

# Formulación ecohidráulica para evaluar la capacidad de autodepuración de ríos de montaña<sup>1</sup>

María Fernanda Riaño-Neira<sup>2</sup>, Lusby Yurey Vigoya-Rodríguez<sup>3</sup>, Néstor Alonso Mancipe-Muñoz<sup>4</sup>, Mayerling Sanabria-Buitrago<sup>5</sup>

## RESUMEN

**Introducción.** Colombia, pese a ser reconocido como un país de alta biodiversidad, cuenta con pocos estudios de interacción de variables biológicas de sus ecosistemas estratégicos (como ríos de montaña) con la hidrodinámica de los cuerpos de agua asociados al mismo. Para entender estas dinámicas ecosistémicas frente a la autodepuración de ríos se ha empleado mundialmente la modelación matemática. **Objetivo.** Formular un modelo matemático que acople variables biológicas y variables

asociadas a la ingeniería de los recursos hidráulicos para evaluar la capacidad de autodepuración de ríos de montaña. **Materiales y Métodos.** Las técnicas de retención de hojarasca y de trazadores conservativos fueron empleadas para formular un modelo ecohidráulico al realizar su validación mediante mediciones en campo, de lo cual se presume que el tiempo que debe emplearse para el ensayo de retención de hojarasca será el mismo tiempo de transporte hallado por la técnica de trazadores conservativos. **Resultados.** El modelo de la formulación

- 1 Artículo original derivado del proyecto de investigación Formulación ecohidráulica de retentividad biológica y detención hidráulica en río de montaña Quebrada La Vieja, Bogotá D.C., realizado entre junio de 2017 y junio de 2018.
- 2 Estudiante último semestre del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: mariafernanda.rn97@hotmail.com ORCID: 0000-0001-6425-768X
- 3 Estudiante último semestre del programa de Ingeniería Ambiental y Sanitaria de la Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: lusbyyurey21@gmail.com ORCID: 0000-0002-7840-8028
- 4 Ingeniero Ambiental y Sanitario, doctor en Ingeniería Ambiental, profesor asistente, Universidad Nacional de Colombia. Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: nmancipe@unal.edu.co ORCID: 0000-0002-6708-0290
- 5 Ingeniera Ambiental y Sanitaria, magíster en Hábitat, profesora asistente, Universidad de La Salle. Bogotá D.C., Colombia. Correo electrónico: msanabria@unisalle.edu.co ORCID: 0000-0002-7696-3247

Autor para correspondencia: María Fernanda Riaño Neira. Correo electrónico: mariafernanda.rn97@hotmail.com

Artículo recibido: 31/10/2018; Artículo aprobado: 02/01/2019

ecohidráulica se realizó con el acople de las dos técnicas permitiendo conocer la hidrodinámica del cuerpo de agua a través de variables como el caudal, la velocidad y el tiempo de transporte, para así evaluar la capacidad del río de retener materia orgánica y degradarla por la acción de organismos propios del mismo (autodepurarse). **Conclusiones.** La integración del tiempo de transporte hidráulico experimental a un modelo de retentividad biológica permite evaluar de manera integral las dinámicas reales de autodepuración de un río de montaña dadas unas condiciones hidrodinámicas espaciales y temporales específicas.

**PALABRAS CLAVE:** modelos matemáticos, retención de hojarasca, variables hidrodinámicas, ecosistema acuático, río de montaña.

## **Ecohydraulic formulation to assess self-purification capacity of mountain rivers**

### **ABSTRACT**

**Introduction.** Although Colombia has been recognized as a country of high biodiversity, it has limited studies about the interaction of biological variables with water bodies hydrodynamics of strategic ecosystems such as mountain rivers. Mathematical modeling has been widely used worldwide in order to understand rivers auto-purification dynamics. **Objective.** Formulate a mathematical model that couples biological and

hydraulic variables to assess self-purification capacity of mountain rivers. **Materials and Methods.** An ecohydraulic model is formulated based on the leaf litter retention and conservative dye tracer techniques. The formulation is validated using field measurements in a mountain river. It is presumed that the travel time estimated by the conservative dye tracer method can be used for the litter retention. **Results.** An eco-hydraulic formulation is obtained that would allow to know the hydrodynamics of the water body through variables such as flow, flow velocity and travel time in order to evaluate the river capacity to retain and degrade organic matter by action microorganisms (auto-purification). **Conclusion.** The integration of the experimental hydraulic travel time to a biological retentivity model makes possible to comprehensively evaluate the real auto-purification dynamics of a mountain river given for specific spatial and temporal hydrodynamic conditions.

**KEYWORDS:** Mathematical models, leaf litter retention, hydrodynamic variables, aquatic ecosystem, Mountain River.

## **Formulação eco-hidráulica para avaliar a capacidade de auto-purificação de rios da montanha**

### **RESUMO**

**Introdução.** A Colômbia, apesar de reconhecida como um país de alta biodiversidade, tem poucos estudos

sobre a interação de variáveis biológicas de seus ecossistemas estratégicos (como rios de montanha) com a hidrodinâmica dos corpos de água associados a ela. Para entender a dinâmica desses ecossistemas em frente à auto-purificação dos rios, a modelagem matemática tem sido amplamente utilizada em todo o mundo. **Objetivo.** Formular uma ferramenta matemática que combina variáveis biológicas e hidráulicas para avaliar a capacidade de autodepuración de ríos de montaña. **Materiais e Métodos.** As técnicas de aprisionamento da folhada e traçadores conservadoras foram usadas para formular um modelo ecohidráulico para efectuar a validação por meio de medições de campo, a partir dos quais presume-se que o tempo a ser utilizado para a maca teste de retenção é o mesmo tempo de transporte encontrado pelo método dos traçadores

conservadores. **Resultados.** O modelo da formulação eco-hidráulica foi feito com o acoplamento das duas técnicas permitindo conhecer a hidrodinâmica da massa de água através de variáveis como vazão, velocidade e tempo de transporte, a fim de avaliar a capacidade do rio em reter matéria orgânica e degradá-lo pela ação de seus próprios organismos (autopuração). **Conclusões.** A integração do tempo de transporte hidráulico experimental a um modelo de retentividade biológica permite avaliar de forma abrangente a dinâmica real de autopurificação de um rio de montanha, dadas as condições hidrodinâmicas espaciais e temporais específicas.

**PALAVRAS CHAVE:** Modelos matemáticos, retenção de folhada, variáveis hidrodinâmicas, ecossistema aquático, rio da montanha.

---

## INTRODUCCIÓN

Entender el comportamiento de los ecosistemas acuáticos frente a la dinámica del cuerpo de agua facilita evaluar y generar una línea base para estudios de impacto ambiental. Además de esto, la relación sistémica resulta ser un aspecto determinante a la hora de delimitar rondas hídricas, porque al conocer su dinámica natural existe una influencia de factores físico bióticos constituidos por el aspecto geomorfológico, las características del ecosistema y su comportamiento hidrológico e hidráulico (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, MADS, 2018). Teniendo en cuenta

este nivel de importancia, se plantea el presente proyecto como un nuevo enfoque que brinde soluciones a problemas ambientales que integren las áreas de conocimiento: biología e ingeniería ambiental y sanitaria en ecosistemas acuáticos lóticos. Un ecosistema de tipo lótico está caracterizado por tener aguas con movimiento en un sentido definido con posibles intercomunicaciones con otros ambientes lóticos para formar sistemas o redes fluviales (Vergara, 2009).

Entre los estudios consultados sobre técnicas y métodos empleados para la evaluación de características de ecosistemas acuáticos de tipo lótico,

se hace referencia a conceptos relacionados con la ecología fluvial que buscan determinar la distribución de velocidades y la capacidad de retener materia orgánica en los ríos. Estos conceptos tienen gran importancia ecológica tanto en la distribución de organismos como en procesos ecológicos. Dentro de las técnicas hidráulicas más conocidas está la de trazadores conservativos y dentro de las técnicas biológicas está la de retención de hojarasca evaluada a través de un modelo de decaimiento exponencial que valora la productividad del ecosistema fluvial (Elosegi y Sabater, 2009).

Esta investigación busca evaluar la autodepuración de un río de montaña, el cual se considera un ecosistema lótico. Una de las herramientas utilizadas para evaluar variables en fenómenos complejos de la realidad como ríos de montaña es la modelación matemática. Sin embargo, muchos estudios analizan los ríos de montaña únicamente desde el punto de vista hidráulico (i.e. caudal, velocidad y volúmenes de agua), sin considerar el comportamiento biológico (retención de biomasa) del mismo. Por consiguiente, en este estudio se integran estas dos técnicas empleadas en los campos de biología e ingeniería de recursos hidráulicos, de tal manera que se desarrolle una metodología sencilla en el marco de la evaluación de la capacidad de autodepuración de ríos de montaña.

Dentro del campo de la biología, la técnica de retención de hojarasca

permite estudiar la capacidad de obstrucción de un cauce en relación con la productividad de un ecosistema fluvial (Elosegi y Sabater, 2009), mientras que en el campo de la ingeniería de recursos hidráulicos la técnica de trazadores conservativos considera el transporte de solutos en ríos a través de un modelo reactor tipo flujo pistón (Chapra, 1997).

Se plantea entonces la posibilidad de integrar el tiempo de transporte de solutos, que se calcula mediante trazadores conservativos, a la técnica de retención de hojarasca, para denotar una formulación ecohidráulica en ríos de montaña con el objeto de evaluar su capacidad de autodepuración. Como caso de estudio para la validación de la formulación, se empleó un tramo de 15 m de longitud no intervenido en la quebrada La Vieja, ubicada en la localidad de Chapinero, en Bogotá D.C.- Colombia.

## MATERIALES Y MÉTODOS

Para desarrollar la formulación ecohidráulica propuesta, se definen primero las técnicas de campo biológica (retención de hojarasca) e hidráulica (trazadores conservativos) y los modelos matemáticos asociados a dichas técnicas. Seguidamente, se presenta la formulación ecohidráulica que incluye el acople de las dos técnicas de campo y el post procesamiento de los datos requerido para establecer las condiciones de autodepuración del río frente a su comportamiento hidráulico.

## Técnica de retención de hojarasca

La técnica consiste en analizar la capacidad de retención de hojas que posee un cuerpo de agua. Para esto se utilizan hojas secas que por sugerencia de la técnica original retención de hojarasca de Elosegui y Sabater (2009) deben ser de fácil reconocimiento como las hojas de *Ginkgo biloba*. Sin embargo, se emplean hojas secas propias del ecosistema de estudio dado que no es fácil acceder a las hojas recomendadas por la técnica. Las hojas se pintan para facilitar su reconocimiento y se hidratan en agua durante 8 a 12 horas previas al ensayo de campo.

El tramo del río caso de estudio se delimita teniendo en cuenta dos criterios: [1] que sea un tramo con fácil acceso y sin intervenciones externas al ecosistema con sección transversal relativamente regular y [2] establecer como largo del tramo 10 veces el ancho promedio. Posteriormente se ubica la red aguas abajo del tramo seleccionado del cauce con el fin de retener las hojas. El lanzamiento de estas hojas se realiza aguas arriba del tramo (extremo superior) como se indica en la figura 1. La técnica recomienda lanzar 50 hojas y después de una hora recolectarlas a lo largo del tramo. En este proceso es necesario identificar el número de hojas retenidas, la caracterización del obstáculo y la distancia a la cual se retuvieron con precisión de un metro. Con esta técnica se estudian variables como tasa de retención, distancia y

cantidad de biomasa en la sección de un río bajo un modelo de tipo exponencial.



Figura 1. Esquema de la técnica de retención de hojarasca.

Para los cálculos de esta técnica, Elosegui y Sabater (2009) expresan el número de hojas en transporte ( $Ld$ ) ajustándolas a un modelo exponencial (ecuación 1).

$$Ld = L_0 e^{-kd} \text{ (Ecuación 1)}$$

Donde  $Ld$  corresponde al número de hojas en transporte,  $L_0$  es el número total de hojas liberadas o recuperadas,  $k$  es la tasa de retención ( $m^{-1}$ ) y  $d$  la distancia recorrida ( $m$ ).



## Técnica de trazadores conservativos

Esta técnica considera variables como el caudal, tiempo de transporte y distancia media del cauce que permiten estimar la hidrodinámica de este e indirectamente establecer zonas muertas que influyen en la retención de la materia orgánica. Para su ejecución se utiliza: (i) sal común como trazador, pues es una sustancia que al ser diluida en agua forma iones conductores (de sodio  $\text{Na}^+$  y de cloruro  $\text{Cl}^-$ ) medibles mediante la conductividad, (ii) balde para la dilución, (iii) probeta y (iv) conductímetro.

Se realizan tres ensayos de trazadores conservativos por cada ensayo con la técnica de retención de hojarasca. Los puntos de medición son los mismos en cada ensayo, el primero es ubicado en la mitad del tramo (entre el extremo superior y el extremo inferior) y el segundo en el extremo inferior del tramo (aguas abajo) (figura 1).

Se mide la conductividad inicial en cada uno de ellos y se diluyen 500 gramos de sal en diez litros de agua. La concentración de trazador deberá ser revaluada para cada río en función del caudal que transporte. Esta mezcla se arroja en el extremo superior del tramo (Figura N° 1) y a partir del tiempo del vertimiento se toman datos de conductividad en intervalos fijos de tiempo (5 segundos en este caso) hasta volver a la conductividad base del cuerpo de agua. Estos datos son procesados y analizados con el fin de hallar el caudal de acuerdo con la fórmula de trazadores

por rápida inyección (Rodríguez, 2015). (Ecuación N° 2).

$$V_1 \cdot C_1 = \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot C_2 \, dt - \int_{t_1}^{t_2} Q \cdot C_0 \, dt$$

(Ecuación 2)

Donde  $Q$  hace referencia al caudal de la corriente,  $C_1$  a la concentración del trazador en la solución,  $V$  al volumen de solución de trazador,  $C_2$  a la concentración del trazador en el punto de medición en el río en función del tiempo  $t$ , y  $C_0$  a la concentración en el río antes de la dosificación (Rodríguez, 2015). Despejando el caudal, la ecuación 2 se resuelve y se tiene la ecuación 3:

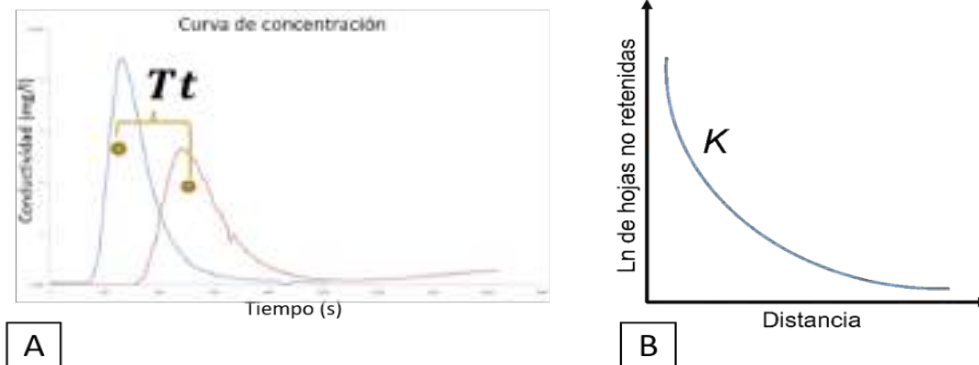
$$Q = \frac{V_1 \cdot C_1}{\int_{t_1}^{t_2} (C_2 - C_0) \, dt} \quad (\text{Ecuación 3})$$

## Formulación ecohidráulica

Para la formulación ecohidráulica el procesamiento de los datos en fase de campo arrojó que a partir de los resultados experimentales de la técnica de trazadores conservativos es posible estimar el tiempo de transporte de la masa de agua al considerar la diferencia de tiempo entre los centroides de dos curvas de respuesta (figura 2a) para dos puntos de medición definidos aguas abajo del vertimiento del trazador (Kilpatrick, Rathbun, Yotsukura, Parker y Delong, 1989). El cálculo del centroide se realiza con la ecuación 4 y el tiempo de transporte del tramo ( $T_t$ )( $T_t$ ) con la ecuación 5. Este tiempo de transporte calculado es empleado como tiempo

de espera entre el lanzamiento de las hojas y su recolección de la técnica de retención de hojarasca, presentada en

el numeral 3.1 como un tiempo arbitrario de una hora.



**Figura 2.** Esquemas de las técnicas. A. Trazadores. B. Retención de hojarasca.

Las coordenadas del centroide de cada curva son calculadas según la ecuación 4, donde  $t$  hace referencia a todos los términos del vector columna tiempo y  $f(t)$  a los valores del vector columna referida a conductividad.

$$\left( \bar{X} = \frac{\int_t^{t_i} t[f(t)]dt}{\int_t^{t_i} f(t)dt}, \bar{Y} = \frac{\frac{1}{2} \int_t^{t_i} f(t)^2 dt}{\int_t^{t_i} f(t)dt} \right)$$

(Ecuación 4)

El vector  $\bar{X}$  de cada uno de los centroides corresponde a todos los valores del tiempo como variable independiente, la resta de los vectores  $\bar{X}$  entre los centroides hallados para la curva de trazadores entre los dos puntos de medición dan como resultado el tiempo de transporte ( $T_t$ ) del cauce (ecuación 5).

$$T_t = \bar{X}_{e1} - \bar{X}_{e2} \text{ (Ecuación 5)}$$

Todos estos cálculos se implementaron en Matlab, para que la ejecución fuera

realizada en campo de manera expedita en un dispositivo móvil y así tomar las decisiones correspondientes al tiempo de transporte para la técnica de retención de hojarasca.

## Posprocesamiento de datos

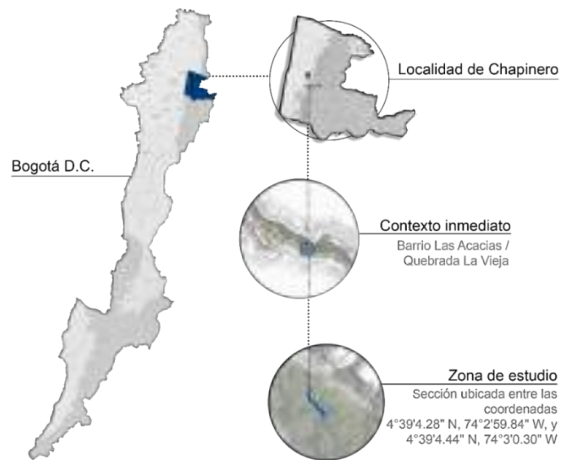
Con base en el macro 10.1 de la técnica 17 de *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* de Elozegi y Sabater (2009), se realiza el procesamiento de los datos de la técnica de la retención de hojarasca, donde se calcula la regresión entre el logaritmo neperiano del número de hojas no retenidas ( $L-L_0$ ) y la distancia ( $d$ ). La pendiente de la regresión equivale a la tasa de retención ( $k$ ) como se indica en la figura 2b.

## RESULTADOS

El tramo de estudio en la quebrada La Vieja se limitó con un ancho de

1,50 m y una longitud de 15 m, donde la sección aguas arriba se ubica en las coordenadas 4°39'4.28"N, 74°2'59.84"W, y la sección aguas abajo en las coordenadas 4°39'4.44"N, 74°3'0.30"W (figura 3).

**Figura 3.** Área de estudio.



**Fuente:** elaborado por los autores con base en las imágenes disponibles como servicio WMS (*Web Map Server*) en el portal de la Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital. IDECA, 2018.

En el tramo trabajado se identificaron obstáculos como rocas, sedimentos, ramas y turbulencias que retuvieron hojas. Este tramo fue natural, sin canalizar y de fácil acceso. Como trabajo de campo se efectuaron dos visitas diagnósticas al área de estudio donde se llevaron a cabo las técnicas originales de retención de hojarasca y de trazadores de manera independiente. Con ello se determinó que el tiempo de espera para la recolección de la hojarasca en el río (una hora) no consideraba las condiciones hidráulicas del río que sí se podrían tener en cuenta con el tiempo

de transporte de la segunda técnica descrita.

Este resultado preliminar indicó que la adaptación del tiempo de transporte de la masa de agua del río a la técnica de retención de hojarasca permitiría asociar la hidrodinámica del río al modelo biológico, si se asume que el tiempo de transporte promedio corresponde a la distancia media que recorrería la masa de agua.

Una vez definida la importancia teórica y experimental de acoplar ambos modelos y técnicas de campo, se procedió a realizar tres salidas de campo en las cuales se implementaron ambas técnicas de forma conjunta al aplicar el tiempo de transporte hidráulico bajo la formulación ecohidráulica propuesta en esta investigación. Como resultado se obtienen las figuras 4a y 4b.

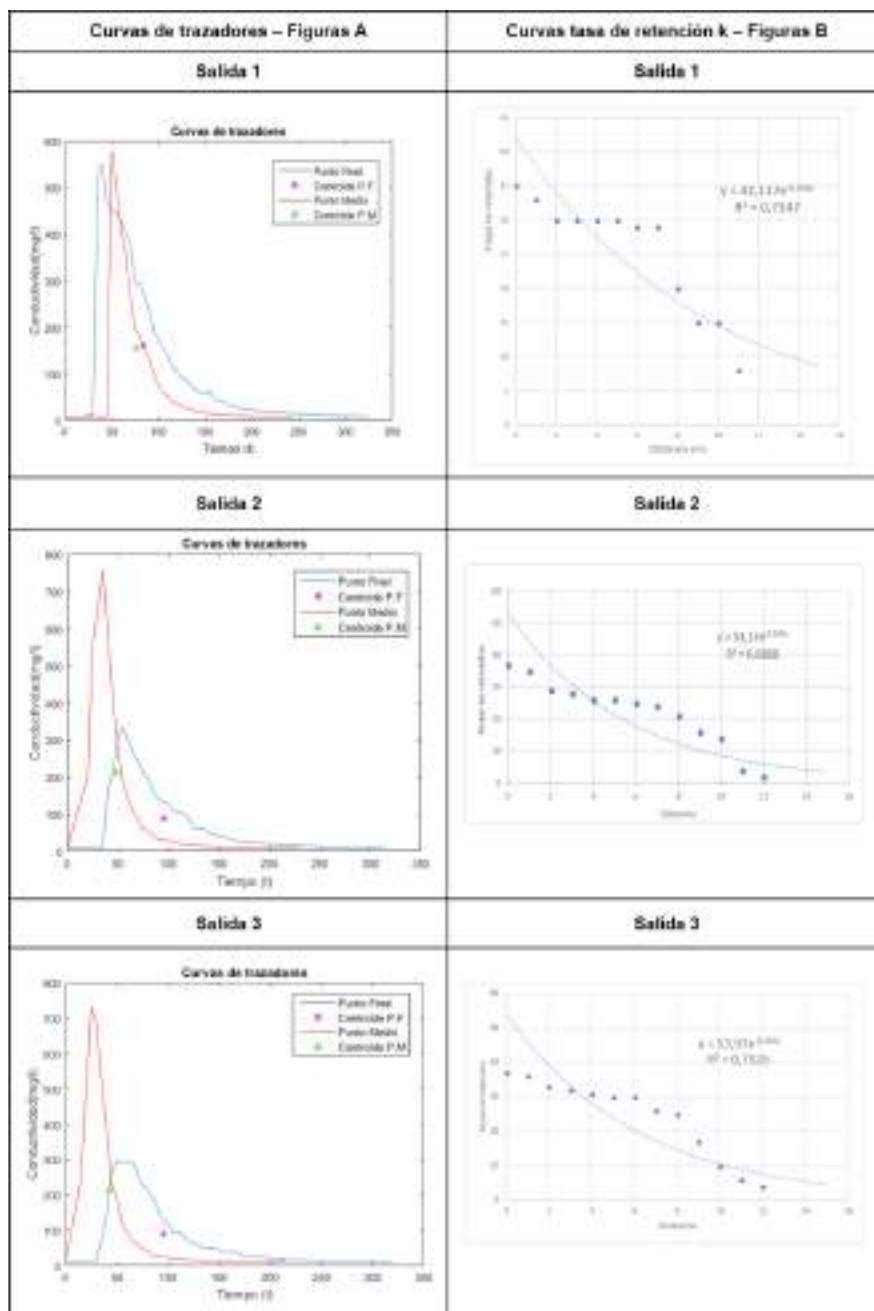
Por otro lado, una variable que se puede calcular dentro de la técnica de retención de hojarasca es la distancia media recorrida por la misma ( $d$ ) a partir de la tasa de retención ( $k$ ). Sin embargo, al realizarse esta técnica en el tiempo de espera de una hora, dicha distancia no refleja la hidrodinámica del río. Es por ello que al tener en cuenta variables que reflejan el comportamiento real de la masa de agua como el caudal, el área transversal del río y el tiempo de transporte ( $T_t$ ), se pudo determinar la distancia media real aplicando la ecuación 6:

$$d = \frac{Q \cdot t_t}{A_t} \text{ (Ecuación 6)}$$



Donde  $Q$  es el caudal,  $A_z$  es el área transversal y la fracción de  $d$  (distancia media) y  $Tt$  (tiempo de transporte)

corresponde a la velocidad media  $\bar{v}$  del río.



**Figura 4.** Resultados obtenidos con las técnicas empleadas para cada una de las salidas. A. Curvas de trazadores. B. Curvas tasa de retención.

El área transversal del río es 0,30 m<sup>2</sup> teniendo en cuenta su ancho de 1,50 m y su profundidad media de 0,20 m. Esta distancia media hallada se comparó con los valores de distancia media encontrados a partir de la técnica de retención de hojarasca.

Para cada salida de campo se calculó el tiempo de transporte, el número de hojas en transporte, la tasa de retención, el caudal y la distancia media hallada por las diferentes técnicas, datos que se relacionan en la tabla 1.

**Tabla 1.** Resumen de cada salida en campo y sus variables representativas.

Ensayo	$Q$ (L/s)	$L_d$	$k$ (m <sup>-1</sup> )	$T_t$ (min)	$d_0$ (m)	$d_1$ (m)	$d_2$ (m)	Lluvia antecedente
Preliminar*	N/A	114,16	0,14	60,00	15,00	6,99	N/A	No
1	33,35	111,44	0,17	0,25	10,00	9,43	10,34	No
2	27,54	108,73	0,18	0,85	12,00	5,44	4,30	Si
3	27,57	106,01	0,16	0,82	9,00	6,16	4,08	Si

**Nota.** Donde  $Q$  es caudal,  $L_d$  son hojas en transporte,  $k$  es tasa de retención de hojarasca,  $T_t$  es tiempo de transporte,  $d_0$  es distancia media experimental hallada mediante la técnica de retención de hojarasca,  $d_1$  es distancia media teórica hallada por la técnica de retención de hojarasca ( $d_1 = 1/k$ ),  $d_2$  es distancia media teórica hallada por la técnica de trazadores conservativos (ecuación N° 6) y N/A es no aplica. \*Aplicación en campo según la técnica original de Retención de Hojarasca (Elosegi y Sabater, 2009).

## DISCUSIÓN

La quebrada La Vieja presenta las características típicas de río de montaña con algunas zonas de rápidos, rocas, pequeñas caídas y sectores de alta turbulencia (figura 1) como lo indica González (2016). Por tener estas características, es ideal para realizar el método de trazadores dado que otros comúnmente usados para determinar la velocidad media del río, como el de área-velocidad, requieren canales uniformes (Kilpatrick y Cobb, 1984). En cuanto al trazador utilizado, la dilución

de sal común es apropiada para los flujos turbulentos comunes en los ríos de montaña. Esta técnica de trazadores conservativos exige fiabilidad y precisión en la toma de datos (Merz y Doppmann, 2006), por lo cual, se realizaron al menos tres ensayos en campo como sugiere Camacho y Cantor (2006).

El uso del tiempo de transporte de la técnica de trazadores conservativos como el tiempo de espera para la recolección de hojas de la técnica de la retención de hojarasca se considera viable, tal como se observa al comparar los resultados del tiempo de

transporte de las dos técnicas originales desarrolladas en el área de estudio. Fue evidente en campo que al esperar una hora en la técnica de la hojarasca las hojas fueron arrastradas en su mayoría a la parte final del tramo de estudio. Esta situación conlleva a estimar una menor tasa de retención de hojarasca por sección longitudinal del río, comparado con lo que se observa cuando se usa como tiempo de espera el tiempo de transporte de la masa de agua.

Es importante precisar que el tiempo de una hora se considera que no correspondería a las condiciones de cualquier tipo de río, dado que el tiempo de transporte es una variable dependiente de las condiciones morfológicas y los niveles del cuerpo de agua como se demuestra en el área de estudio. Entonces, el uso de un tiempo arbitrario que no corresponde al tiempo de transporte de la masa de agua, no permite extraer de manera correcta tasas de retención de materia orgánica (hojarasca) dado que dicho tiempo no corresponde realmente a la condición hidrodinámica (velocidad) que dominaría el proceso de transporte y/o sedimentación de las hojas. De esta manera, la inclusión del tiempo real de transporte ( $T_r$ ) mejora conceptualmente la técnica de la hojarasca y garantiza una evaluación integral de la capacidad de autodepuración real del río.

Los resultados obtenidos experimentalmente (figura 4) se asemejan de modo satisfactorio a la forma cualitativa del comportamiento de las curvas para cada una de las

técnicas empleadas (figura 2). Se observa en el gráfico de trazadores una tendencia sesgada a la izquierda con una caída en la curva, esto de acuerdo a lo representado por Camacho y Cantor (2006) en las curvas de trazadores para los modelos ADZ y TS que indican el mismo comportamiento.

De igual forma se representa el comportamiento esperado de regresión exponencial para la técnica retención de hojarasca. Es de notar que, aunque la técnica de retentividad biológica se modificó parcialmente frente al tiempo de espera para recolectar las hojas con el tiempo de transporte de la masa de agua, se obtiene de igual forma una tendencia exponencial aceptable como se muestra en la figura 4b.

La comparación entre los datos experimentales para cada variable representada en la tabla 1 demuestra que la variable ( $T_r$ ) aumenta inversamente a la variable  $Q$ . A medida que aumenta el caudal disminuye el tiempo de transporte y de igual manera disminuye la capacidad de retención ya que en campo fue posible observar la dificultad de retener hojas durante el aumento del caudal.

El ensayo de la técnica de retención de hojarasca realizado en el transcurso de una hora, arroja que la tasa de retención ( $k$ ) es menor que los demás ensayos con la formulación ecohidráulica. Al permitir un tiempo arbitrario tan alto se presentaba un mayor arrastre de las hojas bajo posibles variaciones de caudal, lo cual resultaría en una mayor

acumulación de hojas en el punto final del tramo que disminuyen la pendiente de la relación de hojas no retenidas de acuerdo a la distancia. Se espera entonces que las tasas de retención de hojarasca ( $k$ ) sean mayores cuando se vincula el tiempo de transporte de la masa de agua dado que se retiene más hojas en partes intermedias del tramo.

Lo anterior se visualiza en la tabla 1 donde la tasa de retención hallada con la técnica original fue de  $0,14 \text{ m}^{-1}$ , mientras que al emplear el tiempo de transporte ( $Tt$ ) de la técnica de trazadores conservativos, la tasa de retención que se calculó varió entre  $0,16$  a  $0,18 \text{ m}^{-1}$ .

Respecto a las distancias medias evaluadas y descritas en la tabla 1 se observa que en el ensayo donde se obtuvo un mayor caudal, las distancias  $d_0$ ,  $d_1$  (asociadas con la técnica de retención de hojarasca) y  $d_2$  (calculada mediante la técnica de trazadores conservativos), presentan valores similares de 10 m, 9,43 m y 10,34 m, respectivamente, debido a que tanto los transportes de la masa de agua como el de las hojas fluyen de manera constante y sobrepasan obstáculos como rocas, sedimentos o raíces. Sin embargo, al observar los caudales menores, las distancias medias varían entre sí indicando que las relacionadas a la retención de hojarasca no corresponden al movimiento medio del cuerpo de agua, ya que dependen de la velocidad del flujo, la profundidad del cauce y sus características morfométricas. En

consecuencia, se demuestra que el régimen hidrodinámico del río afecta el tiempo de transporte y no es correcto asumir en la técnica de retención de hojarasca el tiempo arbitrario de una hora de espera para su ejecución, sin considerar factores como el caudal y la morfometría del río en estudio.

Frente a la formulación ecohidráulica propuesta, se establece que la tasa de retención se puede asociar de forma indirecta a la capacidad de autodepuración del río, ya que la hojarasca retenida va a ser aprovechada por los microorganismos (biodegradación). En este proceso, además que participan estos factores biológicos, también intervienen de forma simultánea factores químicos y físicos, como los que ocurren sobre la materia orgánica donde se presenta un rompimiento en sus enlaces por hidrólisis (acción del agua) y la sedimentación al presentarse adhesión entre partículas (Rivas, 2004). En caudales bajos, el tiempo de retención hidráulico es alto a causa de la sedimentación de sólidos suspendidos y por lo tanto de bacterias adsorbidas, dando como resultado una posible mayor tasa de decaimiento de patógenos y una mayor capacidad de autopurificación de los ríos de montaña en contraste con los ríos de planicie para igual caudal (Camacho, et al., 2007).

Asimismo, en caudales bajos la retención de hojarasca ocurre en mayor medida, implicando que se acumule en el cauce y que exista una mayor degradación de la materia orgánica (Santacruz, 2016).

Esta descomposición es un proceso importante del ecosistema que ocurre de forma continua en ríos donde no sólo se involucran factores bióticos como la presencia de organismos descomponedores y detritívoros (Graça, Bärlocher y Gessner, 2005) sino también factores abióticos como la abrasión física (Santacruz, 2016).

Al estudiar esta retención, se encontró que el modelo exponencial que se asocia es similar al que se emplea en la literatura para determinar la descomposición de hojarasca. Sin embargo, en este último la constante  $k$  hace referencia al coeficiente de descomposición, que relaciona la caída de hojarasca con la acumulación y explica la tasa con la cual la materia orgánica pierde volumen de masa en un periodo de tiempo por acción de organismos descomponedores (Santacruz, 2016). Esto indica que si existe una mayor entrada de hojarasca habrá a su vez una mayor retención, acumulación y descomposición de la misma, lo que genera un alto consumo de nutrientes en el ecosistema ya que hay más alimento para los organismos y recursos del hábitat para ellos (Kreutzweiser, Good, Capell y Holmes, 2007).

Por otro lado, a modo de comparación entre las técnicas aplicadas cabe destacar que, así como el cloruro de sodio es un trazador conservativo las hojas también poseen características de este tipo, porque son móviles, no reaccionan químicamente, no son tóxicas ni contaminantes para las personas ni para el medio ambiente y se detectan fácilmente (Martos, González,

Omil y Pombo, 2006). Por lo tanto, es válido concluir que los dos modelos representan un fenómeno físico a partir de la misma base conceptual de un trazador conservativo denotado previamente, lo cual le da mayor validez al acople de las dos técnicas usadas para la formulación ecohidráulica desarrollada.

## CONCLUSIONES

En esta investigación se formuló y verificó con datos experimentales un acople de dos modelos matemáticos asociados a técnicas de campo que relacionan variables biológicas e hidráulicas en un río de montaña. La formulación ecohidráulica considera que el tiempo de transporte hidráulico del río se puede vincular al periodo necesario para evaluar la retentividad de materia orgánica como un indicador de la capacidad de autodepuración de este tipo de ríos.

La formulación ecohidráulica reduce el tiempo de ejecución en campo de la técnica de retención de hojarasca sin afectar la naturaleza del estudio y arroja datos certeros en cuanto a la asociación con la hidrodinámica del sistema. De igual forma, permite evaluar la capacidad del río para retener materia orgánica y degradarla por la acción de organismos propios del mismo (autodepurarse), también facilita estimar el caudal, la velocidad y el tiempo de transporte que son variables fundamentales frente a la modelación de la calidad del agua. Así mismo, la formulación considera



el tiempo real de transporte de la masa de agua y lo asocia a la capacidad de retentividad de materia orgánica del río manteniendo las bases conceptuales de cada modelo matemático. Adicionalmente, se potencializa la representatividad física de los procesos de autodepuración demostrando así situaciones que antes no se lograban al asumir el tiempo arbitrario de una hora en la técnica de la hojarasca.

Dado que solo se corroboró la formulación ecohidráulica propuesta en un río de montaña, se recomienda ampliar la verificación a otras clases de ríos como el de llanura y a diferentes escalas de estudio asociadas a las dinámicas ecosistémicas que permitan validar el uso de esta formulación ecohidráulica. Así mismo, se sugiere profundizar el estudio de la tipología de hojas a emplear para la técnica de retención de hojarasca dado que aspectos como la forma, el tamaño y el peso de la hoja podrían afectar las dinámicas con las cuales dichas hojas se consideran trazadores conservativos que representan el depositamiento de la materia orgánica frente a la hidrodinámica propia de cada río.

Por otro lado, se sugiere hacer un estudio que emplee esta formulación propuesta más el acompañamiento de la medición de oxígeno disuelto y la materia orgánica para verificar la correspondencia entre la retención de la hojarasca y la descomposición de la materia orgánica, asociada directamente al proceso de autodepuración de los cuerpos de agua.

## Conflicto de intereses

El manuscrito fue elaborado y revisado con la participación de todos los autores, quienes declaran no tener ningún conflicto de interés que ponga en riesgo la validez de los resultados presentados.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la asesoría y orientación de la doctora María Isabel Castro Rebolledo, directora del Programa de Biología de la Universidad de La Salle, en el área de Biología.

## REFERENCIAS

- Camacho, L y Cantor, M. (2006). Calibración y análisis de la capacidad predictiva de modelos de transporte de solutos en un río de montaña colombiano. *Avances en Recursos Hidráulicos*, 14, 39-51.
- Camacho, L., Rodríguez, E., Gelvez, R., González R., Medina, M. y Torres, J. (2007). *Metodología para la caracterización de la capacidad de autopurificación de ríos de montaña*. I Congreso Internacional del Agua y el Ambiente. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Chapra, S. C. (1997). *Surface Water-Quality Modeling*. Singapore: McGraw-Hill.

- Elosegi, A. y Sabater, S. (2009). Dinámica y relevancia de la materia orgánica-retención de hojarasca. *Conceptos y técnicas en ecología fluvial* (pp. 149-150). España: Rubes Editorial.
- González-Trujillo, J. D. (2016). Trait-based responses of caddisfly assemblages to the partial channelization of a High-Andean stream. *Hydrobiologia*, 766, 381–392. doi: 10.1007/s10750-015-2474-z.
- Graça, M. A., Bärlocher, F. y Gessner, M. (2005). *Methods to Study Litter Decomposition: A Practical Guide*. Países Bajos: Springer Editorial.
- Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital. IDECA. (2018). *Mapas Bogotá*. Recuperado de <http://mapas.bogota.gov.co/>.
- Kilpatrick, F. A. y Cobb, E. D. (1984). Measurement of Discharge Using Tracers. Estados Unidos: U.S. Geological Survey y Departamento del Interior. Recuperado de <https://pubs.usgs.gov/of/1984/0136/report.pdf>
- Kilpatrick, F. A., Rathbun, R.E., Yotsukura, N., Parker, G.W. y Delong, L.L. (1989). Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey: Determination of Stream Reaeration Coefficients by use of tracers. Estados Unidos: U.S. Geological Survey y Departamento del Interior. Recuperado de [https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a18/pdf/TWRI\\_3-A18.pdf](https://pubs.usgs.gov/twri/twri3-a18/pdf/TWRI_3-A18.pdf)
- Kreutzweiser, D. P., Good, K. P., Capell, S. S. y Holmes S. B. (2007). Leaf-litter decomposition and macroinvertebrate communities in boreal forest streams linked to upland logging disturbance. *North American Benthological Society*, 27 (1), 1–15. doi: 10.1899/07-034R.1
- Martos, F., González, J., Omil, M. y Pombo, R. (2006). *Agentes forestales de la Xunta de Galicia*. España: Editorial MAD.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. MADS. (2018). Guía técnica de criterios para el acotamiento de las rondas hídricas en Colombia. Bogotá: El Ministerio.
- Rivas–Hernández, A. (2004). Fundamentos de la purificación del agua. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). Recuperado de <http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/-bvirtual/018834/MEMORIAS2004/-CapituloII/2Fundamentosdelapurificaciondelagua.pdf>
- Rodríguez, J. (2015). Construcción y evaluación hidrodinámica de un humedal artificial de flujo horizontal a escala piloto (Tesis de grado en ingeniería mecánica agrícola). Saltillo, México: Departamento de Maquinaria Agrícola, Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro.

Vergara-Olaya, D. L. (2009).  
Entomofauna lítica bioindicadora  
de la calidad del agua (Tesis  
de Grado en Medio Ambiente y  
Desarrollo). Colombia, Medellín:  
Facultad de Minas, Universidad  
Nacional de Colombia.

Santacruz-Castro, T. F. (2016).  
Estudio de la dinámica y variación  
de las tasas de descomposición  
de hojarasca en ríos altoandinos,  
con diferentes usos del suelo (Tesis  
de grado en biología). Cuenca,  
Ecuador: Escuela de Biología del  
Medio Ambiente.