

# Condicionantes hidráulicos del proceso de reaeración. Caso: Quebrada La Pereira

Ana María Jaramillo Sarmiento, Daniel Camilo Largo Gaviria, & Nora Elena Villegas Jiménez

Universidad de Antioquias  
aamoreno@unal.edu.co

*Recibido para evaluación: 05 de Septiembre de 2008 / Aceptación: 01 de Octubre de 2008 / Versión Final: 20 de Octubre de 2008*

## Resumen

El propósito de esta investigación fue contribuir al conocimiento de los mecanismos físicos que gobiernan los procesos de transporte y reaeración en la quebrada La Pereira por medio de la evaluación experimental de dos parámetros del proceso de transporte en corrientes (tiempos de viaje y coeficiente de dispersión longitudinal) en dos tramos representativos de esta corriente, donde se midieron sus atributos hidráulicos y se estimó el coeficiente de reaeración a partir de fórmulas empíricas.

Esta quebrada está ubicada al suroriente del departamento de Antioquia y es un afluente importante del río Negro, en cuya cuenca se genera el 30% de la energía hidroeléctrica del país, por lo cual es de gran importancia el aporte al conocimiento de los procesos de transporte y transformación de sustancias en las corrientes que conforman esta cuenca. Se obtuvieron tiempos de viaje, coeficientes de dispersión longitudinal ( $E$ ) y coeficientes de reaeración ( $K_2$ ) para un intervalo amplio de caudales (0,88 a 6,44 m<sup>3</sup>/s). Los valores de estos coeficientes fueron similares en los dos tramos y se consideran bajos (para  $E$  entre 0,29 y 3,6 m<sup>2</sup>/s y para  $K_2$  entre  $1,80 \times 10^{-5}$  y 5,15 d<sup>-1</sup>).

**Palabras claves:** Coeficiente, Dispersión, Reaeración, Trazador, Tiempo de viaje.

## Abstract

The purpose of this research was to contribute to the knowledge of the physical mechanisms that govern the reaeration and transport processes of La Pereira stream, through the experimental evaluation of two parameters of the transport processes in streams (travel time and longitudinal dispersion coefficient) in two representative reaches of this stream, where its hydraulic attributes were measured and the reaeration coefficient was estimated from empirical formulas.

This stream is located in the southeast of the province of Antioquia and it is an important tributary of Rionegro river, in whose basin the 30% of the country's electric power is generated, this is why it is important to know the hydraulic characteristic and substance transformation of its tributary streams. Travel times, longitudinal dispersion ( $E$ ) and reaeration ( $K_2$ ) coefficients were obtained for a wide range of flows (0,88 y 6,44 m<sup>3</sup>/s). The values of these coefficients were similar in both reaches and are considered low ( $E$  between 0,29 and 3,6 m<sup>2</sup>/s and  $K_2$  between  $1,80 \times 10^{-5}$  and 5,15 d<sup>-1</sup>).

**Keywords:** Coefficient, Dispersion, Reaeration, Tracer, Travel time.

## 1. Introducción

El oxígeno disuelto (OD) es un parámetro fisicoquímico comúnmente utilizado como indicador de la calidad del agua. La reducción severa de éste significa un deterioro de la calidad del hábitat para muchos organismos en los cuerpos de agua.

La concentración de OD de un cuerpo de agua resulta de la interacción de varios procesos, de los cuales unos son *fuentes* y otros son *sumideros*. Para cuantificar el efecto de los anteriores procesos, se cuenta con expresiones cinéticas que se incluyen en diferentes modelos de los cuales el más conocido es el de Streeter-Phelps (Gualtieri y otros, 2002). La reaireación, que suele modelarse como el producto del coeficiente de reaireación y del déficit de oxígeno en la corriente, es la absorción física de oxígeno de la atmósfera al agua y es generalmente el fenómeno que genera el mayor ingreso de oxígeno al sistema acuático, por lo que debe estimarse cuidadosamente. El coeficiente de reaireación puede

determinarse por medio de relaciones empíricas que incluyen características físicas e hidráulicas de la corriente, o mediante ensayos de trazadores, en los cuales es necesario el conocimiento de las condiciones que regulan la dinámica de mezcla y transporte en el cuerpo de agua. En la literatura se encuentran muchas ecuaciones para estimar el coeficiente de reaireación atmosférica, pero ninguna de ellas puede aplicarse en todas las condiciones hidrodinámicas.

Entender cómo se mueve el agua en las corrientes es muy importante, pues estas condiciones de flujo explican gran parte de la variación de la calidad del agua (Chapra, 1997). El transporte de sustancias conservativas disueltas en el agua se puede modelar adecuadamente con una buena comprensión de los procesos de mezcla y dispersión que tienen lugar en los cuerpos de agua (Kilpatrick y Wilson, 1988). Los procesos de mezcla y dispersión están asociados con la velocidad de la corriente, y ésta al caudal, elemento primordial en la capacidad asimilativa del sistema. Alcanzar un alto grado de conocimiento sobre las variaciones del caudal y los tiempos de viaje y el

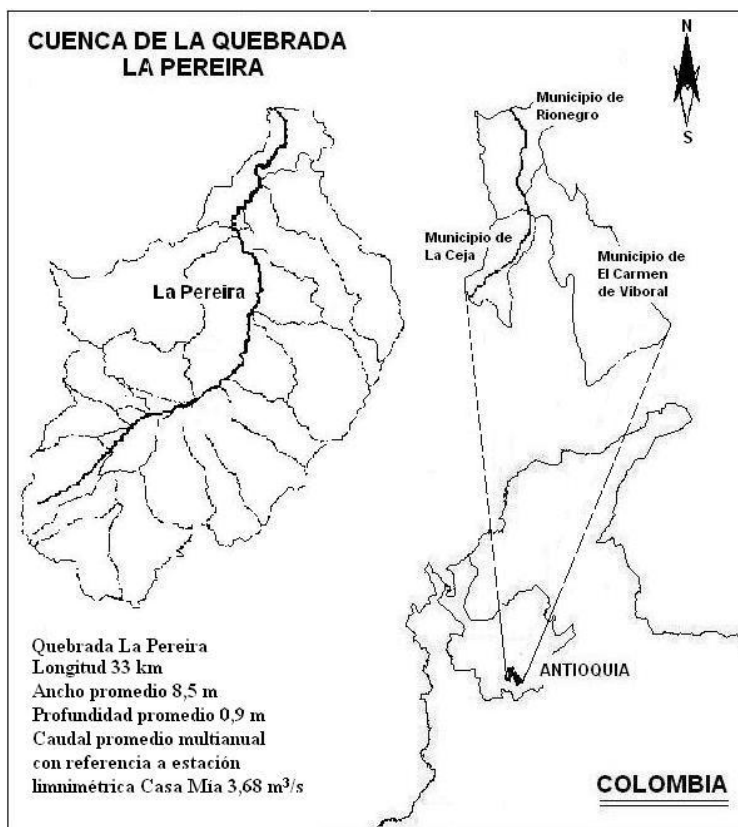


Figura 1. Área de estudio (sin escala)

proceso de dispersión de sustancias en cuerpos de agua constituye una herramienta esencial en la toma de decisiones en casos de descargas de contaminantes (McCutcheon, 1989).

Este trabajo tiene como propósito contribuir al conocimiento de los mecanismos físicos que gobiernan los procesos de transporte y reaeración en la quebrada La Pereira, la cual está ubicada al suroriente del departamento de Antioquia (Figura 1) y es un afluente importante del río Negro, en cuya cuenca se genera el 30% de la energía hidroeléctrica del país. Adicionalmente se busca aportar al conocimiento del uso de trazadores para estimar parámetros de transporte en una quebrada particular.

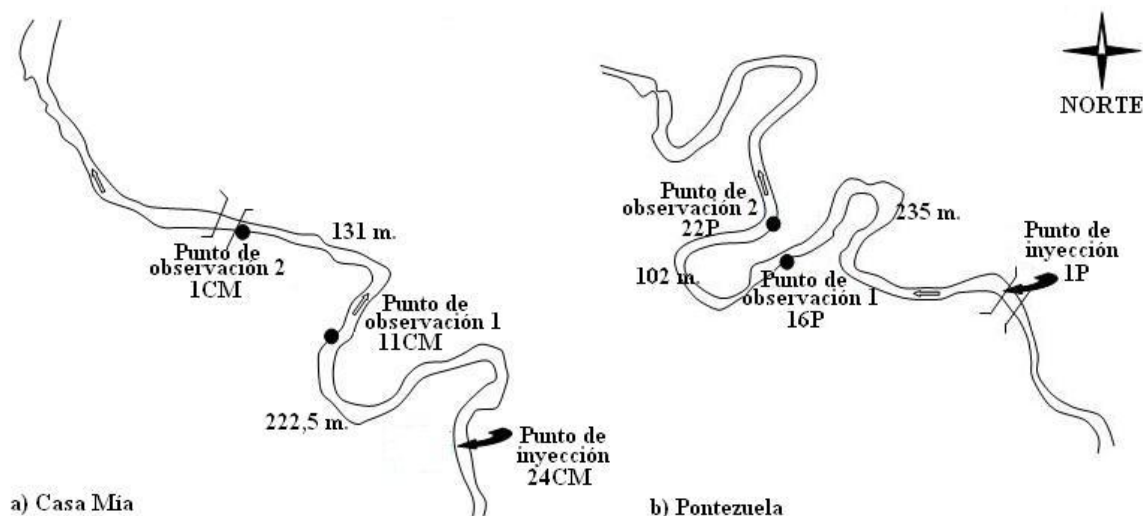
Se evaluaron experimentalmente los principales parámetros de los procesos de transporte (coeficiente de dispersión longitudinal y tiempos de viaje) en dos tramos representativos de esta corriente y se determinó, para los mismos tramos el coeficiente de reaeración a partir de fórmulas empíricas de la literatura que relacionan la reaeración con las características hidráulicas. Con lo anterior se puede tener una mejor aproximación a la respuesta que este cuerpo de agua tendría frente a descargas o vertimientos de contaminantes.

Se hizo la revisión de la teoría básica sobre el balance de OD en una corriente y se consultaron las expresiones empíricas disponibles para la obtención del coeficiente de reaeración ( $K_2$ ), los métodos experimentales para la determinación de

tiempos de viaje y coeficientes de dispersión. El trabajo de campo permitió medir características de la geometría hidráulica en dos tramos de la quebrada La Pereira como velocidad media, profundidad, ancho promedio y pendiente, y, mediante el uso de trazador (sal común), determinar el tiempo de viaje y el coeficiente de dispersión longitudinal. Finalmente se aplicaron las ecuaciones empíricas de O Connor y Dobbins, Churchill, Owens et al., Langbeim y Durum, Parkhurst y Pomeroy y Tsivoglou y Wallace para estimar  $K_2$ .

## 2. Metodología

Se eligieron dos tramos sobre la quebrada La Pereira. Éstos se seleccionaron de manera que cumplieran con las consideraciones de orden práctico (acceso fácil a los puntos de inyección y observación del trazador y que a lo largo del tramo no existiera un afluente importante) para el estudio de trazadores y los objetivos del proyecto (tramos con diferencias en el ancho de la sección transversal). En primer lugar se realizó el levantamiento planimétrico de los tramos en estudio. El tramo Pontezuela (Figura 2) se encuentra en la cuenca media y el tramo Casa Mía (Figura 2), en la cuenca baja. Se midió la longitud de cada tramo, el ancho de sección correspondiente a estaciones sobre la poligonal de cada tramo y la pendiente se obtuvo de información topográfica disponible. En junio y



**Figura 2.** Vista en planta de los puntos de inyección y de observación de trazador. a) en tramo Casa Mía. b) en tramo Pontezuela.

julio de 2007 se realizaron ensayos de trazador y aforos por el método área-velocidad con correntómetro. En el tramo Casa Mía se realizaron siete aforos y en el tramo Pontezuela se realizaron cuatro aforos con correntómetro (Figura 2).

Se hicieron en total ocho ensayos de trazadores, cuatro por tramo de estudio, cada uno con dos repeticiones. El trazador seleccionado fue la sal común, porque es soluble en agua, se puede detectar fácilmente, es fotoestable, es una sustancia conservativa, se consigue muy fácilmente en el mercado y su uso en este tipo de experimentos es bastante extendido (Holguín y Camacho, 2003). La solución de trazador utilizada en los ensayos se preparó con 15 Kg de sal disuelta en 50 litros de agua tomada del punto de inyección. Se utilizó el método de concentración pico y el seguimiento del trazador se realizó mediante la medición de la conductividad eléctrica en los puntos de observación durante cada ensayo a intervalos de tiempo de 5 segundos. Se utilizaron dos conductímetros marca WTW 315i y uno marca Schott Handylab LF1.

Se intercalbraron los conductímetros para homogenizar la

información de los tres equipos utilizados, haciendo un ensayo en laboratorio, midiendo la conductividad registrada por cada conductímetro en una misma solución. De esta manera, se relacionaron las conductividades del conductímetro 1 y del conductímetro 2 con las del conductímetro 3.

## 3. Resultados y Discusión

### 3.1. Características geométricas e hidráulicas

En general puede decirse que el canal para ambos tramos tiene forma de batea, con taludes y lecho de material limo - arcilloso. En el tramo Casa Mía se observan cantos en los taludes y el lecho, mientras que en el tramo Pontezuela predomina la arena y arcilla. El perfil transversal de velocidades para ambos tramos fue heterogéneo, mientras que la velocidad en la vertical se mostró muy uniforme, con poca variación en la velocidad al 20, 60 y 80% de la profundidad. En la Tabla I se resumen las características geométricas e hidráulicas de las secciones estudiadas.

**Tabla I.** Resumen de aforo con correntómetro y de las características geométricas e hidráulicas de los tramos Casa Mía y Pontezuela

Tramo	Estación	Fecha	Profundidad media (m)	Ancho (m)	Área seccional (m <sup>2</sup> )	Velocidad media (m/s)	Caudal (m <sup>3</sup> /s)
Casa Mía	24CM	17-may-07	1,22	8,80	12,13	0,66	8,03
Casa Mía	16CM	17-may-07	0,94	10,50	11,30	0,47	5,28
Casa Mía	1CM	18-may-07	0,85	10,00	9,93	0,58	5,81
Casa Mía	4CM	25-may-07	1,17	11,80	15,28	0,75	11,51
Casa Mía	11CM	25-may-07	1,48	11,10	18,32	-	-
Casa Mía	11CM	07-jun-07	1,38	10,80	17,39	0,57	9,94
Casa Mía	16CM	14-jun-07	1,37	10,60	13,89	-	-
Casa Mía	11CM	05-jul-07	0,81	7,66	6,67	0,25	1,66
Casa Mía	11CM	12-jul-07	0,84	7,80	7,10	0,26	1,83
Pontezuela	5P	18-may-07	1,34	6,00	9,53	0,52	4,91
Pontezuela	3P	18-may-07	1,26	7,00	10,93	0,51	5,62
Pontezuela	16P	12-jun-07	1,29	6,76	7,66	-	-
Pontezuela	21P	12-jun-07	1,42	4,90	6,47	-	-
Pontezuela	16P	03-jul-07	0,66	5,66	3,50	-	-
Pontezuela	3P	10-jul-07	0,54	7,80	4,24	0,31	1,30
Pontezuela	16P	10-jul-07	0,65	5,50	3,84	0,30	1,17

El tramo Casa Mía tiene una longitud total de 403,24 m, un ancho promedio de 11,51 m y una profundidad media de 1,04 m para caudales que variaron entre 1,66 y 11,51 m³/s. El tramo Pontezuela tiene una longitud total de 412,43 m, un ancho promedio de 7,18 m y una profundidad media de 0,75 m, y los caudales variaron entre 1,17 y 5,62 m³/s. Así, el tramo Casa Mía tiene mayor superficie de contacto con la atmósfera y mayor profundidad media que el tramo Pontezuela. La mayor velocidad media encontrada durante los aforos con correntómetro para el tramo Casa Mía fue de 0,75 m/s y para Pontezuela 0,52 m/s. La velocidad para el tramo Casa Mía estuvo entre 0,25 y 0,75 m/s y para Pontezuela entre 0,30 y 0,52 m/s.

### 3.2. Determinación de las características de transporte de solutos mediante el uso de trazadores

Se analizaron los datos provenientes de los ensayos de trazador para obtener tiempo de primer arribo, tiempo pico y tiempo

al 10% de la concentración pico, y a partir de ellos se calcularon los tiempos al centroide, de paso y los caudales. Las diferentes velocidades se obtuvieron una vez determinados los tiempos de viaje. La velocidad de viaje del centroide de masa del trazador representa la velocidad media del tramo. La velocidad promedio para los tramos Casa Mía y Pontezuela fue de 0,26 y 0,20 m/s, respectivamente. Finalmente para calcular el coeficiente de dispersión lineal E se utilizó la expresión de Fischer (Holgún y Camacho, 2003).

$$E = \frac{U^2}{2} \cdot \left[ \frac{\sigma_2^2 - \sigma_1^2}{T_{centroide\ 2} - T_{centroide\ 1}} \right]$$

Donde  $U$  es la velocidad media del tramo,  $\sigma^2$  es la varianza de los datos de la nube de trazador y  $T_{centroide}$  es el tiempo de llegada del centroide de masa de la nube de trazador. Los subíndices 1 y 2 corresponden a los puntos de observación 1 y 2 para cada tramo (Figura 2). Los tiempos al centroide, la velocidad del centroide, el caudal y E se presentan en las Tablas 2 y 3.

**Tabla 2** Tiempo centroide, velocidad centroide, caudal y E para el tramo Casa Mía

Fecha	Ensayo	Punto de observación	Tiempo centroide (s)	Tiempo de viaje (s)	Velocidad centroide (m/s)	Q (m³/s)	E (m²/s)																																																																																									
7 de junio de 2007	1	11CM	399	212	0,62	6,34	2,93																																																																																									
		1CM	611			6,53		14 de junio de 2007	1	11CM	600	332	0,39	4,5	3,6	1CM	933	3,78	2	11CM	537	449	0,29	3,41	1,5	1CM	986	3,22	5 de julio de 2007	3	11CM	494	514	0,25	4,42	1,14	1CM	1009	3,61	1	11CM	1214	696	0,19	1,64	1,3	1CM	1909	1,4	12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36	1CM	2001	1,41	3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65	2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2
14 de junio de 2007	1	11CM	600	332	0,39	4,5	3,6																																																																																									
		1CM	933			3,78			2	11CM	537	449	0,29	3,41	1,5	1CM	986	3,22	5 de julio de 2007	3	11CM	494	514	0,25	4,42	1,14	1CM	1009		3,61	1	11CM	1214	696	0,19	1,64	1,3	1CM	1909	1,4	12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36	1CM		2001	1,41	3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34		1CM	1783	1,65	2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61		
	2	11CM	537	449	0,29	3,41	1,5																																																																																									
		1CM	986			3,22		5 de julio de 2007	3	11CM	494	514	0,25	4,42	1,14	1CM	1009	3,61		1	11CM	1214	696	0,19	1,64	1,3	1CM	1909	1,4	12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36	1CM	2001	1,41		3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65		2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61													
5 de julio de 2007	3	11CM	494	514	0,25	4,42	1,14																																																																																									
		1CM	1009			3,61			1	11CM	1214	696	0,19	1,64	1,3	1CM	1909	1,4	12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36	1CM	2001	1,41		3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65		2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																								
	1	11CM	1214	696	0,19	1,64	1,3																																																																																									
		1CM	1909			1,4		12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36	1CM	2001	1,41		3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65		2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																																			
12 de julio de 2007	2	11CM	1273	728	0,18	1,75	1,36																																																																																									
		1CM	2001			1,41			3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75	1CM	1878	1,35	12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65		2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																																														
	3	11CM	1160	719	0,18	1,16	1,75																																																																																									
		1CM	1878			1,35		12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34	1CM	1783	1,65		2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																																																									
12 de julio de 2007	1	11CM	1000	783	0,18	1,76	1,34																																																																																									
		1CM	1783			1,65			2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44	1CM	1867	1,39	3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																																																																				
	2	11CM	1021	845	0,18	1,74	1,44																																																																																									
		1CM	1867			1,39		3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29	1CM	1699	1,61																																																																															
3	11CM	982	717	0,2	1,73	0,29																																																																																										
	1CM	1699			1,61																																																																																											

**Tabla 3.** Tiempo centroide, velocidad centroide, caudal y E para el tramo Pontezuela

Fecha	Ensayo	Punto de observación	Tiempo centroide (s)	Tiempo de viaje (s)	Velocidad centroide (m/s)	Q (m <sup>3</sup> /s)	E (m <sup>2</sup> /s)
12 de junio de 2007	1	16P	520	520	0,2	3,56	0,31
		22P	1040			2,69	
	2	16P	398	603	0,17	3,85	0,22
		22P	1001			2,59	
	3	16P	699	308	0,33	2,8	0,64
		22P	1007			2,53	
19 de junio de 2007	1	16P	720	407	0,25	2,4	0,97
		22P	1127			1,95	
	2	16P	740	127	0,26	2,89	0,58
		22P	867			3,09	
3 de julio de 2007	1	16P	1064	724	0,14	1	1,83
		22P	1788			0,76	
	2	16P	1081	619	0,17	0,98	0,99
		22P	1701			0,86	
	3	16P	1212			0,98	
		22P					
10 de julio de 2007	1	16P	1155	473	0,22	1,36	0,66
		22P	1628			1,26	
	2	16P	998	543	0,19	1,58	1,45
		22P	1541			1,27	
	3	16P	1036	562	0,18	1,45	0,82
		22P	1598			1,14	

Para los dos tramos, a medida que aumentó el caudal, los tiempos de viaje de la nube de trazador disminuyeron, aunque el comportamiento de las curvas concentración contra tiempo para cada tramo fue diferente. En el tramo Casa Mía (caudales entre 1,26 y 6,44 m<sup>3</sup>/s), el tiempo de viaje de la concentración de primer arribo fue en promedio el 51% del tiempo de viaje del 10% de la concentración pico, es decir, el tiempo que tardó el 10% de la concentración pico en recorrer el tramo Casa Mía fue aproximadamente el doble del tiempo que tardó en recorrer este mismo tramo la concentración de primer arribo. Este comportamiento se evidencia en la figura 4, en la que se observan diferencias en los tiempos de viaje del trazador, aunque la conformación de los puntos por ensayo es similar.

Es decir, no existió una diferencia relativa entre los tiempos de viaje para los diferentes caudales en el tramo Casa Mía. Por su parte, el tramo Pontezuela presentó un comportamiento característico para tres intervalos de caudal. Para caudales de 3,13 y 3,22 m<sup>3</sup>/s, el tiempo de viaje de la concentración de primer arribo fué en promedio el 74% del tiempo que tardó en pasar el 10% de la concentración pico. Es decir, la concentración de primer arribo se demoró tres cuartas partes de lo que tardó el 10% de la concentración pico en recorrer el tramo Pontezuela. Para caudales entre 1,29 y 2,17 m<sup>3</sup>/s, el tiempo de viaje de la concentración de primer arribo fué en promedio el 59% del tiempo que tardó en pasar el 10% de la concentración pico, mientras que para caudales menores a 1 m<sup>3</sup>/s, este

promedio fue del 51%. Así, en el tramo Pontezuela, cuando el caudal fue mayor, el tiempo de viaje de la concentración de primer arribo y del 10% de la concentración pico estuvieron más cercanos, es decir, aumentos de caudal implicaron reducción en la diferencia de tiempo relativa entre el tiempo de viaje de la concentración de primer arribo y tiempo de viaje del 10% de la concentración pico. Esta respuesta representa disminución en el tiempo de paso de la nube de trazador, que a su vez implica menor dispersión longitudinal. (Figuras 4 y 5).

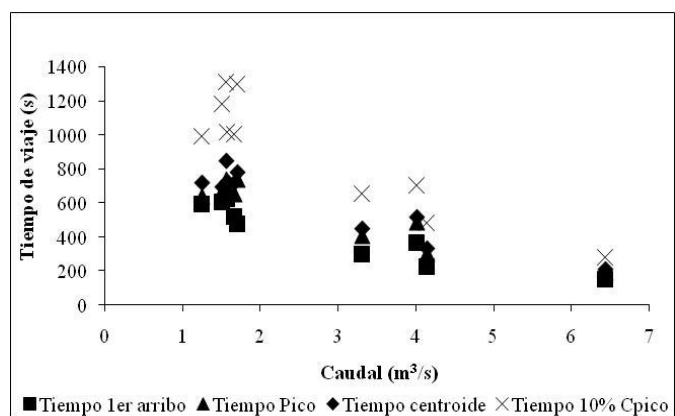


Figura 4. Caudal contra tiempos de viaje de la nube de trazador para el tramo Casa Mía

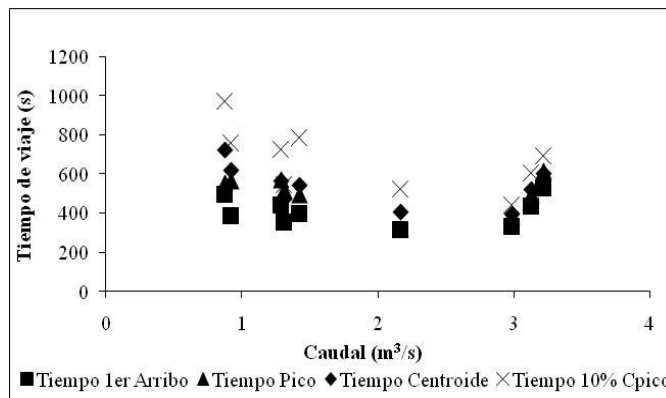


Figura 5. Caudal contra tiempos de viaje de la nube de trazador para el tramo Pontezuela

El comportamiento regular en el tramo Casa Mía e irregular en el tramo Pontezuela en relación con la variación del tiempo de viaje con cambios en el caudal se identifica en la tabla 4.

En el tramo Casa Mía las características dispersivas son proporcionalmente constantes para diferentes escenarios hidrológicos; es decir, al aumentar el caudal disminuye el tiempo de viaje, pero la diferencia relativa entre los tiempos de viaje se mantiene constante, mientras que para el tramo Pontezuela aumentos en el caudal implicaron disminución entre los diferentes tiempos de viaje, pero la diferencia relativa entre los tiempos de viaje no se conserva con variaciones del caudal.

Tabla 4. R-cuadrado de línea de tendencia potencial para datos de caudal contra tiempo en los tramos Casa Mía y Pontezuela.

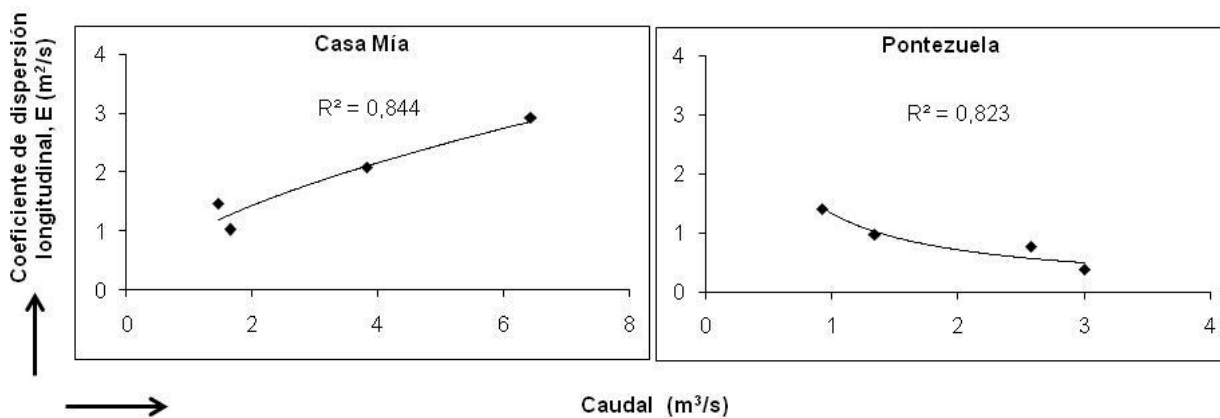
Relación	R <sup>2</sup>	
	Casa Mía	Pontezuela
Caudal contra tiempo de viaje de la concentración de primer arribo	0,8594	0,586
Caudal contra tiempo de viaje de la concentración pico	0,8893	0,7
Caudal contra tiempo de viaje del centroide de masa	0,9084	0,868
Caudal contra tiempo de viaje del 10% de la concentración pico	0,9068	0,747

En la Tabla 5 se presentan los estadísticos básicos para E en los dos tramos de estudio.

**Tabla 5.** Estadísticos básicos del coeficiente de dispersión longitudinal determinado para la quebrada La Pereira.

	Tramo	Casa Mía	Pontezuela
E (m <sup>2</sup> /s)	Promedio	1,67	0,99
	Máximo	3,60	1,83
	Mínimo	0,29	0,58
	Desviación estándar	0,94	0,44

Los valores del E obtenidos de los experimentos con trazadores en el tramo Casa Mía se mantuvieron en un intervalo de 0,29 a 3,60 m<sup>2</sup>/s, y en el tramo Pontezuela estuvieron entre 0,58 y 1,83 m<sup>2</sup>/s, lo cual es un buen marco de referencia para las modelaciones de transporte de solutos y de calidad de agua que se hagan en la corriente de estudio. Además, los valores de E para los dos tramos son bastante bajos, comparados con valores de hasta 1.500 m<sup>2</sup>/s presentados por ríos como el Missouri (Pujol y Sánchez-Cabeza, 1999). Incrementos en el caudal hicieron que el E aumentara en el tramo Casa Mía y disminuyera en el tramo Pontezuela. Se pudo observar que leves cambios en los valores ingresados a la ecuación de Fischer llevan consigo grandes variaciones en el valor de E. Así, puede decirse que E es un parámetro muy sensible. (Figura 6).



**Figura 6.** Caudal contra coeficiente de dispersión longitudinal para los tramos Casa Mía y Pontezuela.

### 3.3. Coeficiente de reaireación $K_2$

Las ecuaciones empíricas y semiempíricas con las que se calculó  $K_2$  fueron las siguientes:

Ecuación de O Connor y Dobbins  $K_2 = 3,93U^{0,5} H^{-1,5}$

Ecuación de Churchill

$$K_2 = 3,93U^{0,969} H^{-1,673} 1,024^{(T-20)}$$

Ecuación de Owens et al  $K_2 = 5,34U^{0,67} H^{-1,85}$

Ecuación de Langbeim y Durum  $K_2 = 5,13UH^{-1,33}$

Ecuación de Parkhurst y Pomeroy

$$K_2 = 23,04((1,017 + F^2)(SU)^{3/8} H^{-1}$$

Ecuación de Tsvoglou y Wallace  $K_2 = 0,1573(S/t_c)$

Ecuación de Thackston y Dawson

$$K_2 = 0,000025(1 + 9F^{1/4})U/H$$

donde  $U$  es la velocidad media (m/s),  $H$  es la profundidad media (m),  $T$  es la temperatura (°C),  $F$  es el número de Froude,  $S$  es la pendiente del tramo (m/m) y  $T_c$  es el tiempo al centroide (s). Estas ecuaciones se seleccionaron de tal manera que las características hidráulicas y geométricas de la quebrada La Pereira estuvieran en los intervalos de aplicabilidad que los autores recomiendan para cada una de ellas. Las estadísticas de la aplicación de las ecuaciones empíricas para hallar  $K_2$  se presentan en la Tabla 6.

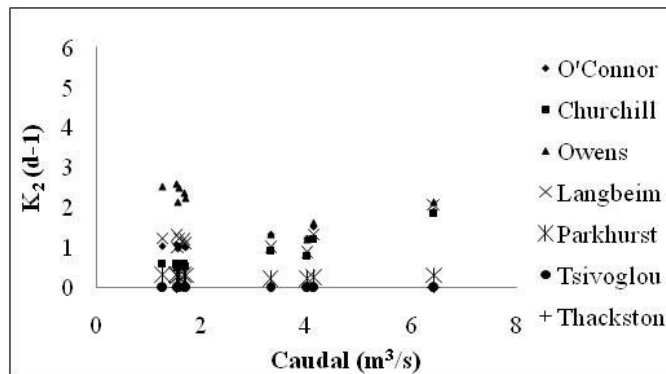


**Tabla 6.** Estadísticos básicos del coeficiente de reaeración  $K_2$  estimado en la quebrada La Pereira.

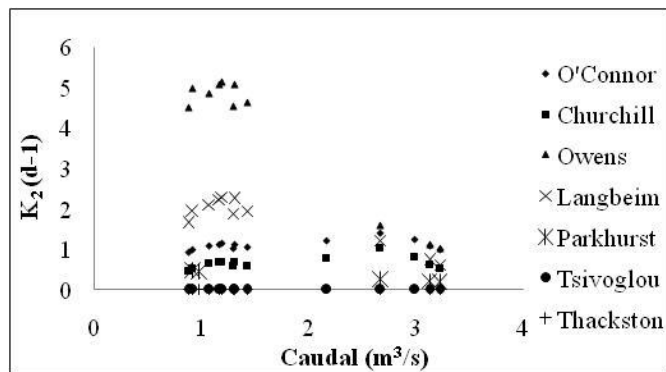
	Tramo	Casa Mía	Pontezuela
$K_2$ ( $d^{-1}$ )	Promedio	0,81	1,05
	Máximo	2,57	5,15
	Mínimo	$2,30 \times 10^{-5}$	$1,80 \times 10^{-5}$
	Desviación estándar	0,76	1,39

Se obtuvieron valores de  $K_2$  que variaron entre  $2,30 \times 10^{-5}$  y  $2,57 d^{-1}$  para el tramo Casa Mía y entre  $1,80 \times 10^{-5}$  y  $5,08 d^{-1}$  para el tramo Pontezuela. En ambos tramos se pueden definir intervalos de valores para  $K_2$ , lo cual es bueno pues se tienen límites definidos de valores de este parámetro en la calibración de modelos de calidad de agua. Los valores de  $K_2$  fueron mayores en el tramo Pontezuela que en el tramo Casa Mía. (Figuras 7 y 8). En ambos casos estos valores fueron bajos si se comparan con valores como el encontrado en el río Guavio, de  $114 d^{-1}$  (Holguín y Camacho, 2003).

Las ecuaciones se pueden separar en dos grupos: en un grupo las que utilizan la velocidad y la profundidad media y en otro las que involucran diferencia de nivel, pendiente y el tiempo al centroide. El primer grupo de ecuaciones utilizadas tienen en el numerador la velocidad media, que para los dos tramos fue similar ( $0,26 m/s$  en Casa Mía y  $0,21 m/s$  en Pontezuela) y en el denominador tienen la profundidad media, que para el tramo Casa Mía fue mayor que en Pontezuela ( $1,04$  y  $0,75 m$  respectivamente); lo que podría explicar por qué se obtuvo un valor más alto para el tramo Pontezuela que para el tramo Casa Mía. Para el segundo grupo adicionalmente, se utilizó la misma pendiente, de donde el factor que determina la diferencia de resultados sería la profundidad media de la sección transversal. Por esta razón, los sectores más profundos pueden tener mayores problemas con el oxígeno disuelto, pues su eficiencia de reaeración atmosférica es menor. La ecuación que dio mayores valores fue la de Owens et al, la de valores intermedios fue la de Langbeim y Durum, ambas ecuaciones de la misma forma, y la ecuación para la cual los valores fueron los más bajos fue la de Thackston y Dawson. (Figuras 7 y 8).



**Figura 7.** Caudal contra  $K_2$  en el tramo Casa Mía



**Figura 8.** Caudal contra  $K_2$  en el tramo Pontezuela

## 4. Conclusiones

El tramo Casa Mía tiene mayor área transversal, mayor caudal y mayores velocidades medias que el tramo Pontezuela. De acuerdo con los perfiles de velocidad obtenidos de los aforos, se puede decir que en ambos tramos la dispersión se debe principalmente a una distribución heterogénea de la velocidad a lo largo de la sección transversal, más que a afectaciones de la distribución vertical, la cual mostró perfiles muy uniformes.

En cuanto a los tiempos de viaje y el coeficiente de dispersión longitudinal, en ambos tramos, aumentos en el caudal significaron reducción en el tiempo de viaje de la nube de trazador, pero para el tramo Casa Mía la diferencia relativa entre los diferentes tiempos de viaje se mantiene constante, mientras que para el tramo Pontezuela aumentos en el caudal implicaron disminución entre los diferentes tiempos de viaje.

Esto quiere decir que el tramo Casa Mía tiene una capacidad dispersiva proporcional con el caudal, a diferencia del tramo Pontezuela en el cual dicha capacidad se reduce con incrementos en el caudal. Este comportamiento puede deberse a que en el tramo Pontezuela las líneas de corriente se homogenizan más con aumentos en el caudal.

Se obtuvieron valores bajos de  $E$  en la quebrada La Pereira: entre 0,29 y 3,60 m<sup>2</sup>/s para Casa Mía, y entre 0,58 y 1,83 m<sup>2</sup>/s para Pontezuela.

Se observó que  $E$  es un parámetro muy sensible a cambios en el tiempo de viaje.

A partir de las ecuaciones empíricas de O Connor y Dobbins, Churchill, Owens *et al.*, Langbeim y Durum, Parkhurst y Pomeroy, Tsivoglou y Wallace y Thackston y Dawson, se obtuvieron valores bajos de  $K_2$  entre  $2,30 \times 10^{-5}$  y  $2,57 \text{ d}^{-1}$  en Casa Mía y entre  $1,80 \times 10^{-5}$  y  $5,15 \text{ d}^{-1}$  en Pontezuela. Para caudales altos se encontró mayor cercanía entre los resultados de las diferentes ecuaciones empíricas, y se notó que las ecuaciones que tienen en su estructura la velocidad media y la profundidad de la corriente dieron resultados similares. Las ecuaciones que incluyen la pendiente y la diferencia de nivel también se agruparon y ambas arrojaron (ecuaciones de Parkhurst y Pomeroy y Tsivoglou y Wallace) valores inferiores a  $0,474 \text{ d}^{-1}$  para los dos tramos, lo cual indicaría que no son aplicables a la corriente de estudio. Se encontró que el condicionante hidráulico en el proceso de reaireación es la profundidad de la corriente, ya que fue el factor que determinó las diferencias en los valores de  $K_2$  para los dos tramos de estudio; así, a las zonas más profundas de la corriente penetra menor concentración de oxígeno disuelto puesto que su eficiencia de reaireación atmosférica es menor. El tramo con menor capacidad de incorporar oxígeno atmosférico a la corriente fue el tramo Casa Mía.

Dados los bajos valores de  $E$  y  $K_2$  encontrados, puede decirse que la capacidad de la quebrada La Pereira para dispersar contaminantes disueltos en el agua y para incorporar oxígeno atmosférico es pobre. Además, los intervalos de valores de  $E$  y  $K_2$  obtenidos fueron estrechos, así que puede tenerse una buena base al momento de modelar el transporte de solutos y la calidad del agua en la corriente de estudio.

## Agradecimientos

Los dos primeros autores agradecen a CORNARE por el apoyo económico y la confianza depositada en el presente trabajo, y especialmente a Stella Vélez y a Julia Cadavid por su gran colaboración, a la profesora Nora Elena Villegas por su gran apoyo, dedicación, paciencia y colaboración, y al profesor Álvaro Wills por su acompañamiento y apoyo durante el trabajo, también agradecen a los compañeros: Leonardo García, Felipe Castañeda, Alejandra García, Carolina Martínez, Adriana Poveda, Diego Chalarca, Bairon Ospina, Mónica Salazar, Santiago Ferrer, Santiago Largo y Sandra Galvis que brindaron su valiosa ayuda en el trabajo de campo y al grupo GAIA y al Departamento de Ingeniería Sanitaria y Ambiental de la Universidad de Antioquia por su colaboración con los espacios y equipos.

## Referencias

- Chapra, S. C., 1997. Surface Water Quality Modeling. McGraw-Hill. Boston.
- Gualtieri, C., Gualtieri, P. y Pulci-Doria, G., 2002. Dimensional analysis of reaeration rate in streams. En: Journal of Environmental Engineering. Vol. 128, No. 1.
- Holguín, J. E y Camacho, L. A., 2003. Determinación de la tasa de reaireación en un río de montaña colombiano mediante el uso de trazadores. Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil-Área Ambiental. Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.
- Hibbs, D. E., Parkhill, K. L. y Gulliver, J. S., 1998. Sulfur hexafluoride gas tracer studies in streams. En: Journal of Environmental Engineering. Vol. 124 No. 8, pp. 752 - 760.
- Kilpatrick, F. A. et al., 1989. Determination of stream reaeration coefficients by use of tracers. United States Geological Survey, USGS.
- Kilpatrick, F.A. y Wilson, J.F., 1988. Measurement of time of travel in streams by dye tracing. United States Geological Survey, USGS.

López, G. M. y Camacho, L. A., 2003. Investigación de la aplicación predictiva de los modelos de transporte de solutos de almacenamiento temporal (TS) y zona muerta agregada (ADZ). Tesis de grado para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil-Área Ambiental. Universidad de Los Andes. Bogotá, Colombia.

McCutcheon, S. C., 1989. Water Quality Modeling. Volume I: Transport and Surface Exchange in Rivers. CRC Press, Inc. EEUU.

Pujol, Ll., Sanchez-Cabeza, J.A., 1999. Determination of longitudinal dispersion coefficient and velocity of the Ebro river waters (Northeast Spain) using tritium as a radiotracer. En: Journal of Environmental Radioactivity, Vol 45, pp.39-57.

Rodríguez, J. F., 1997. Modelación unidimensional y bidimensional del transporte de contaminantes en cursos de agua. En: Ingeniería Hidráulica en México. Vol. XII, Número 1, pp. 5-14.

Wilson, G. T. y Macleod, N., 1974. A critical appraisal of empirical equations and models for the prediction of the coefficient of reaeration of deoxygenated water. En: Water Research. Vol 8, No. 6.

