

# Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia

## Trihalomethane prediction modelling in water distribution systems: calculation of the mean residence time

Andrés Araya-Obando<sup>1</sup>, Mark Jones-Sánchez<sup>2</sup>,  
Luis G. Romero-Esquivel<sup>3</sup>

*Fecha de recepción: 12 de setiembre de 2018*  
*Fecha de aprobación: 25 de abril de 2018*

Araya-Obando, A; Jones-Sánchez, M; Romero-Esquivel, L.  
Modelos de predicción de Trihalometanos en redes de distribución de agua: determinación de tiempos medios de residencia. *Tecnología en Marcha*. Vol. 32-1. Enero-Marzo 2019. Pág 167-178.

DOI: <https://doi.org/10.8845/tm.v32.i1.4126>



- 1 Investigador de la Escuela Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: jobando@tec.ac.cr
- 2 Estudiante de la carrera en Ingeniería en Construcción. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: mkjones0505@gmail.com
- 3 Escuela de Química. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Costa Rica. Correo electrónico: lromero@tec.ac.cr

## Palabras clave

THMs; modelos de predicción; agua de consumo humano; sistemas de distribución; ensayos con trazadores.

## Resumen

El contacto del cloro con la materia orgánica puede producir subproductos de desinfección tales como los Trihalometanos (THMs). Estos compuestos son considerados de riesgo para la salud y su formación se ve influenciada por el pH, temperatura, tipo de materia orgánica, dosis del desinfectante y el tiempo de reacción. No obstante, dados los costos asociados a los análisis en laboratorio, comúnmente se utilizan modelos mecánicos y estadísticos para su predicción. Sin embargo, la determinación del tiempo medio de residencia (TMR) en las redes de distribución requiere de herramientas computacionales que demandan tiempo e inversión por lo que es necesario considerar otros métodos para su estimación. En ese sentido, el presente artículo profundiza en los principales aspectos que se deben considerar para la construcción de un modelo de predicción, así como en el análisis de dos métodos de cálculo para la determinación del TMR en redes de distribución empleando trazadores. Para esto último, se hicieron pruebas en una red de distribución a escala piloto conformada por tuberías de PVC de 12 mm de diámetro. Se utilizó cloruro de sodio como trazador mediante adición continua. Se determinaron los TMR en dos puntos de muestreo y se obtuvo una diferencia de 2,40% y 3,31% respectivamente, demostrando que son dos métodos precisos y de fácil comprensión. Finalmente, se concluye que los modelos construidos a partir de regresiones múltiples pueden ser potencialmente utilizados en Costa Rica, dado que se pueden construir de manera sencilla a partir de condiciones locales.

## Keywords

THMs; prediction models; water for human consumption; distribution systems; tracer test.

## Abstract

Contact of chlorine with organic matter can produce disinfection byproducts such as Trihalomethanes (THMs). These compounds are considered to be hazardous to health and their formation is influenced by pH, temperature, type of organic matter, dose of chlorine and reaction time. However, given the costs associated with laboratory analyzes, mechanical and statistical models are commonly used for their prediction. Nevertheless, the determination of the mean residence time (TMR) in distribution networks requires computational tools that demand time and investment, so it is necessary to consider other methods for their estimation. In this sense, the present article emphasizes into the main aspects that must be considered for the construction of a prediction model, as well as the analysis of two calculation methods for the determination of TMR in distribution networks using tracers. For the latter, tests were carried out on a pilot scale distribution network made up of 12 mm diameter PVC pipes. Sodium chloride was used as a tracer by continuous addition. TMRs were determined at two sampling points and a difference of 2.40% and 3.31% respectively were obtained, demonstrating that both calculations methods are precise and easily understood. Finally, it is concluded that the models constructed from multiple regressions can be potentially used in Costa Rica, since they can be constructed simply from local conditions.

## Introducción

La presencia de subproductos de desinfección se debe a reacciones entre los agentes químicos desinfectantes y la materia orgánica disuelta en el agua [1]–[3]. A lo largo de las últimas décadas, la investigación relacionada con la formación de los subproductos de desinfección en redes de distribución se ha enfocado en i) identificar nuevos subproductos de desinfección [4]; ii) evaluar los efectos en la salud pública atribuibles a la presencia de estas sustancias en términos, principalmente, de la ingesta y la exposición [2], [5]; iii) desarrollar reglamentación con el fin de gestionar el riesgo entre la desinfección del agua y la producción de DBPs [2], [6]; iv) caracterizar la calidad del agua y las condiciones en los sistemas de tratamientos que propician la formación de DBPs [2], [3], [7]–[9]; v) desarrollar, evaluar tecnologías y modificar los sistemas de tratamiento para el control de los DBPs [10]–[12]; y finalmente, vi) cuantificar la formación y la distribución de los DBPs en los sistemas de distribución de agua desde la fuente hasta el consumidor [1], [13]–[22]

A pesar de que se tienen identificadas cerca de 600 especies distintas de subproductos de desinfección [4], sólo algunos de ellos se catalogan como sustancias tóxicas [23]. No obstante, surge especial interés en el caso particular de los Trihalometanos (THMs) ya que se presume que están relacionados con el cáncer renal y del tracto digestivo, efectos reproductivos, problemas con el hígado y riñones [1], [2], [5]. Específicamente, los THMs de mayor potencial de formación son: cloroformo ( $\text{CHCl}_3$ ), bromodicloroformo ( $\text{CHCl}_2\text{Br}$ ), dibromocloroformo ( $\text{CHClBr}_2$ ) y bromoformo ( $\text{CHBr}_3$ ) [1], [8] los cuales son medibles y reportados como Trihalometanos Totales (TTHM) [17]. En el caso de Costa Rica, la cantidad máxima permitida de THMs totales en el agua de consumo es de  $100\mu\text{g/L}$  para el bromoformo y dibromoclorometano,  $60\mu\text{g/}$  para el bromodiclorometano y  $200\mu\text{g/}$  para el cloroformo.

Partiendo del hecho de que las redes de distribución de agua potable constituyen un reactor químico y biológico a gran escala con altos tiempos de residencia [24], se han desarrollado modelos empíricos de predicción para estimar los TTHM, así como, los compuestos individuales de formación [1], [4], [6]. El contar con un modelo de predicción de THMS facilita, entre otras cosas, identificar estrategias operacionales para minimizar su formación, seleccionar puntos de muestreo para el control de calidad, tomar decisiones para la gestión de riesgos asociados a la salud pública, establecer normas más estrictas de control y estimar necesidades de infraestructura para mejorar la calidad del agua. En el marco del contexto en mención, el presente artículo profundiza en los principales aspectos que intervienen en la formación de los THMs, explicando a su vez, la conceptualización y construcción de los modelos de predicción mecánicos y estadísticos utilizados en redes de distribución.

A pesar de que los modelos permiten predecir las concentraciones de THM en un instante dado, una de sus principales limitaciones es la determinación del tiempo de reacción. En el caso de las redes de distribución, se debe determinar el tiempo medio de residencia (TMR). Para ello, se requiere de modelos computacionales como EPANET [13], [16] o a través de sistemas de supervisión, control y adquisición de datos (SCADA) [14]. Sin embargo, este tipo de herramientas requieren de tiempo y de inversión de recursos. Por tanto, en el presente trabajo se evalúa el cálculo de tiempos de residencia en una red construida a escala piloto a la cual se le aplica un trazador. Posteriormente, se analizan dos métodos de tratamiento de datos de los resultados de un ensayo de trazadores con el fin de proveer una metodología de análisis de bajo costo para la determinación del tiempo medio de residencia del agua en los puntos de control de la red de distribución en donde se requiera validar y dar seguimiento a la formación de los THMs.

## Formación de THMs en el agua

Los niveles de THMs formados como resultado de la desinfección en redes de distribución de agua dependen de varios factores como la concentración de materiales precursores, el tiempo de reacción (relacionado con el tiempo medio de residencia del agua en las redes de distribución), el tipo y dosis del desinfectante y algunas características particulares de la calidad del agua (cuadro 1).

**Cuadro 1.-** Principales parámetros que intervienen en la formación de THMs.

Parámetro	Descripción
Materia Orgánica	La materia orgánica caracterizada mediante Carbón Orgánico Total (COT) y disuelto (COD), es el principal precursor. Las sustancias húmicas son las principales precursoras.
Bromuros	Los bromuros son rápidamente oxidados por el cloro a ácido hipobromoso (HOBr), el cual, reacciona con la materia orgánica produciendo THMs bromados considerados más tóxicos.
Desinfectante	La tasa de formación de THMs aumenta con la dosis de cloro ( $Cl_2$ ). Considerando una dosis fija de cloro, la producción de THMs se incrementa si aumenta la concentración de COD. No obstante, la mayoría de los modelos de cinética de formación utilizan la dosis inicial de $Cl_2$ , a pesar de que la concentración cambia durante la reacción.
pH	La producción de THMs aumenta con el incremento del pH. Una baja formación a pH cercano a 5 y una mayor tasa a pH cercano 9,4.
Temperatura (q)	La producción de THMs aumenta con la temperatura por lo que su producción cambia usualmente en verano respecto al invierno.
Tiempo de reacción	Más del 50% de la formación final de THMs se reporta desde pocos minutos a varias horas o días después de la adición del cloro.

Fuente: [1]-[3], [8], [15], [17], [25]

## Modelos de predicción de THMs

Los modelos de predicción de THMs se clasifican en modelos mecánicos y estadísticos. Estos tipos de modelos son calibrados con una base de datos limitada por lo que en ocasiones se omiten términos para simular parámetros importantes y esto produce falta de fiabilidad si el valor de cualquier variable se encuentra fuera del rango de los datos de calibración [21]. De igual forma, la mayoría de los modelos existentes para la formación de DBPs son desarrollados estadísticamente por lo que son o resultan muy específicos del lugar y no serán confiables para las predicciones realizadas fuera del rango de las observaciones existentes [22]. A continuación, se presenta una descripción detallada de los modelos mecánicos y estadísticos.

### Modelos mecánicos

Los modelos mecánicos están basados en presunciones de la química de la reacción de cloración. Debido a la complejidad de las reacciones de cloración y la materia orgánica, estos modelos no producen expresiones analíticas explícitas para cinética de formación del THMs. No obstante, se pueden integrar numéricamente para generar predicciones para las concentraciones de THM como una función del tiempo de reacción y condiciones de reacción iniciales particulares a la zona de estudio. Estos modelos parten del hecho que la formación de THMs está estrechamente vinculada con el consumo de cloro. Dicha afirmación se puede ejemplificar con la (*Ec01*) [15].

$$[TTHM]_T = k_{TC} \cdot (Cl_o - C_T) \dots\dots\dots(Ec01)$$

Donde,  $TTHM_T$  se refiere al total de THMs en un tiempo “ $T$ ”;  $k_{TC}$  es un indicador de la productividad de THMs ( $\mu\text{g/L}$  TTHM por  $\text{mg/L}$  de cloro consumido);  $Cl_o$  corresponde a la concentración inicial de cloro ( $\text{mg/L}$ ) y  $C_T$  se refiere a la concentración de cloro en un tiempo  $T$ . Nótese que la resta de estos últimos dos parámetros corresponde al consumo de cloro para un tiempo de reacción dado.

Este tipo de modelos permiten modelar de forma más práctica la distribución espacial de la formación de TTHM en todo el sistema de abastecimiento [4] a través de programas como EPANET y su complemento de Multi-Especies [6]. Basado en la *Ec01*, Clark [26] propuso un modelo de segundo orden [4], [6], [15] (*Ec02*).

$$[TTHM] = k_{TC} \left\{ Cl_o - \left[ \frac{Cl_o(1-k_{AB})}{1-k_{AB}e^{-(1-k_{AB})ut}} \right] \right\} + TTHM_0 \dots\dots\dots(Ec02)$$

Donde  $TTHM_0$  es la concentración inicial de trihalometanos totales,  $k_{AB}$  y  $u$  son parámetros provenientes de la ecuación de decaimiento de cloro. Con respecto al valor de  $k_{TC}$ , Clark & Sivaganesean [26] propusieron una ecuación para su determinación de acuerdo a las características y las condiciones del sitio en estudio, la cual se representa en la *Ec03* [6], [26]. De igual forma, Brown [17] argumenta que el valor de  $k_{TC}$  puede ser aproximado de manera gráfica mediante la pendiente de la línea de mejor ajuste de la correlación entre los TTHM formados y la cantidad de cloro consumido [17].

$$k_{TC} = e^{1,49} \cdot Cl_o^{0,48} \cdot TOC^{0,18} \cdot pH^{0,96} \cdot T_w^{0,28} \dots\dots\dots(Ec03)$$

Donde  $T_w$  es la temperatura del agua.

### Modelos estadísticos

Los modelos estadísticos no se basan en presunciones sino más bien, en tratar de describir los datos experimentales mediante ecuaciones empíricas de mejor ajuste. Básicamente, la mayoría se basan en el modelo multivariable propuesto por Amy et al. [25] (*Ec04*).

$$TTHM = k \cdot (t)^a \cdot (C_o)^b \cdot (TOC)^c \cdot (\theta)^d \cdot (pH)^e \cdot (Br)^f \cdot (UV_{254})^g \dots\dots\dots(Ec04)$$

Donde,  $TTHM$  corresponde a los Trihalometanos Totales ( $\text{mg/L}$ ),  $k$  es la constante de reacción (determinada a partir del estudio de la cinética de formación),  $t$  es el tiempo de reacción(s) que corresponde al tiempo medio de residencia en el caso de las redes de distribución,  $C_o$  es la concentración del cloro al tiempo cero ( $\text{mg/L}$ ),  $\theta$  es la temperatura del agua ( $^{\circ}\text{C}$ ),  $UV_{254}$  es la absorbancia UV a 254 nm ( $\text{m}^{-1}$ ),  $Br$  es la concentración de bromuro ( $\text{mg/L}$ ) y a-g son las constantes de reacción determinadas a partir de las regresiones [25], [27].

Por su parte, Basiouny *et al.* [28] propone la construcción del modelo estadístico en varias etapas. La primera, contempla trabajo de laboratorio en la cual se toman muestras de agua cruda o tratada (previo a la dosificación) y mediante la adición de pequeñas dosis de cloro controladas se hacen determinaciones de THMs y los parámetros de interés. La segunda etapa contempla el desarrollo del modelo matemático a partir de los datos de laboratorio. La tercera etapa comprende un plan de muestreo en varios puntos uniformemente distribuidos a lo largo de la red, con el fin de validar el modelo matemático [28].

Principalmente, se pueden emplear modelos de regresión múltiple lineal con transformaciones logarítmicas tanto para las variables dependientes como las independientes (log-log) o bien, modelos de regresión no lineales [25] los cuales se pueden simplificar identificando las variables más significativas.

Respecto a la cantidad de determinaciones y parámetros que se requieren para la construcción del modelo, la literatura muestra criterios muy variados. Por ejemplo, Rivadeneyra *et al.* [29] realizaron un estudio donde contemplaron 87 parámetros y 892 análisis de laboratorio, no obstante, el modelo finalmente lo desarrollaron con 7 parámetros que demostraron significancia [29]. Por su parte, Basiouny *et al.* [28] desarrolló un modelo con 3 parámetros con los datos de cinco puntos de muestreo en la planta y 6 puntos distribuidos en la red, para un N=27 obteniendo un R<sup>2</sup> de 0,92.

En el cuadro 2 se presenta un resumen de los principales modelos de predicción reportados en la literatura. A pesar de que la mayoría de estos modelos han sido desarrollados en laboratorio, algunos de ellos se basan en mediciones realizadas a lo largo de la red.

### Tiempo de reacción en redes de distribución de agua

El tiempo medio de residencia del agua se puede determinar mediante la aplicación de un trazador y aplicando los conceptos fundamentales de los modelos de flujo en reactores. DiGiano *et al.* [30] proponen que en redes de distribución se utilice el método de adición continua del trazador conocido como pulso negativo en que se determina la desaparición del trazador en un punto de muestreo determinado [30]. Para esa condición destacan dos modelos de análisis de los datos discretos obtenidos del ensayo de trazadores para determinar el tiempo medio de residencia. El primero se basa en determinar el porcentaje de trazador que ha salido del sistema a distintos tiempos (*Ec05*), lo que representa la fracción de agua nueva (una vez que se dejó de inyectar el trazador) que se ha mezclado con el agua que estaba antes de inducir el pulso negativo [30].

$$F_i(t) = \frac{[C]_o - [C]_i}{[C]_o - [C]_{base}} \dots\dots\dots(Ec05)$$

Donde  $C_o$  representa la concentración del trazador en la fuente justo antes de detener su adicción instantánea, es decir, en el tiempo = 0 (pulso negativo),  $C_i$  sería la concentración del trazador en el punto de muestreo en el tiempo  $i$ , y  $C_{base}$  representa la concentración del trazador presente en el agua cuando no se ha hecho ninguna adicción del trazador (por ejemplo, en el caso de usar cloruro de sodio como trazador, existe la posibilidad que el agua tenga el ión cloruro en su composición). En ese sentido, el denominador representa la cantidad de trazador que se adicionó y el numerador la cantidad que ha salido a partir que se detiene la adicción del trazador. Al estar dividiendo, representa un porcentaje como se comentó anteriormente. Al graficar esta expresión, se obtiene una curva que se incrementa de 0 a 1 y el área sobre la curva representa el tiempo medio de residencia (TMR). Con el fin de simplificar el cálculo esta área se determina mediante la *Ec06*:

$$TMR = \int_0^1 t dF(t) \approx \sum_0^n t_i \cdot F_i(t) \dots\dots\dots(Ec06)$$

Lawler [31] propone un método de cálculo en que a partir de la normalización de la concentración del punto de muestreo respecto a la concentración de entrada determina la distribución interna de los tiempos de residencia  $W(t)$ . esta función representa la fracción del trazador que en

tiempo  $t$  no han salido del sistema ( $Ec07$ ), contrario a la función  $F(t)$ . Al graficar esta función, se obtiene una curva que decrece de cero a uno dado que se trata de un pulso negativo [31].

$$W_i(t) = \frac{C_i}{C_0} = \frac{C_i - C_{base}}{C_0 - C_{base}} \dots\dots\dots(Ec07)$$

**Cuadro 2.** Modelos estadísticos de predicción para formación de THMs reportados en la literatura

Id	Modelo de predicción	Referencia
1	$[TTHM] = 0,00082(pH-2,8)(TOC)(D)^{0,25}(t)^{0,36}$	[22]
2	$[TTHM] = -3,91 + (Br^-)^{0,15} + 0,23 \left( \log(Cl_2) + 0,24(pH) + 10^{(0,0097)} + 0,26(NVTOC) \right)$	[1]
3	$[THM] = 0,0031(UV_{254} \cdot [DOC])^{0,44}[Cl_2]_0^{0,409}t^{0,265}T^{1,06}(pH-2,6)^{0,715}([Br] + 1)^{0,0358}$	[25]
4	$[TTHM] = 0,00309[(DOC)(DUV-254)]^{0,440}(Cl_2)^{0,409}t^{0,265}T^{1,06}(pH-2,6)^{0,715}(Br + 1)^{0,036}$	[22]
5	$[THM] = 7,1(UV_{254})^{0,5}[DOC]^{0,004}([Cl_2]-7,6[NH_3])^{0,224}t^{0,23}T^{0,48}(pH-2,6)^{0,72}([Br] + 1)^{2,01}$	[22]
6	$[THM] = 14,6[(UV_{254})^{0,849}[Cl_2]^{0,206}t^{0,306}(pH-3,8)^{1,01}]$	[22]
7	$[TTHM] = 12,7 (TOC)^{0,291}(T)^{0,271}(D)^{-0,072}$	[1]
8	$[TTHM] = 0,00412(DOC)^{0,152}(Br)^{0,068}T^{0,61}pH^{1,6}(t)^{0,260}$	[1]
9	$[TTHM] = 23,9[(TOC)(UVA)]^{0,403}(Cl_2)^{0,225}(Br)^{0,141}1,027T^{-20}1,156(pH-7,5)t^{0,264}$	[22]
10	$[TTHM] = a[OH^-]^j([Cl]_2(1 - e^{-kt})^m)(UV_{254})^n(algae)^p$	[22]
11	$[TTHM] = 1,392(DOC)^{1,092}(pH)^{0,531}(T)^{0,255}$	[1]
12	$[TTHM] = 0,044(DOC)^{1,030}(t)^{0,262}(pH)^{1,149}(D)^{0,277}(T)^{0,968}$	[1]
13	$[TTHM] = Q \cdot t^{0,156}C_0^{0,147}TOC^{0,187} \cdot x^{0,206}(pH-2,6)^{0,260}$	[20]
14	$[TTHM] = 16,9 + 16(TOC) + 3,319(Cl_2)-1,1135(T) + 1,139(t)$	[16]
15	$[TTHM] = 0,0707(TOC + 3,2)^{1,314}(pH-4,0)^{1,496}(C_0-2,5)^{-0,197} ( + 10)^{0,724}$	[17]
16	$[TTHM] = 10^{-1,375}t^{0,258}(C_0/DOC)^{0,194}pH^{1,695}T^{0,507}Br^{0,218}$	[15]
17	$[TTHM] = 2,056 + 1648,2 \cdot UV_{254}$	[15]
18	$[TTHM] = -9,22 + 360,97(UV) + 0,54(T) + 0,12(t)$	[21]
19	$[\sqrt{TTHM}] = -28,8 + 1,6 \cdot TOC + 2,7 \ln(\sigma)-1,3 \ln(Bc) + 2,4pH + 3,7Cl + 0.1 T_w$	[29]
20	$[THM] = 0,02 (pH)^{2,279} (T)^{0,368}(T_w)^{9,499 \times 10^{-2}}$	[28]



A partir de esta función se determina la distribución de tiempos de residencia a la salida  $E(t)$ , derivando la función  $W$  con respecto al tiempo (Ec08).

$$E(t)_i = -\frac{dW(t)}{dt} \approx -\left(\frac{W(t)}{t}\right) = \frac{W_i - W_{i-1}}{t_i - t_{i-1}} \dots\dots\dots(Ec08)$$

Finalmente, se determina el tiempo medio de residencia utilizando la siguiente expresión (ver Ec09):

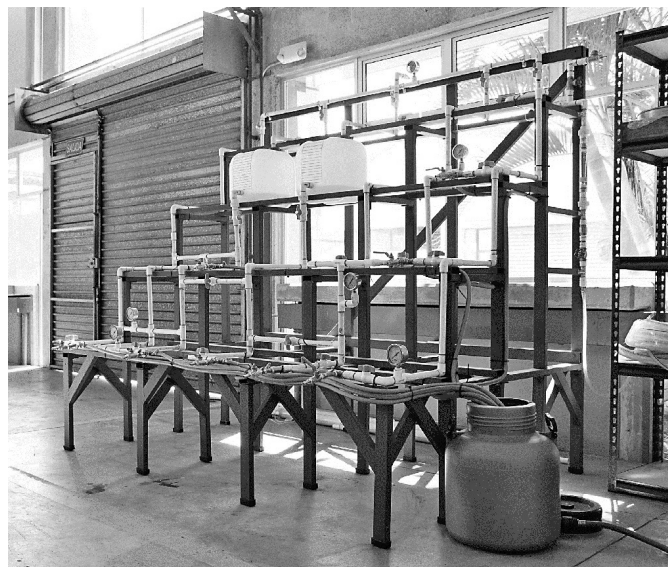
$$TMR = \frac{\sum_{i=0}^n t_{i,prom} \cdot E(t)_{i,prom} \cdot \Delta t_i}{\sum_{i=0}^n E(t)_{i,prom} \cdot \Delta t_i} \dots\dots\dots(Ec09)$$

En donde el sufijo “*prom*” se refiere al promedio entre dos mediciones consecutivas para cada intervalo de tiempo.

### Ejemplo de ensayo de trazadores

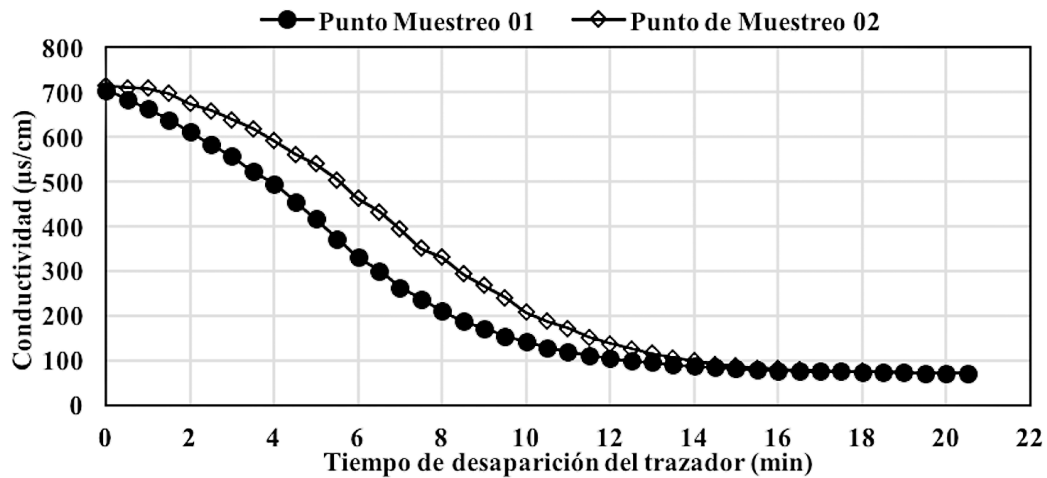
Se realizó un ensayo de trazadores en una red de distribución a escala de laboratorio, compuesta por tuberías de PVC de 12,5 mm de diámetro. La red está compuesta de cuatro líneas principales en la cual, a través de válvulas de control, se simulan configuraciones de tuberías en serie, paralelo, ramificadas y en malla (figura 1). Específicamente, se aplicó una dosificación de cloruro de sodio de manera constante mediante pulso negativo a la entrada del sistema. Para ello, se utilizó una bomba peristáltica multicanal Masterflex L/S de 4 canales. La desaparición del trazador se midió en términos de conductividad eléctrica en dos puntos de control ubicados al final de la red. Se realizaron mediciones cada 30 segundos. Los resultados de la prueba se muestran en la figura 2.

Aplicando el método propuesto por DiGiano et. al. [30], se obtuvo la curva  $F(t)$  utilizando la Ec(5) para luego determinar el tiempo medio de residencia en los puntos de control mediante la Ec(6). La curva  $F$  se muestra a continuación (figura 3):

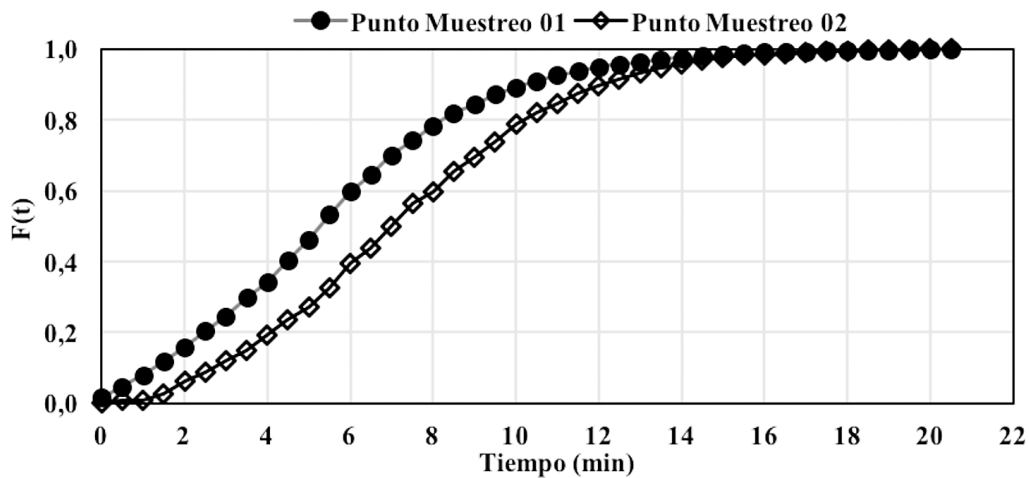


**Figura 1.** Red de distribución a escala de laboratorio para la realización del ensayo de trazadores mediante pulsos negativos.





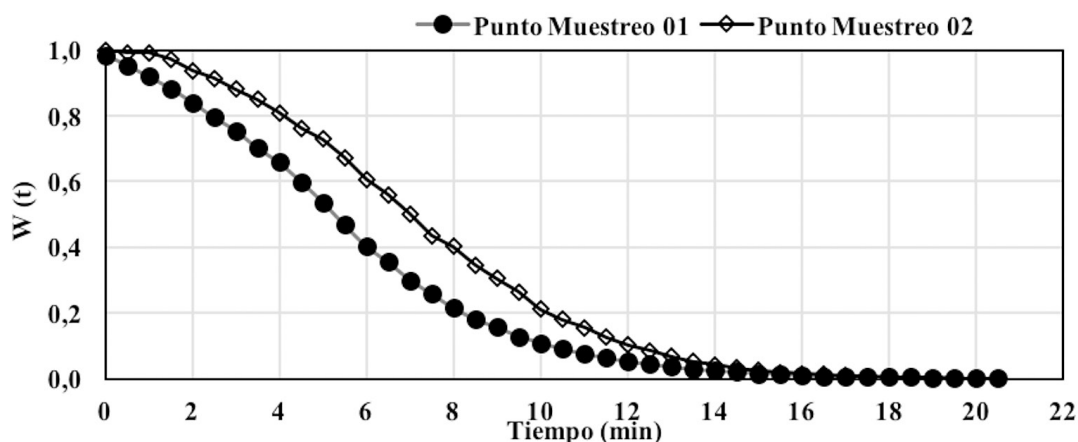
**Figura 2.** Valores de conductividad respecto al tiempo en el ensayo de pulso negativo.



**Figura 3.** Curva F(t) del trazador para los puntos de control de la red a escala piloto.

Aplicando el método descrito por Lawler [31] se obtuvo la curva  $W(t)$  mediante la Ec(7) (figura 4). A partir de estos datos y mediante la Ec(8) y Ec(9) se determinó el tiempo medio de residencia de los puntos de control.

Finalmente, en el cuadro 3, se muestra una comparación de los valores obtenidos del tiempo medio de residencia según los métodos de cálculo acá discutidos. Se puede observar que ambos métodos son precisos y de fácil comprensión. En ese sentido, el ensayo de trazadores no solo permite determinar de manera practica el tiempo medio de residencia, sino que además, la información suministrada por la curva  $F(t)$  y  $W(t)$  relacionada con la distribución de los tiempo de residencia en los puntos de control, provee mayor información respecto a los distintos tiempo de reacción y su probabilidad de ocurrencia en un periodo de análisis dado, facilitando la valoración y la gestión del riesgo asociado con la formación de THMs en las redes de distribución.



**Figura 4.** Curva  $W(t)$  del trazador para los puntos de control de la red a escala piloto.

**Cuadro 3.** Comparación de los tiempos medios de residencia obtenidos mediante el ensayo de trazadores de en la red de distribución a escala piloto.

Id	TMR (min)*		Porcentaje de diferencia (%)
	Método 01 [30]	Método 02 [31]	
Punto Muestreo 1	5,82	5,68	2,40%
Punto Muestreo 2	7,54	7,30	3,31%

## Conclusiones

El desarrollo de modelos de predicción de THMs constituye una herramienta muy valiosa en el marco del desarrollo de las estrategias de control para la mitigación del riesgo de formación de THMs en redes de distribución de agua. Evidentemente, su uso se ve limitado por ser muy específicos del lugar. Comparando la factibilidad y practicidad de uso, se concluye que los modelos estadísticos basados en regresiones multivariables pueden ser potencialmente utilizados en Costa Rica.

Desde el punto de vista de construcción y validación del modelo, indiscutiblemente, el mayor reto radica en determinar el tiempo de reacción que equivale al tiempo medio de residencia. A pesar de existe la posibilidad de emplear la modelación hidráulica con este fin, se evidenció la factibilidad de hacer este tipo de determinaciones de manera más práctica y sencilla mediante la aplicación del ensayo de trazadores, lo cual permite brindar una herramienta de control al operador del servicio de agua desde el punto de vista de la gestión del riesgo de formación de THMs a lo largo de la red de distribución.

## Referencias

- [1] R. Sadiq and M. J. Rodriguez, "Disinfection by-products (DBPs) in drinking water and predictive models for their occurrence: a review.," *Sci. Total Environ.*, vol. 321, no. 1–3, pp. 21–46, Apr. 2004.
- [2] P. C. Singer, *Formation and control of disinfection by-products in drinking water*. Denver, CO: American Water Works Association, 1999.

- [3] S. Barret, S. Krasner, and G. Amy, "Natural Organic Matter and Disinfection By-Products, Copyright, Foreword," en *Natural Organic Matter and Disinfection By-Products*, vol. 761, American Chemical Society, 2000, pp. i-v.
- [4] R. Clark, *Modeling Water Quality in Distribution Systems*, Second Edi. American Water Works Association, 2012.
- [5] G.-S. Wang, Y.-C. Deng, and T.-F. Lin, "Cancer risk assessment from trihalomethanes in drinking water.," *Sci. Total Environ.*, vol. 387, no. 1-3, pp. 86-95, Nov. 2007.
- [6] K. E. Lansey and P. F. Boulous, *Comprehensive Handbook on Water Quality Analysis for Distribution Systems*. Pasadena, California: MWH Soft, 2005.
- [7] P. Roccaro, F. G. A. Vagliasindi, and G. V Korshin, "Relationships between trihalomethanes, haloacetic acids, and haloacetonitriles formed by the chlorination of raw, treated, and fractionated surface waters.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 63, no. 1, pp. 21-30, Feb. 2014.
- [8] R. Fabris, K. Braun, J. Morran, L. Ho, D. Cook, and M. Drikas, "Relating water quality monitoring to disinfection by-product formation in four pilot treatment streams.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 62, no. 6, pp. 377-384, Sep. 2013.
- [9] B. B. Mamba, R. W. Krause, B. Matsebula, and J. Haarhoff, "Monitoring natural organic matter and disinfection by-products at different stages in two South African water treatment plants.," *Water SA*, vol. 35, no. 1, pp. 121-127, Jan. 2009.
- [10] M. Yan, D. Wang, J. Qu, J. Ni, and C. W. K. Chow, "Enhanced coagulation for high alkalinity and micro-polluted water: the third way through coagulant optimization.," *Water Res.*, vol. 42, no. 8-9, pp. 2278-86, Apr. 2008.
- [11] H.-C. Kim and M.-J. Yu, "Characterization of natural organic matter in conventional water treatment processes for selection of treatment processes focused on DBPs control.," *Water Res.*, vol. 39, no. 19, pp. 4779-89, Nov. 2005.
- [12] S. Dharman, V. Chandramouli, and S. Lingireddy, "Predicting Total Organic Carbon Removal Efficiency and Coagulation Dosage Using Artificial Neural Networks.," *Environ. Eng. Sci.*, vol. 29, no. 8, pp. 743-750, Aug. 2012.
- [13] J. Ahn, S. Lee, K. Choi, and J. Koo, "Application of EPANET for the determination of chlorine dose and prediction of THMs in a water distribution system," *Sustain. Environ. Res.*, vol. Vol. 22, no. Issue 1, pp. p31-38, 2012.
- [14] E. C. Wert, J. Bolding, D. J. Rexing, and R. E. Zegers, "Real-time modeling of trihalomethane formation in a full-scale distribution system.," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 61, no. 6, pp. 352-363, Sep. 2012.
- [15] D. Brown, J. Bridgeman, and J. West, "Predicting chlorine decay and THM formation in water supply systems," *Rev. Environ. Sci. Bio/Technology*, vol. 10, no. 1, pp. 79-99, 2011.
- [16] E. Idornigie, M. R. Templeton, C. Maksimovic, and S. Sharifan, "The impact of variable hydraulic operation of water distribution networks on disinfection by-product concentrations.," *Urban Water J.*, vol. 7, no. 5, pp. 301-307, Oct. 2010.
- [17] D. Brown, "The management of trihalomethanes in water supply systems," University of Birmingham, 2009.
- [18] L. D. Sánchez, S. Rodríguez, and P. Torres, "Modelación del cloro residual y subproductos de la desinfección en el sector piloto Nápoles Ciudad Jardín del sistema de distribución de Cali," *Ing. y Compet.*, vol. Vol12, no. Issue1, p. 127-138p, 2010.
- [19] B. Carrico and P. C. Singer, "Impact of Booster Chlorination on Chlorine Decay and THM Production: Simulated Analysis.," *J. Environ. Eng.*, vol. 135, no. 10, pp. 928-935, Oct. 2009.
- [20] B. J. Courtis, J. R. West, and J. Bridgeman, "Chlorine demand-based predictive modeling of THM formation in water distribution networks.," *Urban Water J.*, vol. 6, no. 6, pp. 407-415, Dec. 2009.
- [21] L. Semerjian, J. Dennis, and G. Ayoub, "Modeling the formation of trihalomethanes in drinking waters of Lebanon," *Environ. Monit. Assess.*, vol. 149, no. 1-4, pp. 429-436, 2009.
- [22] G. Korshin, M. Benjamin, and H.-S. Chang, "Modeling DBP Formation Kinetics: Mechanistic and Spectroscopic Approaches," 2004.
- [23] IRIS, "Integrated Risk Information System. Online database.," Washington D.C. US Environmental Protection Agency, 2014.
- [24] A. Grünwald, B. Št'astný, K. Slavičková, and M. Slaviček, "Effect of the Distribution System on Drinking Water Quality," *Acta Polytech.*, vol. 41, no. 3, 2001.
- [25] G. L. Amy, P. A. Chadik, and Z. K. Chowdhury, "Developing Models for Predicting Trihalomethane Formation Potential and Kinetics," *Res. Technol.*, vol. 79, no. 7, pp. 89-97, 1987.

- [26] R. Clark and M. Sivaganesan, "Predicting Chlorine Residuals and Formation of TTHMs in Drinking Water," *J. Environ. Eng.*, vol. 124, no. 12, pp. 1203–1210, Dec. 1998.
- [27] C. Di Cristo, G. Esposito, and A. Leopardi, "Modelling trihalomethanes formation in water supply systems," *Environ. Technol.*, vol. 34, no. 1, pp. 61–70, 2013.
- [28] M. E. Basiouny, T. A. Elmitwalli, and M. R. Ghazy, "Modeling of Trihalometanes in Benha Water Supply Network, Egypt," in *Twelfth International Water Technology Conference, IWTC12 2008*, 2008, pp. 1–13.
- [29] A. Rivadeneyra, M. J. García, F. Delgado, A. González, F. Osorio, and O. Rabaza, "Feasibility Study of a Simple and Low-Cost Device for Monitoring Trihalomethanes Presence in Water Supply Systems Based on Statistical Models," *Water*, vol. 6, pp. 3590–3602, 2014.
- [30] F. A. DiGiano, W. Zhang, and A. Travaglia, "Calculation of the mean residence time in distribution systems from tracer studies and models," *J. Water Supply Res. Technol.*, vol. 54, no. 1, pp. 1–14, 2005.
- [31] D. F. Lawler, "Hydraulic characteristics of water treatment reactors and their effects on treatment efficiency," en *Water Quality and Treatment. A handbook on Drinking Water*, Sixth Edit., J. k. Edzwald, Ed. Denver, Colorado 80235: American Water Works Association, 2011.