

Implementación de un modelo experimental para determinar la concentración de trihalometanos en las redes de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP

Diana Katherine Carrillo Romero

Universidad Industrial de Santander  
Facultad de Ingenierías Físicoquímicas  
Escuela de Ingeniería Química  
Bucaramanga

2010

Implementación de un modelo experimental para determinar la concentración de trihalometanos en las redes de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP

Diana Katherine Carrillo Romero

Trabajo de grado para optar el título de ingeniero químico

Director

Msc. Luis Mariano Idarraga

Universidad industrial de Santander  
Facultad de ingenierías Fisicoquímicas  
Escuela de ingeniería química

Bucaramanga

2010

A DIOS por darme la vida y la mejor familia de todas  
A mis padres por incentivar-me cada día a mejorar como persona  
A mis hermanos que con su cariño alegran la vida  
A Luis Carlos Ardila, por el amor y apoyo incondicional  
A todos los que de una u otra forma aportaron para mi desarrollo personal y  
profesional.  
Y una dedicación especial a mi abuelito Q.E.D.P quien convirtió cada momento  
amargo en una sonrisa, y quien lleno cada espacio de mí con enseñanzas,  
simplemente te amo.

## AGRADECIMIENTOS

- Al ACUEDUCTO METROPOLITANO DE BUCARAMANGA S.A E.S.P, por darme la oportunidad de realizar esta experiencia tan enriquecedora.
- Al el Dr. Carlos Manuel Parra por su apoyo a lo largo de esta experiencia laboral, por sus tan asertivos aportes pero sobre todo por su amistad.
- A todo el personal del laboratorio de calidad: Leito, Uriel, Arge, Teo, Edwin y el jefe, por darme ese ambiente cálido de trabajo y por cada una de sus enseñanzas.
- A Leito Chacón que más que una compañera de trabajo se convirtió en una amiga muy especial, con la cual me llevo los mejores recuerdos de esta etapa de mi vida.
- A Luis Fernando Castañeda por ayudarme amigablemente en el desarrollo de parte de este proyecto, y por todas las carcajadas que provocó.
- A mi director de proyecto Luis Mariano Idarraga, por su colaboración constante y su dedicación al proyecto realizado.
- A la Universidad Industrial de Santander, y en especial a la escuela de ingeniería química, junto con todos sus profesores, por ser los responsables de la educación que se ha obtenido.
- A SE&SE LTDA. Por ayudarme con la parte informática de este proyecto.
- A Hugo Mario Matuk, que con su amistad leal e indestructible, me ha dado los mejores consejos en los momentos de duda.
- A todo el equipo de voleibol de la UIS con quien he compartido mi pasión y con quienes pase momentos muy buenos.

- A las VIP que son mis amigas del alma y con las cuales siempre puedo contar, gracias por apoyarme en las buenas y malas.
- A las niñas de la U, Dianis, Alejis, Andre, La gorda, Conchis, Hefzi, Silvia, por aguantarme en tantas noches de estudio, Uds. también son partícipes de este logro.
- A Julianita, de quien siempre tengo ayuda incondicional y asistencia las 24 horas del día, los 7 días de la semana, hermanita te quiero muchísimo.

**Título:** Implementación de un modelo experimental para determinar la concentración de trihalometanos en las redes de distribución del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga S.A. ESP.\*

**Autor:** Diana Katherine Carrillo Romero\*\*

**Palabras clave:** Trihalometanos (THM), Carbono orgánico total (COT), tiempo de residencia, subproducto de desinfección (DBP), basic++.

La existencia de trihalometanos (THM) se estudia desde que se han encontrado efectos adversos contra la salud, como presencia de cáncer de hígado y tumores en riñón de animales. Estos compuestos químicos no están presentes en el agua cruda, son subproductos de la desinfección para el tratamiento de agua, proceden de la reacción de reactivos oxidantes (cloro), con los compuestos orgánicos e inorgánicos en el agua cruda (materia orgánica).

Este DBP (subproducto de desinfección), está regulado por las legislaciones y reglamentos de cada país, además de otras regulaciones supranacionales como la Organización mundial de la salud; en Colombia está regulados por la resolución **2115 del 22 de junio del 2007**, donde se señalan características y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano, en el cual el valor máximo permitido para trihalometanos es de 0.2 mg/L, valor alto, teniendo en cuenta las recientes determinaciones de organizaciones como la EPA(enviromental protection agency), en donde el valor máximo es de 0.08 mg/L.

Aunque se conocen estudios sobre el potencial de formación de los trihalometanos y la incidencia de las diferentes variables como pH, COT, cloro residual, temperatura y tiempo; el objetivo de este trabajo es estudiar de la formación de trihalometanos, su permanencia en las redes de la ciudad de Bucaramanga y el modelamiento de su formación obteniendo un programa en **basic++**, que proporcionara los valores de THM en las redes, seleccionando como variables más importantes, el tiempo de permanencia en redes y la cantidad de COT.

Este trabajo se realizó con la ayuda y las herramientas proporcionadas por el acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb S.A E.S.P), y servirá para el control periódico de los trihalometanos en las diferentes redes del amb.

---

\* Tesis de Grado

\*\* Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química  
Director: Msc. Luis Mariano Idarraga

Title: Implementation of an experimental modeling to determinate the concentration of Trihalomethane within the distribution network of the Metropolitan Aqueduct of Bucaramanga (amb S.A E.S.P)<sup>\*</sup>

Author: Diana Katherine Carrillo Romero<sup>\*\*</sup>

Key words: Trihalomethane (THM), Total organic carbon (TOC), disinfection byproducts (DBP), residence time, basic++ .

The trihalomethanes (THM) has been studied especially since it has been found that they have adverse effects on health, as well as cancer and tumors on animal's kidneys. These chemical compounds are not present on raw water, they are by-products from the continuously disinfection treatment on the corresponding drinkable water. It origin comes from the reaction between reactive oxidants, with the organic and inorganic compounds present on raw water.

This DBP (disinfectant by-product), is regulated by law of each country, together with international regulations. In Colombia, the DBP is regulated by the Resolution No. 2115 of June 22nd, 2007. Aspects like frequencies of the controlling system and surveillance of the water quality for human consumption can be obtained. According to this law, the maximum percentage allowed of trihalomethanes drinkable water is 0.2 mg/L. This value is highing into account recent indications from organizations such as EPA (Environmental Protection Agency), where the maximum allowed percentage is 0.08 mg/L.

Studies about potential formation of trihalomethanes are known and the incidence of different variables such as pH, TOC, chlorine waste, temperature and time. The objective of this work is the study of trihalomethane formation, the residence time of it in different parts of the drinkable water distribution network in the city of Bucaramanga and the subsequent modeling of THM formation obtaining a program in basic++, that proportionate values of THM within the network. The time of permanency within the network and the quantity of TOC were selected as the most important variables to measure.

This work was carried out with the collaboration and equipments proportionate by the amb S.A E.S.P and it will help for a periodical control of the trihalomethanes in different networks of the amb.

---

<sup>\*</sup> Undergraduate thesis

<sup>\*\*</sup> Faculty of Physical-Chemical Engineering. School of Chemical Engineering  
Supervisor: Msc. Luis Mariano Idarraga

## TABLA DE CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
<b>INTRODUCCION</b>	<b>15</b>
<b>1. MARCO TEÓRICO</b>	<b>17</b>
<b>1.1 Mecanismos<sup>9</sup> y factores que afectan la formación de los subproductos de cloración (CBPs)</b>	<b>17</b>
1.1.1 Mecanismo de formación de CBPs	17
1.1.2 Factores que afectan la formación de CBPs	19
<b>1.2 TRATAMIENTO PARA EL CONTROL CBPs</b>	<b>20</b>
<b>1.3 TOXICOLOGIA DE LOS CBPs</b>	<b>21</b>
<b>1.4 LEGISLACIÓN REFERENTE A SUBPRODUCTOS DE DESINFECCIÓN</b>	<b>22</b>
<b>2. METODOLOGÍA</b>	<b>23</b>
<b>2.1 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ESTADÍSTICAS</b>	<b>23</b>
<b>2.2 REALIZACIÓN DEL POTENCIAL DE FORMACIÓN DE TRIHALOMETANOS (THMs)</b>	<b>25</b>
<b>2.3 PROCESO DE TOMA DE MUESTRAS</b>	<b>26</b>
<b>2.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA RED</b>	<b>26</b>
<b>2.5 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN EL LABORATORIO</b>	<b>27</b>
<b>2.6 DETERMINACIÓN DEL MODELO PARA FORMACIÓN DE THMS</b>	<b>28</b>
<b>2.7 CALIBRACIÓN DEL MODELO</b>	<b>28</b>
<b>2.8 APLICACIÓN DEL MODELO A TODA LA RED AMB</b>	<b>28</b>
<b>2.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS</b>	<b>28</b>
<b>2.10 REALIZACIÓN DEL PROGRAMA A IMPLEMENTAR</b>	<b>29</b>
<b>3. RESULTADOS Y ANALISIS DE RESULTADOS</b>	<b>29</b>

<b>4. CONCLUSIONES</b>	<b>46</b>
<b>5. RECOMENDACIONES</b>	<b>48</b>
<b>6. BIBLIOGRAFÍA</b>	<b>49</b>
<b>7. ANEXOS</b>	<b>52</b>

## LISTA DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1.</b> Coordenadas punto de muestreo.	26
<b>Tabla 2.</b> Procedimientos analíticos para evaluación de parámetros.	27
<b>Tabla 3.</b> Valores de precisión, exactitud y error para los patrones de THMs.	29
<b>Tabla 4.</b> Medición de media y desviación estándar de patrones de THMs.	31
<b>Tabla 5.</b> Tabla de valores t para rechazo de datos.	31
<b>Tabla 6.</b> Re cálculo de valores de t para patrón de 50 ppb.	32
<b>Tabla 7.</b> Valores de r, wl y cl.	32
<b>Tabla 8.</b> Tiempo de residencia en red oriental.	36
<b>Tabla 9.</b> Análisis de absorbancia ultravioleta para determinación de COT.	37
<b>Tabla 10.</b> Comparación datos de THM potencial de formación con thm en redes.	38
<b>Tabla 11.</b> Comparación datos delta THMs en redes con delta THM en potencial	40
<b>Tabla 12.</b> Calibración para THMs vs tiempo.	41
<b>Tabla 13.</b> Calibración para delta THMs vs delta COT.	42
<b>Tabla 14.</b> Ecuaciones para rangos de delta de COT.	43
<b>Tabla 15.</b> Prueba en redes del amb.	43
<b>Tabla 16.</b> Comparación THMs modelo vs THMs epanet.	44

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1.</b> Mecanismo de formacion de CBPs.	18
<b>Figura 2.</b> Diagrama de la metodología.	23
<b>Figura 3.</b> Carta control trihalometanos.	18
<b>Figura 4.</b> Potencial de formación de THMs.	19
<b>Figura 5.</b> Cloro residual vs tiempo, COT vs tiempo, ensayos de potencial de formación.	19
<b>Figura 6.</b> THMs vs tiempo (izq); COT vs tiempo (der).	20
<b>Figura 7.</b> Delta COT vs delta THMs potencial de formación final.	21
<b>Figura 8.</b> THMs vs tiempo (izq), delta THMs vs delta COT; en redes.	23
<b>Figura 9.</b> THMs vs tiempo correlación datos redes con datos potencial.	25
<b>Figura 10.</b> Programa el para calculo de THMs	31

## LISTA DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>Anexo A.</b> Legislación para el control del agua de consumo humano.	52
<b>Anexo B.</b> Cálculos previos para desarrollar el potencial de formación.	54
<b>Anexo C.</b> Tablas de resultados.	56
<b>Anexo D.</b> Determinación de tiempo en la red en EPANET.	65
<b>Anexo E.</b> Trihalometanos en la red por EPANET.	67
<b>Anexo F.</b> Resumen de métodos COT y THMs.	72
<b>Anexo G.</b> Calibración pipetas de laboratorio.	75
<b>Anexo H.</b> Código de programación en lenguaje basic ++.	78

## INTRODUCCION

En los pasados 25 años las diferentes corporaciones que regulan la calidad del agua para consumo han estudiado y modificado los criterios para la protección de la salud pública, haciéndolos más específicos; también se adoptaron nuevos y emergentes tratamientos para el saneamiento del agua. La desinfección del agua es uno de los mayores avances en salud pública del siglo XX. Cien años atrás, las epidemias de tifoidea (producida por la salmonella) y cólera eran comunes en las ciudades; la desinfección fue el factor más importante en la reducción de estas epidemias.

Sin embargo, los desinfectantes pueden reaccionar con otras sustancias naturales que acompañan el agua para formar subproductos, los cuales producen riesgos para la salud. Además, se ha encontrado que patógenos microbiológicos específicos pueden causar enfermedades, ya que son altamente resistentes a las prácticas de desinfección. Por esta razón, se han desarrollado medidas para balancear los riesgos entre los microorganismos patógenos y los subproductos de desinfección, sin que ninguno de los dos proliferen.

Al utilizar el cloro como desinfectante se pueden obtener subproductos de desinfección como trihalometanos (THMs) y los ácidos haloacéticos, siendo los primeros los más estudiados y la parte fundamental de este estudio. Los THMs están compuestos por cloroformo, bromodiclorometano, dibromoclorometano, y bromoformo.

En el caso de las regulaciones en Colombia (con las cuales se rige el amb) se ha reglamentado la cantidad de estos subproductos de desinfección desde 1998 con el Decreto 475, que indicaba un límite máximo permisible para THMs totales de 0.1 mg/L y para cloroformo de 0.03 mg/L. Los demás trihalometanos no se encontraban discriminados. En la actualidad la norma de calidad del agua es el decreto 2115 de 2007, que permite una concentración máxima de 0.2 mg/L de THMs totales y no contempla la cantidad de cloroformo permitida.

En este trabajo se presenta la influencia sobre los THMs de diferentes factores como el pH, la temperatura, el cloro, la materia orgánica y el tiempo; las pruebas realizadas indican que el tiempo y el COT son las variables más importantes. Por este motivo se decidió plantear una ecuación de modelamiento para predecir la cantidad de THMs dependiendo del tiempo de permanencia en la red y de la disminución del COT ante un aumento de los THMs. El modelo es para aplicarlo en forma general, pero se hace la corrección y precisión para las redes de la zona oriental de Bucaramanga, cuyo abastecimiento sólo depende de la planta LA FLORA. Finalmente, se realiza una prueba en las diferentes plantas del amb para conocer si el modelo planteado puede aplicarse a las diferentes redes de la ciudad.

El modelo se plasma finalmente en un programa que tiene un lenguaje de programación en basic++, el cual va a ser de gran importancia para el amb, pues permite tener un control regular de la cantidad de trihalometanos en el agua, y en caso de que estos valores se salgan de la norma, poder establecer acciones correctivas al problema.

## 1. MARCO TEÓRICO

En este capítulo se resaltan algunos aspectos teóricos que se tuvieron en cuenta para la realización del trabajo.

### 1.1 MECANISMOS Y FACTORES QUE AFECTAN LA FORMACIÓN DE LOS CBPs.

Los subproductos de la cloración (CBPs) son todos los compuestos químicos que se generan como consecuencia del tratamiento de desinfección del agua, en especial por la adición de reactivos oxidantes; se producen por la reacción de los reactivos oxidantes con los compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en el agua. Su formación depende de distintos parámetros, como el tipo de desinfectante usado (cloro, ozono, cloraminas, dióxido de cloro), la concentración de materia orgánica en el agua, la presencia de halogenuros (principalmente bromuro), el pH, la dosis de desinfectante, el tiempo de contacto, etc.[1]

Rook (1974) observó que el cloro podía reaccionar con la materia orgánica como los son ácidos húmicos y fúlvicos para formar subproductos de cloración (CBPs) como los trihalometanos (THMs) y los ácidos haloacéticos (HAAs), los cuales son considerados como potenciales cancerígenos.[2]

La presencia de materia orgánica natural en el agua es medida mediante indicadores como carbono orgánico total (COT), carbono orgánico disuelto (COD), absorción ultravioleta ( $UV_{254}$ ), y absorbancia ultravioleta específica (SUVA). Otros indicadores son el color y la turbiedad. Nuevas técnicas como la cromatografía de adsorción, se han empezado a desarrollar, para caracterizar la materia orgánica.

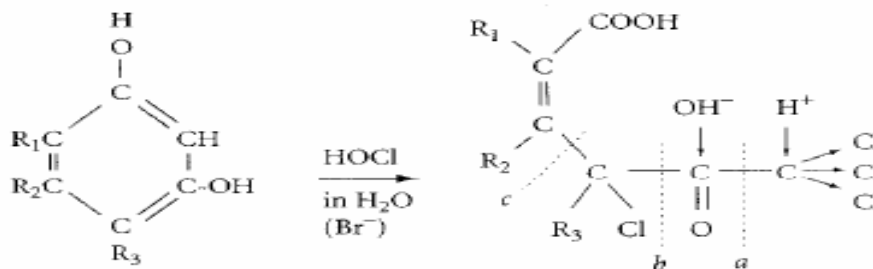
#### 1.1.1 Mecanismo de formación de CBPs

La formación de subproductos de cloración en el agua surge como resultado de la siguiente reacción:  $MON + \text{cloro} \longrightarrow \text{CBPs}$

Donde MON es la materia orgánica natural.

La materia orgánica natural es una mezcla heterogénea de sustancias húmicas, proveniente del arrastre de materia orgánica de los suelos circundantes y de reacciones biológicas, químicas y fotoquímicas que sufren los subproductos orgánicos derivados de la descomposición de plantas y animales en medio acuoso. Una primera clasificación de los CBP sería dividirlos en dos grandes grupos: volátiles (VDBP) y los no volátiles (NVDBP), siendo parte del primer grupo los trihalometanos. El factor más influyente en la abundancia relativa de cada uno de los dos grandes grupos de CBP parece ser el pH de cloración, los VDBP aumentan su formación al aumentar el pH. [4]

Los THMs, se forman según su mecanismo clásico (reacción de haloformo), la cual es catalizada en medio básico. Rook (1997) propuso un mecanismo para la formación de CBPs a partir de las sustancias húmicas, siendo estas estructuras del tipo m-hidroxibencénicas (resorcinol) las más reactivas en la formación de THM.



Fuente: Indiana Garcia, Removal of Organic Matter by Enhanced Coagulation in Nicaragua, Licentiate Thesis Department of Chemical Engineering and Technology, Division of Chemical Engineering..

**Figura 1. Mecanismo de formación de CBPs.**

Las estructuras resultantes sufren diversas rupturas oxidativas que originan los principales CBPs identificados. Los THMs son los originados por la ruptura identificada con la letra a en la figura 1 [3].

### **1.1.2 Factores que afectan la formación de CBP**

La concentración y las especies de CBP dependen de la calidad del agua y de las condiciones de operación. A continuación se describen cada una de las condiciones que influyen en la obtención de CBPs.

#### **a) Materia orgánica.**

Los factores que tienen mayor incidencia son la concentración y las características de la materia orgánica. Primero, un incremento en la concentración de materia orgánica aumenta el nivel de precursores de CBP, y esto aumenta la formación de THMs. Además, un incremento en la concentración de materia orgánica, incrementa la demanda de cloro en el agua. Una alta dosis de cloro va a ser necesaria para mantener un apropiado valor de cloro residual en el sistema de distribución. Esta alta dosis de cloro contribuye a la rápida formación de CBPs [5].

#### **b) Dosis de cloro**

El cloro es uno de los dos reactivos en la formación de subproductos de cloración. Algunos CBPs son productos intermedios en la reacción de cloración y otros son productos finales. Los productos intermedios pueden ser oxidados a productos finales de acuerdo a las ecuaciones desarrolladas por Xie (2004).

$\text{NOM} + \text{HOCl} \rightarrow \text{Productos intermedios}$

$\text{Productos intermedios} + \text{HOCl} \rightarrow \text{Productos finales}$

En general, un incremento en la dosis de cloro o más específicamente el aumento del cloro residual libre, incrementa la formación de productos finales en el agua tratada como los THMs [6].

#### **c) Temperatura**

La temperatura es otro de los factores influyentes en la formación de THM. Krasner (1999) analizó los datos de 35 muestras en Estados Unidos y encontró que la formación de THM fue mayor en verano que en invierno. Las bajas

temperaturas en el invierno sugieren una menor reactividad y una baja velocidad de producción de productos finales como los THM.

En los resultados experimentales se ha observado un aumento continuo del potencial de formación al aumentar la temperatura [7].

#### **d) El tiempo de reacción**

Koch et al. (1991) and Singer (1999) indicaron que la concentración de THMs crece rápidamente durante las primeras horas. Xie (2004) también reportó que los CBPs que son productos finales (THMs y HAAs), aumentan su formación al aumentar el tiempo de reacción. Se ha encontrado la existencia de una cinética de formación de THMs no uniforme, que se puede dividir en dos etapas, siendo la primera mucho más rápido que la segunda. El tiempo de reacción que divide ambas etapas es variable según los casos, dependiendo fundamentalmente de la naturaleza de la materia orgánica precursora y de las condiciones de cloración [5].

#### **e) pH de cloración**

En general, un alto valor de pH tiene como consecuencia un aumento en el nivel de THMs pero un bajo nivel de HAAs. Diferentes autores, como Morris y Baun (1978) y Stevens et al. (1976), han observado que la cloración de la mayoría de los componentes orgánicos da como resultado niveles más altos de cloroformo cuando el pH tiene valores altos y, en general, un aumento en el pH de cloración aumenta el potencial de formación de THMs [5].

### **1.2 TRATAMIENTO PARA EL CONTROL CBPs**

Las dos estrategias posibles para el control de los CBPs son:

#### **a) Eliminación de los precursores:**

Los precursores son eliminados mediante técnicas usuales como la coagulación, adsorción y filtración, así como añadiendo materiales adsorbentes en los suelos de contacto como cal. Los mayores rendimientos en eliminación de materia

orgánica se obtienen con el uso de membranas, pero tiene un costo bastante elevado.

b) Eliminación de los CBPs una vez formados:

CBPs del cloro: las investigaciones se han centrado en la eliminación de los trihalometanos (THM). La USEPA propone dos técnicas para la eliminación: la aireación (air stripping) y la adsorción sobre carbón activado granular. Los inconvenientes que presentan dichas técnicas son que la aireación sólo elimina los DBP volátiles y la adsorción mediante carbón activado (GAC) presenta bajos rendimientos para los THM, especialmente para el cloroformo, además de presentar los filtros una corta vida útil; recientemente se ha desarrollado una técnica PTSA: pressure and thermal swing adsorption, que mejora la efectividad y la vida útil de los filtros de carbón activado. Una alternativa actual a dichos procesos es el uso de la fotólisis catalizada (TiO<sub>2</sub>) y el uso de radiaciones con electrones de alta energía [8].

### **1.3 TOXICOLOGIA DE LOS CBPs**

Aproximadamente, de 765 contaminantes presentes en el agua potable, 20 son reconocidos como carcinogénicos, de 23 se sospecha de su efecto carcinogénico aunque no está evidenciado completamente, 18 son promotores carcinogénicos y 56 son mutagénicos [9].

Investigaciones (Ivancev et al. 1999; Diehl et al. 2000; Graves et al. 2001; Hsu et al. 2001; Cedergren et al. 2002) han encontrado que los subproductos de desinfección tiene un gran efecto en el cáncer, retardo del crecimiento, anomalías en el tracto urinario, abortos espontáneos y defectos cardiacos congénitos. Otros autores (Williams et al. 1982; Kool et al. 1984; Nissinen et al. 2002) han reportado una alta cantidad de mutaciones causadas por agua del grifo, y que este nivel es 19 veces más grande que la mutación causada por agua cruda (Takanashi 2001).

Además observaron que la mutagenicidad incrementaba dramáticamente como resultado de la cloración durante el proceso de purificación del agua [5].

La organización mundial de la salud fija unos valores guía para algunos DBP, en base a un modelo matemático y presentados como la concentración de agua bebida asociada con un exceso de riesgo de cáncer de  $10^{-5}$  (un caso adicional de cáncer por 100.000 personas que ingieren el agua con la concentración guía del subproducto en cuestión de 70 años); por ejemplo, para el cloroformo se establecen un riesgo de cáncer de  $10^{-5}$ ,  $10^{-6}$  y  $10^{-7}$  y los valores de 1,90 µg/L, 0,19 µg/L y 0,019 µg/L respectivamente [10].

Los THM tienen un reconocido efecto carcinogénico especialmente los bromados, con efectos de carcinomas hepatocelulares, tumores en riñón, y adenocarcinomas probados en ratas y ratones [8].

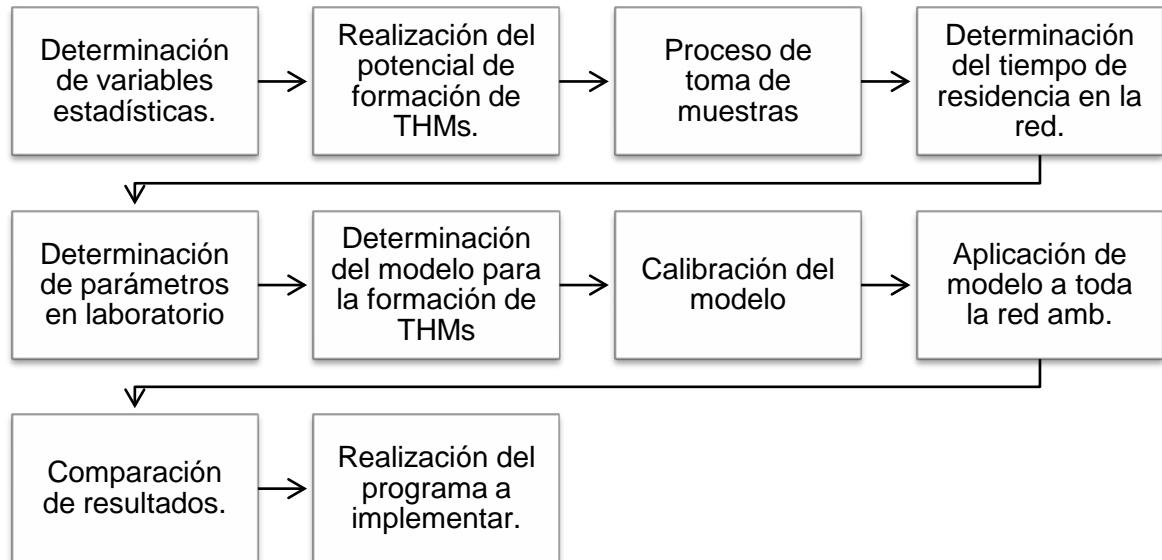
#### **1.4 LEGISLACIÓN REFERENTE A LOS CBPs**

Muchos de los DBP anteriormente citados están regulados por las legislaciones y reglamentos de cada país, además de otras regulaciones (unión europea, organización mundial de la salud). Los trihalometanos (THMs) son los DBP que más han sido objeto de la legislación por diferentes países e instituciones [11], ver anexo A.

En la actualidad la regulación en Colombia para estos se rige por la **resolución 2115 del 22 de junio del 2007**, en la cual solo se toman en cuenta los THMs totales con un valor límite de 200 µg/L.

## 2. METODOLOGIA

Con el fin de desarrollar los principales objetivos de esta investigación, el trabajo fue dividido en las siguientes partes:



Fuente: El autor

Figura 2. Diagrama de la metodología

### 2.1 DETERMINACIÓN DE LAS VARIABLES ESTADÍSTICAS

La determinación de variables estadísticas es muy importante pues permite establecer la validez del modelo.

En este caso se evaluaron parámetros como curva de trabajo, límite de detección, límite de cuantificación, sensibilidad del método, precisión, exactitud y se elaboró la respectiva carta control.

#### **Realización carta control:**

El objetivo es detectar cualquier desviación del procedimiento estándar establecido, de modo que permita generar acciones que puedan corregirlas. Esta

carta es construída con la media y la desviación estándar de un número específico de mediciones del análisis de interés, y se usa cuando se realiza un análisis de duplicado para un estándar o una muestra.

Procedimiento:

1. Se realizan las pruebas para diferentes concentraciones del patrón, en este caso se realizaron pruebas para 20 ppm, 50 ppm, 100 ppm, 150 ppm.
2. Se halla la media ( $\bar{x}$ ) y la desviación estándar ( $s$ ) para cada concentración teniendo seis medidas o datos para cada una de las concentraciones.
3. Con estos datos se hallan los valores críticos  $t$  para rechazo de datos, para descartar los datos dudosos.
4. Teniendo los datos a utilizar se procede a hallar el rango de aceptación de el duplicado ( $R$ ), el límite de advertencia ( $WL$ ) y el límite de control ( $CL$ ).
5. Se realiza la carta control con los datos obtenidos.

Donde  $R = \frac{(\sum R_i)}{n}$  [12] Siendo  $n$  el número de mediciones y  $R_i = F' s$ , para cada una de las concentraciones trabajadas, donde  $F'$  es un factor de multiplicación, 95% de confianza [13].  $WL = R + 2 * s_R$  ;  $S_R$  es la raíz cuadrada de la varianza ( $S_R^2$ ),

$$S_R^2 = \frac{(\sum R_i^2 - n * R^2)}{n-1} . CL = R + 3 * s_R . [12]$$

En caso que se sobrepasen los valores de  $WL$  y  $CL$  hay que tener en cuenta:

(WL): se acepta uno de cada 20 resultados por fuera del límite de advertencia.

(CL): se acepta uno de cada cien resultados por fuera del límite de control.

Si una medición excede un  $WL$  o un  $CL$ , repetir el análisis inmediatamente si se corrige seguir midiendo y si no es así parar el análisis y corregir el problema.

### **Curva de trabajo:**

Para obtener la curva de rango lineal se mide la absorbancia a cada una de las concentraciones medidas y posteriormente se realiza la gráfica del rango lineal.

**Limite de detección:**

El límite de detección se define como la cantidad detectable por encima del ruido de un procedimiento y dentro de un límite declarado de aceptación y se realiza experimentalmente preparando por lo menos 5 patrones de concentración baja cercano al límite de detección reportado en la literatura (10 ppb): se halla la media y la desviación estándar para determinar el coeficiente de variación %CV que debe ser menor al 10% y el error menor al 10% para que esta concentración pueda ser tomada como el límite de detección.

**Limite de cuantificación:**

Se define como la concentración mínima que puede ser detectada con una exactitud y una precisión aceptable.

Con el dato del límite de detección se determina el límite de cuantificación "L.C" mediante la siguiente expresión:  $L.C = 3 * L.DM$ [14]; donde

*L.C: limite de cuantificacion, L.DM: limite de deteccion del metodo*

**Sensibilidad del método:**

Se define como la concentración de un elemento expresado en mg/L requeridos para producir una señal del 1% de absorción.

Con la pendiente obtenida de la curva de trabajo, se determina la sensibilidad del método (S), por la ecuación:  $S = \frac{0.0044}{m}$  [15]

**2.2 REALIZACIÓN DEL POTENCIAL DE FORMACIÓN DE THMS**

El potencial de formación de THMs es un ensayo de cloración simulada, útil para evaluar los precursores de los THMs. En esta cloración se debe asegurar siempre la presencia de cloro residual para que se lleve a cabo la reacción de formación. En el potencial de formación se evalúa principalmente el aumento de los THMs a través del tiempo hasta el casi completo agotamiento de los precursores de formación.

## 2.3 PROCESO DE TOMA DE MUESTRAS

La toma de las muestras se realizó en la red oriental del amb, que es abastecida por la planta La Flora. Las muestras se tomaron en frascos esterilizados de 100 ml y se agregó tiosulfato de sodio al 10% en el momento de la toma de muestra, para inhibir la acción del cloro. Puntos de toma: CAI Morrórico, y barrios Buenos Aires, Álvarez, Pinos, Altos de Cabecera, El prado, Pan de azúcar, Terrazas, Lagos del Cacique, Trinidad, y Reposo.

## 2.4 DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE RESIDENCIA EN LA RED

Para poder conocer el tiempo de residencia del agua en los diferentes puntos de monitoreo en las redes, fue necesario realizar un modelo con la ayuda del programa **EPANET** (del sector que se va a analizar). La ubicación exacta de los puntos en la red se posicionaron con ayuda de un GPS obteniendo las siguientes coordenadas.

Tabla 1. Coordenadas punto de muestreo

Punto	Coordenadas
Buenos aires	N 07°07'54.4" W 073°06'05.3"
Álvarez	N 07°07'35.7" W 073°06'29.7"
Terrazas	N 07°06'31.1" W 073°06'22.8"
Trinidad	N 07°07'35.7" W 073°06'29.7"
CAI Morrórico	N 07°08'02.0" W 073°06'19.0"
Altos de Cabecera	N 07°07'23.1" W 073°06'22.6"
Pan de azúcar	N 07°06'44.7" W 073°06'12.7"
Lagos del cacique	N 07°06'18.2" W 073°06'02.3"
El reposo	N 07°05'33.4" W 073°05'30.9"
Pinos	N 07°08'03.3" W 073°06'35.5"
El prado	N 07°07'10.0" W 073°06'31.1"

Fuente: El autor

Mediante el uso de un trazador (función de EPANET) se esquematizó el recorrido del agua en la red oriental de Bucaramanga, para conocer el tiempo de llegada a los diferentes puntos en los cuales se va a llevar a cabo el monitoreo. Se miró el comportamiento del trazador en cada punto, siendo el tiempo de llegada en momento en el cual el trazador empieza a tener un incremento en el porcentaje.

## 2.5 DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN EL LABORATORIO

Se determinaron diferentes parámetros que según la teoría afectan la formación de THMs, la siguiente tabla resume los procedimientos analíticos llevados a cabo para cada muestra realizada.

Tabla 2. Procedimientos analíticos para evaluación de parámetros

Parámetro	Equipo	técnica	unidades	Resolución 2115/07
pH	pHmetro	potenciométrica	Unidades	6,5-9,0
COLOR	Espectrofotómetro DR5000 HACH	Fotométrica	UPC	Max. 15
TURBIEDAD	Turbidímetro 2100N HACH	Nefelométrica	NTU	Max. 2
COT	Analizador carbono orgánico total TOC-VCPH/CPN	Combustión con infrarrojo dispersivo	mg/L COT	5
THM	Espectrofotómetro TR5000 HACH	Colorimétrico	ppb CHCl <sub>3</sub>	200
TEMPERATURA	Termómetro digital FLUKE	Medición directa	°C	*
COLORO RESIDUAL	Espectrofotómetro TR5000 HACH	DPD-fotométrico	mg/l Cl <sub>2</sub>	0,3-2,0

Fuente: El autor

### Análisis de la absorbancia ultravioleta a 254 nm (UV<sub>254</sub>) para medición de COT

En la medición de COT se realiza el análisis de la técnica de UV<sub>254</sub> para decidir si se usa o no para determinación de COT en el agua.

## **2.6 DETERMINACIÓN DEL MODELO PARA FORMACIÓN DE THMs**

Con los datos obtenidos en la evaluación de parámetros se trazaron varias curvas para observar el comportamiento de las diferentes variables. Como bases para el modelo que se implementó, se tomaron las dos curvas principales: tiempo vs THMs y  $\Delta\text{COT}$  vs  $\Delta\text{THMs}$ . Las ecuaciones se elaboraron con ayuda de la herramienta **EXCEL**, descartando estadísticamente los datos anómalos que se presentaron.

## **2.7 CALIBRACIÓN DEL MODELO**

La calibración del modelo se realizó comparando los resultados obtenidos en la recolección de muestras en la red oriental, con los valores obtenidos en el modelo anterior. Los valores se ajustaron para las dos ecuaciones del modelo. Por último se realizó un muestreo para obtener los errores que se presentan en el modelo y para especificar las restricciones del mismo (intervalo de valores de algunas variables).

## **2.8 APLICACIÓN DEL MODELO A TODA LA RED AMB**

Para verificar si el modelo puede usarse en todas las redes que maneja el amb, se realizó un muestro en diferentes puntos como Kennedy, Pontificia, Tejar y sus respectivas plantas de abastecimiento, Bosconia, Florida, y Morrórico. Se verificó si los resultados corresponden con los hallados en el modelo.

## **2.9 COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Se muestra una comparación de los resultados de THMs formados en la red según el modelo hallado, y según el programa EPANET, con el fin de dar confiabilidad a los resultados calculados.

## 2.10 REALIZACIÓN DEL PROGRAMA A IMPLEMENTAR

El programa para calcular la formación de THMs en la red se desarrolló utilizando Xbasic++. Este programa será de mucha utilidad ya que se podrá establecer un control más periódico de los THMs, además se podrá almacenar un historial de los valores hallados.

## 3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se presentan con el respectivo análisis de los diferentes parámetros establecidos en el trabajo experimental.

### DETERMINACIÓN DE VARIABLES ESTADÍSTICAS

La curva de trabajo utilizada es la que incluye el equipo DR 5000 de Hach, los valores de absorbancia vs concentración que tiene la curva fueron comparados con los medidos experimentalmente obteniendo los valores esperados según la curva de trabajo.

Para cada concentración se halla la precisión (CV=coef. de variación), la exactitud y el error del método, para determinar la confiabilidad de la medida obtenida.

Tabla 3. Valores de Precisión, exactitud y error para los patrones de THMs

Patrón ( $\mu\text{g/L CHCl}_3$ )	Precisión (CV)	Exactitud	Error
20	17,41%	66%	34%
50	11,55%	86%	14%
100	2,42%	70,5%	29,5%
150	4,05%	79,7%	20,3%

Fuente: El autor

Siendo  $CV = \frac{S}{x} * 100$  [15]; S (desviación estándar), x (media).

En la tabla 3. Encontramos los valores de precisión, exactitud y error para las medidas realizadas, se puede decir en general que la técnica cuenta con una precisión buena sin ser la mejor, pues la medida ideal de estos valores es por debajo del 10% , este resultado nos indica el grado de concordancia entre los resultados obtenidos para replicas de una misma muestra; La exactitud del método es aceptable pues se encuentran errores mayores de un 20%, indicando que la aproximación entre el valor obtenido experimentalmente y el valor real no es buena.

En general el resultado obtenido nos indica que en la medición de THMs tiene implícito un error de aprox.  $\pm 13$  ppb, aumentando o disminuyendo este valor dependiendo del rango de medida.

**Limite de detección:**

$$L.DM = 15\mu g/L$$

Patrón 15 ppb			
X	S	CV	ERROR
16,4	1,6	9,8%	9,3%

Se determinó el límite de detección de  $15\mu g/L$  pues fue el valor más bajo que cumplió con la condición de tener un CV por debajo de un 10% y un error menor del 10%, esto muestra la concentración mínima confiable que mide el equipo, en este caso es de 15 ppb.

**Limite de cuantificación:**  $L.C = 3 * L.DM = 45 \mu g/L$

**Sensibilidad del método:**  $S = \frac{0,0044}{m} = \frac{0,0044}{0,004} = 1$

El método tiene una buena sensibilidad, esto quiere decir que es capaz de detectar cualquier cambio de concentración.

## Realización de la carta control

Tabla 4. Medición de media y desviación estándar de patrones de THMs

Ensayo	Patrón CHCl <sub>3</sub>			
	20 ppb	50 ppb	100 ppb	150 ppb
1	33	42	73	116
2	20	35	71	129
3	22	42	72	118
4	29	46	68	122
5	27	64	69	119
6	30	50	70	114
<b>X</b>	26,83	46,16	70,5	119,6
<b>S</b>	5,21	8,41	1,71	4,85

Donde; S: desviación estándar, X: media Fuente: El autor

Se hallan los valores de t para rechazo de datos:

$$t_{alto} = \frac{\text{valor alto} - \text{media}}{\text{desviación estándar}} \quad t_{bajo} = \frac{\text{valor bajo} - \text{media}}{\text{desviación estándar}} \quad [15]$$

Tabla 5. Tabla de valores t para rechazo de datos

	20 ppm	50 ppm	100 ppm	150
1	1,38	0,49	1,46	0,74
2	1,18	1,33	0,29	1,94
3	1,31	0,49	0,88	0,33
4	0,92	0,019	1,46	0,49
5	0,42	2,12	0,88	0,12
6	0,032	0,456	0,29	1,15

Fuente: El autor

El valor crítico para el rechazo de datos en un 95% de confianza para el número de datos n=6 es de 1,82 [16], el único valor que no cumple es el #5 del ensayo para 50 ppm, este dato se retiró y se recalcularon la media y la desviación estándar, con estos nuevos valores se calcularon nuevamente los valores de t.

Tabla 6. Re cálculo de valores de t para patrón de 50 ppb

	Patrón 50ppb	t
1	42	0,20
2	35	1,61
3	42	0,20
4	46	0,60
5	50	1,41
X	43	
S	4,97	

Para este caso el valor crítico del 95% de confianza para un numero de mediciones  $n=5$ , es 1,67. Todos los datos son confiables. Con todos los datos en un rango de confiabilidad del 95%, se procede a hallar el rango aceptación de duplicado, el límite de advertencia y el límite de control.

Tabla 7. Valores de R, WL y CL

R	WL	CL
15,23	27,29	33,32

Se dibuja la carta de control:

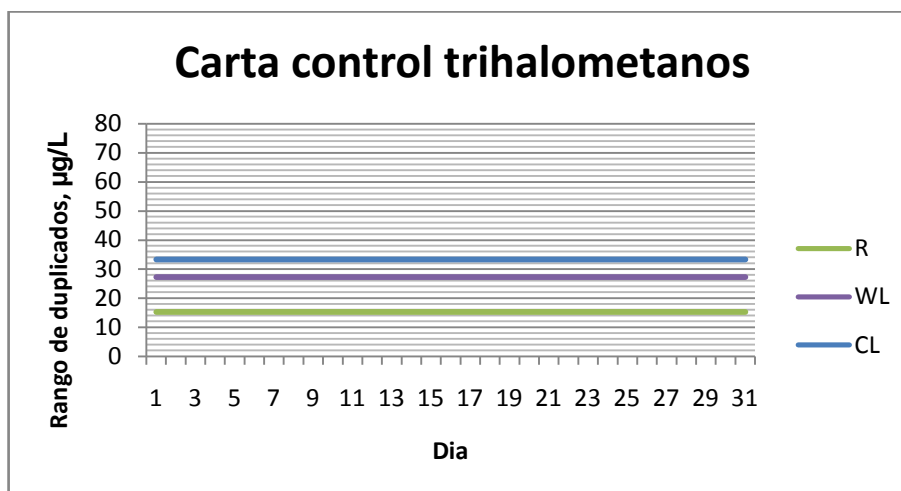


Figura 3. Carta control Trihalometanos Fuente: El autor

Para asegurar la veracidad de las medidas futuras de THMs en aguas se debe leer el patrón en cada ensayo y comprobar que se encuentra dentro de las medidas permitidas.

### REALIZACIÓN DEL POTENCIAL DE FORMACIÓN DE THMS

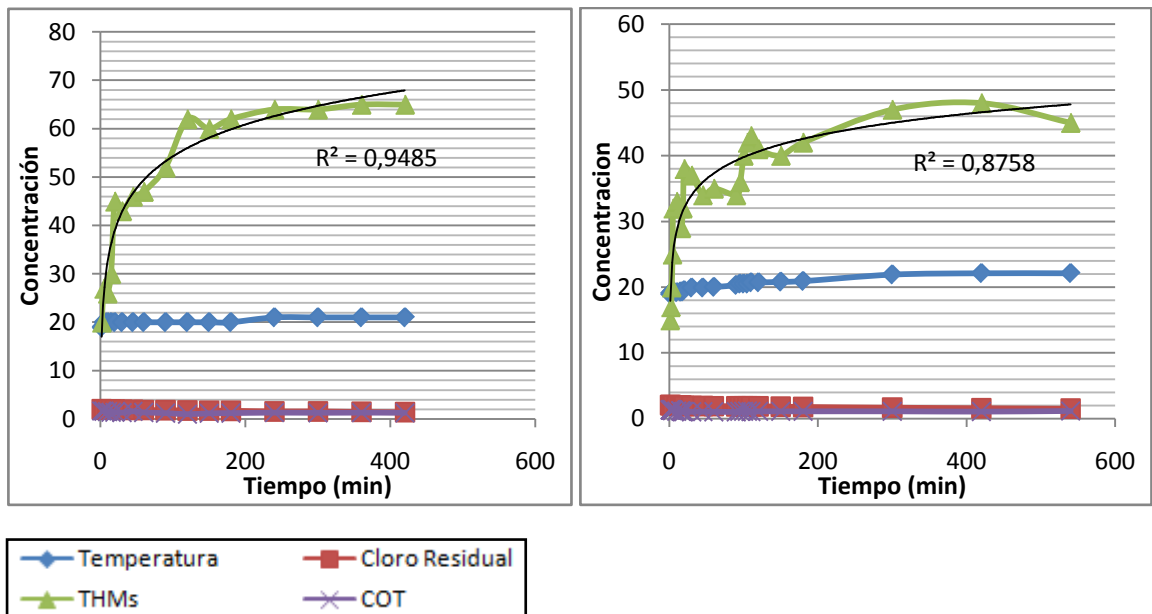


Figura 4. Potencial de Formación de THMs

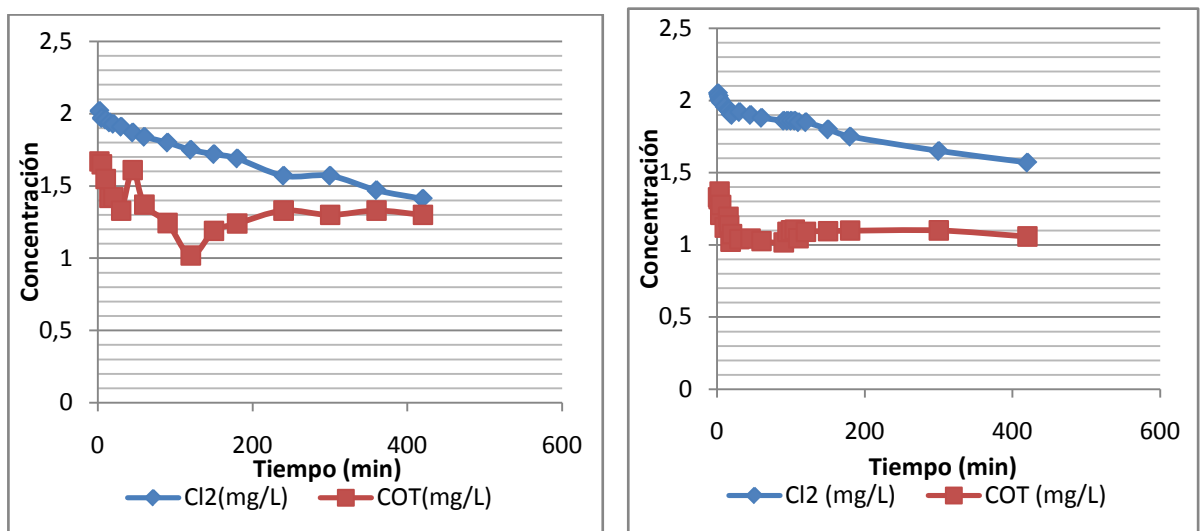


Figura 5. Cloro residual vs Tiempo, COT vs tiempo, ensayos de potencial de formación

En la figura 4 se observa que la ecuación de la izquierda tiene buena correlación para la formación de THM en el tiempo; y se evidencia la reacción principal de formación de trihalometanos. En la figura 5 se observa el consumo de los dos reactivos: cloro residual y COT en el tiempo. En los dos ensayos de potencial de formación la temperatura no tiene variaciones altas, por lo tanto no puede considerarse la influencia en la formación de THMs. También se observa en los ensayos que la máxima formación de THMs se dió en los primeros minutos, dividiendo en dos la cinética de formación. En el primer caso la primera etapa acaba en el tiempo  $t= 240$  min y en el segundo caso en el tiempo  $t=120$ . La diferencia en los tiempos de estancamiento, puede deberse a la cantidad inicial de COT presente en el agua (el segundo caso es menor), la cinética se aproxima a un modelo logarítmico y se puede aseverar que existe una influencia directa del COT en la formación de THMs. En la figura 5 se observa que la correlación entre el COT y el tiempo no es muy buena, es decir que no es conveniente relacionar los datos puntuales y tomar solo el comportamiento de disminución global de COT en el tiempo.

Realizando una correlación entre los resultados de cada ensayo, obtenemos el potencial de formación final así:

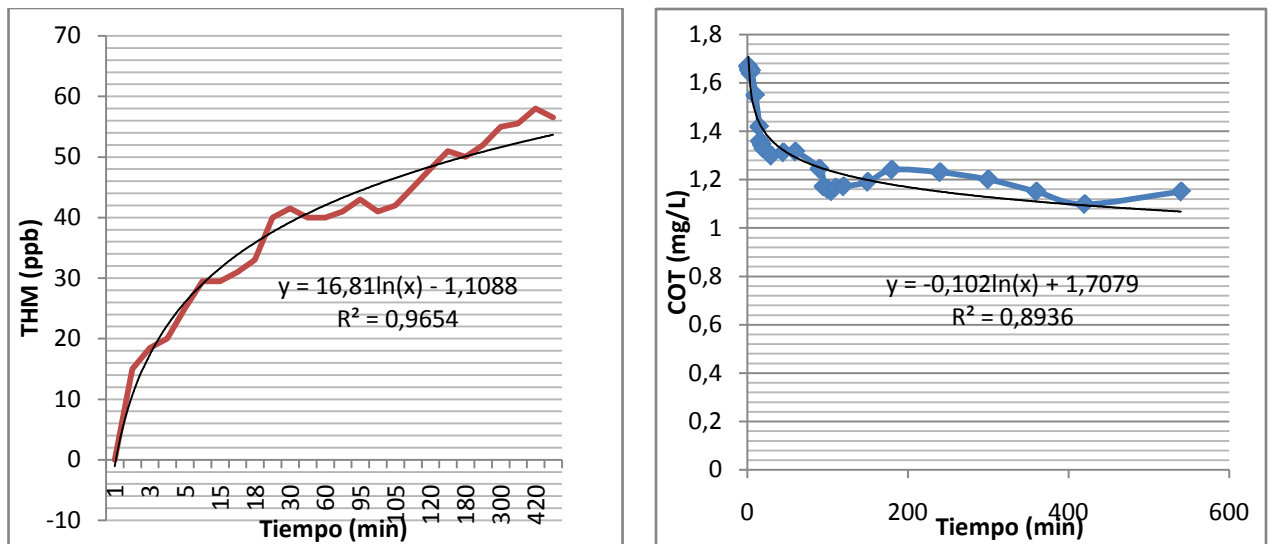
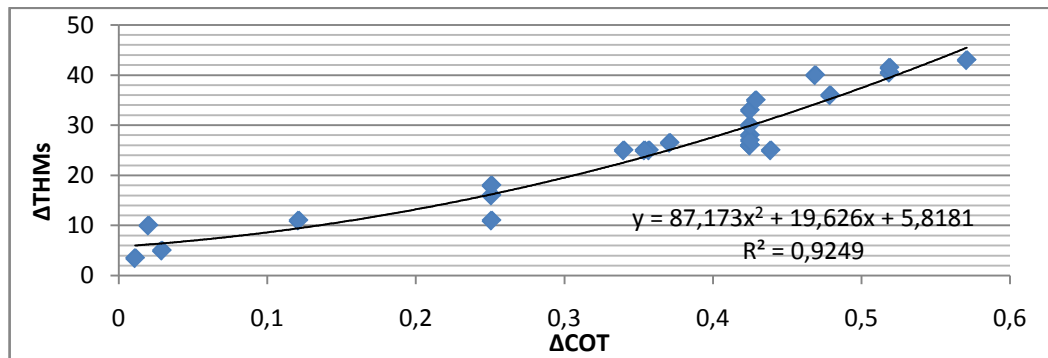


Figura 6. THMs vs tiempo (izq); COT vs tiempo (der).

Relacionando los datos obtenidos en las pruebas de potencial se llega a la ecuación final de THMs vs Tiempo como se refleja en la figura 6. esta ecuación tiene una fuerte correlación y se confirman además las etapas de formación, llegando a un modelo logarítmico con un valor máximo de formación de THMs de 56 ppb.



**Figura 7. delta COT vs delta THM potencial de formación final**

La figura 7 muestra la correlación más importante para el desarrollo del modelo, pues cuantifica mediante una ecuación lo que ocurre en la reacción (para formar THMs se consume COT en el tiempo), como se observó en los ensayos de potencial realizados, la influencia principal para la formación de THMs la presentaron el valor de COT y el tiempo. Al establecer una relación de  $\Delta COT$  vs  $\Delta THM$ , se relaciona implícitamente el tiempo. Además como el valor de COT cambió a través de los días dependiendo de las condiciones del agua cruda, no es posible asociar valores puntuales de COT a valores de THM. Esta ecuación plasma el balance de masa global en el proceso de formación:  $ENTRA (\text{tiempo, COT}) = SALE (\text{THMs}) \text{ ó } REACTIVOS \rightarrow PRODUCTOS$ ; este modelo bastante útil se ajusta a una ecuación polinómica.

## **DETERMINACIÓN DEL TIEMPO DE LLEGADA EN LA RED**

Para cada punto se analizó el recorrido del trazador con el que se está simulando y el tiempo de llegada es el momento en el cual el porcentaje toma un valor. Cabe

resaltar que este trazador tiene en cuenta los tanques y los respectivos tiempos de residencia en estos, para hacer el cálculo con más precisión.

Siguiendo el mismo procedimiento con cada punto los datos obtenidos son:

**Tabla 8. Tiempo de residencia en red oriental.**

Punto	Tiempo (min)
CAI Morrорico	35
Buenos Aires	40
Álvarez	120
Pinos	50
El prado	240
Altos cabecera	210
Pan de azúcar	260
Terrazas	225
Lagos del cacique	165
Trinidad	280
Reposo	300

Fuente: El autor

## **DETERMINACIÓN DE PARÁMETROS EN EL LABORATORIO**

En el anexo C, tabla C1, en donde se muestran los resultados de los parámetros del laboratorio, se puede ver que siempre hay permanencia suficiente del cloro residual en la red, por lo que esta no es la variable a controlar en la formación de THMs. También se puede observar que el pH se mantiene dentro de los valores normales y son cercanos por lo que no se puede dar una dependencia de la formación de THMs y el pH. De igual forma sucede con el color y la turbiedad, parámetros que se encuentran dentro de la norma sin mostrar incidencia sobre la formación de THMs. En resumen, mientras los parámetros de T (°C), pH, color, turbiedad se mantengan en norma, el valor de THMs va a depender directamente del tiempo y el COT.

## Análisis de la absorbancia ultravioleta (UV<sub>245</sub>)

EQUIPO: espectrofotómetro DR5000 HACH

Tabla 9. Análisis de absorbancia ultravioleta para determinación de COT.

MUESTRA	mg/L C (UV <sub>254</sub> )	mg/L COT
Agua destilada	0	0
Cruda flora	1,712	1,700
Tratada flora	32,5	1,630
Agua destilada clorada	29,8	0
Agua destilada clorada inhibida con tiosulfato.	15,6	0

Fuente: El autor

La tabla 9 muestra el porqué no es conveniente medir el COT con la técnica de UV<sub>254</sub>, pues en esa longitud de onda el equipo absorbe el cloro e incluso el tiosulfato, por lo que no garantiza la medida del carbono por separado. Este resultado contradice lo revisado en la literatura, donde en la mayoría de los casos el COT se mide por esta técnica.

## RESULTADOS DE PRUEBAS

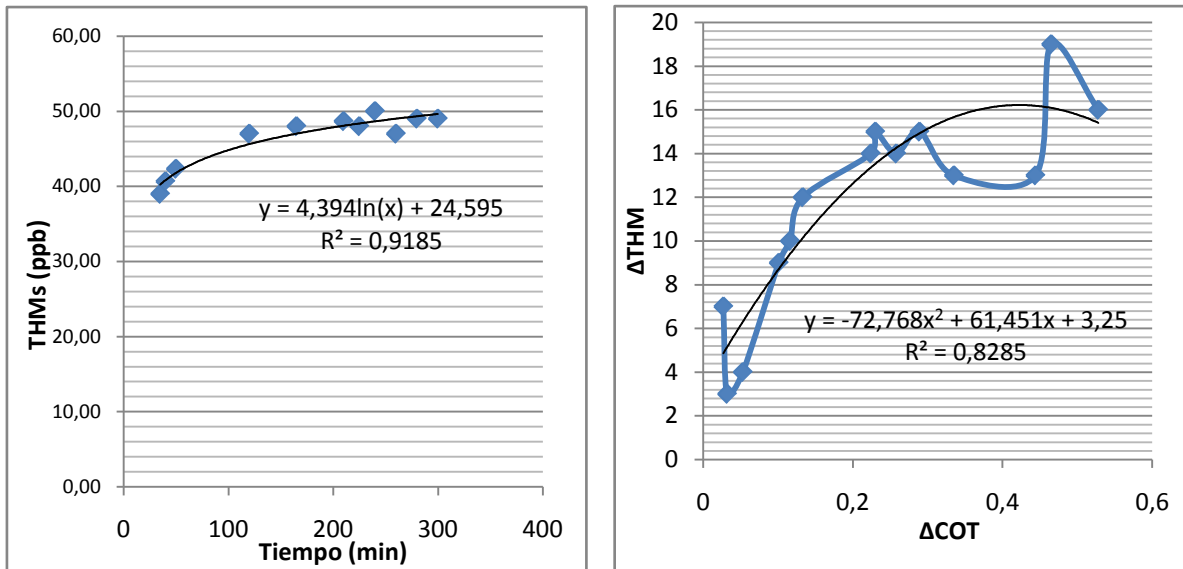


Figura 8. THM vs Tiempo (izq), delta THM vs delta COT(der); en redes.

Tabla 10. Comparación datos de THM potencial de formación con THM en redes.

punto	ENSAYOS				media	THMt*	A	%CV	%error
	1	2	3	4					
Cai Morro	40	39	39	38	39	37,07	-1,93	1,48	5,21
B. aires	38	44	40	*	40,67	38,13	-2,54	7,51	6,66
Álvarez	54	46	43	45	47	46,83	-0,17	10,28	0,36
pinos	42	43	42	*	42,33	39,9	-2,44	1,23	6,11
altos Cab	54	52	40	*	48,67	51,27	2,6	15,56	5,07
prado	50	51	55	*	52	52,32	0,32	5,09	0,62
P. azúcar	46	45	46	51	47	52,96	5,96	5,76	11,25
terrazas	47	50	50	*	49	51,81	2,81	3,53	5,43
L.cacique	45	50	50	47	48	49,36	1,36	5,10	2,75
reposo	50	47	47	52	49	54,09	5,09	5,00	9,41
trinidad	49	45	51	50	48,75	53,55	4,8	5,39	8,96
Fuente: El autor								5,99	5,62

\*THMt= trihalometanos teóricos, por el potencial de formación.

A= THMt – THMexp; donde THMexp= trihalometanos experimentales, por la medición en redes.

%error= (THMt – THMexp)\*100/THMt.

En la tabla 10 se puede ver que los valores obtenidos en redes tienen una buena exactitud y precisión con el modelo hallado en el potencial de formación, siendo el máximo error de aproximadamente 11% y el máximo %CV de 15, lo que refleja que la conducta de los THMs en las redes no difiere mucho. De esto se puede decir que la tubería no afecta gravemente la formación de THMs, al contrario de lo que reporta la literatura. Según esta “la tubería contiene una capa llamada biopelícula la cual contiene materia orgánica que aumenta la producción de THMs en la red”. En el caso del amb, se encuentran principalmente incrustaciones inorgánicas, que no son precursoras de formación de THMs.

La Figura 8 evidencia el comportamiento de la cinética de formación de THMs previamente citado, en este caso los valores máximos de THMs son de 50 ppb. En la red, la correlación entre  $\Delta$ THMs vs  $\Delta$ COT es menor que la hallada en el potencial de formación. Esta diferencia puede deberse a los posibles factores ambientales por los cuales atraviese la muestra antes de ser medido en el laboratorio, aunque muestra la misma tendencia.

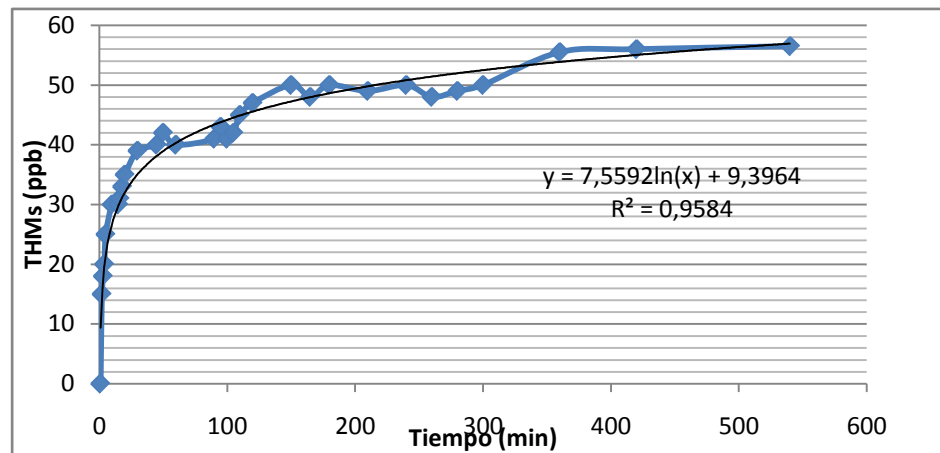


Figura 9. THMs vs Tiempo Correlación datos redes con datos potencial

Se correlacionan los datos obtenidos experimentalmente con los que se tienen del potencial de formación para obtener la ecuación del modelo.

**Ecuación del modelo:  $THM = 7,5592 \ln(t) + 0,9584$**

En la figura 9 se muestra el resultado de introducir todos los datos obtenidos en la red al modelo de potencial, con el fin de obtener la ecuación final que relaciona la formación de THMs a través del tiempo en la red.

Tabla 11. Comparación datos de delta THM en redes con delta THM en potencial

$\Delta$ COT [mg/L COT]	$\Delta$ THMexp [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	$\Delta$ THMt [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	B	%error
0,46	19	32	13	40,62
0,44	13	30	17	56,67
0,33	13	21	8	38,09
0,29	15	18	3	16,67
0,26	14	17	3	17,65
0,23	15	15	0	0,00
0,2	14	14	0	0,00
0,13	12	10	2	20,00
0,12	10	9	1	11,11
0,10	9	8,6	0,4	4,65
0,05	4	7	3	42,86
0,03	3	6	3	50,00

Fuente: El autor

$\Delta$ THMt= delta de trihalometanos teóricos, por el potencial de formación.

$B = \Delta$  THMt –  $\Delta$  THMexp; donde  $\Delta$  THMexp= trihalometanos experimentales por medición en redes.

$\%error = (\Delta$ THMt –  $\Delta$ THMexp)\*100/ $\Delta$ THMt.

**Ecuación del modelo:**  $\Delta$ THM = 81,173 \* ( $\Delta$ COT)<sup>2</sup> + 19,626 \* ( $\Delta$ COT) + 5,8181

En la tabla 11 se puede notar que el porcentaje de error del  $\Delta$ THMt aumenta a medida que aumenta la diferencia de COT, es decir que este modelo es aplicable para  $\Delta$ COT menores de 0,4 pues por arriba de este valor el resultado no es confiable ya que muestra un error considerable.

## RESULTADOS DE PRUEBA PARA CALIBRAR MODELO

Tabla 12. Calibración para THM vs Tiempo

Tiempo [min]	THMc [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	THMm [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	C	%error
30	34	35,11	1,11	3,15
35	65	36,27	-28,73	79,20
40	38	37,28	-0,72	1,93
50	42	38,97	-3,03	7,78
120	46	45,59	-0,41	0,90
165	48	47,99	-0,01	0,014
210	47	49,82	2,82	5,65
225	48	50,34	2,34	4,64
240	48	50,83	2,83	5,56
260	49	51,43	2,43	4,73
280	50	51,99	1,99	3,83
300	51	52,51	1,51	2,88

Fuente: El autor

$C = THMm - THMc$ ; donde THMm= Trihalometanos de modelo,  
 THMc=Trihalometanos calibración.  $\%error = (THMm - THMc) * 100 / THMm$

En la tabla 12 se da un dato particular bastante importante, el valor de los trihalometanos en el punto CAI morrorico el cual es de 65 ppb, esto puede relacionarse a los altos valores de turbiedad y color, los cuales están por encima del rango permitido, este valor alto de turbiedad y color no está directamente relacionado con el aumento en el valor del COT y por lo tanto en el aumento que se presentó en el valor de THMs , en este caso pudo deberse a la interferencia que causan la turbiedad y el color para la medición del equipo, ya que estos son una interferencia positiva en las determinaciones colorimétricas. Exceptuando este dato, se percibe que el valor del error es bastante bajo, lo que se traduce en una

excelente confiabilidad en el modelo para predecir trihalometanos si se cuenta con el tiempo de llegada al punto de medición

Tabla 13. Calibración para delta THM vs delta COT

$\Delta$ COT [mg/L COT]	$\Delta$ THMc [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	$\Delta$ THMm [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	$\Delta$ THMr [mg/L CHCl <sub>3</sub> ]	D	E	F	G
0,10	6	8,62	8,87	2,62	30,36	2,87	32,36
0,11	10	9,15	9,51	-0,85	9,30	-0,49	5,10
0,24	15	15,31	13,95	0,31	1,99	-1,05	7,53
0,30	17	19,48	15,37	2,48	12,73	-1,63	10,62
0,30	16	19,77	15,44	3,77	19,06	-0,56	3,63
0,39	15	26,73	16,40	11,73	43,89	1,40	8,52
0,36	14	23,93	16,16	9,93	41,51	2,16	13,39
0,29	17	18,63	15,14	1,63	8,75	-1,86	12,27
0,31	19	20,35	15,57	1,35	6,65	-3,43	22,01
0,44	20	30,85	16,46	10,85	35,17	-3,54	21,49

Fuente: El autor

$$D = \Delta\text{THMm} - \Delta\text{THMc}$$

$$E = \% \text{Error} = \frac{\Delta\text{THMm} - \Delta\text{THMc}}{\Delta\text{THMm}} * 100$$

$$F = \Delta\text{THMr} - \Delta\text{THMc}$$

$$G = \% \text{Error} = \frac{\Delta\text{THMr} - \Delta\text{THMc}}{\Delta\text{THMr}} * 100$$

Donde;  $\Delta$ THMc= delta de trihalometanos calibrado,  $\Delta$ THMm=delta de trihalometanos modelo,  $\Delta$ THMr= delta de trihalometanos en redes.

De la tabla 13 se puede concluir que para valores de  $\Delta$ COT por debajo de 0,10 ninguna de las dos ecuaciones con las que se puede modelar (modelo o redes) es confiable pues el error se encuentra por encima del 30%; para valores de  $\Delta$ COT entre 0,1 y 0,35 la ecuación que mejor modela el comportamiento es la de el

modelo y para valores de  $\Delta\text{COT}$  por encima de 0,35 la ecuación en la que obtuvo menor error es la de redes.

En resumen:

Tabla 14. Ecuaciones para rangos de delta de COT

$\Delta\text{COT}$	Ecuación	% error
$\leq 0,10$	Ninguna modela	$\geq 30$
$0,10 < \Delta\text{COT} < 0,35$	$\Delta\text{THM}_m = 81,173 * (\Delta\text{COT})^2 + 19,626 * (\Delta\text{COT}) + 5,8181$	Max 11
$\geq 0,35$	$\Delta\text{THM}_r = -72,768 * (\Delta\text{COT})^2 + 61,451 * (\Delta\text{COT}) + 3,25$	Max 15
<b><math>\text{THM} = \Delta\text{THM} + \text{THM en planta}</math></b>		

Fuente: El autor

## APLICACIÓN DE MODELO A LA RED AMB

Tabla 15. Prueba en redes del amb.

Punto	COT	$\Delta\text{COT}$	THM	THM <sub>m</sub>	THM <sub>r</sub>	%error
planta florida	1,933	*	20	*	*	
pontificia	1,596	0,337	44	<b>42,3</b>	35,7	4,02
planta Bosconia	2,365	*	35	*	*	
Kennedy	1,969	0,396	58	65,3	<b>56,2</b>	3,20
planta Morrórico	1,978	*	28	*	*	
el tejear	1,666	0,312	45	<b>46,4</b>	43,3	3,02

Fuente: El autor

Donde; THM= trihalometanos medidos, THM<sub>m</sub>= trihalometanos por modelo, THM<sub>r</sub>= trihalometanos por redes.

En la tabla 15 se observa que el modelo es aplicable a las diferentes redes del amb, con errores bajos en la medición, además se ratifica los rangos de utilización de las ecuaciones del modelo o de redes para los diferentes valores de  $\Delta\text{COT}$ .

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS

### THM modelo vs. THM EPANET

En la siguiente tabla se resumen los resultados para todos los puntos y la comparación con el modelo hallado experimentalmente.

Tabla 16. Comparación THM modelo vs THM epanet.

Punto	THM modelo	THM EPANET	% error
CAI morro	36,27	30,1	20,50
Buenos aires	37,28	30,51	22,19
Pinos	38,97	38,7	0,70
Álvarez	45,59	45,38	0,46
Lagos cacique	47,99	51,23	6,32
Altos Cabecera	49,82	54,8	9,09
Terrazas	50,34	55,4	9,13
El prado	50,83	56,4	9,88
Pan de Azúcar	51,43	57,01	9,79
Trinidad	51,99	56,9	8,63
Reposo	52,51	58,2	9,78

Fuente: El autor

En la tabla 16 Se puede ver que el error no es alto, se puede decir que los resultados del modelo son confiables. El modelo EPANET se puede usar también para el cálculo de THMs en la red pero es más tedioso, pues se tiene que hacer el proceso de realización del mapa, ubicación de coordenadas y saber los valores de cinética resultantes del potencial de formación. Además, se tienen que conocer valores en las tuberías como el coeficiente de rozamiento y el de rugosidad. Por esta razón el modelo hallado es bastante útil y práctico para hallar los valores de THMs.

## REALIZACIÓN DEL PROGRAMA A IMPLEMENTAR

En la figura 10 se ve la plataforma del programa, que resume todo lo que se hizo en el proyecto. Tiene dos métodos de cálculo dependiendo de las variables con las que cuente el usuario. Además, cuenta con una pantalla en donde se puede visualizar los resultados que se obtienen en la sesión. Estos resultados pueden ser guardados en un historial para su posterior uso. Este programa va a permitir la continua evaluación de los THMs en la redes del amb y, de esta manera, tener un control de calidad de este subproducto de desinfección, comparándolo con la resolución que debe cumplir.

Trihalometanos en la Red del amb SA ESP

Mediante esta herramienta se consigue calcular la formación de Trihalometanos que se forman en las Redes del Acueducto Metropolitano de Bucaramanga

Datos para cálculo

Fecha: 04/10/2010

Planta de Tratamiento: LA FLORA

Punto Destino de Muestreo: CAI MORRORRICO

pH: 7

Temperatura (°C): 20

Color (UPC): 1

Turbiedad (NTU): 1

Cloro Residual (mg/L Cl<sub>2</sub>): 1

COT (mg/L COT): 1

Método de cálculo:

Trihalometanos en función del tiempo THM(t)

Trihalometanos en función de COT

En la Planta: 2

En el Destino: 1

Calcular THM's

Calcular / Guardar

Resultados en esta Sesión:

FECHA: 04/10/2010

Planta de Tratamiento: LA FLORA

Punto Destino de Muestreo: CAI MORRORRICO

Datos del Muestreo:

pH: 7

Temperatura (°C): 20

Color(UPC): 1

Turbiedad (NTU): 1

Cloro Residual (mg/L Cl<sub>2</sub>): 1

COT (mg/L COT): 1

NOTA: Los valores están dentro de los rangos permitidos.

Datos del Cálculo:

COT en la planta : 2

Valor calculado de THM: 24.93300

Porcentaje de Error: máximo del 15%

Método de Cálculo: Trihalometanos en función de COT

FECHA: 04/10/2010

Planta de Tratamiento: LA FLORA

Punto Destino de Muestreo: CAI MORRORRICO

Datos del Muestreo:

pH: 7

Temperatura (°C): 20

Color(UPC): 1

Turbiedad (NTU): 1

Cloro Residual (mg/L Cl<sub>2</sub>): 1

COT (mg/L COT): 1

Fuente: El autor

Figura 10. Programa para cálculo de THMs

#### 4. CONCLUSIONES

- Se cumplió el objetivo principal, realizando un modelo que permitiera calcular la formación de trihalometanos en las redes manejadas por el amb.
- El método para la medición de THMs cuenta con valores máximos de precisión o coeficiente de variación de 15%, con valores mínimos de exactitud de 70%, y con una variación en la medición de muestras de  $\pm 12$  ppb; lo cual da una confiabilidad importante en los resultados que se obtienen mediante el método colorimétrico que es el usado para las pruebas desarrolladas en el proyecto.
- El método UV 254 no puede ser utilizado para la medición de COT en aguas cloradas, pues el cloro y el tiosulfato de sodio (inhibidor del cloro) causan una interferencia positiva en la medida.
- Las variables influyentes en la formación de THMs en este caso son el tiempo de permanencia en la red y la cantidad de materia orgánica presente. El cloro no tiene incidencia importante, ya que se asegura siempre la presencia de cloro residual en la red y sus valores no tienen variaciones relevantes.
- La cinética de formación de los trihalometanos se divide en dos etapas, en la primera que es la más rápida, se producen la mayor cantidad de THMs, y en la segunda que corresponde a un periodo de estancamiento, el valor de los THMs permanece constante. El tiempo de cada etapa depende de la concentración inicial de la materia orgánica presente en el agua. Sin embargo, las constantes de formación son similares, lo que establece que la velocidad de formación no depende de la concentración inicial materia orgánica en el agua.

- El estudio permitió encontrar dos formas para calcular la formación de THMs, la primera mediante la ecuación de THMs vs Tiempo, con una exactitud del 94%, y la segunda por la relación entre  $\Delta$ THMs vs  $\Delta$ COT con una exactitud del 88%. Esta última permite determinar la formación de trihalometanos dependiendo de la diferencia en el valor de COT entre la planta de origen y el punto de toma de muestra.
- El modelo puede ser usado en todas las redes del amb, pues los valores obtenidos con el modelo para las redes de distribución se correlacionan satisfactoriamente con los hallados experimentalmente, obteniendo una confiabilidad o exactitud del 95%.
- El programa EPANET permitió determinar los tiempos de residencia de el agua en la red oriental del amb. Además, permitió hacer una comparación de los valores de THMs que predice EPANET y el calculado por el modelo obteniéndose una exactitud del 85%.
- Las incrustaciones que se encuentran en las tuberías que transportan el agua en las redes del amb, no tienen incidencia directa en la formación de trihalometanos, pues los valores obtenidos en el ensayo de potencial siguen el mismo comportamiento que los valores medidos en las redes.
- Con la ayuda del lenguaje basic++ se logró recopilar la información obtenida experimentalmente con el fin de desarrollar un programa que permitiera calcular de forma práctica, rápida y segura la concentración de los THMs en el agua de las redes del amb.

## 5. RECOMENDACIONES

- Se recomienda establecer un valor interno de por lo menos 70 ppb para la cantidad de THMs permitido en el agua del amb, pues los valores establecidos en la resolución 2115/07 son muy permisivos y altos con respecto a los valores permitidos en otras partes del mundo, los cuales se han venido disminuyendo por el resultado de estudios que muestran la incidencia de estos compuestos en la salud humana, y su relación con el cáncer.
- Se recomienda establecer procedimientos para el control de los subproductos de desinfección, como la adición de carbón orgánico en el agua a tratar en el momento en que los valores de COT en el agua cruda aumenten.
- Se recomienda hacer una medición mensual de los valores de THMs en las plantas, para verificar los valores iniciales a incluir en la ecuación de  $\Delta COT$  vs  $\Delta THM$  para obtener los THM finales.
- Se recomienda realizar un estudio de la influencia directa de las variables temperatura, pH, color, turbiedad en la formación de THMs para ampliar el modelo, así como sobre la influencia directa de la influencia del coef. de rozamiento y el de rugosidad en las tuberías en la reacción de formación de THMs
- Cuando las condiciones ambientales cambien y los valores de COT varíen considerablemente, se recomienda usar la ecuación de  $\Delta COT$  vs  $\Delta THM$ , la cual no exige que los valores de COT se encuentren dentro de rangos establecidos.
- Cuando la muestra a analizar pasa por un filtro de carbón activado no se debe utilizar el modelo, pues el filtro retiene cierta cantidad no cuantificada de trihalometanos.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

[1] H.C. Hong a, Y. Liang a, B.P. Han b, A. Mazumder c, Modeling of trihalomethane (THM) formation via chlorination of the water from Dongjiang River (source water for Hong Kong's drinking water); en: Science of the Total Environment 385 (2007) 48–54.

[2] A. NIKOLAOU,G. ARHONDITSIS, V. KOLOVOYIANNIS,S. GOLFINOPOULOS,T.D. LEKKAS determination, interpretation and modeling of chlorination by-products concentrations in surface waters, en: Global Nest: the Int. J. Vol 5, No 3, pp 157-164, 2003.

[3] Garcia, I and Moreno, L. Presence of Trihalomethanes in Four Drinking Water Plants in Nicaragua. Accepted for publication with modifications in Journal of Water Supply: Research and Technology-AQUA, September, 2005.

[4] Francisco Javier Rodríguez Vidal, caracterización de la materia orgánica. En: Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización, Edición Diaz de Santos, 2003; págs. 93-97.

[5] Indiana Garcia, Removal of Organic Matter by Enhanced Coagulation in Nicaragua, Licentiate Thesis Department of Chemical Engineering and Technology, Division of Chemical Engineering, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden.

[6] Shakhawat Chowdhury, Pascale Champagne, P. James McLellan. Models for predicting disinfection byproduct (DBP) formation in drinking waters: A chronological review, Department of Civil Engineering, Queen's University,

Kingston, ON, Canada K7L3N6, Department of Chemical Engineering, Queen's University, Kingston, en: Science of the Total Environment 407 (2009) 4189–4206.

[7] Francisco Javier Rodríguez Vidal, En: Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización. Edición Diaz de Santos, 2003; págs. 101,105.

[8] Oxenford, J. Disinfection by-products: current practices and future directions. Disinfection by-products in water treatment: the chemistry of their formation and control. Editado por Minear, R.1996.

[9] Francisco Javier Rodríguez Vidal. Formación de subproductos de la desinfección con cloro. En: Procesos de potabilización del agua e influencia del tratamiento de ozonización, Edición Diaz de Santos, 2003; págs. 95-97.

[10] PANYAKAPO Mallika, SOONTORNCHAI Sarisak. Cancer risk assessment from exposure to trihalomethanes in tap water and swimming pool water, Department of Environmental Science, Faculty of Science, Silpakorn University, School of Health Science, Sukhothai Thammathirat. En: Journal of Environmental Sciences 20(2008) 372–378.

[11] Organización Panamericana de la salud, publicado en 1999 por Environmental protection agency (EPA). Disponible en internet: [www.epa.gov](http://www.epa.gov)

[12] Standard methods for the examination of water & wastewater, edited by: Andrew D. Eaton, Lenore S. Clesteri, Eugene W. Rice, Arnold E. Greenberg. 21<sup>ST</sup> edition 2005, Centennial edition, Washington DC, pag.1-10 ISBN 0-87553-047-8.

[13] Tabla factor de multiplicación 95% de confianza en: PCC 509-001: procedimiento control de calidad analítico; departamento de control de aguas, acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb), pág. 14.

[14] PCC 504-002: Procedimiento estandarización e incertidumbre de métodos analíticos; departamento de control de calidad de aguas, acueducto metropolitano de Bucaramanga; pág. 8.

[15] PCC 504-001: Procedimiento estandarización e incertidumbre de métodos analíticos; departamento de control de calidad de aguas, acueducto metropolitano de Bucaramanga (amb); pág. 9-11.

[16] Tabla de valores críticos  $t$  para rechazo de datos. En: PCC 504-001: Procedimiento estandarización e incertidumbre de métodos analíticos; departamento de control de calidad de aguas pág. 22.

## 7. ANEXOS

### Anexo A. Legislación para el control del agua de consumo humano

En Colombia:

MINISTERIO DE LA PROTECCIÓN SOCIAL

MINISTERIO DE AMBIENTE, VIVIENDA Y DESARROLLO TERRITORIAL

RESOLUCIÓN NÚMERO 2115 (22 JUN 2007)

Por medio de la cual se señalan características, instrumentos básicos y frecuencias del sistema de control y vigilancia para la calidad del agua para consumo humano.

CARACTERÍSTICAS FÍSICAS Y QUÍMICAS DEL AGUA PARA CONSUMO HUMANO

ARTÍCULO 2º.- CARACTERÍSTICAS FÍSICAS. El agua para consumo humano no podrá sobrepasar los valores máximos aceptables para cada una de las características físicas que se señalan a continuación:

Tabla A1. Características físicas.

Características físicas	Expresadas como	Valor máximo aceptable
Color aparente	Unidades de Platino Cobalto (UPC)	15
Olor y Sabor	Aceptable ó no aceptable	Aceptable
Turbiedad	Unidades Nefelométricas de turbiedad (UNT)	2

ARTÍCULO 5º.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN RECONOCIDO EFECTO ADVERSO EN LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano de los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias que al sobrepasar los valores máximos aceptables tienen reconocido efecto adverso en la salud humana, deben enmarcarse dentro de los valores máximos aceptables que se señalan a continuación:

Tabla A2. Características Químicas que tienen reconocido efecto adverso en la salud humana.

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos diferentes a los plaguicidas y otras sustancias	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Antimonio	Sb	0,02
Arsénico	As	0,01
Bario	Ba	0,7
Cadmio	Cd	0,003
Cianuro libre y disociable	CN <sup>-</sup>	0,05
Cobre	Cu	1,0
Cromo total	Cr	0,05
Mercurio	Hg	0,001
Níquel	Ni	0,02
Plomo	Pb	0,01
Selenio	Se	0,01
Trihalometanos Totales	THMs	0,2
Hidrocarburos Aromáticos Policíclicos (HAP)	HAP	0,01

PARÁGRAFO. Si los compuestos de trihalometanos totales o los de hidrocarburos policíclicos aromáticos señalados la tabla A2, exceden los valores máximos aceptables, es necesario identificarlos y evaluarlos, de acuerdo al mapa de riesgo y a lo señalado por la autoridad sanitaria.

ARTÍCULO 6º.- CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DE SUSTANCIAS QUE TIENEN IMPLICACIONES SOBRE LA SALUD HUMANA. Las características químicas del agua para consumo humano en relación con los elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana se señalan en el siguiente cuadro:

Tabla A3. Características Químicas que tienen implicaciones sobre la salud humana

Elementos, compuestos químicos y mezclas de compuestos químicos que tienen implicaciones sobre la salud humana	Expresados como	Valor máximo aceptable (mg/L)
Carbono Orgánico Total	COT	5,0
Nitritos	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	0,1
Nitratos	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10
Fluoruros	F <sup>-</sup>	1,0

PARÁGRAFO. Cualquier incremento en las concentraciones habituales de Carbono Orgánico Total – COT – debe ser investigado conjuntamente por la persona prestadora que suministra o distribuye agua para consumo humano y la autoridad sanitaria, con el fin de establecer el tratamiento correspondiente para su reducción.

En el mundo:

Tabla A4. Regulación para trihalometanos en diferentes países.

PAIS/ENTIDAD	AÑO	THMs totales	CLOROFORMO	BROMOFORMO
Alemania	1990	-	3	-
Argentina	1994	100	-	-
Brasil	1990	100	-	-
Bélgica	1996	20	-	-
Canadá	1995	100	-	-
EPA	2003	80	-	-
Reino Unido	1996	100	-	-
Unión Europea	1998	100	-	-
Nicaragua	1994	-	200	100
Rusia	1998	-	200	100

#### **Anexo B. Cálculos previos para desarrollar el potencial de formación:**

- Preparación de  $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$  (tiosulfato de sodio):

Se pesan 3,1g en 500 ml de agua destilada y se afora en balón, para obtener una solución del 0.025N; para asegurar la concentración final se realiza un estandarización.

Estandarización: se utiliza un estándar primario de 5ml de  $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$  (Dicromato de potasio), de concentración 0,025N, 5ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  (1:3) y un gramo de KI, se

deja por 5 min en la oscuridad, y se titula con con el tiosulfato de sodio preparado y usando como indicador almidon (1ml), hasta que se observe un color transparente.

Resultado obtenido: 7,048 ml de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

$$\begin{aligned}V_1 \cdot C_1 &= V_2 \cdot C_2 \\5\text{ml} \cdot 0,025\text{N} &= 7,048\text{ml} \cdot C_2 \\C_2 &= 0,018\text{N}\end{aligned}$$

- Estandarización de la solución de Cl<sub>2</sub>:

Se toman 10ml de la solución de Cl<sub>2</sub> y se mezcla con 1g de KI, 5ml de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> (1:3) y se deja 5 min en la oscuridad, se titula con la solución de tiosulfato de sodio utilizando como indicador almidon.

Resultado obtenido: 26,474 ml de Na<sub>2</sub>S<sub>2</sub>O<sub>4</sub>

Para saber la cantidad de cloro utilizamos la siguiente fórmula:

$$\frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{Cl}_2 = \frac{V_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \cdot N_{\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4} \cdot 35,5 \cdot 1000}{V_{\text{Muestra}}}$$
$$\frac{\text{mg}}{\text{l}} \text{Cl}_2 = \frac{26,474 \cdot 0,018 \cdot 35,5 \cdot 1000}{10} = 1691,3 \text{ ppm Cl}_2$$

La muestra de agua tomada para realizar el potencial de formación es de 11 Litros de agua filtrada, se deba agregar cantidad de solución de Cl<sub>2</sub> tal que la muestra contenga 2ppm de Cl<sub>2</sub>

$$\begin{aligned}V_1 \cdot C_1 &= V_2 \cdot C_2 \\V_1 \cdot 1691,3 &= 11\text{L} \cdot 2\text{ppm} \\V_1 &= 13 \text{ ml de SLN}\end{aligned}$$

Antes de agregar el cloro a la muestra se toma una muestra para medir el COT inicial, después se agregan los 13 ml de solución de Cl<sub>2</sub> y se empieza a tomar las muestras cada periodo de tiempo.

### Anexo C. Tablas de resultados

Tabla C1. Datos primer ensayo potencial de formación  
COT INICIAL= 1,700 mg/L

t(min)	T (°C)	Cl <sub>2</sub> (mg/L)	THM (ppb)	COT (mg/L)
2	19	2,02	20	1,669
5	20	1,97	27	1,649
10	20	1,96	26	1,548
15	20	1,94	30	1,418
20	20	1,93	45	1,422
30	20	1,91	43	1,329
45	20	1,87	46	1,610
60	20	1,84	47	1,371
90	20	1,80	52	1,244
120	20	1,75	62	1,020
150	20	1,72	60	1,190
180	20	1,69	62	1,240
240	21	1,57	64	1,330
300	21	1,57	64	1,300
360	21	1,47	65	1,330
420	21	1,41	65	1,300
1440	22	0,72	66	1,256
2880	22,3	0,17	65	1,243

Tabla C2. Datos segundo ensayo de potencial de formación  
COT INICIAL = 1,663

t(min)	T (°C)	Cl <sub>2</sub> (mg/L)	THM (ppb)	COT (mg/L)
1	19	2,05	15	1,33
2	19	2,03	17	1,317
3	19,2	2,01	20	1,369
4	19,3	2,00	25	1,208
5	19,3	1,99	32	1,276
10	19,2	1,96	33	1,120
15	19,3	1,94	32	1,194

16	19,3	1,93	29	1,135
18	19,3	1,91	40	1,021
20	19,5	1,90	38	1,074
30	19,9	1,92	37	1,039
45	19,9	1,90	34	1,043
60	20	1,88	35	1,026
90	20,3	1,86	34	1,017
95	20,5	1,86	33	1,090
100	20,5	1,86	40	1,100
105	20,5	1,86	45	1,105
110	20,7	1,85	48	1,045
120	20,7	1,85	41	1,090
150	20,8	1,80	40	1,095
180	20,9	1,75	42	1,098
300	21,9	1,65	47	1,100
420	22,1	1,57	48	1,058
540	22,1	1,50	45	1,150
1440	22,3	1,07	42	1,200
2880	22,3	0,47	38	1,086

Tabla C3. Datos para la ilustración 7.

t(min)	THM	95	43
1	0	100	41
2	15	105	42
3	18,5	110	45
4	20	120	48
5	25	150	51
10	29,5	180	50
15	29,5	240	52
16	31	300	55
18	33	360	55,5
20	40	420	58
30	41,5	540	56,5
45	40	1440	52,5
60	40	2880	54
90	41		

t(min)	COT	90	1,244
1	1,669	95	1,171
2	1,654	100	1,161
3	1,658	105	1,151
4	1,64	110	1,166
5	1,649	120	1,171
10	1,548	150	1,19
15	1,418	180	1,24
16	1,359	240	1,23
18	1,345	300	1,2
20	1,329	360	1,15
30	1,298	420	1,098
45	1,312	540	1,15
60	1,315		

Tabla C4. Datos ilustración 8.

$\Delta COT$	$\Delta THM$	0,354	25
0,015	2	0,425	26
0,011	3,5	0,425	28
0,029	5	0,425	26
0,02	10	0,425	27
0,121	11	0,425	30
0,251	11	0,425	33
0,251	16	0,479	36
0,251	18	0,429	35
0,34	25	0,439	25
0,371	26,5	0,469	40
0,357	25	0,519	40,5

Tabla C5. Resultados de parámetros en el laboratorio.

PUNTO	FECHA	HORA	TR(min)	CL2	THM	COT	PH	T(°C)	COLOR	TURBIEDAD
planta	18/08/2010	05:00 a.m.	30	0,98	25	2,367	7,06	20	4	0,5
planta	18/08/2010	06:30 a.m.	30	1	30	2,354	7,03	20	7	0,7
planta	18/08/2010	07:00 a.m.	30	1,02	35		7,04	19	5	1
altos cabecera	18/08/2010	08:25 a.m.	210	0,7	54		7,23	21	3	0,7
lagos cacique	18/08/2010	09:25 a.m.	165	0,81	45		7,06	19	6	1
pan de azúcar	18/08/2010	08:40 a.m.	260	1	46		7,15	22	15	2
trinidad	18/08/2010	09:40 a.m.	280	1,02	49		7,25	22	9	1,3
reposo	18/08/2010	10:00 a.m.	300	1	50		7,13	21	5	0,5
planta	19/08/2010	05:00 a.m.	30	1,02	41	1,788	7,24	20	7	1,2
planta	19/08/2010	06:00 a.m.	30	1,01	40		7,23	19,5	10	1,5
planta	19/08/2010	07:30 a.m.	30	1,05	38	1,788	6,9	20,4	5	0,9
CAI morrorico	19/08/2010	08:30 a.m.	35	1	40	1,785	7,16	20	8	0,7
buenos aires	19/08/2010	08:35	40	1,28	38		7,2	21	6	0,6
Álvarez	19/08/2010	08:45 a.m.	120	0,89	54		7,16	20,2	8	1,4
El prado	19/08/2010	08:50 a.m.	240	0,71	50	1,861	7,26	21,4	4	0,8
lagos cacique	19/08/2010	09:40 a.m.	165	0,89	50		7,1	20	7	1
pan de azúcar	19/08/2010	09:20 a.m.	260	0,96	45		7,12	23	10	1,3
planta	20/08/2010	05:00 a.m.	30	0,98	40		7,16	19	3	0,6
planta	20/08/2010	06:00 a.m.	30	0,99	37	1,834	7,14	19,6	1	0,4
planta	20/08/2010	07:00 a.m.	30	0,97	38	1,913	7,03	20	5	0,5
planta	20/08/2010	08:00 a.m.	30	0,93	40	1,734	7,15	20,4	5	0,5
CAI morrorico	20/08/2010	08:15 a.m.	35	0,96	39		7,14	21,2	9	1,1
pinos	20/08/2010	09:00 a.m.	50	0,94	42		7,18	21	3	0,4
Álvarez	20/08/2010	08:30 a.m.	120	0,88	46		7,15	21,6	5	0,8
terrazas	20/08/2010	11:30 a.m.	225	0,85	46	1,469	7,2	21,4	4	0,7

reposo	20/08/2010	11:00 a.m.	300	0,81	45		7,12	20,2	4	0,5
trinidad	20/08/2010	11:30 a.m.	280	0,84	45	1,812	7,1	21,2	5	0,5
planta	23/08/2010	06:00 a.m.	30	0,95	20	1,357	7,14	19,3	2	0,4
planta	23/08/2010	07:00 a.m.	30	0,9	37		7,04	19,6	3	0,6
lagos cacique	23/08/2010	09:00 a.m.	165	0,88	50		7,07	19	9	1,3
pan de azúcar	23/08/2010	09:30 a.m.	260	0,84	46		7,08	23	9	1,5
buenos aires	23/08/2010	08:00 a.m.	40	0,85	44		7,15	21	4	0,8
terrazas	23/08/2010	08:40 a.m.	225	0,83	50	1,304	7,3	21	5	0,5
Álvarez	23/08/2010	08:45 a.m.	120	0,87	34	1,375	7,1	20,1	4	0,5
altos cabecera	23/08/2010	08:25 a.m.	210	0,66	52	1,282	7,2	22	2	0,4
trinidad	23/08/2010	10:00 a.m.	280	0,99	51		7,09	21,4	9	1
reposo	23/08/2010	10:10 a.m.	300	0,99	46	1,133	7,11	20,2	3	0,5
pinos	23/08/2010	10:30 a.m.	50	0,93	43		7,14	20,6	5	0,5
El prado	23/08/2010	11:00 a.m.	240	0,82	51		7,23	21,2	2	0,3
planta	27/08/2010	11:00 a.m.	30	1,13	38	2,096	7,09	20	2	0,4
planta	27/08/2010	12:00 p.m.	30	1,1	36	1,997	7,13	19,6	2	0,5
planta	27/08/2010	01:00 p.m.	30	1,05	32	2,075	7,14	20,2	4	0,4
planta	27/08/2010	02:00 p.m.	30	1,1	35	2,039	7,13	20,4	1	0,3
CAI morrorico	27/08/2010	02:40 p.m.	35	0,93	39	1,986	7,14	20,6	8	1
buenos aires	27/08/2010	02:45 p.m.	40	1,03	40	1,804	7,4	21	4	0,4
Álvarez	27/08/2010	03:30 p.m.	120	0,9	45	1,74	7,25	21,4	3	0,4
pinos	27/08/2010	03:00 p.m.	50	0,93	42	1,923	7,16	20,8	2	0,3
El prado	27/08/2010	03:35 p.m.	240	0,85	55	1,532	7,25	21,6	1	0,2
altos cabecera	27/08/2010	03:40 p.m.	210	0,81	40	1,767	7,3	21,4	3	0,4
pan de azúcar	27/08/2010	03:50 p.m.	260	0,96	51	1,864	7,24	24	6	1
terrazas	27/08/2010	04:00 p.m.	225	0,88	50	1,739	7,28	22	2	0,3
lagos cacique	27/08/2010	04:10 p.m.	165	0,8	47	1,786	7,27	20,5	3	0,4
trinidad	27/08/2010	04:15 p.m.	280	0,84	50	1,25	7,28	23	7	0,9
reposo	27/08/2010	04:30 p.m.	300	1,01	52	1,568	7,26	20,8	4	0,3

Tabla C6. Datos ilustración 9.

$\Delta COT$	$\Delta THM$	Tiempo	THM
0,528	16	35	39,00
0,465	19	40	40,67
0,444	13	120	47,00
0,335	13	50	42,33
0,289	15	210	48,67
0,258	14	240	50,00
0,23	15	260	47,00
0,224	14	225	48,00
0,133	12	165	48,00
0,116	10	300	49,00
0,101	9	280	49,00
0,053	4		
0,032	3		
0,027	7		

Tabla C7. Datos ilustración 10.

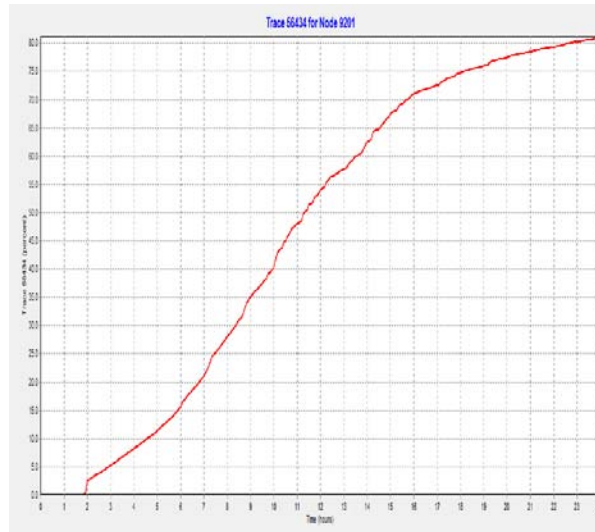
t(min)	THM	100	41
1	0	105	42
2	15	110	45
3	18	120	47
4	20	150	50
5	25	165	48
10	30	180	50
15	30	210	49
16	31	240	50
18	33	260	48
20	35	280	49
30	39	300	50
45	40	360	55,5
50	42	420	56
60	40	540	56,5
90	41		
95	43		

Tabla C8. Resultados pruebas calibración de modelo.

PUNTO	FECHA	HORA	TR(min)	CL2	THM	COT	PH	T(°C)	COLOR	TURBIEDAD
planta	09/09/2010	11:00 a.m.	30	1	31	2,032	7,12	20	3	0,3
planta	09/09/2010	12:00 p.m.	30	1,02	34	2,099	7,21	20,4	5	0,4
planta	09/09/2010	01:00 p.m.	30	0,99	32	1,935	7,15	20,7	2	0,4
planta	09/09/2010	02:00 p.m.	30	1,15	32	2,19	7,16	21,6	0	0,3
CAI morrorico	09/09/2010	02:30 p.m.	35	1,12	65	1,98	7,08	22	97	14
buenos aires	09/09/2010	02:40 p.m.	40	1,1	38	2,011	7,38	23	3	0,6
pinos	09/09/2010	03:00 p.m.	50	1,11	42	1,997	7,17	22,3	2	0,4
Álvarez	09/09/2010	02:50 p.m.	120	0,92	46	1,699	7,33	22,1	0	0,4
El prado	09/09/2010	03:20 p.m.	240	0,97	48	1,733	7,16	22,6	2	0,6
altos cabecera	09/09/2010	03:40 p.m.	210	0,91	47	1,632	7,26	22,1	1	0,3
pan de azúcar	09/09/2010	03:45 p.m.	260	0,99	49	1,709	7,34	26,6	11	1,2
terrazas	09/09/2010	04:00 p.m.	225	0,97	48	1,742	7,27	23,4	0	0,3
lagos cacique	09/09/2010	04:10 p.m.	165	0,94	48	1,648	7,18	26,2	5	0,4
trinidad	09/09/2010	04:15 p.m.	280	1,07	50	1,624	7,22	23	15	2
reposo	09/09/2010	04:20 p.m.	300	1	51	1,597	7,24	22	3	0,6

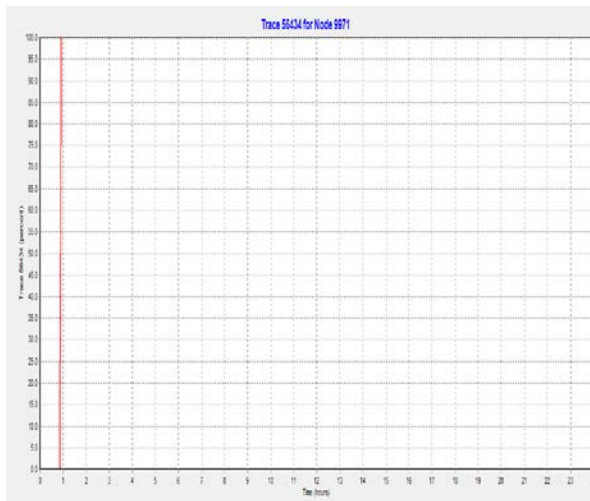
## Anexo D. Determinación de tiempo en la red en EPANET.

Figura D1. Tiempo en Álvarez



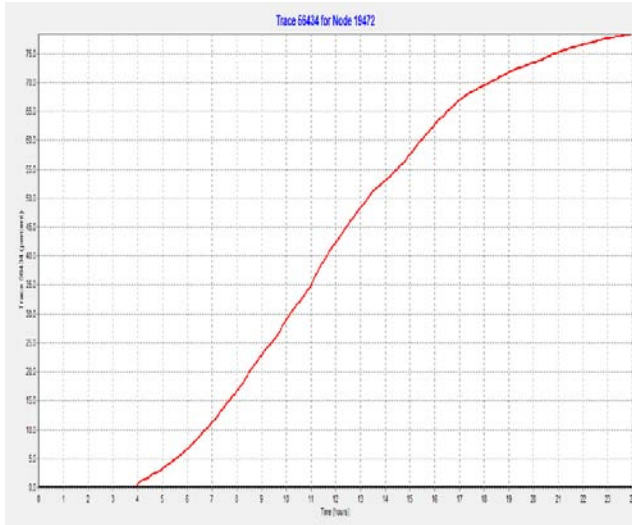
Time Hours	Trace percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
01:10	0
01:15	0
01:20	0
01:25	0
01:30	0
01:35	0
01:40	0
01:45	0
01:50	0
01:55	0,52

Figura D2. Tiempo en los pinos



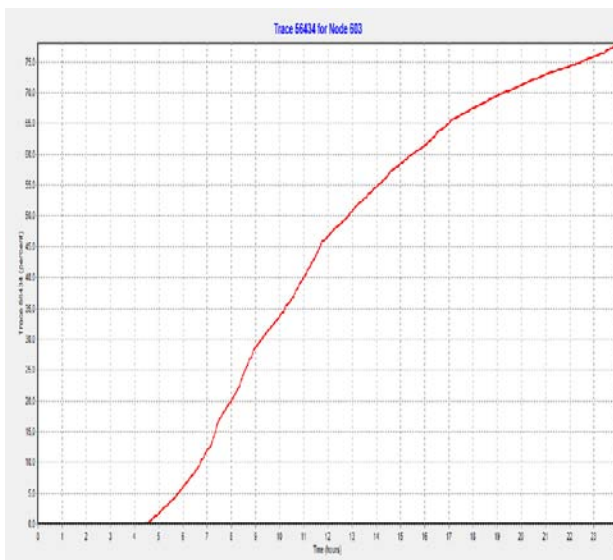
Time Hours	Trace percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
00:25	0
00:30	0
00:35	0
00:40	0
00:45	0
00:50	0
00:55	100

Figura D3. Tiempo en altos de cabecera



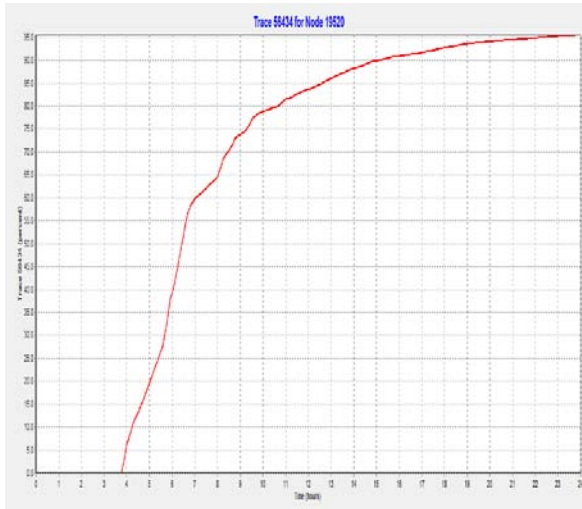
Time Hours	Trace percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
00:25	0
00:30	0
00:35	0
03:25	0
03:30	0
03:35	0
03:40	0
03:45	0
03:50	0
03:55	0
04:00	0,48

Figura D4. Tiempo en pan de azúcar



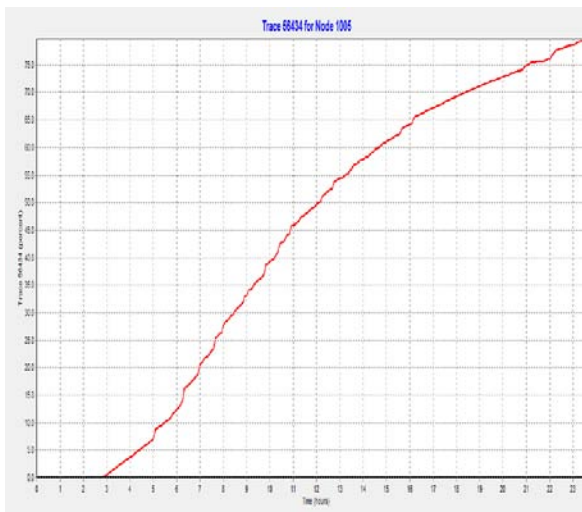
Time Hours	Trace percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
02:20	0
02:25	0
02:30	0
03:10	0
03:15	0
04:00	0
04:05	0
04:10	0
04:15	0
04:20	0,05

Figura D5. Tiempo en terrazas.



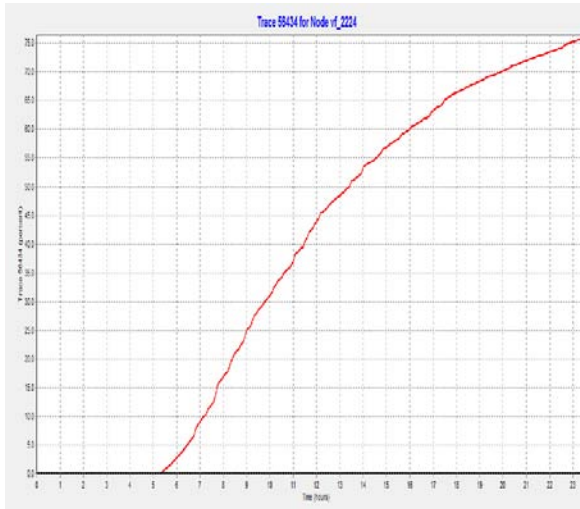
Time Series Table	
Time	Trace
Hours	percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
03:20	0
03:25	0
03:30	0
03:35	0
03:40	0
03:45	0,01
03:50	1,77
03:55	3,66
04:00	6,33
04:05	7,53

Figura D6. Tiempo en lagos del cacique



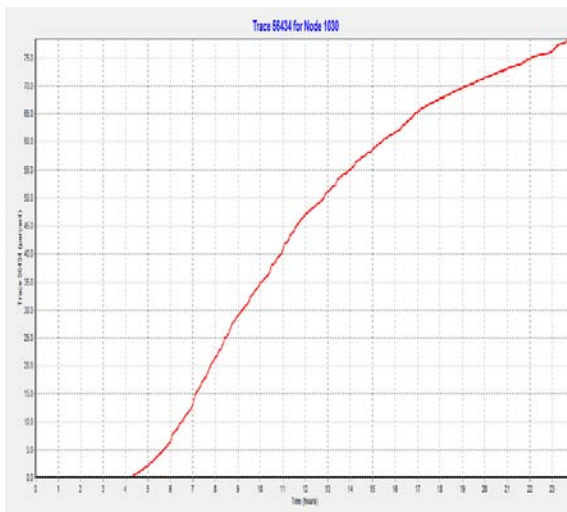
Time Series Table	
Time	Trace
Hours	percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
00:25	0
00:30	0
00:35	0
02:25	0
02:30	0
02:35	0
02:40	0
02:45	0,01
02:50	0,11

Figura D7. Tiempo en el reposo.



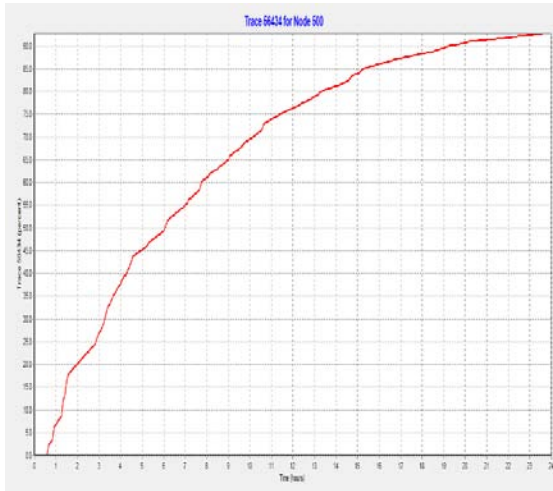
Time Series Table	
Time	Trace
Hours	percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:30	0
00:35	0
00:40	0
04:50	0
04:55	0
05:00	0
05:05	0
05:10	0
05:15	0
05:20	0,12
05:25	0,38

Figura D8. Tiempo en la trinidad.



Time Series Table	
Time	Trace
Hours	percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:40	0
00:45	0
00:50	0
00:55	0
01:00	0
02:00	0
03:00	0
04:00	0
04:05	0
04:10	0,04
04:15	0,16
04:20	0,38

Figura D9. Tiempo en buenos aires



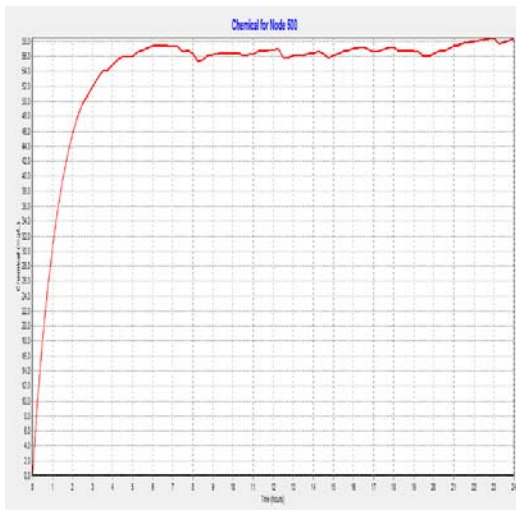
Time Series	
Time	Trace 56434
Hours	percent
00:00	0
00:05	0
00:10	0
00:15	0
00:20	0
00:25	0
00:30	0
00:35	0
00:40	2,34

En este caso el tiempo de llegada del frente del trazador es de 40 min, es decir desde la planta la flora hasta el punto buenos aires hay 40 min

### Anexo E. Trihalometanos en la red por EPANET.

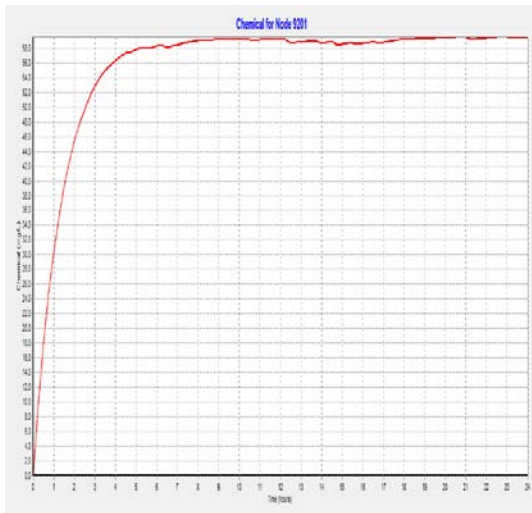
Con la constante de formación hallada en el potencial de formación en las pruebas de laboratorio, además de los valores máximos y valor de THMs en la planta la flora, se corre el modelo en EPANET. Los resultados son arrojados para cada punto de la siguiente manera:

Figura E1. Trihalometanos en buenos aires.



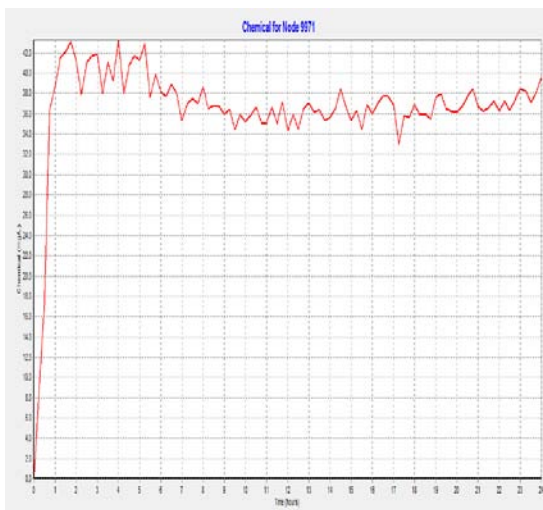
Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,51
01:15	35,45
01:30	39,51
01:45	42,85

Figura E2. Trihalometanos en Álvarez



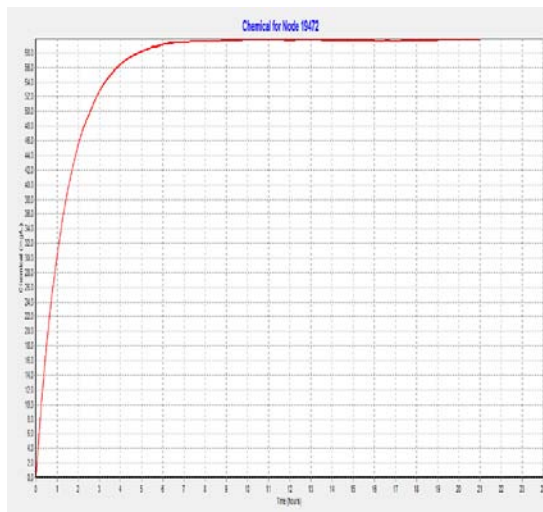
Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,38
01:15	35,17
01:30	39,19
01:45	42,56
02:00	45,38
02:15	47,74

Figura E3. Trihalometanos en los pinos.



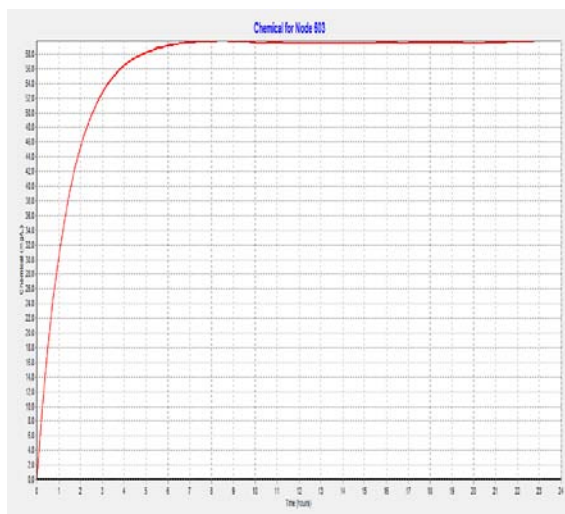
Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	8,82
00:30	17,17
00:45	36,31
01:00	38,73
01:15	41,59
01:30	42,16
01:45	43,11

Figura E4. Trihalometanos en altos de Cabecera



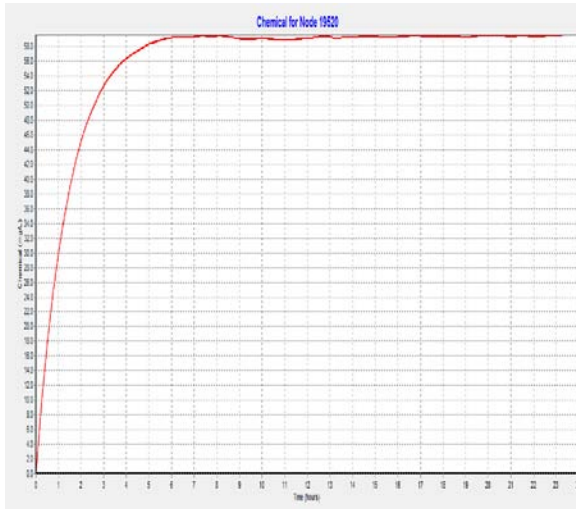
Time	Chemical
Hours	µg/LCHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,38
01:15	35,17
01:30	39,19
01:45	42,56
02:00	45,38
02:15	47,74
02:30	49,61
02:45	51,31
03:00	52,72
03:15	53,91
03:30	54,88
03:45	55,7

Figura E5. Trihalometanos en pan de azúcar



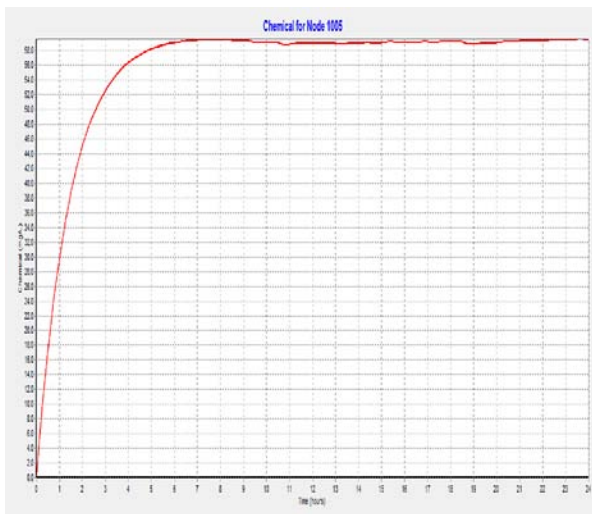
Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,38
01:15	35,17
01:30	39,19
01:45	42,56
02:00	45,38
02:15	47,74
02:30	49,73
02:45	51,39
03:00	52,78
03:15	53,95
03:30	54,93
03:45	55,75
04:00	56,44
04:15	57,01
04:30	57,5

Figura E6. Trihalometanos en terrazas



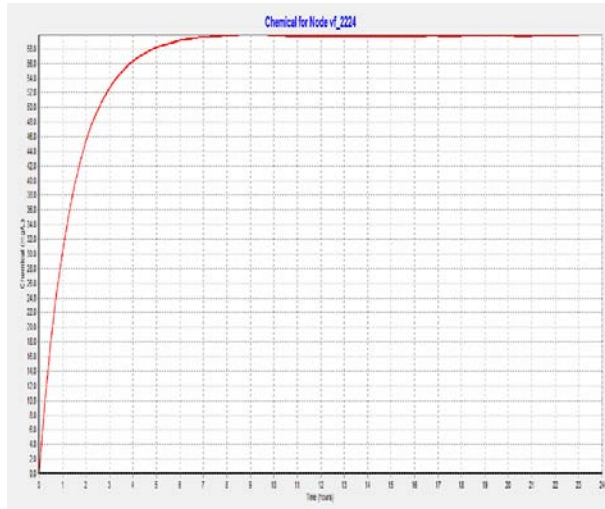
Time Hours	Chemical µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,48
01:00	30,03
01:15	34,86
01:30	38,9
01:45	42,29
02:00	45,18
02:15	47,58
02:30	49,58
02:45	51,27
03:00	52,68
03:15	53,86
03:30	54,86
03:45	55,69

Figura E7. Trihalometanos en lagos de cacique



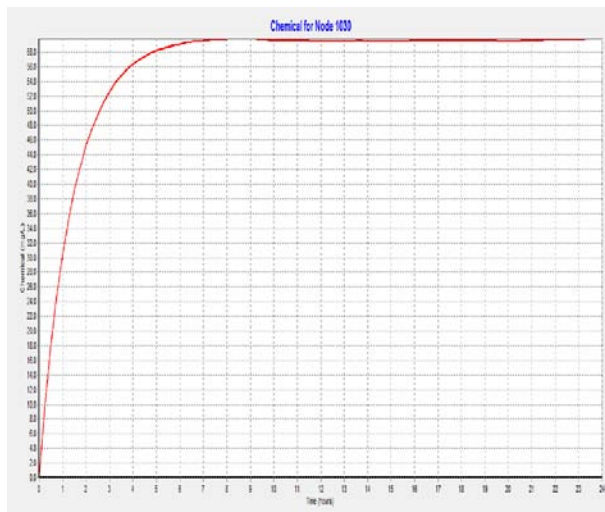
Time Hours	Chemical µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,1
00:45	24,03
01:00	29,85
01:15	34,73
01:30	38,82
01:45	42,24
02:00	45,12
02:15	47,52
02:30	49,54
02:45	51,23

Figura E8. Trihalometanos en el reposo



Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,38
01:15	35,17
01:30	39,19
01:45	42,56
02:00	45,38
02:15	47,74
02:30	49,73
02:45	51,39
03:00	52,7
03:15	53,81
04:00	56,36
04:15	56,95
04:30	57,44
04:45	57,85
05:00	58,2
05:15	58,49

Figura E9. Trihalometanos en la trinidad.



Time	Chemical
Hours	µg/L CHCl <sub>3</sub>
00:00	0
00:15	9,72
00:30	17,85
00:45	24,66
01:00	30,38
01:15	35,17
01:30	39,19
01:45	42,29
02:00	45,16
02:15	47,5
03:30	54,82
03:45	55,66
04:00	56,36
04:15	56,95
04:30	57,44
04:45	57,85

## **Anexo F. Resumen de métodos COT y THMs.**

Carbono orgánico total (COT):

Esta medición se realiza en un equipo especializado, el TOC-V<sub>CPH/CPN</sub>, el cual puede realizar la medición usando uno de los siguientes métodos:

- Método TC-IC
- Método NPOC
- Método POC+NPOC

El método NPOC es el más usado en los análisis de COT.

Principio del método NPOC:

Después de acidificar la muestra a un pH de 2 a 3, un burbujeo de gas pasa a través de la muestra para eliminar el carbono inorgánico presente. El carbono total restante es medido para determinar el carbono orgánico total. Posteriormente la muestra es introducida al tubo de combustión, donde se lleva una oxidación catalítica a una temperatura de 680°C. La muestra es quemada en el tubo de combustión, y como resultado los componentes de carbono en la muestra son convertidos a dióxido de carbono. El gas de arrastre el cual viaja con flujo de 150 mL/min al tubo de combustión, lleva los productos de combustión de la muestra del tubo de combustión a él deshumidificador electrónico, donde el gas es enfriado y deshidratado. El gas después lleva los productos de combustión de la muestra a través de de un depurador de halógeno para remover el cloro y otros halógenos. Finalmente, el gas de arrastre entrega los productos de combustión de la muestra a la celda del gas analizador no dispersivo infrarrojo (NDIR), donde el dióxido de carbono es detectado. El NDIR arroja una señal de detección análoga que forma un pico; el área del pico es medido por el software del TOC-Control V.

El área del pico es proporcional a la concentración de carbono orgánico de la muestra. Una ecuación de curva de calibración que expresa matemáticamente la

relación entre el área del pico y la concentración de COT puede ser generada analizando varias concentraciones de soluciones estándar de COT. La concentración de COT en una muestra puede ser determinada analizando la muestra para obtener el área del pico y después comparar con el área de los picos obtenidos en la ecuación de curva de calibración.

#### Trihalometanos Totales (THMs):

En el método de THM plus los componentes presentes en la muestra reaccionan con N,N-dietilnicotinamida bajo condiciones de calor y alcalinidad para formar un dialdehído intermedio (5-hidroxi-2-(N,N-dietilcarboxamida) 2,4-pentadienal). Las muestras son luego enfriadas y acidificadas a un pH de 2.5. El dialdehído intermedio formado reacciona con 7-amino-1,3 ácido naftaleno disulfónico para formar la base de color. El color formado es directamente proporcional a la cantidad de THM totales presentes en la muestra. Los resultados son medidos a 515 nm.

#### **Procedimiento para determinación de trihalometanos:**

1. Seleccionar el método "725 THM plus"
2. Insertar el adaptador multicelda de 1 pulgada cuadrada.
3. Preparar un baño de agua caliente adicionando 500 ml de agua en un vaso de calentamiento. Poner el recipiente en una plancha de calentamiento.
4. Preparar un baño de agua fría adicionando 500 ml de agua fría (18-25°C) de agua tratada a un recipiente. Mantener la temperatura en este rango.
5. Preparación de la muestra: llenar cada celda con 10 ml de muestra. Tapar la celda y marcarla.
6. Preparación del blanco: llenar la celda con agua desionizada. Tapar y macar como blanco.
7. Agregar tres gotas del reactivo 1 del kit THM plus en cada celda.
8. Tapar fuertemente y agitar. No agitar tan fuerte, pues este puede causar pérdida de THMs dentro del espacio de aire en la celda.

9. Agregar 3 ml del reactivo 2 del kit THM plus en cada celda. Evitar el exceso de agitación de la muestra cuando se esté dispensando el reactivo.
10. Tapar fuertemente y agitar fuertemente.
11. Colocar las celdas dentro del baño de agua caliente cuando el agua este en ebullición. El nivel del agua debe estar por debajo del diamante que se encuentra en las celdas.
12. Un periodo de reacción de 5 minutos empieza.
13. Cuando el tiempo pase, remover las celdas del agua caliente y pasarlos al baño de agua fría.
14. Un periodo de enfriamiento de 3 minutos empieza, cuando el tiempo expire remover las celdas del baño de agua frío.
15. Agregar 1 ml de reactivo 3 del kit de THM plus a cada celda. Las muestras van a subir su temperatura.
16. Reemplazar el baño de agua fría con agua fresca, introducir las muestras en esta agua.
17. Un periodo de enfriamiento de tres minutos va a empezar. Después que el tiempo expire remover las celdas. La temperatura de las muestras debe estar entre 15-25°C.
18. Adicionar el contenido un cojin de reactivo 4 del kit THM plus dentro de cada celda.
19. Tapar y agitar cada celda hasta que el polvo este disuelto. El polvo se disuelve lentamente. Agitar intermitentemente durante los primeros 5 min de desarrollo de color.
20. Un tiempo de desarrollo de color de 15 minutos empieza.
21. Cuando el tiempo acabe, traspasar las muestras y el blanco preparado a las celdas cuadradas.
22. Insertar el blanco dentro del contenedor de celdas del equipo, cerrar la tapa y presionar CERO. La pantalla va a mostrar "0 ppb CHCl3".
23. Insertar las muestras en el contenedor de celda, cerrar la tapa y presionar LEER. Los resultados se muestran en ppb de cloroformo.

Muestreo y almacenamiento:

Recolectar las muestras en botellas de 40-100 ml selladas con tapa Teflon-lined. Llenar las botellas despacio para evitar que quede aire atrapado en la muestra. Sellar las botellas e invertirlas para comprobar que no quede aire atrapado.

NOTA: A causa que los componentes de los trihalometanos son extremadamente volátiles, se debe analizar rápido o inmediatamente. Si no pueden ser inmediatamente analizadas enfriar a 4°C y no dejar almacenado más de 14 días. Las muestras deben estar entre 15-25°C antes de ser analizadas.

### **Anexo G. Calibración pipetas de laboratorio**

El objetivo de la calibración es la de garantizar la calidad de la medida tomada con las diferentes pipetas usadas.

#### **Especificaciones de la prueba para micropipeta:**

Volumen de la pipeta: 100 µL agregando 25 µL en cada número

Humedad relativa: 55%

Temperatura del ambiente: 22,4°C

Corrección de datos por pesada inicial por efecto del aire desplazado:

$$W1 = W2 + W2 * (\delta_{\text{aire}} / \delta 1 - \delta_{\text{aire}} / \delta 2)$$

donde:

W1: peso corregido de la solución (g)

W2: peso aparente de la solución (g)

$\delta 1$ : densidad de la solución

$\delta 2$ : densidad de las pesas (Mettler = 8.0 g/ml)

$\delta$ : densidad del aire = 0.0012 g/ml

Se obtiene el volumen de la siguiente expresión:

$$V_t = W / \delta$$

Efecto de la temperatura en la medida del volumen:

$$V_{20^\circ\text{C}} = V_t + 0.00025(20^\circ - T^\circ)(V_t) \text{ donde:}$$

0.025 \* 100: coeficiente de expansión de soluciones diluidas

T°: Temp a la cual se tomó el volumen

V<sub>t</sub>: Volumen medido

<b>FECHA:</b>		MAYO 30 de 2010							
Medida No.	Volumen teorico	Temperatura solución °C	$\bar{\rho}_1$ : densidad de la solución	Peso vaso vacio (g)	Peso vaso + muestra (g)	W2: Peso aparente (g)	W1: Peso corregido (g)	Vt: Volumen medido (ml)	V 20°C: volumen real en ml
1	20,00	22,4	0,9977	59,4819	59,5018	0,020	0,020	0,020	0,02
2	20,00	22,4	0,9977	59,5018	59,5211	0,019	0,019	0,019	0,02
3	20,00	22,4	0,9977	59,5211	59,5379	0,017	0,017	0,017	0,02
4	20,00	22,4	0,9977	59,5379	59,5573	0,019	0,019	0,019	0,02
5	20,00	22,4	0,9977	59,5573	59,5766	0,019	0,019	0,019	0,02
6	20,00	22,4	0,9977	59,5766	59,5962	0,020	0,020	0,020	0,02
7	20,00	22,4	0,9977	59,5962	59,6157	0,019	0,020	0,020	0,02
8	20,00	22,4	0,9977	59,6157	59,635	0,019	0,019	0,019	0,02
9	20,00	22,4	0,9977	59,635	60	0,020	0,020	0,020	0,02
10	20,00	22,4	0,9977	60	59,6739	0,019	0,019	0,019	0,02
						<b>DESVIACIÓN ESTANDAR</b>			0,00
<b>Promedio</b>	-----	22,4	0,9975	-----	-----	<b>PROMEDIO REAL CORREGIDO</b>			<b>0,019</b>

## Anexo H. Código de programación en lenguaje Xbasic ++

/Este programa permite el cálculo de los trihalometanos que contiene el agua tratada por el Acueducto Metropolitano de Bucaramanga amb SA ESP, con base en calculos predefinidos

Realizado en el año 2010.

```
/**
*****//

#include "Gra.ch"
#include "Xbp.ch"
#include "Common.ch"
#include "Appevent.ch"
#include "Font.ch"

CLASS NewForm FROM _NewForm
  EXPORTED:
    METHOD init
    METHOD create
ENDCLASS

METHOD NewForm:init( oParent, oOwner, aPos, aSize, aPP, IVisible )

  ::_NewForm:init( oParent, oOwner, aPos, aSize, aPP, IVisible )

RETURN self

METHOD NewForm:create( oParent, oOwner, aPos, aSize, aPP, IVisible )

  ::_NewForm:create( oParent, oOwner, aPos, aSize, aPP, IVisible )
  //  ::show()

RETURN self
FUNCTION THM()

  LOCAL nEvent, oXbp, mp1, mp2 ,;
  oMe, bAction

  oMe := NewForm():New():Create()

  bAction := { |mp1, mp2, oXbp| oMe:PlantaActual := oXbp:XbpSLE:getData(),;
```

```

                ActualizarPuntosMuestreo(oMe) }

oMe:PlantaTratamiento:ItemSelected := bAction

bAction := {|mp1, mp2, oxBP| oMe:ConMuestreo := .T.,;
            VerificarPuntoMuestreo(oMe) }

oMe:PuntoMuestreo:ItemSelected := bAction
oMe:Disable()
// oMe:PlantaTratamiento:ItemMarked := bAction
plantas->(DBSETORDER(1))

WHILE !plantas->(EOF())

    oMe:PlantaTratamiento:AddItem(plantas->nombre)
    plantas->(DBSKIP(1))

ENDDO

plantas->(DBSETORDER(2))
muestreo->(DBSETORDER(1))

CENTERCONTROL(oMe)
oMe:Enable()
oMe:PlantaTratamiento:SetInputFocus()
oMe:minSize := oMe:CurrentSize()
oMe:maxSize := oMe:CurrentSize()
oMe:close := {| mp1, mp2 , oXbp | oXbp:Hide(), oXbp:Destroy() }
oMe:Show()
nEvent := xbe_None
WHILE nEvent != xbeP_Close
    nEvent := AppEvent ( @mp1, @mp2, @oXbp )
    oXbp:HandleEvent ( nEvent, mp1, mp2 )
    IF nEvent == xbeP_Quit
        RETURN NIL // AppQuit()
    ENDIF
ENDDO
RETURN NIL

FUNCTION ActualizarPuntosMuestreo(oFrm)
*****
plantas->(DBSEEK(ALLTRIM(oFrm:PlantaActual)))
oFrm:PuntoMuestreo:Clear()

IF muestreo->(DBSEEK(plantas->codigo))

```

```

WHILE !muestreo->(EOF()) .AND. muestreo->planta = plantas->codigo

    oFrm:PuntoMuestreo:AddItem(muestreo->nombre)
    muestreo->(DBSKIP(1))

ENDDO

oFrm:ConMuestreo := .T.
SeleccionFormula(oFrm,"THMt")

ELSE

    oFrm:ConMuestreo := .F.
    SeleccionFormula(oFrm,"THMCOT")

ENDIF
RETURN NIL

*****
FUNCTION VerificarPuntoMuestreo(oFrm)
*****
LOCAL cPuntoMuestreo := ALLTRIM(oFrm:PuntoMuestreo:XBPSLE:editBuffer())

muestreo ->(DBSETORDER(2))

IF muestreo->(DBSEEK(plantas->codigo+cPuntoMuestreo))

    oFrm:ConMuestreo := .T.
    SeleccionFormula(oFrm,"THMt")

ELSE

    oFrm:ConMuestreo := .F.
    SeleccionFormula(oFrm,"THMCOT")

ENDIF

muestreo->(DBSETORDER(1))

RETURN NIL

*****
FUNCTION SeleccionFormula(oFrm,cFormula)
*****

```

```

IF cFormula == "THMt"

    oFrm:THMCOT:SetData(.F.)
    oFrm:THMt:Setdata(.T.)
    oFrm:Static6:Disable()
    oFrm:Static7:Disable()
    oFrm:Static8:Disable()
    oFrm:COT_planta:Disable()
    oFrm:COT_Destino:Disable()

ELSE

    oFrm:PuntoMuestreo:AddItem("Sin Definir...")
    oFrm:THMCOT:SetData(.T.)
    oFrm:THMt:Setdata(.F.)
    oFrm:Static6:enable()
    oFrm:Static7:enable()
    oFrm:Static8:enable()
    oFrm:COT_planta:enable()
    oFrm:COT_Destino:enable()

ENDIF

IF oFrm:ConMuestreo

    oFrm:THMt:Enable()

ELSE

    oFrm:THMt:Disable()

ENDIF
RETURN NIL

*****
FUNCTION calcularTHM(oFrm)
*****
LOCAL THM,;
    deltaCOT,;
    THMPlanta,;
    COTPlanta,;
    COTDestino,;
    CRLF, ;
    cPorcentajeError := "",;
    cMetodoCalculo := "",;

```

```

    ICalculado := .T.,;
    cResultadosAnteriores := oFrm:cResultados

    crlf := chr(13)+ chr(10)
    oFrm:cNotas := crlf

    IF EMPTY(oFrm:PlantaTratamiento:XBPSLE:GetData())

        msgBox("Se debe seleccionar alguna planta de tratamiento",;
            "INCORRECTO!")

        RETURN .F.
    ENDIF

    IF ALLTRIM(oFrm:PuntoMuestreo:XBPSLE:GetData())== "Sin Definir..."

        msgBox("Se deben definir el Punto Destino de Muestreo",;
            "INCORRECTO!")

        RETURN .F.
    ENDIF

    IF EMPTY(oFrm:pH:getData()) .OR. EMPTY(oFrm:Temperatura:getData()) .OR.;
        EMPTY(oFrm:Color:getData()) .OR. EMPTY(oFrm:Turbiedad:getData()) .OR.;
        EMPTY(oFrm:CloroResidual:getData()) .OR. EMPTY(oFrm:COT:getData()).OR.;
        EMPTY(oFrm:PuntoMuestreo:XBPSLE:GetData())

        msgBox("Se deben diligenciar TODOS los valores asociados al Punto Destino
de Muestreo",;
            "Datos Vacios!")

        RETURN .F.
    ENDIF

    IF VAL(oFrm:Ph:Getdata()) < 6.5 .OR. VAL(oFrm:Ph:Getdata()) > 8.5

        oFrm:cNotas += "    ***El pH no est dentro de los rangos apropiados."+crlf

    ENDIF

    IF VAL(oFrm:Temperatura:Getdata()) < 18 .OR. VAL(oFrm:Temperatura:Getdata())
> 25

        oFrm:cNotas += "    ***La Temperatura no est dentro de los rangos
apropiados."+crlf

```

ENDIF

IF VAL(oFrm:Color:Getdata()) < 0 .OR. VAL(oFrm:Color:Getdata()) > 15

oFrm:cNotas += " \*\*\*El Color no est dentro de los rangos apropiados."+crlf

ENDIF

IF VAL(oFrm:Turbiedad:Getdata()) < 0.1 .OR. VAL(oFrm:Turbiedad:Getdata()) > 2

oFrm:cNotas += " \*\*\*La Turbiedad no est dentro de los rangos apropiados."+crlf

ENDIF

IF VAL(oFrm:CloroResidual:Getdata()) < 0.6 .OR. VAL(oFrm:CloroResidual:Getdata()) > 2

oFrm:cNotas += " \*\*\*El Cloro residual no est dentro de los rangos apropiados."+crlf

ENDIF

IF VAL(oFrm:COT:Getdata()) < 0.5 .OR. VAL(oFrm:COT:Getdata()) > 5

oFrm:cNotas += " \*\*\*El COT no est dentro de los rangos apropiados."+crlf

ENDIF

IF !EMPTY(oFrm:cNotas)

ICalculado := .F.  
oFrm:cNotas += " EL MODELO NO APLICA PARA ESTAS CONDICIONES!!!"

ELSE

oFrm:cNotas := "Los valores est n dentro de los rangos permitidos."

ENDIF

IF oFrm:THMt:getData()

THM = ( 7.5592 \* LOG(muestreo->medicion) ) + 0.9584  
cPorcentajeError := " m ximo del 7%"

```

cMetodoCalculo := "Trihalometanos en funciøn del tiempo THM(t)"

ELSE

IF EMPTY(oFrm:COT_Planta:getData())

    MsgBox("Se debe diligenciar el valor asociado al COT en la planta.",;
        "Dato Vacio!")

    RETURN .F.
ENDIF

COTPlanta := VAL(oFrm:COT_Planta:getData())
COTDestino := VAL(oFrm:COT_Destino:getData())
THMPlanta := plantas->THM

deltaCOT = COTPlanta - COTDestino
cMetodoCalculo := "Trihalometanos en funciøn de COT"

IF deltaCOT > 0.1 .AND. deltaCOT < 0.35

    THM = ((87.173 * (deltaCOT ^ 2) ) + ( 19.626 * deltaCOT ) + 5.8181 ) +
    THMPlanta
    cPorcentajeError := " m ximo del 10%"

ELSEIF deltaCOT >= 0.35

    THM = (((-72.768) * (deltaCOT ^ 2) ) + ( 61.451 * deltaCOT ) + 3.25 ) +
    THMPlanta
    cPorcentajeError := " m ximo del 15%"

ELSE

    ConfirmBox( , " delta COT por debajo de 10%."+CHR(10)+CHR(13)+;
        " EL PORCENTAJE DE ERROR ESTARIA POR ENCIMA DEL 30%.",;
        " NO CALCULABLE!!!",XBPMB_OK,XBPMB_CRITICAL )

    RETURN .F.
ENDIF
ENDIF

oFrm:nTHM := THM

oFrm:cResultados := "FECHA: " + Var2LChar( oFrm:fecha:GetData() )+ crlf + crlf +
;

```

```

                "Planta de Tratamiento: "+ oFrm:PlantaActual + crlf + ;
                "Punto Destino de Muestreo: " +
oFrm:PuntoMuestreo:XBPSLE:GetData() + crlf + crlf + ;
                "Datos del Muestreo:" + crlf + ;
                " pH..... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:pH:getData()),5) + crlf + ;
                " Temperatura (§C)..... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:Temperatura:getData()),5) + crlf + ;
                " Color(UPC)..... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:Color:getData()),5) + crlf + ;
                " Turbiedad (NTU)..... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:Turbiedad:getData()),5) + crlf + ;
                " Cloro Residual (mg/L Cl2)... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:CloroResidual:getData()),5) + crlf + ;
                " COT (mg/L COT):..... : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:COT:getData()),5) + crlf + crlf + ;
                " NOTA:" + oFrm:cNotas + crlf + crlf

IF ICalculado
    oFrm:cResultados += "Datos del C lculo:" + crlf
    IF oFrm:THMCOT:getData()

        oFrm:cResultados += " COT en la planta : " +
PADL(ALLTRIM(oFrm:COT_Planta:getData()),5) + crlf

    ENDIF

    oFrm:cResultados += " Valor calculado de THM: " + Var2Char(oFrm:nTHM) +
crlf + ;
        " Porcentaje de Error: " + cPorcentajeError + crlf + ;
        " M,todo de C lculo: " + cMetodoCalculo + crlf + ;
        "===== " + crlf +
crlf
ELSE

    oFrm:cResultados +=
"===== "+crlf+crlf

ENDIF

oFrm:cResultados += cResultadosAnteriores
oFrm:Resultados:SetData(oFrm:cResultados)

RETURN .T.
*****

```

```

FUNCTION calcularGuardarTHM(oFrm)
*****
IF calcularTHM(oFrm)
  THM->(DBAPPEND())
  IF !NETERR()

    THM->fecha      := oFrm:fecha:getData()
    THM->PLANTA     := plantas->codigo
    THM->MUESTREO   := muestreo->codigo
    THM->NOMMUESTRE := oFrm:PuntoMuestreo:XBPSLE:getData()
    THM->METODO     := oFrm:THMt:getData()
    THM->COTPLANTA  := VAL(oFrm:COT_Planta:getData())
    THM->PH         := VAL(oFrm:pH:getData())
    THM->COLOR      := VAL(oFrm:Color:getData())
    THM->TEMPERATUR := VAL(oFrm:Temperatura:getData())
    THM->TURBIEDAD  := VAL(oFrm:Turbiedad:getData())
    THM->CLORORESID := VAL(oFrm:CloroResidual:getData())
    THM->COT        := VAL(oFrm:COT:getData())
    THM->THM        := oFrm:nTHM
    THM->NOTAS      := oFrm:cNotas

    THM->(DBUNLOCK())

  ENDIF

ENDIF

RETURN NIL

#include "_THM.PRG"
* Include program code for the implementation-level class of the form
//

```

