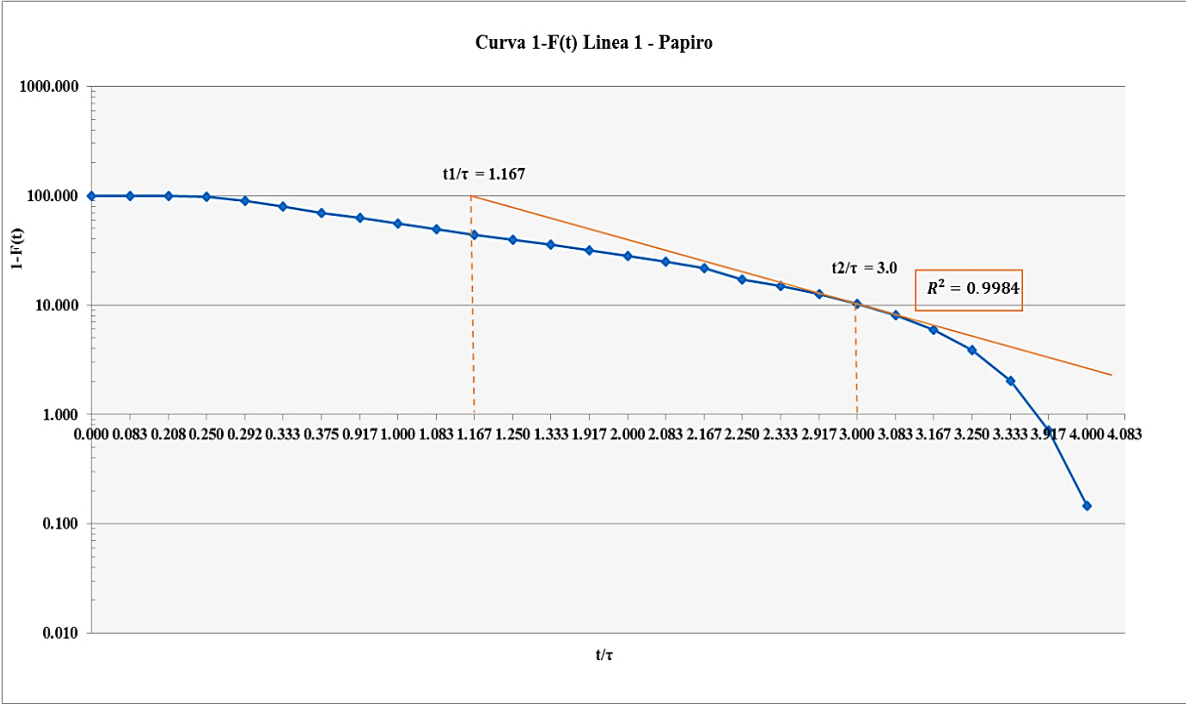
Gráfica 15: Curva 1-F(t) vs t/τ del segundo ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.



Cuadro 16: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 1 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
18.000	0.007	2	0.083	0.007	0.007	0.216	99.784
30.200	0.012	5	0.208	0.012	0.019	0.579	99.421
99.400	0.040	6	0.250	0.040	0.059	1.774	98.226
706.200	0.282	7	0.292	0.282	0.342	10.264	89.736
861.200	0.344	8	0.333	0.344	0.686	20.617	79.383
779.400	0.312	9	0.375	0.312	0.998	29.987	70.013
629.600	0.252	22	0.917	0.252	1.250	37.556	62.444
590.200	0.236	24	1.000	0.236	1.486	44.651	55.349
499.600	0.200	26	1.083	0.200	1.686	50.658	49.342
454.200	0.182	28	1.167	0.182	1.867	56.118	43.882
367.400	0.147	30	1.250	0.147	2.014	60.535	39.465
308.000	0.123	32	1.333	0.123	2.137	64.237	35.763
320.800	0.128	46	1.917	0.128	2.266	68.094	31.906
320.800	0.128	48	2.000	0.128	2.394	71.951	28.049
260.600	0.104	50	2.083	0.104	2.498	75.084	24.916
275.600	0.110	52	2.167	0.110	2.608	78.397	21.603
367.400	0.147	54	2.250	0.147	2.755	82.814	17.186
195.600	0.078	56	2.333	0.078	2.834	85.165	14.835
181.200	0.072	70	2.917	0.072	2.906	87.343	12.657
199.600	0.080	72	3.000	0.080	2.986	89.743	10.257
180.200	0.072	74	3.083	0.072	3.058	91.909	8.091
177.800	0.071	76	3.167	0.071	3.129	94.047	5.953
174.000	0.070	78	3.250	0.070	3.199	96.139	3.861
151.400	0.061	80	3.333	0.061	3.259	97.959	2.041
110.000	0.044	94	3.917	0.044	3.303	99.281	0.719
47.600	0.019	96	4.000	0.019	3.322	99.853	0.147
12.200	0.005	98	4.083	0.005	3.327	100.000	0.000

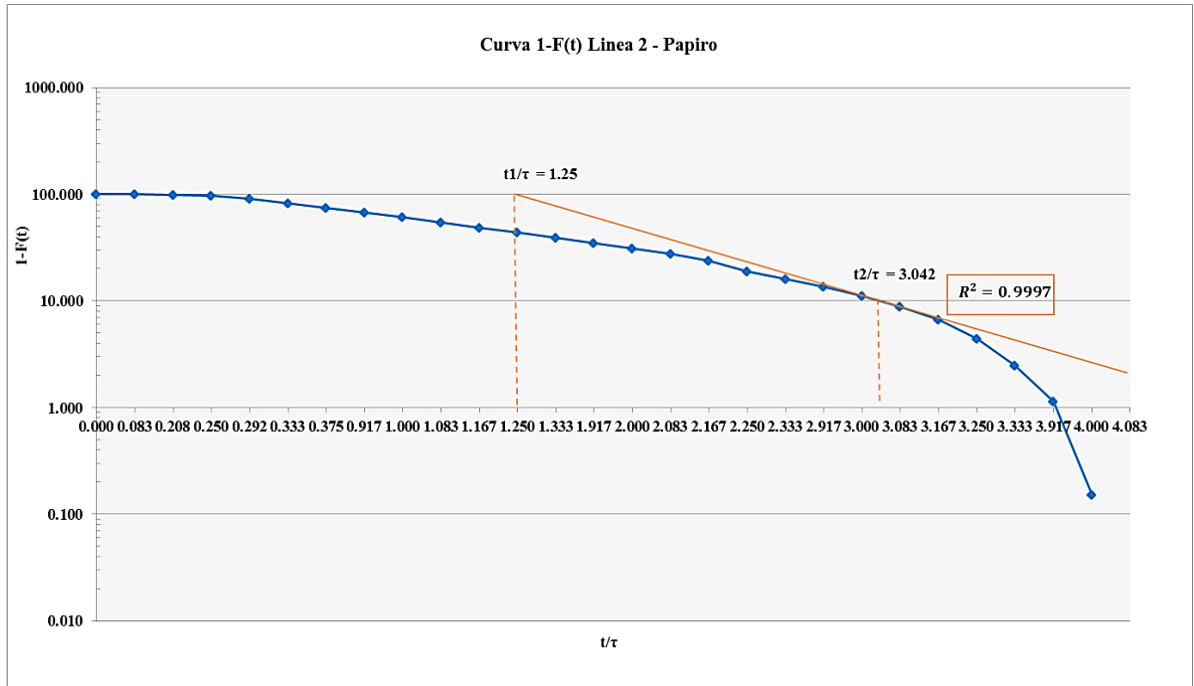
Gráfica 16: Curva 1-F(t) vs t/τ del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 1.



Cuadro 17: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 2 PAPIRO							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
10.550	0.004	2	0.083	0.004	0.004	0.170	99.830
76.550	0.031	5	0.208	0.031	0.035	1.403	98.597
91.150	0.036	6	0.250	0.036	0.071	2.871	97.129
390.950	0.156	7	0.292	0.156	0.228	9.169	90.831
537.950	0.215	8	0.333	0.215	0.443	17.835	82.165
511.550	0.205	9	0.375	0.205	0.647	26.075	73.925
405.350	0.162	22	0.917	0.162	0.810	32.605	67.395
385.550	0.154	24	1.000	0.154	0.964	38.815	61.185
398.950	0.160	26	1.083	0.160	1.123	45.242	54.758
381.550	0.153	28	1.167	0.153	1.276	51.388	48.612
314.750	0.126	30	1.250	0.126	1.402	56.458	43.542
282.950	0.113	32	1.333	0.113	1.515	61.016	38.984
246.550	0.099	46	1.917	0.099	1.614	64.988	35.012
258.950	0.104	48	2.000	0.104	1.717	69.159	30.841
212.350	0.085	50	2.083	0.085	1.802	72.580	27.420
221.550	0.089	52	2.167	0.089	1.891	76.149	23.851
314.750	0.126	54	2.250	0.126	2.017	81.219	18.781
173.950	0.070	56	2.333	0.070	2.086	84.021	15.979
149.750	0.060	70	2.917	0.060	2.146	86.433	13.567
154.150	0.062	72	3.000	0.062	2.208	88.916	11.084
135.550	0.054	74	3.083	0.054	2.262	91.100	8.900
137.350	0.055	76	3.167	0.055	2.317	93.312	6.688
139.950	0.056	78	3.250	0.056	2.373	95.567	4.433
120.550	0.048	80	3.333	0.048	2.421	97.509	2.491
83.750	0.034	94	3.917	0.034	2.455	98.858	1.142
61.550	0.025	96	4.000	0.025	2.479	99.849	0.151
9.350	0.004	98	4.083	0.004	2.483	100.000	0.000

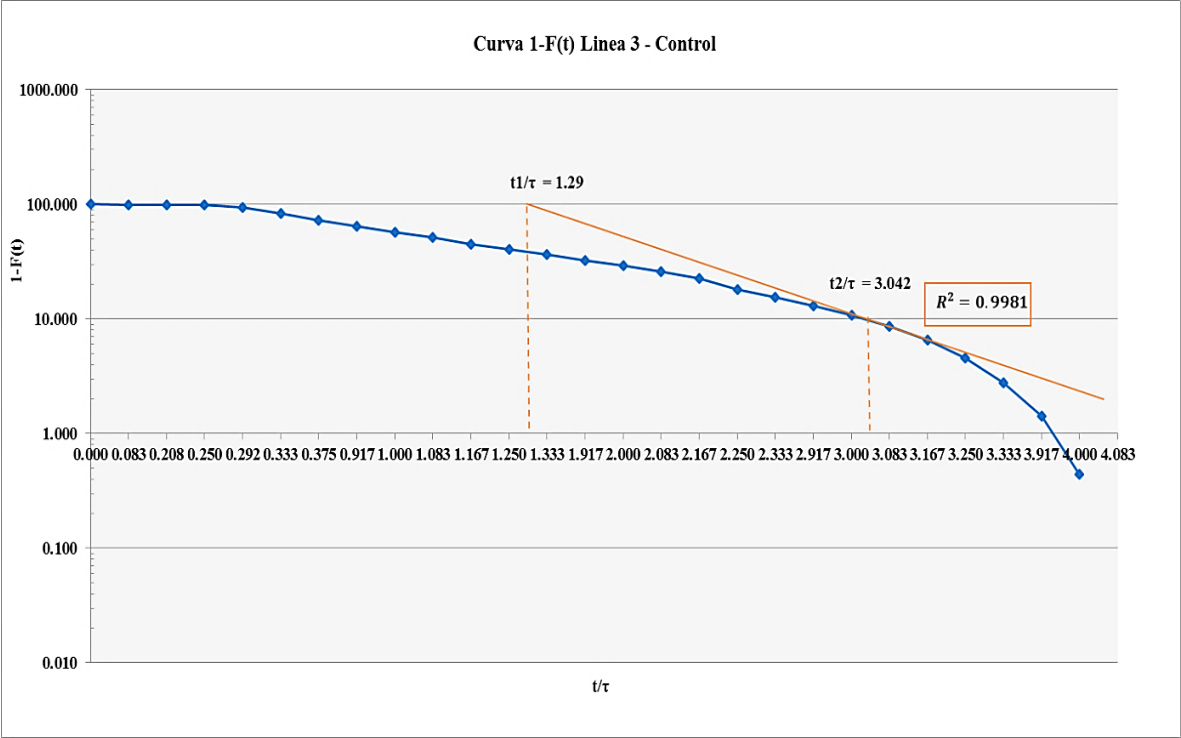
Gráfica 17: curva 1-F(t) vs t/τ del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 2.



Cuadro 18: Tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.

ENSAYO DE TRAZADORES LINEA 3 CONTROL							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(c-\text{Co})$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
18.575	0.007	2	0.083	0.007	0.007	0.251	99.749
14.975	0.006	5	0.208	0.006	0.013	0.453	99.547
43.375	0.017	6	0.250	0.017	0.031	1.038	98.962
409.775	0.164	7	0.292	0.164	0.195	6.566	93.434
753.375	0.301	8	0.333	0.301	0.496	16.729	83.271
764.375	0.306	9	0.375	0.306	0.802	27.041	72.959
600.575	0.240	22	0.917	0.240	1.042	35.143	64.857
574.975	0.230	24	1.000	0.230	1.272	42.899	57.101
440.575	0.176	26	1.083	0.176	1.448	48.843	51.157
434.575	0.174	28	1.167	0.174	1.622	54.705	45.295
353.375	0.141	30	1.250	0.141	1.763	59.472	40.528
293.575	0.117	32	1.333	0.117	1.881	63.433	36.567
311.775	0.125	46	1.917	0.125	2.006	67.639	32.361
238.175	0.095	48	2.000	0.095	2.101	70.852	29.148
230.175	0.092	50	2.083	0.092	2.193	73.957	26.043
248.975	0.100	52	2.167	0.100	2.292	77.316	22.684
353.375	0.141	54	2.250	0.141	2.434	82.083	17.917
183.175	0.073	56	2.333	0.073	2.507	84.554	15.446
170.775	0.068	70	2.917	0.068	2.575	86.858	13.142
175.975	0.070	72	3.000	0.070	2.646	89.232	10.768
155.575	0.062	74	3.083	0.062	2.708	91.330	8.670
156.375	0.063	76	3.167	0.063	2.771	93.440	6.560
146.775	0.059	78	3.250	0.059	2.829	95.420	4.580
132.775	0.053	80	3.333	0.053	2.882	97.211	2.789
101.975	0.041	94	3.917	0.041	2.923	98.587	1.413
71.775	0.029	96	4.000	0.029	2.952	99.555	0.445
32.975	0.013	98	4.083	0.013	2.965	100.000	0.000

Gráfica 18: Curva 1-F(t) vs t/τ del tercer ensayo de trazadores en la planta piloto - Línea 3.



ANEXO D. Ensayo de trazadores en el montaje a escala laboratorio

Cuadro 19: Primer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t_i [h]	Δt_i [h]	$c_i * \Delta t_i$ [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	$c_i * t_i * \Delta t_i$ [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{θFPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{θTS} = \frac{N * (N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.000	0.000	0	0	0.00	0	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0
0.700	0.000	0.166667	0.167	0.17	9E-08	0.00	100.8	0.0	164475375.6	1.5034E-08	0.00000	3.12163E-07
1.100	0.000	0.333333	0.167	0.26	1E-07	0.00	316.8	0.0	248643895.4	3.7125E-08	0.00000	1.58468E-05
2.100	0.001	0.5	0.167	0.50	3E-07	0.01	907.2	0.1	456304353.5	1.3531E-07	0.00000	0.000149415
5.000	0.002	0.666667	0.167	1.20	6E-07	0.02	2880	0.1	1043542350	7.6704E-07	0.00000	0.000707159
11.200	0.004	0.833333	0.167	2.69	1E-06	0.05	8064	0.1	2243381867	3.8487E-06	0.00000	0.002294149
24.300	0.010	1	0.167	5.83	3E-06	0.10	20995.2	0.1	4667258110	1.8117E-05	0.00000	0.00586114
34.200	0.014	1.166667	0.167	8.21	4E-06	0.14	34473.6	0.1	6293050259	3.5886E-05	0.00000	0.012698421
34.800	0.014	1.333333	0.167	8.35	4E-06	0.14	40089.6	0.2	6128948161	3.7156E-05	0.00000	0.024384618
28.700	0.011	1.5	0.167	6.89	4E-06	0.12	37195.2	0.2	4833191429	2.5272E-05	0.00000	0.042703126
31.700	0.013	1.666667	0.167	7.61	4E-06	0.13	45648	0.2	5099305273	3.0831E-05	0.00001	0.069539739
35.200	0.014	1.833333	0.167	8.45	4E-06	0.14	55756.8	0.2	5402905996	3.8016E-05	0.00003	0.106773809
38.400	0.015	2	0.167	9.22	5E-06	0.16	66355.2	0.2	5617717637	4.5242E-05	0.00015	0.156173022
39.500	0.016	2.166667	0.167	9.48	5E-06	0.16	73944	0.2	5501189200	4.7871E-05	0.00051	0.219299312
39.900	0.016	2.333333	0.167	9.58	5E-06	0.16	80438.4	0.3	5283529878	4.8845E-05	0.00144	0.29743092
38.200	0.015	2.5	0.167	9.17	5E-06	0.16	82512	0.3	4803297709	4.4772E-05	0.00349	0.391503415
40.000	0.016	2.666667	0.167	9.60	5E-06	0.16	92160	0.3	4769402410	4.909E-05	0.00744	0.502070615
55.500	0.022	2.833333	0.167	13.32	7E-06	0.23	135864	0.3	6266068924	9.4506E-05	0.01432	0.629284964
57.900	0.023	3	0.167	13.90	7E-06	0.24	150076.8	0.3	6180363265	0.00010286	0.02526	0.772895821
69.600	0.028	3.166667	0.167	16.70	9E-06	0.28	190425.6	0.4	7012527665	0.00014863	0.04146	0.932263484
69.400	0.028	3.333333	0.167	16.66	9E-06	0.28	199872	0.4	6588849210	0.00014777	0.06398	1.106386301
70.400	0.028	3.5	0.167	16.90	9E-06	0.29	212889.6	0.4	6286612491	0.00015206	0.09370	1.293938113
73.300	0.029	3.666667	0.167	17.59	9E-06	0.30	232214.4	0.4	6144706411	0.00016485	0.13116	1.493313235
85.700	0.034	3.833333	0.167	20.57	1E-05	0.35	283838.4	0.4	6730315631	0.00022534	0.17655	1.702676372
105.400	0.042	4	0.167	25.30	1E-05	0.43	364262.4	0.5	7737426696	0.00034084	0.22969	1.920015082
115.000	0.046	4.166667	0.167	27.60	1E-05	0.47	414000	0.5	7872854343	0.00040576	0.29001	2.1431927
113.300	0.045	4.333333	0.167	27.19	1E-05	0.46	424195.2	0.5	7215157629	0.00039385	0.35666	2.36999997
109.400	0.044	4.5	0.167	26.26	1E-05	0.45	425347.2	0.5	6463020304	0.00036721	0.42850	2.598203963
112.000	0.045	4.666667	0.167	26.88	1E-05	0.46	451584	0.5	6120223263	0.00038487	0.50423	2.82559317
115.000	0.046	4.833333	0.167	27.60	1E-05	0.47	480240	0.5	5794336306	0.00040576	0.58245	3.050017985

140.600	0.056	5	0.167	33.74	2E-05	0.57	607392	0.6	6509641596	0.00060652	0.66169	3.269426041
153.400	0.061	5.166667	0.167	36.82	2E-05	0.63	684777.6	0.6	6501904736	0.00072198	0.74056	3.481892117
169.500	0.068	5.333333	0.167	40.68	2E-05	0.69	781056	0.6	6550222524	0.00088149	0.81770	3.685642548
170.600	0.068	5.5	0.167	40.94	2E-05	0.70	810691.2	0.6	5984010502	0.00089296	0.89189	3.879074205
177.000	0.071	5.666667	0.167	42.48	2E-05	0.72	866592	0.6	5607527394	0.00096122	0.96206	4.060768291
193.300	0.077	5.833333	0.167	46.39	2E-05	0.79	974232	0.7	5501014182	0.00114641	1.02730	4.229499278
203.300	0.081	6	0.167	48.79	3E-05	0.83	1053907	0.7	5165590902	0.00126809	1.08686	4.384239387
205.200	0.082	6.166667	0.167	49.25	3E-05	0.84	1093306	0.7	4623523987	0.0012919	1.14018	4.524159071
229.500	0.092	6.333333	0.167	55.08	3E-05	0.94	1255824	0.7	4550451604	0.001616	1.18686	4.648623994
243.600	0.097	6.5	0.167	58.46	3E-05	0.99	1368058	0.7	4213392897	0.00182067	1.22667	4.757188994
249.500	0.100	6.666667	0.167	59.88	3E-05	1.02	1437120	0.8	3726991302	0.00190993	1.25949	4.849589534
260.200	0.104	6.833333	0.167	62.45	3E-05	1.06	1536221	0.8	3318102513	0.00207726	1.28535	4.925731104
267.200	0.107	7	0.167	64.13	3E-05	1.09	1616026	0.8	2869515828	0.00219053	1.30440	4.985677044
270.000	0.108	7.166667	0.167	64.80	3E-05	1.10	1671840	0.8	2402753887	0.00223668	1.31685	5.029635199
268.200	0.107	7.333333	0.167	64.37	3E-05	1.09	1699315	0.8	1939560981	0.00220695	1.32301	5.057943779
265.600	0.106	7.5	0.167	63.74	3E-05	1.08	1721088	0.8	1523814536	0.00216437	1.32323	5.071056788
260.700	0.104	7.666667	0.167	62.57	3E-05	1.06	1726877	0.9	1151130249	0.00208525	1.31793	5.069529314
253.300	0.101	7.833333	0.167	60.79	3E-05	1.03	1714334	0.9	827434485.8	0.00196855	1.30754	5.054002938
242.500	0.097	8	0.167	58.20	3E-05	0.99	1676160	0.9	555446518	0.00180426	1.29251	5.025191486
239.600	0.096	8.166667	0.167	57.50	3E-05	0.98	1690618	0.9	356329198.2	0.00176136	1.27331	4.983867323
235.400	0.094	8.333333	0.167	56.50	3E-05	0.96	1694880	0.9	201659213.8	0.00170016	1.25040	4.930848309
231.700	0.093	8.5	0.167	55.61	3E-05	0.94	1701605	1.0	92436410.5	0.00164713	1.22424	4.866985556
225.500	0.090	8.666667	0.167	54.12	3E-05	0.92	1688544	1.0	25714038.47	0.00156016	1.19526	4.793152063
223.600	0.089	8.833333	0.167	53.66	3E-05	0.91	1706515	1.0	427912.1847	0.00153398	1.16390	4.710232279
214.700	0.086	9	0.167	51.53	3E-05	0.88	1669507	1.0	13439418.43	0.00141429	1.13055	4.619112645
211.300	0.085	9.166667	0.167	50.71	3E-05	0.86	1673496	1.0	62561449.06	0.00136986	1.09560	4.520673106
208.600	0.083	9.333333	0.167	50.06	3E-05	0.85	1682150	1.1	146512571.4	0.00133507	1.05939	4.415779617
200.300	0.080	9.5	0.167	48.07	3E-05	0.82	1644062	1.1	256673202.6	0.00123094	1.02225	4.305277597
200.800	0.080	9.666667	0.167	48.19	3E-05	0.82	1677082	1.1	408291936	0.0012371	0.98448	4.189986314
201.700	0.081	9.833333	0.167	48.41	3E-05	0.82	1713643	1.1	596630395.4	0.00124821	0.94636	4.070694159
203.000	0.081	10	0.167	48.72	3E-05	0.83	1753920	1.1	823264759.9	0.00126435	0.90811	3.948154756
200.600	0.080	10.16667	0.167	48.14	3E-05	0.82	1762070	1.1	1068350255	0.00123463	0.86996	3.823083858
195.200	0.078	10.33333	0.167	46.85	2E-05	0.80	1742746	1.2	1321280785	0.00116906	0.83211	3.696156968
195.700	0.078	10.5	0.167	46.97	3E-05	0.80	1775390	1.2	1640893424	0.00117505	0.79471	3.568007629
190.300	0.076	10.66667	0.167	45.67	2E-05	0.78	1753805	1.2	1936002118	0.00111111	0.75792	3.43922631
187.400	0.075	10.83333	0.167	44.98	2E-05	0.76	1754064	1.2	2274081021	0.00107749	0.72187	3.310359843
183.600	0.073	11	0.167	44.06	2E-05	0.75	1744934	1.2	2619822658	0.00103424	0.68665	3.181911343

179.200	0.072	11.16667	0.167	43.01	2E-05	0.73	1728922	1.3	2970467426	0.00098526	0.65235	3.054340546
173.900	0.070	11.33333	0.167	41.74	2E-05	0.71	1702829	1.3	3313864771	0.00092784	0.61905	2.928064521
163.700	0.065	11.5	0.167	39.29	2E-05	0.67	1626523	1.3	3553736154	0.00082219	0.58680	2.803458695
155.200	0.062	11.66667	0.167	37.25	2E-05	0.63	1564416	1.3	3807725951	0.00073902	0.55565	2.680858144
150.200	0.060	11.83333	0.167	36.05	2E-05	0.61	1535645	1.3	4135396403	0.00069217	0.52562	2.560559105
141.000	0.056	12	0.167	33.84	2E-05	0.57	1461888	1.4	4329219127	0.00060998	0.49674	2.442820659
133.700	0.053	12.16667	0.167	32.09	2E-05	0.55	1405454	1.4	4552159344	0.00054845	0.46902	2.327866556
130.400	0.052	12.33333	0.167	31.30	2E-05	0.53	1389542	1.4	4898377783	0.00052171	0.44247	2.21588714
124.300	0.050	12.5	0.167	29.83	2E-05	0.51	1342440	1.4	5127838556	0.00047404	0.41706	2.107041341
125.300	0.050	12.66667	0.167	30.07	2E-05	0.51	1371283	1.4	5653036286	0.0004817	0.39280	2.001458714
127.900	0.051	12.83333	0.167	30.70	2E-05	0.52	1418155	1.4	6286424972	0.0005019	0.36968	1.899241483
133.000	0.053	13	0.167	31.92	2E-05	0.54	1493856	1.5	7096743929	0.00054272	0.34766	1.800466593
130.000	0.052	13.16667	0.167	31.20	2E-05	0.53	1478880	1.5	7506155727	0.00051852	0.32672	1.705187728
127.700	0.051	13.33333	0.167	30.65	2E-05	0.52	1471104	1.5	7954834229	0.00050033	0.30684	1.613437288
125.000	0.050	13.5	0.167	30.00	2E-05	0.51	1458000	1.5	8377428062	0.0004794	0.28798	1.525228317
126.000	0.050	13.66667	0.167	30.24	2E-05	0.51	1487808	1.5	9061731885	0.0004871	0.27012	1.440556358
118.000	0.047	13.83333	0.167	28.32	2E-05	0.48	1410336	1.6	9084865967	0.00042721	0.25321	1.359401245
117.200	0.047	14	0.167	28.13	1E-05	0.48	1417651	1.6	9637950447	0.00042144	0.23723	1.281728799
116.000	0.046	14.16667	0.167	27.84	1E-05	0.47	1419840	1.6	10167696334	0.00041285	0.22213	1.207492448
114.000	0.046	14.33333	0.167	27.36	1E-05	0.46	1411776	1.6	10629683433	0.00039874	0.20789	1.136634757
104.000	0.042	14.5	0.167	24.96	1E-05	0.42	1302912	1.6	10296615644	0.00033185	0.19446	1.069088855
90.000	0.036	14.66667	0.167	21.60	1E-05	0.37	1140480	1.7	9444762196	0.00024852	0.18181	1.004779785
87.400	0.035	14.83333	0.167	20.98	1E-05	0.36	1120118	1.7	9705812364	0.00023437	0.16991	0.943625743
83.000	0.033	15	0.167	19.92	1E-05	0.34	1075680	1.7	9738553281	0.00021136	0.15871	0.885539241
73.000	0.029	15.16667	0.167	17.52	9E-06	0.30	956592	1.7	9036396233	0.0001635	0.14819	0.830428168
73.000	0.029	15.33333	0.167	17.52	9E-06	0.30	967104	1.7	9520173257	0.0001635	0.13831	0.778196766
75.000	0.030	15.5	0.167	18.00	1E-05	0.31	1004400	1.7	10290991111	0.00017258	0.12904	0.728746524
76.000	0.030	15.66667	0.167	18.24	1E-05	0.31	1028736	1.8	10958128198	0.00017722	0.12034	0.681976985
68.000	0.027	15.83333	0.167	16.32	9E-06	0.28	930240	1.8	10290533831	0.00014187	0.11218	0.63778648
67.000	0.027	16	0.167	16.08	9E-06	0.27	926208	1.8	10629527381	0.00013773	0.10455	0.59607278
Σ	5.215		Σci*Δti	3128.93		Σci*ti*Δti	99779314	Σ	4.64392E+11	0.07119048		

T. Retencion [s]	31889.29678
T. Retencion [h]	8.858138
Varianza σ^2 [S ²]	148418831.5
Varianza σ^2 Nor	0.1459483278

Varianza σ^2 Nor	0.14654
Pe	16.8817
D	0.1308
D/vL	0.05924

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

λt	1.48
λp	1.19444444

Volumen Útil [L]	69.3887476
% Trazador Recuperado	89.4644021

Cuadro 20: Segundo ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES												
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(0) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [0]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{OFPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{OTS} = \frac{N+(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.300	0.000	0	0	0.00	5E-08	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0
0.700	0.000	0.5	0.500	0.50	1.2E-07	0.00	907.2	0.1	246351001.5	5.88571E-08	0.00000	0.000702439
3.200	0.001	1	0.500	2.30	5.3E-07	0.01	8294.4	0.2	950263118.3	1.22999E-06	0.00000	0.023730673
14.300	0.006	1.5	0.500	10.30	2.4E-06	0.06	55598.4	0.2	3527095669	2.45626E-05	0.00003	0.150317296
42.100	0.017	2	0.500	30.31	7E-06	0.17	218246.4	0.3	8462456547	0.000212896	0.00226	0.479797352
82.100	0.033	2.5	0.500	59.11	1.4E-05	0.33	532008	0.4	13138667539	0.000809635	0.02424	1.051988942
125.400	0.050	3	0.500	90.29	2.1E-05	0.50	975110.4	0.5	15514753050	0.001888851	0.10419	1.818875906
153.500	0.061	3.5	0.500	110.52	2.6E-05	0.61	1392552	0.5	14133871066	0.002830215	0.26645	2.66934203
190.000	0.076	4	0.500	136.80	3.2E-05	0.76	1969920	0.6	12368650063	0.004336206	0.49329	3.474547816
226.100	0.090	4.5	0.500	162.79	3.8E-05	0.90	2637230.4	0.7	9673593656	0.006140501	0.73702	4.126621365
242.900	0.097	5	0.500	174.89	4.1E-05	0.97	3147984	0.8	6105680824	0.007086924	0.94839	4.559297694
261.100	0.104	5.5	0.500	187.99	4.4E-05	1.04	3722241.6	0.8	3173468176	0.008188728	1.09533	4.751196933
254.700	0.102	6	0.500	183.38	4.2E-05	1.02	3961094.4	0.9	977397853.1	0.007792209	1.16695	4.717763594
245.900	0.098	6.5	0.500	177.05	4.1E-05	0.98	4142923.2	1.0	45803717.97	0.007263062	1.16875	4.498407186
224.300	0.090	7	0.500	161.50	3.7E-05	0.89	4069699.2	1.1	269315213	0.006043121	1.11534	4.143655668
214.900	0.086	7.5	0.500	154.73	3.6E-05	0.86	4177656	1.1	1478665499	0.005547222	1.02420	3.704948381
195.100	0.078	8	0.500	140.47	3.3E-05	0.78	4045593.6	1.2	3360858266	0.004572116	0.91170	3.227929618
156.500	0.063	8.5	0.500	112.68	2.6E-05	0.62	3448008	1.3	5045177963	0.002941924	0.79113	2.74900241
143.300	0.057	9	0.500	103.18	2.4E-05	0.57	3342902.4	1.4	7439330821	0.002466579	0.67214	2.294387225
123.700	0.049	9.5	0.500	89.06	2.1E-05	0.49	3045988.8	1.4	9432966588	0.001837986	0.56101	1.880817018
105.200	0.042	10	0.500	75.74	1.8E-05	0.42	2726784	1.5	11073859669	0.001329334	0.46129	1.517107562
80.800	0.032	10.5	0.500	58.18	1.3E-05	0.32	2199052.8	1.6	11226226602	0.000784197	0.37448	1.206036717
70.000	0.028	11	0.500	50.40	1.2E-05	0.28	1995840	1.7	12409436924	0.000588571	0.30069	0.946166974
60.700	0.024	11.5	0.500	43.70	1E-05	0.24	1809345.6	1.7	13371147303	0.000442568	0.23915	0.733412569
45.300	0.018	12	0.500	32.62	7.6E-06	0.18	1409011.2	1.8	12138267046	0.00024649	0.18864	0.562273036
28.800	0.012	12.5	0.500	20.74	4.8E-06	0.11	933120	1.9	9224321392	9.96294E-05	0.14772	0.426731811
23.400	0.009	13	0.500	16.85	3.9E-06	0.09	788486.4	2.0	8828599093	6.5771E-05	0.11494	0.320860441
11.500	0.005	13.5	0.500	8.28	1.9E-06	0.05	402408	2.0	5048014491	1.58854E-05	0.08893	0.23918627
4.500	0.002	14	0.500	3.24	7.5E-07	0.02	163296	2.1	2273807718	2.43236E-06	0.06847	0.176883532
0.100	0.000	14.5	0.500	0.07	1.7E-08	0.00	3758.4	2.2	57628902.64	1.20117E-09	0.05247	0.129841388
Σ	1.332			Σci*Ati 2397.67			Σci*ti*Ati 57325060.8	Σ	2.00996E+11	0.073558907		

T. Retención [s]	23908.63337
T. Retención [h]	6.6412870
Varianza σ ² [S ²]	83829512.86
Varianza σ ² Nor	0.1466518134

Varianza σ ² Nor	0.146707
Pe	16.86583
D	0.1310
D/vL	0.059291

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

λt	1.11
λp	0.91666667

Volumen Util [L]	52.02341521
% Trazador Recuperado	69.33014105

Cuadro 21: Tercer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES												
Conductividad Eléctrica [µs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo t_i [h]	Δt_i [h]	$c_i * \Delta t_i$ [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	$c_i * t_i * \Delta t_i$ [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta FPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{\left[\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}\right]}$	$E_{\theta TS} = \frac{N * (N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.100	0.000	0	0	0.00	1E-08	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
0.700	0.000	0.1666667	0.167	0.17	9E-08	0.00	100.8	0.0	113077462.5	1.5324E-08	0.00000	0.00001
1.000	0.000	0.3333333	0.167	0.24	1E-07	0.00	288	0.0	154153821.3	3.1273E-08	0.00000	0.00031
2.500	0.001	0.5	0.167	0.60	3E-07	0.01	1080	0.1	367353025.8	1.9546E-07	0.00000	0.00185
4.300	0.002	0.6666667	0.167	1.03	6E-07	0.01	2476.8	0.1	601576017.3	5.7824E-07	0.00000	0.00628
5.200	0.002	0.8333333	0.167	1.25	7E-07	0.02	3744	0.1	691778819.9	8.4563E-07	0.00000	0.01572
7.500	0.003	1	0.167	1.80	1E-06	0.03	6480	0.1	947551331.3	1.7591E-06	0.00000	0.03250
10.300	0.004	1.1666667	0.167	2.47	1E-06	0.04	10382.4	0.2	1234133296	3.3178E-06	0.00000	0.05889
14.200	0.006	1.3333333	0.167	3.41	2E-06	0.05	16358.4	0.2	1611276210	6.3059E-06	0.00002	0.09686
22.700	0.009	1.5	0.167	5.45	3E-06	0.08	29419.2	0.2	2435581625	1.6115E-05	0.00015	0.14798
26.500	0.011	1.6666667	0.167	6.36	3E-06	0.09	38160	0.2	2684220345	2.1962E-05	0.00069	0.21327
35.200	0.014	1.8333333	0.167	8.45	5E-06	0.12	55756.8	0.2	3360231524	3.8749E-05	0.00236	0.29323
40.600	0.016	2	0.167	9.74	5E-06	0.14	70156.8	0.3	3646030703	5.155E-05	0.00642	0.38778
46.000	0.018	2.1666667	0.167	11.04	6E-06	0.16	86112	0.3	3878678645	6.6174E-05	0.01462	0.49632
55.600	0.022	2.3333333	0.167	13.34	7E-06	0.19	112089.6	0.3	4392805326	9.6677E-05	0.02902	0.61780
70.900	0.028	2.5	0.167	17.02	9E-06	0.25	153144	0.3	5237260988	0.0001572	0.05163	0.75079
91.600	0.037	2.6666667	0.167	21.98	1E-05	0.32	211046.4	0.4	6311429444	0.0002624	0.08408	0.89354
108.400	0.043	2.8333333	0.167	26.02	1E-05	0.37	265363.2	0.4	6949378444	0.00036748	0.12735	1.04409
128.700	0.051	3	0.167	30.89	2E-05	0.45	333590.4	0.4	7656111558	0.000518	0.18163	1.20033
147.600	0.059	3.1666667	0.167	35.42	2E-05	0.51	403833.6	0.4	8123938739	0.00068131	0.24632	1.36010
157.600	0.063	3.3333333	0.167	37.82	2E-05	0.55	453888	0.5	8000599370	0.00077676	0.32014	1.52121
180.900	0.072	3.5	0.167	43.42	2E-05	0.63	547041.6	0.5	8441339141	0.00102341	0.40123	1.68154
207.600	0.083	3.6666667	0.167	49.82	3E-05	0.72	657676.8	0.5	8871495891	0.00134781	0.48742	1.83909
216.800	0.087	3.8333333	0.167	52.03	3E-05	0.75	718041.6	0.5	8450211784	0.00146991	0.57635	1.99199
227.700	0.091	4	0.167	54.65	3E-05	0.79	786931.2	0.5	8059027243	0.00162143	0.66569	2.13854
240.900	0.096	4.1666667	0.167	57.82	3E-05	0.83	867240	0.6	7704504694	0.00181487	0.75323	2.27723
247.100	0.099	4.3333333	0.167	59.30	3E-05	0.85	925142.4	0.6	7102632224	0.00190949	0.83699	2.40677
249.600	0.100	4.5	0.167	59.90	3E-05	0.86	970444.8	0.6	6409365552	0.00194833	0.91531	2.52608
258.400	0.103	4.6666667	0.167	62.02	3E-05	0.89	1041868.8	0.6	5887886108	0.00208813	0.98683	2.63430
260.000	0.104	4.8333333	0.167	62.40	3E-05	0.90	1085760	0.7	5217192764	0.00211407	1.05054	2.73075

262.000	0.105	5	0.167	62.88	3E-05	0.91	1131840	0.7	4590008151	0.00214672	1.10576	2.81499
268.000	0.107	5.1666667	0.167	64.32	3E-05	0.93	1196352	0.7	4058834311	0.00224617	1.15208	2.88673
273.000	0.109	5.3333333	0.167	65.52	4E-05	0.94	1257984	0.7	3533573647	0.00233076	1.18937	2.94588
279.300	0.112	5.5	0.167	67.03	4E-05	0.97	1327233.6	0.7	3048526620	0.00243958	1.21772	2.99250
283.500	0.113	5.6666667	0.167	68.04	4E-05	0.98	1388016	0.8	2568246725	0.0025135	1.23739	3.02679
286.200	0.114	5.8333333	0.167	68.69	4E-05	0.99	1442448	0.8	2111028489	0.0025616	1.24880	3.04907
287.800	0.115	6	0.167	69.07	4E-05	1.00	1491955.2	0.8	1688191478	0.00259032	1.25248	3.05977
287.200	0.115	6.1666667	0.167	68.93	4E-05	0.99	1530201.6	0.8	1300567548	0.00257953	1.24903	3.05941
285.800	0.114	6.3333333	0.167	68.59	4E-05	0.99	1563897.6	0.9	961381929	0.00255445	1.23910	3.04859
282.200	0.113	6.5	0.167	67.73	4E-05	0.98	1584835.2	0.9	669383103.9	0.0024905	1.22338	3.02795
277.700	0.111	6.6666667	0.167	66.65	4E-05	0.96	1599552	0.9	431269692.3	0.00241171	1.20254	2.99819
274.600	0.110	6.8333333	0.167	65.90	4E-05	0.95	1621238.4	0.9	249005851.8	0.00235816	1.17726	2.96003
262.000	0.105	7	0.167	62.88	3E-05	0.91	1584576	0.9	113546572.5	0.00214672	1.14821	2.91421
257.600	0.103	7.1666667	0.167	61.82	3E-05	0.89	1595059.2	1.0	34202306.71	0.00207522	1.11599	2.86148
248.700	0.099	7.3333333	0.167	59.69	3E-05	0.86	1575763.2	1.0	1234048.185	0.0019343	1.08120	2.80259
238.800	0.096	7.5	0.167	57.31	3E-05	0.83	1547424	1.0	11928313.23	0.00178337	1.04437	2.73826
226.300	0.091	7.6666667	0.167	54.31	3E-05	0.78	1499011.2	1.0	60589590.46	0.00160155	1.00601	2.66922
214.100	0.086	7.8333333	0.167	51.38	3E-05	0.74	1449028.8	1.1	140948279.8	0.00143353	0.96657	2.59616
209.500	0.084	8	0.167	50.28	3E-05	0.72	1448064	1.1	255949974.7	0.00137259	0.92644	2.51974
204.000	0.082	8.1666667	0.167	48.96	3E-05	0.71	1439424	1.1	399413093.6	0.00130147	0.88599	2.44060
200.600	0.080	8.3333333	0.167	48.14	3E-05	0.69	1444320	1.1	575099415.2	0.00125845	0.84554	2.35933
187.300	0.075	8.5	0.167	44.95	2E-05	0.65	1375531.2	1.2	739588785.2	0.0010971	0.80535	2.27649
180.700	0.072	8.6666667	0.167	43.37	2E-05	0.63	1353081.6	1.2	940231705.3	0.00102115	0.76566	2.19260
178.300	0.071	8.8333333	0.167	42.79	2E-05	0.62	1360785.6	1.2	1182247317	0.0009942	0.72668	2.10814
174.300	0.070	9	0.167	41.83	2E-05	0.60	1355356.8	1.2	1434637617	0.0009501	0.68858	2.02355
171.600	0.069	9.1666667	0.167	41.18	2E-05	0.59	1359072	1.2	1716659238	0.00092089	0.65148	1.93923
166.300	0.067	9.3333333	0.167	39.91	2E-05	0.58	1341043.2	1.3	1987223599	0.00086488	0.61550	1.85555
163.300	0.065	9.5	0.167	39.19	2E-05	0.56	1340366.4	1.3	2297340301	0.00083396	0.58073	1.77283
160.500	0.064	9.6666667	0.167	38.52	2E-05	0.56	1340496	1.3	2625717230	0.00080561	0.54723	1.69135
156.500	0.063	9.8333333	0.167	37.56	2E-05	0.54	1329624	1.3	2945924383	0.00076595	0.51505	1.61136
153.300	0.061	10	0.167	36.79	2E-05	0.53	1324512	1.4	3289938653	0.00073495	0.48421	1.53309
149.400	0.060	10.1666667	0.167	35.86	2E-05	0.52	1312329.6	1.4	3626024070	0.00069803	0.45474	1.45673
144.000	0.058	10.3333333	0.167	34.56	2E-05	0.50	1285632	1.4	3924455785	0.00064848	0.42663	1.38242
139.000	0.056	10.5	0.167	33.36	2E-05	0.48	1261008	1.4	4226789039	0.00060423	0.39988	1.31031
135.000	0.054	10.6666667	0.167	32.40	2E-05	0.47	1244160	1.4	4554460346	0.00056995	0.37446	1.24049
133.000	0.053	10.8333333	0.167	31.92	2E-05	0.46	1244880	1.5	4952618405	0.00055319	0.35037	1.17304
128.000	0.051	11	0.167	30.72	2E-05	0.44	1216512	1.5	5236674743	0.00051238	0.32756	1.10803
114.000	0.046	11.1666667	0.167	27.36	1E-05	0.39	1099872	1.5	5102424597	0.00040643	0.30600	1.04550

111.000	0.044	11.333333	0.167	26.64	1E-05	0.38	1086912	1.5	5414302451	0.00038532	0.28564	0.98547
109.000	0.044	11.5	0.167	26.16	1E-05	0.38	1083024	1.6	5773696060	0.00037156	0.26646	0.92794
102.000	0.041	11.666667	0.167	24.48	1E-05	0.35	1028160	1.6	5848137125	0.00032537	0.24841	0.87291
98.000	0.039	11.833333	0.167	23.52	1E-05	0.34	1001952	1.6	6063501742	0.00030035	0.23143	0.82036
90.000	0.036	12	0.167	21.60	1E-05	0.31	933120	1.6	5992475024	0.00025331	0.21548	0.77025
86.000	0.034	12.166667	0.167	20.64	1E-05	0.30	904032	1.7	6146114260	0.0002313	0.20052	0.72255
84.000	0.034	12.333333	0.167	20.16	1E-05	0.29	895104	1.7	6427901252	0.00022066	0.18650	0.67721
78.000	0.031	12.5	0.167	18.72	1E-05	0.27	842400	1.7	6376626596	0.00019027	0.17336	0.63417
88.000	0.035	12.666667	0.167	21.12	1E-05	0.30	963072	1.7	7669500264	0.00024218	0.16108	0.59337
74.000	0.030	12.833333	0.167	17.76	1E-05	0.26	820512	1.7	6861872085	0.00017125	0.14959	0.55475
68.000	0.027	13	0.167	16.32	9E-06	0.24	763776	1.8	6696326535	0.00014461	0.13886	0.51823
72.000	0.029	13.166667	0.167	17.28	9E-06	0.25	819072	1.8	7516481708	0.00016212	0.12885	0.48374
73.000	0.029	13.333333	0.167	17.52	1E-05	0.25	840960	1.8	8065665489	0.00016665	0.11951	0.45120
58.000	0.023	13.5	0.167	13.92	8E-06	0.20	676512	1.8	6771752730	0.0001052	0.11080	0.42055
65.000	0.026	13.666667	0.167	15.60	8E-06	0.22	767520	1.9	8007541521	0.00013213	0.10269	0.39170
61.300	0.025	13.833333	0.167	14.71	8E-06	0.21	732657.6	1.9	7957005769	0.00011752	0.09514	0.36457
52.400	0.021	14	0.167	12.58	7E-06	0.18	633830.4	1.9	7157238689	8.5869E-05	0.08811	0.33909
49.500	0.020	14.166667	0.167	11.88	6E-06	0.17	605880	1.9	7105502927	7.6627E-05	0.08158	0.31519
44.300	0.018	14.333333	0.167	10.63	6E-06	0.15	548611.2	1.9	6674915911	6.1373E-05	0.07550	0.29277
40.500	0.016	14.5	0.167	9.72	5E-06	0.14	507384	2.0	6398104618	5.1296E-05	0.06986	0.27178
35.100	0.014	14.666667	0.167	8.42	5E-06	0.12	444787.2	2.0	5807410159	3.8529E-05	0.06462	0.25214
30.400	0.012	14.833333	0.167	7.30	4E-06	0.11	389606.4	2.0	5262284686	2.8901E-05	0.05976	0.23378
26.200	0.010	15	0.167	6.29	3E-06	0.09	339552	2.0	4740168426	2.1467E-05	0.05525	0.21662
24.100	0.010	15.166667	0.167	5.78	3E-06	0.08	315806.4	2.1	4552881578	1.8164E-05	0.05107	0.20061
20.600	0.008	15.333333	0.167	4.94	3E-06	0.07	272908.8	2.1	4059906445	1.3271E-05	0.04719	0.18567
16.300	0.007	15.5	0.167	3.91	2E-06	0.06	218289.6	2.1	3348382287	8.309E-06	0.04359	0.17176
13.700	0.005	15.666667	0.167	3.29	2E-06	0.05	185443.2	2.1	2930901489	5.8697E-06	0.04026	0.15880
10.600	0.004	15.833333	0.167	2.54	1E-06	0.04	145008	2.1	2359765686	3.5139E-06	0.03718	0.14674
0.000	0.000	16	0.167	0.00	0	0.00	0	2.2	0	0	0.03433	0.13552
Σ	5.116		$\Sigma c_i \cdot \Delta t_i$	3069.72		$\Sigma c_i \cdot t_i \cdot \Delta t_i$	81481997	Σ	3.80113E+11	0.07944951		

T. Retención [s]	26543.78797
T. Retención [h]	7.3732744
Varianza σ^2 [S ²]	123826626.1
Varianza σ^2 Nor	0.1757471296

Varianza σ^2 Nor	0.176639
Pe	14.45561
D	0.1528
D/vL	0.069177

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

λt	1.23
λp	1.02777778

Volumen Útil [L]	57.7573164
% Trazador Recuperado	89.9282852

Cuadro 22: Cuarto ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES												
Conductividad Eléctrica [μs/cm]	Concentración [g/L]	Tiempo ti [h]	Δti [h]	ci*Ati [g*s/l]	E(t) [1/s]	E(θ) Experimental	ci*ti*Ati [g*s ² /l]	Tiempo normalizado [θ]	$(t_i - tm)^2 * C_i * \Delta t_i$	$E_i * C_i * \Delta t_i$	$E_{\theta FPD} = \frac{1}{\sqrt{4\pi\theta^3(D/vL)}} * e^{-\frac{(1-\theta)^2}{4\theta(D/vL)}}$	$E_{\theta TS} = \frac{N*(N\theta)^{N-1}}{(N-1)!} * e^{-N\theta}$
0.120	0.000	0	0	0.00	3E-08	0.00	0	0.0	0	0	0.00000	0.00000
3.020	0.001	0.5	0.500	2.17	6E-07	0.01	3913.92	0.1	985098933.6	1.3762E-06	0.00000	0.00076
8.600	0.003	1	0.500	6.19	2E-06	0.04	22291.2	0.2	2350846276	1.116E-05	0.00000	0.01948
15.620	0.006	1.5	0.500	11.25	3E-06	0.08	60730.56	0.2	3517348093	3.6815E-05	0.00044	0.10572
41.220	0.016	2	0.500	29.68	9E-06	0.20	213684.48	0.3	7488686969	0.00025638	0.01492	0.30357
64.520	0.026	2.5	0.500	46.45	1E-05	0.31	418089.6	0.4	9215738253	0.00062813	0.10163	0.61514
92.300	0.037	3	0.500	66.46	2E-05	0.45	717724.8	0.5	10029344863	0.00128548	0.31302	0.99981
149.820	0.060	3.5	0.500	107.87	3E-05	0.72	1359167	0.5	11858374247	0.0033869	0.61694	1.39563
172.220	0.069	4	0.500	124.00	4E-05	0.83	1785577	0.6	9352739058	0.00447539	0.92406	1.74280
207.620	0.083	4.5	0.500	149.49	4E-05	1.00	2421679.7	0.7	7085789433	0.00650432	1.15608	1.99884
223.740	0.089	5	0.500	161.09	5E-05	1.08	2899670.4	0.8	4165135785	0.00755354	1.27781	2.14371
210.460	0.084	5.5	0.500	151.53	4E-05	1.02	3000317.8	0.9	1635038955	0.00668348	1.29263	2.17759
196.520	0.079	6	0.500	141.49	4E-05	0.95	3056279	0.9	311955941.2	0.00582743	1.22498	2.11503
190.800	0.076	6.5	0.500	137.38	4E-05	0.92	3214598.4	1.0	13645770.3	0.00549313	1.10496	1.97837
167.000	0.067	7	0.500	120.24	3E-05	0.81	3030048	1.1	537946570.7	0.0042082	0.95946	1.79216
153.200	0.061	7.5	0.500	110.30	3E-05	0.74	2978208	1.2	1690800255	0.00354145	0.80856	1.57923
132.760	0.053	8	0.500	95.59	3E-05	0.64	2752911.4	1.2	3122179772	0.00265949	0.66533	1.35851
125.200	0.050	8.5	0.500	90.14	3E-05	0.61	2758406.4	1.3	5091131756	0.00236522	0.53702	1.14419
104.200	0.042	9	0.500	75.02	2E-05	0.50	2430777.6	1.4	6510010652	0.00163832	0.42667	0.94581
83.600	0.033	9.5	0.500	60.19	2E-05	0.40	2058566.4	1.5	7436540033	0.00105457	0.33462	0.76887
73.200	0.029	10	0.500	52.70	2E-05	0.35	1897344	1.6	8791111115	0.00080851	0.25959	0.61574
65.400	0.026	10.5	0.500	47.09	1E-05	0.32	1779926.4	1.6	10196256626	0.00064538	0.19956	0.48649
57.500	0.023	11	0.500	41.40	1E-05	0.28	1639440	1.7	11291883514	0.00049888	0.15224	0.37968
46.300	0.019	11.5	0.500	33.34	1E-05	0.22	1380110.4	1.8	11182408461	0.00032346	0.11538	0.29303
26.300	0.011	12	0.500	18.94	6E-06	0.13	818035.2	1.9	7661884828	0.00010437	0.08695	0.22386
12.300	0.005	12.5	0.500	8.86	3E-06	0.06	398520	1.9	4253312172	2.2828E-05	0.06522	0.16941
10.200	0.004	13	0.500	7.34	2E-06	0.05	343699.2	2.0	4130333489	1.5699E-05	0.04871	0.12711
8.500	0.003	13.5	0.500	6.12	2E-06	0.04	297432	2.1	3984265979	1.0902E-05	0.03625	0.09461
5.200	0.002	14	0.500	3.74	1E-06	0.03	188697.6	2.2	2793467520	4.0801E-06	0.02689	0.06989
3.600	0.001	14.5	0.500	2.59	8E-07	0.02	135302.4	2.3	2197220438	1.9555E-06	0.01989	0.05128
Σ	1.060		Σci*Ati	1908.66		Σci*ti*Ati	44061149	Σ	1.5888E+11	0.06004686		

T. Retención [s]	23084.83093
T. Retención [h]	6.41245304
Varianza σ ² [S ²]	83241801.04
Varianza σ ² Nor	0.1562025329

Varianza σ ² Nor	0.15621
Pe	16.0034
D	0.1380
D/vL	0.06249

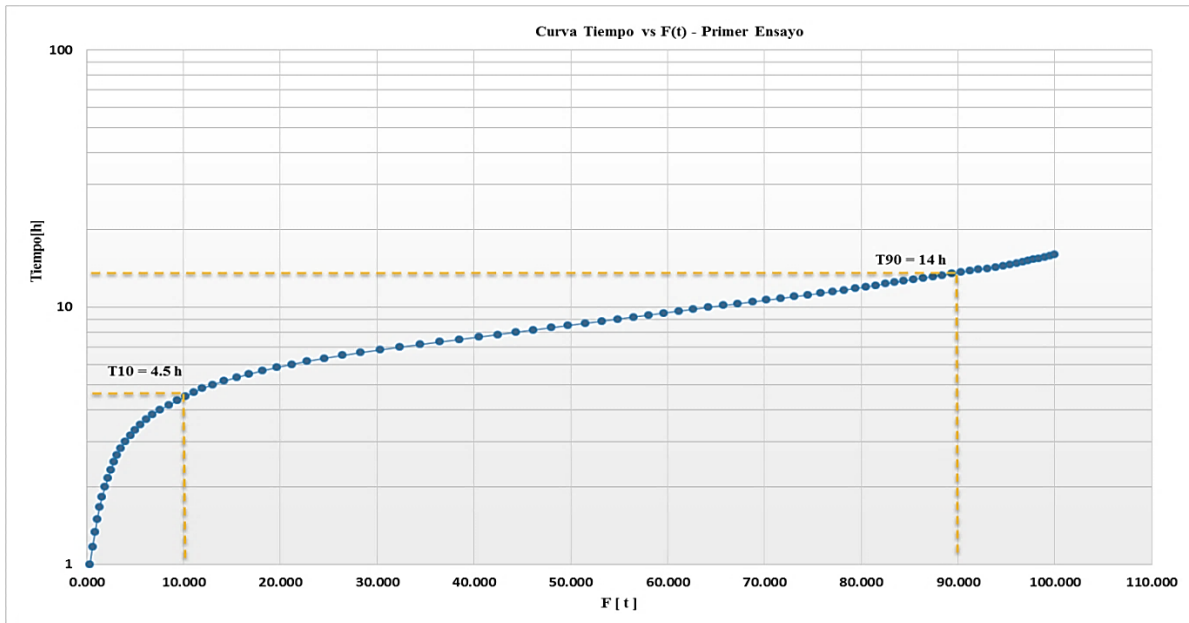
v [m/d]	1.35
L [m]	1.636

λt	1.07
λp	0.83333333

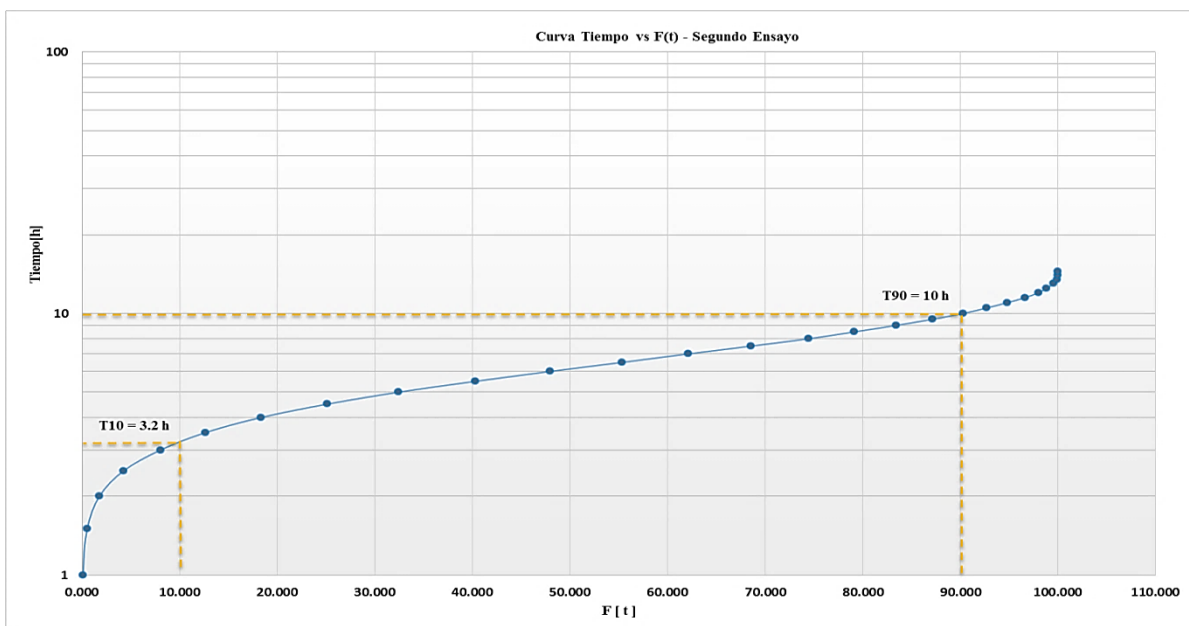
Volumen Útil [L]	50.2308821
% Trazador Recuperado	65.7330499

ANEXO E. Cálculo del Índice de Morril en el montaje a escala laboratorio

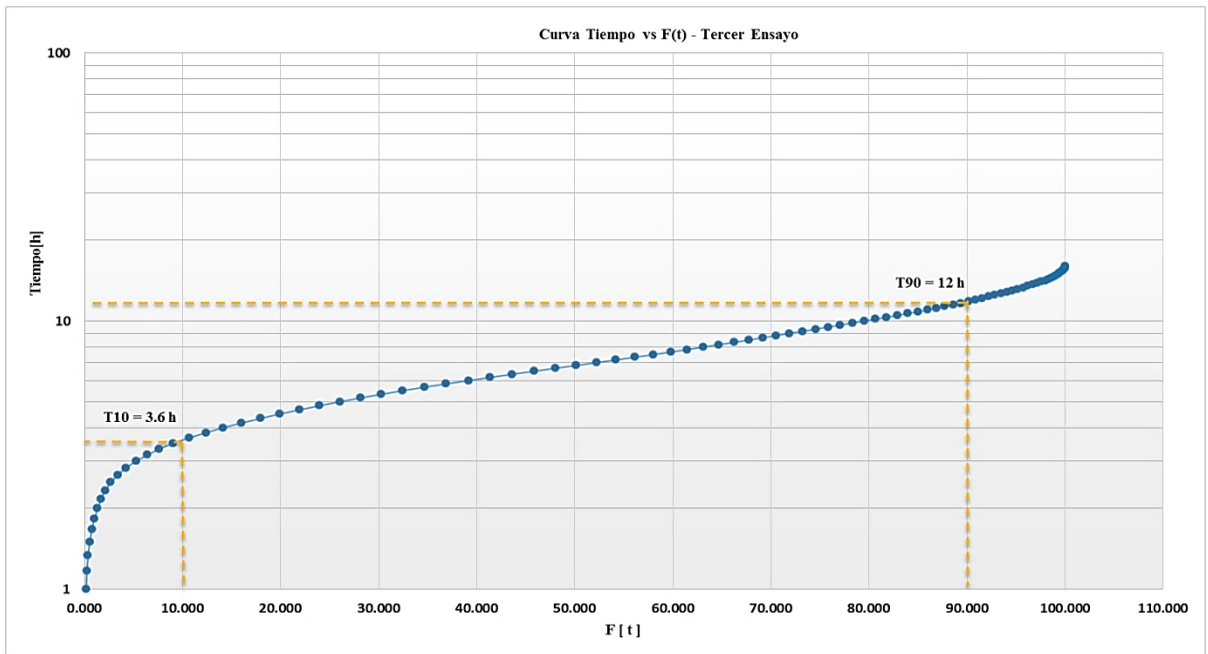
Gráfica 19: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del primer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



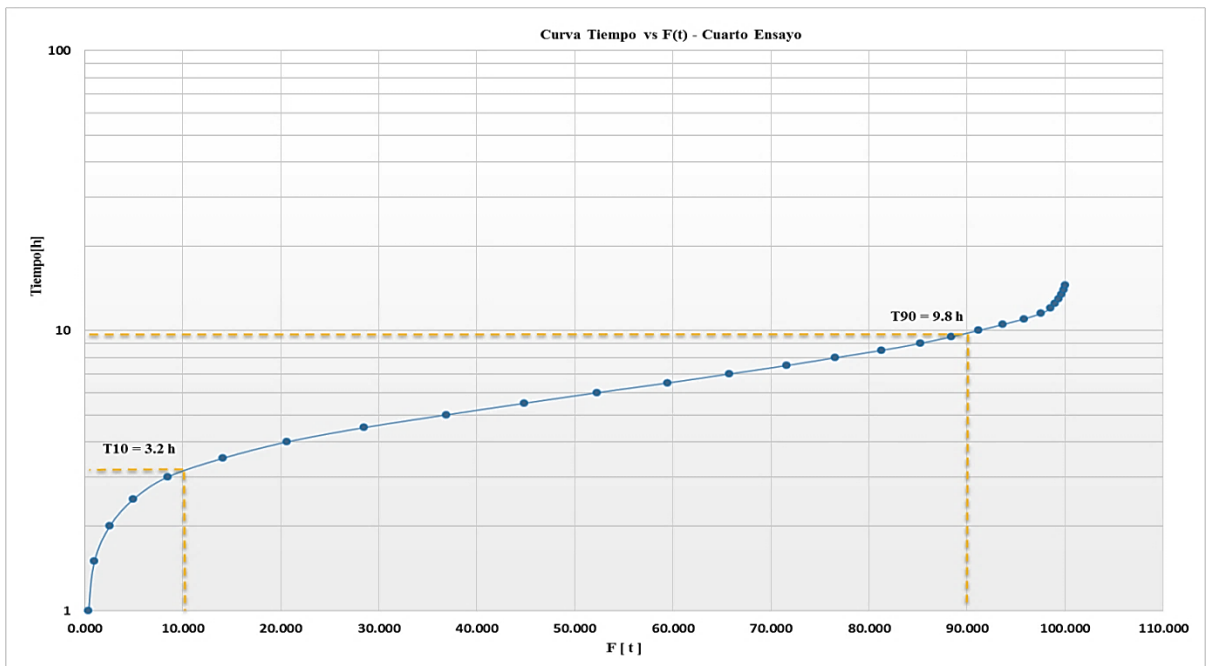
Gráfica 20: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del segundo ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



Gráfica 21: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del tercer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



Gráfica 22: Tiempo Vs porcentaje de trazador que pasa del cuarto ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



**ANEXO F. Aplicación de la metodología de Wolf-Resnick en el montaje a
escala laboratorio**

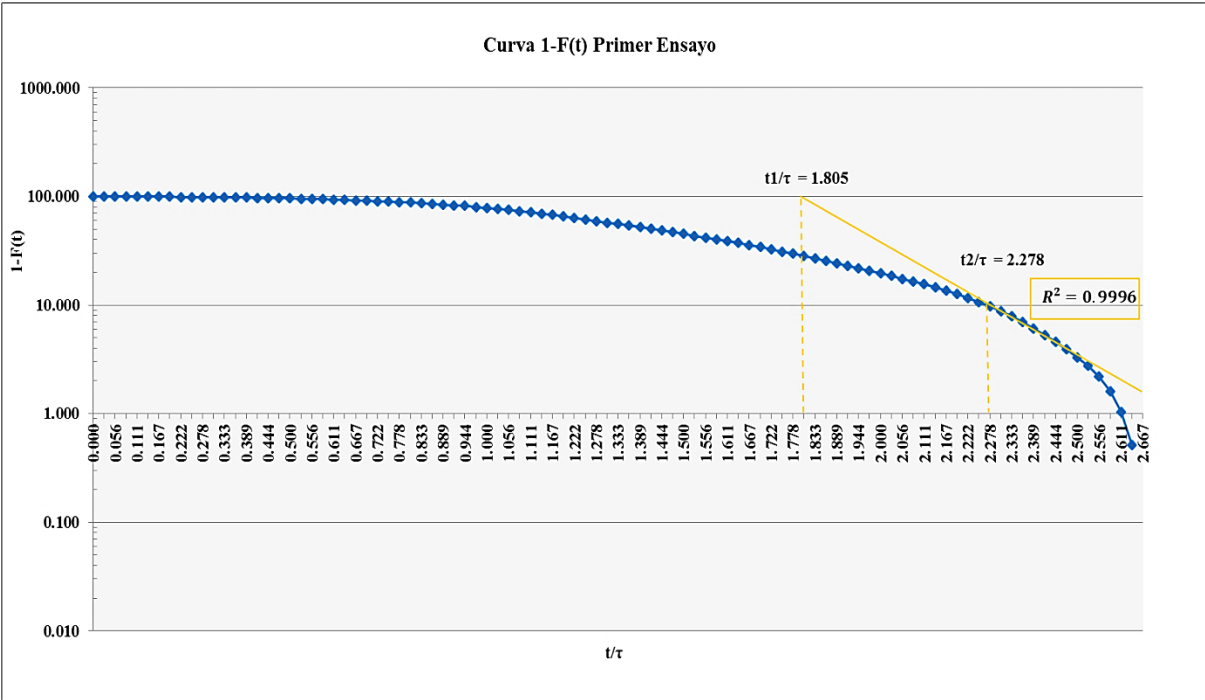
Cuadro 23: Primer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.000	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
0.700	0.000	0.16667	0.028	0.000	0.000	0.005	99.995
1.100	0.000	0.33333	0.056	0.000	0.001	0.014	99.986
2.100	0.001	0.5	0.083	0.001	0.002	0.030	99.970
5.000	0.002	0.66667	0.111	0.002	0.004	0.068	99.932
11.200	0.004	0.83333	0.139	0.004	0.008	0.154	99.846
24.300	0.010	1	0.167	0.010	0.018	0.341	99.659
34.200	0.014	1.16667	0.194	0.014	0.031	0.603	99.397
34.800	0.014	1.33333	0.222	0.014	0.045	0.870	99.130
28.700	0.011	1.5	0.250	0.011	0.057	1.090	98.910
31.700	0.013	1.66667	0.278	0.013	0.070	1.333	98.667
35.200	0.014	1.83333	0.306	0.014	0.084	1.603	98.397
38.400	0.015	2	0.333	0.015	0.099	1.898	98.102
39.500	0.016	2.16667	0.361	0.016	0.115	2.201	97.799
39.900	0.016	2.33333	0.389	0.016	0.131	2.507	97.493
38.200	0.015	2.5	0.417	0.015	0.146	2.800	97.200
40.000	0.016	2.66667	0.444	0.016	0.162	3.106	96.894
55.500	0.022	2.83333	0.472	0.022	0.184	3.532	96.468
57.900	0.023	3	0.500	0.023	0.207	3.976	96.024
69.600	0.028	3.16667	0.528	0.028	0.235	4.510	95.490
69.400	0.028	3.33333	0.556	0.028	0.263	5.042	94.958
70.400	0.028	3.5	0.583	0.028	0.291	5.582	94.418
73.300	0.029	3.66667	0.611	0.029	0.320	6.145	93.855
85.700	0.034	3.83333	0.639	0.034	0.355	6.802	93.198
105.400	0.042	4	0.667	0.042	0.397	7.611	92.389
115.000	0.046	4.16667	0.694	0.046	0.443	8.493	91.507
113.300	0.045	4.33333	0.722	0.045	0.488	9.362	90.638
109.400	0.044	4.5	0.750	0.044	0.532	10.201	89.799
112.000	0.045	4.66667	0.778	0.045	0.577	11.060	88.940
115.000	0.046	4.83333	0.806	0.046	0.623	11.942	88.058
140.600	0.056	5	0.833	0.056	0.679	13.020	86.980
153.400	0.061	5.16667	0.861	0.061	0.740	14.197	85.803
169.500	0.068	5.33333	0.889	0.068	0.808	15.497	84.503
170.600	0.068	5.5	0.917	0.068	0.876	16.806	83.194
177.000	0.071	5.66667	0.944	0.071	0.947	18.163	81.837
193.300	0.077	5.83333	0.972	0.077	1.025	19.646	80.354
203.300	0.081	6	1.000	0.081	1.106	21.205	78.795
205.200	0.082	6.16667	1.028	0.082	1.188	22.779	77.221
229.500	0.092	6.33333	1.056	0.092	1.280	24.540	75.460
243.600	0.097	6.5	1.083	0.097	1.377	26.408	73.592

249.500	0.100	6.66667	1.111	0.100	1.477	28.322	71.678
260.200	0.104	6.83333	1.139	0.104	1.581	30.318	69.682
267.200	0.107	7	1.167	0.107	1.688	32.367	67.633
270.000	0.108	7.16667	1.194	0.108	1.796	34.438	65.562
268.200	0.107	7.33333	1.222	0.107	1.903	36.496	63.504
265.600	0.106	7.5	1.250	0.106	2.009	38.533	61.467
260.700	0.104	7.66667	1.278	0.104	2.114	40.532	59.468
253.300	0.101	7.83333	1.306	0.101	2.215	42.475	57.525
242.500	0.097	8	1.333	0.097	2.312	44.335	55.665
239.600	0.096	8.16667	1.361	0.096	2.408	46.173	53.827
235.400	0.094	8.33333	1.389	0.094	2.502	47.979	52.021
231.700	0.093	8.5	1.417	0.093	2.595	49.756	50.244
225.500	0.090	8.66667	1.444	0.090	2.685	51.486	48.514
223.600	0.089	8.83333	1.472	0.089	2.774	53.201	46.799
214.700	0.086	9	1.500	0.086	2.860	54.848	45.152
211.300	0.085	9.16667	1.528	0.085	2.945	56.468	43.532
208.600	0.083	9.33333	1.556	0.083	3.028	58.068	41.932
200.300	0.080	9.5	1.583	0.080	3.108	59.605	40.395
200.800	0.080	9.66667	1.611	0.080	3.189	61.145	38.855
201.700	0.081	9.83333	1.639	0.081	3.269	62.692	37.308
203.000	0.081	10	1.667	0.081	3.351	64.249	35.751
200.600	0.080	10.1667	1.694	0.080	3.431	65.788	34.212
195.200	0.078	10.3333	1.722	0.078	3.509	67.285	32.715
195.700	0.078	10.5	1.750	0.078	3.587	68.786	31.214
190.300	0.076	10.6667	1.778	0.076	3.663	70.246	29.754
187.400	0.075	10.8333	1.806	0.075	3.738	71.683	28.317
183.600	0.073	11	1.833	0.073	3.812	73.092	26.908
179.200	0.072	11.1667	1.861	0.072	3.883	74.466	25.534
173.900	0.070	11.3333	1.889	0.070	3.953	75.800	24.200
163.700	0.065	11.5	1.917	0.065	4.018	77.056	22.944
155.200	0.062	11.6667	1.944	0.062	4.080	78.246	21.754
150.200	0.060	11.8333	1.972	0.060	4.141	79.398	20.602
141.000	0.056	12	2.000	0.056	4.197	80.480	19.520
133.700	0.053	12.1667	2.028	0.053	4.250	81.505	18.495
130.400	0.052	12.3333	2.056	0.052	4.303	82.505	17.495
124.300	0.050	12.5	2.083	0.050	4.352	83.459	16.541
125.300	0.050	12.6667	2.111	0.050	4.402	84.420	15.580
127.900	0.051	12.8333	2.139	0.051	4.454	85.401	14.599
133.000	0.053	13	2.167	0.053	4.507	86.421	13.579
130.000	0.052	13.1667	2.194	0.052	4.559	87.418	12.582
127.700	0.051	13.3333	2.222	0.051	4.610	88.398	11.602

125.000	0.050	13.5	2.250	0.050	4.660	89.357	10.643
126.000	0.050	13.6667	2.278	0.050	4.710	90.323	9.677
118.000	0.047	13.8333	2.306	0.047	4.757	91.228	8.772
117.200	0.047	14	2.333	0.047	4.804	92.127	7.873
116.000	0.046	14.1667	2.361	0.046	4.851	93.017	6.983
114.000	0.046	14.3333	2.389	0.046	4.896	93.891	6.109
104.000	0.042	14.5	2.417	0.042	4.938	94.689	5.311
90.000	0.036	14.6667	2.444	0.036	4.974	95.379	4.621
87.400	0.035	14.8333	2.472	0.035	5.009	96.050	3.950
83.000	0.033	15	2.500	0.033	5.042	96.686	3.314
73.000	0.029	15.1667	2.528	0.029	5.071	97.246	2.754
73.000	0.029	15.3333	2.556	0.029	5.100	97.806	2.194
75.000	0.030	15.5	2.583	0.030	5.130	98.382	1.618
76.000	0.030	15.6667	2.611	0.030	5.161	98.965	1.035
68.000	0.027	15.8333	2.639	0.027	5.188	99.486	0.514
67.000	0.027	16	2.667	0.027	5.215	100.000	0.000

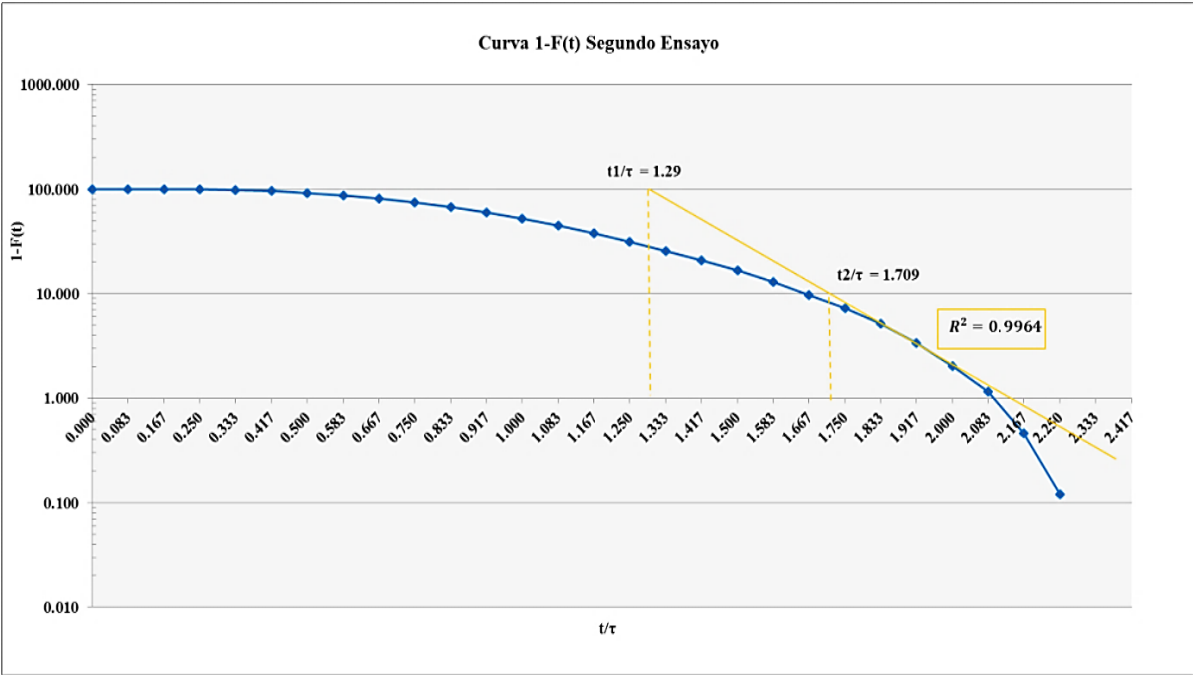
Gráfica 23: Curva 1-F(t) Vs t/τ del primer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



Cuadro 24: Segundo ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.300	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
0.700	0.000	0.5	0.083	0.000	0.000	0.012	99.988
3.200	0.001	1	0.167	0.001	0.001	0.099	99.901
14.300	0.006	1.5	0.250	0.006	0.007	0.521	99.479
42.100	0.017	2	0.333	0.017	0.024	1.779	98.221
82.100	0.033	2.5	0.417	0.033	0.056	4.242	95.758
125.400	0.050	3	0.500	0.050	0.106	8.009	91.991
153.500	0.061	3.5	0.583	0.061	0.168	12.621	87.379
190.000	0.076	4	0.667	0.076	0.244	18.333	81.667
226.100	0.090	4.5	0.750	0.090	0.334	25.131	74.869
242.900	0.097	5	0.833	0.097	0.431	32.435	67.565
261.100	0.104	5.5	0.917	0.104	0.535	40.287	59.713
254.700	0.102	6	1.000	0.102	0.637	47.947	52.053
245.900	0.098	6.5	1.083	0.098	0.735	55.341	44.659
224.300	0.090	7	1.167	0.090	0.825	62.085	37.915
214.900	0.086	7.5	1.250	0.086	0.911	68.546	31.454
195.100	0.078	8	1.333	0.078	0.989	74.411	25.589
156.500	0.063	8.5	1.417	0.062	1.051	79.114	20.886
143.300	0.057	9	1.500	0.057	1.108	83.420	16.580
123.700	0.049	9.5	1.583	0.049	1.158	87.135	12.865
105.200	0.042	10	1.667	0.042	1.200	90.293	9.707
80.800	0.032	10.5	1.750	0.032	1.232	92.717	7.283
70.000	0.028	11	1.833	0.028	1.260	94.815	5.185
60.700	0.024	11.5	1.917	0.024	1.284	96.634	3.366
45.300	0.018	12	2.000	0.018	1.302	97.989	2.011
28.800	0.012	12.5	2.083	0.011	1.313	98.847	1.153
23.400	0.009	13	2.167	0.009	1.322	99.542	0.458
11.500	0.005	13.5	2.250	0.004	1.327	99.880	0.120
4.500	0.002	14	2.333	0.002	1.329	100	0.000
0.100	0.000	14.5	2.417	0.000	1.329	100	0.000

Gráfica 24: Curva 1-F(t) Vs t/τ del segundo ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



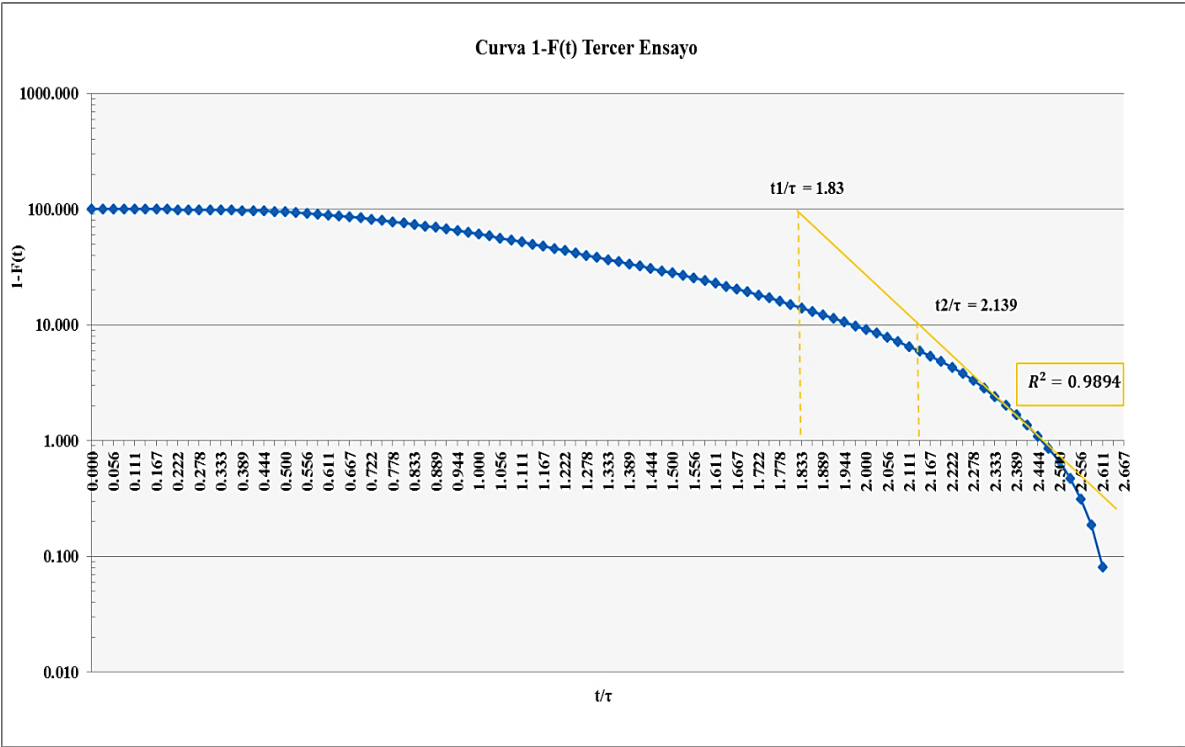
Cuadro 25: Tercer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(c-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.100	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
0.700	0.000	0.1666667	0.028	0.000	0.000	0.005	99.995
1.000	0.000	0.3333333	0.056	0.000	0.001	0.012	99.988
2.500	0.001	0.5	0.083	0.001	0.002	0.031	99.969
4.300	0.002	0.6666667	0.111	0.002	0.003	0.063	99.937
5.200	0.002	0.8333333	0.139	0.002	0.005	0.103	99.897
7.500	0.003	1	0.167	0.003	0.008	0.161	99.839
10.300	0.004	1.1666667	0.194	0.004	0.012	0.241	99.759
14.200	0.006	1.3333333	0.222	0.006	0.018	0.351	99.649
22.700	0.009	1.5	0.250	0.009	0.027	0.528	99.472
26.500	0.011	1.6666667	0.278	0.011	0.038	0.735	99.265
35.200	0.014	1.8333333	0.306	0.014	0.052	1.009	98.991
40.600	0.016	2	0.333	0.016	0.068	1.326	98.674
46.000	0.018	2.1666667	0.361	0.018	0.086	1.685	98.315
55.600	0.022	2.3333333	0.389	0.022	0.108	2.120	97.880
70.900	0.028	2.5	0.417	0.028	0.137	2.674	97.326
91.600	0.037	2.6666667	0.444	0.037	0.173	3.389	96.611
108.400	0.043	2.8333333	0.472	0.043	0.217	4.237	95.763
128.700	0.051	3	0.500	0.051	0.268	5.243	94.757
147.600	0.059	3.1666667	0.528	0.059	0.327	6.397	93.603
157.600	0.063	3.3333333	0.556	0.063	0.390	7.629	92.371
180.900	0.072	3.5	0.583	0.072	0.462	9.044	90.956
207.600	0.083	3.6666667	0.611	0.083	0.545	10.667	89.333
216.800	0.087	3.8333333	0.639	0.087	0.632	12.363	87.637
227.700	0.091	4	0.667	0.091	0.723	14.144	85.856
240.900	0.096	4.1666667	0.694	0.096	0.819	16.028	83.972
247.100	0.099	4.3333333	0.722	0.099	0.918	17.960	82.040
249.600	0.100	4.5	0.750	0.100	1.018	19.913	80.087
258.400	0.103	4.6666667	0.778	0.103	1.121	21.934	78.066
260.000	0.104	4.8333333	0.806	0.104	1.225	23.967	76.033
262.000	0.105	5	0.833	0.105	1.330	26.016	73.984
268.000	0.107	5.1666667	0.861	0.107	1.437	28.112	71.888
273.000	0.109	5.3333333	0.889	0.109	1.546	30.247	69.753
279.300	0.112	5.5	0.917	0.112	1.658	32.432	67.568
283.500	0.113	5.6666667	0.944	0.113	1.771	34.649	65.351
286.200	0.114	5.8333333	0.972	0.114	1.886	36.888	63.112
287.800	0.115	6	1.000	0.115	2.001	39.139	60.861
287.200	0.115	6.1666667	1.028	0.115	2.116	41.385	58.615
285.800	0.114	6.3333333	1.056	0.114	2.230	43.621	56.379
282.200	0.113	6.5	1.083	0.113	2.343	45.828	54.172

277.700	0.111	6.6666667	1.111	0.111	2.454	48.000	52.000
274.600	0.110	6.8333333	1.139	0.110	2.564	50.147	49.853
262.000	0.105	7	1.167	0.105	2.668	52.197	47.803
257.600	0.103	7.1666667	1.194	0.103	2.771	54.211	45.789
248.700	0.099	7.3333333	1.222	0.099	2.871	56.156	43.844
238.800	0.096	7.5	1.250	0.095	2.966	58.024	41.976
226.300	0.091	7.6666667	1.278	0.090	3.057	59.794	40.206
214.100	0.086	7.8333333	1.306	0.086	3.142	61.468	38.532
209.500	0.084	8	1.333	0.084	3.226	63.107	36.893
204.000	0.082	8.1666667	1.361	0.082	3.308	64.702	35.298
200.600	0.080	8.3333333	1.389	0.080	3.388	66.271	33.729
187.300	0.075	8.5	1.417	0.075	3.463	67.735	32.265
180.700	0.072	8.6666667	1.444	0.072	3.535	69.148	30.852
178.300	0.071	8.8333333	1.472	0.071	3.606	70.543	29.457
174.300	0.070	9	1.500	0.070	3.676	71.906	28.094
171.600	0.069	9.1666667	1.528	0.069	3.745	73.248	26.752
166.300	0.067	9.3333333	1.556	0.066	3.811	74.548	25.452
163.300	0.065	9.5	1.583	0.065	3.876	75.825	24.175
160.500	0.064	9.6666667	1.611	0.064	3.941	77.080	22.920
156.500	0.063	9.8333333	1.639	0.063	4.003	78.304	21.696
153.300	0.061	10	1.667	0.061	4.064	79.502	20.498
149.400	0.060	10.166667	1.694	0.060	4.124	80.670	19.330
144.000	0.058	10.333333	1.722	0.058	4.182	81.796	18.204
139.000	0.056	10.5	1.750	0.056	4.237	82.883	17.117
135.000	0.054	10.666667	1.778	0.054	4.291	83.939	16.061
133.000	0.053	10.833333	1.806	0.053	4.344	84.978	15.022
128.000	0.051	11	1.833	0.051	4.396	85.979	14.021
114.000	0.046	11.166667	1.861	0.046	4.441	86.870	13.130
111.000	0.044	11.333333	1.889	0.044	4.485	87.738	12.262
109.000	0.044	11.5	1.917	0.044	4.529	88.590	11.410
102.000	0.041	11.666667	1.944	0.041	4.570	89.387	10.613
98.000	0.039	11.833333	1.972	0.039	4.609	90.153	9.847
90.000	0.036	12	2.000	0.036	4.645	90.857	9.143
86.000	0.034	12.166667	2.028	0.034	4.679	91.529	8.471
84.000	0.034	12.333333	2.056	0.034	4.713	92.185	7.815
78.000	0.031	12.5	2.083	0.031	4.744	92.795	7.205
88.000	0.035	12.666667	2.111	0.035	4.779	93.482	6.518
74.000	0.030	12.833333	2.139	0.030	4.809	94.061	5.939
68.000	0.027	13	2.167	0.027	4.836	94.592	5.408
72.000	0.029	13.166667	2.194	0.029	4.865	95.154	4.846
73.000	0.029	13.333333	2.222	0.029	4.894	95.725	4.275

58.000	0.023	13.5	2.250	0.023	4.917	96.178	3.822
65.000	0.026	13.666667	2.278	0.026	4.943	96.686	3.314
61.300	0.025	13.833333	2.306	0.024	4.967	97.165	2.835
52.400	0.021	14	2.333	0.021	4.988	97.574	2.426
49.500	0.020	14.166667	2.361	0.020	5.008	97.960	2.040
44.300	0.018	14.333333	2.389	0.018	5.026	98.306	1.694
40.500	0.016	14.5	2.417	0.016	5.042	98.622	1.378
35.100	0.014	14.666667	2.444	0.014	5.056	98.896	1.104
30.400	0.012	14.833333	2.472	0.012	5.068	99.133	0.867
26.200	0.010	15	2.500	0.010	5.078	99.337	0.663
24.100	0.010	15.166667	2.528	0.010	5.088	99.525	0.475
20.600	0.008	15.333333	2.556	0.008	5.096	99.685	0.315
16.300	0.007	15.5	2.583	0.006	5.103	99.812	0.188
13.700	0.005	15.666667	2.611	0.005	5.108	99.919	0.081
10.600	0.004	15.833333	2.639	0.004	5.112	100.000	0.000
0.000	0.000	16	2.667	0.000	5.112	100.000	0.000

Gráfica 25: Curva 1-F(t) Vs t/τ del tercer ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.



Cuadro 26: Cuarto ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

ENSAYO DE TRAZADORES							
Conductividad Eléctrica [$\mu\text{s}/\text{cm}$]	Concentración (C) [g/L]	Tiempo t_i [h]	t/τ	C-Co	$\Sigma(C-Co)$	F(t)	1-F(t)
0.120	0.000	0	0.000	0.000	0.000	0.000	100.000
3.020	0.001	0.5	0.083	0.001	0.001	0.110	99.890
8.600	0.003	1	0.167	0.003	0.005	0.430	99.570
15.620	0.006	1.5	0.250	0.006	0.011	1.015	98.985
41.220	0.016	2	0.333	0.016	0.027	2.568	97.432
64.520	0.026	2.5	0.417	0.026	0.053	5.000	95.000
92.300	0.037	3	0.500	0.037	0.090	8.482	91.518
149.820	0.060	3.5	0.583	0.060	0.150	14.137	85.863
172.220	0.069	4	0.667	0.069	0.219	20.637	79.363
207.620	0.083	4.5	0.750	0.083	0.302	28.475	71.525
223.740	0.089	5	0.833	0.089	0.391	36.922	63.078
210.460	0.084	5.5	0.917	0.084	0.475	44.867	55.133
196.520	0.079	6	1.000	0.079	0.554	52.285	47.715
190.800	0.076	6.5	1.083	0.076	0.630	59.488	40.512
167.000	0.067	7	1.167	0.067	0.697	65.791	34.209
153.200	0.061	7.5	1.250	0.061	0.758	71.573	28.427
132.760	0.053	8	1.333	0.053	0.811	76.583	23.417
125.200	0.050	8.5	1.417	0.050	0.861	81.308	18.692
104.200	0.042	9	1.500	0.042	0.903	85.239	14.761
83.600	0.033	9.5	1.583	0.033	0.936	88.393	11.607
73.200	0.029	10	1.667	0.029	0.965	91.153	8.847
65.400	0.026	10.5	1.750	0.026	0.991	93.619	6.381
57.500	0.023	11	1.833	0.023	1.014	95.786	4.214
46.300	0.019	11.5	1.917	0.018	1.033	97.530	2.470
26.300	0.011	12	2.000	0.010	1.043	98.519	1.481
12.300	0.005	12.5	2.083	0.005	1.048	98.979	1.021
10.200	0.004	13	2.167	0.004	1.052	99.360	0.640
8.500	0.003	13.5	2.250	0.003	1.056	99.677	0.323
5.200	0.002	14	2.333	0.002	1.058	99.869	0.131
3.600	0.001	14.5	2.417	0.001	1.059	100.000	0.000

Gráfica 26: Curva 1-F(t) Vs t/τ del cuarto ensayo de trazadores en el reactor a escala laboratorio.

