



UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS
PRIMER CLAUSTRO UNIVERSITARIO DE COLOMBIA

**DETERMINACIÓN DE LAS TASAS DE REAIREACIÓN (K_a) EVALUADAS POR
ECUACIONES EMPÍRICAS Y SEMI-EMPÍRICAS PARA EL ESTUDIO DE
CONTAMINANTES POR MEDIO DE TRAZADORES DEL RÍO PALOMINO, LA
GUAJIRA**

AUTOR(ES):

GERALDINE MOLINA MEDINA

DAVID SANTIAGO SIERRA UMAÑA

PROYECTO DE GRADO

DIRECTOR

Carlos Andrés Peña Guzmán

UNIVERSIDAD SANTO TOMÁS

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL

BOGOTÁ D.C

2019

Nota de aceptación:

_____ Firma del Director

_____ Firma del Jurado

BOGOTÁ D.C. MAYO DE 2019

Tabla de contenido

RESUMEN	4
ABSTRACT	4
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	5
JUSTIFICACIÓN	6
OBJETIVOS	7
Objetivo General	7
Objetivos Específicos	7
MARCO TEÓRICO.....	8
COEFICIENTES DE REAIREACIÓN.....	8
TRANSPORTE DE SOLUTOS	12
TRAZADORES	13
MODELOS DE TRANSPORTE DE SOLUTOS	14
METODOLOGÍA.....	15
Fase 1. Caracterización de la cuenca del río Palomino	17
Fase 1.2. Muestreo y pruebas iniciales	19
Fase 1.3. Determinación geomorfológica del río Palomino.....	20
Fase 1.4. Simulación de muestreos.....	23
Fase 2. Cálculo y comparación de tasas de reaireación por ecuaciones empíricas y semi empíricas	25
Fase 2.1. Análisis de solutos	26
Fase 3. Diseño y construcción del reactor	26
Fase 3.1 Cálculo de tasas de reaireación mediante intercambio gaseoso	29
ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	30
Fase 1.2. Muestreo y pruebas iniciales	30
Fase 1.4. Simulación de muestreos.....	37
Fase 2. Cálculo de ecuaciones semi empíricas.....	43
Fase 2.1. Análisis de solutos	48
Fase 3. Diseño y construcción del reactor	51
Fase 3.1. Cálculo de tasas de reaireación mediante intercambio gaseoso	51
CONCLUSIONES.....	53
REFERENCIAS.....	54
ANEXOS	¡Error! Marcador no definido.

RESUMEN

Los coeficientes de reaeración permiten explicar la importancia que tiene la presencia de oxígeno disuelto en el recurso hídrico, su relación con la ausencia de oxígeno atmosférico y cómo se desarrollan los procesos de mezcla y autodepuración del agua al evaluar las características hidráulicas de un río y sus respectivos parámetros determinantes para la modelación de calidad hídrica. El método de trazadores se desarrolla a partir de la inyección de sustancias conservativas que se encargan de recoger información de los contaminantes presentes en el agua, y por tanto entablar una relación con los coeficientes de reaeración calculados para posteriormente ejercer un análisis de los resultados obtenidos y sus principales condicionales a la calidad del agua del Río Palomino.

El presente proyecto tiene como objetivo principal la determinación y comparación de las tasas de reaeración (K_a) por medio de ecuaciones empíricas y semi empíricas por el método de trazadores, además de un análisis de solutos con ayuda del método ADZ, y posteriormente una comparación de estas tasas con la tasa de reaeración obtenida por experimento gaseoso para un tramo determinado del Río Palomino, La Guajira.

Se obtuvieron valores de K_a de $1,5701 \text{ d}^{-1}$ por la ecuación de O'Connor – Dobbins (1958), y para el experimento de intercambio gaseoso igual a $1,653 \text{ d}^{-1}$. La selección de estas tasas se da por el ajuste al tubo de corriente y las condiciones del río.

Palabras Clave: Tasas de reaeración, trazadores, oxígeno disuelto, contaminantes, modelación.

ABSTRACT

The re-aeration coefficients explain the importance the presence of dissolved oxygen in the water resource, it's relation to the absence of atmospheric oxygen and how the processes of mixing and self-cleaning of the water are developed when evaluating the hydraulic characteristics of a river and its respective determining parameters for water quality modeling. However, the tracer method is developed from the injection of conservative substances that are responsible for collecting information on contaminants present in the water, and therefore establish a relationship with the re-aeration coefficients calculated to subsequently perform an analysis of the Results obtained and their main conditionals to the water quality of the Palomino River.

The main objective of this paper is the determination and comparison of re-aeration rates (K_a) by means of empirical and semi-empirical equations by the tracer method, as well as a solute analysis with the help of the ADZ method, and subsequently a comparison of these rates with the rate of re-aeration obtained by a gaseous experiment for a determined section of the Palomino River, La Guajira.

Ka values of 1.5701 d⁻¹ were obtained by the O'Connor-Dobbins equation (1958), and for the gaseous exchange experiment equal to 1.653 d⁻¹. The selection of these rates is given by the adjustment to the current pipe and river conditions.

Keywords: Rates of reaeration, tracers, dissolved oxygen, contaminants, modelling.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Una de las principales causas de alteración de las condiciones habituales del agua deriva en las actividades cotidianas que realiza el hombre generando subproductos, los cuales son el resultado de la contaminación presente en los cuerpos hídricos [1]. Todo esto se evidencia a nivel mundial debido a los grandes vertimientos y descargas que se dan a nivel industrial lo que ocasiona la saturación de materia orgánica en el agua [2], y por tanto se da origen a un proceso de eutrofización en estos cuerpos lo que produce disminución en el oxígeno disuelto, disminución de especies y de los ecosistemas acuáticos [3]. Por tanto, la suma de estos problemas se ven como resultado a nivel mundial alterando la función del agua como fuente de abastecimiento para uso y consumo de los seres humanos [4]–[6].

Se evidencian serios riesgos a nivel ambiental y de salud teniendo en cuenta los problemas mencionados anteriormente, todos estos como consecuencia de la presencia de elementos como el fósforo y nitrógeno [5] [6]. En un territorio como Colombia al ser un país con alta demanda de agua [7] y presentar varios cuerpos de agua importantes para el abastecimiento de las poblaciones así como el desarrollo de los diferentes ecosistemas presentes en el territorio, se observan los problemas mencionados a nivel global y en específico la contaminación por presencia de metales pesados, acumulación de materia orgánica no biodegradable, arrastre de materiales que ponen en peligro las actividades naturales en las cuencas hidrográficas[8] y en algunos casos disminución del oxígeno disuelto.[4]

A partir de esto, se han realizado estudios en Colombia que abordan la importancia del recurso hídrico como fuente benéfica para la comunidad, además de determinar cuáles han sido las principales causas para su degradación. Según el estudio nacional del agua (ENA 2014) entregado por el IDEAM, se concluye que Colombia tiene grandes falencias en el cuidado del agua producto de la contaminación industrial, vulnerabilidad al desabastecimiento y vulnerabilidad a la variación climática [7], adicional a esto se obtienen datos del ENA que arrojan 18 subzonas hidrográficas como las principales afectadas, las cuales se ubican en las cuencas del Magdalena-Cauca y Caribe respectivamente, en los que se asientan 110 municipios con alrededor de 17'500.000 de habitantes del total poblacional en el país.[9]

Uno de los departamentos con mayor contaminación y desabastecimiento del recurso hídrico es La Guajira, dado por las diferentes actividades económicas en torno al sector hídrico como el turismo, minería (legal e ilegal), ganadería extensiva y ausencia de sistemas de acueducto y alcantarillado. [10]

Debido a esto en La Guajira y en especial el corregimiento de Palomino por actividades de turismo lo que posiblemente sea un riesgo para la salud de los habitantes y turistas así como afectación a los ecosistemas que allí habitan.

JUSTIFICACIÓN

La medición y evaluación de los diferentes parámetros para estimar la calidad del agua en los ríos es importante ya que de esta depende la vida y los ciclos naturales para cada uno de los organismos que allí habitan [11]. Parámetros que resultan ser indicadores de calidad del agua como pH, temperatura, turbiedad y oxígeno disuelto como uno de los más cruciales en la determinación de un nivel óptimo para los cuerpos de agua.[3], [12]

Para Cox es determinante la variabilidad de oxígeno disuelto que se presenta en los cuerpos de agua ya que esto representa una fuente de producción de oxígeno para la fotosíntesis, mejor aireación en estructuras hidráulicas [3], es por esto que se hallan diferentes modelos matemáticos por los cuales se determina la cantidad de OD, ya que este parámetro depende de las condiciones de cada río[13], al igual que la implementación de programas de monitoreo los cuales son el medio por el cual se usan las herramientas de los modelos para determinar los niveles de OD y calidad del agua.[14]

La importancia del oxígeno disuelto en los cuerpos de agua es vital para la estimación de las tasas de reaeración (K_a) las cuales al igual que las concentraciones de OD varían para cada cuerpo de agua [15], es así que se proponen diferentes métodos para la medición de estas tasas y en gran parte se evidencian los experimentos mediante pruebas de trazadores[13], [15].

Las tasas de reaeración permiten determinar la capacidad de autodepuración que hay en un cauce de un cuerpo de agua [16], lo cual es producto de la mezcla por el arrastre de materia orgánica, sedimentos, contaminantes y otros flujos [11].

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar las tasas de reaireación (K_a) evaluadas por métodos empíricos y semi empíricos del Río Palomino ubicado en el departamento de La Guajira.

Objetivos Específicos

- ❖ Determinar las características geomorfológicas e hidráulicas del tramo de estudio que permita una adecuada simulación de calidad del agua.
- ❖ Calcular las tasas de reaireación a partir de las diferentes ecuaciones empírica y semi empíricas por el método de trazadores.
- ❖ Estimar las tasas de reaireación por medio de un experimento de intercambio gaseoso.

MARCO TEÓRICO

COEFICIENTES DE REAIREACIÓN

- **Contexto**

Los cuerpos de agua cuentan con unas características particulares que son determinadas por sus parámetros fisicoquímicos de calidad de agua. Entre estos parámetros se destaca la presencia de oxígeno en el recurso hídrico, dicho parámetro hace referencia a los coeficientes de reaireación. El proceso de reaireación se da a partir de la capacidad que tiene un cuerpo de agua para depurar las cargas contaminantes en su composición, y retomar los niveles de oxígeno habituales que le permiten regular la vida acuática. Es decir, que la inclusión del oxígeno atmosférico en el agua permite calcular el coeficiente de reaireación en un tiempo determinado, dando como resultado el retorno del oxígeno al agua como mecanismo natural de este [17].

- **Métodos para cálculos de tasas de reaireación**

El método de trazadores para evaluación de contaminantes, emplea diferentes ecuaciones empíricas y semi empíricas que permiten calcular la tasa de reaireación de un cuerpo de agua en función de sus parámetros hidráulicos. Teniendo en cuenta lo anterior se presentan diferentes métodos para el cálculo del coeficiente de reaireación como se ve en la siguiente tabla:

Tabla 1. Tasas de reaireación

Autores	Ecuación	Variables	Fundamento
O'Connor - Dobbins	$Ka = 3,93 * \frac{U^{0,5}}{H^{1,5}}$	U= Velocidad (m/s) H= Profundidad (m)	Este método fue calculado con base en los modelos de transferencia de masa y teniendo en cuenta velocidad y profundidad como los parámetros más importantes [18].
Churchill et. al	$Ka = 5.026 U^{0.969} H^{-1.673} (1.0241)^{T-20^{\circ}}$	U=velocidad (m/s) H=Profundidad (m) T=temperatura en Celsius	Se determina con base en mediciones realizadas debajo de presas hidráulicas donde hay deficiencia de OD [19].
Owens y Gibbs	$Ka = 9.41 U^{0.67} H^{-1.85} (1.0241)^{T-20^{\circ}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada a partir de un método de equilibrio realizando un balance de OD sin necesidad de depender directamente del oxígeno atmosférico [19].
Krenkel y Orlob	$Ka = 173.4 \frac{U^{0.408}}{H^{0.66}}$ $Ka = 2750.3 \frac{D^{1.321}}{H^{2.32}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) D= coeficiente de dispersión	Esa ecuación se plantea a partir de la presencia de OD en fuentes energéticas, teniendo relación con la disipación de la energía, aplicado a sistemas de alcantarillados [20].
Dobbins	$Ka = 55.4 \left(\frac{1}{0.9} \right) * \left(\frac{Fr^2}{Fr^{1.5}} \right) * \left(U * \frac{S^{0.375}}{H} \right) * Coth \frac{(4.54 * U * S^{0.125})}{0.9 * Fr^{0.5}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) S= pendiente Fr= número de Froude	Ecuación planteada a partir de un experimento de intercambio gaseoso mediante la implementación de trazadores no conservativos, como variables a tener en cuenta se encuentran el número de Froude [19].

Langbein y Durum	$Ka_{20^\circ} = 3.3 \frac{U}{H^{-1.33}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada a partir de los modelos de O'Connor y Dobbins, Churchill, Elmore, Buckingham y datos de Krenkel y Orlob, en este modelo se consideran las variaciones de los coeficientes lo que muestra una disminución del coeficiente aguas abajo [19].
Isaacs-Gaudy	$Ka = 3.053 \frac{U}{H^{\frac{3}{2}}} * 1.0241^{T-20^\circ}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada a partir del experimento en un tanque circular con paredes móviles simulando la condición del flujo, teniendo en cuenta la altura de la lámina de agua y la velocidad local del flujo [19].
Negulescu-Rojanski	$Ka = 4.74 \left(\frac{U}{H}\right)^{0.85}$ $Ka = 1.423 D \left(\frac{U}{H}\right)^{1.63}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) D= coeficiente de dispersión	Ecuación planteada a partir de un análisis de regresión, implementándose en canales de recirculación, se tiene en cuenta el coeficiente de dispersión el cual relaciona el movimiento de masa y el flujo del líquido [19].
Thackston y Krenkel	$Ka = 24.9 * \frac{Fr^{0.5} * U^*}{H}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) Fr= número de Froude	Ecuación planteada a partir de estudios en canales donde hay desoxigenación de agua, en función de la velocidad, altura de lámina de agua y número de Froude [19].
Parkhurst y Pomeroy	$Ka = 23.4 * \frac{10.17 * Fr^2 * S * U^{\frac{3}{8}}}{H}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) S= pendiente Fr= número de Froude	Ecuación planteada a partir de modelos en aguas residuales, todo esto en función de la pendiente, velocidad, altura de la lámina de agua y el número de Froude [19].

Tsivoglou y Neal	$Ka = 0.1772 * \left(\frac{H}{t}\right)$	H= profundidad (m) t= tiempo (s)	Ecuación planteada a partir de experimentos de trazadores a partir de la inyección de un gas tomando las muestras aguas abajo en diferentes puntos [19].
Bennett y Rathbun	$(1) \quad Ka = 32,5 * \frac{U^{0,413} S^{0,273}}{H^{1,408}}$ $(2) \quad Ka = 5,585 * \frac{U^{0,607}}{H^{1,689}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m) S= pendiente	Ecuaciones planteadas con base en el análisis de registro de datos históricos [21].
Owens	$(1) \quad Ka = 5,34 * \frac{U^{0,67}}{H^{1,85}}$ $(2) \quad Ka = 6,935 * \frac{U^{0,73}}{H^{1,75}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada a partir de datos previos en estudios realizados por Churchill, y monitoreo de la desoxigenación de ríos con sulfito de sodio. La segunda ecuación se plantea con base en experimentos para ríos rápidos y poco profundos [21].
Long	$Ka = 1,923 * \frac{U^{0,273}}{H^{0,894}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada con base en experimentos realizados en ríos de Texas [21].
Bansal	$Ka = 1,8 * \frac{U^{0,6}}{H^{1,4}}$	U= velocidad (m/s) H= profundidad (m)	Ecuación planteada con base en análisis de datos previos realizados por Churchill (1962), O'Connor – Dobbins (1958) y Langbein y Durum (1967) [21].

Fuente. Autores

- **Relación con el Oxígeno Disuelto**

Es el proceso de absorción de oxígeno desde la atmósfera hacia un cuerpo de agua, este se caracteriza por el coeficiente de reaireación en la superficie, cuando la absorción de oxígeno va a la atmósfera se asume como un proceso de primer orden [16].

La reaireación tiende a equilibrar la concentración de OD de un cuerpo de agua (masa del cuerpo) con un valor de saturación, se considera una condición estable cuando el OD está por debajo del oxígeno de saturación. Se puede determinar la velocidad de transferencia de oxígeno con la ecuación de Fick:

Ecuación 1

$$J = D \cdot \frac{\partial C}{\partial x}$$

Donde J es el flujo difusivo que atraviesa la superficie ($\text{mol cm}^{-2} \text{s}^{-1}$), D es el coeficiente de difusión ($\text{cm}^2 \text{s}^{-1}$), $\partial C / \partial x$ es el gradiente de concentración, esta ecuación explica que *“la densidad de corriente de partículas es proporcional al gradiente de concentración”*

TRANSPORTE DE SOLUTOS

Contexto

El transporte de contaminantes puede explicarse como el viaje o movimiento de sustancias a través de un medio acuático, atmosférico o en el suelo. Sin embargo, el transporte de contaminantes se da en diferentes condiciones por lo cual los procesos varían dependiendo de las características del recurso en el que el contaminante se transporta. Para el caso del recurso hídrico, se encuentra una clasificación de tres procesos que pueden explicar el comportamiento y transporte de un contaminante como lo son: advección, difusión y dispersión [44].

- **Proceso en transporte de solutos**

- a) Advección:** La advección es el proceso de transporte de contaminantes que se caracteriza por dar una velocidad de viaje del contaminante igual a la del cuerpo de agua y donde la pluma contaminante es constante cuando este proceso es el único involucrado [44].
- b) Difusión:** La difusión a diferencia de la advección tiene la particularidad de registrar dinamismo en el tiempo de viaje del contaminante y por tanto, conlleva una variación en la pluma contaminante que se dispersa en las dimensiones del cuerpo de agua [44].
- c) Dispersión:** La dispersión es un proceso de transporte de contaminantes que se da principalmente en los cuerpos de agua subterránea a partir de la variable porosidad. En este caso, cuando las partículas de contaminación viajan a través de un medio estrecho el tiempo de viaje resulta ser más lento mientras que un medio con mayor

amplitud de ancho permite dar un flujo más veloz para el contaminante [44].

TRAZADORES

Contexto

Los trazadores son catalogados como sustancias conservativas que tienen como función evaluar el comportamiento de transporte en un medio acuático o atmosférico. Sustancias conservativas hacen alusión a las sustancias que no reaccionan con ningún otro tipo de material por lo cual la información contenida no se altera y así mismo, sus posibilidad de transformarse es nula. Los trazadores químicos deben cumplir con requisitos para la evaluación de contaminantes en un cuerpo de agua, por ejemplo ser solubles en el agua y no alterar las propiedades hidráulicas del agua subsuperficial [22].

- **Tipos de trazadores**

Los trazadores son clasificados según su procedencia y se pueden registrar diferentes categorías de trazadores. Sin embargo, la clasificación más general de los trazadores se divide en: Trazadores conservativos y no conservativos dentro de los cuales se encuentran los trazadores orgánicos, inorgánicos y radioactivos [23].

Trazadores conservativos

- a) **Trazadores orgánicos:** Son una clase de trazadores químicos que por ser de esta procedencia no pueden originarse de manera natural y tienen la particularidad de ser los más efectivos para evaluación de contaminantes, por lo cual su proceso se lleva a cabo de cromatografías. Los más usuales derivan de los alcoholes como el etanol, metanol, isopropanol, solventes entre otros [23].
- b) **Trazadores inorgánicos:** Los principales trazadores inorgánicos provienen de soluciones salinas para la evaluación de transporte de sustancias en el agua. Se caracterizan por ser altamente solubles en el agua, pero a través del tiempo se ha propuesto evaluar primero las condiciones de la sal que será utilizada como trazador con el propósito de conocer con mayor claridad cómo se dará la distribución de iones en el cuerpo de agua [23].

Trazadores Radioactivos: Este tipo de trazadores se caracterizan por contener isótopos radiactivos que se encargan de evaluar la composición de los yacimientos a través de la radiación de ondas beta y gamma. Los isótopos se encuentran estables y entregan su información en unidades partes por trillón por lo cual el volumen de inyección es muy pequeño [23].

MODELOS DE TRANSPORTE DE SOLUTOS

- **Contexto**

Los modelos de transporte de contaminantes son importantes en la evaluación de una corriente de agua, ya que estos son una representación de los procesos de advección, dispersión y difusión lo cual da paso a la determinación de variables como tiempo medio de viaje y tiempo de arribo entre otros [24]. Existen tres tipos de transporte de solutos dado por los modelos ADE, TS y el modelo ADZ siendo este último explicado a continuación.

- **Modelo de zona muerta agregada (ADZ)**

Este modelo es el más importante propuesto por Beer y Young, en donde se determina la estimación de los distintos parámetros utilizando series de tiempo, teniendo en cuenta que los más importantes son el tiempo de viaje y el retraso advectivo. Este modelo explica la naturaleza de la dispersión longitudinal en los flujos de agua, y así mismo dividen el flujo en dos zonas diferentes: la corriente principal y la zona muerta [25].

Para la corriente principal se usa la siguiente ecuación [25]:

Ecuación 2

$$\frac{\partial c}{\partial t} + U \frac{\partial c}{\partial x} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} + KT_c(s - c)$$

Donde U es la velocidad y D es el coeficiente de dispersión longitudinal.

Para la zona muerta se usa la siguiente ecuación [25]:

Ecuación 3

$$\frac{\partial s}{\partial t} = KT_s(c - s)$$

Donde K es el coeficiente de intercambio de masa entre la zona muerta y la corriente principal, T_c es la relación del área interfacial entre la corriente principal y la zona muerta directamente al volumen del flujo principal, T_s es la relación entre el área interfacial y el volumen de la zona muerta [25]. El modelo anterior es tomado por Lees, Camacho y Chapra, en donde se hace realmente importante la dispersión longitudinal en las fuentes hídricas con ayuda del modelo ADZ [26].

Para formular la ecuación de balance de masa teniendo en cuenta el modelo presente, se deben tener en cuenta las condiciones de tener un soluto conservativo en condiciones de flujo constante, considerando un volumen de control todo esto representado en la ecuación 4 [26].

Ecuación 4

$$\frac{d[V_a \bar{C}(t)]}{dt} = QC_u(t - \tau) - QC(t)$$

Donde V_a es el volumen total de agua que alcanza el río, $\bar{C}(t)$ es la concentración promedio que alcanza el soluto, $C(t)$ y $C_u(t)$ son la concentración promedio del tramo y las concentraciones de entrada y salida respectivamente, τ es el retraso del tiempo advectivo el cual es un parámetro que describe la advección de los solutos por el movimiento del flujo másico, finalmente Q es el caudal de descarga [26].

En el modelo ADZ es de gran importancia tener en consideración parámetros como el tiempo de viaje, retraso advectivo y fracción dispersiva los cuales mantienen una relación para llevar a cabo el modelo lo cual se muestra en las ecuaciones (4), (5), (6)

Ecuación 5

$$V = DFV_a,$$

Donde V es el volumen de mezcla activo que es aplicado para los modelos de flujos de aire, DF se conoce como la fracción dispersiva parámetro que define las características de mezcla de solutos [26].

Dadas las condiciones anteriores se establece el tiempo de residencia el cual representa el tiempo total de viaje asociado con la dispersión

Ecuación 6

$$T_r = V/Q$$

El parámetro anterior de tiempo es totalmente diferente al tiempo de viaje el cual está dado por:

Ecuación 7

$$\bar{t} = T_r + \tau$$

Donde se ve representado por el tiempo que demora el soluto en el proceso advectivo y dispersivo [25], [26] de manera tal que relacionando la ecuación 5 y 7 se puede expresar de la siguiente manera

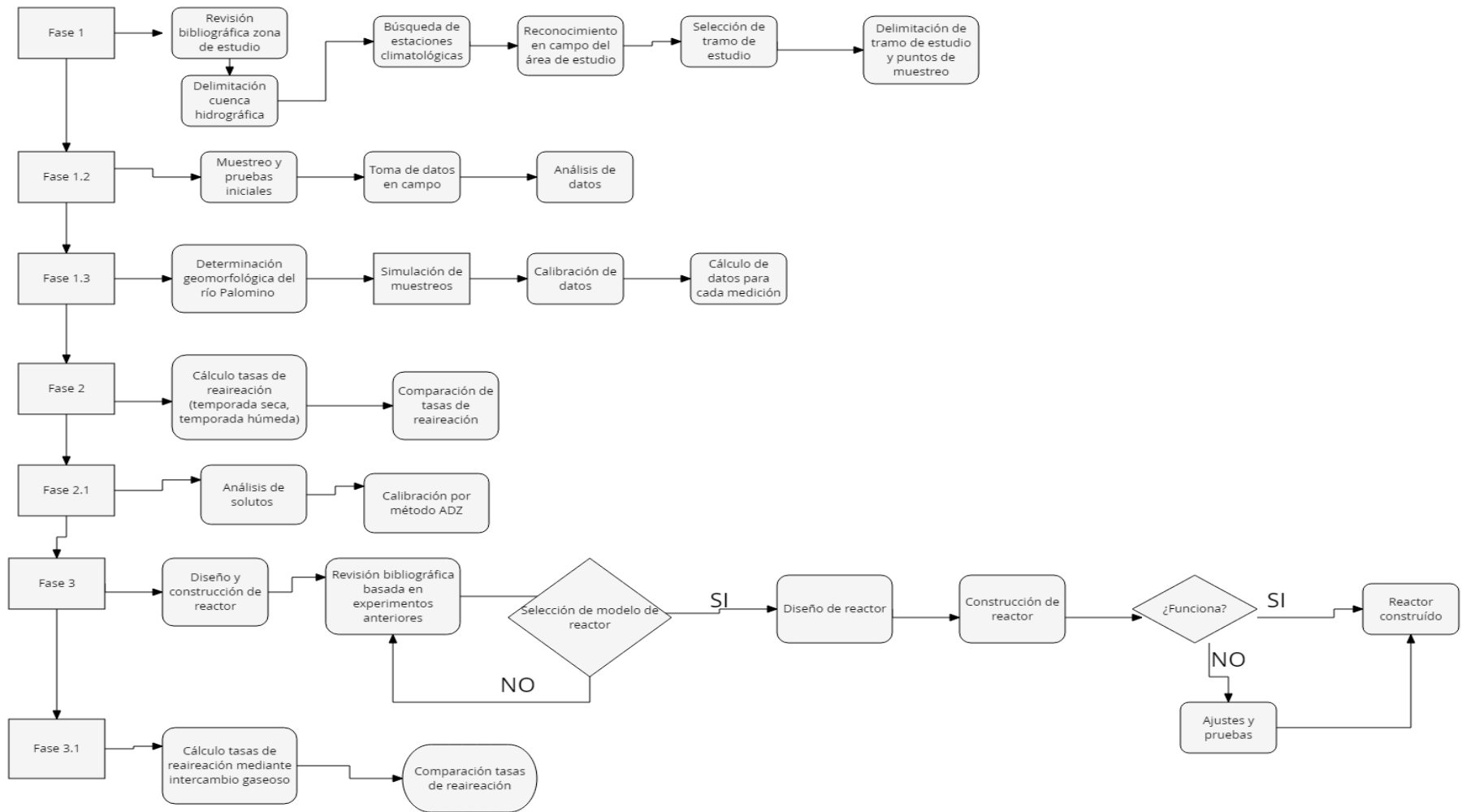
Ecuación 8

$$DF = \frac{V}{V_a} = \frac{\bar{t}}{\tau} = 1 - \frac{\tau}{\bar{t}}$$

METODOLOGÍA

A continuación se muestra un diagrama de flujo el cual describe de manera general la metodología, la cual se divide en varias fases que comprenden la caracterización de la zona de estudio, diseño y construcción de un reactor que tiene en cuenta las pruebas para su correcto funcionamiento antes de iniciar con la siguiente fase la cual comprende la toma de datos y su posterior análisis y cálculo de las diferentes variables de estudio, a su vez se tiene en cuenta el análisis de sensibilidad y calibración de los datos obtenidos en campo para verificar la exactitud de estos con los datos arrojados por los modelos predeterminados del equipo Fluvia.

Ilustración 1. Diagrama de flujo metodológica



Fuente. Autores

Fase 1. Caracterización de la cuenca del río Palomino

El corregimiento de Palomino ubicado en el departamento de La Guajira, es conocido por ser un sector turístico visitado en su mayoría por viajeros extranjeros. Este corregimiento se encuentra en la jurisdicción del municipio de Dibulla, limitando con el departamento de Magdalena. Este lugar ha incrementado a nivel turístico en los últimos años, debido a su cultura y a las actividades que se desarrollan en éste para mejorar la experiencia de sus visitantes. Por tanto, resulta importante emplear una caracterización de la cuenca del río para posteriormente analizar las condiciones hídricas así como otros aspectos.

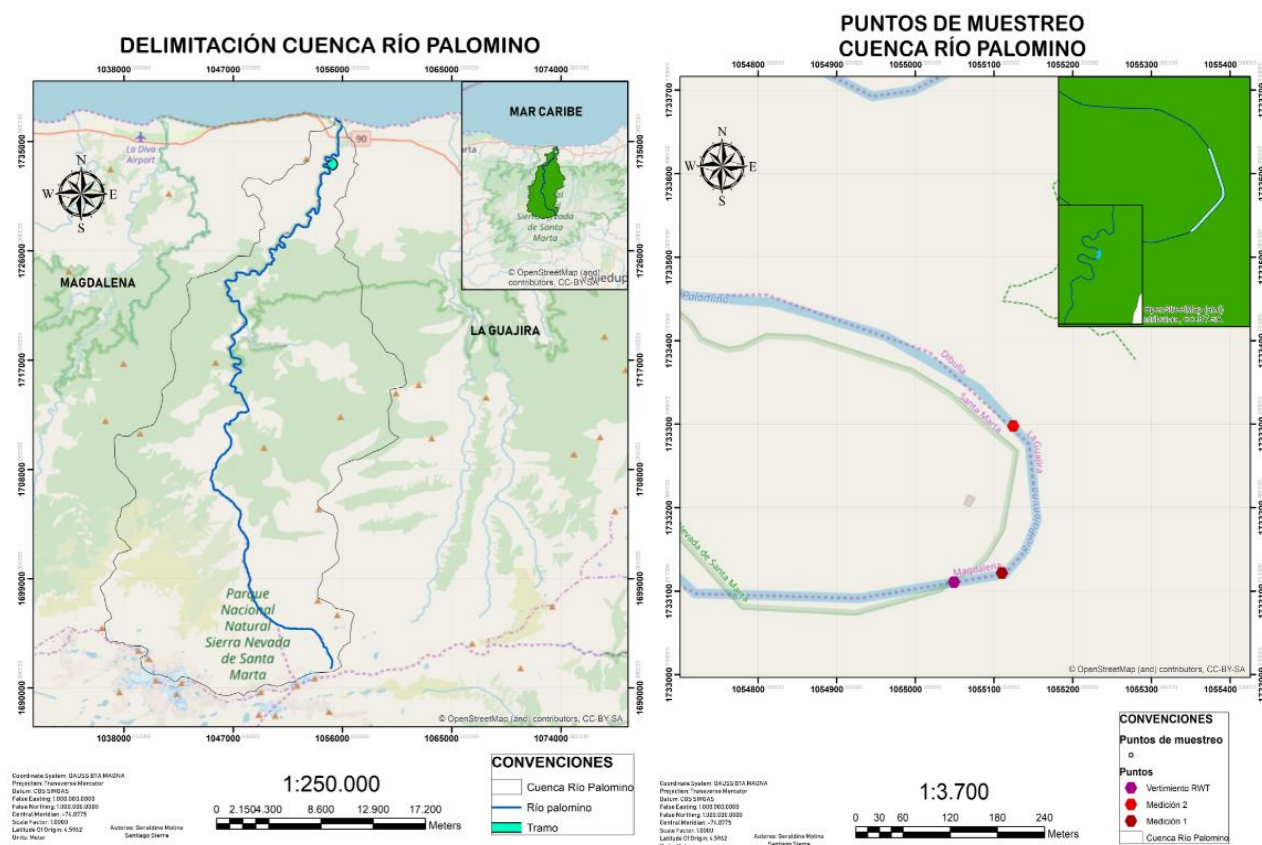
La Subcuenca hidrográfica del Río Palomino hace parte de la zona hidrográfica Caribe Guajira, con un área de 682 km². Nace en las alturas de la Sierra Nevada de Santa Marta aproximadamente a 4600 m.s.n.m, y su curso recorre cerca de unos 70 km de longitud hasta desembocar finalmente en el Mar Caribe. Sus coordenadas de latitud y longitud son 10° 50' 19,01" N y 73° 35' 15,26" E respectivamente [12]. Dicho esto, se considera como un río de planicie puesto que en la mayoría de su trayecto se evidencia una pendiente mínima hasta su punto de desembocadura. Un factor importante es la nieve en los picos de la Sierra Nevada, ya que al descongelarse permite el escurrimiento del agua hacia el río para seguir con su curso habitual. Así mismo, al nacer en una cota alta con respecto al nivel del mar, se evidencia que la pendiente con la que el agua baja de la Sierra influye directamente en la velocidad con que ésta viaja a través de su cauce hasta equilibrarse en la condición de planicie con la que cuenta el río [12].

Las cuencas hidrográficas se clasifican dependiendo su punto de desembocadura, por lo que la cuenca del Río Palomino se denomina clase exorreica al drenar sus corrientes de agua directamente en el Océano. Cuenta con el aporte hídrico de los ríos Lucuice y San Salvador, y también de la Quebrada Mamaise [12]. Puesto que el área del río es mayor a 250 km², la cuenca del río es considerada como una cuenca grande y en la cual tienen influencia parámetros como: Área, cauce, efecto de almacenaje del agua, elevación y pendiente [12]. El período de lluvia en esta zona tiene un comportamiento monomodal, en el cual se registran precipitaciones entre mayo y noviembre, dando lugar a la temporada seca para los meses restantes del año. La vertiente del río tiene gran importancia, al marcar el límite entre los departamentos de Magdalena y La Guajira.

La cuenca del Río Palomino cuenta con una forma oval oblonga o rectangular alargada, su índice de compacidad es de 1,57 el cual indica que el sistema de drenaje en la cuenca es eficiente y por tanto la probabilidad de creciente es muy baja. En las partes altas del río se evidencia una importante capacidad de infiltración, y gracias a las condiciones climáticas de la zona, el crecimiento de cobertura vegetal es considerable y por ende se ve limitada la probabilidad de erosión en el suelo. Sin embargo, cuando el río toma su condición de planicie el efecto es el contrario, puesto que la infiltración es mínima y esto limita el crecimiento de vegetación en la ribera de la cuenca [12].

A continuación se presenta la delimitación de la cuenca hidrográfica del Río Palomino y el tramo seleccionado para el muestreo así como los puntos de toma de muestras.

Mapas 1 y 2. Ubicación Geográfica Cuenca Río Palomino, Puntos de muestreo Río Palomino, La Guajira



Fuente. Autores

El tramo de estudio se seleccionó considerando que en estos puntos se realizan actividades de recreación sobre el río, el primero a 60 m del punto de vertimiento y el segundo a 150 m del mismo.

La toma de datos se registró en la orilla del río entre los 40 cm y 1 m ya que al evaluar el OD en la superficie del río se presenta mayor intercambio de oxígeno.

Ilustración 2. Punto de vertimiento



Fuente. Autores

Ilustración 3. Punto de muestreo 1



Ilustración 4. Punto de muestreo 2



Fuente. Autores

Fase 1.2. Muestreo y pruebas iniciales

Para las pruebas iniciales con el trazador conservativo se hizo uso de un fluviómetro (equipo Fluvia) el cual permitió realizar la completa recolección de datos así como una curva de trazador en tiempo real para un posterior análisis y calibración de datos [33], el experimento se inicia con la toma de aproximadamente 8 lt de agua en un balde la cual se mezcló con 6 g de Rodamina WT.

Algunos de los datos registrados por el equipo Fluvia y otros parámetros necesarios para el diseño y posterior muestreo por medio del experimento son:

- **Ancho (W):** Es necesario para el ensayo de trazadores así como para la determinación de las dimensiones del reactor, relacionando el volumen de agua al interior del reactor con este parámetro para determinar una mezcla óptima.
- **Altura de lámina de agua (H):** Es necesaria para estimar el área del cuerpo de agua.
- **Distancia (X):** Es necesario para la ejecución de la modelación realizada por el equipo Fluvia.
- **Concentración pico (C_p):** Es el valor máximo de concentración de Rodamina registrado por el equipo Fluvia.
- **Concentración base (C_b):** Es un valor constante antes del registro de la primera partícula de Rodamina.
- **Phi (ϕ):** Representa el coeficiente de asimetría el cual relaciona la velocidad advectiva y la velocidad bidireccional de difusión del trazador [27]
- **Tiempo pico (t_p):** Corresponde al valor de tiempo máximo en que se presentó la máxima concentración registrada por el equipo Fluvia.
- **Velocidad local (U):** Corresponde a la velocidad presente en el cuerpo de agua [27]
- **E :** Corresponde al coeficiente de dispersión longitudinal

- **Pendiente:** Al realizar el ensayo por trazadores se debe calcular este parámetro que corresponde a la pendiente, calculado a partir de la ecuación de Elder (1959) [28]

La curva generada por el equipo Fluvia presenta 4 puntos importantes para la calibración y análisis de los datos registrados.

1. **Tiempo del gatillo:** Hace referencia al tiempo en que el equipo inicia con el registros de datos del muestreo después de realizado el vertimiento.
2. **Concentración base:** Relaciona la concentración inicial de Rodamina, y de allí parte el aumento de esta hasta alcanzar su punto máximo como se muestra en la gráfica.
3. **Centroides (3 y 5):** Cumplen la función de determinar el tiempo medio de viaje para el muestreo, el primero se ubica antes de alcanzar el tiempo pico y el segundo de ubica en el momento en que la curva inicia su descenso respecto a la concentración.
4. **Concentración pico:** Pone en evidencia la concentración máxima que alcanza la Rodamina en un muestreo, y es fundamental para posteriormente evaluar el coeficiente de reaireación en el río.

Se plantearon dos muestreos, en temporada de lluvia y temporada seca los cuales se realizaron en los meses de noviembre y abril respectivamente.

El muestreo inicial se realizó durante la temporada de lluvia, pese a que el levantamiento de la información se realizó en este tiempo, hubo inconvenientes debido al exceso de brillo solar alterando el funcionamiento de las sondas de conductividad y del fluviómetro respectivamente. Fue importante comparar la geomorfología del río en dos temporadas por medio del experimento con trazadores para evidenciar la dinámica de cada variable en función de la intensidad de lluvia. Se realizaron cuatro mediciones para la temporada seca, puesto que el equipo Fluvia presentó problemas de calibración impidiendo la toma de datos con normalidad para las dos mediciones restantes. Sin embargo, la concentración de Rodamina no tuvo alteraciones considerables, por lo cual es posible continuar con el análisis de la información recopilada en campo.

Fase 1.3. Determinación geomorfológica del río Palomino

De acuerdo a los estudios realizados en cuerpos de agua con inyección de trazadores, es posible determinar los parámetros hidráulicos con ecuaciones predispuestas. A partir de la información obtenida en campo con la Rodamina WT, se da lugar al cálculo de la geomorfología del río la cual hace referencia a la caracterización base de una fuente hídrica en torno a sus condiciones de flujo. A continuación se muestra el desarrollo de las ecuaciones aplicadas para cada caso:

- **Nivel de lámina de agua:**

Conociendo el valor del caudal registrado en el punto de muestreo, el ancho del mismo y la velocidad local de la prueba realizada, fue posible calcular la altura de lámina de agua para conocer el área en este punto despejando la siguiente ecuación:

Ecuación 9

$$Q = U * A$$

Donde Q es el caudal del río, A hace referencia a la multiplicación del ancho y altura de lámina de agua en el punto de muestreo, por lo cual dicha variable es la que se despeja dando como resultado la siguiente ecuación:

Ecuación 10

$$H = \frac{Q}{UA}$$

Donde H hace referencia a la altura de nivel de lámina, parámetro que varía dependiendo el comportamiento del caudal y U es la velocidad registrada por el trazador.

- **Coefficiente de dispersión longitudinal**

El coeficiente de dispersión longitudinal resulta ser un parámetro de gran importancia en el análisis de trazadores, puesto que éste proyecta el transporte de contaminantes en un curso fluvial respectivo, para su cálculo se procedió a desarrollar la siguiente ecuación:

Ecuación 11

$$E = \frac{\phi^2 U^2 0,215 tp}{2}$$

Dónde ϕ está relacionado al tubo de corriente [27], U es la velocidad local del muestreo para el punto de descarga, tp hace referencia al tiempo al pico del muestreo y E es el coeficiente de dispersión longitudinal.

- **Pendiente**

La pendiente puede calcularse a partir de la diferencia de cotas, y la distancia trabajada para un muestreo. Para este caso, Elder (1959) propone calcular dicho parámetro a partir del coeficiente de dispersión longitudinal, el efecto de gravedad y el ancho del río asumiendo que es equivalente al radio hidráulico a partir de la siguiente ecuación:

Ecuación 12

$$S = \frac{E^2}{35,2 * H^3 * g}$$

Donde, H representa el nivel de lámina de agua, 35,2 representa una constante la cual fue determinada por Elder (1959) mediante investigaciones para cálculo de pendiente [29] y g representa la constante universal gravitacional (9,81 m/s²).

- **Velocidad local según Elder**

A partir de los estudios realizados por Elder (1959), se procede a calcular la geomorfología del cuerpo hídrico para comparar con los datos del trazador. En este caso, se aplica la primera ecuación básica para trazadores

Ecuación 13

$$U = \frac{1}{\phi} * \sqrt{\frac{2E}{\tau}}$$

Donde τ (Tao) hace referencia a la multiplicación de 0,215 (Valor predeterminado) por el tiempo al pico. Sin embargo, Elder (1959) propone la aplicación de una segunda ecuación bajo el concepto de Chezy de la siguiente manera

Ecuación 14

$$U = C\sqrt{RS}$$

Donde C hace referencia al coeficiente de resistividad de Chezy que es calculado al despejar las demás variables de la ecuación 14. R hace referencia al radio hidráulico del río, el cual puede ser tomado como $R=H$ teniendo en cuenta la teoría de Elder (1959) en cuanto a ríos anchos se refiere [29]. Sin embargo, se calculó bajo su respectiva ecuación para corroborar que fueran iguales, tal como se ve a continuación:

Ecuación 15

$$R = \frac{A}{P_{mojado}}$$

Ecuación 16

$$C = \frac{U}{\sqrt{RS}}$$

- **Función F para pendiente**

Gracias a las investigaciones hechas por Elder (1959) y con base en el principio de Leopold – Maddock (1953), es importante calcular una función F en la que se pueda tener veracidad del valor obtenido para pendiente, teniendo en cuenta que esta ecuación se encuentra en función del coeficiente de dispersión y de la igualdad de las ecuaciones de velocidad local descritas anteriormente bajo el principio de Elder. La función F para pendiente se calcula de la siguiente manera:

Ecuación 17

$$F = \phi^2 * 0,215 * tp * \left(\frac{C^2}{2}\right) * \sqrt{\frac{S}{H * g}}$$

A partir de las investigaciones realizadas por Elder (1959) se estipula que el valor de esta función debe ser igual o cercano a 5,93 con el cual se determina si el dato calculado de pendiente es fiable para el muestreo.

- **Coeficiente de difusión transversal**

La modelación de vertimientos en torno al transporte dispersivo de contaminantes es fundamental para comprender el movimiento de las partículas en una corriente. El coeficiente de difusión transversal se considera como la capacidad de un soluto para moverse en un fluido determinado, el cual se puede calcular a partir del concepto de Elder, bajo el desarrollo de la siguiente ecuación:

Ecuación 18

$$\varepsilon_y = 0,23H\sqrt{HgS}$$

Con el cálculo de este parámetro se da por concluida la determinación de la geomorfología del río en torno a los datos recolectados en campo con el fluviómetro.

Fase 1.4. Simulación de muestreos

Posterior al análisis de geomorfología, hidráulica y de la realización del modelo para las mediciones registradas en las dos temporadas, se hizo una comparación de datos teniendo en cuenta la metodología para pruebas con trazadores, la cual es una herramienta para evidenciar la veracidad de la información tomada en campo con respecto a ecuaciones predispuestas. Este proceso puede entenderse como simulación de modelos de calidad de agua, basándose en los principios de Fick y Galileo, los cuales permiten comparar la información del modelo con lo simulado en torno al comportamiento de la pluma contaminante. No obstante, es importante aclarar que la base del estudio parte de información en condiciones “local-general” lo cual hace referencia a realizar pruebas en una fracción del ancho del río, y posteriormente proyectarla a las condiciones reales del cauce para encontrar un equilibrio dinámico, método que resulta adecuado para trabajar en

ríos anchos teniendo en cuenta que en su mayoría es difícil abarcar la pluma del trazador en la totalidad del ancho del cauce [30].

A partir del principio de relatividad de Galileo, en el cual se establece que las leyes físicas son iguales en un sistema determinado, es posible aplicar el modelo “local-general” explicado anteriormente. Con base en esto, es posible proyectar el comportamiento de los contaminantes en el río Palomino con la prueba de trazadores a partir de la ecuación de Fick, la cual se evidencia a continuación:

Ecuación 19

$$C = \frac{M}{A\sqrt{4Et}} e^{-\frac{(x-ut)^2}{4Et}}$$

Esta se puede expresar en función de parámetros diferentes relacionados con los resultados de la prueba de trazadores de tal manera que,

Ecuación 20

$$C = \frac{M}{Q * \Phi * t *,16} e^{-\frac{(t_o-t)^2}{2\beta*(\Phi t)^2}}$$

Donde β corresponde a la relación entre τ (tiempo Gaussiano) y el tiempo al pico de la prueba, donde el primer parámetro se determina a partir de la ecuación 13 despejando el término τ en función del coeficiente de dispersión. β Resulta ser un valor constante para todos los casos, dado que al ser calculado su resultado es 0,214 tal como se evidencia en cada medición

Ecuación 21

$$\tau = \frac{2E}{\Phi^2 U^2}$$

Ecuación 22

$$\beta = \frac{\tau}{tp}$$

Donde, τ es el tiempo Gaussiano, y tp es el tiempo pico de la concentración máxima registrada por el equipo fluvia. Reemplazando el valor de β en el primer denominador, Fick simplifica su ecuación explicando que (Ecuación 23) es igual a 1,16 y se puede calcular la concentración máxima del muestreo en función de la información registrada por el trazador. Dicho esto, es aconsejable calcular el factor y exponente por separado, donde el primero hace referencia al factor de la Rodamina y el cual será constante en la simulación teniendo en cuenta que sus valores son fijos

Ecuación 23

$$\sqrt{2\pi\beta} = 1,16$$

$$C = \frac{M}{Q * \phi * t * 1,16}$$

Donde t resulta de la resta del tiempo al pico y el tiempo del gatillo, tal como se muestra en la ecuación anterior. El cálculo del exponente de la ecuación 20 parte de emplear el tiempo punto a punto tal como lo registra el equipo fluvia mediante Excel, por lo que éste varía hasta finalizar el muestreo. El tiempo del gatillo se resta al tiempo registrado para cada punto, siendo este último el único parámetro variable en la ecuación.

$$e^{\frac{tp - ABS(t4 - tg)^2}{2\beta\phi^2 * ABS(t4 - tg)^2}}$$

Los valores iniciales del tiempo van a ser menores al tiempo del gatillo, por lo cual debe realizarse la resta en valor absoluto para no registrar error en los cálculos. Con base en lo anterior, el factor de concentración de Rodamina se multiplica con cada exponente calculado y con la concentración base (Cb), dando lugar a la curva simulada de la prueba de trazadores para cada medición.

Fase 2. Cálculo y comparación de tasas de reaireación por ecuaciones empíricas y semi empíricas

Los coeficientes de reaireación se caracterizan por demostrar el intercambio de oxígeno que hay entre un cuerpo de agua con la atmósfera, por lo que es un parámetro importante para emplear modelos de calidad de agua. A través de estudios en torno a los procesos de reaireación en corrientes hídricas, se han determinado diferentes ecuaciones en las que se tiene en cuenta la geomorfología del río y características hidráulicas propias del río como lo son la velocidad local, nivel de lámina de agua, ancho, entre otros. Sin embargo, estos estudios han sido realizados en ríos con condiciones hidráulicas diferentes por lo que se han estimado unos rangos para los principales parámetros, con el fin de emplear las ecuaciones adecuadas y obtener resultados de reaireación cercanos a la realidad. Aun así, estas ecuaciones al ser generales no demuestran la certeza esperada en los resultados, por lo que sirven como premisa para comparar las tasas de reaireación bajo metodologías adicionales.

Las ecuaciones empíricas se caracterizan por ser desarrolladas en función de dos variables a partir de datos experimentales, mientras que las ecuaciones semi empíricas tienen en cuenta mayor cantidad de variables en su planteamiento y se desarrollan en investigaciones puntuales por lo cual los resultados son más convincentes.

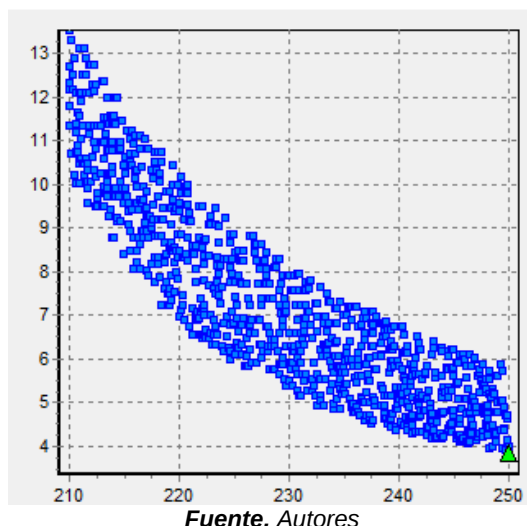
Con base en lo anterior, se realizó un listado con las ecuaciones semi-empíricas más utilizadas a nivel mundial para cálculo de coeficientes de reaireación a partir de una revisión bibliográfica, tal como se observa en la tabla 1.

Fase 2.1. Análisis de solutos

Una vez obtenidos los datos de los muestreos se procede a realizar el análisis de solutos mediante la calibración de los datos por medio del modelo ADZ para así determinar el tiempo de viaje el cuál es parámetro fundamental para el cálculo de las tasas de reaireación en las ecuaciones empíricas y semi empíricas, se hizo uso de una herramienta de análisis de solutos la cual permite realizar el análisis de las simulaciones para cada una de las mediciones, para así obtener y determinar los parámetros con mayor sensibilidad, considerando la serie de datos con 1000 simulaciones las cuales permiten una mejor exactitud de los valores registrados para cada una de las mediciones.

Para determinar la sensibilidad regional a partir de la serie de datos ingresada, se debe reconocer el parámetro con mayor sensibilidad, es por esto que se toma como base la metodología GLUE [31] la cual establece que se identifican los parámetros sensibles por medio de la curvatura de los datos como se observa en la ilustración 5, por el contrario si la serie de datos no se observa de manera similar se establece que es un parámetro no sensible.

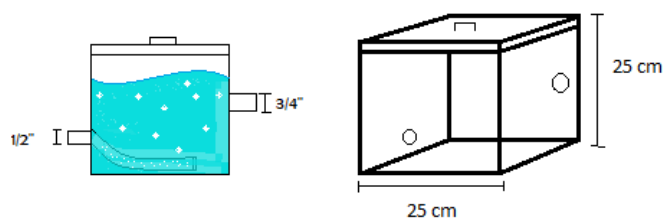
Ilustración 5. Identificación de parámetro sensible



Fase 3. Diseño y construcción del reactor

Para la segunda fase correspondiente a la construcción del reactor se diseñó y construyó un tanque el cual permitió realizar el experimento gaseoso el cual facilita la mezcla del trazador conservativo (Rodamina WT) y del trazador gaseoso (Propano), lo que a su vez disminuye la pérdida en el momento de la inyección del trazador [32].

Ilustración 6. Esquema reactor



Fuente. Autores

Previamente, se realizó una revisión bibliográfica para identificar el tipo de gas más conveniente para realizar el estudio teniendo en cuenta la eficiencia en los datos recolectados, costos de compra, entre otras variables de interés. Se han realizado diversos estudios con trazadores no conservativos, donde el gas más habitual para estos casos es el Hexafluoruro de Azufre (SF_6). Sin embargo, es un gas difícil de conseguir en Colombia al no ser producido directamente en el país, por lo que fue descartado. Así mismo, se han realizado estudios con la inyección de gases nobles como Kriptón y Xenón, y por su parte con Propano, siendo este último el escogido para la evaluación de coeficientes de reaireación teniendo en cuenta que los costos de compra son bajos con respecto a los nombrados anteriormente, además de que se puede adquirir con mayor facilidad al ser usado como gas convencional de cocina.

Para el diseño del reactor se tomó como base el experimento realizado por Holguín y Camacho (2003) [32], [33] a su vez lo realizado por Hibbs (1998) además de tener en consideración modificaciones hechas por los autores.

En el experimento realizado por Hibbs se establece la siguiente relación: “Para un sistema que opera con una presión de 35 kPa y una masa inicial de 100 mg se necesitan al menos 8 litros de agua dentro del reactor” dadas estas condiciones y comparándolas con el río objeto de estudio se determina que estas se ajustan por lo cual se toma como base el volumen de agua dentro del reactor, la presión del gas y la masa del trazador [32].

Los parámetros a tener en cuenta para el cálculo y diseño del reactor son:

- **Presión:** Este parámetro se calcula con el fin de estimar cuál es el valor óptimo para permitir la correcta mezcla entre el trazador conservativo y no conservativo [33] [29]
- **Volumen de agua:** Se tiene en cuenta para permitir la adecuada mezcla entre los trazadores, además de presentar variaciones para cada cuerpo de agua.
- **Masa:** Se debe determinar la masa de cada uno de los trazadores a usar, teniendo en cuenta el ancho del cuerpo de agua, y las distancias entre los puntos de descarga.
- **Concentración máxima:** Este parámetro se calcula para establecer la cantidad máxima de gas que puede soportar el reactor [33], [29].

- **K_g**: Este parámetro es la tasa de volatilización del gas que fue calculada por Tzivoglou y Neal lo que permite verificar si puede haber pérdida del gas a inyectar en el cuerpo de agua [33].
- **K_{a(T)}**: Este parámetro hace referencia a una corrección de temperatura a 20°C la cual se ve expresada

$$K_a(T) = K_a * \theta^{T-20}$$

Para determinar la masa del trazador gaseoso al interior del reactor es necesario calcular la concentración máxima del gas dada por [32]

Ecuación 26

$$C_{max} = \frac{M}{2A * \sqrt{\pi D t_{max}}} e^{[K_g * t_{max}]}$$

Donde M es la masa del trazador conservativo (Rodamina WT), D es el coeficiente de dispersión longitudinal, $t_{máx}$ es dado por $t_{max} = \frac{x}{U_{pico}}$ donde U_{pico} es la velocidad.

Una vez obtenida la concentración máxima se determinó la masa del gas propano, de la siguiente ecuación

Ecuación 27

$$M_{C_3H_8} = \frac{V_{agua} P_{C_3H_8} PM}{H' RT}$$

Donde $M_{C_3H_8}$ es la masa del gas en gramos (g), V_{agua} es el volumen total de agua al interior del reactor en litros, $P_{C_3H_8}$ es la presión del gas en atmósferas, R corresponde a la constante universal de gases (atmL/molK), T es la temperatura de mezcla (°K), PM es el peso molecular del gas y finalmente H' es la constante de Henry (168 g/Laire por g/Lagua) [32], [33].

Ilustración 7. Reactor



Fuente. Autores

Se realizó el diseño de un tanque el cual tiene capacidad total de 15 litros, en su interior 8 litros de agua y 6 g de Rodamina, cuenta con una entrada para el gas adaptada con una manguera de media pulgada ($\frac{1}{2}$ "), conectado a esta manguera se posiciona en el fondo un difusor el cual permite una mezcla adecuada entre la Rodamina y el gas, con las burbujas que se forman se permite una distribución uniforme y sin pérdidas. La salida se adaptó con un tubo PVC de $\frac{3}{4}$ " y conectado a este varios tubos conectados por medio de codos teniendo al final una válvula la cual se introduce en el río para la inyección de la mezcla como se muestra en la ilustración 4, el reactor se construyó de manera tal que fuese sellado para evitar cualquier fuga.

Fase 3.1 Cálculo de tasas de reaireación mediante intercambio gaseoso

Para realizar el cálculo de las tasas de reaireación con inyección de gases es el método más eficiente para el cálculo de esta variable, el cual es muy viable por sus bajos costos y facilidad de implementación. A partir de las concentraciones después de la mezcla entre el trazador conservativo (Rodamina WT) y el gas (Propano), se puede determinar la tasa de reaireación aguas arriba y aguas abajo en un río con base en la siguiente ecuación:

Ecuación 28

$$Kg = \frac{1}{tp} \ln \frac{\left(\frac{Cg}{Cc}\right)^1}{\left(\frac{Cg}{Cc}\right)^2} J$$

Donde Kg es la tasa de volatilización del trazador gaseoso (d^{-1}), tp el tiempo de viaje de la concentración pico del trazador conservativo (d), Cg la concentración pico del trazador gaseoso (d^{-1}), Cc la concentración pico del trazador conservativo (μg) y J la relación de recuperación del trazador conservativo o estado de ganancia estable SSG la cual se determina de la siguiente manera:

Ecuación 29

$$J = \frac{A_1 Q_1}{A_2 Q_2}$$

Donde Q hace referencia al caudal del río aguas arribas y abajo (m^3/s), A hace referencia al área de la curva tiempo-concentración del trazador conservativo aguas arriba y abajo ($\mu g * s$). Finalmente se procede a calcular la tasa de reaireación de la siguiente manera:

Ecuación 30

$$Ka = \left(\frac{DO_2}{Dg}\right)^{0,5} Kg$$

Donde DO_2 y Dg son las difusividades del oxígeno y del gas trazador del agua ($cm^2 s^{-1}$) calculadas mediante la ecuación de Wilke – Chang (1987).

Para realizar el cálculo de las tasas de reaireación mediante el experimento de intercambio gaseoso fue necesario la toma de muestras en los puntos de

descarga, de manera tal que se realizó la toma de cinco (5) muestras cada 10 segundos en cada punto de descarga para posteriormente realizar las mediciones, la toma de muestras se realizó en envases color ámbar con capacidad de 250 ml como se observa en la ilustración 7, esto para lograr una mejor conservación de las muestras. Se debe tener en consideración que las muestras fueron refrigeradas con una temperatura de 4°C, hasta su regreso al laboratorio en donde se realizó la medición con el equipo BIOGAS 5000 el cual es un analizador de gases, que permite determinar el porcentaje de pureza de gases como: CH₄, CO₂, O₂ y H₂S.

Ilustración 8. Toma de muestras



Fuente. Autores

Ilustración 9. Equipo BIOGAS 5000



Fuente. Autores

Al ser el Propano el trazador volátil se busca una relación entre este y el Metano lo cual permite hallar el porcentaje y concentración de propano inyectado al río en mezcla con la Rodamina.

ANÁLISIS Y RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos para cada una de las fases anteriormente descritas, teniendo en cuenta las comparaciones de cada una de las tasas de reaeración y la selección de la tasa que más se ajusta a las condiciones del río Palomino.

Fase 1.2. Muestreo y pruebas iniciales

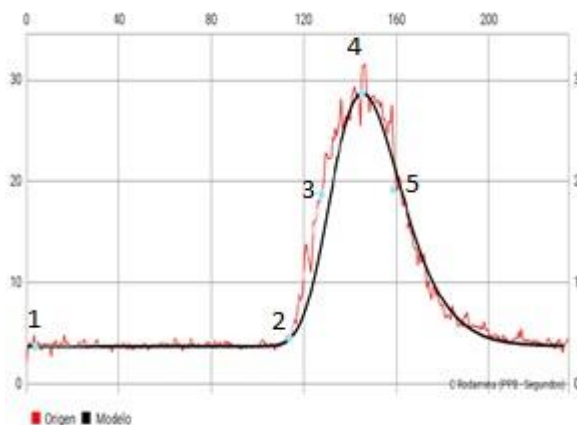
Los resultados obtenidos se muestran incluyendo los arrojados por la fase 1.3 correspondiente a las variables geomorfológicas del río Palomino.

- **Temporada de lluvia**

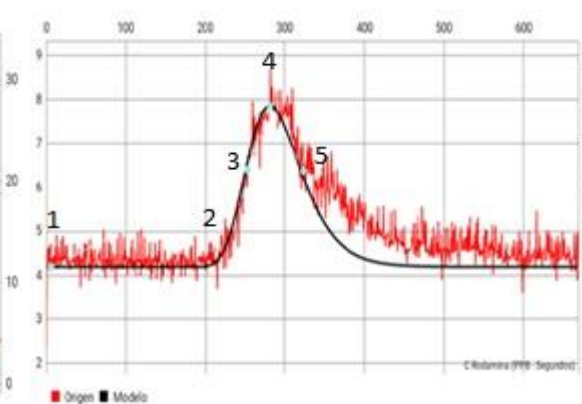
Se realizaron un total de seis (6) mediciones para la temporada de lluvia en las cuales se determinó la concentración de Rodamina, parámetros base entregados por el fluviómetro con que se realizó el muestreo y con los cuales se calculó la geomorfología para cada caso. A continuación se evidencian las respectivas

curvas generadas por el equipo fluvia con su respectiva concentración del trazador.

Gráfica 1. Día 1, medición punto 1

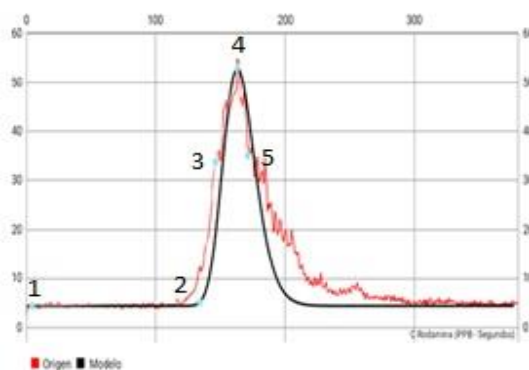


Gráfica 2. Día 1, medición punto 2

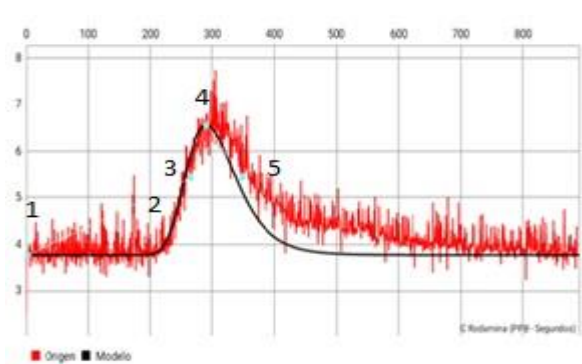


Fuente. Autores

Gráfica 3. Día 2, medición punto 1

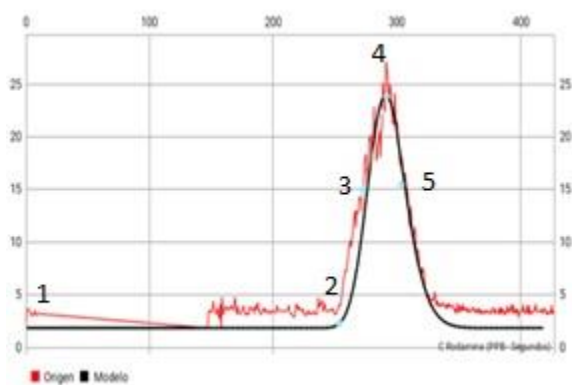


Gráfica 4. Día 2, medición punto 2

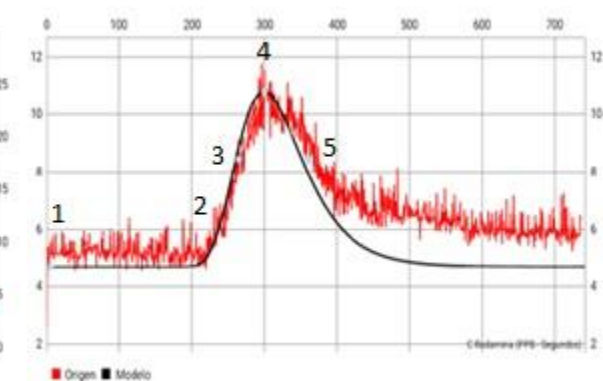


Fuente. Autores

Gráfica 5. Día 3, medición punto 1



Gráfica 6. Día 3, medición punto 2



Fuente. Autores

Se realizaron dos vertimientos en el punto de medición 1, puesto que el primer muestreo se vio alterado por las condiciones de ruido en el lugar. A continuación se evidencia la información base registrada por el equipo Fluvia, teniendo en cuenta que la distancia hace referencia al recorrido del trazador desde el punto de vertimiento hasta los respectivos puntos de descarga para cada medición.

Tabla 2. Información base, Río Palomino

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2 PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 3, PUNTO 1	DÍA 3, PUNTO 2
X (Distancia (m))	60	150	60	150	60	150
W (Ancho (m))	29,31	35	29,31	35	29,31	35
Q (Caudal (m ³ /s))	6,194	18,711	3,980	20,853	7,099	8,306
U (Velocidad local (m/s))	0,424	0,545	0,378	0,521	0,213	0,502
Cp (Concentración pico (ppb))	28,586	7,8434	52,998	6,556	23,910	10,801
Cb (Concentración base (ppb))	3,676	4,196	4,460	3,778	1,852	4,691
φ (Tubo de corriente)	0,232	0,272	0,165	0,310	0,114	0,344
tp (Tiempo pico (s))	141,444	275,238	158,609	288,088	281,408	298,762

Fuente. Autores

A partir de esta información se calcularon los parámetros geomorfológicos (Fase 1.3) del río de la siguiente manera:

Tabla 3. Cálculos de geomorfología, temporada de lluvia

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2 PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 3, PUNTO 1	DÍA 3, PUNTO 2
H (Lámina de agua (m))	0,498	0,959	0,359	1,140	1,137	0,472
E (Coeficiente de dispersión (m ² /s))	0,147	1,107	0,066	0,804	0,017	0,953
Pendiente (S)	0,0005	0,0040	0,015	0,0065	0,011	0,024
U (Velocidad local 1 (m/s))	0,423	0,541	0,377	0,519	0,207	0,500
R (Radio	0,482	0,891	0,350	1,073	1,055	0,460

hidráulico (m))						
C (Coeficiente de Chezy)	27,204	9,062	12,497	14,463	1,921	4,758
U (Velocidad local 2 (m/s))	0,396	0,541	0,376	0,518	0,206	0,499
F (Función pendiente)	6,03	6,39	1,96	6,44	-	6,19
ε_y (Coeficiente de difusión transversal (m ² /s))	0,0056	0,0124	0,009	0,070	0,091	0,0036

Fuente. Autores

El río Palomino es una corriente de agua que a lo largo de su cauce muestra amplitud en cuanto al ancho del canal, con valores superiores a 30 m. Al ser un río de planicie sus condiciones de velocidad no son muy altas por lo que directamente la pendiente no es tan elevada, lo que resulta fiable con los valores obtenidos de pendiente en la tabla anterior. Se pudo determinar que el caudal medio varía entre 4 m³/s y 20 m³/s aproximadamente para la temporada de lluvia, dependiendo del nivel de lámina de agua para el punto de descarga 1 con un valor mínimo de 0,359 m y un valor máximo de 1,137 m se determina que los resultados son congruentes con lo evidenciado en campo ya que el nivel de lámina de agua en las orillas del río es bajo; por otro lado el valor máximo tuvo lugar en el tercer día de medición con el antecedente de que la noche previa hubo presencia de lluvia en la cuenca, por lo cual se observó un incremento en la lámina de agua producto de este fenómeno. Sumado a esto, los datos fueron comparados con los niveles de caudal registrados en la estación limnigráfica Puente Carretera (15037020) ubicada aguas abajo del río, todo esto es correcto frente a las pruebas realizadas con el fluviómetro y la Rodamina. El coeficiente de dispersión longitudinal (E) presentó una variación entre 0,017 y 1,107 m²/s obteniendo así una baja probabilidad de dispersión de solutos a lo largo y ancho del río Palomino. Los valores de pendiente presentan inconsistencias en algunas mediciones, teniendo en cuenta que estos fueron medidos bajo el principio de Elder (1959) en el cual se determina la veracidad a partir de la función F de pendiente en la que se relaciona la exactitud de los parámetros hidráulicos obtenidos por el trazador. Sin embargo, para los valores anómalos se procedió a calcular la pendiente a partir del principio de Leopold-Maddock registrando valores cercanos a la geomorfología del río y con los cuales se pudo continuar la determinación de esta. En efecto el parámetro más exacto fue la velocidad local, la cual fue calculada bajo las ecuaciones de Elder (1959) comprobando lo explicado en la ecuación 13. Pese a que las velocidades para el río Palomino no presentan un aumento considerable, se tiene en cuenta que este parámetro es fundamental para comprender la degradación de las partículas aguas abajo considerando que la turbulencia elimina con facilidad las cargas contaminantes y por ende la recuperación de oxígeno es rápida. La

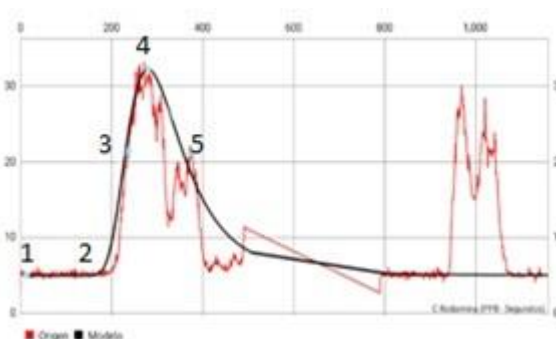
velocidad local registró un valor mínimo de 0,207 m/s y un valor máximo de 0,541 m/s.

El coeficiente de difusión transversal registró valores entre 0,0036 m²/s y 0,070 m²/s lo que permite inferir que los solutos pueden moverse fácilmente en el flujo del río Palomino, considerando que la ley de Fick expone que para líquidos este valor es cercano a 10⁻⁵ cm²/s.

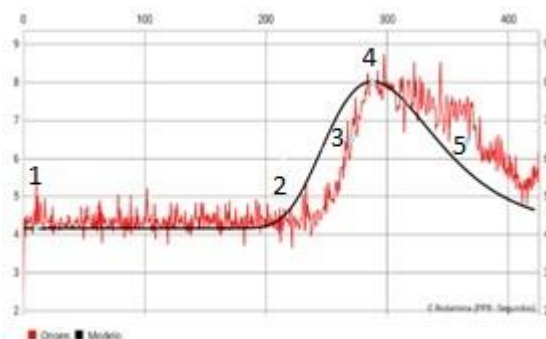
- **Temporada seca**

El muestreo realizado para la temporada seca tuvo registro de cuatro mediciones en total, dos en cada punto de descarga establecido para el tramo del río, resaltando las falencias en la toma de datos producto de los problemas de calibración que presentó el equipo Fluvia. Sin embargo, los datos en su mayoría son coherentes por lo cual es posible calcular la geomorfología del cauce. A continuación se presentan las respectivas de concentración de Rodamina y la información base para cada medición

Gráfica 7. Día 1, medición punto 1

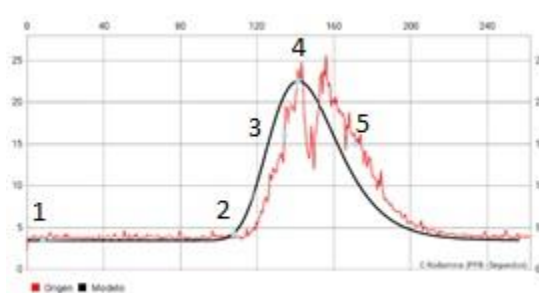


Gráfica 8. Día 1, medición punto 2

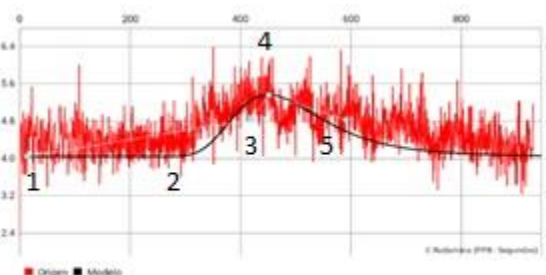


Fuente. Autores

Gráfica 9. Día 2, medición punto 1



Gráfica 10. Día 2, medición punto 2



Fuente. Autores

Tabla 4. Información base temporada seca, Día 1 medición 1, Río Palomino

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2
X (Distancia (m))	60	150	60	150
W (Ancho (m))	27,10	25,50	27,10	25,50

Q (Caudal (m^3/s))	1,339	13,231	6,859	21,423
U (Velocidad local (m/s))	0,215	0,541	0,451	0,444
Cp (Concentración pico (ppb))	32,219	8,0288	22,540	5,3669
Cb (Concentración base (ppb))	4,996	4,166	3,481	4,049
ϕ (Tubo de corriente)	0,520	0,356	0,282	0,413
tp (Tiempo pico (s))	278,943	277,142	133,085	450,936

Fuente. Autores

Al igual que para la temporada de lluvia se determinó la geomorfología del río arrojando los siguientes resultados

Tabla 5. Cálculos geomorfología temporada seca

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 1
H (Lámina de agua (m))	0,229	0,981	0,541	1,892
E (Coeficiente de dispersión (m^2/s))	0,373	0,647	0,230	1,622
Pendiente (S)	0,025	0,0069	0,0008	0,00068
U (Velocidad local 1 (m/s))	0,183	0,543	0,449	0,442
R (Radio hidráulico (m))	0,225	0,928	0,538	1,647
C (Coeficiente de Chezy)	2,123	16,271	21,642	10,384
U (Velocidad local 2 (m/s))	0,182	0,542	0,449	0,442
F (Función pendiente)	4,43	6,47	6,42	6,86
εy (Coeficiente de difusión transversal (m^2/s))	0,0124	0,0058	0,0085	0,048

A partir de la información geomorfológica calculada, se presentan variaciones en el caudal medio, de acuerdo con el ancho medido para los puntos de descarga (27,10 m y 25,50 m) se evidencia una disminución del caudal de acuerdo a lo esperado para la temporada seca, registrando valores entre 1,339 m³/s y 21,453 m³/s. Sin embargo este último se considera un dato anómalo considerando que la calibración del equipo para la cuarta toma de datos dio lugar a inconvenientes por lo cual se consideran datos desacertados, es por esto que se toma como valor superior de caudal el registrado para la segunda medición (13,321 m³/s), el cual es similar a las condiciones del río. Dicho esto, es evidente que los valores de nivel de lámina de agua disminuyeran, exceptuando la última medición la cual registra un valor inusual del 1,892 m por lo cual se desprecia del estudio. Se destaca la variación en el ancho del río para el segundo punto de descarga ya que para este caso se presentó una disminución de 10 m en comparación a los muestreos en temporada de lluvia, debido a que la orilla derecha del río cuenta con un valor bajo por lo cual para el muestreo esa parte del río quedó seca, lo que dio lugar a la disminución directa del caudal medio. El coeficiente de dispersión longitudinal presentó variaciones entre 0,230 m²/s y 0,647 m²/s por lo cual se infiere que hay baja probabilidad de dispersión de solutos a lo largo del cauce, teniendo en cuenta los altos niveles de radiación solar y el incremento en las velocidades para la temporada seca, es coherente afirmar que las partículas se podrán degradar en menor tiempo aguas abajo del río. El cálculo de la pendiente probablemente fue el parámetro con mayor alteración debido a la inexactitud de los datos registrados por el trazador, teniendo en cuenta que el tubo de corriente solo cumplió su condición en una medición, por ende las mediciones restantes no fueron exactas para este parámetro, por lo tanto se recalculó a partir del principio de Leopold-Maddock obteniendo resultados semejantes a lo observado en campo. La velocidad local presentó un incremento en la mayoría de las mediciones con respecto a lo evaluado en temporada de lluvia, debido al incremento en la pendiente y por consiguiente el incremento en la turbulencia a lo largo del cauce. Sin embargo para la primera medición el valor de 0,183 m/s fue el más bajo para todas las mediciones en campo, influido por el cálculo de la pendiente. A pesar de esto, al realizar la comparación de las velocidades locales del trazador con las calculadas con el principio de Elder (1959) resultaron ser acordes por lo que la magnitud del parámetro resulta ser acertada para las condiciones del río.

Finalmente el coeficiente de difusión se encuentra en un rango de 0,0058 m²/s y 0,048 m²/s no presentó una variación considerable con respecto a lo registrado en la temporada de lluvia, por lo tanto se considera que la condición es similar en cuanto a la degradación de partículas líquidas aguas abajo bajo el principio de Fick.

Fase 1.4. Simulación de muestreos

- **Temporada de lluvia**

Determinada la geomorfología del río en sus diferentes mediciones, es pertinente comparar lo modelado con una simulación a partir de ecuaciones para la equivalencia de tasas de masa con las ecuaciones explicadas en la metodología. A partir de ello, se muestra la información base para cada medición en la siguiente tabla

Tabla 6. Datos para simulación con trazadores

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2 PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 3, PUNTO 1	DÍA 3, PUNTO 2
Q (Caudal (L/s))	6194,894	18711,3496	3980,739	20853,4688	7099,9688	8306,1484
ϕ (Tubo de corriente)	0,232	0,272	0,165	0,310	0,114	0,344
T (tiempo total (s))	234,443	668,842	380,245	887,881	427,214	736,250
Tg (tiempo del gatillo (s))	3,796	5,69	4,41	2,517	9,520	1,246
Cb (concentración base (ppb))	3,676	4,196	4,46	3,778	1,852	4,691
Cp (concentración pico (ppb))	28,586	7,8434	51,022	6,547	20,390	10,749
M (masa (μg))	6000000	6000000	6000000	6000000	6000000	6000000
Tp (tiempo pico (s))	141,444	275,238	158,609	288,088	281,408	298,762

Fuente. Autores

A continuación se presenta el cálculo de las ecuaciones usadas para la simulación

Tabla 7. Cálculos simulación por trazadores, temporada de lluvia

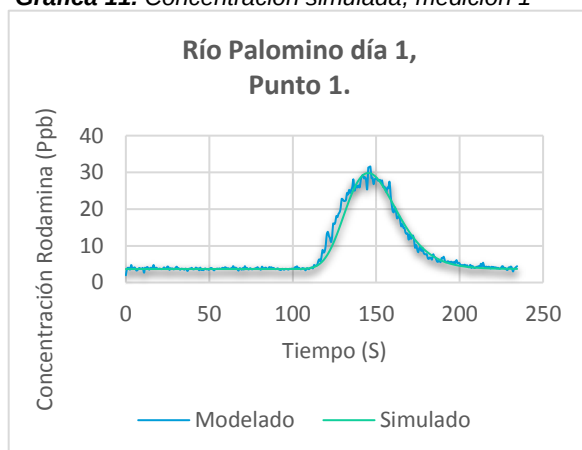
PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2 PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 3, PUNTO 1	DÍA 3, PUNTO 2
τ (Tiempo Gaussiano (s))	30,383	58,884	33,933	61,643	57,664	63,914
β (Beta)	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214	0,214
Parámetro ecuación de Fick	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16	1,16

Factor de concentración RWT (ppb)	26,145	3,770	51,070	2,8018	23,504	6,084
--	--------	-------	--------	--------	--------	-------

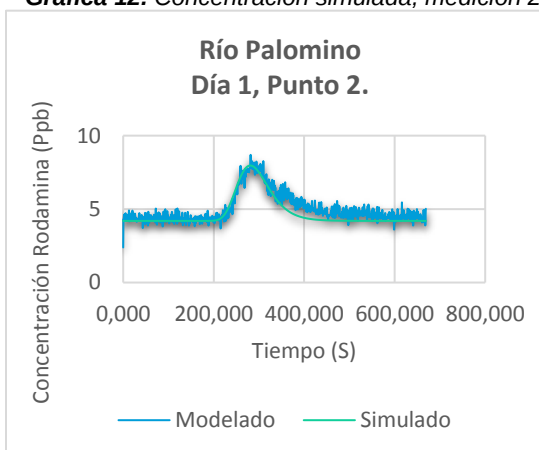
Fuente. Autores

De acuerdo con lo expresado por Elder (1959) en que expresa a Beta como una constante que relaciona el tiempo Gaussiano T_{ao} y el tiempo al pico del muestreo, se demostró para cada caso el cumplimiento de este principio tal como se ve en las ecuaciones previas. A partir de ello, fue posible calcular el factor de concentración de Rodamina y posteriormente con los tiempos registrados en Excel para cada medición, emplear el cálculo del exponente punto a punto con el fin de graficar el comportamiento del contaminante. A continuación se puede apreciar la concentración de rodamina simulada con respecto al modelo establecido por el equipo Fluvia.

Gráfica 11. Concentración simulada, medición 1

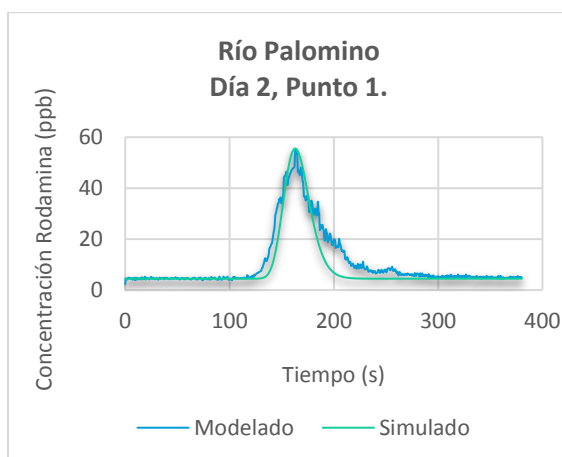


Gráfica 12. Concentración simulada, medición 2

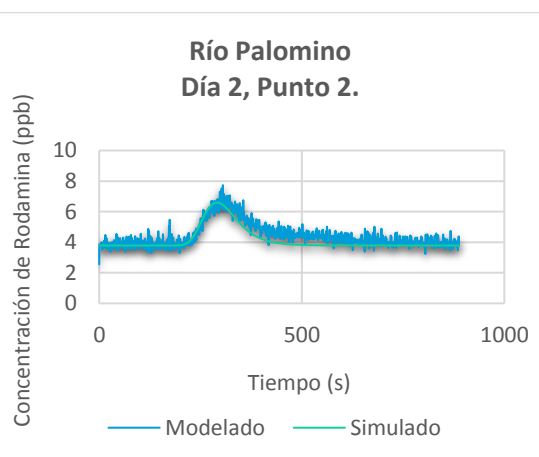


Fuente. Autores

Gráfica 13. Concentración simulada, medición 3

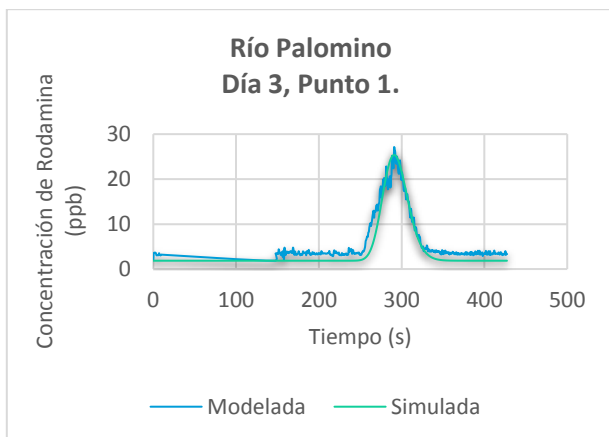


Gráfica 14. Concentración simulada, medición 4

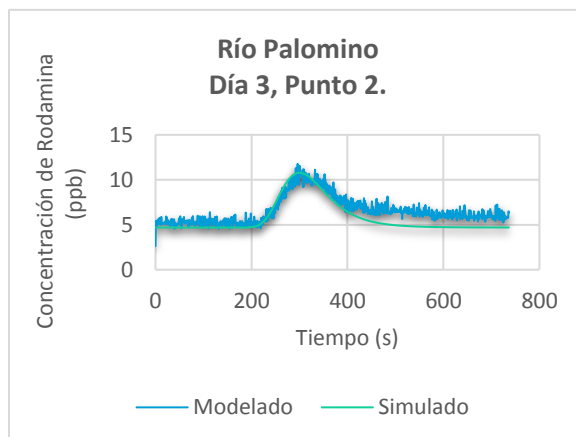


Fuente. Autores

Gráfica 15. Concentración simulada, medición 5



Gráfica 16. Concentración simulada, medición 6



Fuente. Autores

Inicialmente, se pudo demostrar la teoría de Elder en que el tiempo Beta es una constante equivalente a 0,214 al relacionar τ en función del coeficiente de dispersión, el tubo de corriente y la velocidad local de cada medición, y el tiempo pico de la misma. A partir de ello, mediante la simulación de la concentración del trazador se evidencia que la curva calculada es congruente a la modelada por el equipo fluvia para todos los casos. Pese a las condiciones de ruido ambiental producto de la radiación solar presente en el registro de datos, la información obtenida en campo fue satisfactoria para evidenciar el comportamiento del contaminante durante los muestreos. Se puede apreciar que el tiempo mínimo para alcanzar la concentración mínima de Rodamina en el punto 1 fue de 141,444 s con una magnitud de 28,586 ppb, mientras que la más baja se dio el tercer día con 20,390 ppb y un tiempo pico de 281,408 s, esto debido a la fluctuación errónea al iniciar el muestreo producto del ruido ambiental. Pese a que el tiempo pico para la quinta medición fue el más alto, la concentración de Rodamina disminuyó considerablemente a la evaluada en el segundo día (51,022 ppb) consecuencia de la radiación solar la cual permitió degradar rápidamente las partículas presentes en el río. El valor de 51,022 ppb es congruente para la tercera medición, teniendo en cuenta que la noche previa a la toma de datos llovió continuamente por lo cual el río arrastró gran cantidad de materia orgánica que elevó la carga contaminante que con normalidad presenta el río. Para el punto de descarga 2 se presentaron concentraciones de Rodamina más bajas puesto que la distancia desde el punto de vertimiento hasta el punto de toma de muestra se encontraba a 150 m haciendo que las partículas se fueran degradando rápidamente hasta pasar al final del tramo. Como se evidencia en el registro de datos, la concentración máxima del trazador fue igual a 10,749 ppb en un tiempo pico de 298,762 s. La velocidad no presentó variaciones en las mediciones del segundo punto de descarga, por lo cual se puede deducir que el registro en la concentración más alta se dio por las precipitaciones de la noche anterior lo que permitió arrastrar mayor cantidad de materia orgánica. La concentración más baja se dio en la cuarta medición con una magnitud de 6,547 ppb en un tiempo pico de 288,088 s la cual es coherente con la carga contaminante del río ya que la cantidad de materia orgánica arrastrada para esta medición fue menor; la

radiación solar en el punto de descarga 2 fue más directa y por ende las partículas fueron desapareciendo a lo largo del tramo con mayor rapidez. De acuerdo con las curvas del modelo y simulación, el comportamiento del contaminante para todas las mediciones se mostró con éxito y es coherente con la calidad del agua que caracteriza al río Palomino, sumado a que el tubo de corriente cumplió su rango base en todas las mediciones para dar mayor efectividad en los datos recolectados.

- **Temporada seca**

A partir de las cuatro mediciones realizadas en temporada seca con el método de trazadores, se determinaron parámetros bases para simular el comportamiento de la Rodamina observado en la tabla 12, a su vez con los datos obtenidos se calculan los parámetros demostrando el principio de Elder (1959) (tabla 13) y se simulan las curvas de concentración.

Tabla 8. Información base para simulación con trazadores, temporada seca

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 1
Q (Caudal (L/s))	1339,695	13231,996	6859,283	21423,617
ϕ (Tubo de corriente)	0,520	0,356	0,282	0,413
T (tiempo total (s))	1145,551	424,952	262,235	930,018
Tg (tiempo del gatillo (s))	1,226	10,795	8,254	0,6
Cb (concentración base (ppb))	4,996	4,166	3,481	4,049
Cp (concentración pico (ppb))	32,219	8,0288	22,5407	5,3669
M (masa (μg))	6000000	6000000	6000000	6000000
Tp (tiempo pico (s))	278,493	227,142	133,085	450,930

Fuente. Autores

Tabla 9. Cálculos de simulación por trazadores, temporada seca

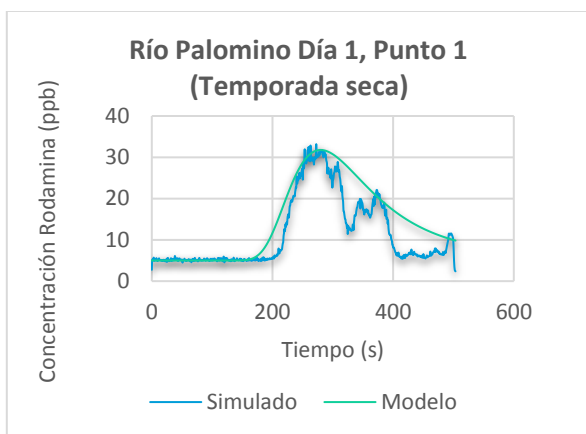
PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 1
τ (Tiempo Gaussiano (s))	59,683	59,687	28,438	96,475

β (Beta)	0,214	0,214	0,214	0,214
Parámetro ecuación de Fick	1,16	1,16	1,16	1,16
Factor de concentración RWT (ppb)	26,778	4,122	21,421	1,298

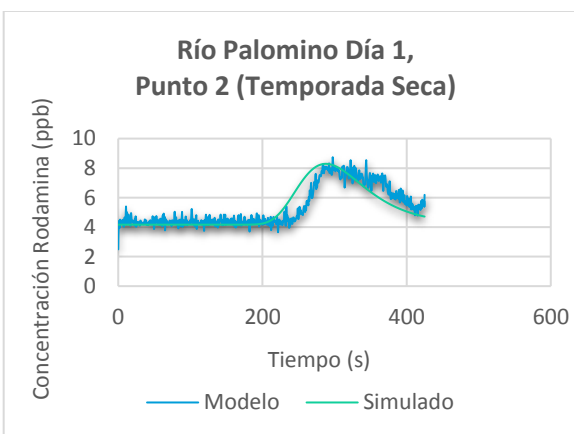
Fuente. Autores

Pese a las complicaciones evidenciadas en campo con la toma de datos, la simulación del trazador fue acorde a lo registrado por el modelo del equipo Fluvia, dando lugar a las curvas de concentración como se muestra en las siguientes graficas

Gráfica 17. Concentración simulada, medición 1

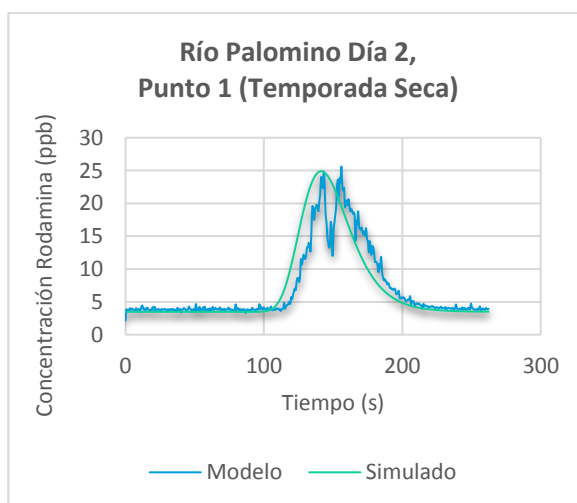


Gráfica 18. Concentración simulada, medición 2

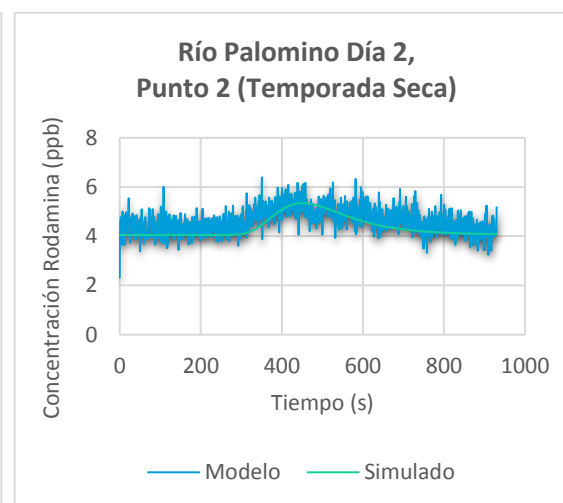


Fuente. Autores

Gráfica 19. Concentración simulada, medición 3



Gráfica 20. Concentración simulada, medición 4



Fuente. Autores

Como se evidencia en la primera gráfica, la concentración de Rodamina simulada es acorde a la modelada por el equipo Fluvia, registrando un valor pico equivalente a 31,774 ppb por lo que se evidencia que esta incrementó con respecto a la evaluada en la temporada de lluvia para la primera medición. Este incremento se debe a la sedimentación de material a las orillas del río y al convertirse en material de arrastre las cargas contaminantes incrementan a su vez, por lo que es coherente el comportamiento de las curvas registradas. Sumado a esto, al realizar las mediciones en campo se observó la presencia de lodos que a su vez eran arrastrados por el cauce del río, lo cual dio lugar a un color más oscuro del río y por ende la concentración de contaminantes elevó su magnitud. Los problemas de calibración en el equipo limitaron la efectividad de todos los datos para el muestreo, pero para el caso de la concentración de Rodamina este inconveniente no limitó simular adecuadamente la carga contaminante del río. Sin embargo al final del muestreo se puede evidenciar la formación de otra curva de concentración, la cual se desprecia debido a que esta fue generada por los errores que empezó a presentar el equipo; gracias al valor registrado por el tubo de corriente (0,356) en la segunda medición, el trazador tuvo un comportamiento más coherente a lo modelado por el equipo, dando lugar a una efectiva simulación en la concentración de Rodamina. Se alcanzó un pico de 8,2888 ppb para el segundo punto de descarga, y se tiene en cuenta que al realizar el vertimiento a 150 m de la medición las partículas se han ido degradando con facilidad a lo largo del cauce por lo que la simulación es coherente con lo observado en campo, teniendo en cuenta lo anterior la concentración real del muestreo es equivalente a 4,122 ppb, es decir la calculada en el factor de concentración Rodamina considerando que el río viene con una concentración base como se muestra en la gráfica partiendo de 4 ppb aproximadamente. La velocidad influye en que las partículas se degraden con mayor facilidad debido a la mezcla rápida que se presenta por el incremento en la turbulencia para este punto, debido a las grandes rocas que dan paso a los saltos hidráulicos. Calculada la concentración simulada de Rodamina se puede evidenciar que el pico para la tercera medición es mayor que el modelado, con un valor de 24,902 ppb; la diferencia con el modelo no es importante por lo cual el comportamiento de la carga contaminante es acorde a lo evidenciado en el río, en consideración se infiere que para la tercera medición el tubo de corriente ocupó plenamente el espacio en que se ubicaron las sondas para el muestreo, dando mayor certeza en los datos obtenidos. El incremento en la velocidad local con respecto a la evidenciada en la primera medición, dio lugar a una mayor facilidad en la degradación de partículas por lo cual es congruente el decaimiento en la concentración de Rodamina, teniendo en cuenta que la concentración base del río para este punto es de 3,481 ppb se evidencia que la carga contaminante real del río es equivalente a 21,061 ppb. Se destaca la estabilidad del modelo en el registro de datos, por lo que la campana de Gauss se aprecia en plenitud. Para esta medición se registró el tiempo pico más rápido para el muestreo de temporada seca, debido a la poca afluencia de turistas en la medición del trazador, dado esto el trazador no se estancó en su curso como si sucedió en otros casos. Con respecto a la gráfica de la última medición se puede evidenciar un

decaimiento notorio en la concentración de Rodamina, esto puede relacionarse en primera instancia a los problemas de calibración que el equipo presentó principalmente en esta medición. Además, la velocidad disminuyó con respecto a la evaluada para la medición 2, resultando ser igual a 0,444 m/s por lo cual se descarta que la degradación de partículas haya aumentado por efectos de turbulencia. A pesar de que la carga contaminante es baja, sigue siendo coherente con el comportamiento del río teniendo en cuenta que para el punto de descarga las concentraciones no son muy altas, y en temporada seca es congruente evidenciar una contaminación más baja de lo habitual. Es importante resaltar que el tubo de corriente no ocupó totalmente el área en que se ubicaron las sondas, por lo que este parámetro también pudo influir en la toma de datos. Sin embargo, al notar congruencia en las curvas de la gráfica y poner en evidencia el efecto de campana de Gauss, se considera que el muestreo fue exitoso para evaluar la concentración de rodamina en la medición 4.

Fase 2. Cálculo de ecuaciones semi empíricas

- **Temporada de lluvia**

Una vez realizada la revisión bibliográfica para el cálculo de coeficientes de reaeración con ecuaciones semi empíricas, se determinó una lista para cada medición realizada teniendo en cuenta que los parámetros para cada caso se ajusten a los rangos establecidos a cada método. Sin embargo, muchas de las ecuaciones fueron descartadas ya que estas fueron estudiadas en ríos pequeños. Previo al cálculo de las ecuaciones, se presenta la información base para cada medición.

Tabla 10. Información base para ecuaciones semi empíricas

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2 PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2	DÍA 3, PUNTO 1	DÍA 3, PUNTO 2
H (Lámina de agua (m))	0,498	0,980	0,359	1,143	1,137	0,472
U (Velocidad local (m/s))	0,424	0,545	0,378	0,521	0,213	0,502
S (Pendiente)	0,0005	0,0012	0,0002	0,0012	0,011	0,024
T (Temperatura (°C))	23,338	25,587	26,586	24,72	22,045	40,093
θ	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024	1,024

Fuente. Autores

Con base en la revisión bibliográfica para cálculo de tasas de reaeración, se filtró una lista con el total de ecuaciones a emplear en las diferentes mediciones de temporada de lluvia y en esta se tienen en cuenta las ecuaciones establecidas para cada una de las temporadas en las cuales se realizaron las mediciones.

- Churchill (1962)
- O'Connor – Dobbins (1958)
- Owens 1 y 2 (1964)
- Langbein y Durum (1967)
- Bennett y Rathbun 1 y 2 (1972)
- Tsivoglou y Neal (1976)
- Parker y Gay (1987)
- Isaac y Gaudy (1968)
- Long (1984)
- Bansal (1973)
- Dobbins (1965)
- Tsivoglou y Wallace (1972)

Cada ecuación desarrollada debe ser sometida a corrección por temperatura teniendo en cuenta que las investigaciones de cada autor se realizaron en condiciones de 20°C en cuanto a temperatura se refiere. Realizados los cálculos para cada medición, se presentan los resultados obtenidos en la tabla 14

Tabla 11. Cálculos de K_a para temporada de lluvia

AUTOR(ES)	K_a (d^{-1}) DÍA 1, PUNTO 1	K_a (d^{-1}) DÍA 1, PUNTO 2	K_a (d^{-1}) DÍA 2, PUNTO 1	K_a (d^{-1}) DÍA 2, PUNTO 2	K_a (d^{-1}) DÍA 3, PUNTO 1	K_a (d^{-1}) DÍA 3, PUNTO 2
Churchill (1962)	-	2,573	-	-	-	-
O'Connor Dobbins (1958)	7,871	-	13,115	-	1,570	13,976
Owens 1 (1964)	11,795	4,206	21,612	3,010	1,568	21,673
Owens 2 (1964)	13,571	5,257	23,900	-	-	25,057
Langbein y Durum (1967)	5,949	3,278	8,853	2,503	0,967	11,244
Bennett y Rathbun 1 (1972)	8,267	4,820	11,424	3,708	4,416	-
Bennett y Rathbun 2 (1972)	11,640	4,557	20,381	3,352	1,845	20,983
Parker y Gay (1987)	10,097	15,606	8,485	14,479	-	-
Isaac y Gaudy (1968)	-	-	9,746	2,263	0,834	11,814
Long (1984)	-	-	-	1,596	1,179	-
Bansal (1973)	-	-	-	-	0,624	-

Fuente. Autores

De acuerdo a la revisión bibliográfica realizada, en la mayoría de casos las ecuaciones se encuentran en función de nivel de lámina de agua y velocidad. Teniendo en cuenta que el tubo de corriente cumplió su condición en todas las mediciones, los datos arrojados son fiables y por ende la determinación de K_a está cercana a la realidad del río palomino. A partir de los resultados determinados, el valor más alto para K_a en el punto de descarga 1 fue de $23,900 \text{ d}^{-1}$ bajo la segunda ecuación de Owens (1964), debido a la sensibilidad que presenta la ecuación respecto a la velocidad, puesto que dicho parámetro marcó un valor bajo en la tercera medición de la cual se destaca el valor de K_a . Esto permite deducir que la recuperación de oxígeno será más lenta debido a que los solutos no se degradan rápidamente por la condición de velocidad baja. Sin embargo, es importante resaltar la inexactitud en estas ecuaciones predictivas al ser investigadas para ríos puntuales por lo que al pasar a términos generales las condiciones de evaluación varían dependiendo la corriente de agua. Los valores más bajos de K_a se dieron en la quinta medición (día 3, punto 1) pese a registrar el dato de velocidad más bajo para el caso ($0,213 \text{ m/s}$). Sin embargo esta condición se dio gracias al incremento evidente en la altura de lámina, parámetro al cual es sensible para cada una de las ecuaciones desarrolladas por lo que los valores están dentro de los rangos normales para el intercambio de oxígeno entre el agua y la atmósfera. El valor mínimo de K_a fue de $0,624 \text{ d}^{-1}$ dado por la ecuación de Bansal (1973) por lo que la recuperación de oxígeno para este caso será rápida limitando los procesos de contaminación aguas abajo. Los resultados restantes para cada ecuación en el punto de descarga 1 (medición 1 y 2) mantienen un equilibrio, por lo cual se deduce el cálculo de K_a es muy cercano a la realidad del río.

Por su parte, el punto de descarga 2 registró los valores más altos en la sexta medición (día 3, punto 2) producto de la corrección por temperatura ya que este valor registrado por el equipo fluvia fue de 40°C el cual está fuera de la realidad, por lo que se desprecian estos cálculos, al igual que el valor anómalo arrojado por la ecuación de Parker y Gay (1987) con una magnitud de $14,479 \text{ d}^{-1}$ el cual pese a acoplar sus parámetros al principio mencionado, no es acorde a los resultados de las ecuaciones restantes. Con base en lo anterior, se determina que el valor más alto de K_a para el segundo punto de descarga (medición 2) fue de $5,257 \text{ d}^{-1}$ bajo el principio de Owens (1964) el cual es coherente teniendo en cuenta la distancia recorrida del trazador desde su vertimiento, el incremento en la velocidad para este punto y así mismo el nivel de lámina de agua el cual es más del doble al registrado en el punto de medición 1. No obstante, las ecuaciones aplicadas son sensibles principalmente a la velocidad y nivel de lámina de agua, teniendo en cuenta que el tubo de corriente cumplió su rango establecido dando veracidad a los valores entregados por el equipo fluvia y los calculados para la geomorfología del río. Esto permite inferir que el río no ha permitido gran cantidad de oxígeno disuelto ya que las cargas contaminantes son mínimas y por tanto tiene la capacidad de recuperar sus condiciones habituales con facilidad.

- **Temporada seca**

Para la temporada seca se presentan los siguientes datos base para posteriormente realizar el cálculo de las tasas de reaireación para cada una de las ecuaciones elegidas con su respectiva corrección de temperatura.

Tabla 12. Información base para ecuaciones semi empíricas

PARÁMETRO	DÍA 1, PUNTO 1	DÍA 1, PUNTO 2	DÍA 2, PUNTO 1	DÍA 2, PUNTO 2
H (Lámina de agua (m))	0,498	0,980	0,359	1,143
U (Velocidad local (m/s))	0,424	0,545	0,378	0,521
S (Pendiente)	0,0005	0,0012	0,0002	0,0012
T (Temperatura (°C))	23,338	25,587	26,586	24,72
θ	1,024	1,024	1,024	1,024

Fuente. Autores

Tabla 13. Cálculo de Ka para temporada seca

AUTOR(ES)		Ka (d ⁻¹) DÍA 1, PUNTO 1	Ka (d ⁻¹) DÍA 1, PUNTO 2	Ka (d ⁻¹) DÍA 2, PUNTO 1	Ka (d ⁻¹) DÍA 2, PUNTO 2
O'Connor Dobbins (1958)		-	3,898	7,040	1,106
Owens 1 (1964)		32,566	4,841	10,228	1,048
Owens 2 (1964)		33,293	6,035	11,952	-
Bennett y Rathbun 1 (1972)		60,631	7,515	8,640	1,632
Bennett y Rathbun 2 (1972)		29,613	5,228	10,248	1,278
Parker y Gay (1987)		59,272	-	-	-
Isaac y Gaudy (1968)		10,465	-	-	-
Tsivoglou y Wallace		11,073	-	-	-

(1972)				
Tsivoglou y Neal (1976)	12,474	-	-	-

Fuente. Autores

Se determinó un total de ocho ecuaciones pertinentes para el cálculo de tasas de reaireación de la medición 1 en temporada seca. Pese a que todas las ecuaciones mencionadas en la tabla anterior se ajustan los parámetros base para cada caso, se puede evidenciar una gran variación en los resultados obtenidos. El valor atípico superior se da en la ecuación de Bennett y Rathbun (1) con un dato de $60,631 \text{ d}^{-1}$ el cual no es coherente con el proceso de reaireación del río. Los valores más consecuentes se dan a partir de las ecuaciones de Owens (1964) dado que el primer día de medición se observó gran cantidad de lodo que iba siendo arrastrado a lo largo del cauce lo que pudo influir en el incremento de solutos y por ende, una recuperación más alta de oxígeno disuelto con respecto a lo evaluado para temporada lluviosa en la primera medición. De acuerdo con los resultados para las ecuaciones resultas se puede evidenciar que la reaireación mantuvo un equilibrio con respecto a lo evaluado en la segunda medición de temporada lluviosa, esto se puede relacionar a los valores similares de velocidad que se presentaron para cada caso. La reaireación se encuentra en un rango de 3 y 6 d^{-1} por lo que la cantidad de material de arrastre en este punto es mínimo y la capacidad de oxigenar el agua es muy buena, por ende se mantienen condiciones óptimas en cuanto a calidad de agua para el segundo punto de descarga. El valor más alto registrado por la ecuación de Bennett y Rathbun (1972) (1) igual a $5,933 \text{ d}^{-1}$ a pesar de no estar tan acorde con los resultados restantes, es un valor que mantiene la lógica del proceso de reaireación para este caso. La tercera medición (día 2, punto 1) dio lugar a un proceso de reaireación más acorde a las condiciones del Río Palomino, teniendo en cuenta que la contaminación en el cauce es mínima y por ende la facilidad de recuperar oxígeno es muy alta. Sumado a esto, la degradación de partículas para esta medición se da en menor tiempo teniendo en cuenta que la velocidad de $0,451 \text{ m/s}$ es más del doble a la registrada en la medición 1, y así mismo la pendiente para la medición fue un poco más inclinada teniendo en cuenta que las condiciones climáticas a la hora del muestreo se dieron en altas temperaturas. El valor más alto para coeficientes de reaireación se dio al desarrollar la ecuación de Owens (1964) (2) con un dato de $11,952 \text{ d}^{-1}$. Por último, es importante resaltar que el valor de tubo de corriente fue fundamental para obtener valores verídicos de todo el muestreo, lo que pudo influir en el cálculo más certero de K_a para esta medición. Partiendo de la información recopilada para la cuarta medición, en primera instancia se puede evidenciar que se registraron valores atípicos con respecto a los evaluados en las mediciones restantes, por ejemplo la altura de lámina de agua ($1,892 \text{ m}$) el cual está fuera de la realidad teniendo en cuenta que para temporada seca este valor debe ser menor al registrado en diciembre. Dicho esto, es evidente que el proceso de reaireación bajó excesivamente con respecto a lo evaluado el resto de días de muestreo, registrando un valor inferior de $1,048 \text{ d}^{-1}$ a partir de la ecuación de Owens (1964) (1). Pese a que la calidad del agua del Río Palomino es muy buena,

los valores en cuanto a tasas de reaireación no son verídicos del todo. Sin embargo para este caso, la velocidad continúa siendo alta (0,444 m/s) por lo cual la degradación de partículas se da rápidamente. Sabiendo que cada ecuación desarrollada depende directamente de los valores de lámina de agua y velocidad local, se puede deducir que aplicar ecuaciones semi-empíricas para esta medición no es aconsejable teniendo en cuenta el fallo en los datos recopilados mediante el equipo fluvia sin dejar de lado los problemas de calibración que éste presentó al realizar el muestreo de temporada seca.

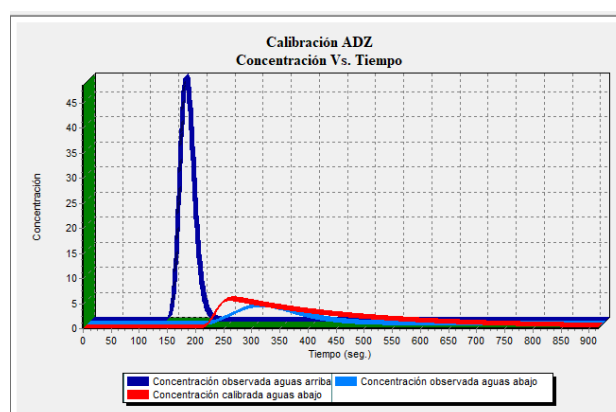
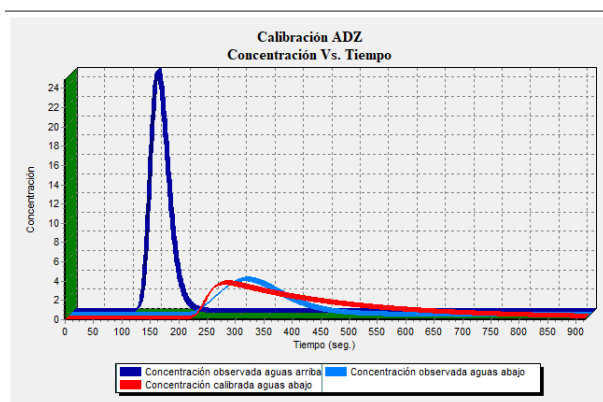
Fase 2.1. Análisis de solutos

- **Temporada de lluvia**

En la gráfica 21 y 22 se evidencian las concentraciones aguas arriba y aguas abajo identificadas por colores azul oscuro y azul claro respectivamente, la curva de concentración de color rojo representa la calibración de la concentración indicando que se ajusta en gran medida a los datos registrados por el equipo fluvia, una vez realizada la calibración se obtiene un valor de R^2 que indica la confiabilidad de los datos, el retraso advectivo y el tiempo de viaje.

Gráfica 21. Calibración ADZ, día 1 tiempo lluvioso

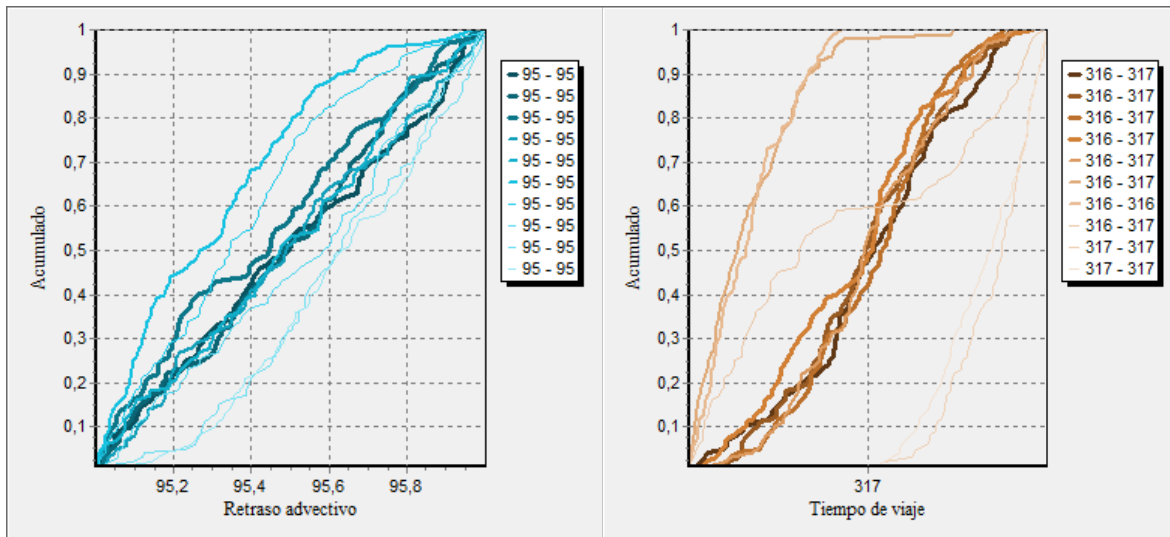
Gráfica 22. Calibración ADZ, Día 2 tiempo lluvioso



Fuente. Autores

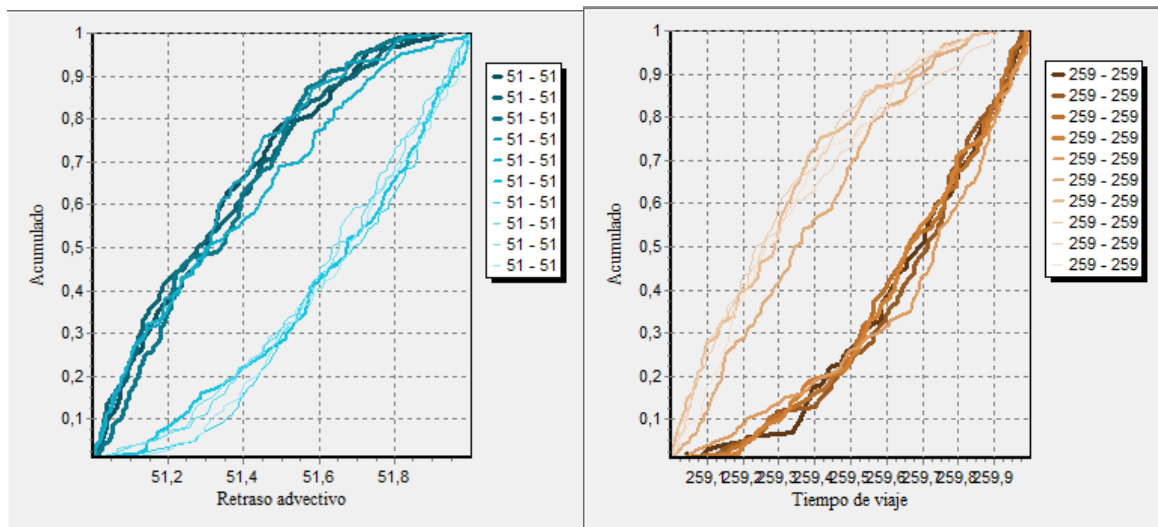
A su vez en las gráficas de sensibilidad regional presentadas en la ilustración 5 se puede observar que la distribución de los datos es notable para el tiempo de viaje, ya que por la tendencia de la curva se determina la sensibilidad por la forma de esta, en comparación con la del retraso advectivo ya que esta presenta una tendencia lineal. El tiempo de viaje obtenido representa un valor de 317 segundos y para el retraso advectivo un valor de 95, lo que indica que justo en el momento en que un soluto ingrese al río se disponen de 317 s para que este recorra 150 m a lo largo de este.

Ilustración 10. Sensibilidad regional, Río Palomino día 1, tiempo lluvioso



Fuente. Autores

Ilustración 11. Sensibilidad regional, Río Palomino día 2, tiempo lluvioso



Fuente. Autores

Para el segundo día de medición se establece un retraso advectivo de 52 s y un tiempo de viaje de 259 s, siendo este último el parámetro sensible presentando similitud frente al comportamiento obtenido para el primer día.

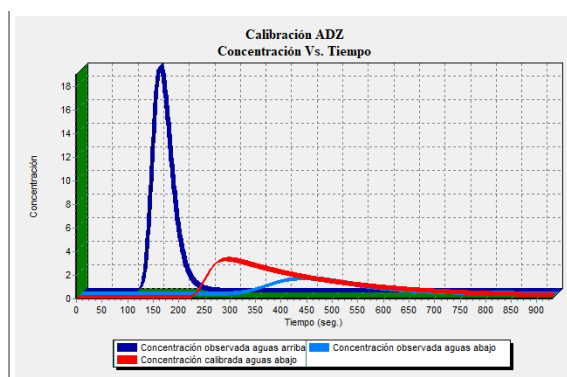
Finalmente se establece una relación cercana y acertada de los datos con respecto a las pruebas realizadas con el equipo Fluvia para los datos registrados en la temporada de lluvia, además de constatar que los tiempos de viaje para cada

uno de los días se encuentra en un rango cercano que va desde 259 s hasta 317 s.

- **Temporada seca**

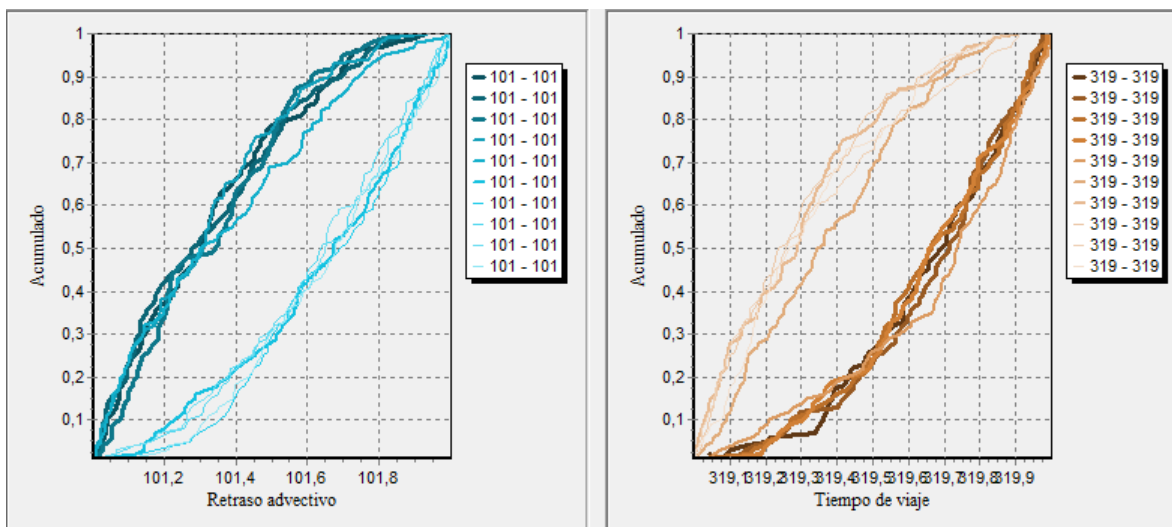
Dado que se presentaron inconvenientes con el equipo en la medición para el primer día, se realizó la respectiva calibración encontrando que los datos presentan inconsistencias y no son fiables, es por esto que se decide descartar este día para la calibración, por tanto se tomaron los valores del segundo día como se observa en la ilustración 2.

Ilustración 12. Calibración ADZ, Día 2 tiempo seco



Fuente. Autores

Ilustración 13. Sensibilidad regional, Río Palomino, día 2 tiempo seco



Fuente. Autores

Teniendo en cuenta lo anterior se evidencia que la curva de calibración para el segundo día se logra ajustar en gran medida a la serie de datos registrados, es así que se logra obtener la sensibilidad regional como se observa en la ilustración 13, donde se encuentra que el parámetro sensible es el tiempo de viaje el cual presenta un valor de 319 s.

Finalmente se considera que los datos para las dos temporadas se relacionan ya que el tiempo de viaje se encuentra en un rango de 259 s a 319 s lo que indica que se dispone de esta cantidad de tiempo para que un contaminante se desplace por el río Palomino, a su vez se tiene en cuenta la capacidad de oxigenación del río ya que con los valores de las tasas de reaeración se espera una buena recuperación del río.

Fase 3. Diseño y construcción del reactor

Para esta se fase se establecen los datos observados en la tabla 2, de esta manera se realizan las respectivas pruebas para constatar que el reactor funciona de manera eficiente.

Tabla 14. Parámetros de diseño reactor

PC_3H_8 (atm)	PM (g/mol)	H' (g/aire g/agua)	R (atm/mol K)	T (°K)	V _{agua} (L)	M C_3H_8 (g)	W (m)	H (m)	S
1,16	44	168	0,082	293,15	8	0,126	35	0,5	0,501

Fuente. Autores

Tabla 15. Parámetros registrados por equipo Fluvia

M RWT (g)	tc 1 (s)	tc 2 (s)	Ka (T) (d-1)	Kg (C_3H_8) (d-1)	tp (s)	u (m/s)	ϕ	D	C _{máx}
6	137,002	335,784	83,363	60,405	275,238	0,545	0,272	0,647	5,978

Fuente. Autores

Tabla 16. Resultados masa gas propano

Concentración máxima C_3H_8	Masa C_3H_8
5,978	0,030 g

Fuente. Autores

Tomando como referencia la relación utilizada por Hibbs y las variables registradas por el equipo Fluvia se obtuvo que la masa del gas Propano es 0,030 g.

Fase 3.1. Cálculo de tasas de reaeración mediante intercambio gaseoso

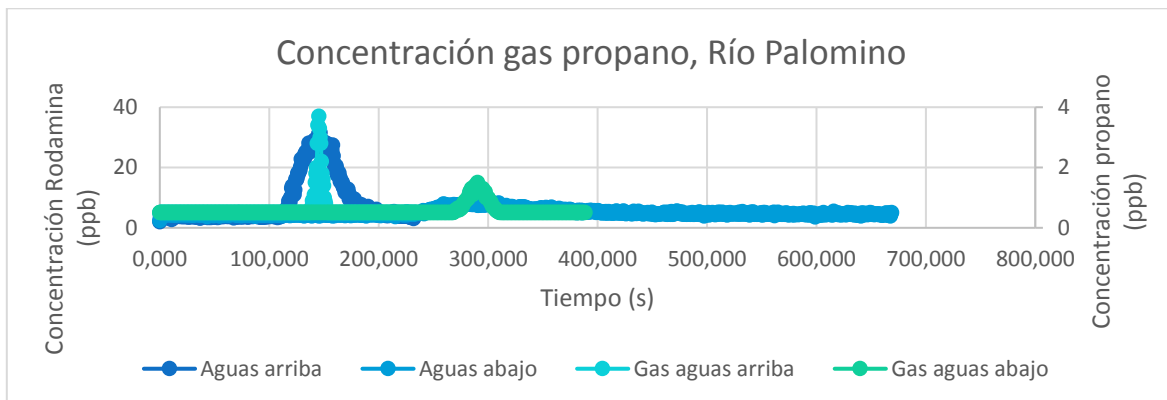
Para realizar el cálculo de la tasa de reaeración fue necesario obtener los valores de concentración del propano y con esto estimar el resultado, para luego comparar lo obtenido en el experimento con trazadores seleccionando la ecuación más adecuada. A continuación se evidencian los resultados de las ecuaciones empleadas para esta medición:

Tabla 17. Estimación de K_a por medio de intercambio gaseoso, Río Palomino

PARÁMETRO	VALOR
$K_g (d^{-1})$	1,028
$T_p (día)$	0,0006713
$C_{g1} (ppb)$	4,144
$C_{g2} (ppb)$	1,568
$C_{c1} (ppb)$	29,821
$C_{c2} (ppb)$	7,9659
J	-183,339
$Q1 (m^3/s)$	6,194
$Q2 (m^3/s)$	18,711
$DO_2 (cm^2/s) [34]$	$1,76 \times 10^{-5}$
$D_g (cm^2/s) [34]$	$0,68 \times 10^{-5}$
$K_a (d^{-1})$	1,653

Fuente. Autores

Gráfica 23. Comportamiento trazador gaseoso (propano), Río Palomino



Fuente. Autores

Considerando los datos anteriores se observa un valor negativo para el parámetro J dado que el área bajo la curva de las concentraciones del gas arroja un valor bajo ya que hay una directa relación de las concentraciones del trazador. El tiempo de viaje se toma a partir de los resultados generados por el modelo ADZ teniendo en cuenta que se debe realizar una conversión de unidades de segundos a días. Sumado a esto se relacionan las concentraciones de metano registradas por el equipo BIOGAS 5000 para expresarlas en unidades de propano,

considerando que estas se encuentran en *ppb*; a partir de esta información se calculó la tasa de volatilización del trazador gaseoso arrojando un valor de 1,028 d^{-1} para posteriormente comparar el K_a con la tasa más adecuada de las ecuaciones semi empíricas. El valor obtenido fue de 1,653 d^{-1} siendo un valor cercano al arrojado por la ecuación de O'Connor – Dobbins (1958) el cual equivale a 1,570 d^{-1} lo cual es congruente con las condiciones del río dadas las proyecciones “local – general” que evidencian que la altura de lámina de agua concuerda con la geomorfología del cauce.

Cabe resaltar que al realizar la comparación entre las tasas se encontraron varias ecuaciones válidas para el cálculo (ver ANEXO 1), sin embargo se registraron valores anómalos en algunas de ellas por lo que se descartaron para la comparación del K_a registrado por el trazador gaseoso.

El K_a seleccionado fue el dado por la ecuación de O'Connor – Dobbins ya que las condiciones del tubo de corriente fueron las más apropiadas para la quinta medición (día 3, medición 1) con un valor de 0,114 teniendo en cuenta que este se encuentra por debajo de 0,38 [27] siendo este un rango predeterminado.

CONCLUSIONES

- Las tasas de reaireación obtenidas a partir del cálculo de las ecuaciones semi empíricas son congruentes frente al comportamiento observado en el río Palomino, ya que los datos presentados arrojan tiempos cortos lo que quiere decir que la capacidad de oxigenación del río es alta gracias a los bajos niveles de lámina de agua, facilitando la presencia de OD en la superficie del cauce.
- Los valores determinados para caudal medio del río son acordes con los datos históricos de la estación limnigráfica Puente Carretera, teniendo en cuenta el nivel de lámina de agua para cada temporada evaluada.
- A partir de los resultados del coeficiente de dispersión longitudinal, es evidente la baja probabilidad de esparcimiento de los solutos a lo largo y ancho del río, por lo cual se degradan con facilidad aguas abajo en tiempos cortos.
- El cálculo de la geomorfología para temporada de lluvia fue exitoso en gran medida al cumplir la condición del tubo de corriente, cubriendo la pluma del trazador en plenitud para cada medición.
- La pendiente presentó errores en sus cálculos debido al no cumplimiento de la función F , por lo que se tomaron los valores más cercanos a la realidad para el cálculo de tasas de reaireación mediante ecuaciones semi-empíricas.
- Los resultados del coeficiente de difusión molecular demuestran la facilidad de los solutos para moverse a lo largo del río, teniendo en cuenta que estos valores son acordes a la teoría de Fick para movimiento de líquidos y sólidos.

- Las concentraciones de Rodamina calculadas por el modelo son acordes a lo simulado bajo ecuaciones predictivas, demostrando correctamente como es el comportamiento del contaminante a lo largo del tramo del río.
- La construcción del reactor fue exitosa, ya que permitió una mezcla adecuada entre los dos trazadores, disminuyendo pérdidas y obteniendo la tasa de reaireación adecuada teniendo en cuenta las condiciones del río Palomino.
- La calibración ADZ permitió conocer la fiabilidad de los datos registrados para cada una de las mediciones, y a su vez las variables principales fueron importantes para la determinación de las K_a .
- Los tiempos de viaje estimados para cada temporada se encuentran en un rango de 259 s y 319 s, y estos permiten establecer con más exactitud el comportamiento y transporte de contaminantes que puedan estar presentes en el río Palomino.
- El K_a hallado por el experimento de intercambio gaseoso es congruente con el K_a estimado por método empírico de O'Connor – Dobbins por lo que este valor representa de forma correcta la oxigenación del Río Palomino lo que conlleva a inferir un muestreo exitoso.
- Se ratifica que el método de inyección de trazadores no conservativos es más apropiado para el cálculo de coeficientes de reaireación dado que este arroja valores ajustados a cada una de las condiciones de oxigenación de los cuerpos de agua.

REFERENCIAS

- [1] S. Bagchi, «Arsenic threat reaching global dimensions», *Can. Med. Assoc. J.*, vol. 177, n.º 11, pp. 1344-1345, nov. 2007.
- [2] R. Ballance y J. Bartram, Eds., *Water Quality Monitoring: A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes*. Spon Press, 1998.
- [3] B. A. Cox, «A review of dissolved oxygen modelling techniques for lowland rivers», *Sci. Total Environ.*, vol. 314-316, pp. 303-334, oct. 2003.
- [4] B. A. Cox, «A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers», *Sci. Total Environ.*, vol. 314-316, pp. 335-377, oct. 2003.
- [5] D. L. Correll, «The Role of Phosphorus in the Eutrophication of Receiving Waters: A Review», *J. Environ. Qual.*, vol. 27, n.º 2, p. 261, 1998.
- [6] C. M. Cooper, «Biological Effects of Agriculturally Derived Surface Water Pollutants on Aquatic Systems—A Review», *J. Environ. Qual.*, vol. 22, n.º 3, pp. 402-408, 9/01 1993.

- [7] IDEAM, «Estudio Nacional del Agua 2014». 2014.
- [8] E. Sánchez *et al.*, «Use of the water quality index and dissolved oxygen deficit as simple indicators of watersheds pollution», *Ecol. Indic.*, vol. 7, n.º 2, pp. 315-328, abr. 2007.
- [9] DANE, «Clasificación Industrial Internacional Uniforme de Todas las Actividades», DANE.
- [10] Cormagdalena, «Informe de monitoreo del recurso hídrico según Decreto 2667 de 2012- Corrientes que cuentan con objetivos de calidad en jurisdicción», CORMAGDALENA, 2015.
- [11] P. R. Kannel, S. R. Kanel, S. Lee, Y.-S. Lee, y T. Y. Gan, «A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams», *Environ. Model. Assess.*, vol. 16, n.º 2, pp. 183-204, abr. 2011.
- [12] I. Neuta, C. Reyes, L. Romero, L. Serpa, y S. Vasquez, «Cuenca hidrográfica Palomino.pdf». Universidad del Magdalena.
- [13] Universidad de Sucre, J. J. Feria Díaz, D. Náder Salgado, Universidad Pontificia Bolivariana, S. J. Meza Pérez, y Universidad Pontificia Bolivariana, «Deoxygenation and re-aeration rates of the Sinu river», *Ing. Desarro.*, vol. 35, n.º 1, pp. 1-17, ene. 2017.
- [14] H. Haider, W. Ali, y S. Haydar, «Evaluation of various relationships of reaeration rate coefficient for modeling dissolved oxygen in a river with extreme flow variations in Pakistan», *Hydrol. Process.*, vol. 27, n.º 26, pp. 3949-3963.
- [15] A. F. Nadal y A. M. Cossavella, «Determinación de la tasa de reaireación y modelación hidrodinámica de un tramo del río Tercero (Ctalamochita)», vol. 1, n.º 1, p. 10, 2014.
- [16] M. J. Gromiec, «Reaeration», en *Developments in Environmental Modelling*, vol. 14, Elsevier, 1989, pp. 33-64.
- [17] A. Trento, «CÁLCULO DEL COEFICIENTE DE REAIREACIÓN EN EL TRAMO INFERIOR DEL RÍO SALADO (SANTA FE)», p. 9.
- [18] D. J. O'Connor y W. E. Dobbins, «Mechanism of Reaeration in Natural Streams», *Trans. Am. Soc. Civ. Eng.*, vol. 123, n.º 1, pp. 641-666, 1958.
- [19] J. P. BENNETT, «Reaeration in Open-Channel Flow», p. 86.
- [20] P. Balmér y M. Tagizadeh-Nasser, «Oxygen transfer in gravity flow sewers», p. 9.
- [21] L. A. O. MEDINA, «DETERMINACIÓN Y COMPARACIÓN DE LA TASA DE REAIREACIÓN DE LOS RÍOS MOLINOS, TORCA, ARZOBISPO Y DE LA QUEBRADA LA VIEJA, EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ MEDIANTE LA APLICACIÓN DE ECUACIONES EMPÍRICAS.», p. 68, 2016.
- [22] H. Zojer, «Técnicas de trazadores», p. 16.

- [23] Cesar Guzman Martinez, «Marco teórico para geoquímica de trazadores», 23:59:12 UTC.
- [24] D. A. A. Fernández, «Aplicación de un modelo de transporte de solutos en el análisis de la hidrodinámica y el transporte de las concentraciones contaminantes en un hidrosistema urbano en Bogotá», p. 127.
- [25] T. Beer y P. C. Young, «Longitudinal Dispersion in Natural Streams», *J. Environ. Eng.*, vol. 109, n.º 5, pp. 1049-1067, oct. 1983.
- [26] M. J. Lees, L. A. Camacho, y S. Chapra, «On the relationship of transient storage and aggregated dead zone models of longitudinal solute transport in streams», *Water Resour. Res.*, vol. 36, n.º 1, pp. 213-224, ene. 2000.
- [27] A. Constaín A., J. Carvajal R, A. Carvajal R, y R. Lemos R, «Nuevo método de cálculo de la longitud de mezcla en cauces naturales con trazadores conservativos». .
- [28] FLUVIA, «Informe Prueba de Trazadores.docx». .
- [29] A J Constain, D J Mesa, C A Peña-Guzmán, y J L Corredor, «A New method to measure slope in large rivers using tracers», *Unpublished*, 2014.
- [30] C. Aragón, A. José, M. Fernández, y D. Javier, «CONTAMINATION PLUMES», vol. 7, p. 10, 2015.
- [31] K. Beven y A. Binley, «The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction», *Hydrol. Process.*, vol. 6, n.º 3, pp. 279-298, jul. 1992.
- [32] D. E. Hibbs, K. L. Parkhill, y J. S. Gulliver, «Sulfur Hexafluoride Gas Tracer Studies in Streams», *J. Environ. Eng.*, vol. 124, n.º 8, pp. 752-760, ago. 1998.
- [33] J. Holguín y A. Camacho, «Determinación de la tasa de reaireación en un río de montaña.pdf».
- [34] D. P. Genereux y H. F. Hemond, «Determination of gas exchange rate constants for a small stream on Walker Branch Watershed, Tennessee», *Water Resour. Res.*, vol. 28, n.º 9, pp. 2365-2374, sep. 1992.