

# ESTIMACIÓN DEL COEFICIENTE DE PARTICIÓN PARA LA MODELACIÓN DE ORGANISMOS INDICADORES DE PATÓGENOS EN RÍOS

Natalia Sánchez y Luis A. Camacho

<sup>1</sup>Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental, Universidad de los Andes,  
Carrera 1 No 18A-12, Bogotá Colombia.  
E-mail: n.sanchez2060@uniandes.edu.co, la.camacho@uniandes.edu.co

## Introducción

El acelerado crecimiento de la población, el aumento en el consumo del agua para diferentes actividades, y la falta de tratamiento de las aguas servidas ha incrementado de forma severa los niveles de contaminación hídrica en países en desarrollo. Los organismos patógenos (bacterias, virus, parásitos y protozoos) representan la principal causa de la transmisión de enfermedades de origen hídrico como gastroenteritis simple hasta casos fatales de diarrea, disentería, hepatitis o fiebre tifoidea, generando altas tasas de morbo-mortalidad en la población (Arcos & Ávila *et al.*, 2005).

La modelación del transporte y destino de organismos patógenos en sistemas acuáticos es de gran utilidad para cuantificar el efecto adverso de vertimientos en cuerpos de agua superficiales, y permite conocer los factores que afectan su concentración, la relación con otros determinantes de calidad de agua y los mecanismos de transporte que los afectan. Como primera aproximación, el decaimiento de organismos patógenos en corrientes naturales ha sido modelado en varias investigaciones asumiendo un coeficiente de decaimiento de primer orden o tasa global de decaimiento ( $K_b$ ) para describir la reducción neta de su concentración con el tiempo y la distancia recorrida hacia aguas abajo (Bowie *et al.*, 1985; Thomann y Mueller, 1987; Chapra, 1997; Koji *et al.*, 2014).

Los parámetros que explican la tasa  $K_b$  ( $d^{-1}$ ) y que deben ser calibrados son el coeficiente empírico de extinción de luz ( $K_e$ ), el coeficiente de partición ( $K_d$ ) y la velocidad de sedimentación ( $V_s$ ) (Chapra, 1997). De estos, la asociación sedimento/ microorganismo es la más difícil de estimar. Los estudios encontrados acerca de la tendencia de las bacterias a adherirse en los sedimentos son escasos (Craig *et al.*, 2002; Jamieson *et al.*, 2005; Kinnaman *et al.*, 2012, Fernández *et al.*, 2013; Piorkowski *et al.*, 2014; King y James *et al.*; 2017) y se han enfocado en evaluar distintas técnicas para la extracción de bacterias en sedimento, analizando el tipo y tamaño. El coeficiente de partición ( $K_d$ ) es por lo tanto uno de los parámetros importantes dentro de un modelo de transporte y decaimiento de bacterias patógenas. Los métodos utilizados para la estimación del coeficiente  $K_d$ , han sido aplicados para entender principalmente el transporte de sustancias tóxicas químicas en aguas subterráneas, siendo no aplicables en forma directa a bacterias coliformes en cuerpos de agua superficial.

## Objetivos y alcance

En el presente artículo se presenta una metodología para la estimación experimental del coeficiente de partición ( $K_d$ ) y se sugiere la medición en campo de radiación solar, temperatura y salinidad, para determinar de forma más precisa la tasa global de decaimiento ( $K_b$ ) de organismos patógenos. La metodología propuesta se aplica y evalúa con datos del río Teusacá en los Andes colombianos.

## Metodología

La metodología completa propuesta se presenta en Sánchez (2018) y se resume a continuación en los siguientes pasos.

- 1) Se toma un volumen de muestra simple o puntual representativo en el sitio de muestreo en el río de 1 litro (recipiente tipo Schott de vidrio esterilizado) para los análisis microbiológicos y 2 litros (recipiente plástico) para medición de sólidos suspendidos totales, sólidos volátiles y granulometría láser. A la muestra recolectada se le miden in-situ el pH, la conductividad eléctrica para calcular la salinidad  $S$  (ppt), el oxígeno disuelto  $OD$  (mg/L) y la temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ ). Adicionalmente, se realiza aforo con molinete para la medición del caudal y se mide la radiación solar superficial  $I_o$  (ly/hr) mediante un piranómetro de campo.
- 2) Las muestras se mantienen refrigeradas a  $4^{\circ}C$  aproximadamente y asiladas de la luz solar desde el lugar de colecta hasta el laboratorio. El mismo día de toma en menos de 24 horas se realiza la medición de coliformes totales (CT) y *E.coli* para evitar problemas de multiplicación y muerte de microorganismos. Por su parte, la prueba estándar de SST (APHA, 2005) debe realizarse antes de 7 días. Se realiza granulometría láser para determinar la distribución del tamaño promedio de las partículas y determinar la velocidad de sedimentación  $V_s$  (m/d) y medición de carbono orgánico, mediante la prueba de sólidos suspendidos volátiles (SSV).
- 3) Antes de la medición de CT y *E.coli* en sedimentos y agua se separa el sedimento y el agua mediante la prueba de sedimentación volumétrica. Para ello se traslada el litro de muestra bien mezclada, a un cono Imhoff y se deja sedimentar por un periodo de 45 minutos. Después se agita la muestra cerca de las paredes, con un agitador esterilizado o mediante rotación, y se deja asentar otros 15 minutos. El agua libre de sedimentos se transfiere a otro recipiente previamente esterilizado.
- 4) Para desprender las bacterias asociadas a los sólidos suspendidos y medir su concentración se utiliza agua peptonada al 1% como solución buffer. Este es un medio de enriquecimiento no selectivo que proporciona nutrientes necesarios para el desarrollo microbiano y mantiene el balance osmótico (Jamieson *et al.*, 2005; Gómez *et al.*, 2009). En el cono Imhoff que tiene los sedimentos se agrega un volumen igual al del agua extraída (1 L) y se agita manualmente por 10 minutos con el fin de que los sólidos se diluyan en la solución y las bacterias se adhieran a ésta. Luego se trasvasa dicha solución a otro recipiente esterilizado.
- 5) A las dos muestras resultantes, agua libre de sedimentos, y sedimentos diluidos en solución acuosa, se realiza la

cuantificación de bacterias coliformes totales por medio de filtración por membrana utilizando como medio de cultivo Coli-Blue. Al final se obtiene la concentración de bacterias libres en el agua ( $N_w$ ) y en los sedimentos ( $N_p$ ), ambas expresadas en UFC/100 ml y la concentración de sólidos suspendidos ( $m$ ) en (g/L). Para reducir errores por contaminación externa o variaciones en la toma de muestra o mediciones de laboratorio se realizan 4 repeticiones del experimento y dos diluciones cada una por duplicado de cada siembra.

## Cálculos

Al final de la metodología propuesta se deben realizar los siguientes cálculos para obtener los parámetros de la tasa global de mortalidad de organismos indicadores de patógenos  $K_b$ .

$$K_d = \frac{N_p}{N_w \cdot m} \quad [1]$$

$$F_p = \frac{K_d \cdot m}{1 + K_d \cdot m} \quad [2]$$

$$K_e = 0.55 \cdot m \quad [3]$$

$$K_{b1} = (0.8 + 0.02 \cdot S) \cdot 1.07^{T-20} \quad [4]$$

$$K_{bi} = \frac{1.0 \cdot I_0}{K_e \cdot H} (1 - e^{-K_e \cdot H}) \quad [5]$$

$$K_{bs} = F_p \cdot \frac{V_s}{H} \quad [6]$$

$$K_b = K_{b1} + K_{bi} + K_{bs} \quad [7]$$

donde,  $H$  es la profundidad del río (m);  $F_p$  es la fracción de las bacterias adheridas en los sedimentos;  $K_{b1}$ ,  $K_{bi}$  y  $K_{bs}$  son las tasas de mortalidad base, mortalidad por radiación solar y decaimiento por sedimentación respectivamente ( $d^{-1}$ ); y las demás variables han sido definidas previamente.

## Descripción caso de estudio

El tramo de estudio es de aproximadamente 11 km de longitud, se encuentra entre el municipio La Calera, aguas abajo del embalse San Rafael y la estación la cabaña (Fig. 1) en cercanías de Bogotá. El tramo de estudio tiene en cuenta el sitio de vertimiento de la PTAR del municipio de La Calera, la confluencia de la Quebrada Simayá y las aguas residuales del conjunto residencial Macadamia. Para la aplicación de la metodología propuesta los sitios de medición son T5-A. abajo de la confluencia de la Quebrada Simayá y T8 Puente intermedio II. La longitud del sub-tramo de estudio es de aproximadamente 4.18 Km. Para evaluar la metodología se realizaron dos campañas de mediciones.

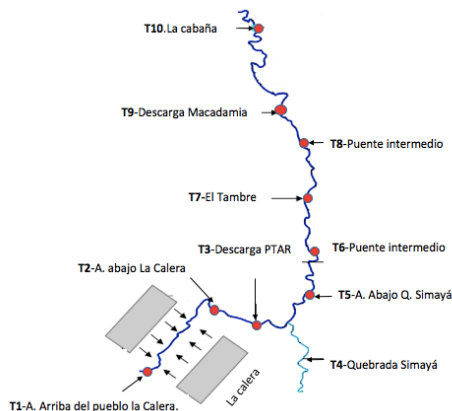


Figura 1.- Caso de estudio Río Teusacá. Mediciones en T5 y T8.

## Resultados

En la Tabla 1 se resumen los resultados de las mediciones *In situ* y análisis de laboratorio de las dos campañas realizadas, y en la Tabla 2 los resultados de los cálculos intermedios y la tasa global de decaimiento obtenida con la metodología propuesta en este río de montaña.

Tabla 1.- Mediciones *In situ* y análisis de laboratorio campañas 1 y 2.

	Abajo Q. Simayá Campaña		P. Intermedio II Campaña	
	1	2	1	2
Temperatura (°C)	13.35	14.60	17.13	14.90
pH	7.05	6.86	7.20	7.36
Conductividad (µS/cm)	107.9	108.4	111.1	113.5
Salinidad (ppt)	0.048	0.052	0.050	0.056
Oxígeno disuelto (mg/l)	7.29	7.03	6.74	7.16
Caudal (m³/s)	1.7	0.7	1.7	0.7
Radiación solar (ly/hr)	31.4	25.5	71.7	24.8
CT (UFC/100 mL)	3.1E+04	1.6E+04	8.5E+04	4.8E+03
E. Coli (UFC/100 mL)	4.0E+03	1.5E+03	9.8E+03	5.1E+02
SST (mg/L)	14.05	9.01	18.80	7.54
Diámetro promedio (µm)	20.51	22.67	27.3	31.3
Vel. sedimentación (m/d)	1.5	1.5	1.5	1.5

Tabla 2.- Resultados tasa global de decaimiento  $K_b$  ( $d^{-1}$ ).

	$K_d$ ( $m^3/g$ )		$F_p$ (%)		$K_{b1}$ ( $d^{-1}$ )		$K_{bi}$ ( $d^{-1}$ )		$K_{bs}$ ( $d^{-1}$ )		$K_b$ ( $d^{-1}$ )	
	CT	E. coli	CT	E. coli	CT	E. coli	CT	E. coli	CT	E. coli	CT	E. coli
<b>Campaña 1</b>												
Máximo	0.0054	0.0069	7	7	0.66	0.66	15.90	15.90	0.20	0.25	16.76	16.72
Medio	0.0034	0.0035	5	5	0.59	0.59	11.70	11.70	0.16	0.18	12.42	12.50
Mínimo	0.0019	0.0014	3	2	0.52	0.52	8.52	8.52	0.11	0.12	9.18	9.11
<b>Campaña 2</b>												
Máximo	0.026	0.034	20	25	0.57	0.57	12.66	12.66	0.69	0.71	13.56	13.56
Medio	0.021	0.017	15	11	0.56	0.56	10.44	10.44	0.46	0.34	11.67	11.84
Mínimo	0.01	0.006	9	5	0.55	0.55	8.19	8.19	0.32	0.19	9.24	9.47

De acuerdo a los resultados, los valores de  $K_d$  muestran el mismo orden de magnitud para ambos sitios de medición en cada una de las campañas siendo similares tanto para CT como *E.coli*. Los coeficientes difieren en orden de magnitud entre campañas por la diferencia de caudales. Cuando aumenta el caudal se incrementan las bacterias libres en el agua disminuyendo la tendencia a adsorberse en los sedimentos. Como resultado importante, las tasas de decaimiento  $K_b$  estimadas de forma experimental están dentro del rango de valores reportados en la literatura (Bowie, 1985; Brookes *et al.*, 2004) y las tasas obtenidas por calibración directa en este río por Torres y Camacho (2008). Es importante resaltar que los valores encontrados de  $K_b$  son bastante altos, lo cual se explica por la alta capacidad de asimilación de la contaminación de la corriente, característica principal de los ríos de montaña.

## Conclusiones

La metodología y mediciones directas *In situ* propuestas reducen la incertidumbre en la estimación de la tasa global de decaimiento de organismos patógenos. La metodología proporciona órdenes de magnitud experimentales del coeficiente de partición  $K_d$ , permitiendo estimar directamente el efecto de la sedimentación en el decaimiento de bacterias coliformes totales y *E.coli*. Lo anterior, reduce los problemas obtenidos de falta de sentido físico, cuando dicho coeficiente es calibrado directamente en un modelo matemático.

## Referencias

Sánchez N. (2018). Estimación del coeficiente de partición y modelación de organismos indicadores de patógenos en ríos. *Tesis de Maestría Universidad de los Andes*, pp. 182.