



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA CIVIL – APROVECHAMIENTOS HIDRÁULICOS

**DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERÍAS A PRESIÓN**

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
DOCTOR EN INGENIERÍA

PRESENTA:  
**M. en C. ROJACQUES MOMPREMIER**

TUTOR  
**DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES**

COMITÉ TUTOR  
**DR. RAMÓN DOMÍNGUEZ MORA**  
**DR. ADRIÁN PEDROZO ACUÑA**  
**DR. EDGAR G. MENDOZA BALDWIN**  
**DR. JESÚS GRACIA SÁNCHEZ**

MÉXICO, D.F. FEBRERO DE 2015.

**JURADO ASIGNADO:**

**Presidente:** Dr. Ramón Domínguez Mora  
**Secretario:** Dr. Jesús Gracia Sánchez  
**Primer vocal:** Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles  
**Segundo vocal:** Dr. Adrián Pedrozo Acuña  
**Tercer vocal:** Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin

Lugar donde se realizó la tesis:

**INSTITUTO DE INGENIERÍA, UNAM**

**TUTOR DE LA TESIS**

**DR. ÓSCAR ARTURO FUENTES MARILES**

---

FIRMA

## AGRADECIMIENTOS

A Dios por su amor, su bondad y su misericordia  
A mi Padre Joseph Jacques Mompremier, mi madre Alette Mompremier (Q.E.P.D)  
A mis hermanos: Roosevelt, Rosenie, Rose Urielle, Rodolph, Rose Elmyrne, Ronel y Adeline  
A Bertude Pierre por su apoyo incondicional  
A mi tutor, Dr. Óscar Arturo Fuentes Mariles  
A mi comité tutorial: Dr. Jesús Gracia Sánchez, Dr. Ramón Domínguez Mora, Dr. Adrián Pedrozo Acuña, Dr. Edgar Gerardo Mendoza Baldwin  
A la Universidad Nacional Autónoma de México, mi Alma Mater  
Al Instituto de Ingeniería de la UNAM  
A la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laval  
A mi supervisora, Dra. Genevieve Pelletier  
Al Patel College of Global Sustainability, University of South Florida  
Mis supervisores: Dr. Kalanity Vairavamoorthy y Dr. Kebreab Ghebremichel  
Al Consejo Nacional de Ciencias y Tecnológico (CONACYT)  
A José Alberto Sánchez Cruz, Martín Jiménez Magaña, Raquel Teresa Montes Rojas y Liliana Marrufo Vázquez por su amistad y apoyo  
A todos aquellos que me han apoyado durante el desarrollo de esta investigación principalmente:  
Juan Ansberto Cruz Geron, Faustino De Luna Cruz, Óscar Pozos Estrada, David Ricardo Mendoza, Hipólito Morales Lorenzo, Luis Omar García Hernández, Ángel Bautista Tadeo, Jaime Andrés Patiño Márquez, Juan Orozco Martínez, Eliud De La Rosa Camacho, Javier González, Pedro Loredó Medina, Jesús David Ramírez Orta, Marcelina Flores Gaona, Alejandro Maya Trejo, Jorge Modesto Bernal Hernández, Claudia Lucía Hernández, Darío Alfredo Hernández Aguilar, Alejandra Morales Zamacona y Laura Vélez Morales.

## ***TABLA DE CONTENIDO***

<b><i>INTRODUCCIÓN</i></b> .....	<b>1</b>
<b><i>OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN DOCTORAL</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>OBJETIVOS PARTICULARES</i></b> .....	<b>3</b>
<b><i>HIPÓTESIS</i></b> .....	<b>4</b>
<b>CAPITULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS</b>	
<b><i>1. CALIDAD DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE</i></b> .....	<b>6</b>
<b><i>1.1. LAS CARACTERISTICAS FISICAS DEL AGUA</i></b> .....	<b>6</b>
1.1.1. Turbiedad.....	6
1.1.2. El Color.....	6
1.1.3. Sabor y Olor.....	7
1.1.4. Temperatura.....	7
1.1.5. El pH.....	7
<b><i>1.2. LAS CARACTERISTICAS QUÍMICAS DEL AGUA</i></b> .....	<b>8</b>
1.2.1. Arsénico.....	8
1.2.2. Bario.....	8
1.2.3.El Cadmio.....	8
1.2.4. El Cromo.....	8
1.2.5. El Flúor.....	9
1.2.6. Zinc.....	9

1.2.7. El Cobre.....	9
1.2.8. El hierro y manganeso.....	9
<b>1.3. CARACTERISTICAS BACTERIOLÓGICAS DEL AGUA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4. CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DEL AGUA.....</b>	<b>9</b>
<b>1.5. TRATAMIENTO DEL AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO.....</b>	<b>10</b>
1.5.1. Cloración.....	10
1.5.2. El cloro y sus propiedades.....	10
1.5.3. Características del cloro.....	10
1.5.4. Factores que influyen en la cloración.....	11
1.5.5. Reacciones química.....	12
1.5.6. Proceso de cloración.....	12
1.5.7. Método de aplicación del cloro.....	12
<b>1.6. ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL TRANSPORTE Y MEZCLA EN REDES DE AGUA POTABLE.....</b>	<b>13</b>
1.6.1. Mecanismo de transporte.....	13
1.6.1.1. Advección.....	13
1.6.1.2. Difusión.....	13
1.6.1.2.1. Ecuación de la difusión.....	14
1.6.1.2.2. Tipos de difusión.....	14
1.6.1.3. Dispersión.....	14
1.6.1.4. Reacción.....	14
<b>1.7. MODELACIÓN DE LAS REACCIONES QUÍMICAS.....</b>	<b>15</b>
1.7.1. Coeficientes de reacción con el volumen de agua $k_b$ .....	16
1.7.2. Coeficientes de reacción con la pared de la tubería $k_w$ .....	17

<b>1.8.</b>	<b>MEZCLA EN CRUCES DE TUBERÍAS.....</b>	<b>21</b>
<b>1.9.</b>	<b>MEZCLA EN DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO.....</b>	<b>22</b>
<b>1.10.</b>	<b>MODELACIÓN DEL TIEMPO DE TRASLADO.....</b>	<b>22</b>
<b>1.11.</b>	<b>MODELIZACIÓN DE LA TRAZABILIDAD.....</b>	<b>23</b>
<b>CAPITULO 2: ESTADO DEL ARTE</b>		
<b>2.1.</b>	<b>DECAIMIENTO DEL CLORO EN REDES DE AGUA POTABLE.....</b>	<b>26</b>
	2.1.1. Desarrollo del biofilm.....	26
<b>2.2.</b>	<b>MEZCLA EN CRUCES DE TUBERÍAS.....</b>	<b>30</b>
	2.2.1. Modelo de los cruces de tuberías.....	35
	2.2.1.1. Mezcla de los dos flujos.....	35
	2.2.1.2. No ocurre la mezcla de los flujos.....	37
	2.2.2. Ecuación propuesta.....	38
	2.2.3. Resultados obtenidos con las ecuaciones desarrolladas.....	39
<b>CAPITULO 3: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO</b>		
<b>3.</b>	<b>COMPOSICIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>41</b>
	3.1. Instrumentación.....	47
	3.1.1. Medidor de flujo.....	47
	3.1.2. Medidor de presión.....	48
	3.1.3. Funcionamiento del equipo de medición de presión.....	49
	3.1.4. Medidor de cloro en línea.....	50
	3.1.5. Características del medidor de cloro en línea.....	51
	3.1.5.1. Dimensión del instrumento.....	51
	3.1.5.2. Función principal.....	51
	3.1.5.3. Propósito funcional del equipo.....	52
	3.1.5.4. Principio de funcionamiento.....	52

3.1.5.5. Especificación funcional.....	53
3.1.5.6. Escalas de medición.....	54
3.1.5.7. Salida analógica.....	54
3.1.5.8. Entrada analógica.....	55
3.1.5.9. Fuente de alimentación universal.....	55
3.1.5.10. Celda de flujo.....	55
3.1.6. Instalación y configuración de los data loggers.....	55
<b>3.2. ALIMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL.....</b>	<b>60</b>
<b>3.3. ESTABLECIMIENTO DE LOS ESCENARIOS (DATOS DE ENTRADA).....</b>	<b>62</b>
3.3.1. Alimentación simple .....	62
3.3.2. Alimentación doble (válida para entradas a 45°, 90°, 180°).....	63
3.3.3. Alimentación doble caso T.....	63
3.3.4. Alimentación triple.....	63
<b>3.4. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA.....</b>	<b>63</b>
3.4.1. Gastos.....	63
3.4.2. Concentración.....	65
<b>3.5. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO.....</b>	<b>65</b>
3.5.1. Análisis e interpretación de resultados de la prueba 1.....	66
3.5.2. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 2).....	68
3.5.2.1. Análisis e interpretación de los resultados de la prueba 2.....	69
3.5.3. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 3).....	69
3.5.3.1. Análisis e interpretación de resultado de la prueba 3.....	70
3.5.4. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 4).....	71
3.5.4.1. Análisis e interpretación de resultados de la prueba 4.....	72
3.5.5. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 5).....	73

3.5.6. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 6).....	75
3.5.6.1. Análisis e interpretación de los resultados de la prueba 6.....	75
3.5.7. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 7).....	76
3.5.8. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 8).....	79
3.5.8.1 Análisis e interpretación de resultado de la prueba 8.....	81
3.5.9. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 9).....	82
<b>3.6. TENDENCIA DE FLUJOS EN UN CRUCE DE TUBERÍAS</b> (Dos entradas a 45° y 90°: $Q_{e1} > Q_{e2}$ , $C_{e1} > C_{e2}$ y $Q_{e1} < Q_{e2}$ $C_{e1} > C_{e2}$ ).....	84
<b>3.7. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS</b> [Dos entradas a 180°: $Q_{e1} < Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ ].....	88
<b>3.8. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS</b> [Dos entradas a 180°: $Q_{e1} > Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ ].....	89
<b>3.9. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS</b> [Caso T y Y: una entrada y dos salidas].....	90
<b>3.10. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS</b> [Caso T y Y: Dos entradas y una salida].....	91
<b>3.11. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERIAS</b> [Una entrada y tres salidas].....	91
<b><i>CAPITULO 4. MODELACIÓN NUMÉRICA Y CASO DE APLICACIÓN</i></b>	
<b>4. UTILIDAD DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA.....</b>	<b>94</b>
4.1. Utilidad predictiva.....	94
4.2. Definición del modelo para el decaimiento del cloro.....	94
4.2.1. Calibración del modelo.....	95
4.2.2. Datos y métodos.....	95



4.2.3. Estimación del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, $k_b$ .....	96
4.2.3.1. Estimación del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, $k_b$ [Laboratorio Hidráulico de la Universidad de Guanajuato].....	99
4.2.4. Reacción con la pared de la tubería $k_w$ .....	102
4.2.5. Coeficiente de Hazen-Williams.....	102
<b>4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO (MEZCLA EN CRUCES).....</b>	<b>103</b>
4.3.1. Metodología para calibrar el modelo (cruces de tuberías).....	103
4.3.2. Validación del modelo.....	104
4.3.3. Resultados obtenidos con el modelo matemático (una entrada y tres salidas).....	106
4.3.4. Calibración del modelo matemático (dos entradas y una salida).....	110
4.3.5. Calibración del modelo matemático (dos entradas y dos salidas).....	112
4.3.6. Calibración del modelo matemático (dos entradas y dos salidas).....	115
4.3.7. Calibración del modelo matemático (dos entradas y dos salidas).....	118
4.3.8. Calibración del modelo matemático (dos entradas y dos salidas).....	121
<b>4.4. CASO DE APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....</b>	<b>124</b>
4.4.1. Situación geográfica.....	124
4.4.2. Población.....	126
<b>4.5. ESTUDIO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE DUBERGER- LES SAULES.....</b>	<b>126</b>
4.5.1. Datos generales.....	126
4.5.2. Características de la red y algunos parámetros.....	127
4.5.2.1. Coeficiente pérdida de carga.....	127
<b>4.6. MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA (CASO DE APLICACIÓN).....</b>	<b>128</b>
4.6.1. Coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua $k_b$ .....	128
4.6.2. Coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías.....	129

4.6.3. Mixing parameter.....	129
<b>4.7. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....</b>	<b>131</b>
4.7.1. Relación entre el tiempo de viaje y la concentración del cloro simulados.....	134
<b>4.8. VALIDACION DEL MODELO.....</b>	<b>136</b>
4.8.1. Comparación entre el modelo que considera mezcla completa y modelo que considera mezcla incompleta (caso de esta tesis).....	136
4.8.2. Ejercicio propuesto para comprobar el impacto de la mezcla incompleta en la predicción del decaimiento del cloro en redes de agua.....	137
 <b>CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES</b>	
<b>CONCLUSIONES.....</b>	<b>145</b>
<b>RECOMENDACIONES.....</b>	<b>148</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>149</b>
<b>ANEXO 1:</b> Comparación de resultado entre el modelo experimental y las ecuaciones desarrolladas....	153
<b>ANEXO 2:</b> Relación entre el tiempo de viaje y el decaimiento del cloro.....	155
<b>ANEXO 3:</b> Número de Reynolds calculados a partir de los gastos de entrada.....	161
<b>ANEXO 4:</b> Comparación de resultados obtenidos en el modelo experimental y los resultados obtenidos con las ecuaciones desarrolladas.....	165
<b>ANEXO 5:</b> Resultados obtenidos durante las pruebas de decaimiento del cloro (Universidad de Guanajuato).....	171

## ***LISTA DE FIGURAS***

### **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Figura 1.1.	Equipo para la determinación de color en el agua.....	7
Figura 1.2.	Ilustración conceptual de la variación de la concentración en el tiempo.....	15

### **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**

Figura 2.1.	Formación del biofilm.....	26
Figura 2.2.	Desarrollo de biofilm con respecto a la velocidad.....	27
Figura 2.3.	Factores que contribuyen al decaimiento del cloro.....	27

### **CAPÍTULO 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO**

Figura 3.1.	Cruces de tuberías.....	42
Figura 3.2.	Fuente de abastecimiento del dispositivo físico.....	42
Figura 3.3.	Tanques de almacenamiento de 420 litros cada uno.....	43
Figura 3.4.	Vista general del dispositivo experimental (plano).....	44
Figura 3.5.	Vista en 3D del dispositivo experimental.....	44
Figura 3.6.	Elevación de los tanques.....	45
Figura 3.7.	Dispositivo físico construido [cruces de 45°].....	45
Figura 3.8.	Dispositivo físico construido [cruces de 90°].....	46
Figura 3.9.	Dispositivo físico construido [tres entradas].....	46
Figura3.10.	Vista del medidor de flujo.....	47
Figura 3.11.	Medidor de presión.....	48
Figura 3.12.	Sistema de adquisición de medición de presión.....	49
Figura 3.13.	Medidor de cloro en línea.....	50
Figura 3.14.	Dimensiones del equipo de medición de cloro.....	51

Figura 3.15.	Algunos detalles del equipo de medición de cloro.....	51
Figura 3.16.	Presentación del medidor de cloro en línea.....	53
Figura 3.17.	Detalles de la celda de flujo del medidor de cloro.....	55
Figura 3.18.	Presentación de los data loggers modelo El USB-4.....	56
Figura 3.19.	Menú principal del programa Easy Log USB.....	57
Figura 3.20.	Primer paso del programa EasyLog USB.....	57
Figura 3.21.	Segundo paso del programa EasyLog USB.....	58
Figura 3.22.	Tercer paso del programa EasyLog USB.....	58
Figura 3.23.	Último paso del programa EasyLog USB.....	59
Figura 3.24.	Instalación de los data loggers 2 y 3.....	59
Figura 3.25.	Instalación de los data loggers 4 y 5.....	60
Figura 3.26.	Tipos de alimentación.....	61
Figura 3.27.	Dispositivo físico de cruces de tuberías.....	62
Figura 3.28.	Datos de entrada en las pruebas de Laboratorio.....	64
Figura 3.29.	Carga constante en los tinacos durante las pruebas.....	64
Figura 3.30.	Proceso de dosificación durante las pruebas.....	65
Figura 3.31.	Tendencia de dos flujos en un cruce de 45° y 90°, $Q_{e1} > Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ .....	84
Figura 3.32.	Tendencia de dos flujos en un cruce de tuberías, entradas a 180° $Q_{e1} < Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ .....	88
Figura 3.33.	Tendencia de dos flujos en un cruce de tuberías, entrada a 180°, $Q_{e1} > Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ .....	89
Figura 3.34.	Tendencia de un flujo en una T.....	90
Figura 3.35.	Tendencia de dos flujos en una T.....	91
Figura 3.36.	Tendencia de tres flujos en un cruce de tuberías.....	92

## CAPÍTULO 4. MODELACIÓN NUMÉRICA Y CASO DE APLICACIÓN

Figura 4.1.	Sistema montado para estimar el coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, $k_b$ .....	97
Figura 4.2.	Ubicación del parámetro mixing parameter en el archivo INP.....	104
Figura 4.3.	Gastos simulados, Alimentación: simple, una entrada y tres salidas.....	107
Figura 4.4.	Velocidades simuladas, Alimentación simple, una entrada y tres salidas.....	107
Figura 4.5.	Concentraciones simuladas, Alimentación simple: una entrada y tres salidas.....	108
Figura 4.6.	Concentraciones simuladas, Alimentación doble: dos entradas y una salida.....	111
Figura 4.7.	Gastos simulados, Alimentación doble: $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}=C_{e2}$ . ....	113
Figura 4.8.	Concentraciones simuladas, Alimentación doble: $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}=C_{e2}$ .....	113
Figura 4.9.	Gastos simulados, Alimentación doble: $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}<C_{e2}$ . ....	116
Figura 4.10.	Velocidades simuladas, Alimentación doble: $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}<C_{e2}$ .....	116
Figura 4.11.	Gastos simulados, Alimentación doble: $Q_{e1}>Q_{e2}$ , $C_{e1}>C_{e2}$ .....	119
Figura 4.12.	Concentraciones simuladas (Alimentación doble: $Q_{e1} > Q_{e2}$ , $C_{e1} > C_{e2}$ .....	120
Figura 4.13.	Gastos simulados, Alimentación doble: $Q_{e1} < Q_{e2}$ , $C_{e1} > C_{e2}$ .....	122
Figura 4.14.	Concentraciones simuladas, Alimentación doble: $Q_{e1} < Q_{e2}$ , $C_{e1} > C_{e2}$ .....	122
Figura 4.15.	Proceso de tratamiento del agua en un sistema de abastecimiento.....	127
Figura 4.16.	Curvas de presiones en los nudos de la red Duberger-Les Saules.....	128
Figura 4.17.	Zona de posible mezcla de los flujos dentro de la red.....	130
Figura 4.18.	Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 1).....	131
Figura 4.19.	Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 2).....	132
Figura 4.20.	Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 3).....	132
Figura 4.21.	Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 4).....	133
Figura 4.22.	Curvas de nivel de concentración de cloro (Hora 6).....	133
Figura 4.23.	Tiempo de viaje simulado VS concentración del cloro simulada.....	135

Figura 4.24.	Curva de nivel de concentración de cloro mediante Epanet 2.0 (hora 6).....	136
Figura 4.25.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 1) [modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta].....	138
Figura 4.26.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 2) [modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta].....	139
Figura 4.27.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 3) [modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta].....	140
Figura 4.28.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 4).....	141
Figura 4.29.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 5) [modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta].....	142
Figura 4.30.	Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 6) [modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta].....	143

## ***LISTA DE TABLAS***

### **CAPÍTULO 1. FUNDAMENTOS TEÓRICOS**

Tabla 1.1.	Valores reportados del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua $k_b$ .....	17
Tabla 1.2.	Valores del coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías de diferente diámetro [Alcocer, et al, 2003].....	21

### **CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE**

Tabla 2.1.	Variación del número de Reynolds en diferentes escenarios.....	34
Tabla 2.2.	Mezcla incompleta en cruces de tuberías.....	36
Tabla 2.3.	Mezcla incompleta en cruces de tuberías.....	37

### **CAPÍTULO 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO**

Tabla 3.1.	Diámetros de los cruces de tuberías construidos.....	41
Tabla 3.2.	Registro del programa de medición de presión.....	50
Tabla 3.3.	Resultados de la prueba 1.....	66
Tabla 3.4.	Resultados de la prueba 2.....	68
Tabla 3.5.	Resultados de la prueba 3.....	69
Tabla 3.6.	Resultados de la prueba 4.....	71
Tabla 3.7.	Resultados de la prueba 5.....	73
Tabla 3.8.	Resultados de la prueba 6.....	75
Tabla 3.9.	Resultados de la prueba 7.....	77
Tabla 3.10.	Resultados de la prueba 8.....	79
Tabla 3.11.	Resultados de la prueba 9.....	82
Tabla 3.12.	Obtención del coeficiente R [ $Q_{e1} > Q_{e2}$ ; $C_{e1} > C_{e2}$ ].....	85
Tabla 3.12A	Obtención del coeficiente R [ $Q_{e1} > Q_{e2}$ ; $C_{e1} < C_{e2}$ ].....	85

Tabla 3.13.	Obtención del coeficiente R [entradas a 180° $Q_{e1} < Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ ].	89
Tabla 3.14.	Obtención del coeficiente R [entradas a 180° $Q_{e1} > Q_{e2}$ y $C_{e1} > C_{e2}$ ].	90
Tabla 3.15.	Coeficiente R estimado en los casos estudiados en esta investigación.	92

#### **CAPÍTULO 4. MODELACIÓN NUMÉRICA Y CASO DE APLICACIÓN**

Tabla 4.1.	Valores del coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías de diferente diámetro, [Alcocer, et al. 2004].	102
Tabla 4.2.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: (una entrada y tres salidas).	105
Tabla 4.3.	Comparación entre valores simulados y valores medidos (Alimentación simple: una entrada y tres salidas).	109
Tabla 4.4.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: (dos entradas y una salida).	110
Tabla 4.5.	Comparación entre valores simulados y medidos (dos entradas y una salida).	111
Tabla 4.6.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}=C_{e2}$ ).	112
Tabla 4.7.	Comparación entre valores simulados y valores medidos: ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}=C_{e2}$ ).	114
Tabla 4.8.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}<C_{e2}$ ).	115
Tabla 4.9.	Comparación de resultados simulados y medidos: ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ , $C_{e1}<C_{e2}$ ).	117
Tabla 4.10.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: ( $Q_{e1}>Q_{e2}$ , $C_{e1}>C_{e2}$ ).	118
Tabla 4.11.	Comparación de resultados simulados y medidos ( $Q_{e1}>Q_{e2}$ , $C_{e1}>C_{e2}$ ).	120
Tabla 4.12.	Resultados obtenidos en el modelo experimental: ( $Q_{e1}<Q_{e2}$ , $C_{e1}>C_{e2}$ ).	121
Tabla 4.13.	Comparación de resultados simulados y medidos: ( $Q_{e1}<Q_{e2}$ , $C_{e1}>C_{e2}$ ).	123
Tabla 4.13A.	Mixing parameter asignado a cada caso estudiado.	124
Tabla 4.14.	Población total de la zona de estudio.	126
Tabla 4.15.	Coeficiente de decaimiento para diferentes épocas del año [Binet et al 2010].	129
Tabla 4.16.	Valores del coeficiente mixing parameter para los puntos seleccionados.	131



**LISTA DE GRAFICAS****CAPÍTULO 3. DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y PRUEBAS DE LABORATORIO**

Gráfica 3.1.	Resultados de la prueba 1, Entrada 1.....	67
Gráfica 3.2.	Resultados de la prueba 1, Entrada 2 .....	67
Gráfica 3.3.	Resultados de la prueba 1, Salida 1.....	67
Gráfica 3.4.	Resultados de la prueba 1. Salida 2.....	67
Gráfica 3.5.	Resultados de la prueba 2. Salida 1.....	68
Gráfica 3.6.	Resultados de la prueba 2. Salida 2.....	68
Gráfica 3.7.	Resultados de la prueba 3. Entrada1.....	70
Gráfica 3.8.	Resultados de la prueba 3. Entrada 2.....	70
Gráfica 3.9.	Resultados de la prueba 3. Salida 1.....	70
Gráfica 3.10.	Resultados de la prueba 4. Entrada1.....	71
Gráfica 3.11.	Resultados de la prueba 4. Entrada 2.....	71
Gráfica 3.12.	Resultados de la prueba 4. Salida 1.....	72
Gráfica 3.13.	Resultados de la prueba 4. Salida 2.....	72
Gráfica 3.14.	Resultados de la prueba 5. Entrada 1.....	73
Gráfica 3.15.	Resultados de la prueba 5. Entrada 2.....	74
Gráfica 3.16.	Resultados de la prueba 5. Salida 1.....	74
Gráfica 3.17.	Resultados de la prueba 5. Salida 2.....	74
Gráfica 3.18.	Resultados de la prueba 7. Entrada 1.....	77
Gráfica 3.19.	Resultados de la prueba 7. Entrada 2.....	78
Gráfica 3.20.	Resultados de la prueba 7. Salida 1.....	78
Gráfica 3.21.	Resultados de la prueba 7. Salida 2.....	78
Gráfica 3.22.	Resultados de la prueba 8. Entada 1.....	79

Gráfica 3.23.	Resultados de la prueba 8. Entrada 1.....	80
Gráfica 3.24.	Resultados de la prueba 8. Salida 1.....	80
Gráfica 3.25.	Resultados de la prueba 8. Salida 2.....	80
Gráfica 3.26.	Resultados de la prueba 9. Entrada 1.....	82
Gráfica 3.27.	Resultados de la prueba 9. Entrada 2.....	83
Gráfica 3.28.	Resultados de la prueba 9. Salida 1.....	83
Gráfica 3.29.	Resultados de la prueba 9. Salida 2.....	83

**CAPÍTULO 4. MODELACIÓN NUMÉRICA Y CASO DE APLICACIÓN**

Gráfica 4.1.	Curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua, Culiacán.....	96
Gráfica 4.2.	Curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua, Instituto de Ingeniería.....	98

## ***RESUMEN***

En esta tesis se realizó una investigación sobre el comportamiento de dos flujos con concentraciones de cloro diferentes, los cuales se mezclan al coincidir en un cruce o nudo de una red de tuberías para el transporte de agua potable. Se construyó un dispositivo físico en un laboratorio de la Coordinación de Hidráulica y Ambiental del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, donde se practicaron diferentes eventos, variando los gastos y las concentraciones de cloro en las entradas de los cruces, para después medir su concentración en las salidas. Los resultados de laboratorio mostraron que la suposición general que afirma que siempre ocurre una mezcla completa y homogénea en un cruce es errónea, y se obtuvieron expresiones matemáticas para el cálculo de la concentración del cloro en función de las concentraciones iniciales y la disposición de las tuberías que se intersectan. Con apoyo del programa EPANET-BAM, se realizaron simulaciones numéricas del mismo fenómeno, y se observó una buena correlación entre los resultados experimentales y los numéricos, utilizando las expresiones propuestas para el cálculo de la concentración en los nudos de una red. Finalmente, se aplicó el modelo planteado a una red real de la región de Duberger-Les Saules, en la Ciudad de Quebec, Canadá, lo que permitió identificar las zonas del sistema donde es conveniente la dosificación adicional de cloro.

**Palabras claves:** Mezcla, Cruce de tuberías, EPANET-BAM, Mixing parameter

## ***ABSTRACT***

This thesis investigates the mixing phenomena in pipe junctions in water distribution systems. Network simulation models frequently assume the mixing at pipe junctions is complete and instantaneous. In the present study, a series of experiments with varying inflows and sodium hypochlorite concentrations were carried out in the Hydraulic Laboratory of the Institute of Engineering at the National Autonomous University of Mexico. Experimental results in this study showed that mixing is not complete in most of the cases; intersecting flows tend to bifurcate rather than mix completely. Numerical simulations of these experiments have been performed using EPANET-BAM. Good agreement between calculated and measured values was obtained. Finally, the model was also tested using the data of a real water distribution system in the region of Duberger-Les Saules, Quebec City, Canada. Larger vulnerability zone was identified due the impact of the incomplete mixing at cross junction in the prediction of the chlorine in a water distribution network.

**Keys words: Mixing, Cross junctions, EPANET-BAM, Mixing parameter**

# *INTRODUCCIÓN*

El agua es esencial para la vida, y por ello todos debemos disponer de un abastecimiento satisfactorio (suficiente, salubre y accesible). La mejora del suministro del agua proporciona beneficios tangibles para la salud, debe realizarse el máximo esfuerzo para lograr que la calidad del agua sea la adecuada. El agua potable, según se define, no ocasiona ningún daño a la salud cuando se consume, teniendo en cuenta las diferentes sensibilidades que pueden presentar las personas en las distintas etapas de su vida. El acceso al agua potable es fundamental para la salud, uno de los derechos humanos básicos y un componente fundamental de las políticas eficaces de protección de la salud.

La importancia del agua, el saneamiento y la higiene para la salud han quedado reflejados en los documentos de diversos foros internacionales sobre el tema. La Asamblea General de las Naciones Unidas declaró que el periodo de 2005 a 2015 es el Decenio Internacional para la Acción «**El agua, fuente de vida**». La disponibilidad al agua potable es importante para la salud y desarrollo de las personas en los ámbitos nacional, regional y local.

Las enfermedades relacionadas con consumo de agua tienen una gran repercusión en la preservación de la salud de la población, y por ello debe asegurarse que su calidad sea adecuada.

De acuerdo con un estudio realizado por la Organización Mundial de la Salud (OMS), en las hojas informativas sobre enfermedades relacionadas con el agua, se señala que alrededor del 80 por ciento de las enfermedades, y más de una tercera parte de todas las muertes en los países en desarrollo, están relacionadas con el agua. Se estima que cada ocho segundos muere un niño en

el mundo por una enfermedad relacionada con el agua. Cada año, más de cinco millones de personas fallecen por dolencias vinculadas a su consumo, la falta de higiene en su manejo en el hogar, o defectos en la distribución de este líquido.

La diarrea, originada en un 30 por ciento de los casos por el agua, causa una grave deshidratación y desnutrición, y casi 3 millones de niños menores de cinco años en el planeta mueren por esta causa, lo que representa la cuarta parte de muertes en este grupo de edad.

Dado que la calidad del agua puede mejorarse mediante el tratamiento adecuado de la misma, la disponibilidad hídrica se mantiene a través de la aplicación correcta de las operaciones de tratamiento y la gestión integral de los sistemas de distribución.

La naturaleza y la forma de las normas relativas al agua potable pueden diferir de unos países o regiones a otros. No hay un método único que pueda aplicarse de forma universal. En el desarrollo y la aplicación de normas es fundamental tener en cuenta las leyes vigentes relativas al agua, a la salud y al gobierno local, y evaluar la capacidad para desarrollar y aplicar reglamentos de cada país. Los métodos que pueden funcionar en un país o región no necesariamente pueden transferirse a otros países o regiones. En el desarrollo de un marco reglamentario, es fundamental que cada país evalúe sus necesidades y capacidades.

En México, uno de los parámetros de calidad que debe cumplir el agua potable está definido por la modificación de la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994 (publicada en el Diario Oficial de la Federación, el miércoles 22 de noviembre de 2000), acorde con las directrices comunitarias. A nivel internacional, la EPA (Environmental Protection Agency) determina las pautas a seguir en el control de la calidad del agua potable a través de la Safe Drinking Water Act.

Uno de los parámetros para evaluar la calidad del agua es el cloro residual libre que contiene el agua en una concentración de entre 0.5 y 1.50 mg/l, para cumplir con las normas de salud, y sobre todo mantenerla libre de contaminantes, ya sean químicos o agentes de otro tipo que causan efectos nocivos al ser humano.

La calidad del agua para consumo humano en las redes de distribución de agua potable es un asunto que interesa las sociedades en el mundo por su relación con la salud pública. Lo que justifica el amplio desarrollo de los modelos para analizar la calidad del agua.

Por lo anterior, el desarrollo de estudios para mejorar la calidad del agua en las redes de tuberías de distribución es muy importante para la sociedad y fue uno de los motivos para emprender ésta investigación doctoral que se dividió en cinco capítulos.

El **capítulo I**, tiene como propósito fundamental revisar los fundamentos teóricos sobre calidad del agua en las redes de tuberías para la distribución de agua potable.

En el **capítulo II**, se hace una exploración documental sobre los resultados de distintas clases de estudios sobre la calidad del agua en redes de agua potable, especialmente sobre el decaimiento del cloro y las posibles mezclas de flujos de distinta concentración en los cruces de tuberías.

El **capítulo III**, se refiere al desarrollo del dispositivo físico construido en el Laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM, para estudiar el fenómeno de mezcla de flujos en cruces de tuberías. También se describen las pruebas realizadas, los resultados obtenidos y las ecuaciones desarrolladas a partir de los resultados.

En el **capítulo IV**, se propone una metodología para el desarrollo y calibración de un modelo matemático. Se aplicó el modelo planteado a una red real de agua potable en la región de Duberger-Les Saules en la Ciudad de Québec, Canadá. Los resultados obtenidos se presentan en el mismo capítulo.

Finalmente, en **capítulo V**, se presentan las conclusiones, así como las recomendaciones y las posibles líneas de investigación a seguir.

## **OBJETIVOS GENERALES DE LA INVESTIGACIÓN DOCTORAL**

La investigación tiene los siguientes objetivos:

- Estudiar la mezcla de flujos en cruces de tuberías.
- Desarrollar un modelo matemático que permita simular la calidad del agua en una red de distribución, tomando en cuenta el decaimiento del cloro en el tiempo durante su propagación en las conducciones, de acuerdo con el material de la tubería, así como el posible mezclado en los sitios donde se encuentren dos o más tuberías.
- Determinar la variación de la concentración del hipoclorito de sodio en una red de distribución de agua potable a lo largo del tiempo, en diferentes puntos de la red, para determinar si su concentración es adecuada y cumple con las normas oficiales establecidas.

## **OBJETIVOS PARTICULARES**

- Determinar la concentración del cloro en las entradas y salidas de las uniones de más de dos tuberías (uniones en Tee y Cruces) dentro de la red.
- Ubicar las zonas de la red y los puntos donde la cloración es deficiente, siendo necesaria la reinyección de cloro, en caso de que no se cumpla con los niveles marcados por la norma correspondiente, para que cualquier punto de dicha red cumpla con los requisitos necesarios.

## HIPÓTESIS

Para estudiar la calidad del agua en redes de distribución, se plantearon las siguientes hipótesis:

- La concentración de cloro en los cruces de tuberías, depende de los gastos de entrada y de la concentración del cloro en los flujos de entrada.
- La correlación entre el tiempo de viaje y la concentración del cloro en un punto de la red es un factor que permite validar el modelo matemático.
- Las características físicas y bacteriológicas del agua modifican el coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua,  $k_b$ .
- La edad de servicio de las tuberías puede modificar al coeficiente de reacción del cloro con la pared de las tuberías,  $k_w$ .



***CAPITULO I***  
***Fundamentos teóricos***

## **1. CALIDAD DE AGUA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

Para determinar la calidad del agua potable se consideran características de tipo físico, químico, biológico y radiológico.

### **1.1. LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL AGUA**

Las principales características físicas del agua que se consideran para su calidad son:

#### **1.1.1. Turbiedad**

La turbiedad se define como una medida del grado de transparencia del agua debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuantos más sólidos depositados haya en el agua, menos transparente es, dando la impresión de estar más sucia y más alta será la turbidez. La turbidez es considerada una buena medida de la calidad del agua. Es decir, la turbidez es la reducción de la transparencia de un líquido causada por la presencia de materia sin disolver.

Existen algunas interferencias en la medición de turbidez del agua, como la presencia de residuos flotantes o sedimentados, la coloración, el crecimiento de algas y las burbujas de aire presentes en la muestra de agua para analizar. Su instrumento de medición es el nefelómetro o turbidímetro, que mide la intensidad de la luz dispersada cuando un rayo de luz pasa a través de una muestra de agua.

En lagos, la turbidez del agua se mide con un disco Secchi. Se trata un disco blanco y negro que se deja caer en el agua atado a una cuerda. Se anota la profundidad que el disco alcanza hasta que se pierde de vista. Esto proporciona una estimación del nivel de turbidez en el lago.

Su unidad de medida es en NTU (Unidades Nefelométricas de Turbiedad). La turbiedad del agua para consumo humano no debe superar en ningún caso 5 NTU.

#### **1.1.2. El Color**

El agua de uso doméstico e industrial tiene como parámetro de aceptación la de ser incolora. En la actualidad, gran cantidad del agua disponible presenta color por lo que no puede suministrarse hasta haberse removido el color.

Las aguas superficiales pueden tener color debido a la presencia de iones metálicos naturales (hierro y manganeso), materia orgánica y contaminantes domésticos e industriales, como en el caso de las industrias de papel, curtido y textil; esta última causa de coloración puede ser por los desechos de teñido los cuales imparten colores en una amplia variedad, los cuales pueden ser fácilmente reconocidos y rastreados.

El color que en el agua produce la materia suspendida y disuelta, se le denomina “color aparente”, una vez eliminado el material suspendido, el color remanente se le conoce como “color verdadero”.

La unidad para la medición del color que se usa como estándar, es el color que produce 1 mg/L de Platino en la forma de cloroplatinato. La Figura 1.1, muestra uno de los equipos utilizados para la determinación del color el equipo que mide el color del agua.



**Figura 1.1. Equipo para la determinación de color en el agua**

### **1.1.3. Sabor y Olor**

Se originan por la presencia de bacterias, vegetación, desechos domésticos o industriales. La prueba para su determinación es organoléptica.

### **1.1.4. Temperatura**

Es un parámetro importante en el proceso de desinfección señalándose como valor óptimo 10 a 15° C.

### **1.1.5. El pH**

Por definición, el pH es una medición de la cantidad relativa de iones de hidrógeno e hidróxido en el agua. Un agua que contenga más iones de hidrógeno tiene una acidez mayor, mientras que el agua que contiene más iones de hidróxido indica un rango básico. El rango varía de 0 a 14, siendo 7 el valor neutro. Un pH menor a 7 indica acidez, mientras que un pH mayor a 7, indica basicidad.

## **1.2. LAS CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS DEL AGUA**

Las características del agua están dadas por la presencia o ausencia de determinados elementos. Los más comunes que se encuentran en el agua se listan a continuación.

### **1.2.1. Arsénico:**

En estado natural, el arsénico se presenta generalmente como una sal. En el hábitat humano es frecuentemente un agente contaminante en las zonas mineras. Un aspecto importante a tener en cuenta es que el arsénico se acumula en el cabello, las uñas y huesos. Por otra parte, los niños son particularmente sensibles a él.

Las investigaciones han revelado que la ingesta de arsénico a través del agua potable durante períodos prolongados puede causar cáncer de vejiga, pulmones, piel, riñones, fosas nasales, hígado y próstata. La Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) indica que el contenido máximo de arsénico del agua potable debe ser de 0.01 ppm, a manera de proteger a los consumidores de los efectos de la exposición al arsénico a largo plazo.

### **1.2.2. Bario**

Los efectos de los diferentes compuestos de bario sobre la salud dependen de la solubilidad del compuesto en agua. Los compuestos de bario que no son solubles en agua, generalmente son menos dañinos y se usan a menudo en medicina. Aquellos compuestos de bario que se disuelven fácilmente en agua pueden causar efectos adversos en seres humanos. Ingerir altos niveles de compuestos de bario solubles en agua por tiempo breve, puede provocar: dificultad para respirar; aumento de la presión sanguínea; alteraciones en el ritmo del corazón; irritación del estómago; edema cerebral, debilidad muscular, entre otras.

### **1.2.3. El Cadmio**

El cadmio puede estar presente en el agua potable a causa de la contaminación industrial o por el deterioro de las tuberías galvanizadas. El cadmio es un metal altamente tóxico y se le han atribuido varios casos de envenenamiento alimenticio.

### **1.2.4. El Cromo**

El cromo hexavalente es cancerígeno, y en el agua potable debe determinarse para asegurarse de que no está contaminada con este metal.

La presencia del cromo en las redes de agua potable puede producirse por desechos de industrias que utilizan sales de cromo. Es importante tener en cuenta la industria de curtidumbres, ya que allí se utilizan grandes cantidades de cromo que después son descargadas a los ríos, donde kilómetros más adelante son interceptados por bocatomas de acueductos. Una concentración excesiva de cromo puede producir enfermedades, como cáncer broncopulmonar.

### **1.2.5. El Flúor**

En concentraciones altas los fluoruros son tóxicos. La razón es, por una parte, la precipitación del calcio en forma del fluoruro de calcio y, por otra parte, puede formar complejos con los centros metálicos de algunas enzimas.

### **1.2.6. Zinc**

La presencia del zinc en el agua potable puede deberse al deterioro de las tuberías de hierro galvanizado y a la pérdida del zinc del latón. En tales casos puede sospecharse también de la presencia de plomo y cadmio por ser impurezas del zinc, usadas en la galvanización. También puede deberse a la contaminación con agua de desechos industriales

### **1.2.7. El Cobre**

La presencia de excesos de cobre en agua potable puede ocasionar problemas de sabor y color y producir manchas en los artefactos sanitarios y la ropa durante el lavado, además de afectar la salud de las personas por trastornos gastrointestinales, como náuseas, seguidas de vómitos y diarrea.

### **1.2.8. El hierro y manganeso**

Son dos elementos similares que pueden ser un problema para el abastecimiento del agua potable. El hierro es más común que el manganeso, pero frecuentemente se presentan juntos. No son peligrosos para la salud. Sin embargo el hierro y el manganeso pueden darle al agua sabor, olor y color indeseable y causar manchas rojizos-café en la ropa, porcelana, platos, utensilios, vasos, lavaplatos, accesorios de plomería y concreto. El hierro y el manganeso son elementos comunes en la superficie de la tierra. A medida que el agua se filtra por el suelo, estos minerales pueden disolverse de las rocas y ser acarreados hacia el agua subterránea. Además, los tubos de hierro pueden disolver hierro dentro del abastecimiento de agua residencial.

## **1.3. CARACTERÍSTICAS BACTERIOLÓGICAS DEL AGUA**

Son organismos patógenos, como virus, bacterias, protozoarios. Algunos organismos causantes de enfermedades en los humanos se originan en las descargas fecales de individuos infectados. Otros están presentes en las descargas fecales de animales.

## **1.4. CARACTERÍSTICAS RADIOLÓGICAS DEL AGUA**

Se ha comprobado, en estudios realizados tanto con seres humanos como con animales, que la exposición a dosis bajas y moderadas de radiación puede aumentar la incidencia de cáncer a

largo plazo. En concreto, hay estudios con animales que sugieren que la exposición a la radiación puede aumentar la tasa de malformaciones genéticas.

No se prevén efectos radiológicos perjudiciales para la salud debido al consumo de agua si ésta contiene concentraciones de radionúclidos menores que los niveles de referencia.

## **1.5. TRATAMIENTO DEL AGUA PARA EL CONSUMO HUMANO**

El agua cruda en su estado natural, sea de origen superficial o subterráneo, no puede ser utilizada para la bebida sin un adecuado tratamiento, por no encontrarse lo suficientemente pura desde el punto de vista de su calidad sanitaria. Al pasar a través del suelo o por la superficie de la tierra el agua se va contaminando y puede arrastrar organismos, nocivos para la salud humana, como son bacterias, virus y parásitos. El tratamiento de desinfección, es un requisito obligatorio para que el agua pueda ser destinada para consumo humano.

Los estudios aseguran procesos de sedimentación, floculación, coagulación y filtración a pesar de todo no pueden reducir completamente el contenido bacteriológico del agua y para asegurar su calidad antes de su distribución se requiere una desinfección final, la cual frecuentemente se lleva a cabo por medio de la aplicación de cloro

### **1.5.1. Cloración**

La cloración consiste entonces en la adición de cloro al agua, ya sea cloro puro o alguno de sus compuestos, en dosis adecuadas para cumplir la normativa vigente respecto a la calidad bacteriológica y a la concentración de desinfectante activo residual que debe estar presente en todo punto de la red de distribución de agua potable.

### **1.5.2. El cloro y sus propiedades**

Es un elemento químico de número atómico 17, situado en el grupo de los halógenos de la tabla periódica de los elementos, con símbolo  $\text{Cl}_2$ . Se listan a continuación las principales características del cloro.

### **1.5.3. Características del cloro**

El cloro es un elemento químico identificado con el símbolo  $\text{Cl}_2$ , sus principales características son:

- No se encuentra en la naturaleza en forma pura;
- Bajo condiciones normales de temperatura y presión es un gas amarillo, verdoso, muy irritante, puede atacar la piel y los ojos;

- El cloro a baja presión es un líquido color ámbar que a presión y temperaturas normales vaporiza rápidamente;
- Se combina con otros elementos formando productos sólidos o líquidos más estables;
- El cloro libre en forma de ácido hipocloroso tiene mayor poder bactericida que el ácido hipoclorito, dependiendo del pH y la temperatura del agua;
- Cuanto mayor sea el grado de oxidación del cloro, mayor es el poder oxidante del compuesto formado;
- El cloro es ligeramente soluble en agua (5%).

#### **1.5.4. Factores que influyen en la cloración**

Entre los principales factores que influyen en el proceso de desinfección y tratamiento del agua con cloro, figuran los siguientes:

- Naturaleza, concentración y distribución de los organismos que se van a eliminar, así como de la concentración y distribución de la sustancia desinfectante y de los productos de su reacción con el agua, así como de las sustancias disueltas o en suspensión presentes en el agua.
- Naturaleza y temperatura del agua objeto del tratamiento.
- Tiempo de contacto entre el cloro y el agua y;
- pH del agua.

Entre las múltiples sustancias que pueden contener las aguas naturales, algunas influyen en gran medida en la eficiencia de la cloración. Por ejemplo, en presencia de sustancias orgánicas, la acción desinfectante del cloro es menor. El amoníaco y otros compuestos orgánicos nitrogenados consumen cloro. El hierro y el manganeso reaccionan con el cloro aumentando la demanda de éste, y, una vez oxidados, contribuyen a aumentar la turbiedad del agua.

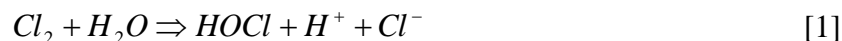
Respecto a la temperatura, la eficiencia de cloración aumenta al aumentar aquélla, naturalmente siempre que las demás condiciones permanezcan invariables. A pesar de esto, ocurre que como en el agua a baja temperatura el cloro permanece más tiempo, puede llegar a compensarse la mayor lentitud de la desinfección con la mayor duración del cloro en el agua.

El tiempo de contacto es otro factor importante a tener en cuenta, ya que durante este tiempo, tienen lugar las reacciones entre el cloro, el agua y las sustancias en ella presentes. El tiempo de contacto mínimo suficiente para una cloración eficaz es, a su vez, función de la temperatura, pH, concentración y naturaleza de los organismos y sustancias presentes en el agua, así como de la concentración y estado en que se halle el cloro. Puede decirse que a menor tiempo de contacto menor será la destrucción de microorganismos. Se recomienda un tiempo de contacto mínima de

30 minutos para asegurar la muerte bacteriana. El pH juega un papel de suma importancia mientras mayor es el pH del agua, mayor es el tiempo requerido para destruir los microorganismos.

### 1.5.5. Reacciones químicas

El cloro gaseoso reacciona completamente con el agua para formar ácido hipocloroso:



El ácido hipocloroso, a su vez se disocia en el agua para formar ion hipoclorito:



### 1.5.6. Proceso de cloración

El proceso de cloración consiste en lo siguiente:

La solución diluida se inyecta mediante de una bomba centrífuga o peristáltica o por medio de un tubo Venturi al sistema de abastecimiento o al modelo físico a una tasa controlada.

### 1.5.7. Método de aplicación del cloro

El cloro se aplica al agua por medio de inyectores de cloro gaseoso e hipocloradores. Los inyectores de cloro gaseoso son usados por plantas de gran tamaño. El cloro gaseoso está contenido en cilindros a presión donde el cloro se encuentra licuado. El hipoclorador es la parte del sistema encargada de desinfectar el agua. Cuando el agua baja por se conduce a gravedad, es instalado en la parte superior del tanque y cuando los sistemas operan por medio de bombeo, en la caseta de control. Los servicios de agua potable urbanos y rurales deben tener como mínimo 0.2 mg/L en los terminales de red.

Los hipocloradores se clasifican en cuatro tipos:

- de desplazamiento positivo
- de aspiración
- de succión y
- de tabletas



En la cloración de desplazamiento positivo se inyecta hipoclorito mediante pistón o diafragma, mientras que en la cloración de aspiración el cloro es inyectado mediante el vacío que crea el flujo del agua, en cuanto a la cloración de succión, se inyecta cloro por la succión de la bomba y finalmente en la cloración de tabletas el cloro es inyectado mediante la disolución controlada de tabletas de cloro.

## **1.6. ECUACIONES FUNDAMENTALES DEL TRANSPORTE Y MEZCLA EN REDES DE AGUA POTABLE**

Para modelar la calidad del agua en una red de distribución de agua potable, es importante tomar en cuenta tres principios fundamentales:

- Conservación de la masa en las tuberías y en los nodos; es decir la masa que entra en la tubería debe de ser igual a la que sale.
- Mezcla completa e instantánea del agua que entra en los nodos, este principio no siempre se cumple, Mompremier et al. (2007).
- Reacciones cinéticas del decaimiento del cloro durante su trayectoria desde los tanques de almacenamiento y a través de las tuberías.

### **1.6.1. Mecanismo de transporte**

Dado la importancia del transporte de un fluido, es importante definir los mecanismos por los cuales puede ocurrir. Son cuatro mecanismos y a continuación se definen cada uno de ellos.

- Advección
- Difusión
- Dispersión
- Reacción

#### **1.6.1.1. Advección**

En ocasiones el término advección se utiliza como sinónimo con convección. Sin embargo, técnicamente hablando, se prefiere utilizar la convección para describir el transporte por la difusión.

#### **1.6.1.2. Difusión**

Es el proceso por el cual las moléculas, iones u otras pequeñas partículas espontáneamente se mezclan, moviéndose de regiones de relativamente alta concentración hacia regiones de baja concentración.

### 1.6.1.2.1. Ecuación de la difusión

La ecuación de la ecuación de la difusión puede ser representada por la siguiente expresión:

$$\text{Flujo de masa} = -D \frac{\partial C}{\partial x} \quad [3]$$

donde

- C concentración de la sustancia (mg/L)
- D coeficiente de difusión ( $\text{m}^2\text{s}^{-1}$ )

En esta ecuación el signo negativo considera que la sustancia fluye de un área de alta concentración hacia una de baja.

### 1.6.1.2.2. Tipos de difusión

Los resultados experimentales comprueban que cada sustancia contenida en el agua puede reaccionar con otras sustancias, con las paredes del tubo, con la propia agua o con los microorganismos y como resultado de diferentes procesos químicos o bioquímicos puede variar su concentración. Según la reacción, las sustancias en el agua se pueden dividir en tres grupos:

- a) **Conservativas:** Su concentración no varía en el tiempo. El flúor, que a veces se introduce al agua potable por cuestiones de salud dental, pertenece a ese grupo.
- b) **No conservativas y decrecientes:** Su concentración decrece con el tiempo de residencia en el agua. El cloro que se usa como desinfectante pertenece a este grupo.
- c) **No conservativas y crecientes:** Son compuestos químicos que se forman en el agua y su concentración se incrementa con el tiempo de residencia. Un ejemplo son los trihalometanos que se forman al reaccionar el cloro con la materia orgánica presente en el agua.

### 1.6.1.3. Dispersión

En química, la dispersión es el conjunto de fenómenos mediante los cuales las especies químicas pasan de unos compartimentos ambientales a otros o se diluyen dentro de uno de ellos.

### 1.6.1.4. Reacción

La reacción es todo proceso termodinámico en el cual una o más sustancias por efecto de un factor energético, se transforman, cambiando su estructura molecular y sus enlaces, en otras sustancias llamadas productos.

## 1.7. MODELACIÓN DE LAS REACCIONES QUÍMICAS

Dentro de la masa del fluido se producen reacciones químicas, que son función de la concentración del producto adicionado, de la tasa de reacción y del orden de la reacción:

$$\frac{dC}{dt} = k \cdot C^n \quad [4]$$

donde

$k_b$       tasa de reacción  
 $n$         número de orden de la reacción

En forma resumida, se puede decir que según el tipo de sustancia existen cuatro diferentes funciones de decaimiento:

1. Conservativa
2. Decaimiento de orden cero
3. Decaimiento de primer orden
4. Decaimiento de segundo orden

La Figura 1.2 muestra una ilustración conceptual de la variación de la concentración en el tiempo para reacciones de decaimiento de orden  $n$ .

$n = 0$   
 $n = 1$   
 $n = 2$

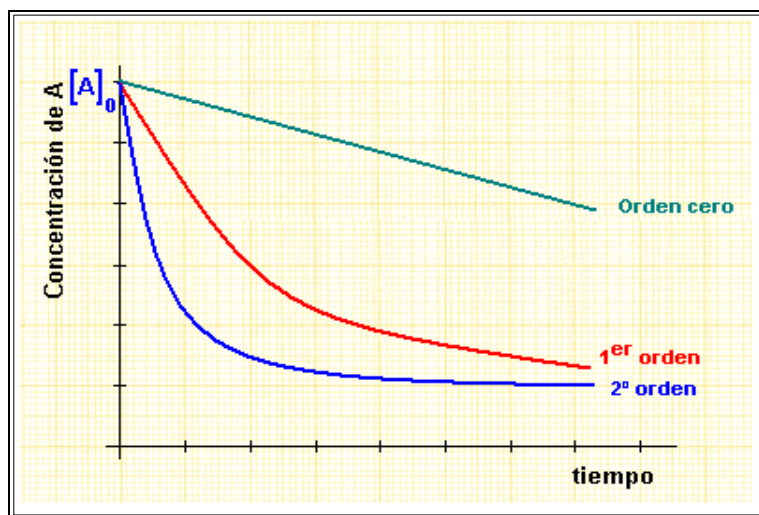


Figura 1.2. Ilustración conceptual de la variación de la concentración en el tiempo para reacciones de decaimiento de orden  $n$ .

Se han desarrollado numerosos modelos (Rossman, Clark, Grayman) para tener en cuenta estas reacciones, concluyendo que el modelo de decaimiento de primer orden se ajusta adecuadamente a los desinfectantes que se utilizan en la práctica.

$$\frac{dC}{dt} = \pm k.C^n \quad [5]$$

queda en:

$$\frac{dC}{dt} = \pm k.C \quad [6]$$

donde

k es la tasa de reacción global [1/T]

Luego:

$$\frac{dC}{C} = \pm k.dt \quad [7]$$

integrando

$$\int_{C_0}^C \frac{dC}{C} = \pm k \cdot \int_{t_0}^t dt \quad [8]$$

Finalmente se queda la siguiente expresión:

$$\ln \frac{C}{C_0} = \pm k.t \quad C = C_0 \cdot e^{\pm k.t} \quad [9]$$

### 1.7.1. Coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, $k_b$

La desinfección es uno de los procesos más comúnmente modelados. Como se mostrará en la figura 2.1, el cloro reacciona con materia orgánica natural (MON) y con la pared de la tubería, produciendo reacciones de oxidación con el biofilm y/o con el material de la tubería (ocasionando corrosión).

La constante,  $k$ , depende a su vez del coeficiente de reacción de masa (bulk coefficient,  $k_b$ ) y del coeficiente de reacción de pared (wall coefficient,  $k_w$ ).

$$-\frac{dC}{dt} = k_b C^n \quad [10]$$

donde

- C concentración del cloro
- n orden de la reacción
- $k_b$  constante que depende de la composición del agua.

Dado que esa composición será diferente para cada lugar, el coeficiente,  $k_b$ , toma valores diferentes. En la Tabla 1.1 se muestran unos valores del coeficiente  $k_b$ , obtenidos a partir de varios trabajos de investigación en diferentes países por autores diferentes.

**Tabla 1.1. Valores reportados del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua  $k_b$**

Lugar de realización	Coefficiente de decaimiento (1/día)	pH	T (°C)
Planta de tratamiento de agua, "Watcom Water", Bellingham, Washington, USA	0.883	8.05	17.40
Planta de tratamiento Fairfield, California, USA.	1.160	8.15	17.90
Estación de bombeo Harrisburg Oberlin, Pennsylvania, USA	0.232	7.52	16.46
Acueducto del norte de Marin Russia R., North Penn "Water Authority "Lansdale, Pennsylvania USA	1.320	7.42	22.20
Hua et al [1999], tratamiento final y tap Inglaterra	0.040 – 5.400	-	-
Alcocer et al,[2003]. Sector "Zona Norte", Culiacán, Sinaloa, México	0.040 – 0.693	6.00-7.00	29-33
Alcocer, et al Culiacán [2003]. Sector "Humaya", Culiacán, Sinaloa, México	0.012- 0.194	6.00-7.00	29 – 35

### 1.7.2. Coeficiente de reacción del cloro con las paredes de las tuberías, $k_w$

El material de la pared de las tuberías es un factor importante en el decaimiento del cloro en las redes de agua potable. El cloro y otras sustancias contenidas en el agua pueden reaccionar con los materiales de la pared de la tubería.

Estudios anteriores mencionan que la reacción con la pared de las tuberías normalmente se mide en términos de la tasa de reacción y depende de la cantidad de superficie disponible para reaccionar y la tasa de transferencia de masa entre el fluido y la pared de la tubería. Dentro de las tuberías, en ocasiones la reacción con la pared de las tuberías puede ser significativa. Según los estudios realizados, este tipo de reacción es representada por un crecimiento de primer u orden cero. La ecuación desarrollada para representar la constante  $k_w$ , se muestra a continuación:

$$k_{pared} = \frac{2k_w k_f C}{r(k_w + k_f)} \quad [11]$$

donde

$k_w$  constante de la velocidad de reacción en la pared (L/T)

$k_f$  coeficiente de la transferencia de masa (L/T)

$r$  radio de la tubería (L)

De forma simultánea en caso de presentarse una reacción de primer orden en la masa del fluido  $k_b$ , se podrá obtener una constante global de decaimiento,  $k$  (1/T), ésta incorporará las reacciones en la pared de la tubería y en la masa del fluido, teniendo:

$$k = k_b + \frac{2k_w k_f}{R_H (k_w + k_f)} \quad [12]$$

donde

$k_w$  constante de la velocidad de reacción en la pared (L/T)

$k_b$  constante de reacción del cloro con el volumen de agua (1/T)

$k$  constante global de decaimiento (1/T)

$k_f$  transferencia de masa (L/T)

Cuando  $k_w$  y  $k_b$  son iguales, el coeficiente global de reacción de decaimiento  $k$ , podrá variar de una tubería a otra, porque mantiene una relación con el caudal y el diámetro de la tubería.

Sin embargo, para poder aplicar la ecuación 12, primeramente se tiene que calcular el coeficiente de transferencia de masa  $k_f$ , usado para determinar la velocidad a la que el desinfectante es transportado.

Para obtener este coeficiente, se utiliza el número adimensional de Sherwood, el coeficiente de difusión de la tubería y el diámetro. La expresión matemática para calcular la transferencia de masa es la siguiente:

$$k_f = \frac{S_h D}{d} \quad [13]$$

donde

- $S_h$  número de Sherwood
- $D$  difusividad molecular de la sustancia en el seno del fluido ( $L^2/T$ ).
- $d$  diámetro de la tubería (L)

El número de Sherwood, es un número adimensional utilizado en transferencia de masa, representa el cociente entre la transferencia de masa por convección y difusión. El número de Sherwood puede ser representado por la siguiente ecuación.

$$S_h = \frac{K_c L}{D} \quad [14]$$

donde

- $K_c$  coeficiente global de transferencia de masa [L/T]
- $L$  longitud característica [L]
- $D$  difusividad del componente [ $L^2/T$ ]

Cabe mencionar que depende de las condiciones del flujo, existen otras ecuaciones para calcular el número de Sherwood, a continuación, se presentan unos ejemplos:

Para condiciones de flujo estático, el número de Sherwood,  $S_h$  será igual a 2. Para el caso de flujo turbulento, el número de Sherwood se calcula mediante la siguiente ecuación:

$$S_h = 0.023 \text{Re}^{0.83} \left( \frac{\nu}{D} \right)^{0.333} \quad [15]$$

donde

- $\text{Re}$  número de Reynolds (adimensional)
- $\nu$  viscosidad cinemática del fluido ( $L^2/T$ )
- $D$  difusividad molecular de la sustancia en el seno del fluido ( $L^2/T$ ).

En caso presentarse flujo laminar, el número de Sherwood se obtiene mediante la siguiente expresión.

$$S_h = 3.65 + \frac{0.0668 \left(\frac{d}{L}\right) \text{Re} \left(\frac{\nu}{D}\right)}{1 + 0.04 \left[ \left(\frac{d}{L}\right) \text{Re} \left(\frac{\nu}{D}\right)^{2/3} \right]} \quad [16]$$

donde

- L longitud (L)
- D difusividad molecular de la sustancia en el seno del fluido (L<sup>2</sup>/T).
- Re Número de Reynolds
- $\nu$  Viscosidad cinemática (L<sup>2</sup>/T)
- d diámetro de la tubería (L)

La experiencia demuestra que la determinación del valor de la constante de reacción en la pared es un trabajo muy complicado porque se requiere una inversión muy alta, para la infraestructura y equipo.

Sin embargo, investigadores como Rossman et al. (1994), Hua et al. (1999) y Alcocer et al. (2002), realizaron varios estudios con el objetivo de cuantificar el impacto que tiene la reacción del cloro con las paredes de las tuberías.

Rossman et al. (1993), a través de sus estudios en campo, concluyeron que el valor de  $k_w$  está en un rango de valores entre 0.15 y 0.45 T<sup>-1</sup>. Cabe mencionar que la reacción del agua en los tanques de la zona en estudio puede influir mucho en los resultados, en otra palabra es posible encontrar resultados diferentes según la zona de estudio.

Hua et al. (1999), en sus estudios, encontraron que  $k_w$  representa solo el 10% del coeficiente de reacción con el agua,  $k_b$ .

Alcocer et al. (2002), en su primer trabajo realizado en una ciudad mexicana, utilizaron tuberías de 10 y 16 pulgadas y obtuvo valores entre 0.1509 y 0.4140 1/día.

Dos años después, Alcocer et al. (2004), realizaron otro estudio en el cual obtuvo los resultados que se muestran en la Tabla 1.2.



**Tabla 1.2. Valores del coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías de diferente diámetro, [Alcocer et al. 2004]**

Diámetro (pulgadas)	Velocidad (m/s)	$k_w$ (m/día)
3	0.340	0.473
6	0.695	2.072
10	0.485	0.320
12	1.155	1.338
18	0.550	0.729

Sin embargo en las tuberías metálicas, la rugosidad aumenta con la antigüedad, debido a incrustaciones y a los efectos de agentes corrosivos. Algunas investigaciones sugieren que el mismo proceso que incrementa la rugosidad de las tuberías tendería a aumentar también la capacidad de reacción de las paredes, especialmente con el cloro y otros desinfectantes.

### 1.8. MEZCLA EN CRUCES DE TUBERÍAS

Con respecto a la mezcla en cruces de tuberías, varios investigadores en México, así que en otros países aseguran que la mezcla es “*completa e instantánea*”. Para calcular esta concentración en las salidas se emplea la ecuación 17. Por lo anterior, la concentración de la sustancia (cloro) que abandona el nodo de mezcla, será la media ponderada de las concentraciones de las tuberías que llegue. Por ejemplo,

$$C_{i|x=0} = \frac{\sum_{j \in I_k} Q_j C_{j|x=L_j} + Q_{k,ext} C_{k,ext}}{\sum_{j \in I_k} Q_j + Q_{k,ext}} \quad [17]$$

donde

- i tramo con caudal que abandona el nodo k;
- $I_k$  conjunto de tramos con caudal que llega al nodo k;
- $L_j$  longitud del tramo j, (m);
- $Q_j$  caudal en el tramo j, ( $m^3/s$ );
- $Q_{k,ext}$  caudal externo que entra a la red en el nodo k, ( $m^3/s$ )
- $C_{k,ext}$  concentración del caudal externo que entra en el nodo k, (mg/L)

La mayoría de los programas comerciales de simulación de calidad de agua emplean la condición de mezcla completa e instantánea en los nodos.

Uno de los trabajos más recientes relacionado con la mezcla en cruces de tuberías, fue realizado en el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, II-UNAM, en el cual se manifiesta que no siempre presenta este tipo de condición [Mompremier y Fuentes, 2007]. Según los resultados encontrados, se pueden presentar dos casos:

- 1) Mezcla en los cruces: En este caso, los dos flujos que entran al cruce con diferentes concentraciones llegan a mezclarse al abandonar el cruce.
- 2) No hay mezcla: En este caso, los dos flujos que entran casi no se mezclan; [Cruickshank y Chávez, 2004]. Los trabajos recientes mencionan que cuando no hay una mezcla, existe un decaimiento de la concentración inicial [Mompremier, 2010].

### 1.9. MEZCLA EN DEPÓSITOS DE ALMACENAMIENTO

Con respecto a la mezcla de sustancias en depósitos, los modelos de calidad de agua desarrollados en México así que en el extranjero consideran que la mezcla es completa.

Mientras que va pasando el tiempo, la concentración de la sustancia va decreciendo dentro del depósito. Este decaimiento se expresa de la siguiente forma:

$$\frac{\partial(V_s C_s)}{\partial t} = \sum Q_i C_{i|x=L} - \sum_{j \in O_s} Q_j C_s - r(C_s) \quad [18]$$

donde

- $V_s$  volumen de agua almacenada en el instante t, [m<sup>3</sup>];
- $C_s$  concentración dentro de la instalación de almacenamiento [mg/L];
- $Q_i$  caudal en la tubería que entra, [m<sup>3</sup>/s];
- $Q_j$  caudal en tubería saliente, [m<sup>3</sup>/s];
- $I_s$  conjunto de tuberías que suministran caudal al depósito;
- $O_s$  conjunto de tuberías que extraen agua del tanque.

### 1.10. MODELACIÓN DEL TIEMPO DE TRASLADO

El tiempo de traslado brinda una idea general de la calidad del agua en cualquier punto del sistema. Normalmente se cuantifica desde que el agua ingresa al sistema (desde un tanque o reservorio) hasta que llega al nodo en estudio.

$$A_j = A_{j-1} + \frac{X}{V} \quad [19]$$

donde

$A_j$  tiempo de traslado (age) del agua en el nodo  $j$

$X$  distancia entre el nodo  $j-1$  y el nodo  $j$

$V$  velocidad entre el nodo  $j-1$  y el nodo  $j$

### 1.11. MODELIZACIÓN DE LA TRAZABILIDAD (TRACE)

Se llama trazabilidad o seguimiento del flujo de agua a la identificación del origen del agua en cualquier punto del sistema. En sistemas que tienen más de una fuente de agua, se utiliza para:

- Determinar qué porcentaje de caudal proviene de cada fuente en cada nodo
- Determinar el área de influencia de cada fuente individual, y su variación a través del tiempo.

# ***CAPÍTULO II***

## ***Estado del arte***

## 2. ESTADO DEL ARTE

La misión principal de un sistema de abastecimiento de agua potable es la entrega del agua requerida por los usuarios con una presión suficiente y una calidad adecuada, en cualquier momento del día.

Un aspecto importante a destacar sobre los estudios realizados por la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA, 1999), se refiere al cloro ya que esta sustancia tiene una alta capacidad para la desinfección del agua, además de su aplicación para la desactivación de la mayoría de los microorganismos a un costo relativamente bajo.

El cloro es el desinfectante más comúnmente utilizado en la desinfección del agua, debe mantenerse una concentración óptima en el agua para evitar la aparición de organismos patógenos que deterioran la calidad del agua potable.

En diversos estudios en los que el cloro es utilizado como desinfectante en los sistemas de distribución de agua, se ha observado que disminuye su concentración durante el día. En la literatura técnica sobre el tema se explica que existen varios aspectos que contribuyen a este decaimiento, entre los que se pueden mencionar:

- La trayectoria del flujo y el tiempo de residencia en el agua;
- Formación de biofilm
- El regimen del flujo
- El tipo de material de las tuberías y
- La mezcla de las sustancias disueltas en los cruces de tuberías.

Para determinar las causas del deterioro de la calidad del agua es necesario tener en cuenta los factores que intervienen en el proceso de potabilización y su distribución, haciendo énfasis en la desinfección inicial y en el sostenimiento de los niveles de cloro residual libre a medida que fluye el agua por la red. Además, es necesario analizar los factores que afectan su calidad, como consecuencia de largos tiempos de retención en estructuras de almacenamiento con características deficientes, estas estructuras normalmente se localizan justo antes de los sitios de consumo.

En el siguiente apartado se mencionan algunas investigaciones sobre el decaimiento del cloro en las tuberías de las redes de distribución de agua potable.

## 2.1. DECAIMIENTO DEL CLORO EN REDES DE AGUA POTABLE

Según estudios realizados por varios investigadores a través el mundo, existen varios factores que contribuyen al decaimiento del cloro en una red de distribución de agua potable, algunos de los cuales se mencionan en los siguientes apartados.

### 2.1.1. Desarrollo del biofilm

Es sabido que uno de los principales agentes que influyen en este deterioro de las tuberías es la formación de biofilm en su interior.

Las tuberías de los sistemas de distribución se asemejan a reactores de crecimiento de biofilm, con un complicado conjunto de componentes y reacciones que varían con el tiempo. Wable et al. (1991), mencionaron que el flujo de agua favorece el transporte de nutrientes y bacterias, el crecimiento bacteriano también puede verse favorecido por la alta superficie de contacto de las paredes de las tuberías y las partículas presentes en el agua (Figura 2.1).

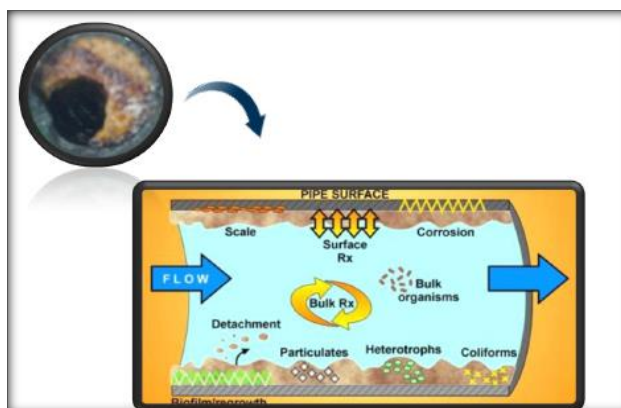
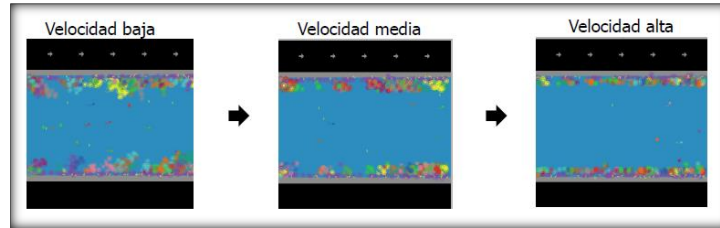


Figura 2.1. Formación del biofilm

Piera (2002), define el biofilm como una respuesta de las bacterias ante un medio adverso. Dependiendo de la especie, las bacterias adoptarán diferentes estrategias para la formación del biofilm.

Por otra parte Martínez et al. (2013), señalaron que el grosor del biofilm adherido a la pared interna de la tubería disminuye con el aumento de la velocidad de flujo, esto debido al incremento de la fuerza de corte y la disminución del espesor de la capa límite (Figura 2.2).



**Figura 2.2. Desarrollo de biofilm con respecto a la velocidad (Martínez et al. ,2013)**

En forma resumida, en la Figura 2.3, se presentan los factores más importantes para el decaimiento del cloro en un sistema de agua potable:

- La trayectoria del flujo y el tiempo de residencia en el agua
- El régimen del flujo
- El tipo de material de las tuberías
- La mezcla de las sustancias disueltas en los cruces de tuberías



**Figura 2.3. Factores que contribuyen al decaimiento del cloro Martínez et al. (2013)**

A la luz de los resultados obtenidos en su modelo de decaimiento de cloro en una tubería simple, Biswas et al. (1993), encontraron que las paredes de las tuberías pueden ser factores de decaimiento del cloro en redes de agua potable.

En una de sus publicaciones Clark et al. (1993), mencionaron que el tiempo de residencia es otro factor que contribuye al decaimiento de cloro en una red de distribución. En varios países se utilizan tanques de almacenamiento domiciliarios (tinacos) como reserva, y esta agua almacenada solo se utiliza cuando existe una suspensión en el suministro de la red, este tipo de uso genera mayor impacto sobre la calidad del agua que se consume, debido a que el agua se mantiene estancada durante mucho tiempo. En este caso, el tiempo de residencia en dichos tanques pueden ser llegar a ser muy altos, lo cual genera una disminución en las concentraciones del cloro. Esta sola condición provocaría graves consecuencias para la salud de los usuarios.

Vasconcelos et al. (1997) y Vieira et al. (2004), desarrollaron modelos para predecir la variación de la concentración de sustancias disueltas con el tiempo, bajo un conjunto conocido de condiciones hidráulicas, y se basan en la desaparición del cloro; siendo el modelo cinético de decaimiento de primer orden.

Rossmann (2000), aseguró que los largos tiempos de reacción producen generalmente altos consumos del desinfectante para mantener un efecto residual y mayor formación de subproductos de la desinfección (SPD). Por otro lado, un incremento del potencial hidrógeno (pH) incrementa los Trihalometanos (THM), también la temperatura tiene un efecto directo en las velocidades de reacción, a mayor temperatura, mayor velocidad (Rodríguez y Sérodes, 2001).

La Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU, USEPA, por su sigla en inglés reportó en 2003, con la colaboración de diversos proveedores de agua importantes de Nueva Jersey, información acerca de las cantidades y los tipos de subproductos de la desinfección (SPD) que aparecen normalmente a causa de la desinfección. Además, se están realizando diversos estudios sanitarios para seguir investigando las posibles conexiones entre los efectos perjudiciales para la salud y las distintas cantidades de estos subproductos presentes en el agua potable.

Tzatchkov (2003), desarrolló las ecuaciones y el esquema numérico de un modelo para calcular las concentraciones no permanentes del cloro en los puntos de una red de agua potable. El modelo se compone de dos partes: modelo hidráulico y modelo fisicoquímico. El modelo considera la reacción del cloro con el agua y con el material del tubo por medio de ecuaciones cinéticas de primer orden. Se obtuvo una ecuación diferencial que admite una solución analítica usando el método de las características.

Por otra parte Boulos et al. (2006), demostraron que la reacción del cloro con la materia orgánica no solamente contribuye a su decaimiento, sino que también forma subproductos de la desinfección (SPD), incluyendo trihalometanos (THM) y ácidos halo-acéticos (AH), los cuales pueden ser cancerígenos y generar otros problemas de salud.

Respecto al decaimiento del cloro, Al-Jaser (2007), ha puesto énfasis sobre el impacto de la edad de servicio de las tuberías sobre la constante de decaimiento del cloro. Por esta misma razón, fueron analizadas trescientos dos secciones de tubería de diferentes tamaños y materiales



para obtener las constantes de decaimiento del cloro para esas tuberías. Los resultados mostraron que la edad de servicio de las tuberías, es un factor importante que no debe ser ignorado en algunos tubos como los de hierro fundido, acero, cemento forradas con hierro dúctil, y de cemento forradas con hierro fundido.

En una de sus publicaciones, Diana Robescu y Nicolae Jivan (2008), utilizaron la ecuación de dispersión para modelar el decaimiento del cloro residual a lo largo de la tubería principal del sistema de distribución de agua potable de la ciudad de Ramnicu, Rumania, tomando en cuenta factores como la distancia, la velocidad y la turbulencia. El modelo está incorporado a un programa que simula la calidad del agua en un sistema de distribución llamada FlexPDE. Los resultados obtenidos con este programa fueron comparados con datos experimentales, y presentaron resultados satisfactorios. La ecuación de dispersion que plantearon es la siguiente:

$$\frac{\partial \bar{C}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\bar{u}\bar{C}) = \frac{\partial}{\partial x} \left( \varepsilon_x \frac{\partial \bar{C}}{\partial x} \right) - KC \quad [20]$$

donde:

C	concentración del cloro [mg/L]
t	tiempo [s]
k	constante de decaimiento del cloro [ $t^{-1}$ ]
u	velocidad [m/s]
x	distancias de las tuberías [m]

Es importante mencionar que Tzatchkov et al. (2004), han puesto énfasis sobre el análisis de la ecuación cinética de la reacción del cloro residual con el agua, separada de la reacción con la pared de las tuberías. A partir de muestras tomadas en varios puntos de la red de agua potable de una ciudad en México, señalan que el decaimiento del cloro libre es proporcional al contenido de materia orgánica en el agua, a un mayor contenido de materia orgánica se produce un decaimiento más rápido.

El cloro residual libre en la muestra se consume, oxidando la materia orgánica, fierro, manganeso y material nitrogenado en el agua. Esta reacción es más intensa en el inicio del proceso, dado que al transcurrir el tiempo esos componentes ya han sido oxidados, y el cloro

restante tiene un poder oxidante menor. Por esta razón, la tasa de decaimiento es más alta en el principio, y decrece con el tiempo.

De acuerdo a lo señalado, se considera el modelo desarrollado por Levenspiel (1999), que utiliza una ecuación cinética de orden mixto con dos coeficientes de decaimiento  $k_1$  y  $k_2$ , es decir:

$$-\frac{dC}{dt} = \frac{k_1 C}{1 + k_2 C} \quad [21]$$

Separando variables, la ecuación anterior puede integrarse para obtener:

$$\ln \frac{C_0}{C} + k_2 (C_0 - C) = k_1 t \quad [22]$$

Por medio de transformaciones, la ecuación 22 puede representarse mediante:

$$\frac{\ln\left(\frac{C_0}{C}\right)}{C_0 - C} = -k_2 + \frac{k_1 t}{C_0 - C} \quad [23]$$

donde:

$C_0$                     concentración inicial [mg/L]

$C$                         concentración final [mg/L]

$k_1$  y  $k_2$ ,            coeficientes de decaimiento

$t$                         tiempo [s]

## 2.2. MEZCLA EN CRUCES DE TUBERÍAS

En una serie de estudios conducidos por Fuentes (2002), Chávez y Cruickshank (2004), Song et al. 2010), Mompremier (2008), se han puesto especial énfasis en un fenómeno muy importante dentro de los sistemas de distribución de agua potable: “*Mezclas en cruces de tuberías*”. Cabe destacar que en los métodos convencionales se supone que la concentración de una sustancia en el cruce de una tubería se realiza de manera homogénea, pero se ha observado que esto no siempre se cumple.

Respecto a este punto, Fuentes et al. (2002), en un estudio realizado en el Instituto de Ingeniería UNAM, han puesto especial atención en la mezcla de sustancias en cruces de tuberías. Para investigar el proceso, se construyó un modelo físico de cruces, este modelo físico fue

desarrollado en las instalaciones del Laboratorio de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Para la construcción de un dispositivo experimental se utilizaron tuberías de acrílico de diferentes diámetros, así como diversos accesorios como: Tees, codos, adaptadores, reducciones para realizar los diferentes montajes y ensambles; Adicionalmente se utilizaron equipos electrónico y manual para medir la presión, el gasto, así como la concentración de la sustancia trazadora.

Para los ensayos se utilizaron tres tipos de flujo, que se denominan:

- Flujo mínimo
- Flujo medio
- Flujo máximo

Para el modelo numérico, se emplean las ecuaciones de la hidrodinámica del flujo en el cruce de los tubos: conservación de la masa y cantidad de movimiento.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad [24]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (v + v_t) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right] \quad [25]$$

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \frac{v}{S_c} + \frac{v_t}{\sigma_c} \right) \frac{\partial c}{\partial x_j} \right] = 0 \quad [26]$$

De acuerdo con los resultados obtenidos en este estudio, puede decirse que la concentración de una sustancia en un nudo no siempre se realiza de manera homogénea. Esto se corroboró cuando al aumentar el flujo volumétrico en una de las entradas, se incrementó el flujo en las salidas, y se observó una disminución de la concentración en las dos salidas, pero nunca de manera homogénea.

A su vez, Cruickshank (2002), publicó un artículo en el cual se describe el fenómeno de mezcla en cruces de tuberías. Los resultados indicaron que cuando dos flujos de concentraciones diferentes entran a un cruce de tuberías se mezclan en forma parcial. Una explicación para esto, según el autor, es la superioridad de uno de los gastos de entrada. Por otro lado, cuando los flujos tienen una magnitud similar no se mezclan.

De acuerdo con lo anterior, Cruickshank, señaló que las pérdidas locales juegan un papel importante en el fenómeno de mezcla, pues la forma en que se produce la repartición de los

flujos en el cruce depende de ellas cuando las tuberías son cortas. También mencionó que la turbulencia es un factor importante en el fenómeno de mezcla. Para desarrollar las ecuaciones que permiten calcular las concentraciones en las salidas de los cruces, se realizaron experimentos en laboratorio por medio de modelos físicos. Con los resultados obtenidos se plantearon las siguientes ecuaciones:

$$C_{s1} = \frac{1}{S_1} [E_2 C_{e2} + DQ C_{e1} + 0.06(C_{e1} - C_{e2})] \quad [27]$$

$$C_{s2} = \frac{1}{S_2} [S_2 C_{e1} - 0.06E_2(C_{e1} - C_{e2})] \quad [28]$$

donde:

$E_1, E_2$	gastos de entrada (l/s)
$S_1, S_2,$	gastos de salida (l/s)
$C_{e1}, C_{e2}$	concentración de la sustancia trazadora en las entradas (mg/L)
$C_{s1}, C_{s2}$	concentración de la sustancia trazadora en las salidas (mg/L)
$DQ$	parte del caudal que fluye sin mezclarse, cuando uno de los flujos es mayor a otro.

Para calcular  $DQ$ , se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$S_1 = E_1 - DQ \quad [29]$$

$$S_2 = E_2 + DQ \quad [30]$$

Finalmente, los resultados obtenidos fueron utilizados para calcular las concentraciones en una red de agua potable. Después de haber realizado varias pruebas en diferentes escenarios, se concluyó que la hipótesis de mezcla completa de los flujos en cruces de redes de tuberías lleva a cálculos errados sobre concentración de sustancias en el agua.

Por su parte, Song et al. (2010), llevaron a cabo investigaciones sobre el mismo fenómeno, y corroboraron los resultados de una cantidad de trabajos previos en este campo.

Para investigar el fenómeno de transporte en cruces de tuberías de agua potable, se construyó un dispositivo físico (las características no se presentan en este trabajo). Las tuberías de entrada fueron etiquetadas “Oeste y Sur”, y las salidas como “Norte y Este”. El cloruro de sodio fue utilizado como trazador durante las pruebas de laboratorio. La entrada Oeste se alimentó con agua limpia y la entrada Sur se alimentó con una mezcla de agua con una concentración de NaCl.

Dos parámetros constituyeron el foco central de este estudio:

1. El Número de **Schmidt**, que es un número adimensional definido como el cociente entre la difusión de cantidad de movimiento y la difusión de masa, y se utiliza para caracterizar flujos en los que hay procesos convectivos de cantidad de movimiento y masa. Se define como:

$$S_c = \frac{\nu}{D} \quad [31]$$

donde:

$\nu$	viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]
$D$	difusividad másica [m <sup>2</sup> /s]

2. El Número de **Reynolds**, es un número adimensional, y se utiliza para caracterizar el movimiento de un fluido. Se define como:

$$Re = \frac{v_s D}{\nu} \quad [32]$$

donde:

$v_s$	velocidad característica del fluido [m/s]
$D$	diámetro de la tubería [m]
$\nu$	viscosidad cinemática del fluido [m <sup>2</sup> /s]

Se evaluaron diferentes escenarios en los cuales se varió el número de Reynolds con el fin de examinar el efecto de la velocidad del flujo en el fenómeno de mezcla en cruces. En los datos

presentados en la Tabla 2.1, se aprecian los diferentes valores del Reynolds utilizados en este estudio.

Escenario 1: ( $Re_s=Re_w, Re_N=Re_E$ )

Escenario 2: ( $Re_s \neq Re_w, Re_N=Re_E$ )

Escenario 3: ( $Re_s=Re_w, Re_N \neq Re_E$ )

Caso general: ( $Re_s \neq Re_w, Re_N \neq Re_E$ )

**Tabla 2.1. Variación del número de Reynolds en diferentes escenarios**

$Re_s$	$Re_w$	$Re_E$	$Re_N$
11000	11000	11000	11000
22000	11000	16500	16500
44000	11000	27500	27500
88000	11000	49500	60000

Se desarrollaron ecuaciones para calcular la concentración en ambas salidas

$$C_N^* = \frac{C_N - C_W}{C_S - C_W} \quad [33]$$

$$C_E^* = \frac{C_E - C_W}{C_S - C_W} \quad [34]$$

donde

- $C_N$       concentración en la salida norte
- $C_W$       concentración en la entrada oeste
- $C_S$       concentración en la entrada sur
- $C_E$       concentración en la salida este

$C_N^*$	concentración calculada en la salida norte
$C_E^*$	concentración calculada en la salida este

Los resultados obtenidos muestran que cuando dos flujos de concentración diferente llegan a un cruce se mezclan, pero nunca en forma homogénea, es decir, no se presentó una mezcla perfecta porque los flujos de salida no tienen una concentración del 50%.

Numerosos estudios han intentado explicar el fenómeno de mezcla de sustancias en cruces de tuberías. Otra investigación acerca del tema fue realizada por Mompremier (2010); este estudio empezó con la meta de estimar la concentración del cloro en la salida de un cruce de tuberías, con la finalidad de analizar la propagación de una sustancia (cloro) en el agua que fluye en tuberías de distribución de agua potable, para determinar su concentración.

Para alcanzar los objetivos de este trabajo de investigación, fue necesario construir modelos físicos en el Laboratorio Hidráulico del Instituto de Ingeniería UNAM con el propósito de analizar, visualizar y entender los fenómenos que ocurren durante las pruebas.

### **2.2.1.- Modelo de los cruces de tuberías**

Este modelo se diseñó con tres cruces diferentes. El primero de ellos cuenta con tuberías de acrílico de 20 mm de diámetro, con ángulo de 90 grados. El segundo con las mismas características anteriores a diferencia del ángulo que fue de 45 grados y el tercer cruce se diseñó con tubos de acrílico de 32 y 25 mm de diámetros, con un ángulo de 90 grados. La altura del nivel de piso al eje de los cruces fue de 1.00 m de altura. En las entradas y salidas de los cruces se colocó un piezómetro con el propósito de medir los niveles. Este modelo se abasteció con dos tanques: El primero con una capacidad de 450 litros, el cual conducía agua limpia y se ubicó a 0.95 m de altura y el segundo tanque con una capacidad de 1100 litros ubicado a 1.23 m, llevaba agua con una sustancia disuelta (cloro). Para regular el gasto, se instaló en la salida de cada tanque una válvula de 1.5 pulgadas. Es sistema se alimentó por gravedad. En la salida de cada tanque, se instaló un piezómetro con el fin de visualizar el nivel del agua en los tanques.

Se llevaron a cabo una serie de experimentos con diferentes escenarios, variando caudales de entrada al cruce, concentraciones de cloro en cada una de las entradas, diámetros y configuración de los cruces. Sobre la cuestión de mezcla en cruces de tuberías, este estudio mostró que cuando dos flujos volumétricos de concentración diferente entran a un cruce, pueden ocurrir dos fenómenos, los cuales se explican en los apartados 2.2.1.1 y 2.2.1.2.

#### **2.2.1.1. Mezcla de los dos flujos**

Sucede cuando el flujo volumétrico que tiene mayor concentración de cloro ingresa con un gasto mayor que el otro. En la Tabla 2.2 se presentan resultados obtenidos en algunas pruebas realizadas en el laboratorio. Como se puede observar en todas las pruebas el flujo de entrada 2,

llevaba una concentración del cloro casi igual a cero, sin embargo se observó que en las salidas los flujos tenían una concentración de cloro. Con estos resultados se afirmó que los dos flujos se mezclaron, pero la mezcla nunca era perfecta. Si hubiera presentado una mezcla completa la concentración del cloro en las salidas serían iguales.

**Tabla 2.2. Mezcla incompleta en cruces de tuberías**

Escenario 1	Gasto [L/s]	Concentración [mg/L]
<b>Entrada1</b>	0.52	1.34
<b>Entrada 2</b>	0.45	0.02
<b>Salida 1</b>	0.25	0.32
<b>Salida 2</b>	0.31	0.55
<b>Escenario 2</b>		
<b>Entrada1</b>	1.40	0.43
<b>Entrada 2</b>	1.35	0.04
<b>Salida 1</b>	1.29	0.26
<b>Salida 2</b>	1.46	0.30
<b>Escenario 3</b>		
<b>Entrada1</b>	1.35	1.30
<b>Entrada 2</b>	0.32	0.01
<b>Salida 1</b>	1.04	0.66
<b>Salida 2</b>	0.72	1.30
<b>Escenario 4</b>		
<b>Entrada1</b>	1	1.30
<b>Entrada 2</b>	0.32	0.01
<b>Salida 1</b>	0.76	0.65
<b>Salida 2</b>	0.56	1.28
<b>Escenario 5</b>		
<b>Entrada1</b>	1.35	1.30
<b>Entrada 2</b>	0.72	0.01
<b>Salida 1</b>	1.17	0.36
<b>Salida 2</b>	0.93	1.04

Este estudio ayudó a corroborar los resultados de una gran cantidad de trabajos previos. Sin embargo, tales investigaciones sólo mencionaron que no hay una mezcla perfecta, pero ninguno evaluó el porcentaje de mezcla en cada salida. También, en esta investigación se pudo observar que en la mayoría de estas pruebas el sistema no era conservativo, en otras palabras la masa de entrada era diferente de la masa de salida en varios casos. Entre las conclusiones de este trabajo se puede decir que se requieren análisis experimentales adicionales para calcular el porcentaje en



cada salida, con el fin de obtener mejores predicciones del fenómeno utilizando un modelo matemático.

### 2.2.1.2. No ocurre la mezcla de los flujos

Existe la posibilidad de que dos flujos volumétricos ingresen al cruce, para posteriormente salir conservando su individualidad, es decir, sin mezclarse. Una explicación posible para esto es que cuando el flujo volumétrico que lleva una menor concentración de cloro entra al cruce con un caudal mayor que el otro, no se presenta la mezcla. En la Tabla 2.3, se presentan resultados obtenidos en algunos escenarios

**Tabla 2.3. Mezcla incompleta en cruces de tuberías**

Escenario 1	Gasto [L/s]	Concentración [mg/L]
<b>Entrada1</b>	0.21	0.56
<b>Entrada 2</b>	0.72	0.04
<b>Salida 1</b>	0.39	0.03
<b>Salida 2</b>	0.54	0.27
<b>Escenario 2</b>		
<b>Entrada1</b>	0.21	1.72
<b>Entrada 2</b>	1.35	0.04
<b>Salida 1</b>	0.36	0.04
<b>Salida 2</b>	1.2	0.52
<b>Escenario 3</b>		
<b>Entrada1</b>	0.21	0.56
<b>Entrada 2</b>	1.53	0.04
<b>Salida 1</b>	0.49	0.02
<b>Salida 2</b>	1.25	0.13
<b>Escenario 4</b>		
<b>Entrada1</b>	0.72	0.5
<b>Entrada 2</b>	1.35	0.04
<b>Salida 1</b>	0.87	0.04
<b>Salida 2</b>	1.2	0.17

Los resultados de esta investigación mostraron que el factor principal para que se presente el fenómeno de mezcla de sustancias es la magnitud de los gastos de entrada. Adicionalmente, un aporte significativo de este estudio, pues en trabajos previos no se menciona como una conclusión, establece que aun cuando no haya mezcla en los cruces, sí ocurre una disminución o pérdida de la concentración en la salida.

### 2.2.2. Ecuación propuesta

A partir de los resultados experimentales se establecieron ecuaciones que describen el fenómeno de mezcla en cruces, es decir, son válidos cuando el gasto de entrada mayor también contiene la mayor concentración de *cloro*.

$$(E_1 C_1 + E_2 C_2) \Delta t = M \quad [35]$$

$$(C_{s1} q_1 + C_{s2} q_2) \Delta t = M \quad [36]$$

$$C_{s1} q_1 \Delta t = C_{s2} q_2 \Delta t \quad [37]$$

Donde

$E_1, E_2$  gastos de entrada (L/s)

$C_1, C_2$  concentraciones de entrada (mg/L)

$q_1, q_2$  gastos de salida (L/s)

$C_{s1}, C_{s2}$  concentraciones en las salidas (mg/L)

$M$  cantidad de masa total en la entrada ó en la salida (mg/s)

$\Delta t$  incremento en el tiempo (sec)

Con la ecuación 37 se puede estimarse, las concentraciones en las salidas 1 y 2 del cruce de tuberías, toda vez que los gastos y concentraciones de entrada sean conocidos:

$$C_{s2} = \frac{C_{s1} q_1}{q_2} \quad [38]$$

Sustituyendo la ecuación 38 en la ecuación 36, se obtuvo la siguiente ecuación

$$C_{s1} = \frac{M/\Delta t}{2q_1} = \frac{E_1 C_1 + E_2 C_2}{2q_1} \quad [39]$$

Sin embargo, en el cálculo de concentración del cloro en modelo de cruces de tuberías, no se obtuvieron siempre resultados satisfactorios con estas ecuaciones, por eso surgió la necesidad de investigar sobre este fenómeno.

### **2.2.3. Resultados obtenidos con las ecuaciones desarrolladas**

Para validar estas ecuaciones, se realizaron otras pruebas midiendo la concentración del cloro en las entradas y salidas de los cruces de tuberías y posteriormente calcular la masa de entrada y salida por cada caso estudiado. Los resultados experimentales fueron comparados con los obtenidos mediante las ecuaciones 38 y 39. En la Tabla 2.4 (Anexo 1) se presenta la comparación entre ambos resultados. En general las ecuaciones presentan buenas estimaciones, sin embargo, en otras pruebas no se obtuvieron siempre resultados satisfactorios con estas ecuaciones, por eso surgió la necesidad de investigar más sobre este fenómeno.

***Capítulo III***  
***Dispositivo experimental y pruebas de***  
***laboratorio***

Con el objetivo principal de simular el comportamiento de dos fluidos de concentraciones diferentes en un nudo de tuberías de una red de agua potable, se construyó un dispositivo físico en el Laboratorio del edificio 11 del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Con el fin de obtener mejores resultados en las pruebas, se listaron las condiciones que este dispositivo debería cumplir:

- 1- Uso de un material de fácil manipulación para construir los cruces de tuberías de diferentes diámetros;
- 2- Manejar flujo permanente en las tuberías durante las pruebas;
- 3- Colocar válvulas en las entradas y salidas del sistema para regular el flujo;
- 4- Contar con medidores de flujo en las entradas y salidas del dispositivo y;
- 5- Tener instrumentos para medir la concentración en las entradas y salidas del dispositivo físico, así como medidores de presión.

### 3. COMPOSICIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

El dispositivo estuvo compuesto de tres partes fundamentales:

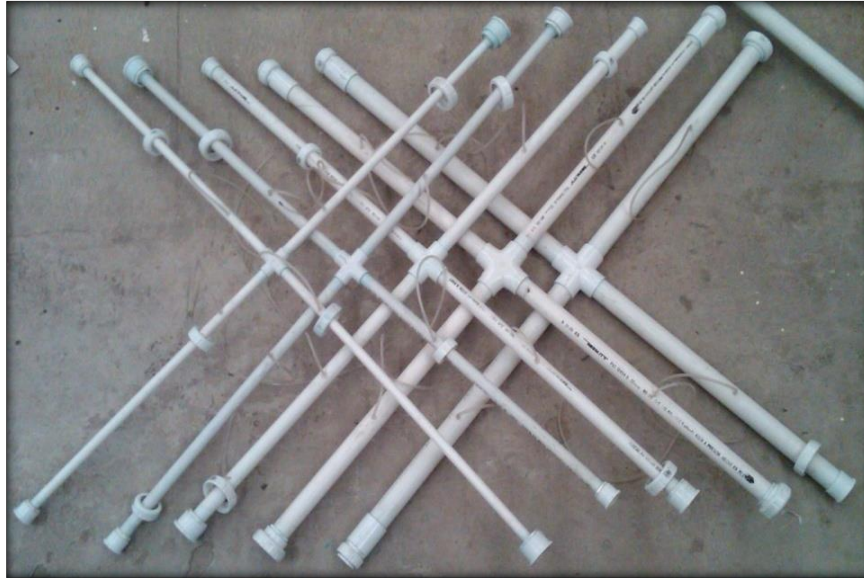
- Los cruces de tuberías

Construidos con tuberías de policloruro de vinilo, PVC, de cinco diámetros diferentes, como se muestra en la Tabla 3.1.

**Tabla 3.1. Diámetros de los cruces de tuberías construidos**

Diámetro Nominal		Diámetro Real	
[pulg]	[mm]	[mm]	[pulg]
1/2"	13	17.54	0.69
3/4"	19	22.08	0.87
1"	25	29.80	1.17
1 1/4"	32	38.06	1.50
1 1/2"	38	43.84	1.73

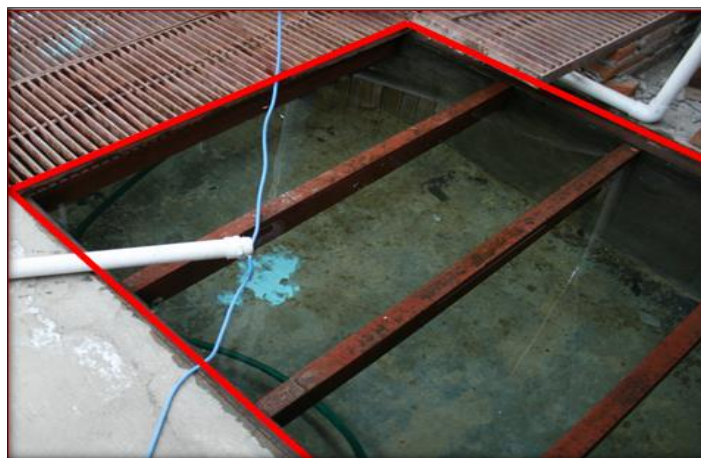
A partir de los diámetros seleccionados, se construyeron cinco cruces de tuberías para simular el comportamiento de los flujos. En la Figura 3.1 se puede apreciar los cruces de diferentes diámetros.



**Figura 3.1. Cruces de tuberías**

- Un Fuente de abastecimiento

Se utilizó como fuente de abastecimiento un cárcamo de 2.12 metros cúbicos, empleando la toma de la red de la Universidad para llenar el cárcamo. En la Figura 3.2 se muestra el cárcamo.



**Figura 3.2. Fuente de abastecimiento del dispositivo físico**

- Dos tanques de almacenamiento de 420 litros cada uno.

A 3.55 metros del nivel del dispositivo se instalaron dos tinacos (Figura 3.3) de una capacidad de 420 litros cada uno, con el fin abastecer el dispositivo durante las pruebas. La conducción del agua se realiza por medio de tuberías PVC de 2 pulgadas de diámetro, tanto para la impulsión hacia los tinacos para el abasto del modelo y el rebose de excesos. Finalmente para realizar los diferentes montajes y ensambles, así como la conexión de válvulas, fue necesario contar con accesorios de acople rápido en el mismo material de la tubería. Los accesorios adquiridos fueron: “Tees” rápidas, codos rápidos, collares sencillos, adaptadores macho y hembra rápidos, reducciones rápidas y uniones rápidas.



**Figura 3.3. Tanques de almacenamiento de 420 litros cada uno.**

En la Figura 3.4 se observa el plan de diseño del dispositivo, la Figura 3.5, muestra una vista en 3D, la Figura 3.6, muestra un corte longitudinal y finalmente las figuras 3.7 al 3.9 muestran vistas del dispositivo físico construido en el Laboratorio de Hidráulico del Instituto de Ingeniería de la UNAM. También se puede observar los diferentes componentes de este dispositivo físico así como algunas mediciones.

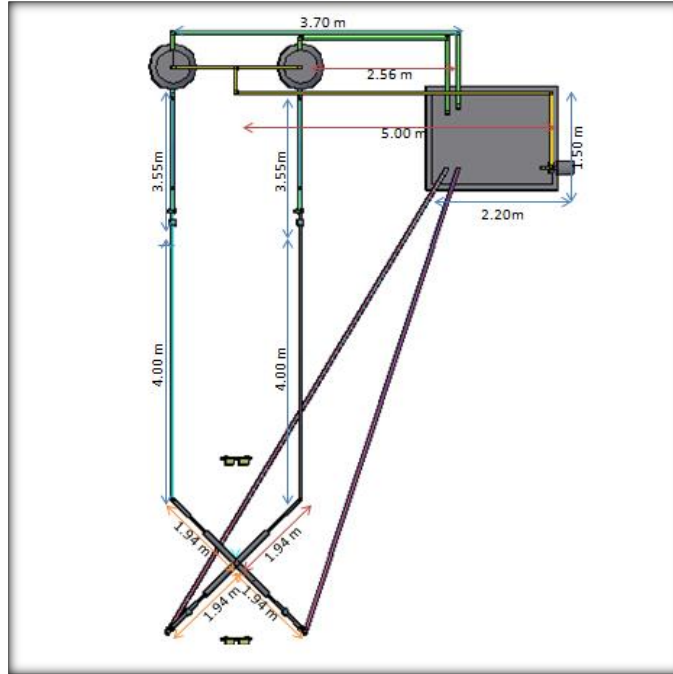


Figura 3.4. Vista general del dispositivo experimental (plano)

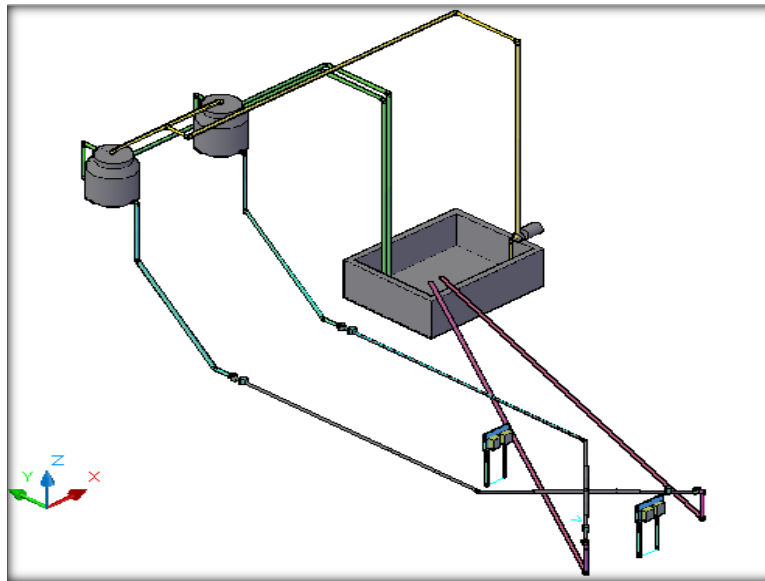


Figura 3.5. Vista en 3D del dispositivo experimental



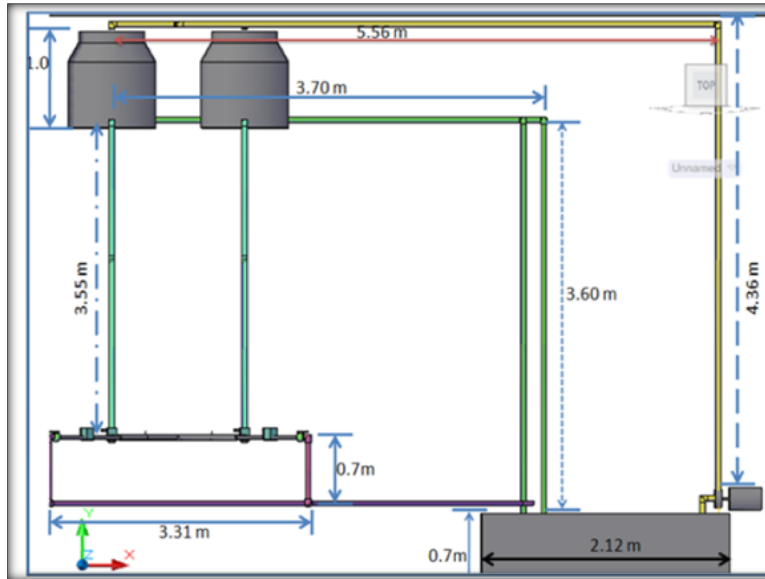


Figura 3.6. Elevación de los tanques



Figura 3.7. Dispositivo físico construido [cruces de 45°]



**Figura 3.8. Dispositivo físico construido [cruces de 90°]**



**Figura 3.9. Dispositivo físico construido [tres entradas]**

### 3.1. INSTRUMENTACIÓN

Para obtener mejor resultado en las pruebas de laboratorio fue necesario armar el dispositivo con equipos de alta calidad. A continuación se presenta una lista de los equipos utilizados en las pruebas de laboratorio.

#### 3.1.1. Medidor de flujo

Se utilizaron cuatros medidores de flujo ubicados en las entradas y salidas de los cruces de tuberías. El equipo mide e indica caudal instantáneo, está construido con un tubo de medición metálico cuya medición es confiable para bajos caudales, y apto para altas presiones.

La Figura 3.10 presenta un aspecto exterior del medidor; se puede apreciar la pantalla donde aparecen las mediciones instantáneas y el tubo de conexión, así como un corte longitudinal donde se puede observar la ubicación de la turbina de medición.

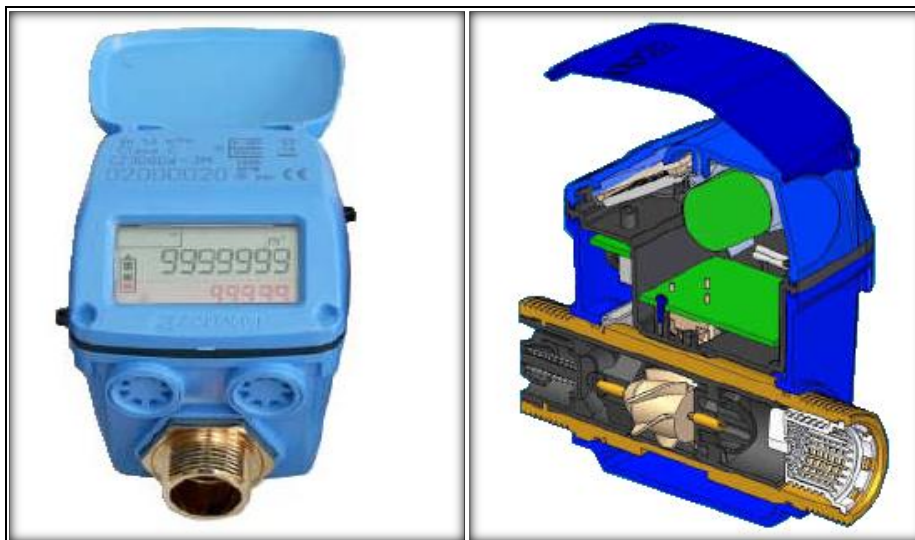


Figura 3.10. Vista del medidor de flujo

A continuación se mencionan algunas ventajas que tiene el equipo utilizado:

- 1.- Buena precisión para caudal pequeño;
- 2.- Provee una información visual directa en una pantalla;
- 3.- Instalación y mantenimiento simple y;
- 4.- Incertidumbre  $\pm 1$  litro/hora.

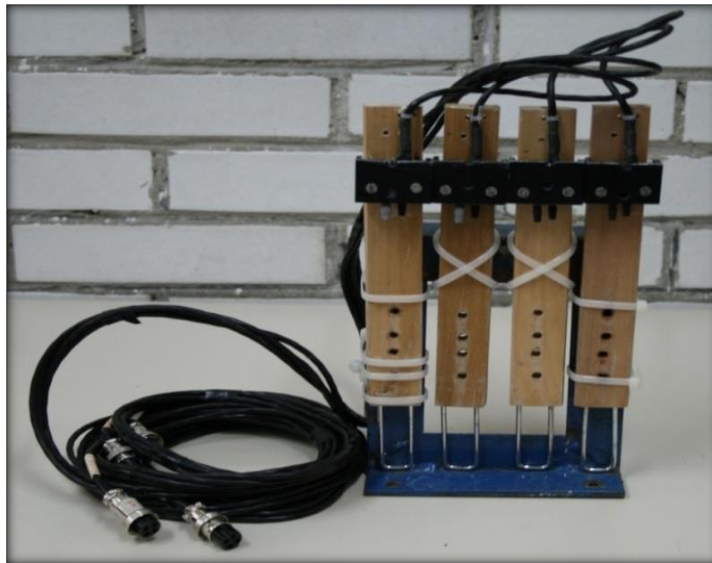
También tiene algunas desventajas como son:

- 1.- Se generan pérdidas de energía locales;
- 2.- Costo del equipo muy alto y;
- 3.- Muy sensible a la presencia de sólidos en suspensión, lo que puede causar mediciones erróneas.

### 3.1.2. Medidor de presión

El equipo de medición de presión está compuesto de tres partes:

- 1.- Cuatro sensores de presión absoluta, como se puede observar en la Figura 3.11.



**Figura 3.11. Medidor de presión**

- 2.- Una consola de conexión de sensores
- 3.- Un software (programa de computadora).

Este programa permite leer el valor de la presión durante las pruebas en cada canal, y al mismo tiempo almacenar los datos en un archivo de computadora. En la Figura 3.12 se muestra la pantalla principal del programa, donde se pueden apreciar los valores de la presión correspondiente a cada uno de los cuatros canales.



Figura 3.12. Sistema de adquisición de medición de presión

### 3.1.3. Funcionamiento del equipo de medición de presión

Para medir la presión en las entradas y salidas de los cruces de tuberías, se procedió de la siguiente manera:

- 1.- Se conectaron los cuatros sensores a unas boquillas ubicadas aguas arriba y aguas abajo de los cruces por medio de manguera transparente de tipo acuario, y posteriormente a cada sensor correspondiente.
- 2.- Los sensores a su vez se conectaron en la consola de conexión, que transforma las señales físicas en digitales, y posteriormente la información se almacena en una laptop por medio de un software.
- 3.- Se abrieron las válvulas de entrada y se cierran las de salida, de tal forma que las tuberías se llenan de agua.
- 4.- Se desconectaron las mangueras al sensor para eliminar las burbujas de aire, se espera un minuto hasta que se establece el flujo, y posteriormente se tapa la parte inferior de la manguera mientras que se llena de agua y se conecta la parte superior al sensor. Este procedimiento se repite para cada sensor.
- 5.- Se conectó cada sensor a su canal respectivo en la consola de conexión.
- 6.- Se encendió la consola.
- 7.- Se ejecutó el programa desde la computadora.



8.- Se verificó que los cuatros canales marcaran el mismo valor (en mm), para compensarlos.

9.- Se presionó el botón “Almacenar” para almacenar los datos.

10.- El programa registró mediciones a cada segundo y se almacenaron los datos en una Tabla de Excel, con la fecha y la hora. En la Tabla 3.2 se muestran los resultados.

**Tabla 3.2. Registro del programa de medición de presión**

Fecha	Hora	Canal 1	Canal 2	Canal 3	Canal 4
28/09/2011	03:47:21 p.m.	1633.52	1617.59	1545.57	1539.49
28/09/2011	03:47:22 p.m.	1627.99	1612.05	1540.03	1545.03
28/09/2011	03:47:23 p.m.	1627.99	1617.59	1545.57	1533.95
28/09/2011	03:47:24 p.m.	1633.52	1628.66	1551.11	1545.03
28/09/2011	03:47:25 p.m.	1622.45	1600.97	1540.03	1539.49
28/09/2011	03:47:26 p.m.	1627.99	1600.97	1551.11	1539.49
28/09/2011	03:47:27 p.m.	1633.52	1617.59	1540.03	1533.95

### 3.1.4. Medidor de cloro en línea

Uno de los equipos de mayor exigencia fue el medidor de cloro requerido para una adecuada medición de la concentración del cloro de forma instantánea y con gran precisión. Se pudo contar con un equipo de última tecnología, diseñado por la empresa italiana *B&C electronics*. La Figura 3.13, muestra una vista del equipo.



Figura 3.13. Medidor de cloro en línea

### 3.1.5. Características del medidor de cloro en línea

#### 3.1.5.1. Dimensión del instrumento

En las figuras 3.14 y 3.15 se presentan las dimensiones y algunos detalles del equipo de medición de cloro.

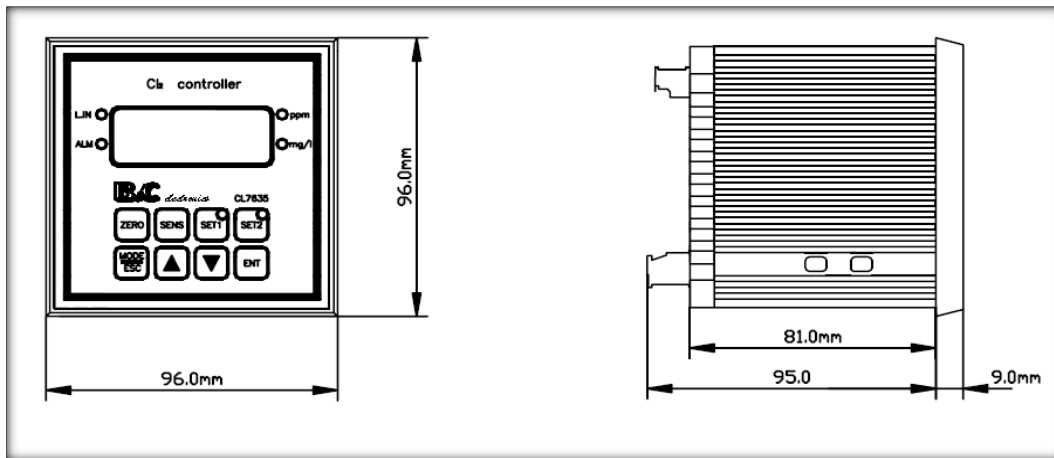


Figura 3.14. Dimensiones del equipo de medición de cloro

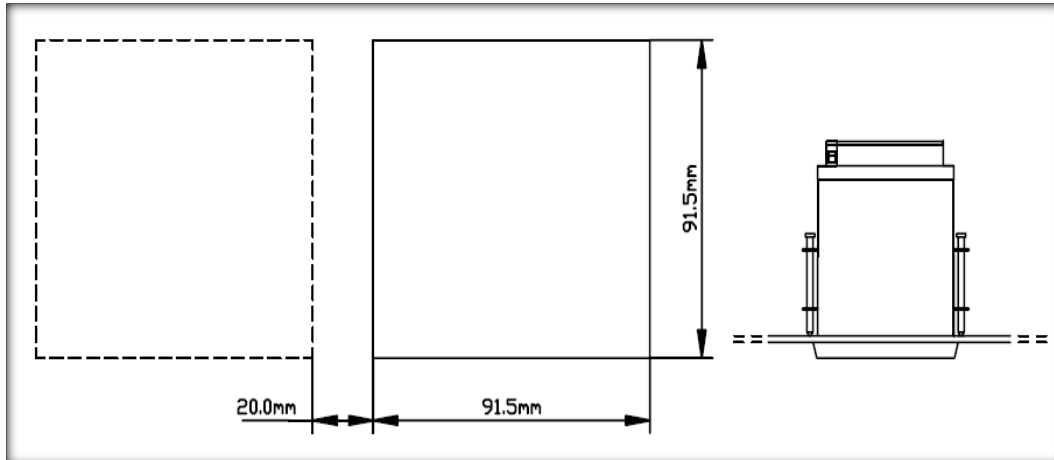


Figura 3.15. Algunos detalles del equipo de medición de cloro

#### 3.1.5.2. Función principal

El “*Cl<sub>2</sub> controller CL 7635*”, lo que se traduce en español como “Medidor de cloro en línea”, es un equipo diseñado especialmente para medir varios parámetros según la necesidad del usuario, como por ejemplo: el cloro residual, el dióxido de cloro, ozono disuelto, la temperatura, la

turbiedad y el pH. Por cada parámetro mencionado se requiere un sensor diferente. El parámetro que se toma en cuenta en este trabajo es el cloro.

### **3.1.5.3. Propósito funcional del equipo**

El monitoreo del sistema básico de cloro se compone de tres partes fundamentales:

- El controlador
- El sensor
- La celda de flujo

El instrumento cuenta con los circuitos eléctricos necesarios y el firmware para llevar a cabo las siguientes funciones:

- Ya que el sensor adecuado está conectado, se muestran los valores de concentración del cloro en la pantalla.
- Si un sensor de temperatura PT100 o PT1000 están conectados, se muestran en la pantalla los valores de la temperatura;
- Se realiza una compensación de temperatura automática o manual;
- Se proporciona una salida analógica para grabación y la adquisición de datos;
- Entrega un contacto externo libre de tensión que activa la alarma.

### **3.1.5.4. Principio de funcionamiento**

La medición del cloro se realiza por medio de dos tipos de sensores:

- Celda polarográfica con electrodos sumergidos en un electrolito adecuado y con membrana selectiva;
- Sensor potenciostático.

Una tensión de polarización se aplica al ánodo y al cátodo de la celda con el fin de obtener una corriente en el electrodo, proporcional a la concentración de cloro.

La corriente a través de la celda está efectuando un consumo de cloro para ser renovado por un flujo de líquido constante. Si el líquido no se renueva regularmente la lectura disminuirá lentamente a cero.

Este equipo dispone de una compensación de temperatura manual o automática, referida a la temperatura de 20°C o 25°C.



### 3.1.5.5. Especificación funcional

a).- El display

El instrumento tiene 7 segmentos y 4 dígitos LED en el display. La pantalla muestra los valores de las mediciones y los diferentes mensajes para el operador. En particular, los mensajes se desplazan en la pantalla y son precedidos por sus números de referencia técnicos. Ver la Figura 3.16.

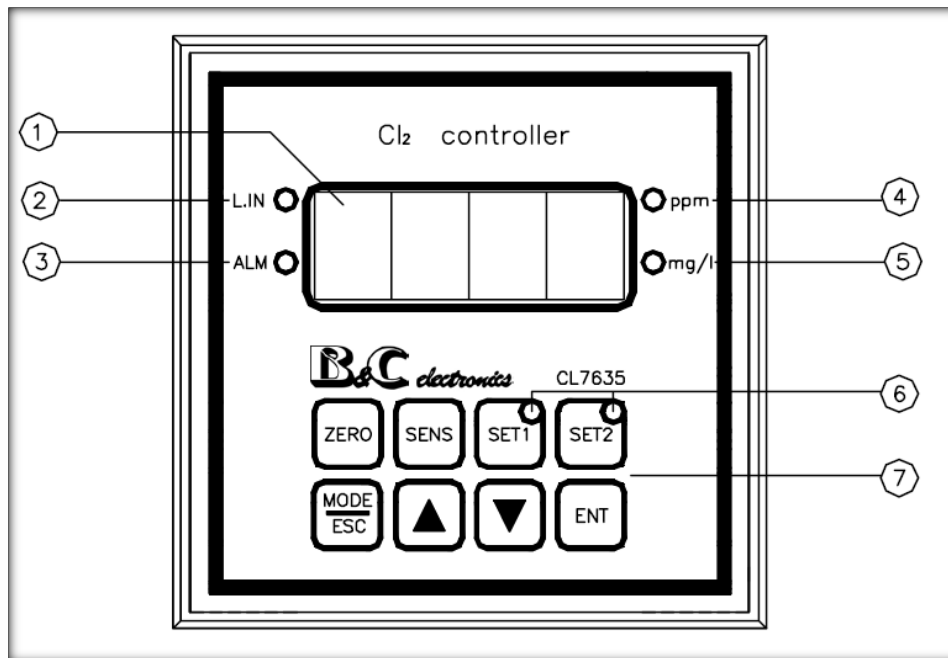


Figura 3.16. Presentación del medidor de cloro en línea

- 1.- Pantalla (Display) muestra los valores y mensajes;
- 2.- Entrada lógica contacto de visualización;
- 3.- La visualización de alarmas activas;
- 4.- Unidad de medida seleccionada (ppm);
- 5.- Unidad de medida seleccionada (mg/L);
- 6.- SET de los relés activados y;
- 7.- Teclado.

El teclado está compuesto de 7 teclas:

- Zero: inicia la calibración del cero;
- Sens: inicia la calibración de la sensibilidad;
- Set 1: inicia la calibración del punto de consigna 1;
- Set 2: inicia la calibración del punto de consigna 2;
- Mode o ESC: visualiza las funciones del instrumento y salir sin cambiar los valores;
- ▲: aumento de los valores, cambia las opciones;
- ▼: disminución de los valores y;
- Ent: introducir los nuevos valores e inicia la función de visualizar.

Como se mencionó anteriormente, el equipo puede medir la concentración del cloro, dióxido de cloro, dióxido de ozono y la temperatura. La concentración se mide en mg/L o ppm, se indica por un Led a la derecha del equipo y la temperatura en grado Celsius o Fahrenheit.

En cuanto a la medición de la concentración del cloro, el equipo puede detectar la concentración mínima de 0.01 mg/L y la máxima de 20 mg/L.

El equipo tiene dos puntos de ajuste independientes los cuales pueden ser programados en una escala para activar correspondencia entre ellos.

### **3.1.5.6. Escalas de medición**

El equipo cuenta con la selección de dos escalas:

1.- Punto de consigna o “Set points”

El instrumento tiene dos puntos de ajuste independientes que pueden ser programados a través de toda la escala y activar los contactos de relé correspondientes.

2.- Alarma

El instrumento cuenta con un relé de alarma, que es del tipo de contacto SPDT.

La condición de alarma se puede configurar para:

- Valores de cloro mayores o menores en comparación con los puntos de ajustes;
- Señal lógica de entrada del dispositivo externo.

### **3.1.5.7. Salida analógica**

El instrumento tiene una salida analógica aislada para enviar los valores medidos. La salida con separación galvánica permite al controlador comunicarse con un PLC o con una grabadora de datos y no necesita una fuente de alimentación externa.

### 3.1.5.8. Entrada analógica

El instrumento está equipado con una entrada lógica para conectarse a contactos externos de estado sólido. La función de entrada lógica puede ser activada o desactivada en el menú de configuración.

### 3.1.5.9. Fuente de alimentación universal

El instrumento puede funcionar con una fuente de alimentación 85/264 VAC. El instrumento tiene el menú de configuración protegido por una contraseña específica. En el menú, es posible desactivar las funciones de calibración de sensores, los valores de puntos de ajuste y cambiar los parámetros, alarmas y cambio de parámetros de entrada lógica.

### 3.1.5.10. Celda de flujo

La celda de flujo es el lugar donde está ubicado el sensor y está diseñada especialmente para recibir la muestra. En la Figura 3.17 se puede observar la celda así como sus componentes.

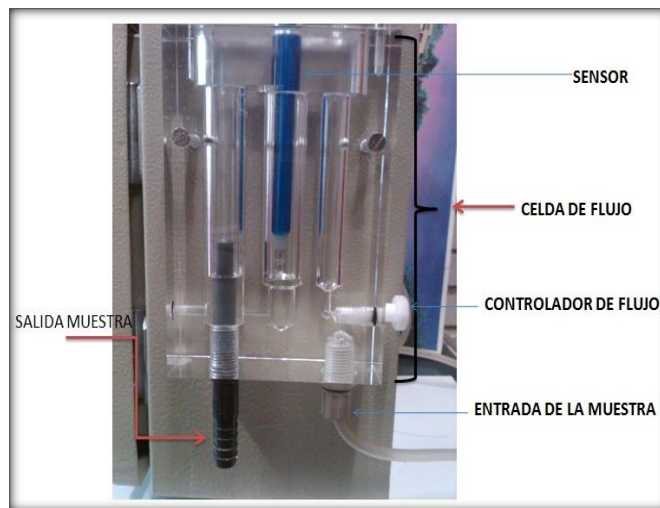


Figura 3.17. Detalles de la celda de flujo del medidor de cloro

Como se puede observar en la Figura 3.17, la celda tiene una entrada; en este punto entra la muestra y posteriormente tiene que hacer un recorrido al interior de la celda hasta llegar a la parte central donde se ubica el sensor y posteriormente llegar a la salida.

### 3.1.6. Instalación y configuración de los data loggers (registrator de datos)

Un registrador de datos (data loggers) es un dispositivo electrónico que registra datos en el tiempo o en relación a la ubicación por medio de instrumentos y sensores propios o conectados

externamente. Casi todos están basados en microcontroladores. Por lo general son pequeños, con pilas, portátiles, equipados con un microprocesador, memoria interna para almacenamiento de datos y sensores. Algunos registradores de datos se comunican con un ordenador personal y utilizan software específico para activar el registrador de datos, ver y analizar los datos recogidos mientras que otros tienen un dispositivo de interfaz local (teclado, pantalla LCD) y puede ser utilizado como un dispositivo independiente.

Los registradores de datos varían entre los de propósito general para una amplia gama de aplicaciones a los dispositivos de medición muy específicos para medir en un medio ambiente o aplicación particular. Es común que los tipos de propósito general sean programables sin embargo muchos siguen como máquinas estáticas con un número limitado de parámetros variables.

Los data loggers que se utilizaron en esta investigación son diseñados por la empresa Lascar Electronics, y tienen las características descritas anteriormente. En la Figura 3.18 se pueden observar los data loggers.



Figura 3.18. Presentación de los data loggers modelo EL USB-4

El software utilizado para activar el registrador de datos se llama **Easy Log USB**. Es muy fácil de manejar. A continuación se listan los pasos a seguir para utilizar este software.


1.- Una vez descargado el programa en la computadora, para entrar hay que dar click sobre el icono  que se encuentra en el disco duro de la computadora. Posteriormente, aparecerá una pantalla como la que se muestra en la figura 3.19.



Figura 3.19. Menú principal del programa Easy Log USB

Como se puede observar, el programa tiene tres opciones:

- Programar e iniciar el USB data logger;
- Parar el USB data logger y descargar los datos y;
- Ver los datos almacenados.

Para empezar una prueba es necesario programar los data loggers; por eso se tiene que escoger la primera opción que aparece en la Figura 3.20.

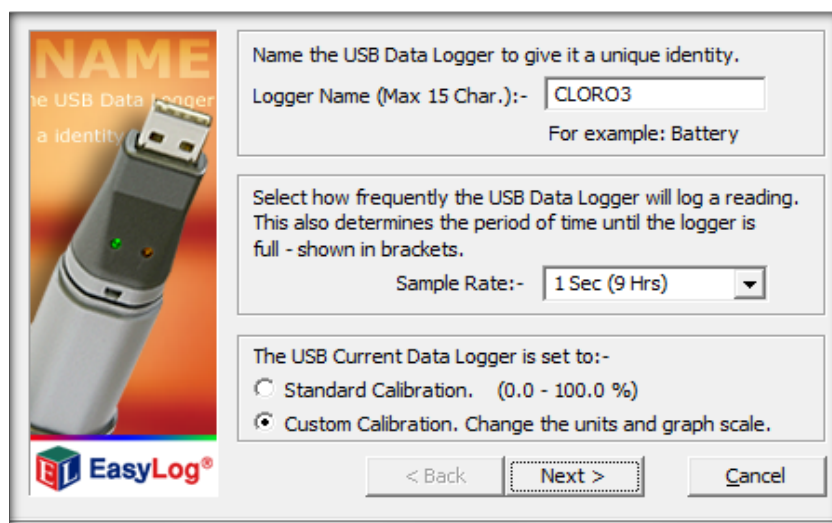


Figura 3.20. Primer paso del programa EasyLog USB

La misma Figura 3.20, nos da la opción de dar un nombre o título al data logger y seleccionar el intervalo de tiempo para registrar los datos. Posteriormente, se presiona “next” y aparece la pantalla que se muestra en la Figura 3.21.

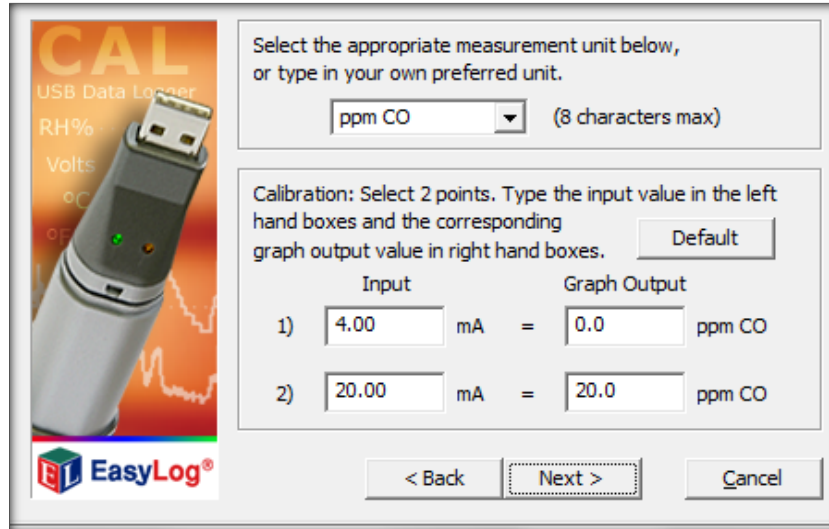


Figura 3.21. Segundo paso del programa EasyLog USB

La Figura 3.21 da la opción de escoger la unidad de medición y el intervalo de medición, es decir, el mínimo y el máximo.

La pantalla que aparece en la Figura 3.22 permite programar alarmas.

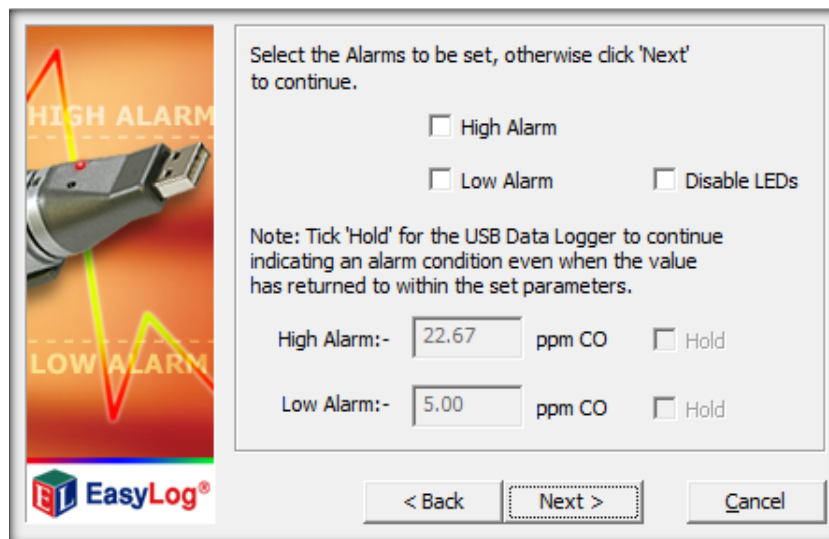


Figura 3.22. Tercer paso del programa EasyLog USB

Finalmente, la última pantalla (Figura 3.23) da la opción de programar cuando el data logger empezará a registrar datos. Una vez terminada la programación, se presiona el icono “Finish” y el dispositivo está listo para almacenar datos en la fecha y la hora programada por el operador.

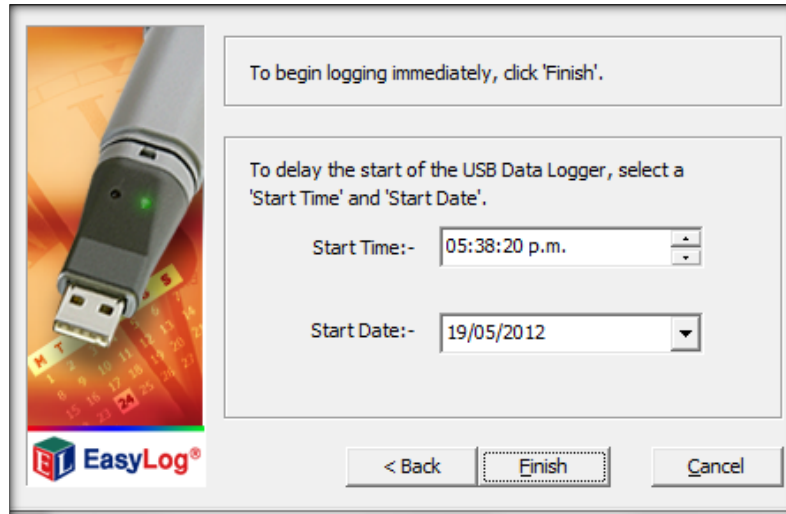


Figura 3.23. Último paso del programa EasyLog USB

Una vez programados los data loggers, se conecta cada uno en su equipo respectivo para almacenar los datos durante la duración de la prueba. Una vez terminada la prueba se genera la representación gráfica de los valores instantáneos de los sensores del equipo de medición de cloro. En las figuras 3.24 y 3.25, se puede observar la conexión de los data loggers.

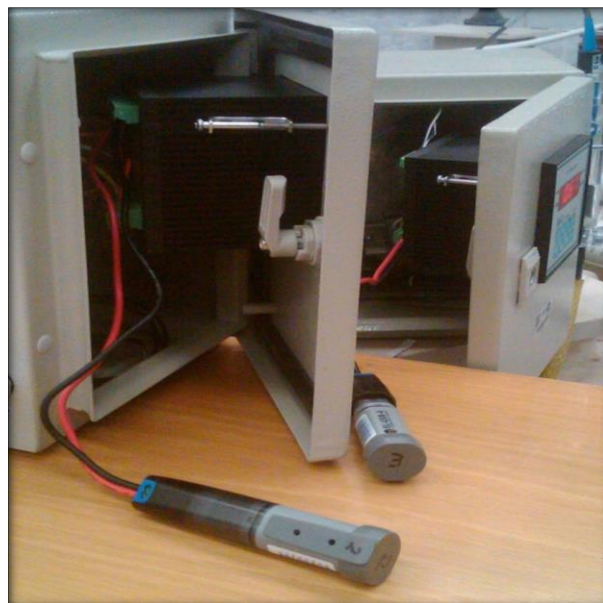


Figura 3.24. Instalación de los data loggers 2 y 3



Figura 3.25. Instalación de los data loggers 4 y 5

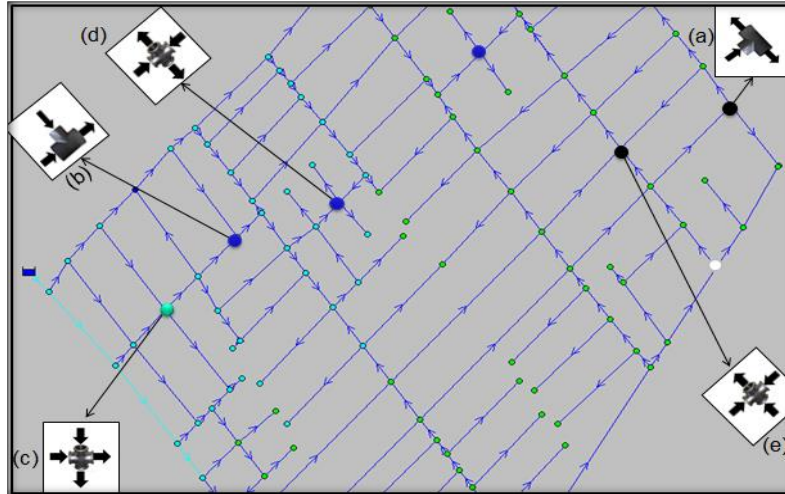
### 3.2. ALIMENTACIÓN DEL DISPOSITIVO EXPERIMENTAL

Para alimentar el dispositivo fue necesario simular una red, con el fin de observar el sentido de los flujos dentro de la misma red para determinar los diferentes tipos de alimentación.

En la Figura 3.26, se observa el resultado de la simulación de una red real y se puede apreciar el sentido del flujo dentro del sistema. A partir de esta simulación se definieron tres tipos de alimentación:

- Alimentación simple
- Alimentación doble
- Alimentación triple





**Figura 3.26. Tipos de alimentación**

- *Alimentación simple:* Se habla de alimentación simple cuando en el nudo llega un solo flujo sin importar el número de salidas, que pueden ser una o dos (Fig.3.26a).
- *Alimentación doble:* Cuando en el nudo entran dos flujos y pueden llegar al cruce a  $90^\circ$  o  $180^\circ$ , dependiendo del sentido del flujo (Figs. 3.26b, 3.26c, 3.26d).
- *Alimentación triple:* Cuando llegan al nudo tres flujos (3.26e)

En la Figura 3.27, se muestra como el dispositivo fue ajustado a cada tipo de alimentación descrito previamente.



Figura 3.27. Dispositivo físico de cruces de tuberías

### 3.3. ESTABLECIMIENTO DE LOS ESCENARIOS (DATOS DE ENTRADA)

#### 3.3.1. Alimentación simple

$Q_e$  y  $C_e$  (conocidos)

$Q_{s1}, Q_{s2}, Q_{s3}$  (Incógnitas);  $C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}$  (incógnitas)

donde:

$Q_e$  y  $C_e$  Gasto y concentración en la entrada

$Q_{s1}, Q_{s2}, Q_{s3}$  Gastos en las salidas

$C_{s1}, C_{s2}, C_{s3}$  Concentración en las salidas

**3.3.2. Alimentación doble (válida para entradas a 45°, 90°, 180°)**

$$\begin{cases} Q_{e1} = Q_{e2} \\ C_{e1} = C_{e2} \end{cases} \begin{cases} Q_{e1} \neq Q_{e2} \\ C_{e1} = C_{e2} \end{cases} \begin{cases} Q_{e1} = Q_{e2} \\ C_{e1} \neq C_{e2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} Q_{e1} \neq Q_{e2} \\ C_{e1} \neq C_{e2} \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} Q_{e1} > Q_{e2} \\ C_{e1} > C_{e2} \end{cases} \begin{cases} Q_{e1} > Q_{e2} \\ C_{e1} < C_{e2} \end{cases}$$

**3.3.3. Alimentación doble caso T**

$$\begin{cases} Q_{e1} = Q_{e2} \\ C_{e1} = C_{e2} \end{cases} \begin{cases} Q_{e1} \neq Q_{e2} \\ C_{e1} \neq C_{e2} \end{cases}$$

**3.3.4. Alimentación triple**

$$\begin{cases} Q_{e1} = Q_{e2} = Q_{e3} \\ C_{e1} = C_{e2} = C_{e3} \end{cases} \begin{cases} Q_{e1} \neq Q_{e2} \neq Q_{e3} \\ C_{e1} \neq C_{e2} \neq C_{e3} \end{cases}$$

**3.4. OBTENCIÓN DE LOS DATOS DE ENTRADA**

Dos datos que fueron indispensables para realizar las pruebas fueron los gastos de entrada y la concentración de cloro en cada flujo.

**3.4.1. Gastos**

Para obtener los gastos, como se mencionó anteriormente, se utilizó un cárcamo como fuente de abastecimiento, y por medio de una bomba el agua fue trasladada a dos tinacos ubicados a 3.55 metros del dispositivo, que por gravedad permitió el abastecimiento del agua (Figura 3.28). Cabe

mencionar que en la entrada del dispositivo fueron instaladas dos válvulas de seccionamiento para regular el flujo. Así se obtuvieron los gastos de ingreso en cada entrada.



**Figura 3.28. Datos de entrada en las pruebas de Laboratorio**

Para mantener el gasto fijo en las entradas del dispositivo fue necesario mantener carga constante en los tinacos. Debido al buen funcionamiento de la bomba que abastece los tinacos, y una fuente adicional que suministra agua al cárcamo, la carga en los tinacos se mantuvo constante, lo que permitió tener siempre un gasto fijo en las entradas. En la Figura 3.29, se muestra el nivel de agua en los tinacos.



**Figura 3.29. Carga constante en los tinacos durante las pruebas**

### 3.4.2. Concentración

Para obtener la concentración en las entradas se utilizó una bomba dosificadora y un medidor de cloro en línea descrito anteriormente. El controlador dosifica el cloro hasta el punto (set point) fijado por el usuario. Una vez que disminuya, automáticamente arrancará la dosificadora mediante la señal del relevador que contiene el controlador. En la Figura 3.30, se puede observar la bomba dosificadora.



Figura 3.30. Proceso de dosificación durante las pruebas

### 3.5. REALIZACIÓN DE LAS PRUEBAS DE LABORATORIO

Una vez que el dispositivo físico fue construido, se establecieron los escenarios y se realizaron una serie de pruebas por cada tipo de alimentación, en las cuales se variaron los gastos de entrada y la concentración. Las pruebas fueron realizadas en régimen laminar y turbulento. En el anexo 3 se presentan los valores del número de Reynolds calculados con respecto a cada tipo de gastos establecidos.

Cada prueba tuvo una duración mínima de 5 minutos. Los datos fueron almacenados en los data loggers, y posteriormente fueron procesados para descargar las gráficas que genera el programa EasyLog.

### 3.5.1. Análisis e interpretación de resultados de la prueba 1

A continuación se presentan los resultados obtenidos en la serie de pruebas que corresponden a una alimentación simple. En este caso se observó que un solo flujo llegó al cruce y se repartió en tres ramas. Se observó que la concentración no cambió por las siguientes razones:

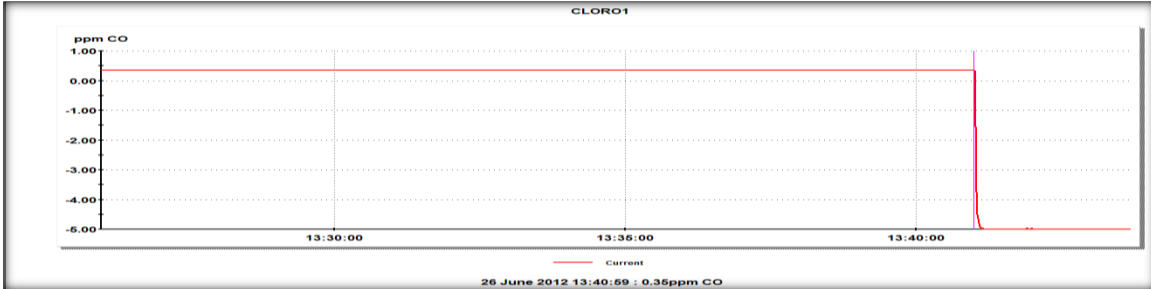
- No hubo contacto con otro tipo de flujo
- El tiempo de residencia era muy corto
- No hubo decaimiento

Por esto se observa en la Tabla 3.3, que la concentración inicial de 0.35 mg/L es igual a la concentración en las tres salidas.

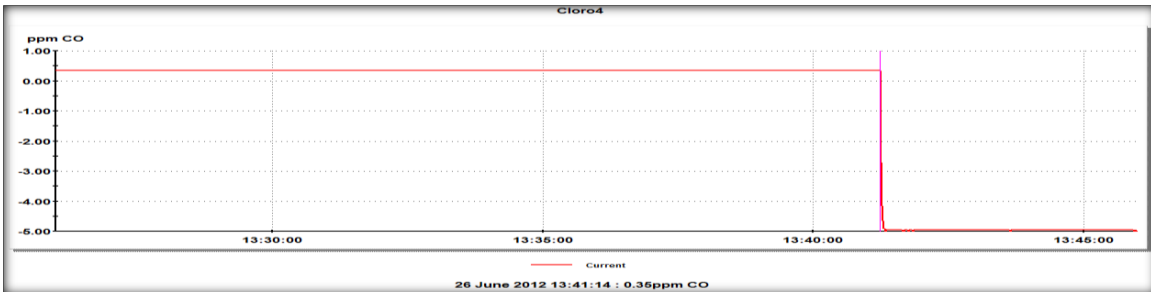
Cabe mencionar que estos tipos de pruebas, la magnitud de los flujos de salida no influye. Se observó el cumplimiento de la ecuación de conservación de la masa. La cantidad de masa de entrada era casi igual a la de salida, con un error absoluto de 0.003 mg/s, que puede considerarse como insignificante. En las gráficas 1 y 2 se observan los resultados corresponden a las 2 entradas, mientras que las gráficas 3 y 4 presentan los resultados de las 2 salidas.

**Tabla 3.3. Resultados de la prueba 1**

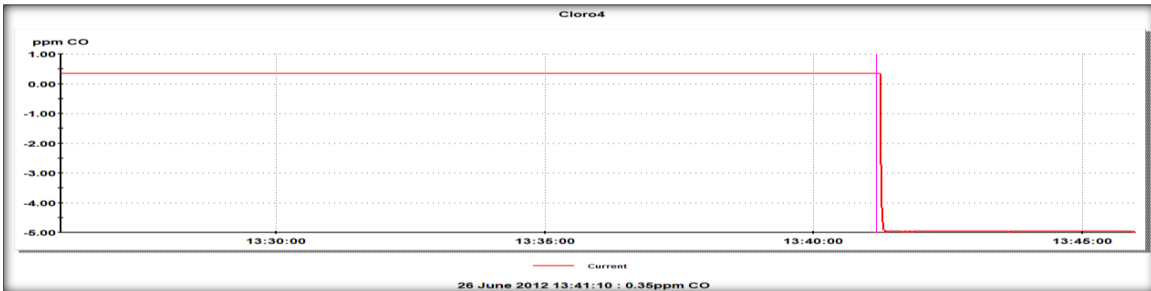
DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad Cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1 ½	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE						
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00043	0.35	0.29	1.25E+04	0.150	0.150
SALIDA 1	0.00012	0.35	0.08	3.49E+03	0.042	0.147
SALIDA 2	0.00016	0.35	0.11	4.65E+03	0.056	
SALIDA 3	0.00014	0.35	0.09	4.07E+03	0.049	



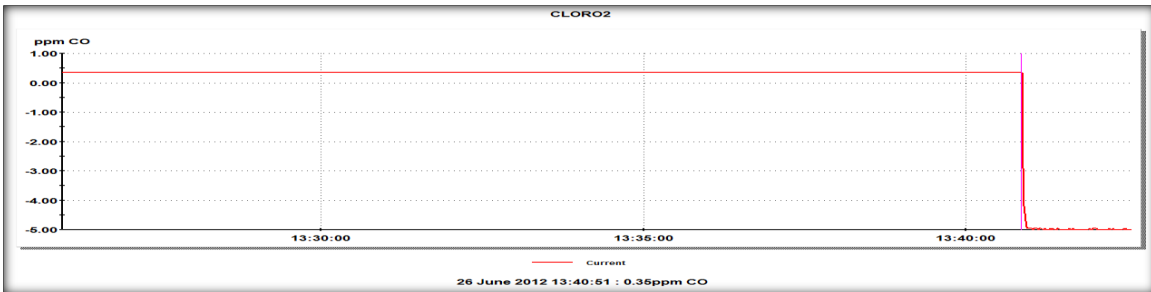
Gráfica 3.1. Resultados de la prueba 1 [entrada 1]



Gráfica 3.2. Resultados de la prueba 1 [entrada 2]



Gráfica 3.3. Resultados de la prueba 1 [Salida 1]



Gráfica 3.4. Resultados de la prueba 1 [Salida 2]

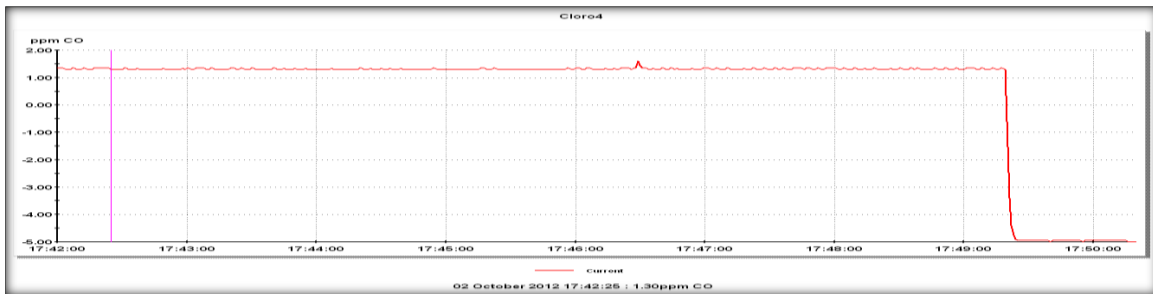


### 3.5.2. Resultados de las pruebas de Laboratorio (prueba 2)

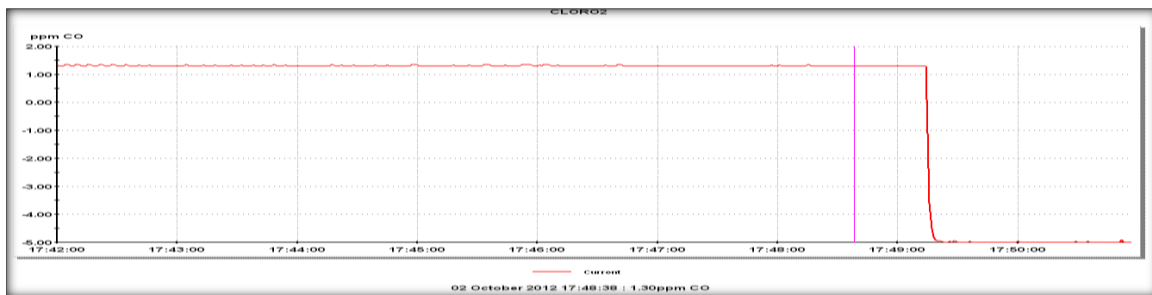
En la Tabla 3.4, se presentan los resultados de la prueba 2 en la cual se manejó una alimentación simple con una entrada y dos salidas. En la gráficas 3.5 y 3.6 se pueden observar la concentración del cloro en las salidas durante el tiempo que duró la prueba.

**Tabla 3.4. Resultados de la prueba 2**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Díametro [pulg]	Viscosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1 <sup>1/2</sup>	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE						
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00043	1.30	0.29	1.25E+04	0.567	0.559
SALIDA 1	0.00020	1.30	0.13	5.81E+03	0.264	0.546
SALIDA 2	0.00023	1.30	0.15	6.39E+03	0.290	



**Gráfica 3.5. Resultados de la prueba 2 [Salida 1]**



**Gráfica 3.6. Resultados de la prueba 2 [Salida 2]**



### 3.5.2.1. Análisis e interpretación de los resultados de la prueba 2

En caso de una T o Y, según la manera que llegan de los flujos al cruce, los resultados puede ser diferentes. Los resultados que se muestran en la Tabla 3.4, corresponden al caso de una alimentación simple con dos salidas. En esta prueba se observó que la concentración no cambió al salir de la T. Como se explicó anteriormente, este resultado suena lógico debido a que el flujo no tuvo contacto con otro flujo. Se aplicó la ecuación de conservación de masa para comprobar los resultados, se observó un error absoluto de 0.013 mg/s entre la masa de entrada y de salida.

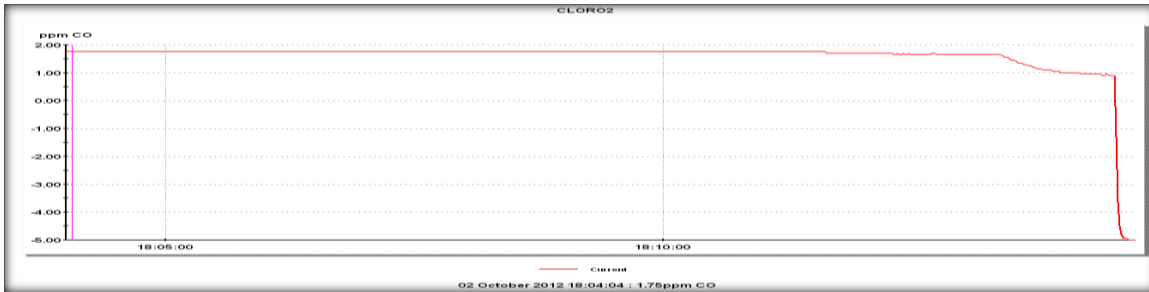
Es importante mencionar que para estos casos (una entrada y dos salidas) se realizaron varias pruebas de la misma serie. Se obtuvieron los mismos resultados, siempre la concentración del cloro en las salidas siempre eran iguales a la concentración de entrada.

### 3.5.3. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 3)

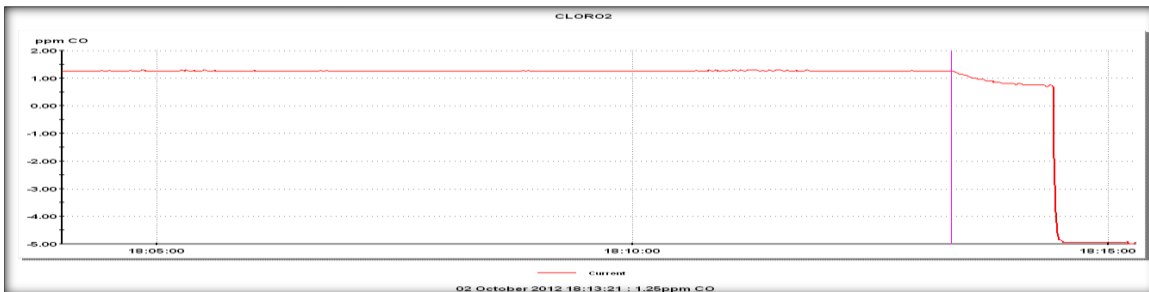
En la Tabla 3.5, se presentan los resultados de la prueba 3, en las gráficas 3.7 al 3.9, se puede observar la representación gráfica de los valores instantáneos de los sensores del equipo de medición de cloro. En esta prueba se manejó una alimentación doble: dos entradas y una salida, con gastos de entrada diferentes y concentración diferente.

**Tabla 3.5. Resultado de la prueba 3**

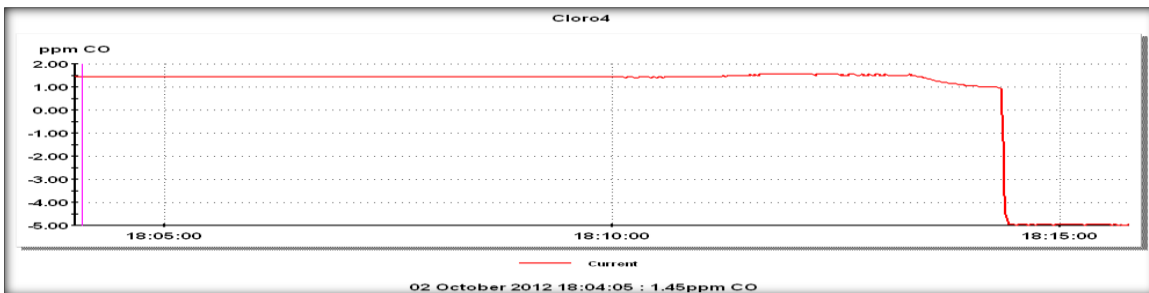
DIFUSION DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESION						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Díámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1 <sup>1/2</sup>	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE						
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	MASA TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00024	1.75	0.16	6.97E+03	0.42	0.63
ENTRADA 2	0.00017	1.25	0.11	4.94E+03	0.21	0.61
SALIDA	0.00042	1.45	0.28	1.22E+04	0.61	



Gráfica 3.7. Resultados de la prueba 3 [Entrada1]



Gráfica 3.8. Resultados de la prueba 3 [Entrada 2]



Gráfica 3.9. Resultados de la prueba 3 [Salida 1]

### 3.5.3.1. Análisis e interpretación de resultado de la prueba 3

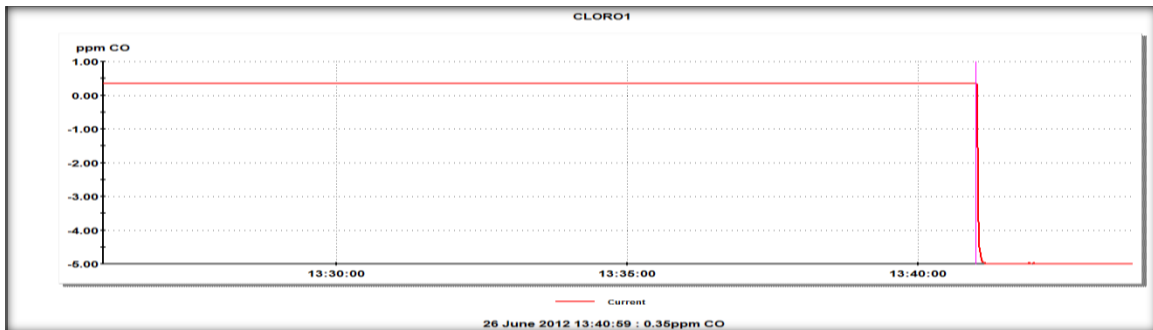
En cuanto a los resultados de la prueba 3, listados en la tabla 3.5, los resultados fueron diferentes a los resultados de la prueba 2. En esta prueba, dos flujos con gastos diferentes y de concentración diferente llegaron a la T. Se midió la concentración inicial, y en la salida se observó que la concentración del cloro era igual al promedio de las concentraciones iniciales. Se puede decir en este caso que los dos flujos se mezclaron.

### 3.5.4. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 4)

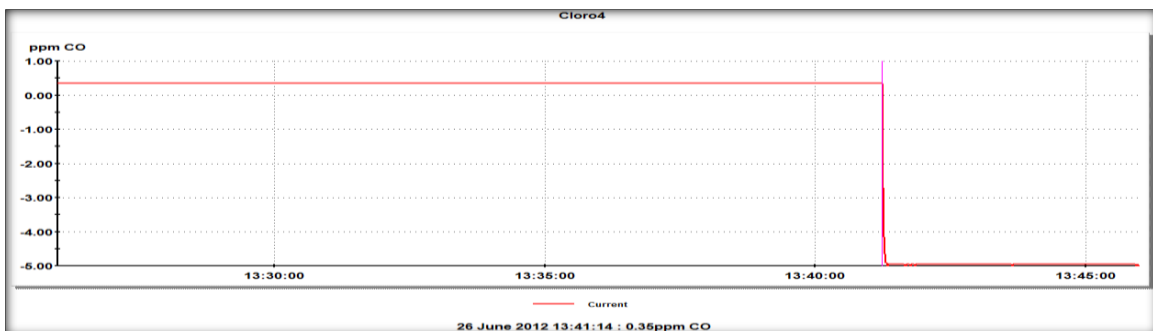
En la Tabla 3.6, se pueden observar los resultados de la prueba 4 en la cual se manejó una alimentación doble: dos entradas a 90° y dos salidas con gastos de entrada iguales y concentración de entrada igual.

**Tabla 3.6. Resultados de la prueba 4**

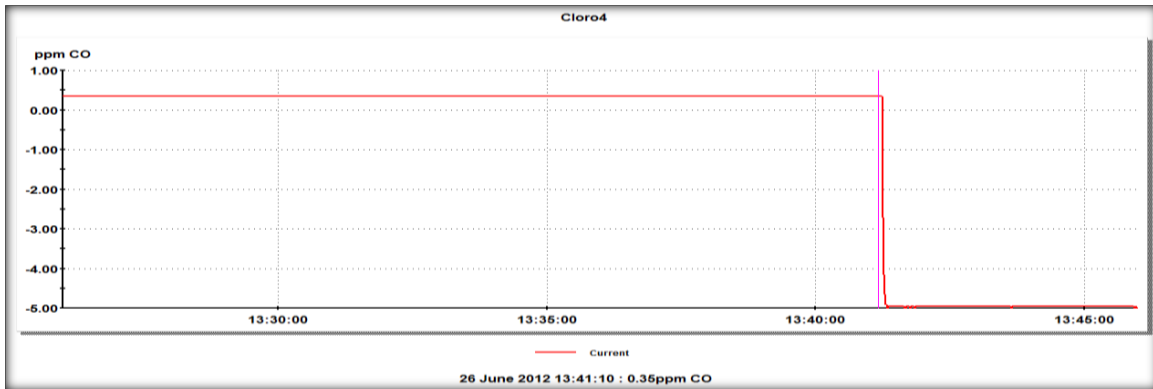
DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	¾	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESIÓN [mm]
ENTRADA 1	0.00030	0.35	0.78	1.73E+04	0.105	0.21	1615
ENTRADA 2	0.00030	0.35	0.78	1.73E+04	0.105		1621
SALIDA 1	0.00036	0.35	0.90	2.08E+04	0.126	0.21	1565
SALIDA 2	0.00024	0.35	0.62	1.38E+04	0.840		1536



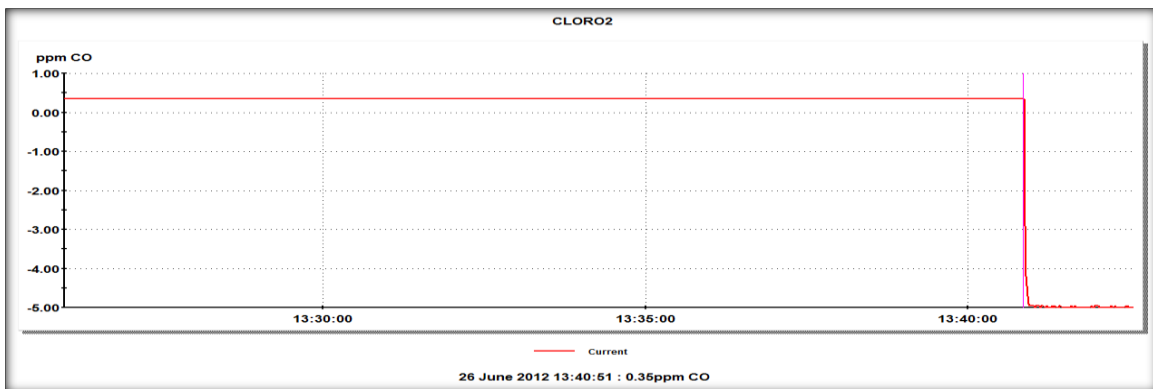
**Gráfica 3.10. Resultados de la prueba 4 [Entrada 1]**



**Gráfica 3.11. Resultados de la prueba 4 [Entrada 2]**



Gráfica 3.12. Resultados de la prueba 4 [Salida 1]



Gráfica 3.13. Resultados de la prueba 4 [Salida 2]

#### 3.5.4.1. Análisis e interpretación de resultados de la prueba 4

Según los datos de la Tabla 3.7, los dos flujos llegan al cruce con mismos gastos y con la misma concentración de cloro. Después de la medición de la concentración aguas abajo del cruce, se observó que no hubo un cambio, es decir, la concentración en las dos entradas era prácticamente igual a la concentración en las 2 salidas. Varias pruebas de la misma categoría fueron realizadas, y los resultados fueron similares. A partir de estos resultados se concluyó lo siguiente:

Cuando dos flujos de magnitudes iguales y de misma concentración de cloro llegan a un cruce, siempre salen con la misma concentración. Eso es válido cuando los flujos ingresan con un ángulo de  $45^\circ$  y  $90^\circ$ . En la Tabla 3.7, se presentan los resultados de la misma serie de pruebas y se observó que en la salida la concentración fue igual en ambas salidas.

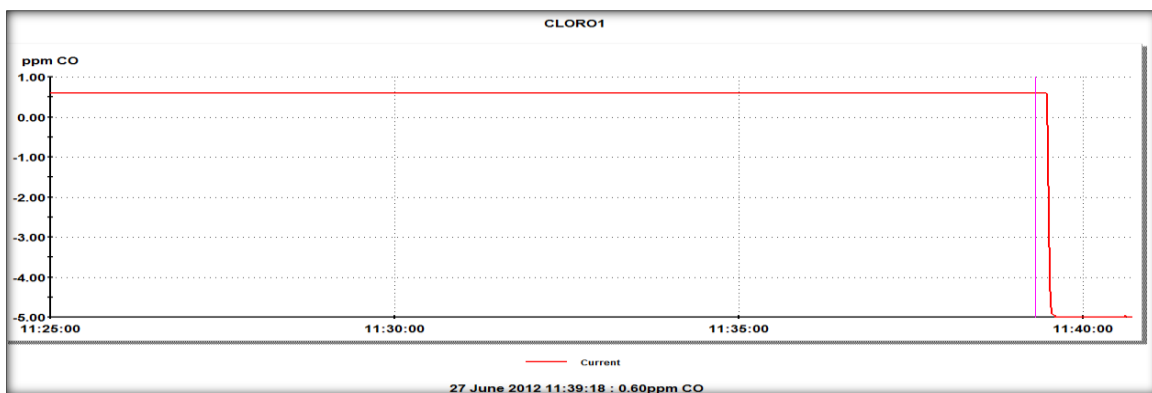
### 3.5.5. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 5)

En la Tabla 3.7, se presentan los resultados de la prueba 5. En esta prueba se manejó una alimentación doble, dos entradas a 90° y dos salidas con gastos de entrada iguales y la misma concentración de cloro a la de entrada.

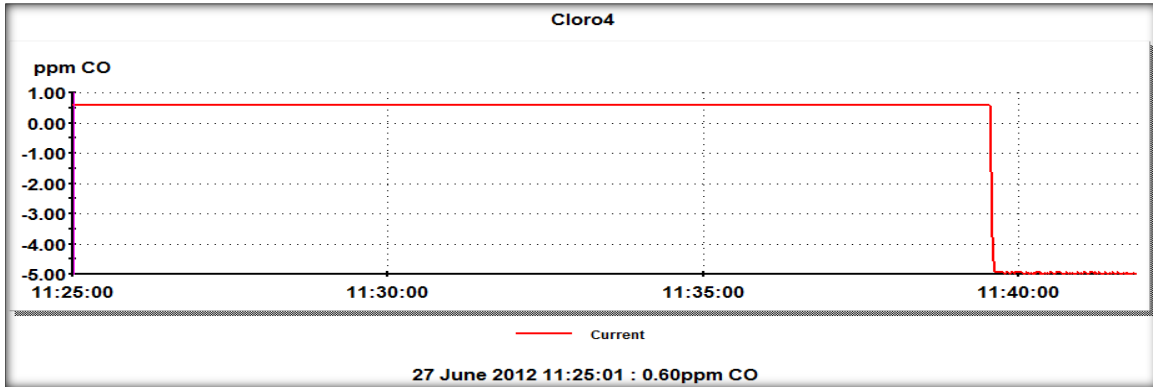
**Tabla 3.7. Resultados de la prueba 5**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad Absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	¾	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	Presión [mm]
ENTRADA 1	0.00019	0.60	0.49	1.10E+04	0.114	0.228	1356
ENTRADA 2	0.00019	0.60	0.49	1.10E+04	0.114		1356
SALIDA 1	0.00024	0.60	0.60	1.33E+04	0.138	0.228	1299
SALIDA 2	0.00014	0.60	0.34	7.50E+03	0.090		1232

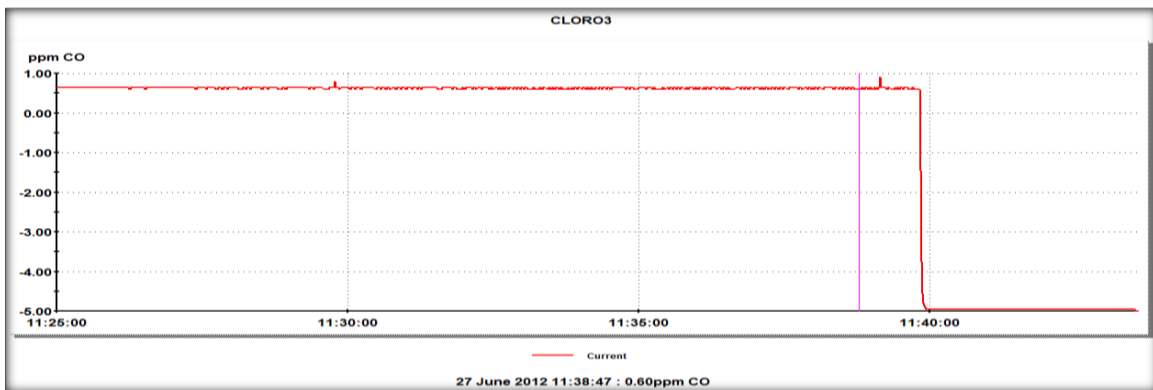
En las gráficas 3.14 al 3.17, se presentan estos mismos resultados y puede observarse, la concentración en las entradas y salidas permaneció igual (0.60 mg/L) durante toda la prueba.



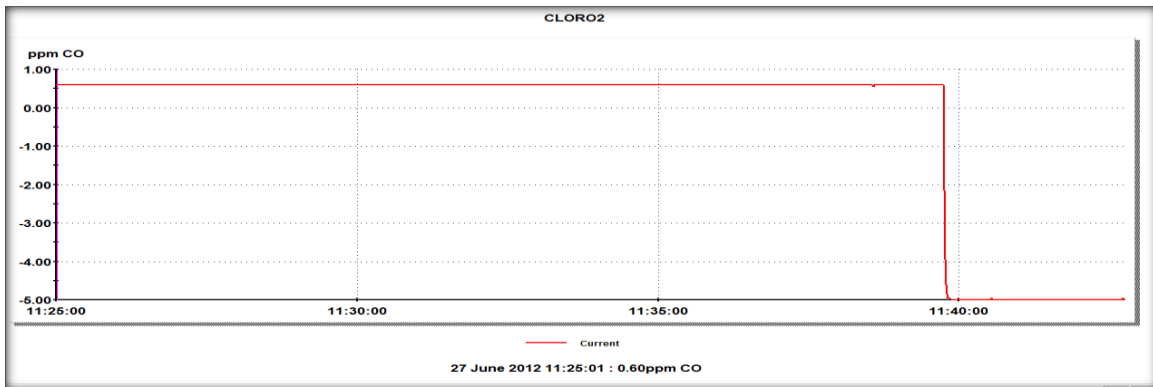
**Gráfica 3.14. Resultados de la prueba 5 [Entrada 1]**



Gráfica 3.15. Resultados de la prueba 5 [Entrada 2]



Gráfica 3.16. Resultados de la prueba 5 [Salida 1]



Gráfica 3.17. Resultados de la prueba 5 [Salida 2]

### 3.5.6. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 6)

En la Tabla 3.8, se pueden ver los resultados de la prueba 6 con una alimentación doble, dos entradas a 90° y dos salidas con gastos de entrada iguales y concentración de entrada diferente.

**Tabla 3.8. Resultados de la prueba 6**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	1 <sup>1/2</sup>	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESION [mm.c.a]
ENTRADA 1	0.00024	0.50	0.16	6.97E+03	0.120	0.450	1487
ENTRADA 2	0.00024	1.39	0.16	6.97E+03	0.330		1487
SALIDA 1	0.00025	1.28	0.17	7.26E+03	0.320	0.453	1485
SALIDA 2	0.00022	0.60	0.15	6.39E+03	0.133		1481

#### 3.5.6.1. Análisis e interpretación de los resultados de la prueba 6

En esta prueba los gastos de entrada fueron iguales y la concentración en ambas entradas fue diferente. Para este caso, los dos flujos casi no se mezclan antes de salir del cruce. Como se pudo observar en la Tabla 3.8, la concentración del cloro en las salidas eran diferentes. En una de las salidas, la concentración era casi doble de la otra. Si hubiera una mezcla completa, la concentración sería igual en ambas salidas.

### 3.5.7. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 7)

En la Tabla 3.9 y las gráficas 3.18 al 3.21, se listan los resultados de la prueba 7. En esta prueba se manejó una alimentación doble; dos entradas a  $90^\circ$  y dos salidas con gastos de entrada diferentes ( $Q_{e1}=0.21$  L/s y  $Q_2= 0.105$  L/s) y concentración de entrada diferente: ( $C_{e1}=1.75$  mg/L y  $C_{e2}=0.75$  mg/L). Se observó también que el gasto mayor tenía la mayor concentración de cloro. Los resultados de esta prueba confirmaron que hubo una mezcla no homogénea: 1.25 mg/L y 1.65 mg/L en ambas salidas. Se puede concluir que para que ocurra una mezcla en un cruce de tuberías, el gasto mayor debe tener una concentración mayor de cloro. Con el propósito de visualizar físicamente el fenómeno del mezclado, se utilizó un trazador (colorante artificial para alimentos, rojo grosella). Se utilizaron los mismos gastos y se obtuvieron los mismos resultados. En la ilustración 3.1, se puede observar

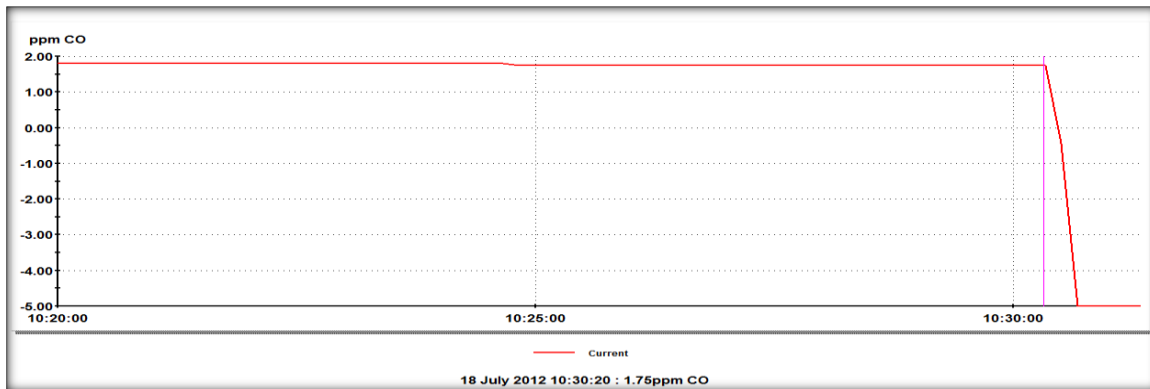


**Ilustración 3.1. Mezcla parcial en cruce de tubería**

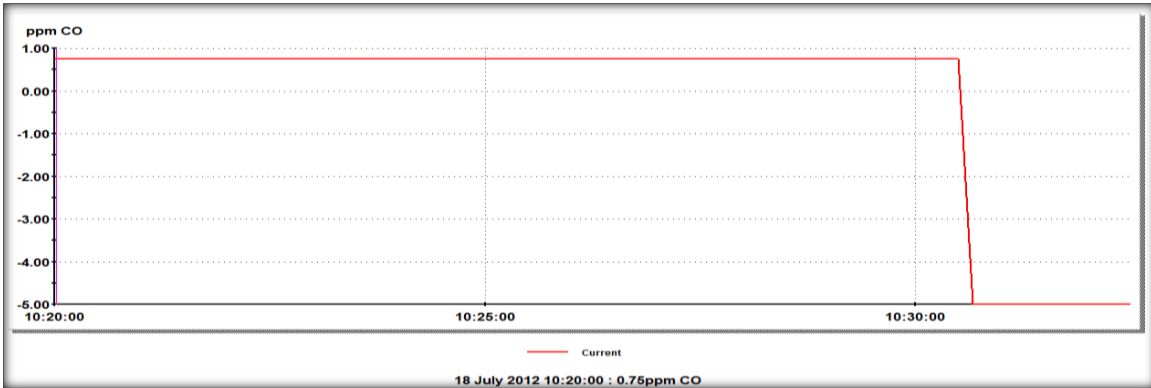


**Tabla 3.9. Resultados de la prueba 7**

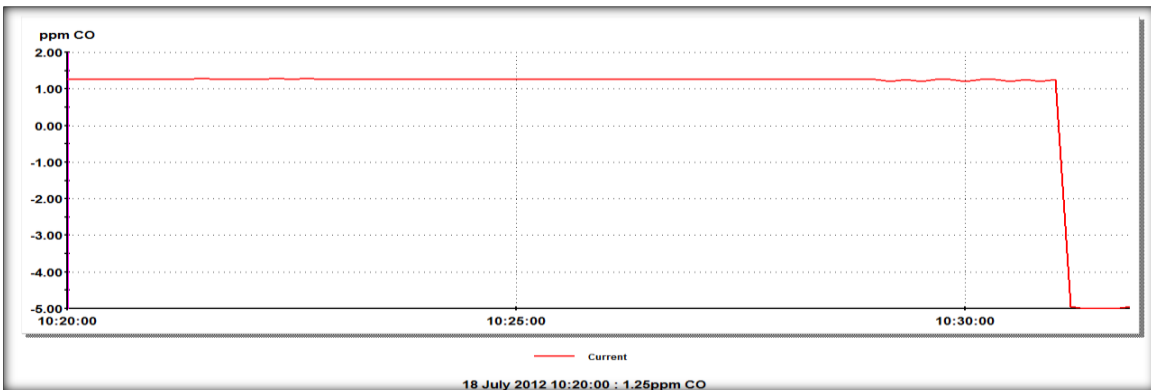
DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad Absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	¾	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA EN EL CRUCE							
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESIÓN [mm]
ENTRADA 1	0.000210	1.75	0.55	1.21E+04	0.367	0.447	1300
ENTRADA 2	0.000105	0.75	0.27	6.05E+03	0.078		1200
SALIDA 1	0.000156	1.25	0.41	9.00E+03	0.195	0.45	1110
SALIDA 2	0.000155	1.65	0.40	8.65E+03	0.255		1115



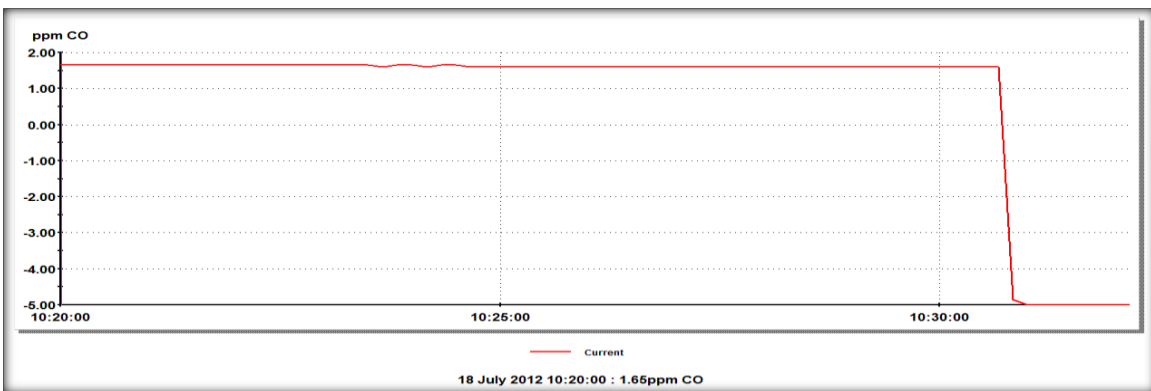
**Gráfica 3.18. Resultados de la prueba 7 [Entrada 1]**



Gráfica 3.19. Resultados de la prueba 7 [Entrada 2]



Gráfica 3.20. Resultados de la prueba 7 [Salida 1]



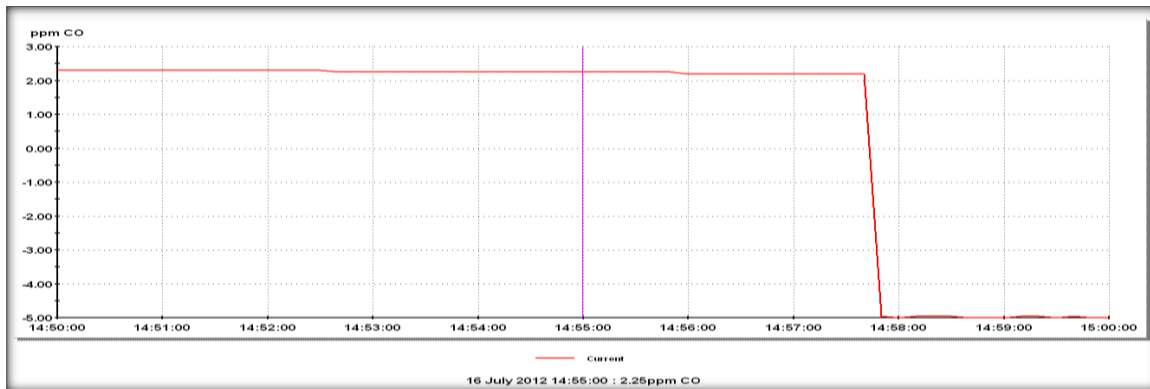
Gráfica 3.21. Resultados de la prueba 7 [Salida 2]

### 3.5.8. Resultados de pruebas de laboratorio, (prueba 8)

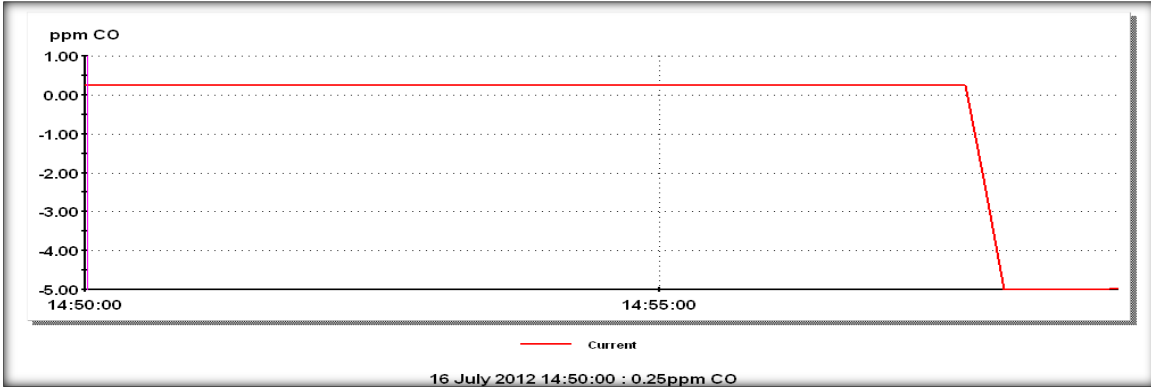
Los resultados de la prueba 8 con una alimentación doble: dos entradas a 90° y dos salidas con gastos de entrada diferentes y concentración de entrada diferente se presentan en la Tabla 3.10. Para este caso, el gasto  $Q_{e1}$  es menor al gasto  $Q_{e2}$  y tiene mayor concentración de cloro.

**Tabla 3.10. Resultados de la prueba 8**

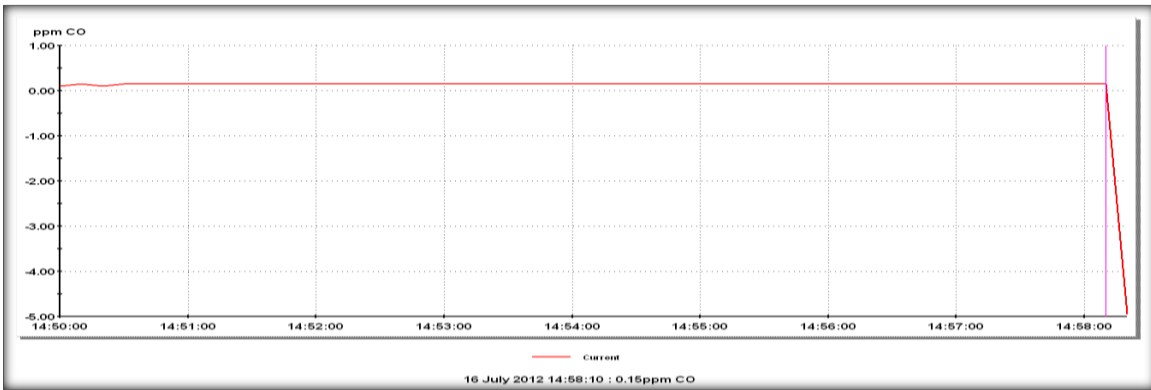
DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	¾	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACION	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M. TOTAL [mg/s]	Presión [mm]
ENTRADA 1	0.00012	2.3	0.30	6.92E+03	0.276	0.338	1200
ENTRADA 2	0.00025	0.25	0.65	1.44E+04	0.062		1300
SALIDA 1	0.00020	0.25	0.52	1.15E+04	0.030	0.334	1235
SALIDA 2	0.00016	1.90	0.41	9.23E+03	0.304		1130



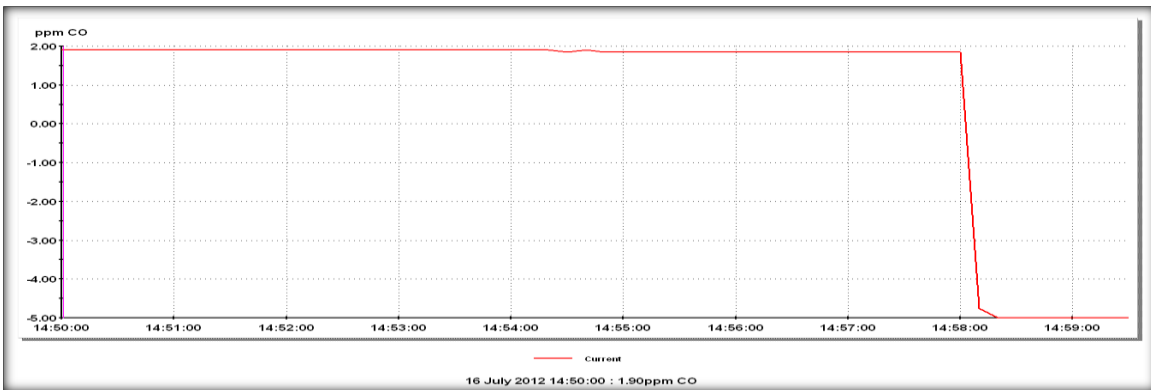
**Gráfica 3.22. Resultados de la prueba 8 [Entada 1]**



Gráfica 3.23. Resultados de la prueba 8 [Entrada 1]



Gráfica 3.24. Resultados de la prueba 8 [Salida 1]



Gráfica 3.25. Resultados de la prueba 8 [Salida 2]

### 3.5.8.1 Análisis e interpretación de resultado de la prueba 8

Para esta serie de pruebas en la cual el gasto menor tenía una mayor concentración de cloro, se observó que no hubo una mezcla en la salida del cruce. Los dos flujos llegan al cruce a  $90^\circ$ , y sin embargo salen del mismo sin mezclarse. Con el propósito de visualizar físicamente el fenómeno del mezclado, para estas series de pruebas se utilizó el mismo trazador (colorante artificial para alimentos, rojo grosella). Se utilizaron los mismos gastos y se obtuvieron los mismos resultados. En la ilustración 3.2 y las gráficas 3.22 al 3.25, se observa como los dos flujos salieron del cruce guardando su individualidad después de haberse encontrado en el cruce.



**Ilustración 3.2. Flujo que salen sin mezclarse en cruces de tuberías**

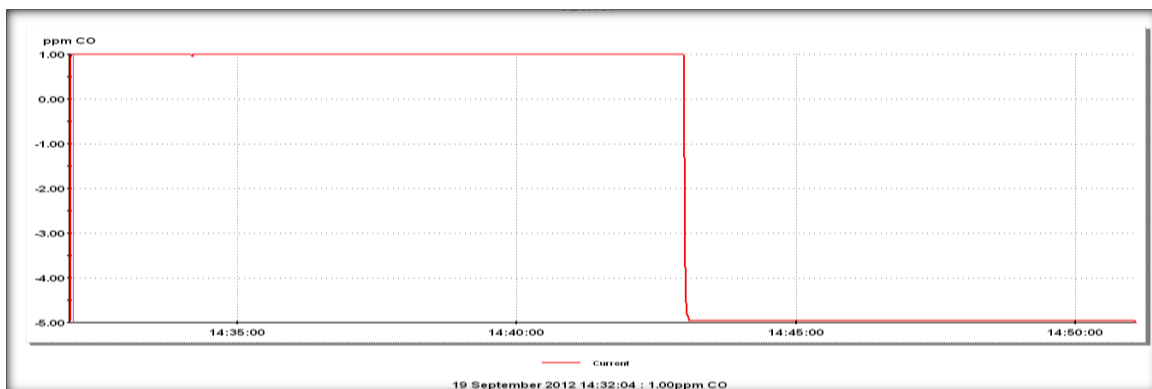
Como se mencionó anteriormente, la magnitud de los flujos así como su concentración son muy importantes, pues definen si va a suceder una mezcla en los cruces o no. Para este caso, cuando el gasto mayor tiene menor concentración de cloro, nunca se presenta una mezcla. Sin embargo, en algunos resultados se pudo observar una reducción alrededor de 17% de la concentración inicial. En la Tabla 3.9, se observó que los flujos entran al cruce con una concentración de 2.30 mg/L y 0.25 mg/L respectivamente y salen con una concentración de 0.25 mg/L en la salida 2 y 1.90 mg/L en la salida 1. En otras pruebas de la misma serie se observó un incremento hasta 10% en la salida 2 y en cuanto a la salida 1 siempre se observó esta disminución. Lo más importante es que siempre se observó el mismo patrón de comportamiento en toda esta serie de pruebas. En la Tabla 3.12A, se presentan resultados obtenidos en otras pruebas de la misma serie.

### 3.5.9. Resultados de pruebas de laboratorio (prueba 9)

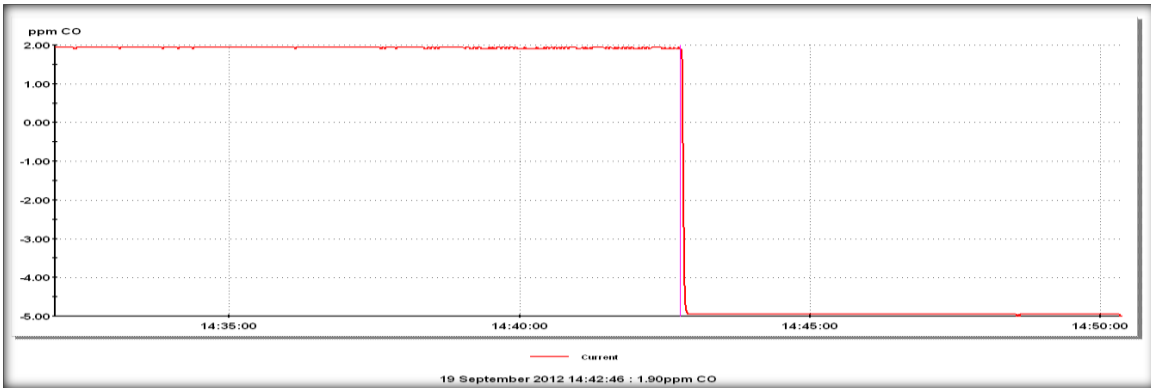
En la Tabla 3.11, se pueden observar los resultados de la prueba 9 con alimentación doble (dos entradas a 180° y dos salidas con gastos de entrada diferentes y concentración de entrada diferente). Para este caso, se observó una mezcla completa, ya que la concentración del cloro en ambas salidas fue igual. El sistema fue conservativo aun con un error absoluto de 0.017 entre la masa de entrada y de salida. Se realizaron varias pruebas de la misma categoría, siempre se observó una mezcla completa. La representación gráfica de los valores instantáneos de los sensores del equipo de medición de cloro se presenta en las gráficas 3.26 al 3.29.

**Tabla 3.11. Resultados de la prueba 9**

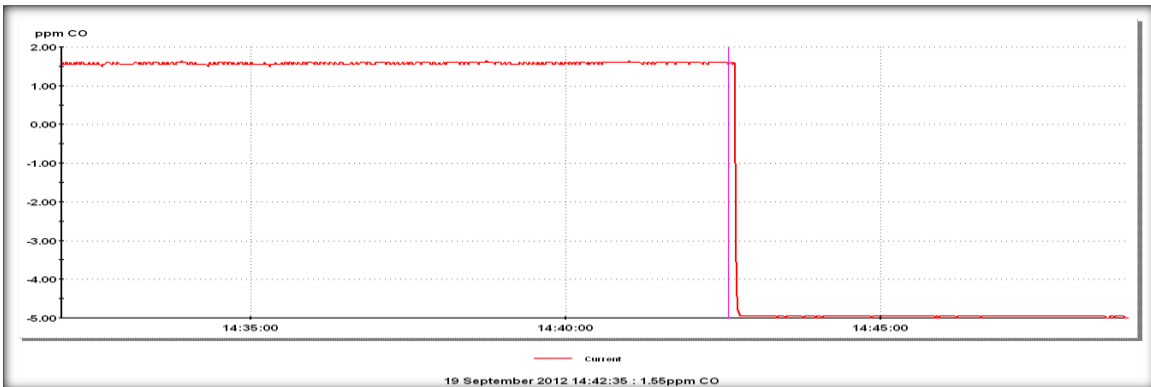
DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN					
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA EN LOS CRUCES					
Ubicación	Gasto [L/s]	Concentración [mg/L]	Reynolds [adim]	Masa [mg/s]	M.Total [mg/s]
Entrada 1	0.14	1.00	4.07E+03	0.140	0.577
Entrada 2	0.23	1.90	6.68E+03	0.437	
Salida 1	0.12	1.55	3.49E+03	0.180	0.567
Salida 2	0.25	1.55	7.26E+03	0.3875	



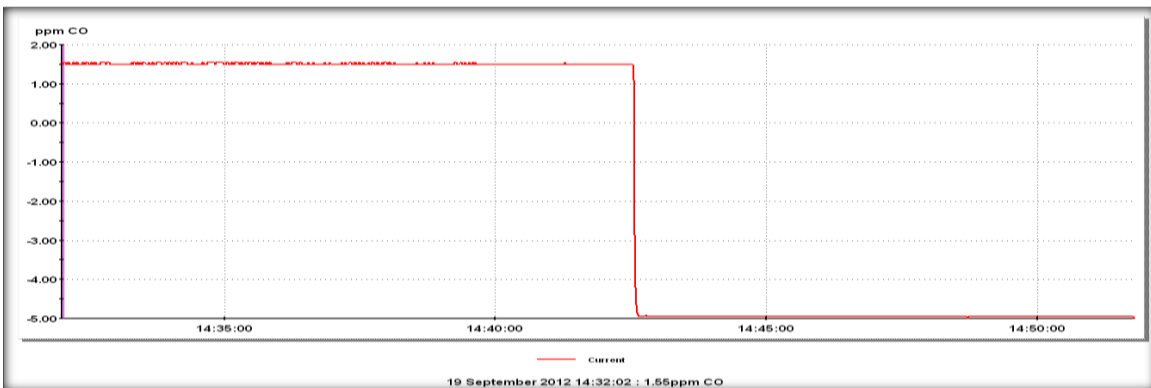
**Gráfica 3.26. Resultados de la prueba 9 [Entrada 1]**



Gráfica 3.27. Resultados de la prueba 9 [Entrada 2]



Gráfica 3.28. Resultados de la prueba 9 [Salida 1]



Gráfica 3.29. Resultados de la prueba 9 [Salida 2]

### 3.6. TENDENCIA DE FLUJOS EN UN CRUCE DE TUBERÍAS

[Dos entradas a  $45^\circ$  y  $90^\circ$ :  $Q_{e1} > Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$  y  $Q_{e1} < Q_{e2}$   $C_{e1} > C_{e2}$ ]

Para desarrollar las ecuaciones que describen el fenómeno de mezcla en cruces de tuberías para los diferentes casos estudiados, primero se analizó la tendencia de los flujos en cruces de tuberías. En un sentido general, se verificó un patrón de comportamiento de los flujos en un cruce durante un período de tiempo.

En la Figura 3.31, se muestra la tendencia de dos flujos en un cruce de  $90^\circ$ . Para este caso los gastos de entrada son diferentes y las concentraciones de cloro en las entradas de los cruces son diferentes.

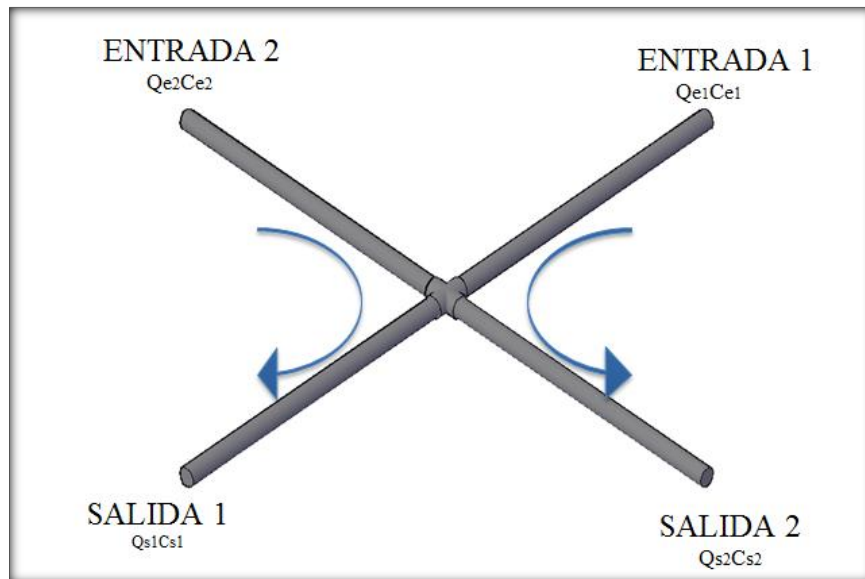


Figura 3.31. Tendencia de dos flujos en un cruce de  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ,  $Q_{e1} > Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$

Como se puede observar en la Figura 3.31, existe una relación entre la concentración de entrada y de salida. Al multiplicar la concentración de salida 2 por un coeficiente  $R$ , se puede obtener la concentración de la entrada 1 y viceversa. Para obtener este coeficiente, se realizaron varias pruebas de la misma categoría (con diámetros diferentes) y posteriormente se divide la concentración de la salida 2 con la concentración de la entrada 1, (cuando  $C_{e1} > C_{e2}$ ), Tabla 3.12) y la concentración de la salida 1 con la entrada 2, (cuando  $C_{e2} > C_{e1}$ , Tabla 3.12A). Al final se definió un promedio para determinar el coeficiente definitivo para cada caso.



Tabla 3.12. Obtención del coeficiente R [ $Q_{e1} > Q_{e2}$ ;  $C_{e1} > C_{e2}$ ]

PATRON DE COMPORTAMIENTO DE FLUJOS											
	$Q_{e1}$ [L/s]	$Q_{e2}$ [L/s]	$Q_{s1}$ [L/s]	$Q_{s2}$ [L/s]	$C_{e1}$ [mg/L]	$C_{e2}$ [mg/L]	$C_{s1}$ [mg/L]	$C_{s2}$ [mg/L]	Me [mg/s]	Ms [mg/s]	R
Prueba 1	0.180	0.090	0.140	0.125	1.75	0.70	1.24	1.63	0.378	0.377	<b>0.93</b>
Prueba 2	0.194	0.120	0.150	0.160	1.65	0.70	1.06	1.53	0.404	0.404	<b>0.93</b>
Prueba 3	0.210	0.105	0.156	0.150	1.75	0.75	1.27	1.63	0.446	0.443	<b>0.93</b>
Prueba 4	0.250	0.160	0.260	0.140	1.25	0.87	1.10	1.17	0.452	0.450	<b>0.94</b>
Prueba 5	0.350	0.180	0.300	0.220	1.80	1.42	1.65	1.75	0.886	0.880	<b>0.97</b>
Prueba 6	0.360	0.180	0.290	0.250	1.65	0.80	1.16	1.53	0.738	0.719	<b>0.93</b>
Prueba 7	0.380	0.230	0.310	0.300	0.19	0.13	0.16	0.17	0.102	0.101	<b>0.89</b>
Prueba 8	0.400	0.240	0.310	0.325	1.25	0.85	1.00	1.16	0.704	0.687	<b>0.93</b>
Prueba 9	0.430	0.210	0.330	0.300	1.75	0.75	1.25	1.63	0.910	0.902	<b>0.93</b>
Prueba 10	0.390	0.280	0.350	0.320	1.55	0.80	1.04	1.44	0.829	0.825	<b>0.93</b>
Prueba 11	0.900	0.440	0.630	0.710	1.39	0.50	0.88	1.29	1.471	1.470	<b>0.93</b>
Max	0.900	0.440	0.630	0.710	1.800	1.420	1.650	1.750			<b>0.97</b>
Min	0.180	0.090	0.140	0.125	0.190	0.130	0.160	0.170			<b>0.89</b>
Promedio	0.368	0.203	0.293	0.273	1.453	0.752	1.074	1.357			<b>0.93</b>

Tabla 3.12A. Obtención del coeficiente R [ $Q_{e1} > Q_{e2}$ ;  $C_{e1} < C_{e2}$ ]

PATRON DE COMPORTAMIENTO DE FLUJOS											
Scenario 6	$Q_{e1}$ [L/s]	$Q_{e2}$ [L/s]	$Q_{s1}$ [L/s]	$Q_{s2}$ [L/s]	$C_{e1}$ [mg/L]	$C_{e2}$ [mg/L]	$C_{s1}$ [mg/L]	$C_{s2}$ [mg/L]	Me [mg/s]	Ms [mg/s]	R
Prueba 1	0.250	0.150	0.170	0.230	0.60	1.00	0.78	0.73	0.300	0.300	<b>0.78</b>
Prueba 2	0.320	0.170	0.180	0.310	0.61	1.25	1.00	0.73	0.408	0.406	<b>0.80</b>
Prueba 3	0.340	0.200	0.220	0.320	0.90	1.35	1.08	1.04	0.576	0.570	<b>0.80</b>
Prueba 4	0.340	0.210	0.260	0.290	0.06	0.50	0.40	0.07	0.125	0.124	<b>0.80</b>
Prueba 5	0.360	0.220	0.270	0.310	0.15	0.51	0.41	0.18	0.166	0.166	<b>0.80</b>
Prueba 6	0.380	0.200	0.250	0.310	0.21	0.81	0.65	0.21	0.242	0.227	<b>0.80</b>
Prueba 7	0.400	0.300	0.350	0.340	0.71	1.39	1.15	0.87	0.701	0.701	<b>0.83</b>
Prueba 8	0.450	0.240	0.340	0.340	0.50	1.40	1.12	0.52	0.561	0.558	<b>0.80</b>
Prueba 9	0.680	0.400	0.440	0.640	0.30	0.70	0.58	0.36	0.484	0.484	<b>0.83</b>
Prueba 10	0.900	0.480	0.700	0.680	0.90	1.65	1.32	0.99	1.602	1.597	<b>0.80</b>
Max	0.900	0.480	0.700	0.680	0.900	1.650	1.320	1.040			<b>0.83</b>
Min	0.170	0.100	0.120	0.140	0.060	0.500	0.400	0.070			<b>0.78</b>
Promedio	0.417	0.243	0.300	0.355	0.493	1.008	0.826	0.556			<b>0.80</b>

Al promediar la primera serie de resultados, (Tabla 3.12), se estableció la siguiente relación:

$$\frac{C_{s2}}{C_{e1}} = 0.93 \quad [40]$$

A partir de esta relación se obtuvo la ecuación para calcular la concentración en la salida 2, en un cruce de tuberías.

$$C_{s2} = 0.93C_{e1} \quad [41]$$

donde:

$C_{s2}$  Concentración del cloro en la salida 2

$C_{e1}$  Concentración en la entrada 1

Para obtener la concentración en la salida 1, se tomó en cuenta la ecuación de conservación de la masa en un cruce de tuberías con la expresión siguiente:

$$Q_{e1}C_{e1} + Q_{e2}C_{e2} = Q_{s1}C_{s1} + Q_{s2}C_{s2} \quad [42]$$

donde

$Q_{e1}$  y  $Q_{e2}$  gasto en las entradas 1 y 2 respectivamente;

$Q_{s1}$  y  $Q_{s2}$  gasto en las salidas 1 y 2;

$C_{e1}$  y  $C_{e2}$  concentración del cloro en las entradas 1 y 2;

$C_{s1}$  y  $C_{s2}$  concentración del cloro en las salidas 1 y 2.

Los términos de la izquierda de la ecuación anterior representa la masa total en las dos entradas. Al sustituirla por  $M_e$  se obtuvo la expresión:

$$M_e = Q_{s1}C_{s1} + Q_{s2}C_{s2} \quad [43]$$

donde:

$M_e$  masa total en las entradas 1 y 2.

Sustituyendo  $C_{s2} = 0.93C_{e1}$  en la ecuación anterior, se obtuvo la siguiente expresión:

$$M_e = Q_{s1}C_{s1} + 0.93C_{e1}Q_{s2} \quad [45]$$

$$Q_{s1}C_{s1} = M_e - 0.93C_{e1}Q_{s2} \quad [46]$$

Al despejar el valor de  $C_{s1}$  en la ecuación anterior, se obtuvo la ecuación para calcular la concentración del cloro en la salida de un cruce de tuberías, cuando hay una mezcla parcial:

$$C_{s1} = \frac{M_e - 0.93C_{e1}Q_{s2}}{Q_{s1}} \quad [47]$$

$M_e$  Masa total en las entradas 1 y 2;

$Q_{s1}$  y  $Q_{s2}$  gasto en las salidas 1 y 2;

$C_{e1}$  Concentración del cloro en la entrada 1;

$C_{s1}$  Concentración del cloro en la salida 1.

En la Tabla 3.12A, se puede observar que para el segundo caso el coeficiente es igual 0.80, y haciendo las consideraciones anteriores se obtuvieron las expresiones para el cálculo de la concentración del cloro en las salidas de un cruce, cuando no hay mezcla:

$$C_{s1} = 0.80C_{e2} \quad [48]$$

$$C_{s2} = \frac{M_e - 0.80C_{e2}Q_{s1}}{Q_{s2}} \quad [49]$$

En cuanto al tercer caso, los gastos de entrada fueron iguales, por eso:

$$\frac{C_{s2}}{C_{e1}} = 1 \quad [50]$$

Despejando  $C_{s2}$  en la expresión anterior se obtuvo:

$$C_{s2} = C_{e1} \quad [51]$$

Para obtener  $C_{s1}$  basta de sustituir  $C_{s1}$  en la ecuación siguiente

$$C_{s1} = \frac{M_e - C_{e1}Q_{s2}}{Q_{s1}} \quad [52]$$

### 3.7. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS

[Dos entradas a  $180^\circ$ :  $Q_{e1} < Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$ ]

En la Figura 3.32, se muestra la tendencia de dos flujos que entran a un cruce de tuberías a  $180^\circ$ . En este caso, el gasto en el entrada 1 es menor, mientras su concentración de cloro es mayor.

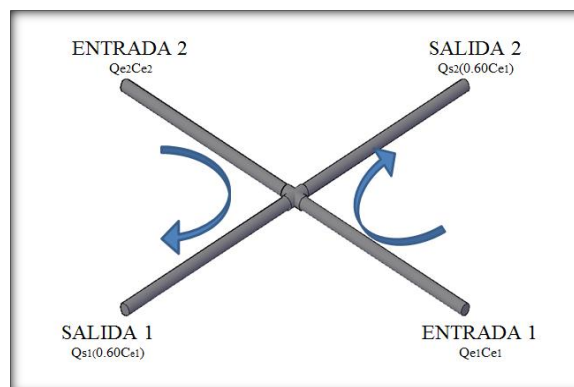


Figura 3.32. Tendencia de dos flujos en un cruce de tuberías, entrada a  $180^\circ$   $Q_{e1} < Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$

En la Tabla 3.13, se presentan 5 escenarios en los cuales los gastos en la entrada 1, son menores a los gastos de la entrada 2, y tienen una concentración mayor de cloro. Se observa que siempre hubo una mezcla completa en la salida, y que el valor de  $C_s/C_{e1}$ , es aproximadamente igual a 0.60.

**Tabla 3.13. Obtención del coeficiente R [entradas a 180°  $Q_{e1} < Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$ ]**

PATRON DE COMPORTAMIENTO DE FLUJOS					
Pruebas	$C_{e1}$ [mg/L]	$C_{e2}$ [mg/L]	$C_{s1}$ [mg/L]	$C_{s2}$ [mg/L]	$C_s/C_{e1}$
1	1.55	0.6	0.93	0.95	<b>0.60</b>
2	1.47	0.59	0.88	0.88	<b>0.60</b>
3	1.67	0.59	0.97	0.97	<b>0.58</b>
4	1.37	0.61	0.82	0.84	<b>0.61</b>
5	1.68	0.6	1.1	1.08	<b>0.64</b>
<b>Promedio</b>					<b>0.60</b>

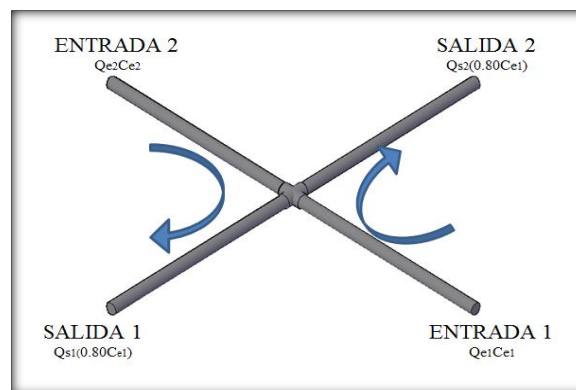
Como el valor de  $\frac{C_s}{C_{e1}} = 0.60$  en todas las pruebas, al despejar el valor de  $C_s$  en la expresión anterior, se obtuvo la ecuación para calcular la concentración del cloro en las salidas.

$$C_s = 0.60 C_{e1} \quad [53]$$

### 3.8. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS

[Dos entradas a 180°:  $Q_{e1} > Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$ ]

La Figura 3.33 muestra la tendencia de dos flujos que entran a un cruce a 180°. Para este caso el gasto 1 es mayor que el gasto 2; la concentración en la entrada 1 es mayor a la concentración de entrada 2.



**Figura 3.33. Tendencia de dos flujos en un cruce de tuberías, entrada 180°,  $Q_{e1} > Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$ ]**

En la Tabla 3.14, se presentan 5 pruebas en las cuales el gasto en la entrada 1, es mayor al gasto de la entrada 2, y tienen una concentración mayor de cloro. Se observa que siempre hubo una mezcla completa en la salida, y que el valor de  $C_s/C_{e1}$  es igual a 0.80.

**Tabla 3.14. Obtención del coeficiente R [entradas a 180°  $Q_{e1} > Q_{e2}$  y  $C_{e1} > C_{e2}$ ]**

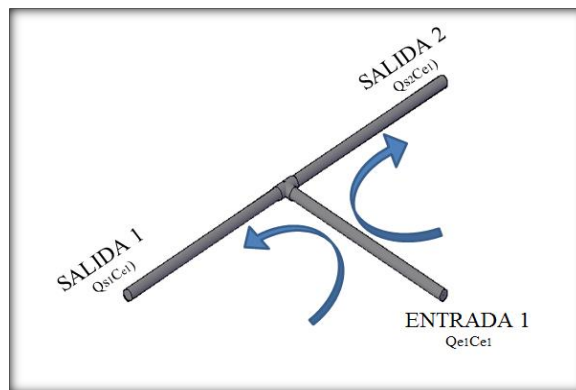
PATRON DE COMPORTAMIENTO DE FLUJOS					
Prueba	$C_{e1}$ [mg/L]	$C_{e2}$ [mg/L]	$C_{s1}$ [mg/L]	$C_{s2}$ [mg/L]	$C_s/C_e$
1	1.00	1.90	1.49	1.50	<b>0.80</b>
2	1.04	2.04	1.64	1.64	<b>0.80</b>
3	1.75	1.29	1.38	1.38	<b>0.79</b>
4	0.64	1.44	1.09	1.14	<b>0.79</b>
5	0.55	1.73	1.35	1.40	<b>0.81</b>
<b>Promedio</b>					<b>0.80</b>

Como el valor de  $\frac{C_s}{C_{e1}} = 0.80$  en todas las pruebas, al despejar el valor de  $C_s$  en la expresión anterior se obtuvo la ecuación para calcular la concentración del cloro en las salidas.

$$C_s = 0.80 C_{e1} \quad [54]$$

### 3.9. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS [Caso T y Y: una entrada y dos salidas]

La tendencia de un flujo que entra en una T se muestra en la siguiente Figura 3.34 mientras que la de dos flujos entrando en la misma T se muestra en la Figura 3.35.



**Figura 3.34. Tendencia de un flujo en una T**

El flujo que entra a un solo punto de una T siempre sale con la misma concentración de cloro independientemente de los gastos de salida. La experiencia demuestra que el flujo no reacciona con la pared de las tuberías debido a que el tiempo de residencia es muy corto.

$$C_{e1} = C_{s1} = C_{s2} \quad [55]$$

### 3.10. TENDENCIA DE FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS [Caso T y Y: Dos entradas y una salida]

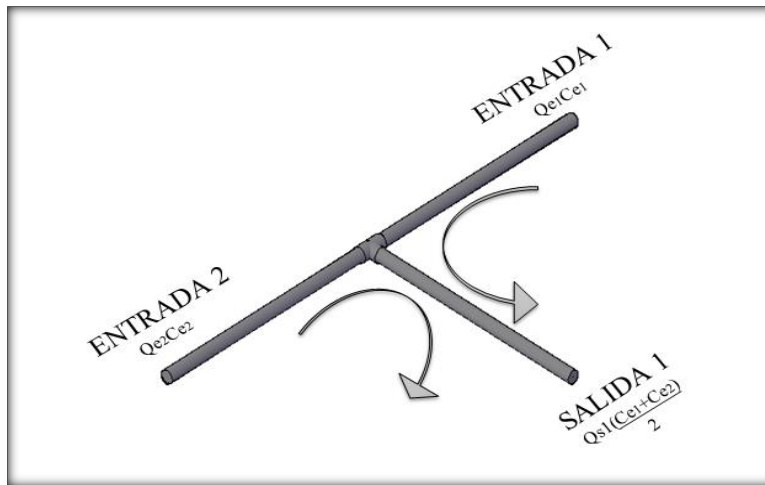


Figura 3.35. Tendencia de dos flujos en una T

Contrariamente a lo que sucedió con un flujo que entra en una T, dos flujos de concentración de cloro diferente que entran a una T siempre salen mezclados. La experiencia demuestra que hay una mezcla perfecta.

La ecuación para calcular la concentración en la salida de una T es la siguiente:

$$C_s = \frac{C_{e1} + C_{e2}}{2} \quad [56]$$

### 3.11. TENDENCIA DE TRES FLUJOS EN CRUCES DE TUBERÍAS [Una entrada y tres salidas]

En el caso de un flujo que entra a un cruce de tubería se muestra la tendencia en la Figura 3.36.

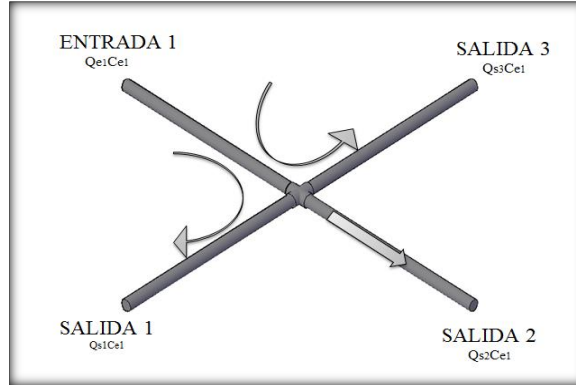


Figura 3.36. Tendencia de tres flujos en un cruce de tuberías

Como se observa en la Figura anterior, el flujo que entra al cruce no tiene contacto con otro flujo, y como el tiempo de residencia es muy corto, no reacciona con la tubería. Las pruebas de Laboratorio demuestran que este flujo siempre sale con la misma concentración en las tres salidas. La ecuación que representa este fenómeno es la siguiente:

$$C_e = C_{s1} = C_{s2} = C_{s3} \quad [57]$$

Cuando entran tres flujos de concentración diferente en un cruce de tuberías siempre salen mezclados; la ecuación para calcular la concentración en la única salida es la siguiente:

$$C_s = \frac{C_{e1} + C_{e2} + C_{e3}}{3} \quad [58]$$

En forma resumida se presentan en la Tabla 3.15, los diferentes valores del coeficiente R obtenidos en esta investigación.

Tabla 3.15 Coeficiente R estimado en los casos estudiados en esta investigación

CASOS ESTUDIADOS	ANGULO	COEFICIENTE R
$Q_{e1} > Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$	45° y 90°	<b>0.93</b>
$Q_{e1} < Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$	45° y 90°	<b>0.80</b>
$Q_{e1} = Q_{e2}; C_{e1} = C_{e2}$	45° Y 90°	<b>1.00</b>
$Q_{e1} = Q_{e2}; C_{e1} \neq C_{e2}$	45 Y 90°	<b>0.80</b>
$Q_{e1} > Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$	180°	<b>0.80</b>
$Q_{e1} < Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$	180°	<b>0.60</b>
<b>OBSERVACION</b>		
En el caso de T y cruces con 3 entradas y una salida no se calculó el coeficiente R, porque la concentración final es igual al promedio de la suma de las concentraciones en las entradas.		



***Capítulo IV***  
***Modelación numérica y caso de  
aplicación***

## **MODELACIÓN NUMÉRICA DEL DECAIMIENTO DEL CLORO EN REDES DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE**

La difusión de sustancias líquidas en el agua es esencialmente dinámica. Dichas sustancias están en permanente movimiento, ya sea por el efecto del propio desplazamiento del agua, o por los cambios de posición natural de las moléculas. El transporte de contaminantes ha sido ampliamente estudiado y ha dado origen a numerosas ecuaciones matemáticas que describen su comportamiento. Estos modelos han mostrado ser de una gran utilidad en la planificación de recursos y en el adecuado manejo de la mayoría de los problemas de contaminación del agua.

Un modelo es un dispositivo que constituye una aproximación a la situación de campo. Intuitivamente, un modelo matemático es una ecuación o conjunto de ecuaciones que simulan de manera aproximada la relación estímulo-respuesta de un aspecto de interés del sistema. Los modelos matemáticos de calidad de agua son herramientas de utilidad para la toma de decisiones relacionadas con la planeación, la gestión y la rehabilitación de los sistemas de abastecimiento de agua potable.

### **4. UTILIDAD DE LOS MODELOS DE CALIDAD DE AGUA**

Los modelos matemáticos de calidad del agua tienen una gran cantidad de aplicaciones, siendo la más conocida la que se indica a continuación.

#### **4.1. Utilidad predictiva**

Los modelos matemáticos para la calidad del agua constituyen una importante herramienta, entregando información anticipada de las condiciones de la calidad del agua en una red. Esta información es importante para mejorar su calidad durante su trayectoria en un sistema de abastecimiento.

#### **4.2. Definición del modelo para el decaimiento del cloro**

Se trata de un modelo utilizado sobre EPANET-BAM, que es un software libre desarrollado por Klifford. K. Ho y Siri Sahib S. Khalsa en el Laboratorio Nacional Sandia en EE.UU. A partir de las características físicas de la red de distribución como los nudos, los tanques, las tuberías, los accesorios y los equipos de bombeo, entre otros, el modelo permite realizar el cálculo hidráulico para encontrar una estimación de las pérdidas de carga, la velocidad del flujo, los gastos en las tuberías, la presión en los nudos y finalmente simula los fenómenos físico-químicos que se producen en el agua, especialmente el decaimiento del cloro y las posibles mezclas en los cruces de tuberías.

Esta investigación está enfocada sobre la simulación de los fenómenos físico-químicos especialmente el decaimiento del cloro y la mezcla de flujos en cruce de tuberías. Por esta razón

la calibración del modelo se realiza en dos etapas: el decaimiento del cloro en las tuberías y la mezcla de los flujos en los cruces.

#### 4.2.1. Calibración del modelo

Durante el desarrollo de esta sección se exponen los procedimientos seguidos en la calibración y validación del modelo matemático a partir de datos experimentales.

Con el propósito de medir la calidad de las soluciones del modelo obtenidas para diferentes valores de los parámetros especialmente el mixing parameter se utilizaron indicadores estadísticos que permitan medir dicha calidad. Para el análisis de las variaciones de los parámetros del modelo matemático, se utilizó como criterio de calidad el parámetro estadístico “RMSE” (root mean square error o error de la desviación cuadrática media) de los residuos, definido como:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [(Valorcalculado) - (Valormedido)]^2}{N}} \quad [59]$$

donde N: es el número de datos

El valor óptimo de este parámetro es cero, lo cual representa que lo estimado es “idéntico” a lo modelado. Un valor diferente de cero, representa la medida de la desviación cuadrática media referida a la diferencia de los valores calculados y medidos.

Es necesario comprobar que el modelo se comporte de manera adecuada y los valores obtenidos por el modelo para las variables de estado y de salida sean similares a los medidos directamente. Lo más habitual es utilizar procedimientos estadísticos basados en las magnitudes de los errores.

$$E = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\text{mod} - \text{med} / \text{med})^2}{N}} \quad [60]$$

#### 4.2.2. Datos y métodos

Para modelar la calidad del agua en redes de agua potable, uno de los parámetros a controlar y el cual es tema de esta tesis es el decaimiento del cloro a lo largo de su trayectoria dentro de la red

de distribución de acuerdo a los coeficientes de degradación  $k_b$  y  $k_w$  y las posibles mezclas en los cruces de tuberías.

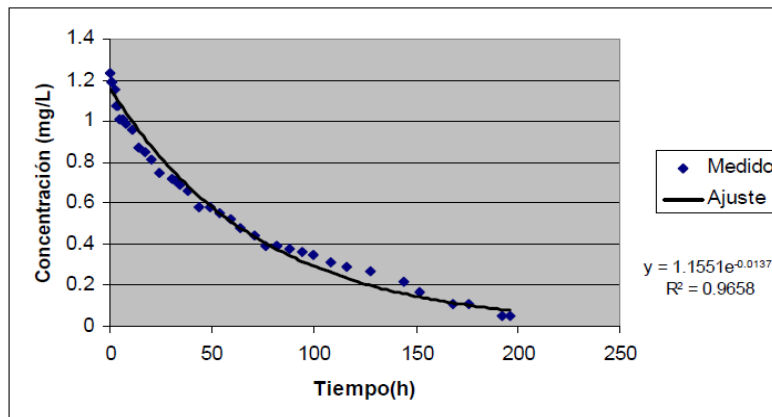
#### 4.2.3. Estimación del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, $k_b$

Existen varios factores que contribuyen al decaimiento del cloro en el agua. La reacción del cloro con el agua se debe principalmente a los siguientes factores: la temperatura Hua et al (1999), Beatty et al (1996), el pH, el contenido de materia orgánica e inorgánica, los compuestos órgano clorados, la presencia de metales como, hierro ferroso ( $Fe^{++}$ ), manganeso ( $Mn^{++}$ ); la presencia del ácido sulfhídrico,  $H_2S$ ; entre otras sustancias. Dado que esa composición será diferente para cada lugar, el coeficiente  $k_b$  tendrá valor diferente por cada lugar.

Para obtener la constante de reacción con el volumen de agua ( $k_b$ ), Alcocer et al, (2002) empleó el siguiente procedimiento que se describe a continuación:

- Se tomaron las muestras de agua almacenándolas en frascos de un litro.
- Posteriormente a determinados intervalos de tiempo se midió la concentración del cloro en las muestras.
- Con lo anterior, se obtuvo el decaimiento del cloro.
- Por último se procesaron los datos de las mediciones a través de un programa de ajuste de curvas, por ejemplo Excel, esto con el objetivo de construir una curva de decaimiento como se puede observar en el gráfico 4.1. El ajuste debe ser del tipo exponencial.

Para el caso de esta ilustración, el valor de la reacción del cloro con el volumen de agua fue de 0.0137 l/día.



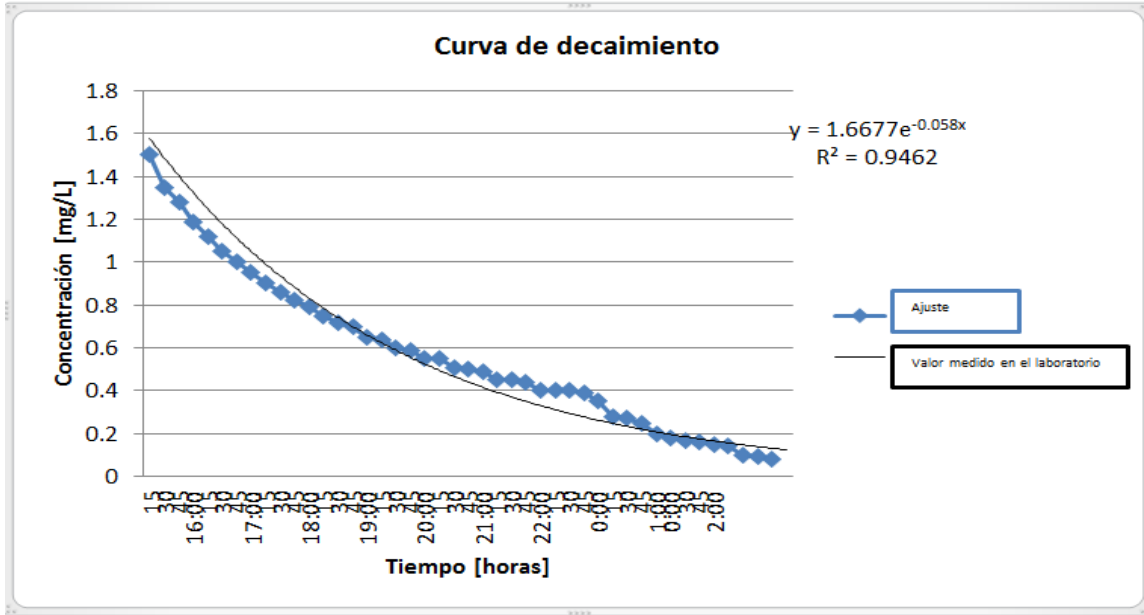
Gráfica 4.1. Curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua, Culiacán, México, [Alcocer *et al* 2002].

En el Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México (II-UNAM), se utilizó un sistema de recirculación para realizar las pruebas en el laboratorio con el fin de obtener el coeficiente ( $k_b$ ). Este sistema está compuesto de un depósito de 400 litros de capacidad, en el cual el agua tenía una concentración de cloro conocida. Se utilizó un medidor de cloro en línea (cuyas características fueron descritas en el capítulo 3) para medir la concentración del cloro a través del tiempo. Finalmente se utilizó una bomba que conduce el agua hacia el equipo de medición. En la Figura 4.1 se muestra el sistema utilizado. Durante esta prueba se observó que el decaimiento fue más rápido al principio de la prueba. Con el uso de los dataloggers se registraron los datos durante la prueba con intervalos de un segundo.



**Figura 4.1. Sistema montado para estimar el coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua,  $k_b$**   
[Mompremier, 2012]

Los datos medidos fueron procesados a través del programa Excel para construir la curva de decaimiento. Del análisis y manejo de los datos se debe obtener una línea de tendencia de tipo exponencial, el valor del coeficiente de decaimiento  $k_b$  tomó un valor de 0.058 1/día. En el gráfico 4.2 se muestra la curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua obtenida en el dispositivo montado en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, [Mompremier, 2012].



Gráfica 4.2. Curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua, Instituto de Ingeniería UNAM, [Mompremier, 2012].

Los valores de  $k_b$  obtenidos en el laboratorio del Instituto de Ingeniería de la UNAM están acordes a lo reportado por Vasconcelos et al. (1996), Lansey y Boulos, (2005). Según los estudios realizados por estos investigadores,  $k_b$  siempre toma un rango de valores entre 0.01 a 0.074 1/día. El coeficiente de reacción del cloro con el volumen del agua  $k_b$ , generalmente se incrementan de forma proporcional a temperaturas elevadas, Vasconcelos *et al.* (1997). La cinética de la reacción del cloro con el agua se describe por medio de una ecuación de primer orden.

Existen una forma directa para estimar el coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua  $k_b$ . En la Facultad de Ingeniería de la Universidad Laval en Quebec, Canadá, Binet et. Al (2010) presentaron una ecuación con la cual se puede calcular o estimar el valor de  $k_b$ . Esta ecuación se describe a continuación:

$$k_b = -\frac{1}{t - t_0} \ln\left(\frac{C_{CDV}(t)}{C_{CDV}(t_0)}\right) \quad [61]$$

donde:

- $k_b$       coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua (1/día)
- $t$         tiempo donde se toma una muestra (h)
- $t_0$       tiempo inicial donde se toma la primera muestra (h)

CCDV<sub>(t)</sub> concentración del cloro al punto de muestreo al instante t (mg/L)  
 CCDV<sub>(t0)</sub> concentración del cloro al punto de muestreo al instante t<sub>0</sub> (mg/L)

El ajuste que se realiza es de tipo exponencial, con base en la siguiente expresión:

$$C = C_0 e^{-k_b t} \quad [62]$$

donde

k<sub>b</sub> coeficiente de reacción del cloro con el agua [1/día]  
 C<sub>0</sub> concentración de la sustancia al inicio del tramo, [mg/L].  
 T tiempo [h]

#### **4.2.3.1. Estimación del coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua, k<sub>b</sub> [Laboratorio hidráulico de la Universidad de Guanajuato]**

En el dispositivo físico construido en el Laboratorio Hidráulico de la Universidad de Guanajuato se realizaron varias pruebas con el propósito de estimar el coeficiente de decaimiento con el volumen de agua k<sub>b</sub> y posteriormente conocer la concentración de cloro en varios puntos del dispositivo. Este dispositivo se diseñó de acuerdo al espacio disponible en el laboratorio, consta de tuberías de cobre y PVC de ½ a 4 pulgadas de diámetro (fotografía 4.2). Se utilizó una bomba que permite extraer un gasto que simula la demanda en la red (fotografía 4.1D).

El dispositivo se divide en cinco sectores y es alimentado por una bomba que extrae agua de un cárcamo (fotografía 4.1 C) que se encuentra colocado a nivel de piso; también cuenta con canales cuya finalidad es conducir el agua que sale por las llaves hacia el cárcamo para su recirculación. Se utilizó un medidor de flujo con el fin de medir el gasto que circula dentro del sistema, (fotografía 4.1 E)



Fotografía 4.1. Modelo físico de la Universidad de Guanajuato



Fotografía 4.2. Modelo físico de la Universidad de Guanajuato



Para estimar el coeficiente de decaimiento con el volumen de agua  $k_b$ , se llevaron a cabo varias pruebas en las instalaciones del laboratorio hidráulico de la Universidad de Guanajuato. Se instalaron los equipos de medición de cloro en varios puntos del dispositivo (fotografía 4.1.F), desde el punto más cercano del cárcamo hasta el punto más lejano.

Para estimar el coeficiente de decaimiento con el volumen del agua  $k_b$  se empleó el mismo procedimiento descrito en el apartado 4.2.3 (Laboratorio del Instituto de Ingeniería). Sin embargo, los tinacos fueron sustituidos por el cárcamo. Los resultados fueron registrados con los “dataloggers” durante la prueba con intervalos de dos segundos, y posteriormente fueron procesados a través del programa Excel para construir la curva de decaimiento. En esta investigación el valor estimado fue 0.065 1/día, valor acorde a lo reportado por Lansey y Boulos, (2005).

En cuanto al estudio del decaimiento del cloro, se realizaron otras pruebas en el mismo dispositivo. Los resultados se muestran en la Tabla 4 (Anexo). Como se puede observar en esta Tabla, se manejaron tres tipos de gastos: 32.07 L/s, 27.32 L/s, 22.37 L/s, la concentración inicial en las tres pruebas fue de 0.85 mg/L. Como se aprecia, no se registró un decaimiento del cloro durante las pruebas. Como se pudo observar el tiempo de residencia fue demasiado corto para que sucediera un decaimiento del cloro (menos de un minuto).

Aplicando la ecuación 62 se obtuvieron los mismos resultados.

$$C_1 = 0.85e^{-0.065(0.005)} = 0.849$$

#### 4.2.4. Reacción con la pared de la tubería $k_w$

La pared de las tuberías es un factor importante en el decaimiento del cloro en las redes de agua potable. Eso es debido que el cloro y otras sustancias contenidas en el agua pueden reaccionar con los materiales de los cuales están fabricados o recubiertos las paredes de la tubería.

Estudios anteriores mencionaron que la reacción con la pared de las tuberías normalmente se mide en términos de la tasa de reacción y depende de la cantidad de superficie disponible para reaccionar y de la tasa de transferencia de masa entre el fluido y la pared de la tubería. Dentro de las tuberías, en ocasiones la reacción con la pared puede ser significativa. Hua et al. (1999) reporta que la constante  $k_w$  representa solo el 10% de la constante  $k_b$ .

Alcocer *et al.* (2004), reporta valores para  $k_w$  en el rango de 0.320 y 2.0725 m/día. Los valores obtenidos y las condiciones de este estudio se presentan en la Tabla 4.1

**Tabla 4.1 Valores del coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías de diferente diámetro, [Alcocer, *et al.* 2004].**

Diámetro (pulgadas)	Velocidad (m/s)	$K_w$ (m/día)
3	0.340	0.473
6	0.695	2.072
10	0.485	0.320
12	1.155	1.338
18	0.550	0.729

Es importante mencionar que el diámetro de las tuberías juega un papel importante en los mecanismos de transporte. Para las tuberías de diámetros pequeños (150 y 200 mm) el  $k_w$  es el que predomina mientras que para los diámetros grandes (300mm y más) predomina el coeficiente  $k_b$ , Rossman et al. (1994). Otros parámetros que intervienen en el mecanismo de decaimiento son: la temperatura del agua, la concentración, el contenido de materia orgánica natural.

#### 4.2.5. Coeficiente de Hazen-Williams

Cada tubería tiene su propio coeficiente de pérdida de energía ( $C_{H-W}$ ) el cual depende del material y la edad de servicio. Este coeficiente interviene en los cálculos de las velocidades e influye en el transporte del cloro en las tuberías. En este estudio los coeficientes varían entre 70 a 100.

### 4.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO (MEZCLA EN CRUCES)

Como se ha visto en el capítulo 3, cuando dos flujos entran en un cruce a 45° o 90° y tienen la misma concentración de cloro, independientemente de su magnitud, salen con la misma concentración. Cuando los gastos son diferentes y tienen concentración de cloro diferente, dos eventos pueden esperarse:

- **No se mezclan los flujos.** Esto sucede cuando el flujo de mayor magnitud tiene menor concentración de cloro.
- **Se mezclan** cuando el flujo de mayor magnitud tiene una mayor concentración de cloro. Sin embargo, los resultados de laboratorio muestran que esta mezcla **no es homogénea**.

Otros casos fueron estudiados con entrada a 180°, Tee. Diferentes ecuaciones fueron desarrolladas para representar cada caso.

#### 4.3.1. Metodología para calibrar el modelo (cruces de tuberías)

Como se ha mencionado para el caso del estudio del mezclado en cruces de tuberías se utilizó como base, el modelo desarrollado en el Laboratorio Nacional de Sandia (Sandia National Laboratories) en 2007 por Siri Sahib S. Khalsa y Clifford K. Ho. Este modelo es conocido como EPANET BAM (Bulk advective Model), el cual es la nueva versión de EPANET. En esta versión se agregó en la interface gráfica una nueva propiedad llamada “**mixing parameter**”, el cual predice la concentración de sustancias en las salidas de un cruce de tuberías. Este parámetro se ubica entre la “demand y pattern” como se observa en la figura 4.2 y tiene un rango de valores entre 0.1 y 1. Este coeficiente debe elegirse con base en las ecuaciones desarrolladas en el capítulo 3 a partir de pruebas realizadas en el modelo físico construido en las instalaciones del Laboratorio Hidráulico del Instituto de Ingeniería de la UNAM.

Se requieren varios parámetros como son:

- Elevación de los tanques [h,m]
- Elevación de los nudos [h,m]
- Diámetros de las tuberías [d, m]
- Los gastos de entrada [ $Q_1$  y  $Q_2$ , L/s]
- Los coeficientes de Hazen-Williams
- La concentración de entrada de cada cruce, [ $C_1$  y  $C_2$ , mg/L]

Sin embargo estos parámetros están fijos en el proceso de calibración.

Finalmente para asegurar que la elección del **mixing parameter** sea la adecuada, debe usarse la ecuación del error de la desviación cuadrática media para encontrar el valor óptimo.

Es importante mencionar que los archivos “.net” de EPANET no son compatibles con EPANET-BAM. Para abrir un archivo .net en EPANET- BAM debe seguirse el siguiente procedimiento:

- Exportar el archivo .net de EPANET como archivo de texto .INP de la manera siguiente:  
File menú → Export → Network
- Agregar “MixParam” en el archivo INP exportado como se ve en la figura 4.2

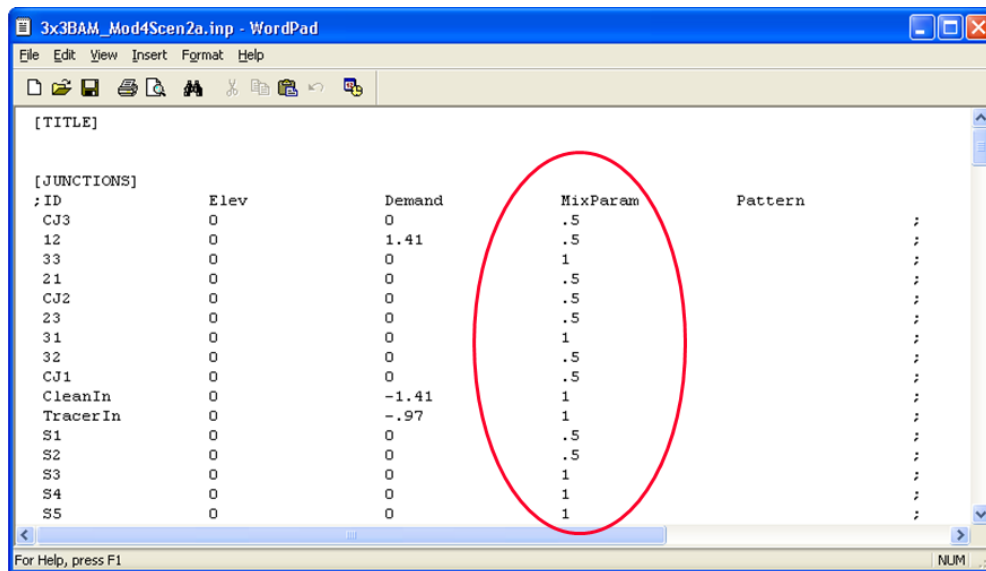


Figura 4.2. Ubicación del parámetro Mixing parameter en el archivo .INP

### Instalación del EPANET-BAM

El software contiene las siguientes herramientas:

- EpanetBAMw.exe and epanetBAM.dll - the EPANET-BAM executable  
Graphical user interface for Windows 95/98/NT/XP/7
- EpanetBAM.exe - command line executable version of the solver.

### 4.3.2. Validación del modelo

Por definición, la validación es el proceso de comprobar que los resultados aportados por el modelo para las variables de salida no se desvían demasiado de los medidos en la realidad (caso de los cruces de tuberías). En cada simulación se utiliza un **mixing parameter** diferente (0.1 a 1) para obtener dos valores correspondientes a la salida 1 y salida 2. Posteriormente se debe calcular

el error de la desviación cuadrática media en cada caso. Finalmente, el **mixing parameter** correspondiente al error de la desviación cuadrática media más pequeña es el valor óptimo. Se utilizaron los datos de la Tabla 4.2 para el primer proceso de calibración.

**Tabla 4.2. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación simple: una entrada y tres salidas)**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1 ½	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE						
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00043	0.35	0.29	1.25E+04	0.15	0.147
SALIDA 1	0.00012	0.35	0.08	3.49E+03	0.042	
SALIDA 2	0.00016	0.35	0.11	4.65E+03	0.056	
SALIDA 3	0.00014	0.35	0.09	4.07E+03	0.049	

### 4.3.3. Resultados obtenidos con el modelo matemático (Alimentación simple: una entrada y tres salidas)

Para este escenario, es importante recordar que el modelo experimental se configuró como un sistema abastecido por gravedad desde dos tanques elevados del laboratorio. El caso simulado tiene una entrada y tres salidas.

En la Tabla 4.2 se muestran algunos parámetros físicos de los cruces tales como: tipo de material, el diámetro de las tuberías, la longitud, entre otros, pero lo más importante para la modelación numérica eran los datos de entrada, es decir los gastos y las concentraciones iniciales.

Como se mencionó anteriormente, el modelo matemático permite encontrar una buena estimación de las pérdidas de carga, la velocidad del flujo, los gastos en las tuberías. En las figuras 4.3 y 4.4 se pueden observar los gastos y las velocidades simulados. Al compararlos con los valores encontrados en la Tabla 4.2 se puede observar que existe una buena correlación entre los datos medidos y los datos simulados.

Como se puede observar, los gastos simulados y medidos son iguales, las velocidades son iguales excepto en la salida 3, el valor medido es de 0.09 m/s y el valor simulado es 0.10 m/s. Como se puede observar, la diferencia es muy pequeña.

En cuanto a las concentraciones del cloro en las tres salidas, los resultados figuran en la Tabla 4.3. Como se puede observar, esta Tabla se divide en seis columnas: en la primera columna se encuentran los valores de la concentración de cloro (salida 1 y salida 2) medidos en Laboratorio, en la segunda aparecen los números de simulaciones mientras que en la tercera columna se pueden observar los valores (concentración del cloro) simulados, en la cuarta columna se presentan los coeficientes mixing parameter. Es importante mencionar que se utilizaron diez valores, 0.1 hasta 1; en la quinta figuran los valores del error de la desviación cuadrática media por cada simulación y finalmente en la sexta se observa la raíz de la desviación cuadrática media.

Como puede observarse en la Tabla 4.3, el valor de la concentración del cloro no cambia a medida que aumenta el valor del coeficiente **mixing parameter**. A partir de los resultados, se concluyó que en el caso de un cruce de tubería con una entrada y tres salidas se puede elegir para el coeficiente **mixing parameter** cualquier valor entre 0.1 y 1, porque el valor calculado y el valor simulado siempre serán iguales. Para este trabajo de investigación, el valor elegido fue 0.5.

En la figura 4.3 se pueden observar los gastos simulados, la figura 4.4 muestra las velocidades simuladas mientras que en la figura 4.5 se pueden observar la concentración del cloro en las tres salidas y finalmente en la Tabla 4.3 se muestran los valores del error de la desviación cuadrática media por cada simulación y se comparan los datos medidos y los datos simulados.

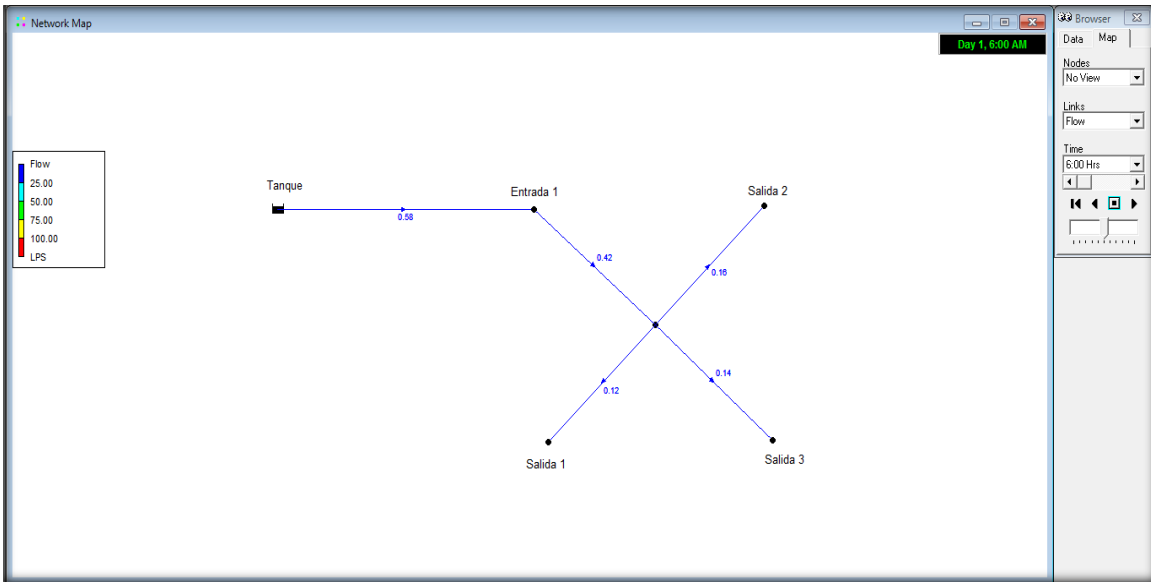


Figura 4.3. Gastos simulados (Alimentación: simple, una entrada y tres salida)

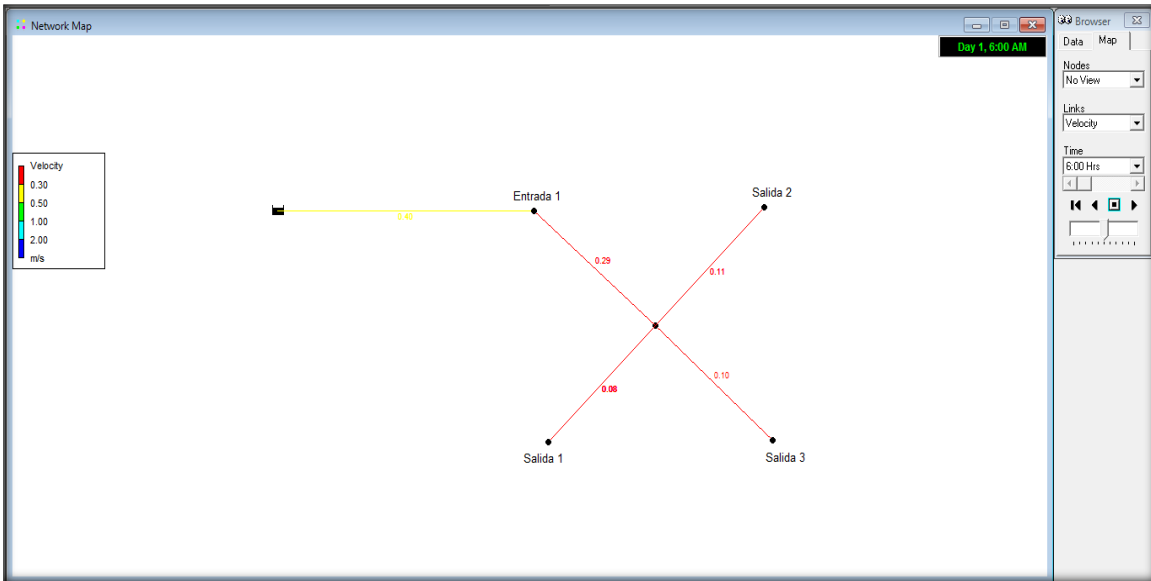


Figura 4.4. Velocidades simuladas (Alimentación simple, una entrada y tres salidas)

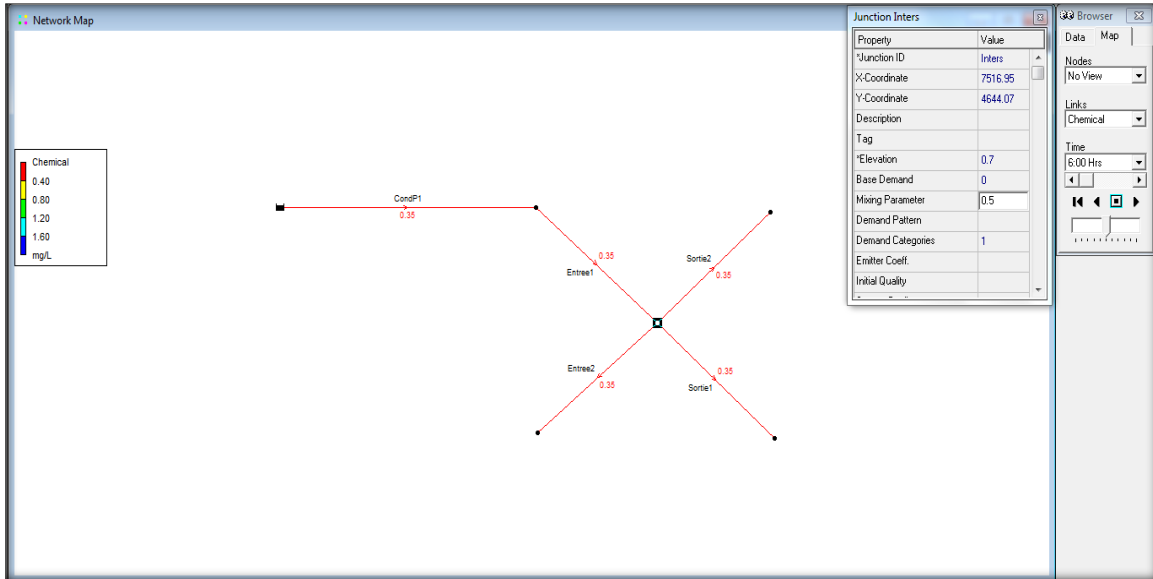


Figura 4.5. Concentraciones simuladas (Alimentación simple: una entrada y tres salidas)



**Tabla 4.3. Comparación entre valores simulados y valores medidos  
(Alimentación simple: una entrada y tres salidas)**

Modelo experimental $C_{s1}$ , $C_{s2}$ y $C_{s3}$ [mg/L]	Número de simulaciones	Modelo matemático $C_{s1}$ , $C_{s2}$ y $C_{s3}$ [mg/L]	Mixing parameter [adim]	RMSE [adim]	$\sqrt{RMSE}$
0.35		0.35		0	0
0.35	1	0.35	0.1	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	2	0.35	0.2	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	3	0.35	0.3	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	4	0.35	0.4	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	5	0.35	0.5	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	6	0.35	0.6	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	7	0.35	0.7	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	8	0.35	0.8	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	9	0.35	0.9	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	10	0.35	1	0	0
0.35		0.35		0	0

**Tabla 4.4. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación doble: dos entradas y una salida)**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1	0.0015	1.6	0.00080	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE						
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	MASA TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00024	1.75	0.16	6.97E+03	0.42	0.63
ENTRADA 2	0.00017	1.25	0.11	4.94E+03	0.21	0.61
SALIDA	0.00042	1.47	0.28	1.22E+04	0.61	

#### 4.3.4. Calibración del modelo matemático (Alimentación doble: dos entradas y una salida)

Para el estudio de este caso, el modelo físico fue modificado. En lugar de una cruz, se utilizó una Tee para que los dos flujos de entrada, se mezclen y posteriormente salgan en el otro extremo.

Según los resultados obtenidos en el laboratorio, como se observa en la Tabla 4.4, los flujos de gastos diferentes [0.24 L/s y 0.17 L/s] y de concentración de cloro diferente [1.75 mg/L y 1.25 mg/L] entran a una Tee, se mezclan para salir con una concentración de cloro cercana al promedio de las dos concentraciones, (1.47 mg/L).

Los mismos datos fueron introducidos en el modelo matemático. Se realizaron 10 simulaciones con el fin de encontrar el coeficiente **mixing parameter** que mejor representa el caso estudiado.

En la Tabla 4.5 se muestran los valores de la concentración del cloro en la salida de la Tee para diez simulaciones. Se observa que el valor de la concentración del cloro en la salida no cambia a medida que aumenta el valor del coeficiente **mixing parameter**.

Como no se observó ninguna diferencia entre los resultados simulados y medidos y que el valor del error de la desviación cuadrática media siempre es igual a cero en todas las simulaciones, se concluyó lo siguiente: En el caso en el que dos flujos con concentraciones de cloro diferente llegan a una Tee, se puede elegir para el coeficiente **mixing parameter** cualquier valor dentro del intervalo [0.1, 1].

La figura 4.6 muestra los resultados obtenidos en la primera simulación del modelo matemático. En la Tabla 4.5 se comparan los valores simulados y medidos, también se muestran los diferentes valores de la desviación cuadrática media correspondiente a un valor diferente del **mixing parameter**. Para este caso, en esta investigación se eligió el valor de 0.5.

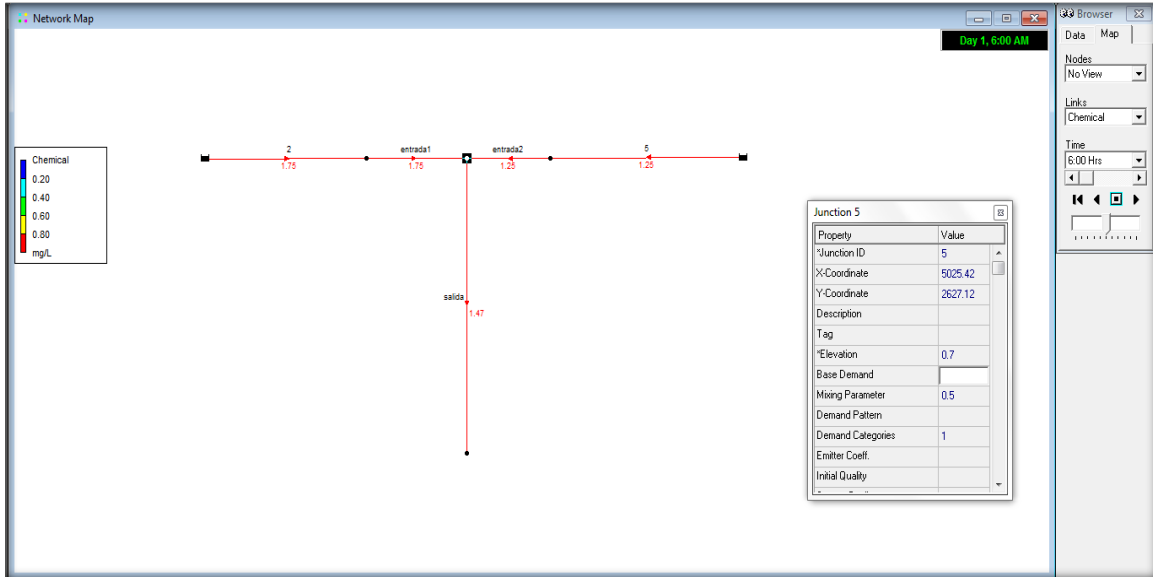


Figura 4.6. Concentraciones simuladas (Alimentación doble: dos entradas y una salida)

Tabla 4.5. Comparacion entre valores simulados y valores medidos (Alimentación doble: dos entradas y una salida)

Modelo Experimental $C_{salida}$ [mg/L]	Número de simulaciones	Modelo Matemático $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Mixing Parameter [Adim]	RMSE [Adim]	$\sqrt{RMSE}$
1.47	1	1.47	0.1	0	0
1.47	2	1.47	0.2	0	0
1.47	3	1.47	0.3	0	0
1.47	4	1.47	0.4	0	0
1.47	5	1.47	0.5	0	0
1.47	6	1.47	0.6	0	0
1.47	7	1.47	0.7	0	0
1.47	8	1.47	0.8	0	0
1.47	9	1.47	0.9	0	0
1.47	10	1.47	1	0	0

**Tabla 4.6. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$ ,  $C_{e1}=C_{e2}$ )**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	3/4	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESIÓN [mm]
ENTRADA 1	0.0003	0.35	0.78	1.73E+04	0.000105	0.21	1615
ENTRADA 2	0.0003	0.35	0.78	1.73E+04	0.000105		1621
SALIDA 1	0.00036	0.35	0.94	2.08E+04	0.000126	0.21	1565
SALIDA 2	0.00024	0.35	0.62	1.38E+04	0.000084		1536

#### 4.3.5. Calibración del modelo matemático (Alimentación doble: dos entradas y dos salidas)

Para este caso, se utilizó un cruce en el cual llegan dos flujos con la misma magnitud ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ ) teniendo la misma concentración del cloro, ( $C_{e1}=C_{e2}$ ).

Como se observa en esta Tabla 4.6, los flujos salen del cruce con la misma concentración de cloro [0.35 mg/L]; en otro término la concentración inicial era igual a la concentración final en todas las series de pruebas.

En cuanto al modelo matemático, la calibración empezó con el valor inicial 0.1 (**mixing parameter**), al finalizar la primera simulación se observó que la concentración inicial fue igual a la concentración final como ocurrió en el Laboratorio. Se realizó otra simulación usando 0.2 como valor del coeficiente. En esta simulación se encontró que el valor de la concentración final fue igual a la concentración inicial. En todas las simulaciones se observó que la concentración del cloro en las salidas no cambió a medida que se incrementó el valor del coeficiente [0.1, 1]. Con estos valores introducidos en el modelo matemático se produjeron los mismos valores obtenidos en el Laboratorio. A partir de estas simulaciones se pudo reiterar que cuando dos flujos entran a un cruce de tuberías con la misma concentración de cloro siempre van a salir con la misma concentración. Para este caso se eligió un valor de 0.5.

Para verificar la pertinencia de los resultados del modelo para otros conjuntos de datos diferentes a los utilizados en la calibración y cumplir con el objetivo principal de este trabajo, se validó el modelo computacional utilizando otros datos experimentales.

Los datos iniciales (gastos de entrada y concentraciones iniciales) fueron sustituidos por otros datos conservando el mismo escenario (gastos de entrada iguales y concentración de cloro igual), se realizaron 10 simulaciones con los mismos coeficientes de **mixing parameter** en las cuales se observaron las mismas tendencias, es decir concentración inicial era igual a la concentración final. Estos resultados permitieron confiar en la calibración del modelo.

La figura 4.7 muestra los gastos simulados y se observan una igualdad entre los datos simulados y medidos. En la figura 4.8 se muestran los valores de la concentraciones simuladas y finalmente en la Tabla 4.7 se observaron que los valores de la concentración en las salidas correspondiente a cada valor del **mixing parameter** fueron iguales [0.35 mg/L]. El error de la desviación cuadrática media fue igual a cero en todos los casos.

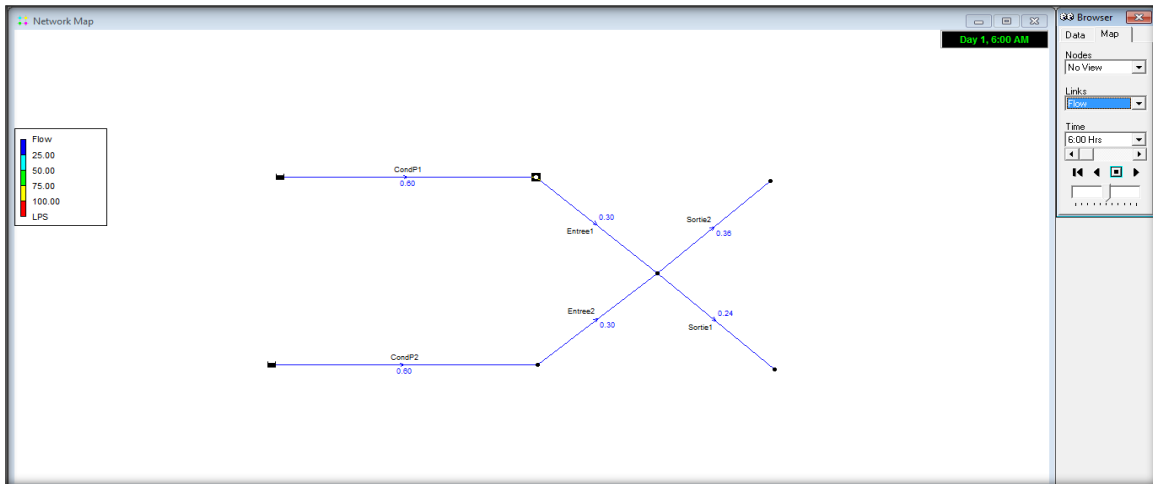


Figura 4.7. Gastos simulados (Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$ ,  $C_{e1}=C_{e2}$ )

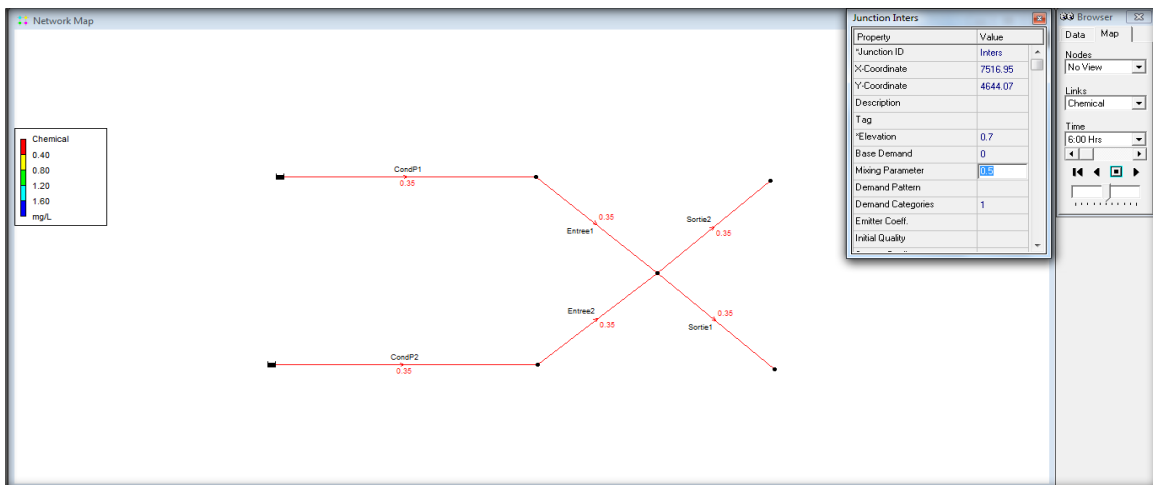


Figura 4.8. Concentraciones simuladas (Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$ ,  $C_{e1}=C_{e2}$ )

**Tabla 4.7. Comparación entre valores simulados y valores medidos (Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$ ,  $C_{e1}=C_{e2}$ )**

Modelo Experimental $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Número de simulaciones	Modelo Matamático $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Mixing Parameter [Adim]	RMSE [Adim]	$\sqrt{RMSE}$
0.35	1	0.35	0.1	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	2	0.35	0.2	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	3	0.35	0.3	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	4	0.35	0.4	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	5	0.35	0.5	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	6	0.35	0.6	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	7	0.35	0.7	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	8	0.35	0.8	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	9	0.35	0.9	0	0
0.35		0.35		0	0
0.35	10	0.35	1	0	0
0.35		0.35		0	0

**Tabla 4.8. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$  ,  $C_{e1}<C_{e2}$ )**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	1 <sup>1/2</sup>	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA DEL CRUCE							
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	# REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESION [mm]
ENTRADA 1	0.00024	0.5	0.16	6.97E+03	0.12	0.453	1487
ENTRADA 2	0.00024	1.39	0.16	6.97E+03	0.33		1487
SALIDA 1	0.00025	1.28	0.17	7.26E+03	0.32	0.453	1485
SALIDA 2	0.00022	0.6	0.15	6.39E+03	0.133		1481

**4.3.6. Calibración del modelo matematico (Alimentación doble: dos entradas y dos salidas )**

En las dos entradas del cruce entraron dos flujos con la misma magnitud ( $Q_{e1}=Q_{e2}$ ) provenientes de dos fuentes diferentes, es decir la concentración en las entradas era diferente, ( $C_{e1}<C_{e2}$ ). Como se puede observar en la Tabla 4.8, los resultados del modelo experimental mostraron que para estas series de pruebas, los flujos salieron del cruce sin mezclarse.

Para calibrar el modelo matemático para este caso, se realizó el mismo procedimiento del caso anterior. En la primera simulación se utilizó el valor más pequeño del intervalo [0.1, 1] y como resultado, se obtuvieron 1.36 mg/L en la salida 1 y 0.50 en la salida 2. Como se observa en la Tabla 4.9 (comparación de resultados) el valor encontrado en la salida 1 fue mayor al valor medido en el laboratorio y el valor simulado en la salida 2 fue menor al valor medido en la salida 2. En la segunda simulación utilizando 0.2 se observó una disminución en la salida 1 (1.36 a 1.30) y un incremento en la salida 2 (0.5 a 0.62). Al comparar los valores medidos contra los valores simulados se observó una pequeña diferencia y el valor de la desviación cuadrática media era casi igual a cero (0.04).

Se realizó otra simulación utilizando 0.3 como valor del coeficiente mixing parameter. En este caso se observó que la concentración en la salida 1 era igual a 1.26 mg/L y 0.66 mg/L en la salida 2. En cuanto a la desviación cuadrática media su valor en este caso era igual a 0.08.

Se realizaron otras simulaciones utilizando los otros valores del coeficiente mixing parameter y se observó la siguiente tendencia: El mixing parameter incrementó a medida que la

concentración en la salida 1 disminuyó; la concentración en la salida 2 se incrementó y la desviación cuadrática media también se incrementó. En otros términos se puede decir que mientras que el mixing parameter se incrementaba, los valores simulados se alejaron más de los valores medidos y los valores del error de la desviación cuadrática media se alejaron de cero.

Al comparar los valores medidos y los valores simulados se observó que los valores más parecidos se obtuvieron en la segunda simulación (mixing parameter = 0.2). En esta simulación se obtuvo el valor más pequeño de la desviación cuadrática media (0.04). Por esta razón se eligió 0.2 como mixing parameter.

En la figura 4.9 se puede observar el valor de los gastos simulados en la primera simulación mientras que en la figura 4.10 se observan las concentraciones simuladas y finalmente la Tabla 4.9 muestra una comparación entre los resultados simulados y los resultados medidos en el Laboratorio así como los valores de la desviación cuadrática media.

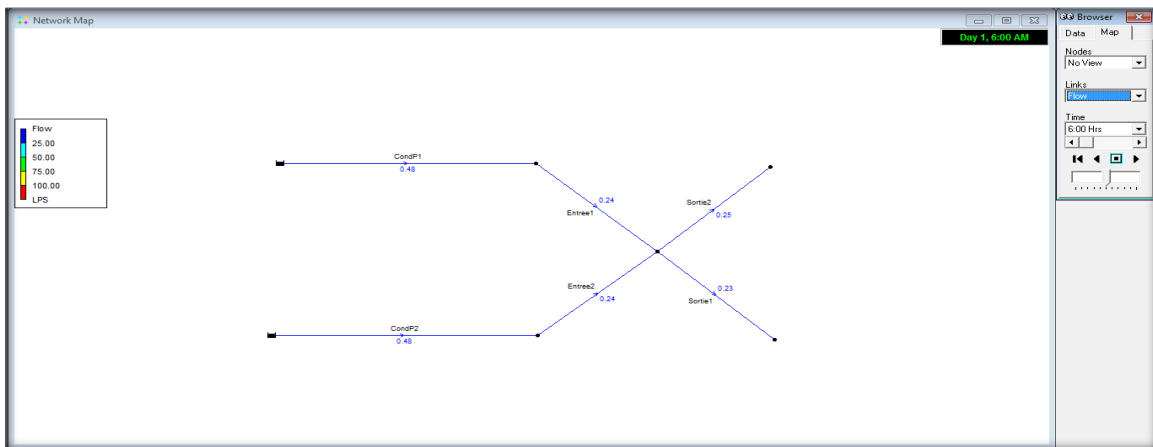


Figura 4.9 Gastos simulados (Alimentación doble:  $Q_e=Q_{e2}$  ,  $C_{e1}<C_{e2}$ )

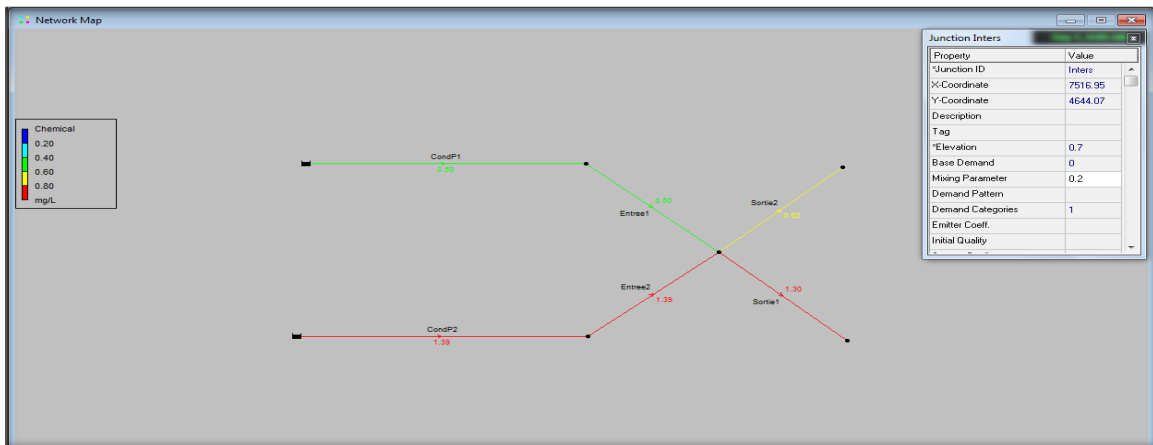


Figura 4.10. Velocidades simuladas (Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$  ,  $C_{e1}<C_{e2}$ )



**Tabla 4.9. Comparación de resultados simulados y medidos  
(Alimentación doble:  $Q_{e1}=Q_{e2}$  ,  $C_{e1}<C_{e2}$ )**

Modelo Experimental $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Número simulaciones	Modelo Matemático $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Mixing Parameter	RMSE [Adim]	$\sqrt{RMSE}$
1.28	1	1.36	0.1	0.0064	0.08
0.6		0.5		0.01	0.1
1.28	2	1.3	0.2	0.0004	0.02
0.6		0.62		0.0004	0.02
1.28	3	1.26	0.3	0.0004	0.02
0.6		0.66		0.0036	0.06
1.28	4	1.21	0.4	0.0049	0.07
0.6		0.7		0.01	0.1
1.28	5	1.17	0.5	0.0121	0.11
0.6		0.74		0.0196	0.14
1.28	6	1.12	0.6	0.0256	0.16
0.6		0.78		0.0324	0.18
1.28	7	1.08	0.7	0.04	0.2
0.6		0.82		0.0484	0.22
1.28	8	1.03	0.8	0.0625	0.25
0.6		0.86		0.0676	0.26
1.28	9	0.99	0.9	0.0841	0.29
0.6		0.9		0.09	0.3
1.28	10	0.95	1	0.1089	0.33
0.6		0.94		0.1156	0.34

**Tabla 4.10. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación doble:  $Q_{e1} > Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )**

DIFUSIÓN DEL CLORO EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN							
DATOS GENERALES DEL CRUCE							
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]		
PVC	3/4	0.0015	1.6	0.00028	1.00E-06		
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA EN EL CRUCE							
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	M.TOTAL [mg/s]	PRESION [mm]
ENTRADA 1	0.000210	1.75	0.55	1.21E+04	0.367	0.447	1300
ENTRADA 2	0.000105	0.75	0.27	6.05E+03	0.078		1200
SALIDA 1	0.000156	1.25	0.41	9.00E+03	0.195	0.450	1110
SALIDA 2	0.000155	1.65	0.40	8.65E+03	0.255		1115

**4.3.7. Calibración del modelo matematico (Alimentación doble: dos entradas y dos salidas)**

Este caso es muy diferente de los casos estudiados anteriormente. Según los datos de la Tabla 4.10, dos flujos de diferentes magnitudes ( $Q_{e1} > Q_{e2}$ ) y de concentraciones de cloro diferentes, ( $C_{e1} > C_{e2}$ ) entraron al cruce. Los valores medidos durante la prueba realizada en el Laboratorio Hidráulico del Instituto de Ingeniería de la UNAM confirmaron que para este caso, los flujos salieron mezclados. Sin embargo la mezcla no era perfecta, es decir la concentración en la salida 1 era diferente de la salida 2.

Con el valor de 0.1 (mixing parameter) se inició el proceso de calibración del modelo matemático para este caso. Con este valor se realizó una primera simulación. En la Tabla 4.11. se observó que los valores simulados (concentración en la salida 1 era inferior a la concentración medida, 1.22 mg/L < 1.25 mg/L y la concentración en la salida 2 era mayor a la concentración medida, 1.72 mg/L > 1.65 mg/L) eran diferentes de los valores medidos en el Laboratorio. La suma de raíz cuadrada del error de la desviación cuadrática media en las salidas dio un valor de 0.1.

En la segunda simulación se utilizó 0.2 como coeficiente y se observó la misma tendencia, la concentración en la salida 1 seguía incrementándose (1.23 mg/L) y la de la salida 2 disminuyendo (1.69 mg/L). Sin embargo la desviación cuadrática media se acercó a cero (0.06).

Se realizó otra simulación utilizando 0.3 como coeficiente mixing parameter. En este caso se obtuvieron valores de concentración más cercanos a los medidos (1.26 mg/L valor simulado y 1.25 mg/L valor medido en la salida 1) y (1.66 mg/L valor simulado y 1.65 mg/L valor medido en la salida 2). Lo más importante en la simulación era el valor del error de la desviación cuadrática media que se acercó más al cero. Se obtuvo un valor de 0.02.

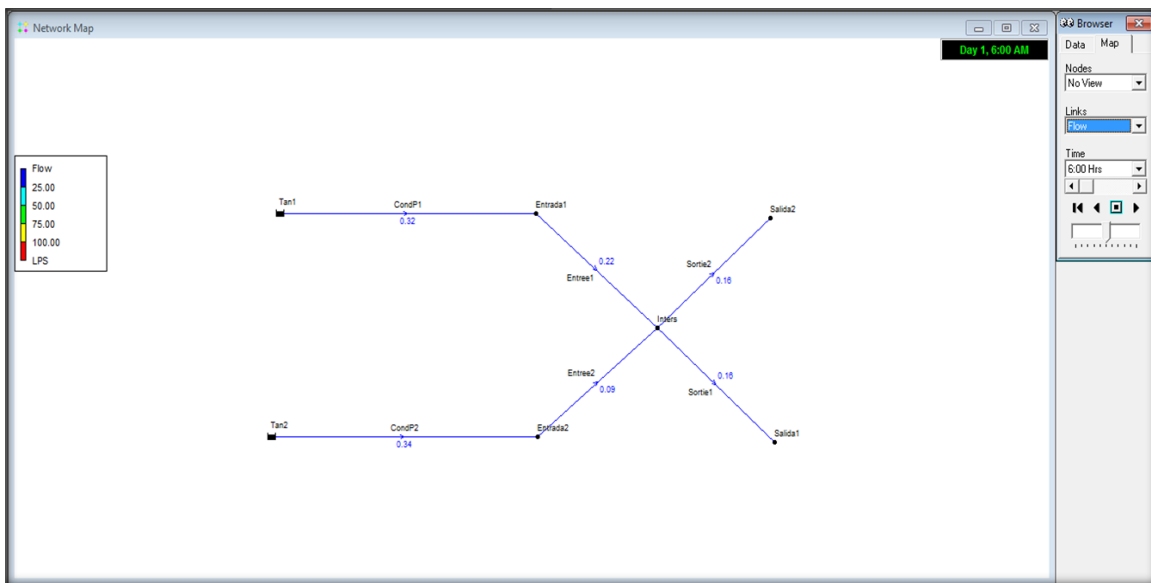
En la cuarta y quinta simulaciones se observó que los valores simulados eran cercanos a los valores medidos, sin embargo la desviación cuadrática media se alejó de cero.

Se realizaron otras simulaciones utilizando los últimos cinco valores del mixing parameter y se observó la misma tendencia; a medida que el mixing parameter incrementaba, la concentración en la salida 1 incrementó, la concentración en la salida 2 disminuyó y el error de la desviación cuadrática media se incrementó. En otros términos, se puede decir que mientras que el mixing parameter se incrementaba, los valores simulados se alejaron más de los valores medidos y los valores de la desviación cuadrática media se alejaron de cero.

Es importante mencionar que en las dos últimas simulaciones los valores en las salidas son iguales, lo que contradice la teoría de mezcla estudiado en el capítulo 3.

Al comparar los valores medidos y los valores simulados se observó que los valores óptimos se obtuvieron en la tercera simulación (mixing parameter = 0.3). En esta simulación la desviación cuadrática media era (0.02).

Las Figuras 4.11 y 4.12 muestran los gastos y las concentraciones simuladas; y la Tabla 4.11 muestra la comparación de los datos simulados y medidos.



**Figura 4.11. Gastos simulados (Alimentación doble:  $Q_{e1} > Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )**

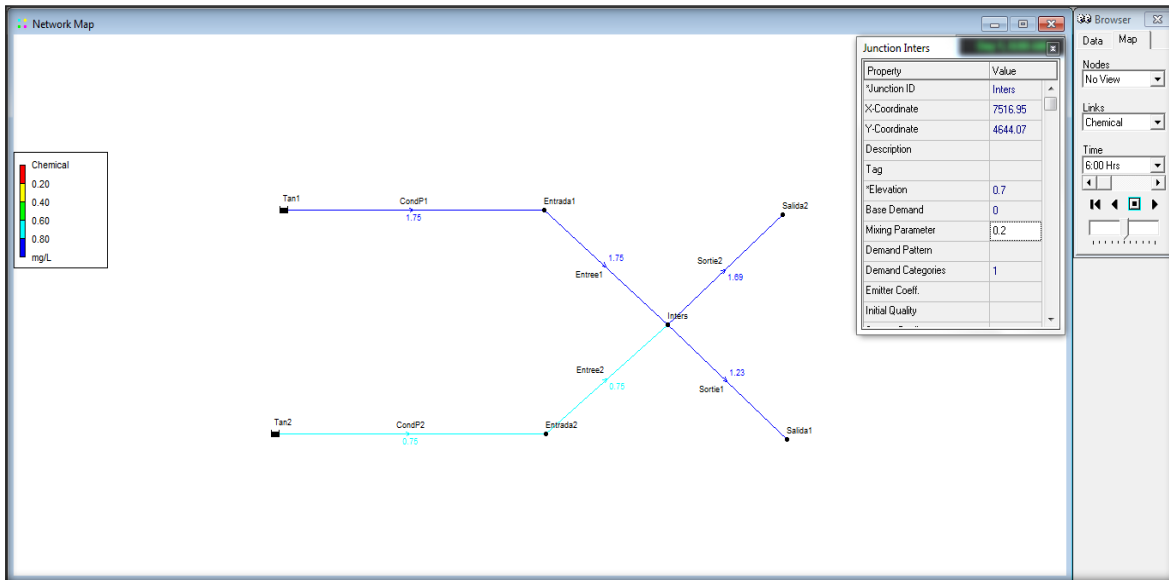


Figura 4.12. Concentraciones simuladas (Alimentación doble:  $Q_{e1} > Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )

Tabla 4.11. Comparación de resultados simulados y medidos (Alimentación doble:  $Q_{e1} > Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )

Modelo Experimental $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Número Simulaciones	Modelo matemático $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Mixing Parameter	RMSE [Adim]	$\sqrt{RMSE}$
1.25	1	1.22	0.1	0.0009	0.03
1.65		1.72		0.0049	
1.25	2	1.23	0.2	0.0004	0.02
1.65		1.69		0.0016	
1.25	3	1.26	0.3	0.0001	0.01
1.65		1.66		0.0001	
1.25	4	1.29	0.4	0.0016	0.04
1.65		1.64		0.0001	
1.25	5	1.32	0.5	0.0049	0.07
1.65		1.61		0.0016	
1.25	6	1.35	0.6	0.01	0.1
1.65		1.58		0.0049	
1.25	7	1.38	0.7	0.0169	0.13
1.65		1.55		0.01	
1.25	8	1.41	0.8	0.0256	0.16
1.65		1.52		0.0169	
1.25	9	1.44	0.9	0.0361	0.19
1.65		1.49		0.0256	
1.25	10	1.46	1	0.0441	0.21
1.65		1.46		0.0361	

**Tabla 4.12. Resultados obtenidos en el modelo experimental  
(Alimentación doble:  $Q_{e1} < Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )**

DIFUSIÓN DE SUSTANCIA EN REDES DE TUBERIAS A PRESIÓN						
DATOS GENERALES DEL CRUCE						
MATERIAL	Diámetro [pulg]	Rugosidad absoluta [mm]	Longitud [m]	Area [m <sup>2</sup> ]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	
PVC	1 <sup>1/2</sup>	0.0015	1.6	0.00113	1.00E-06	
DATOS DE ENTRADA Y DE SALIDA EN LOS CRUCES						
UBICACIONES	GASTO [m <sup>3</sup> /s]	CONCENTRACIÓN [mg/L]	VELOCIDAD [m/s]	REYNOLDS [Adim]	MASA [mg/s]	MASA TOTAL [mg/s]
ENTRADA 1	0.00017	1.90	0.11	4.94E+03	0.323	0.451
ENTRADA 2	0.00020	0.64	0.13	5.81E+03	0.128	
SALIDA 1	0.00020	1.62	0.13	5.81E+03	0.324	0.450
SALIDA 2	0.00017	0.74	0.11	4.94E+03	0.126	

#### 4.3.8. Calibración del modelo matemático (Alimentación doble: dos entradas y dos salidas)

Las condiciones iniciales que se manejaron en este escenario fueron las siguientes: los gastos de entrada fueron diferentes, ( $Q_{e1} < Q_{e2}$ ), las concentraciones iniciales también fueron diferentes ( $C_{e1} > C_{e2}$ ). Se realizaron varias pruebas en el Laboratorio para estudiar el comportamiento de los fujos en las salidas del cruce. Al final de la prueba, se midieron las concentraciones del cloro en las dos salidas. En la Tabla 4.12 se observó que los flujos salen del cruce sin mezclarse. Sin embargo se observó una disminución en la salida 2 y un ligero incremento en la salida 1.

Para calibrar el modelo matemático se utilizaron las mismas condiciones iniciales del modelo experimental, la única variable que cambió en cada simulación fue el **mixing parameter**. En la primera simulación tomó un valor de 0.1.

En la Tabla 4.13 se muestran los resultados obtenidos en las 10 simulaciones. En cuanto a la primera, se observó que los primeros valores simulados son diferentes de los valores medidos (1.67 mg/L en la salida 1 y 0.7 mg/L en la salida 2 mientras que los valores medidos son los siguientes: 1.62 mg/L y 0.74 mg/L). Como se puede observar no hubo una diferencia significativa, por esta razón la desviación cuadrática media tuvo un valor de 0.09.

En la segunda simulación con valor de 0.2 para coeficiente se observó que la concentración en la salida 1 igualó a la concentración medida (1.62 mg/L) y la de la salida 2 tuvo un valor mayor a la concentración medida (0.76 mg/L valor simulado y 0.74 mg/L valor medido). Para este caso, la desviación cuadrática media fue igual a 0.02.

En la tercera simulación con un valor de 0.3 como coeficiente mixing parameter se observó una disminución en la salida 1 y un incremento en la salida 2 en comparación a la simulación anterior. En cuanto a la desviación cuadrática media se obtuvo un valor superior a las dos simulaciones anteriores, es decir se alejó de cero. En la cuarta y quinta simulaciones, los valores simulados se alejaron más de los valores medidos así como la desviación cuadrática media.

En cuanto a las últimas cinco simulaciones se observó la misma tendencia, los valores simulados se alejaron de los valores medidos y la desviación cuadrática media se incrementó a medida que el mixing parameter se incrementaba. Es importante mencionar que en las dos últimas simulaciones los valores en las dos salidas fueron iguales, lo que contradijo la teoría de mezcla estudiado en el capítulo 3. Por eso es de gran importancia elegir el mixing parameter adecuado en cada caso estudiado. Al comparar los valores medidos y los valores simulados se observó que los valores más parecidos se obtuvieron en la segunda simulación (mixing parameter = 0.2), con una desviación cuadrática media (0.02). Las figuras 4.13 y 4.14 muestran los valores del gasto y concentración simulados.

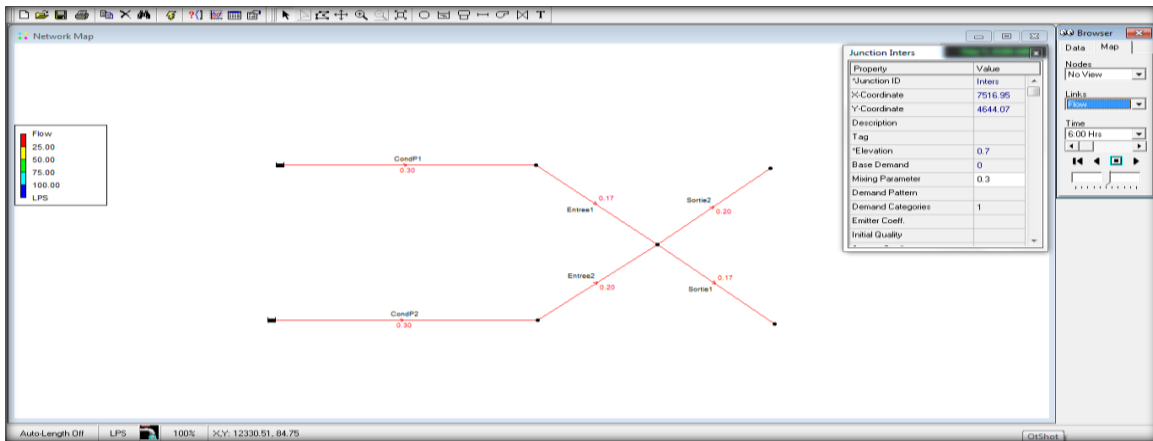


Figura 4.13 Gastos simulados (Alimentación doble:  $Q_{e1} < Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C$ )

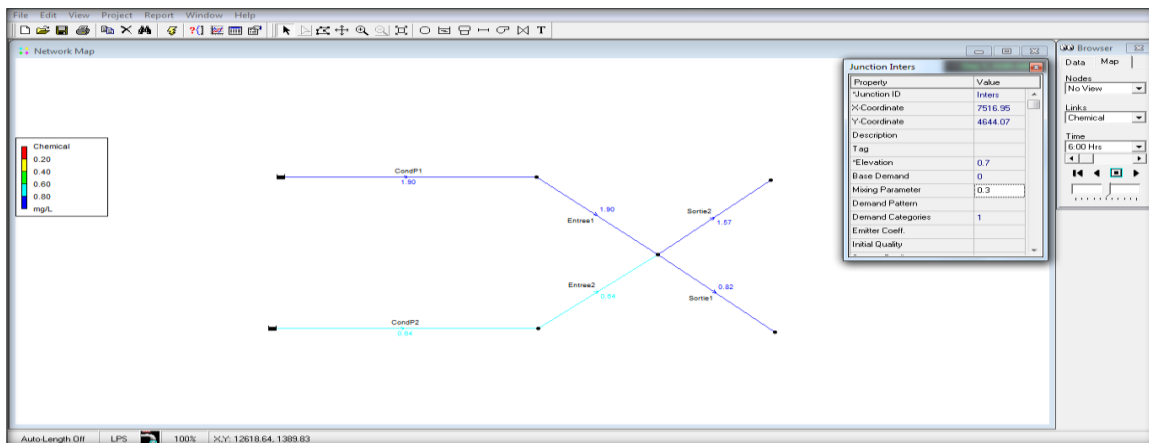


Figura 4.14. Concentraciones simuladas (Alimentación doble:  $Q_{e1} < Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )

**Tabla 4.13. Comparación de resultados simulados y medidos  
(Alimentación doble:  $Q_{e1} < Q_{e2}$ ,  $C_{e1} > C_{e2}$ )**

Modelo experimental $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Número simulaciones	Modelo matemático $C_{s1}$ y $C_{s2}$ [mg/L]	Mixing Parameter [Adim]	RMSE [Adim]	$\sqrt{RMSE}$
1.62	1	1.67	0.1	0.0025	0.05
0.74		0.7		0.0016	0.04
1.62	2	1.62	0.2	0	0
0.74		0.76		0.0004	0.02
1.62	3	1.57	0.3	0.0025	0.05
0.74		0.82		0.0064	0.08
1.62	4	1.52	0.4	0.01	0.1
0.74		0.87		0.0169	0.13
1.62	5	1.48	0.5	0.0196	0.14
0.74		0.93		0.0361	0.19
1.62	6	1.43	0.6	0.0361	0.19
0.74		0.99		0.0625	0.25
1.62	7	1.38	0.7	0.0576	0.24
0.74		1.05		0.0961	0.31
1.62	8	1.33	0.8	0.0841	0.29
0.74		1.11		0.1369	0.37
1.62	9	1.28	0.9	0.1156	0.34
0.74		1.17		0.1849	0.43
1.62	10	1.23	1	0.1521	0.39
0.74		1.23		0.2401	0.49

En cuanto a los otros casos: gastos de entradas diferentes (a 180°) con concentraciones diferentes y tres entradas y una salida se realizó las mismas simulaciones y se observó que cumplen con la teoría de mezcla perfecta como se había visto en el laboratorio. Para estos casos, se puede elegir cualquier valor de mixing parameter dentro del intervalo [0,1]. En la Tabla 4.13A, se presentan los valores del coeficiente mixing parameter asignados a cada caso estudiado en esta investigación.

**Tabla 4.13A Mixing parameter asignado a cada caso estudiado**

Escenarios	Condiciones iniciales	Tipo de Mezcla	Intersección		s	R
			Cruze	Tee		
1	$Q_{e1}=Q_{e2}; C_{e1}=C_{e2}$ (a 45°, 90°)	completa	X		$0 \leq s \leq 1$	1
2	$Q_{e1} \neq Q_{e2} \neq Q_{e3}; C_{e1} \neq C_{e2} \neq C_{e3}$	completa	X		$0 \leq s \leq 1$	N/A
3	$Q_{e1}=Q_{e2}; C_{e1} \neq C_{e2}$	completa		X	$0 \leq s \leq 1$	N/A
4	$Q_{e1}=Q_{e2}; C_{e1} < C_{e2}$	incompleta	X		<b>0.5</b>	<b>0.80</b>
5	$Q_{e1} > Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$	incompleta	X		<b>0.3</b>	<b>0.93</b>
6	$Q_{e1} > Q_{e2}; C_{e1} < C_{e2}$ (entrada a 45°)	sin mezcla	X		<b>0.2</b>	<b>0.80</b>
7	$Q_{e1} > Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$ (entrada a 180°)	completa	X		$0 \leq s \leq 1$	0.80
8	$Q_{e1} < Q_{e2}; C_{e1} > C_{e2}$ (entrada a 180°)	completa	X		$0 \leq s \leq 1$	0.60

#### 4.4. CASO DE APLICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

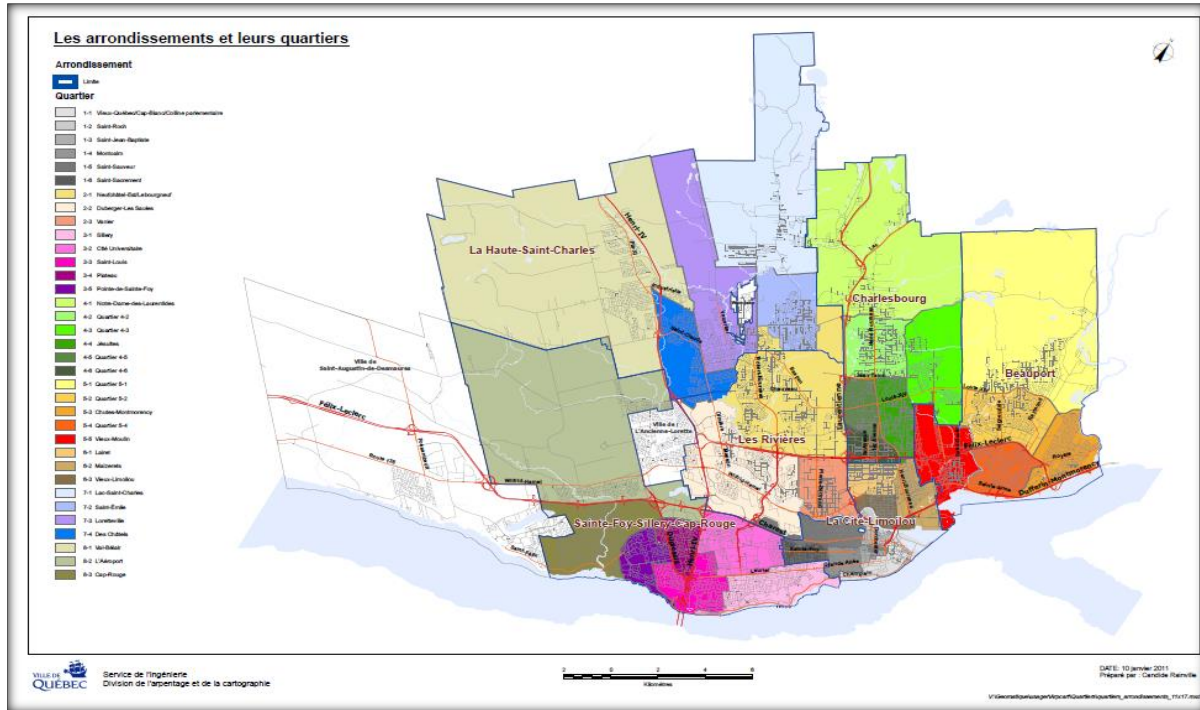
##### OBJETIVO DE LA APLICACIÓN

Realizar simulaciones en la red de agua potable de la “delegación” Duberger-Les Saules para estudiar la difusión del cloro en dicha red utilizando el modelo desarrollado en esta tesis que considera mezcla incompleta en los cruces de tuberías, y posteriormente comparar estos resultados con los estimados mediante el uso del Epanet version 2.0 el cual que considera mezcla completa en cruces de tuberías.

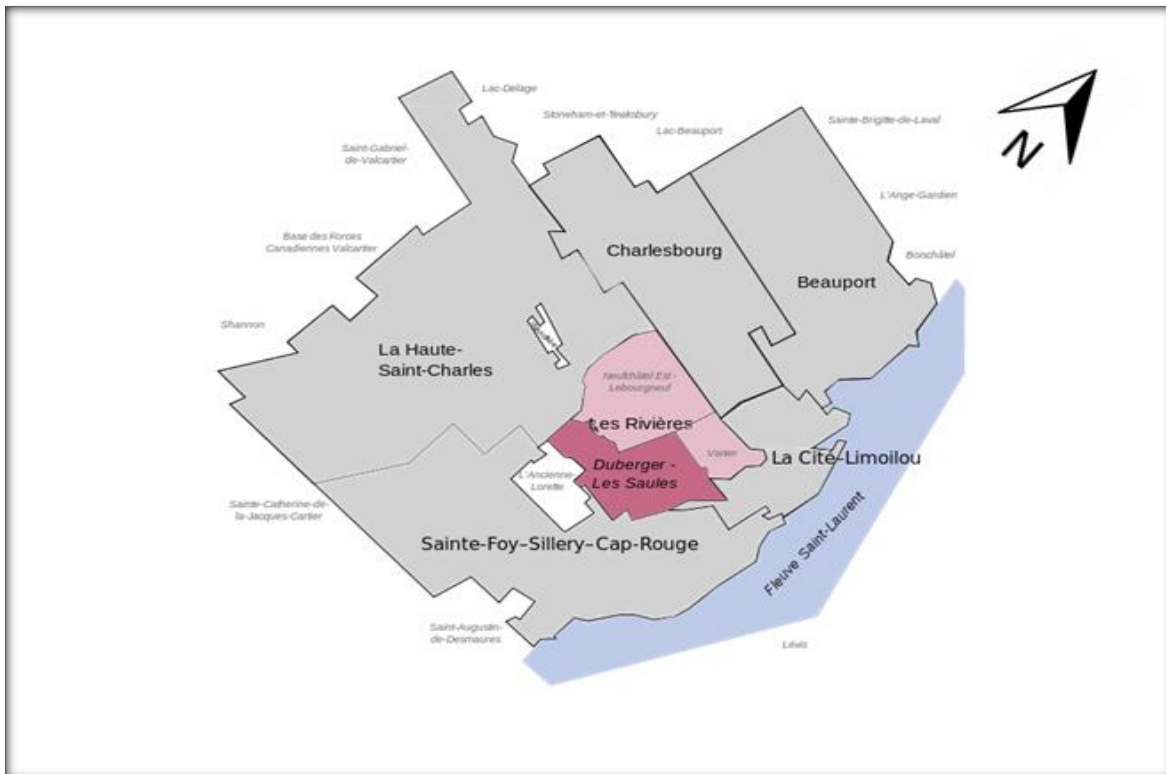
##### 4.4.1. Situación geográfica

La situación geográfica de Duberger-Les Saules es muy particular con respecto a las otras “delegaciones” de la ciudad de Quebec. Se subdividen en seis sectores (4 para Les Saules y 2 para Duberger. Al sur de la autopista de la capital, se encuentra el sector Du Buisson, del otro lado de la autopista se encuentra el sector Masson y al norte del Boulevard Wilfrid-Hamel el sector Savio. Al Oeste se encuentra una parte del sector Beaumont. Por su parte, Duberger se divide en dos partes: El centro y sector de Domaine este, separados por el autopista de Vallon. Sus coordenadas geográficas son: 46°48’54” Norte 71°18’36” Oeste. En los mapas 1 y 2 se puede observar la zona de estudio.





Mapa 1. Situación geográfica de la zona de estudio



#### 4.4.2. Población

La zona de estudio tiene una gran proporción de gente de tercera edad (65 años y más) y este grupo de edad ha aumentado a un 15% desde 1996. La categoría de jóvenes de 20 a 34 años ha disminuido durante los últimos años. Los sectores identificados como los más desfavorables se ubican en los sectores de Du Buisson y Du Berger centro.

En la tabla 4.14 se presenta la población total de la zona de estudio.

**Tabla 4.14. Población total de la zona de estudio (Fuente: Estadística Canadá)**

	DUBERGER	LES SAULES
POBLACIÓN EN 2001	10150	11953

### 4.5. ESTUDIO DE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA POTABLE DE DUBERGER-LES SAULES

#### 4.5.1. Datos generales

El agua que abastece la Ciudad de Quebec proviene del río Saint-Laurent, río Saint-Charles y el río Montmorency. Antes de su distribución, el agua está sometida a un tratamiento físico-químico terminando con una ozonación y finalmente a una post-cloración, Rodríguez et al. (2004). Todo eso sirve para inactivar, incluso destruir la mayoría de los organismos como: las bacterias, los virus entre otros para que el agua sea estéticamente aceptable (sabor, olor, color, etc). Contrariamente a las normas mexicanas, las normas canadienses exigen que el agua debe de contar con una concentración de cloro entre 0.2 y 1.5 mg/L para cumplir con las normas (salud Canadá, 2007). La Figura 4.15. muestra el proceso de desinfección que está sometida el agua desde la fuente hasta los usuarios.

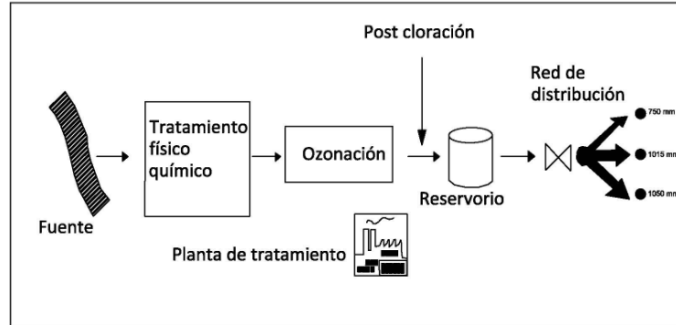


Figura 4.15. Proceso de tratamiento del agua en un sistema de abastecimiento

Además del aspecto cualitativo del agua que es el enfoque principal de esta investigación, el aspecto cuantitativo es muy importante porque se debe asegurar una distribución sin interrupción con una presión adecuada a lo largo de la red de distribución.

#### 4.5.2. Características de la red y algunos parámetros

La red se encuentra conformado por 172 nudos y 216 tramos de tuberías, de diámetro entre 75 y 750 mm, de PVC y acero, dos válvulas de seccionamiento y dos válvulas reductoras de presión. Además cuenta con dos tanques de abastecimiento ubicados al noreste y al sureste de la red. El sistema trabaja a gravedad, las demandas corresponden a una demanda máxima diaria-horaria

Luego de analizar los parámetros útiles para el cálculo se procede a modelar la red utilizando la versión EPANET-BAM calibrada a partir de los resultados de Laboratorio. Este programa realiza simulaciones en periodos prolongados del comportamiento hidráulico y de la calidad de la distribución eficiente de agua en redes de suministro a presión. El programa basa su cálculo en método iterativo de Hardy Cross, y para el análisis de las pérdidas de carga se utiliza la ecuación de Hazen-Williams.

##### 4.5.2.1. Coeficiente pérdida de carga

La pérdida de carga en una tubería es debida a la fricción por el paso del agua, y puede calcularse mediante fórmulas diferentes, tales como:

- La fórmula de Hazen-Williams
- La fórmula de Dracy-Weisbach
- La fórmula de Chezy-Manning

Como se acaba de mencionar, en el Epanet se utiliza la ecuación de Hazen-Williams. Cada tubería tiene su propio coeficiente de pérdida de energía ( $C_{H-W}$ ) el cual depende del material y la edad de servicio. Este coeficiente interviene en los cálculos de las velocidades e influye en el transporte del cloro en las tuberías. En este estudio los coeficientes varían entre 70 a 100. Una vez establecidos los parámetros y los valores para el cálculo hidráulico, se realizó una simulación. Era importante verificar las velocidades y las presiones en la red para un correcto

funcionamiento. Los resultados obtenidos satisfacen las condiciones mínimas para el buen funcionamiento de una red. Sin embargo, en los siguientes nudos: Junc J-5472Q, Junc J-8593Q, Junc J-8594Q, Junc J-8595Q, Junc J-8596Q, Junc J-8597Q, Junc J-8805Q, Junc J-8596Q2, Junc J-8594Q2 resultó más complicado el cumplimiento de las demandas de presión. Por eso era necesario la ubicación de las dos válvulas reductoras de presión. La Figura 4.16 muestra las curvas de presión obtenidas a partir de una simulación.

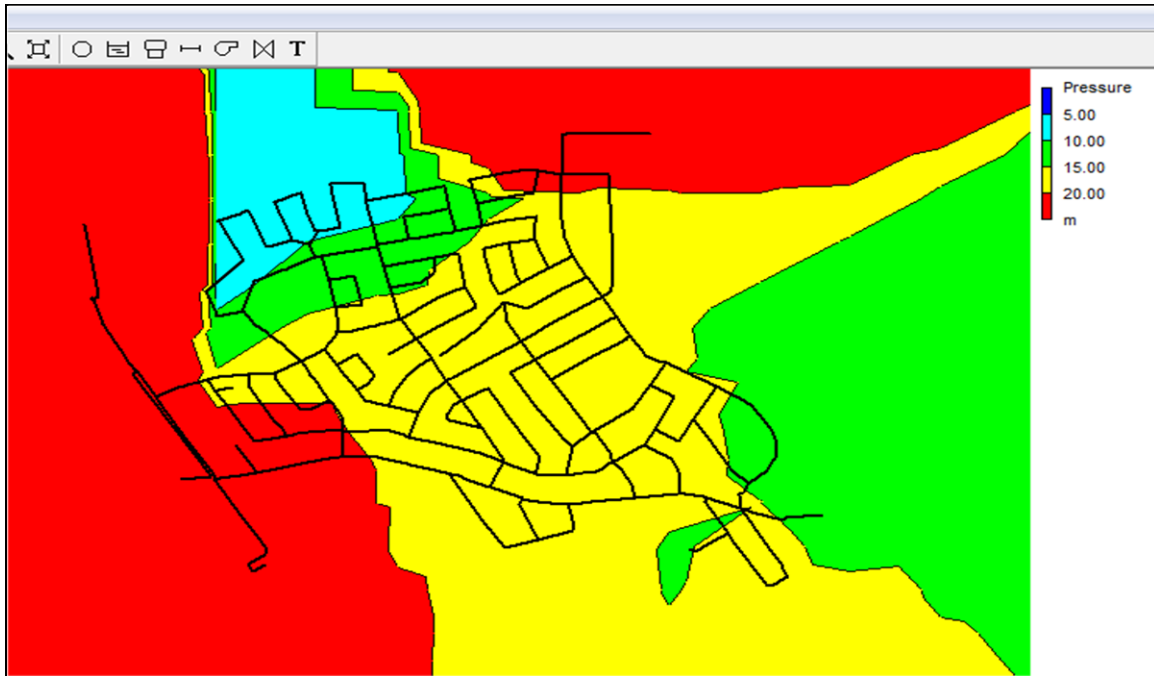


Figura 4.16. Curvas de presiones en los nudos de la red Duberger-Les Saules

## 4.6. MODELACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA (CASO DE APLICACIÓN)

### 4.6.1. coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua: $k_b$

Como se mencionó en el apartado 4.2.2, para modelar la concentración del cloro en una red de agua potable tres datos son fundamentales: los coeficientes de decaimiento  $k_b$ ,  $k_w$  y el mixing parameter. Para el caso de aplicación de esta tesis, se utilizó el coeficiente  $k_b$ , obtenido por Binet et al. (2010) en su trabajo de investigación. Para obtener este coeficiente  $k_b$ , Binet realizó una campaña de medición durante tres meses: (Julio, agosto y noviembre) afin de destacar la influencia de las estaciones sobre el decaimiento. Se eligieron varios sitios para tomar las muestras. Una vez recolectadas las muestras se utilizó el mismo procedimiento descrito en el apartado 4.2.3. En la Tabla 4.15 se presentan los valores del coeficiente  $k_b$  obtenido durante las tres campañas.

**Tabla 4.15. Coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua para diferentes épocas del año [Binet et al 2010]**

Fecha	$K_b$ (1/día)	$R^2$	Número de muestra
13 de Julio	0.053	0.92	30
21 de Julio	0.033	0.94	18
25 de Agosto	0.057	0.95	19
12 de Noviembre	0.016	0.97	10

Como se puede observar en la Tabla 4.15, durante la campaña del 13 de julio 2009, a partir de 30 muestras recolectadas se obtuvo un coeficiente  $k_b$  igual a 0.053. Sin embargo, este coeficiente se disminuyó con los datos colectados en la campaña del 21 de julio 0.053 a 0.033. En agosto el coeficiente incrementó (0.057) finalmente en la campaña de noviembre se disminuyó. Es importante mencionar que por cada curva se calculó el valor del coeficiente  $R^2$  y el error cuadrático medio, esos valores permiten ver cual es la precisión de la correlación.

#### 4.6.2. Coeficiente de reacción del cloro con la pared de tuberías: $k_w$

Es importante mencionar que la corrosión de las tuberías tiene un impacto importante sobre el decaimiento del cloro dentro de una red de distribución. Esta corrosión tiene más efecto cuando el periodo de instalación de las tuberías es muy avanzada. En caso de la red de Duberger-Les Saules las tuberías fueron instaladas de 1950 a 1970 luego de 1979 al 2007. Como se puede observar, la mayoría de las tuberías tienen alrededor de 50 años de servicio, por eso se usó un  $k_w$  dentro de este intervalo:  $-0,06 \text{ m/día} < k_w < -1,52 \text{ m/día}$ . Para este trabajo  $k_w$  es igual a 0.08 m/día.

#### 4.6.3. Mixing parameter

Como se había explicado en la primera parte de la calibración, según el caso estudiado el coeficiente mixing parameter tiene un valor diferente. Por eso era muy importante saber las fuentes de abastecimiento, el sentido del flujo y luego ubicar las zonas **donde los flujos de fuentes diferentes se mezclaron**. En el caso de Duberger-Les Saules, la red esta abastecida por dos tanques: uno se ubica al noreste de la red y el otro al sureste.

Existen dos maneras distintas para ubicar las zonas de mezclas:

- Ubicar puntos estratégicos en la red para medir la conductividad del agua porque la conductividad cambia según la fuente, Deslisle et al. (2009);

- Realizar una simulación para ver la trayectoria del flujo dentro del sistema, y las áreas de influencia de cada tanque. Las áreas comunes corresponden a la zona de “posible mezcla” en esta investigación, se eligió la segunda opción por su facilidad.

Se realizó una simulación utilizando 0.053 1/día como valor de  $k_b$  y 0.08 m/día para  $k_w$ . La Figura 4.17 muestra la zona donde se pudo ocurrir posible mezclas de flujo. Siete puntos etiquetados como A, B, C, D, E, F y G fueron localizados como puntos estratégicos. De los siete puntos, el punto A era el más importante porque allí sucedió la primera mezcla en todo el sistema, pues el flujo proveniente del tanque noreste era de mayor magnitud con una concentración de cloro mayor. Como se había visto en el capítulo cuatro, cuando eso sucede los flujos se mezclan al salir del cruce. En el apartado 4.3.7 se ha visto que el coeficiente **mixing parameter** que corresponde a este caso es 0.3.

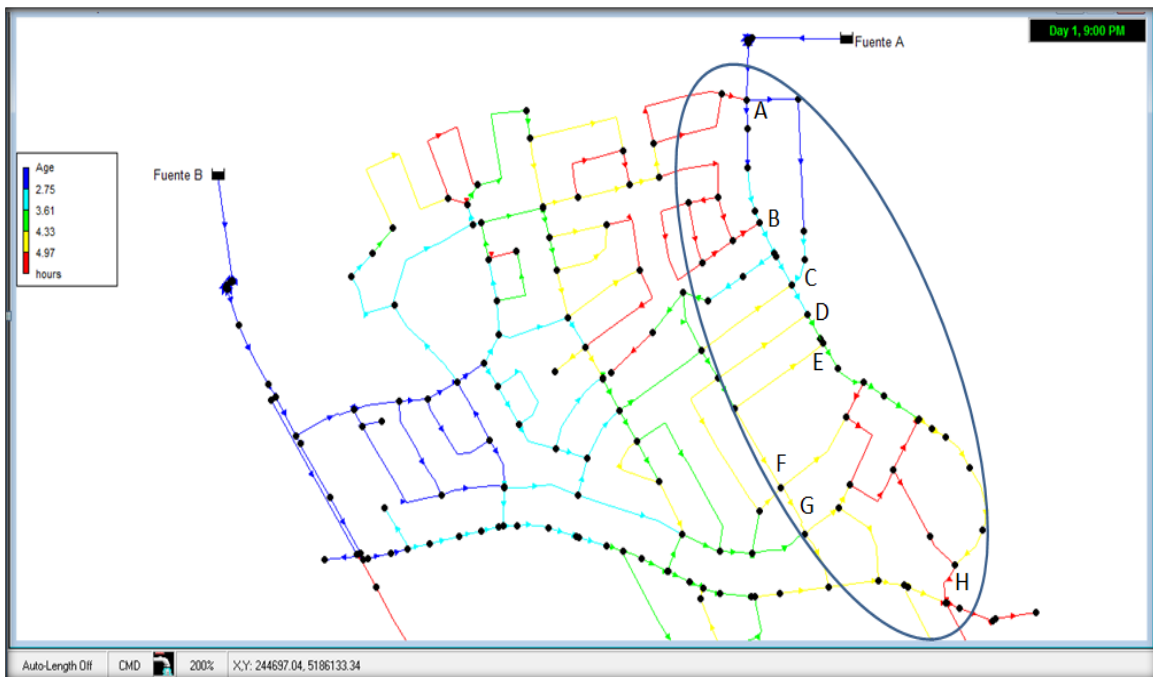


Figura 4.17 Zona de posible mezcla de los flujos dentro de la red

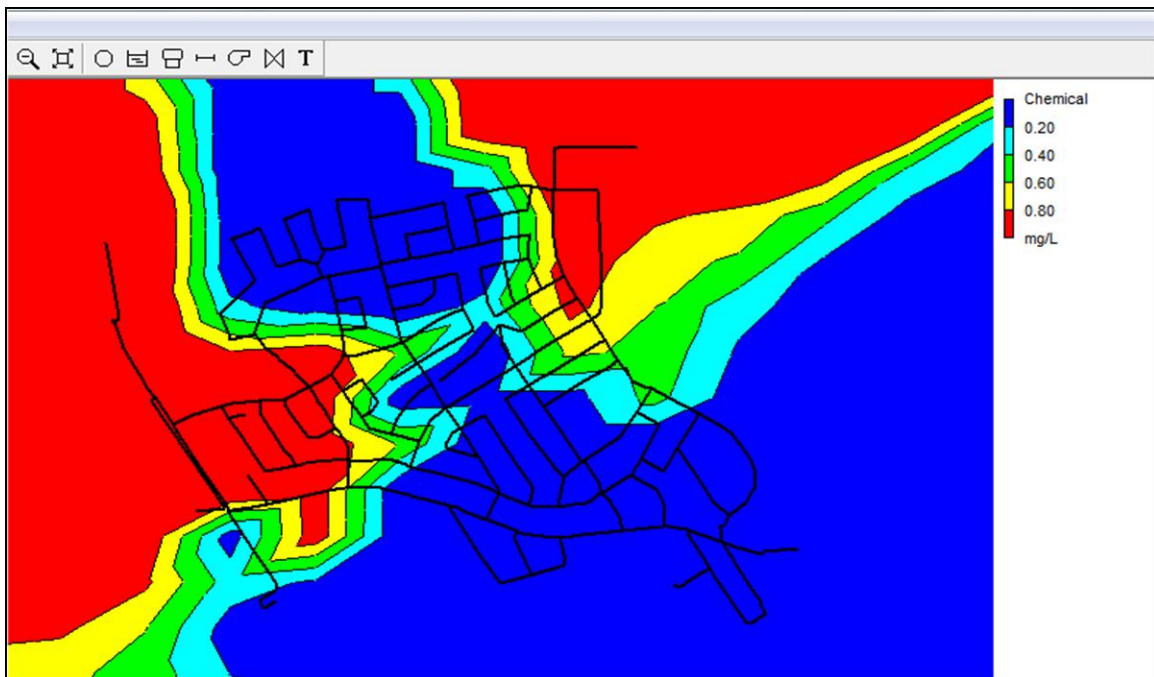
Una vez ubicados los puntos de “posibles mezcla”, sabiendo los gastos y la concentración de los flujos se establecieron los diferentes casos de mezcla como se hizo en el apartado 4.3. En la Tabla 4.15 se muestran los valores del coeficiente mixing parameter en cada punto para realizar la simulación final.

**Tabla 4.16. Valores del coeficiente mixing parameter para los puntos seleccionados**

Puntos de interes	Coefficiente mixing paramater
A	0.3
B	0.5
C	0.3
D	0.5
E	0.5
F	0.4
G	0.5

#### 4.7. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El modelo numérico considerado en esta investigación permitió simular la calidad del agua en la red de distribución de la “delegación” de Duberger-Les Saules, en la ciudad de Quebec, Canadá. Este modelo tomó en cuenta el decaimiento del cloro en el tiempo durante su propagación en la red, así como el posible mezclado en los sitios donde se encuentren dos o más tuberías. A partir de una simulación, con el modelo se visualizó el avance del cloro e identificaron ciertas partes de la red donde la concentración del cloro era igual a la concentración mínima establecida por las normas de salud de este país. Las curvas de concentración del cloro dentro de la red de Duberger-Les Saules obtenidas a partir de esta simulación se muestran en las figuras 4.18 al 4.22.



**Figura 4.18. Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 1)**

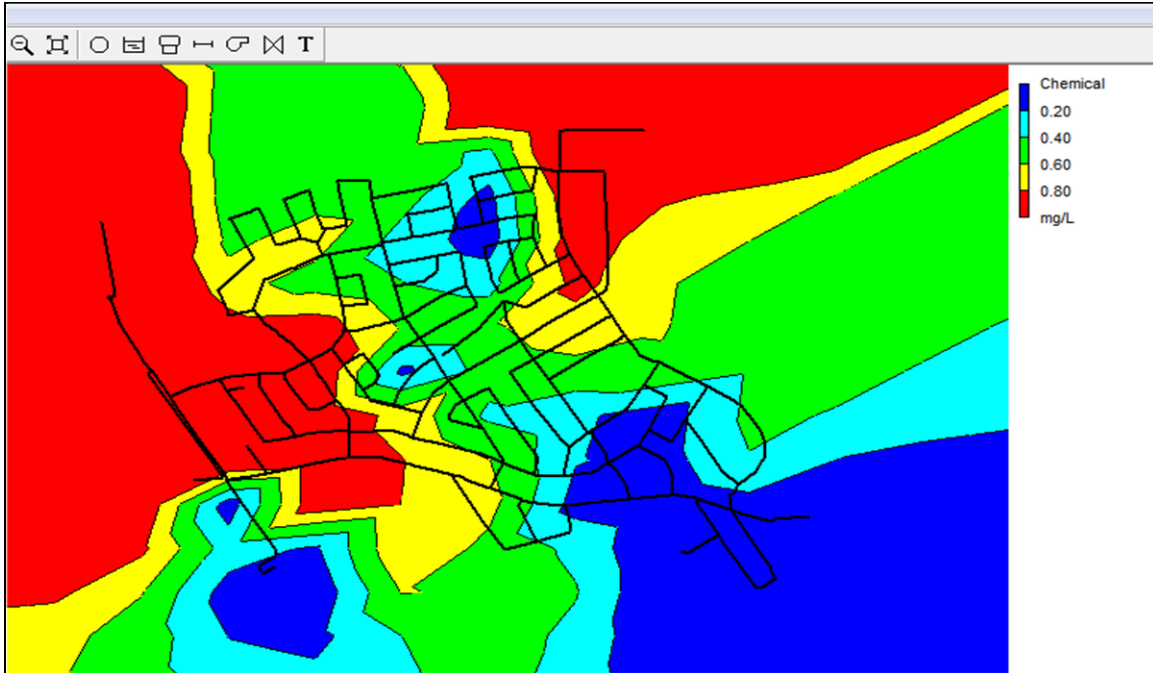


Figura 4.19. Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 2)

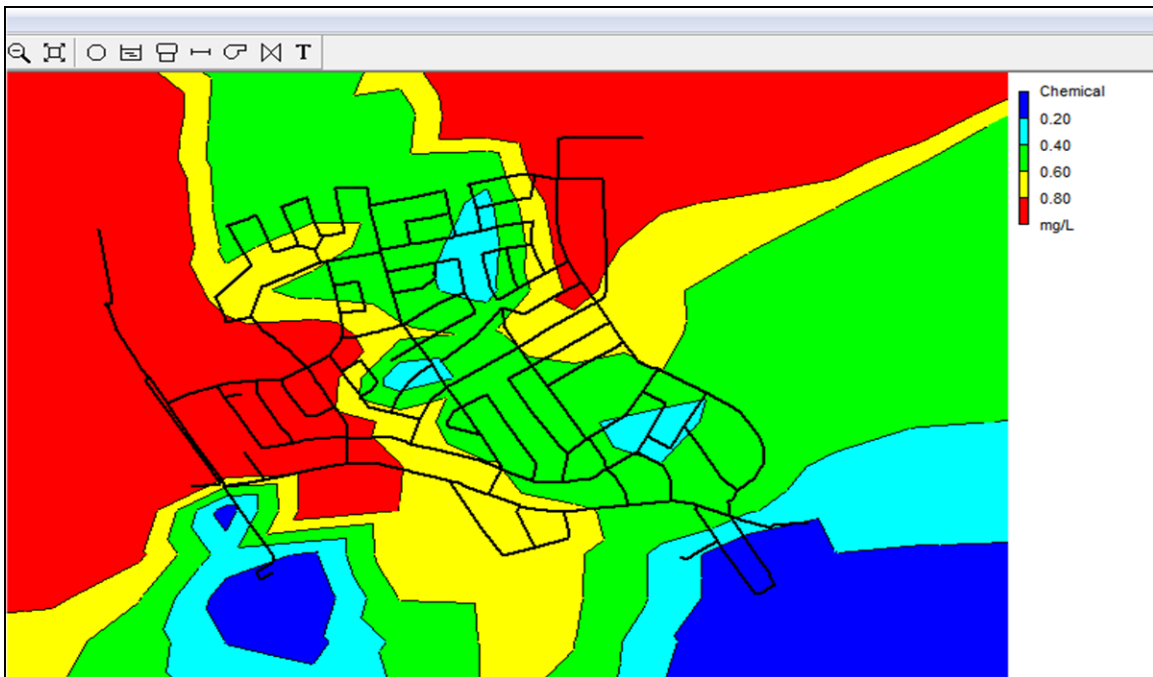


Figura 4.20. Curvas de niveles de concentración del cloro (Hora 3)



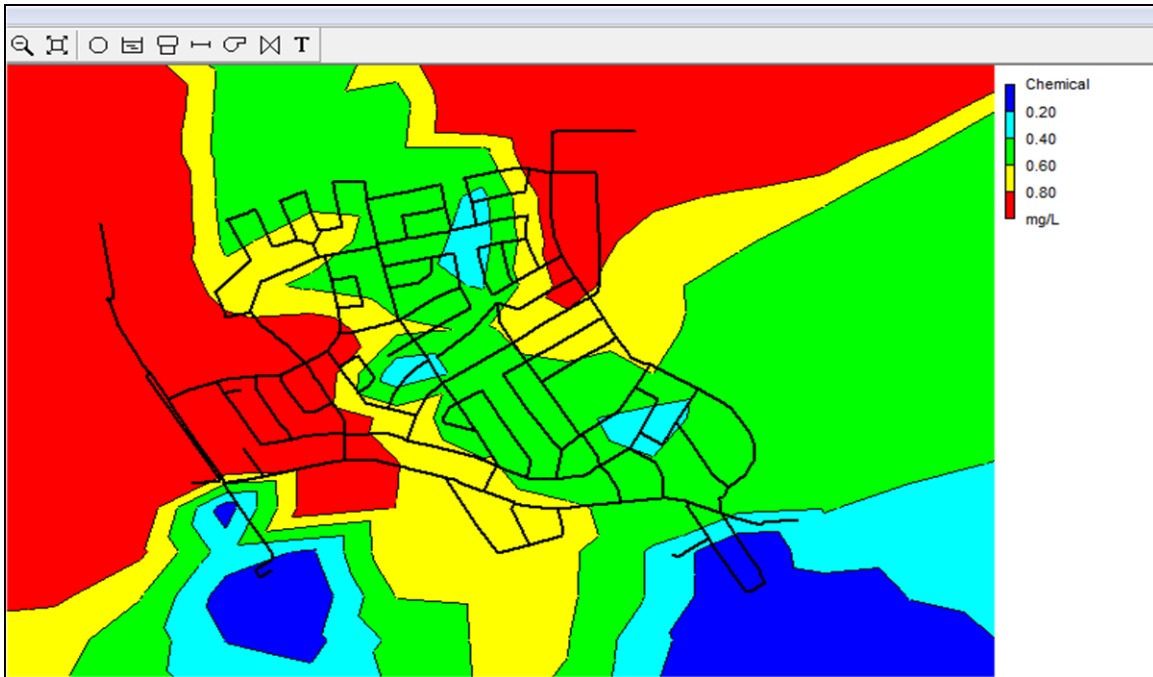


Figura 4.21. Curvas de niveles de concentración del cloro Hora 4)

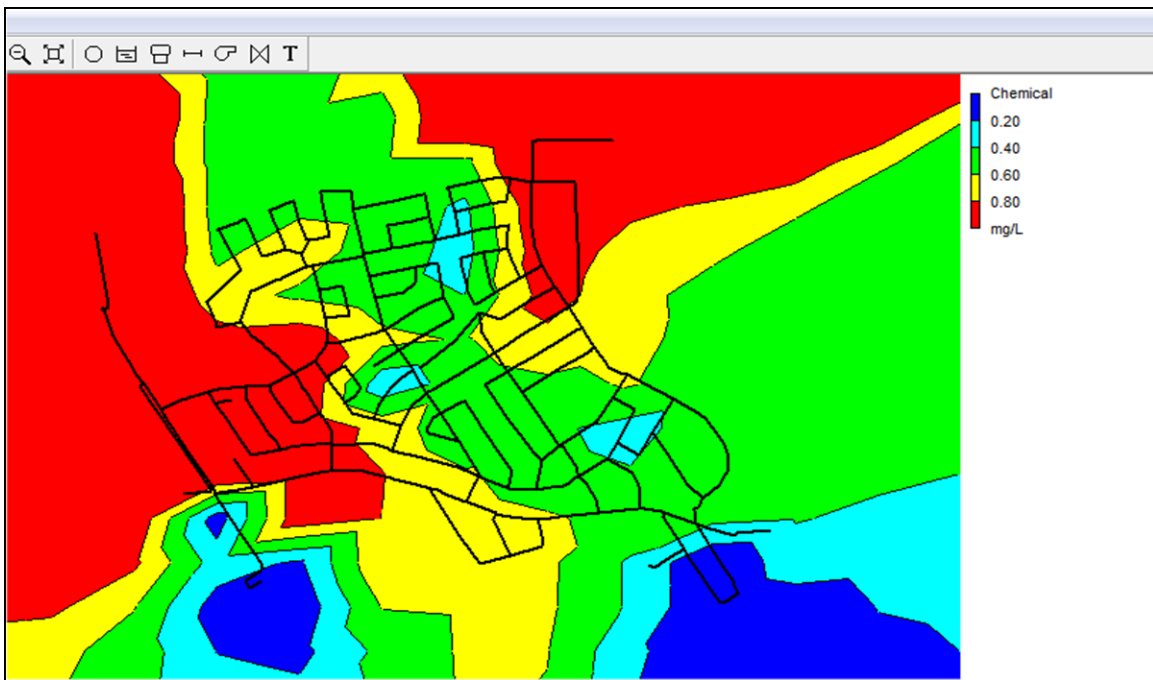


Figura 4.22. Curvas de nivel de concentración de cloro (Hora 6)

#### 4.7.1. Relación entre el tiempo de viaje y la concentración del cloro simulados

En la literatura se ha demostrado que existe un vínculo entre el tiempo de viaje del agua y el decaimiento de cloro dentro de un sistema de abastecimiento de agua potable. En otras palabras se ha demostrado que el tiempo de viaje es uno de los factores que contribuye al decaimiento del cloro; más largo es el tiempo de viaje, más será el decaimiento de cloro. En el caso de esta investigación el tiempo de viaje del agua desde los tanques de almacenamiento hacia los puntos más lejanos era aproximadamente de seis horas. Se esperó la concentración del cloro más baja en estas zonas. Analizando la figura 4.22, se observaron tres zonas con menor concentración de cloro. La primera se ubica al oriente de la red y las otras dos al sur de la red. Eso significa que el agua tardó más en llegar a estos puntos, por esta razón fueron etiquetados como zona con déficit de cloro o de concentración mínima.

Para verificar los resultados del modelo matemático y cumplir el principal objetivo de este trabajo se tuvo que validar. Existen dos maneras distintas de hacerlo:

- Comparar los datos simulados contra los datos medidos en el campo. Por ello, es necesario tomar unas muestras en varios puntos de la red y posteriormente medir su concentración de cloro y finalmente comparar la concentración medida y simulada;
- Estudiar el vínculo existente entre el tiempo de viaje y la concentración del cloro en todas las partes de la red. Se espera una concentración alta en zonas donde el tiempo de viaje es menor y concentración baja en zonas donde el tiempo de viaje es mayor.

En la Figura 4.23 se compararon dos curvas de nivel: tiempo de viaje contra concentración del cloro. Cada uno de los mapas se divide en cinco áreas de diferentes colores y cada color representa un rango de valor en orden ascendente. Para el mapa del tiempo de viaje, se tiene lo siguiente: azul (0-3 horas), turquesa (3-4.5 horas), verde (4.5-6.5 horas), amarillo (6.5-8 horas) y rojo (8-72 horas); en cuanto al mapa de concentración de cloro la configuración es la siguiente: azul (0-0.2mg/L), turquesa (0.2-0.4 mg/L), verde (0.4-0.6 mg/L), amarillo (0.6-0.8 mg/L) y rojo (0.8-1.5 mg/L). Los valores se encuentran en el Anexo 2.

Observando al mismo tiempo las superficies de tiempo de viaje y de concentración simulados, se notó que las zonas de color rojo donde el tiempo de viaje es mayor o igual a 8 horas y las zonas de color azul donde la concentración del cloro es menor o igual a 0.2 mg/L están localizadas más o menos al mismo lugar. Se hizo la misma observación para las zonas de color amarillo y turquesa, las zonas de color verde y las demás zonas.

Es importante mencionar que las zonas de área azul en el mapa de concentración son consideradas como zonas de riesgo (según las normas Canadienses) porque la concentración del cloro es menor o igual a 0.2 ( $Cl \leq 0.2$  mg/L). En estas zonas los usuarios pueden recibir el agua de mala calidad. Como el objetivo es entregar el agua apta para consumir se tiene que tomar decisiones

para mejorar su calidad en estas zonas para proteger la salud de los usuarios. Sin embargo es importante aclarar que no es el objetivo primordial de esta tesis.

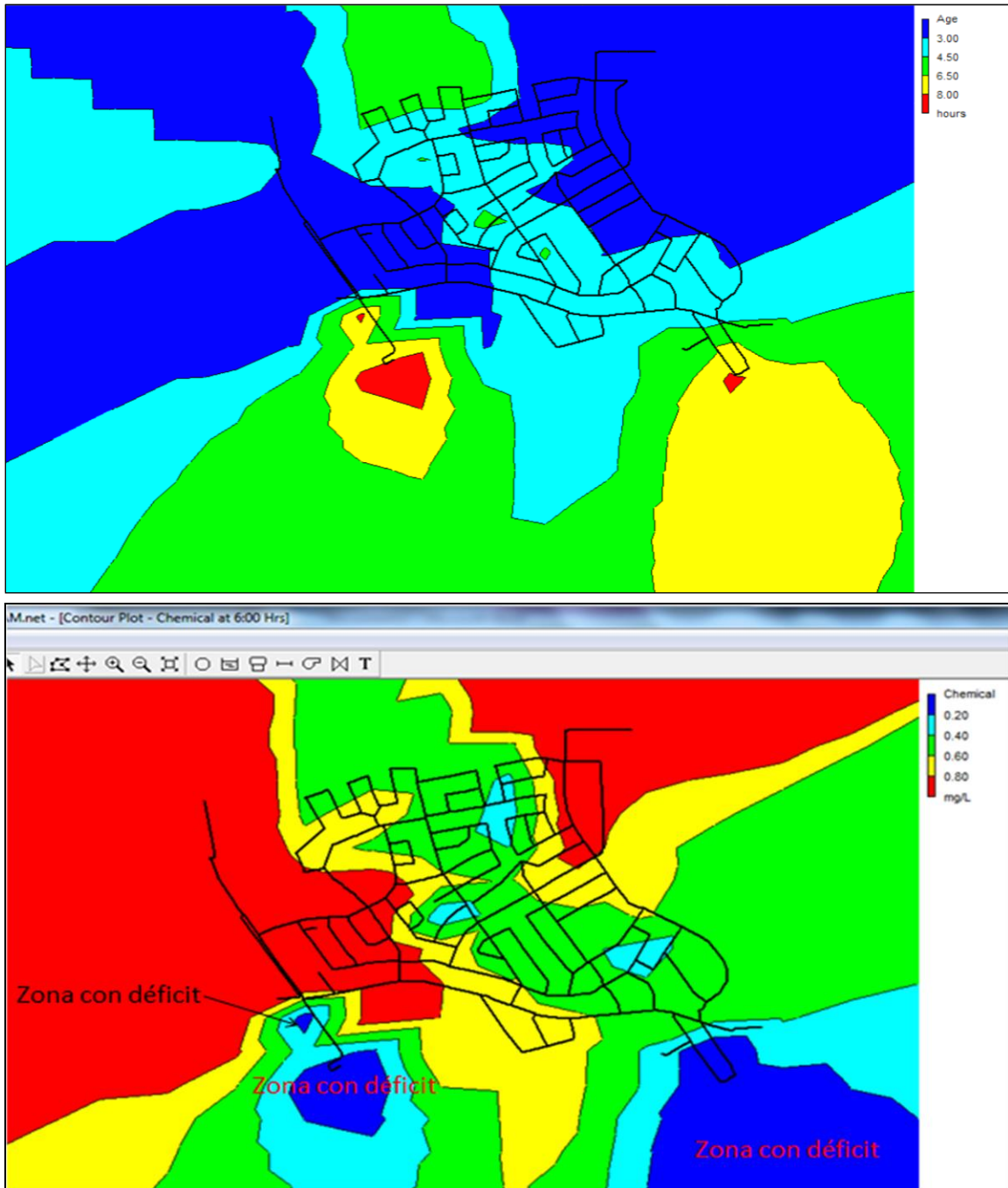


Figura 4.23. Tiempo de viaje simulado VS concentración del cloro simulada

## 4.8. VALIDACIÓN DEL MODELO

### 4.8.1. Comparación entre el modelo que considera mezcla completa y modelo que considera mezcla incompleta (caso de esta tesis)

Se comparan los resultados con los estimados mediante el uso del Epanet 2.0, el cual considera mezcla completa en cruces de tuberías. Se realizó una simulación utilizando las mismas características de la red de Duberger-Les Saules, así como las mismas especificaciones, es decir, misma fórmula de pérdidas, mismo intervalo de cálculo hidráulico, misma precisión del cálculo hidráulico y los mismos valores de  $k_b$  y  $k_w$ . En la Figura 4.24 se muestra una curva de nivel de concentración de cloro (hora 6), obtenida a partir de esta simulación. Con estos resultados se observaron diferencias entre los dos modelos. En esta Figura se observó que el cloro se difundió en prácticamente toda la superficie de la red. La concentración del cloro se encontró dentro de los valores establecidos por las normas de salud en dicho país (al excepción de un solo punto ubicado al sur de la red), mientras que con el uso del modelo de la tesis (Figura 4.22) se observaron varias áreas azules, en estas zonas la concentración de cloro era igual al valor mínimo, 0.20 mg/L.

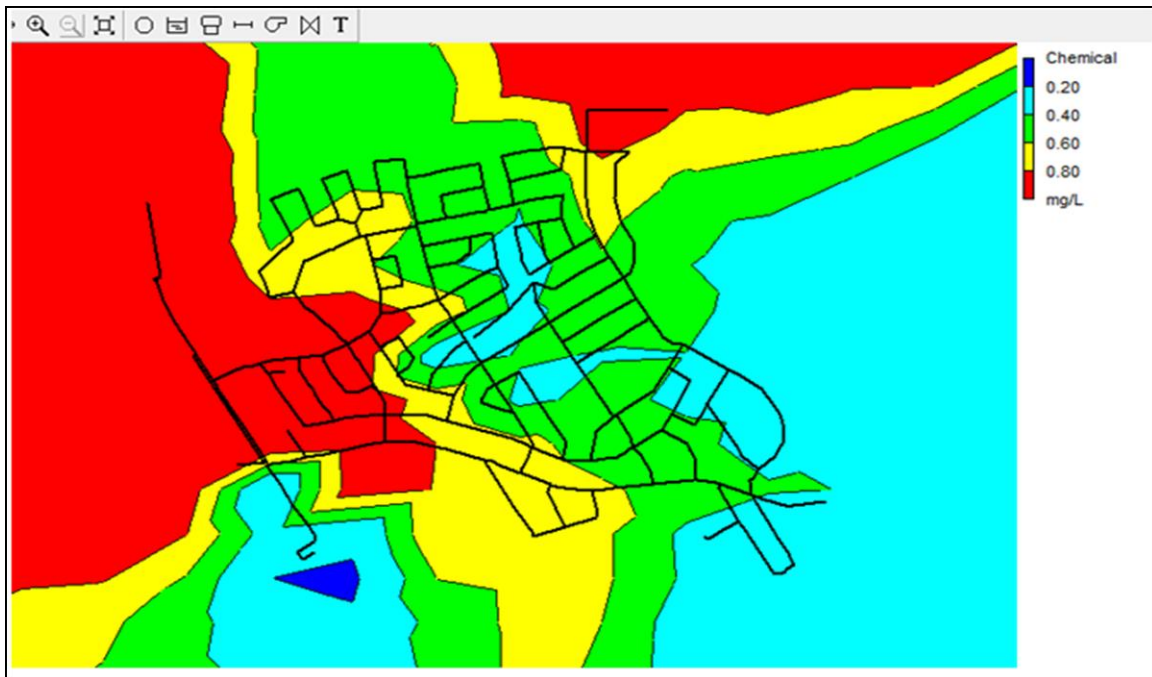


Figura 4.24. Curva de nivel de concentración de cloro mediante Epanet 2.0 (hora 6)

#### **4.8.2. Ejercicio propuesto para comprobar el impacto de la mezcla incompleta en la predicción del decaimiento del cloro en redes de agua**

El agua sale de los tanques de la red Duberger-Les Saules con una concentración de 1.5 mg/L. Con el fin de hacer la diferencia entre los resultados de los dos modelos de simulación, se consideró que en el tanque noroeste el agua no tiene cloro mientras que en el tanque suroeste el agua lleva una concentración de 1.50mg/L. Se llevaron a cabo varias simulaciones para estudiar la difusión del cloro dentro de la red de distribución; posteriormente se generaron las curvas de niveles de concentración de cloro.

En las figuras 4.25 a 4.30 se muestran las curvas de nivel obtenidas a partir de los dos modelos. Como se explicó anteriormente, los mapas se dividen en cinco áreas de diferentes colores y cada color representa un rango de valor en orden ascendente: azul (0.00-0.10mg/L), turquesa (0.10-0.4 mg/L), verde (0.40-0.60 mg/L), amarillo (0.60-0.80 mg/L) y rojo (0.80-1.5 mg/L). En la figura 4.25 se pudo ver que los dos mapas son muy parecidos, ya que no hubo choque entre los dos flujos. En cuanto a la Figura 4.26, se hizo la misma observación. A partir de la figura 4.27 se tienen ciertas diferencias ya que hubo choque de flujos de concentraciones diferentes. Se observaron más áreas azules en el segundo mapa ya que no hubo mezcla completa. En la figura 4.28 las áreas azules eran menores en el mapa 1, pues el modelo consideró mezcla completa, mientras que en el mapa 2 se observaron varias áreas azules, ya que los flujos no se mezclaron en la realidad.

Es importante mencionar que a partir de 6 horas de simulación los resultados entre los dos modelos fueron muy distintos. En las figuras 4.29 y 4.30 (en los mapas arriba) se pudo observar una desaparición de las áreas azules dentro de la red. Eso significa que en toda la red la concentración del cloro fue mayor a cero, mientras que en los segundos mapas de las mismas figuras se observaron varias manchas azules, ya que en la realidad los flujos no se mezclaron en todos nudos, y cuando hubo una mezcla no era completa en todos los casos, como se había observado en las pruebas de Laboratorio.

Con en estos resultados se identifican las diferencias entre los dos modelos de simulación. Considerar siempre una mezcla completa en cruces de tuberías dentro de una red es una desventaja, porque las predicciones son erróneas y eso puede tener consecuencias negativas en la salud de la población.

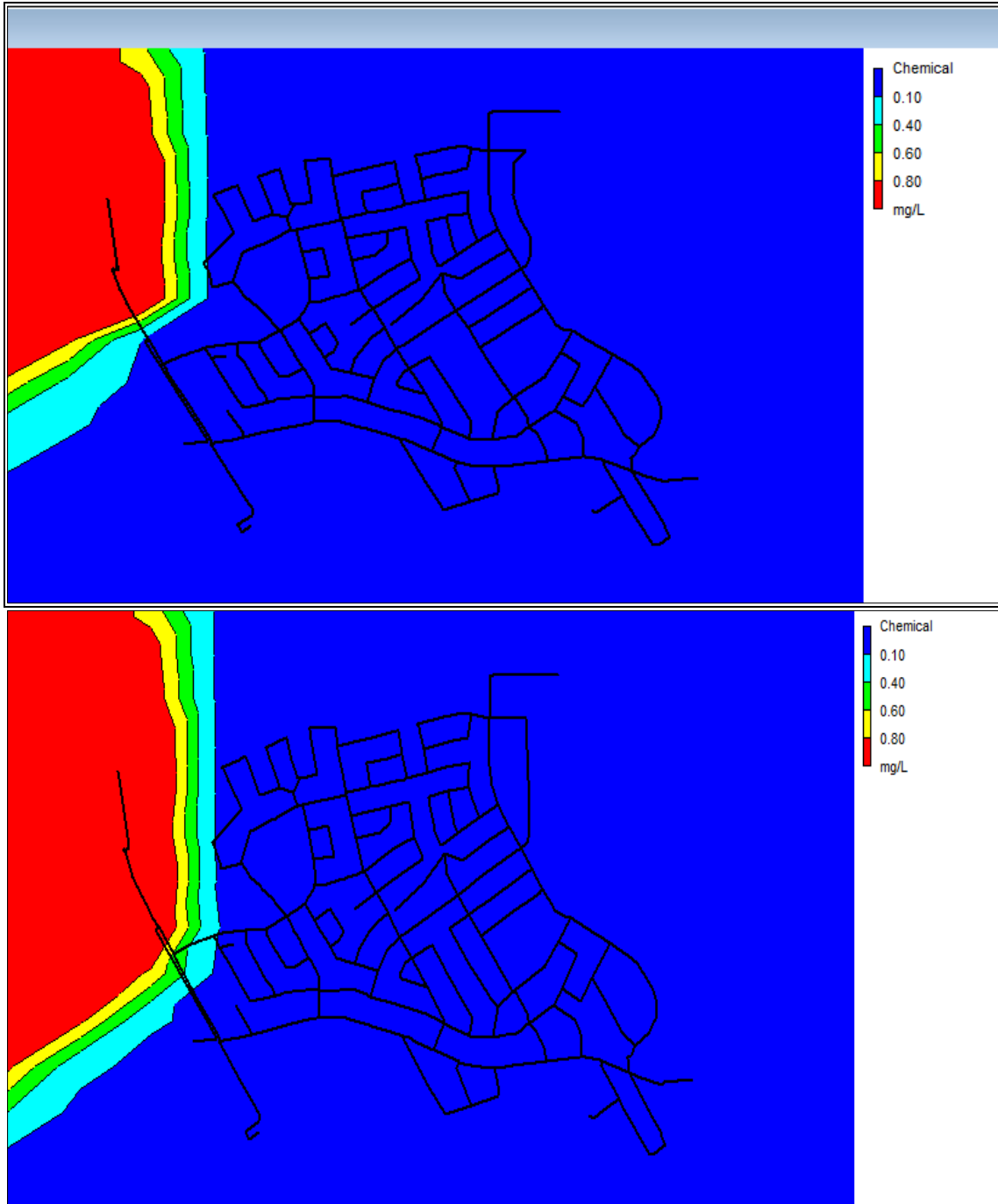


Figura 4.25. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 1)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]

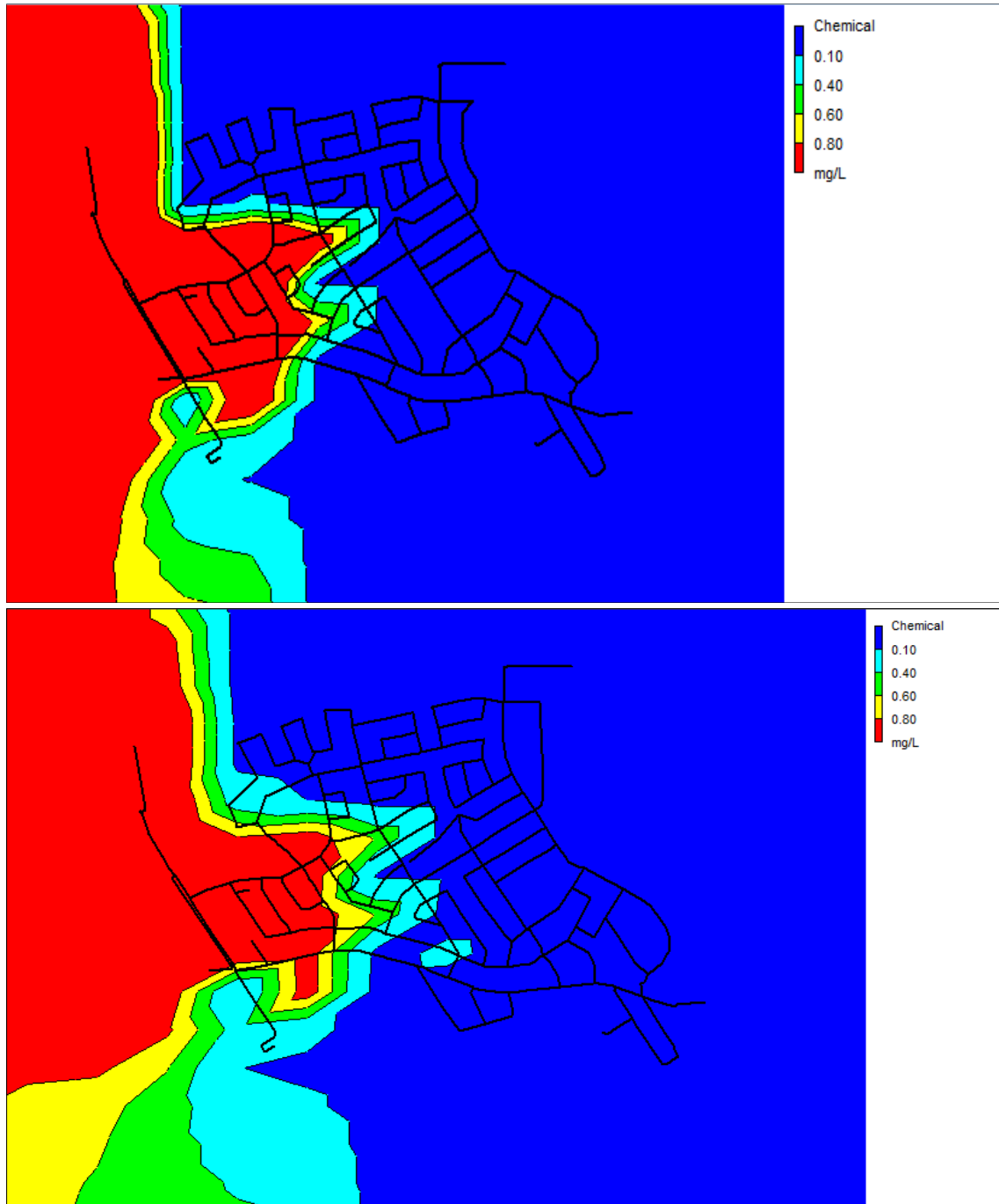
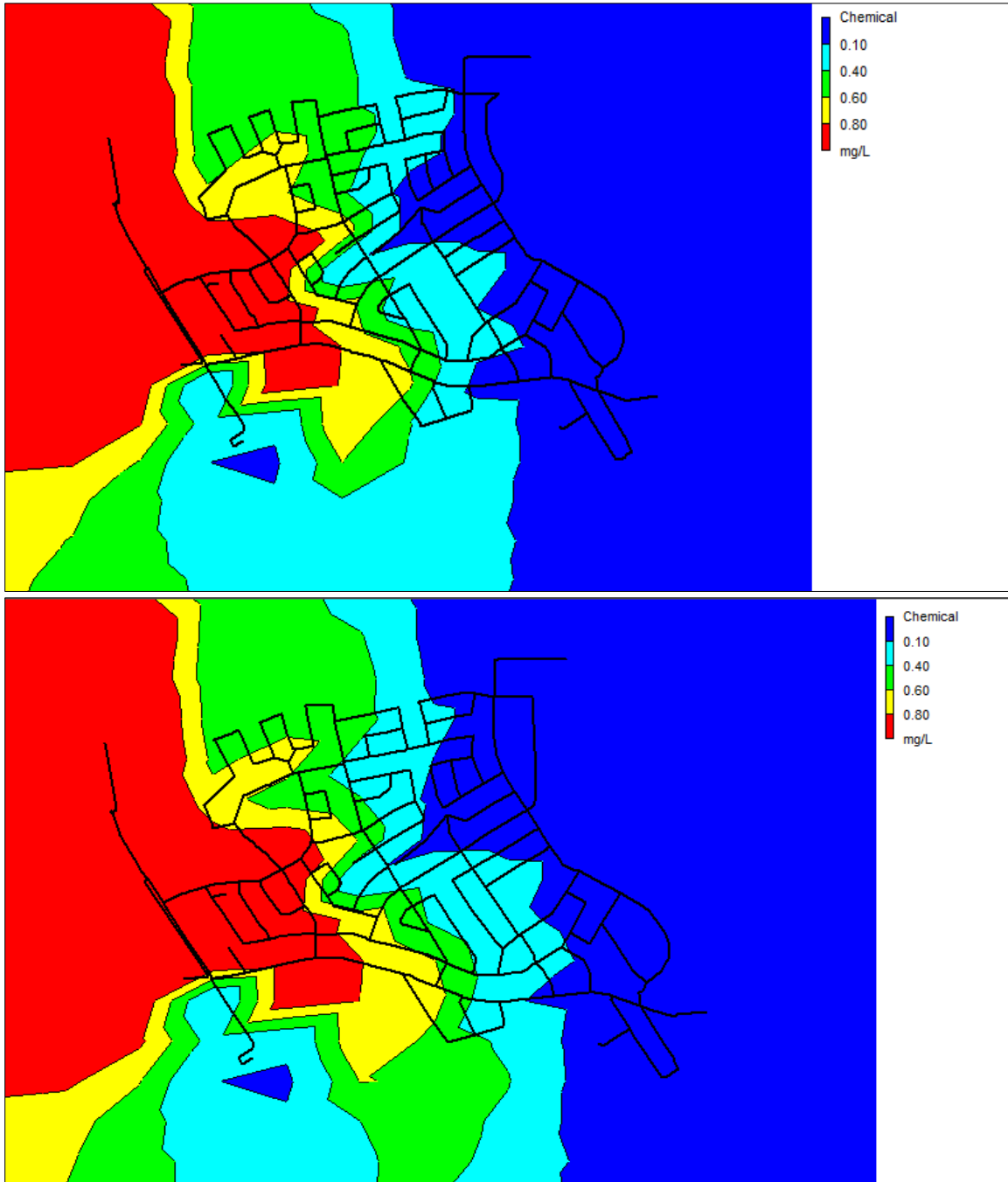


Figura 4.26. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 2)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]



**Figura 4.27. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro(hora 3)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]**



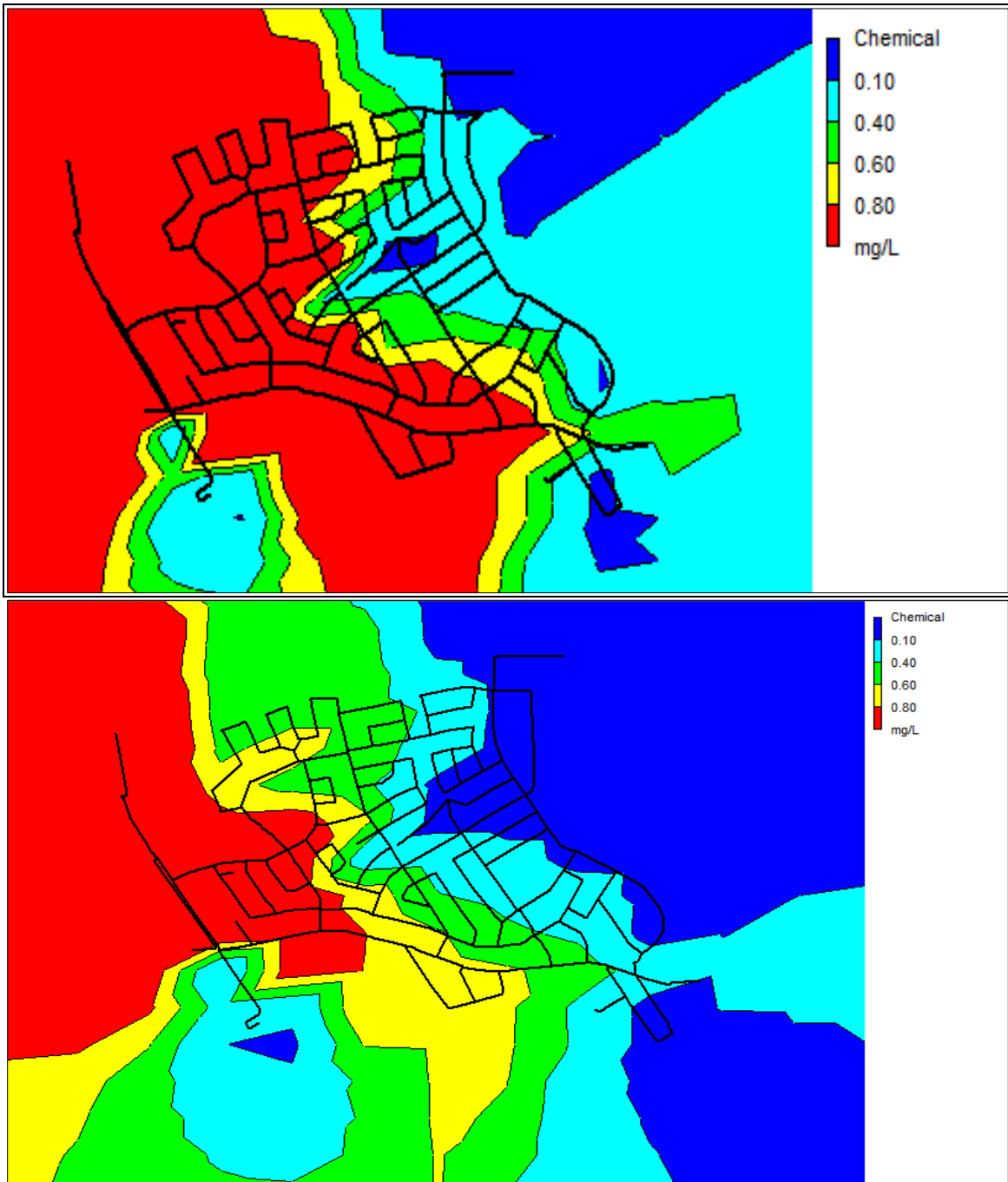
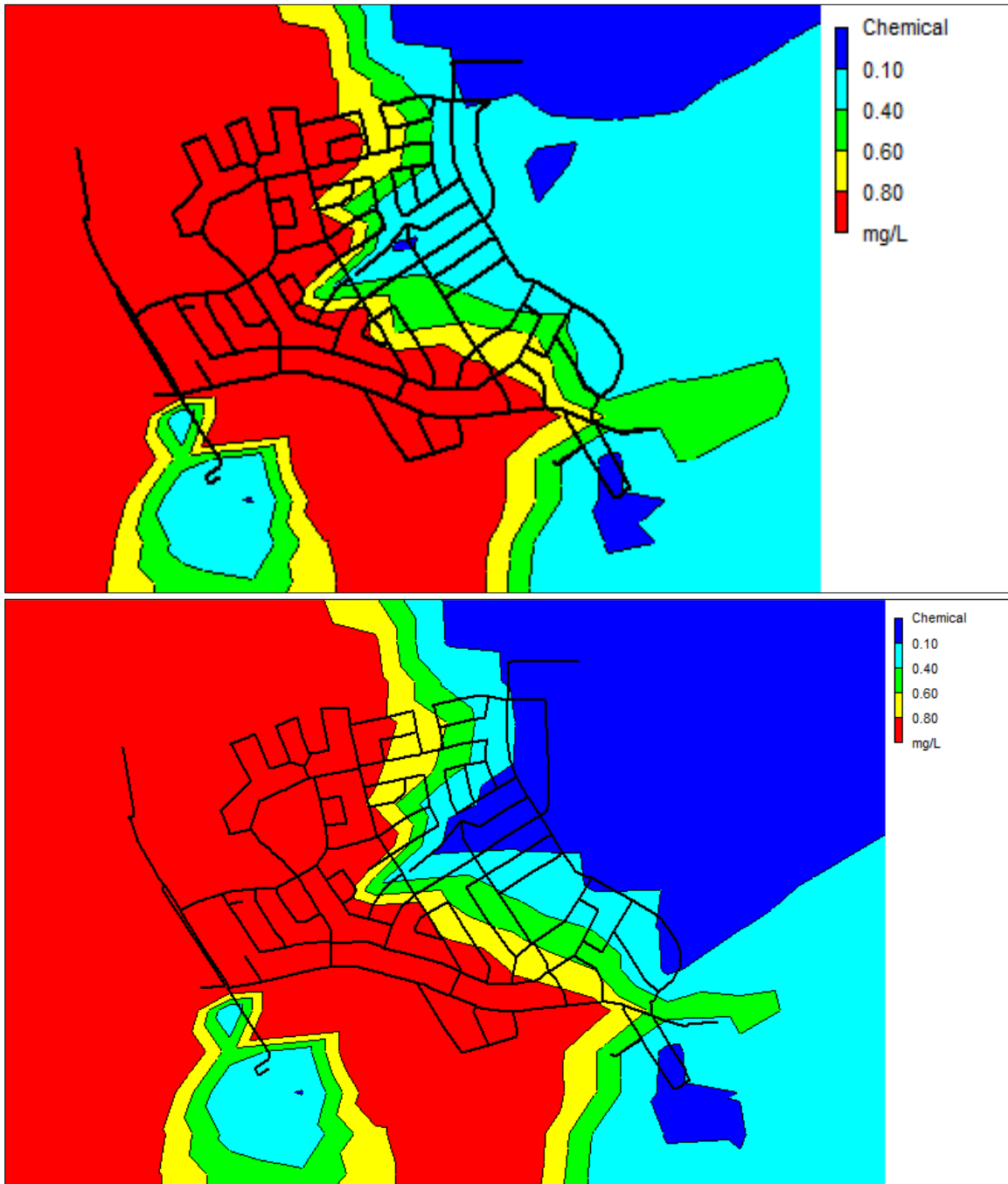
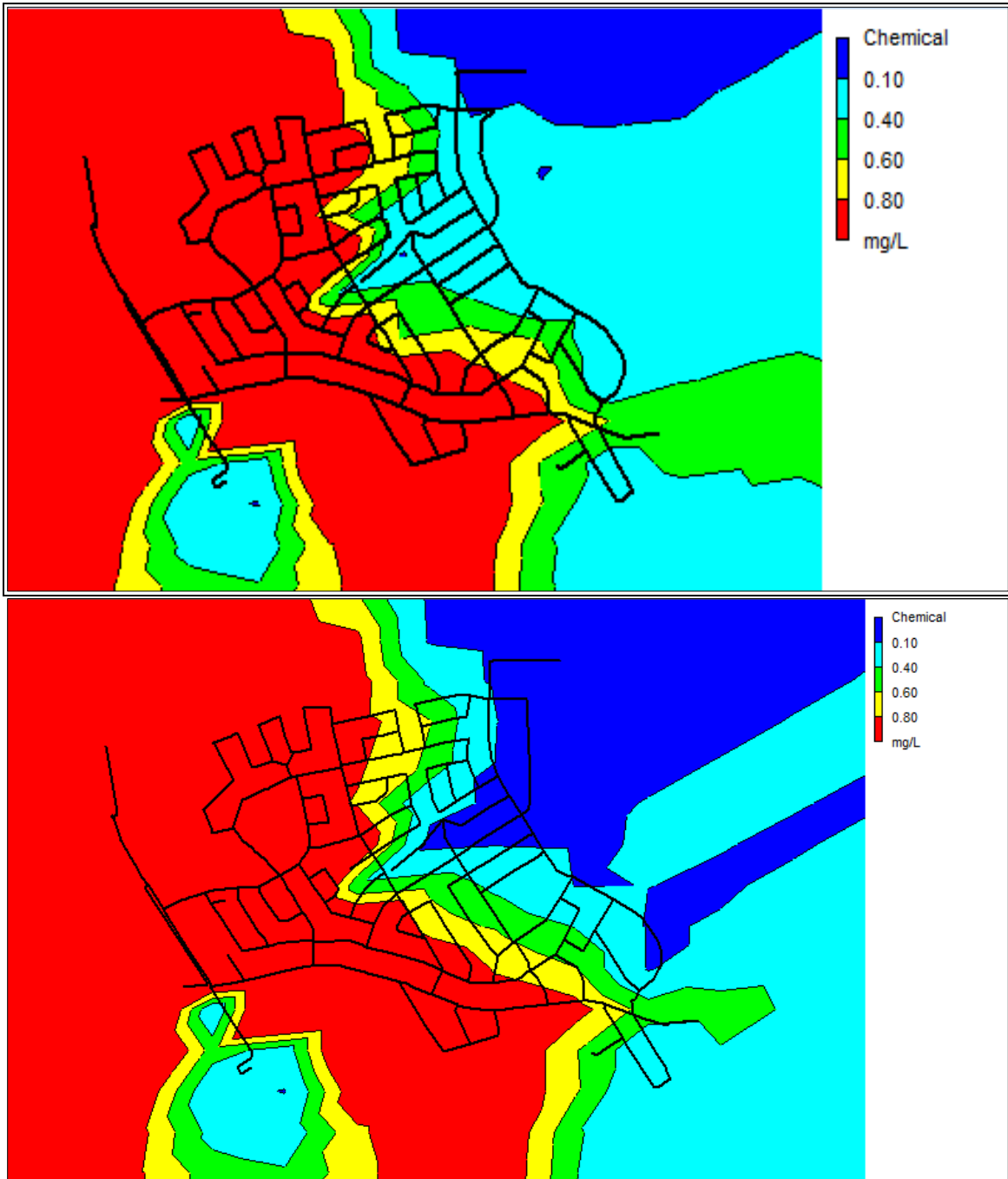


Figura 4.28. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 4)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]



**Figura 4.29. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 5)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]**



**Figura 4.30. Comparación de curva de nivel de concentración de cloro (hora 6)  
[modelo que considera mezcla completa VS modelo que considera mezcla incompleta]**

# *Capítulo V*

## *Conclusiones y recomendaciones*

## 5.- CONCLUSIÓN

En esta tesis se propuso un modelo matemático para simular la calidad del agua en una red de distribución a lo largo de su trayectoria, con el fin de revisar si el cloro residual que contiene el agua que se extrae de la red de distribución se encuentra en el intervalo de aceptación establecido por las Normas Oficiales de salud.

El modelo matemático para calcular la concentración del cloro en una red de distribución propuesto se aplicó en una red real que está en servicio en Duberger-Les Saules, Ciudad de Quebec, Canadá.

Para desarrollar el modelo se llevaron a cabo varias actividades: Primero se construyó un dispositivo físico en uno de los laboratorios de Hidráulica del Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México, en el cual se realizaron varias pruebas modificando los gastos y las concentraciones de cloro en las entradas de los cruces para medir su concentración en las salidas.

Los resultados de los experimentos de laboratorio mostraron que la suposición general que afirma que siempre ocurre una mezcla completa y homogénea en un cruce de tuberías es errónea. Según esta consideración, cuando dos flujos de concentración de cloro diferente llegan a un cruce, siempre salen mezclados, es decir, con la misma concentración en ambas salidas.

Además, en las pruebas mencionadas, se consideraron cruces con ángulos diferentes, y se utilizaron equipos de alta calidad para medir los gastos, la presión y la concentración del cloro.

Se analizó la tendencia de los flujos obtenidos de los experimentos en un cruce, para explicar el comportamiento observado. Se desarrollaron ecuaciones que describen cómo se lleva a cabo la mezcla del cloro en la unión de tres y cuatro tuberías, (caso de una T o Y, cruces de tuberías con ángulos de  $45^\circ$  y  $90^\circ$ ). Los resultados del dispositivo físico se compararon con los resultados obtenidos a partir de las ecuaciones propuestas, y se verificó que la diferencia entre ambos resultados es pequeña. Lo anterior validó las ecuaciones propuestas.

En lo que se refiere a la mezcla de cloro en la confluencia de varias tuberías se puntualizó:

**A.-** Tres tuberías, T y Y en este caso, dos eventos pueden suceder:

- Cuando entra un solo flujo y sale en la bifurcación, la concentración del cloro no cambia.
- Cuando entran dos flujos con concentración de cloro diferentes, **salen mezclados y esta mezcla es igual al promedio de la suma de la concentración de las dos entradas.**

**B.-** Cuatros tuberías (cruce). Para este caso es importante saber cómo llegan los flujos al cruce. Según los estudios realizados, pueden ingresar de dos formas: a  $90^\circ$  ó  $180^\circ$ . Otros factores importantes son los gastos y la concentración de entrada.

Cuando dos flujos entran al cruce a 45° ó 90° y tienen la misma concentración de cloro, independientemente de su magnitud, **salen con la misma concentración**. Cuando los gastos son diferentes y tienen concentración de cloro diferente, dos eventos pueden suceder:

- **No se mezclan los flujos**. Esto sucede cuando el flujo de mayor magnitud tiene menor concentración de cloro.
- **Se mezclan** cuando el flujo de mayor magnitud tiene una mayor concentración de cloro. Sin embargo, los resultados de laboratorio muestran que esta mezcla **no es homogénea**.

Cuando los flujos entran al cruce a 180°, dos eventos suceden:

- **Los flujos se mezclan y la concentración en las salidas es igual al 60%** de la concentración mayor. Esto sucede cuando los gastos de entrada son diferentes y el de mayor magnitud tiene menor concentración de cloro o viceversa.
- **Los flujos se mezclan y la concentración en las salidas es igual al 80%** de la concentración mayor de entrada. Esto sucede cuando el flujo de mayor magnitud tiene mayor concentración de cloro.

C.- Cuando entran tres flujos en un cruce, salen mezclados y la concentración en la salida es igual al promedio de la concentración de los tres flujos.

Un estudio de caracterización de la cinética de decaimiento del cloro ha sido realizado. Se mostró que existen varios factores que contribuyen al decaimiento del cloro en el agua como: la temperatura, el pH, el contenido de materia orgánica e inorgánica, los compuestos órgano clorados, la presencia de metales como, hierro ferroso ( $\text{Fe}^{++}$ ), manganeso ( $\text{Mn}^{++}$ ), la presencia del ácido sulfhídrico,  $\text{H}_2\text{S}$ , entre otras sustancias. Se estimó el coeficiente de reacción del cloro con el volumen de agua,  $k_b$ , llevando a cabo pruebas de laboratorio, así como una campaña de colecta de muestra en la red estudiada. Dado que la composición del agua es diferente para cada lugar, y las condiciones climáticas son diferentes en cada país, este coeficiente  $k_b$  tiene valores diferentes en cada lugar.

Se observó que la pared de las tuberías es otro factor importante en el decaimiento del cloro en las redes de agua potable. Eso es debido a que el cloro y las sustancias contenidas en el agua pueden reaccionar con los materiales de los cuales están fabricadas o recubiertas las paredes de la tubería. También se mostró que la edad de servicio de las tuberías, la corrosión y el biofilm son otros factores de decaimiento porque modifican el coeficiente de reacción con la pared de la tubería  $k_w$ .

Curvas de concentración y tiempo de viaje fueron comparadas con el fin de enfatizar al vínculo existente entre ellos. Así se localizaron zonas más vulnerables ( $C \leq 0.2 \text{ mg/L}$ ) dentro de la red de distribución analizada, donde deben aplicarse estrategias para mejorar la calidad del agua. Una

de las estrategias podría ser la reinyección del cloro, sin embargo se sabe que la adición del cloro en exceso puede aumentar la concentración de los subproductos de la desinfección, como son los trihalometanos que se forman por el contacto del cloro con la materia orgánica contenida en el agua, y que representan un peligro a largo plazo para la salud de los usuarios.

Las medidas para prevenir este riesgo a largo plazo (relacionado por ejemplo con los subproductos de la desinfección) no deben originar riesgos adicionales a corto plazo, tales como aquellos relacionados a las enfermedades infecciosas de origen hídrico. La reducción de los subproductos de la desinfección sólo puede lograrse introduciendo tratamientos específicos o utilizando un recurso hídrico de mejor calidad. Una vez planteados estos principios básicos, la O.M.S. propuso en 1994 valores guía para un importante número de subproductos de la desinfección. La primera prioridad es asegurar un abastecimiento continuo de agua sana. La desinfección es el tratamiento prioritario e indispensable de cualquier agua contaminada o susceptible de estarlo por microorganismos patógenos.

Los trabajos de esta investigación pueden ser aplicados en grandes ciudades como la Ciudad de México, porque la red distribución es abastecida por cuatro fuentes: Mantos acuíferos del Valle de México; sistema de Cutzamala; sistema de Lerma y los manantiales del sur-poniente de la Ciudad. La aplicación de la nueva teoría sobre la mezcla de sustancias desarrollada en esta investigación podría ser una aportación importante. Se ha reportado que en varios sectores de red, la concentración del cloro residual que contiene el agua no se encuentra en el intervalo de aceptación establecido por las Normas de salud, debido a la corrosión de las tuberías que tiene impacto importante sobre la concentración del cloro residual. Se reporta que más del 30% de la red tiene hasta 80 años de antigüedad. Además de eso, se espera tener una variación en la cinética de decaimiento dentro de la red; esto se debe a la falta de presión registrada en ciertas partes de la red, lo que provoca un aumento del tiempo de resistencia.

La mayoría de los sistemas de abastecimiento de agua de localidades urbanas superan los 60 años, y durante este tiempo las tuberías han sufrido incrustaciones aumentado su rugosidad y reduciendo su diámetro, e incluso produciendo fatiga del material, lo que ocasiona frecuentes interrupciones del servicio por roturas y/o pérdida de agua por grietas. Por lo anterior, se hace necesario establecer una metodología de evaluación del estado de los componentes de una red de distribución de agua potable, así como determinar los mecanismos de análisis, pues todo esto es fundamental para poder decidir sobre su rehabilitación o renovación. El modelo numérico presentado puede convertirse en una buena herramienta para los trabajos de modernización y mantenimiento correctivo de cualquier red de distribución de agua potable.

## 5.1.- RECOMENDACIONES

Como se expuso a lo largo de esta investigación, los beneficios que aporta la cloración son incontables por la prevención de muchas enfermedades contagiosas, lo cual es muy importante, especialmente considerando el hecho de que el agua es fundamental para la vida del ser humano y el ambiente que lo rodea. Como el uso de cloro para la desinfección del agua conlleva la desventaja de producir sustancias cloradas tóxicas, entre ellas los trihalometanos (THMs), generados cuando el ácido hipocloroso reacciona con la materia orgánica del agua, se recomienda utilizar estrategias hidráulicas como abrir o cerrar algunas válvulas para reorientar el agua dentro de la red, regularizar la presión en las entradas, sectorizar y agregar otros tanques de almacenamiento para que cada sector sea abastecido por su propio tanque, llevar a cabo programas con el fin de vigilar y verificar las condiciones que guardan los sistemas de desinfección y niveles de cloración en las redes de distribución de agua potable, y reinyectar el cloro en puntos estratégicos. No obstante, será necesario reducir la concentración del cloro en las plantas de tratamiento con el fin de minimizar la reproducción de los subproductos de la desinfección.

También se recomienda utilizar estrategias preventivas como protección de las fuentes de abastecimiento, control de la calidad de las sustancias químicas, registro, seguimiento y control de las características a lo largo de todo el proceso de potabilización y la distribución, para reducir significativamente los riesgos de manera sustentable.

Lo que constituye el verdadero avance es el cambio de la cultura de gestión bajo un enfoque preventivo, y considerando el sistema de manera integral: fuentes de abastecimiento, planta potabilizadora y red de distribución.

Finalmente, para futuras investigaciones en el área podrían considerarse tuberías en materiales diferentes al PVC con diámetros mayores a 1 ½ pulgadas; también sería interesante utilizar gastos de entrada hasta 3 L/s. En cuanto a equipo sería mejor utilizar medidores de flujo electromagnéticos de inserción fija o variable con data loggers o conexión usb para bajar a la PC.



**BIBLIOGRAFÍA**

A.O. Al-Jasser (2005) “Chlorine decay in drinking-water transmission and distribution systems: Pipe service age effect”. *Water Research* 41 (2007) 387 – 396.

Arevalo, J.A (2007) “Modeling free chlorine and chloramine decay in a pilot distribution system”. College of Engineering and Computer Science at the University of Central Florida Orlando, Florida.

Austin, R.G., van Bloemen Waanders, B., McKenna, S., and Choi, C.Y. (2008) “Mixing at Cross Junctions in Water Distribution Systems. II: Experimental Study”. *J. Water Resources, Planning, and Management*, 134(3), 295-302.

Beaulieu, C (2010) “Caracterisation spatio-temporelle de la réactivité des précurseurs de sous-produits de la désinfection en réseau de distribution d'eau potable”. Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.

Bélisle. S. (2011) “Portrait de l'utilisation du suivi en continu de la qualité de l'eau potable dans les municipalités du Québec”. Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.

Biswas, P., Lu, C., Clark, R., 1993. A Model for chlorine concentration decay in pipes. *Water Res.* 27 (12), 1715–1724.

C.K. Ho and S.S. Khalsa (2008) “EPANET-BAM: Water Quality Modeling with incomplete mixing in pipe junctions”. Proceedings of the 10th Annual Water Distribution Systems Analysis Conference WDSA2008, Van Zyl, J.E., Ilemobade, A.A., Jacobs, H.E. (eds.), August 17-20, 2008, Kruger National Park, South Africa.

Chávez Z.C., Fuentes M.O.A., Vicente W. y Domínguez M.R. (2002). “Simulación numérica de la mezcla turbulenta en el cruce de tuberías”. *Memorias de XIX Congreso Latinoamericano de hidráulica, La Habana, Cuba.*

Clark, R.M., Coyle, J.A., 1990. Measuring and modeling variations in distribution system water quality. *J.Ame.Water Resour.Assoc.* 2 (46), 46–53.

Clark, R.M., Goodrich, J.A., Wymer, L.J., (1993) “Effect of the distribution system on drinking water quality”. *J.Water Supply. Res.Technol.* 42 (1), 30–38.

Clifford K. Ho (2008) “Solute Mixing Models for Water-Distribution Pipe Networks” *Journal of Hydraulic Engineering* © ASCE / September 2008 / 1237.

D. C. Gang., T. E. Clevenger and S. K. Banerji (2003) “Modeling Chlorine Decay in Surface Water”. *Journal of Environmental Informatics* 1 (1) 21- 27 (2003).

Delisle, F-J (2009) “Amélioration de la connaissance des temps de séjour en réseau de distribution en vue de l'amélioration de la qualité de l'eau potable”. Faculté des Sciences et de Génie Université Laval.

Diana Robescu., Nicolae Jivan., Dan Robescu “Modelling chlorine decay in drinking water mains”.

- Environmental Engineering and Management Journal, November/December 2008, Vol.7, No.6, 737-741.
- Francisque, A. (2009) "Strategies for improving the surveillance of drinking water quality in distribution networks: application of emerging modeling approaches". Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Québec.
- Fuentes M.O.A., Chávez Z.C. y Osnaya R.J. (1998). "Método para determinar las concentraciones de una sustancia en una red de tuberías de agua potable". Vector, No. 18, septiembre, No. 19, octubre, 1998, México, D.F.
- Fuentes M.O.A., Chávez Z.C. y Osnaya R.J. (2000). "Comprobación experimental del cálculo de concentraciones de cloro en redes de tuberías de agua potable". Memorias del XIX Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo I, pp 207-216, Córdoba, Argentina.
- Fuentes, O.A. y Fuentes G. (1992). "Funcionamiento hidráulico a presión en régimen no permanente de una red de tuberías". Memorias de XV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Tomo II, Cartagena, Colombia.
- Guillaume. B.(2010) " Mieux predire la degradation du chlore en réseau de distribution, cas d'étude: la Ville de Québec." Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Québec.
- Ho, C.K. (2008) "Solute Mixing Models for Water Distribution Pipe Networks". J. Hydraulic Engineering, in press.
- Ho, C.K. and Khalsa, S.S. (2008) "Improved Contaminant Mixing Models for Water Quality Modeling in Water Distribution Networks". Singapore Internal Water Week Water Convention, Singapore, June 23-27, 2008.
- Ho, C.K., Choi, C. Y., and McKenna, S. A. (2007) "Evaluation of Complete and Incomplete Mixing Models in Water Distribution Pipe Network Simulations". In Proceedings of the 2007 World Environmental and Water Resources Congress, Tampa, FL, May 15-19, 2007.
- Ho, C.K., Orear, L., Wright, J. L., and McKenna, S. A. (2006) "Contaminant Mixing at Pipe Joints: Comparison Between Laboratory Flow Experiments and Computational Fluid Dynamics Models". In Proceedings of the 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati, OH, August 27-30, 2006.
- J. E. Wooschlager., B. E. Rittmann and P. Piriou (2005) "Water quality decay in distribution systems – problems, causes, and new modeling tools". Urban Water Journal, Vol. 2, No. 2, June 2005, 69 – 79.
- Khalsa, S.S. and Ho, C.K. (2007) EPANET-BAM v.1.0, © Sandia National Laboratories, 2007. Free software distributed under GNU Lesser General Public License as published by the Free Software Foundation, [www.sandia.gov/EPANET-BAM](http://www.sandia.gov/EPANET-BAM).
- Legay, C (2010) "Développement de strategies pour l'évaluation de l'exposition de la population aux sous-produits de la chloration dans l'eau potable". Faculté des Sciences et de Génie de l'Université Laval, Québec.

Mompremier R., Fuentes Mariles O.A (2012) “Cálculo de difusión de sustancias en redes de tuberías a presión”. Memorias del XXV Congreso Latinoamericano de Hidráulica, San José, Costa Rica, 9 al 12 de Septiembre de 2012. IAHR-CIC.

Mompremier, R. (2010). “Difusión de sustancias en redes de tuberías a presión”. Escuela Superior de Ingeniería y Arquitectura, Instituto Politécnico Nacional, México.

Mompremier, R., Fuentes Mariles, O.A and De Luna Cruz, F (2012) “Resultados de pruebas de laboratorio para analizar la difusión del cloro en cruces de tuberías”. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica, Acapulco, Guerrero, México, Noviembre 2012. AMH.

Osman N. ÖZDEM (1999) “DYNAQ: A Chlorine Decay Simulator in Water Supply Networks”. Turk J Engin Environ Sci 24 (2000) 401-412, TÜBITAK.

Patiño Marquez, J.A (2011) “Pérdidas menores de energía en redes de tubería de agua potable”. Facultad de ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

Piao, H., Lee, Y., Hartman, D and Bush, C (2010) “Determination of Chlorine Bulk and Wall Decay Coefficients for Calibration of the GCWW All-Pipes Distribution System Model”. OAWWA Annual Conference September 22, 2010, Columbus, Ohio.

R.G. Austin; B. van Bloemen Waanders; S. McKenna; C.Y. Choi (2008) “Mixing at cross junctions in water distribution systems. II: Experimental study”. Journal of Water Resources Planning and Management. 2008; 134(3):295-302.

Romero-Gomez, P (2008) “Mixing at Cross Junctions in Water Distribution Systems. I: Numerical Study”. Journal of Water Resources Planning and Management, Vol. 134, No. 3, May/June 2008, pp. 285-294.

Romero-Gomez, P., Choi, C (2011) “Axial dispersion coefficients in laminar flows of water distribution systems”. J. Hydraul. Eng., 137(11), 1500–1508.

Romero-Gomez, P., Ho, C.K., and Choi, C.Y. (2008) “Mixing at Cross Junctions in Water Distribution Systems. I: Numerical Study”. J. Water Resources, Planning, and Management, May/June, 134(3), 285-294.

Rossman, L.A. (2000) “Epanet User Manual”, Risk Reduction Engineering Laboratory, US Environmental Protection Agency, Cincinnati, Ohio.

Shanks, C.M (2012) “Variabilité spatio-temporelle des sous-produits de la désinfection émergents (haloacétonitriles, halonitrométhane et halocétone) dans un réseau de distribution d'eau potable”. Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.

Stephen W. Webb and Bart G. van Bloemen Waanders (2006) “High fidelity computational fluid dynamics for mixing in water distribution systems”. 8th Annual Water Distribution Systems Analysis Symposium, Cincinnati, Ohio, USA, August 27-30, 2006

Simard, A. (2008) “Stratégies Hydrauliques pour améliorer la qualité de l'eau potable en réseau de distribution”. Faculté des Sciences et de Génie Université Laval, Québec.

Víctor Hugo Alcocer-Yamanaka., Velitchko Tzatchkov. “Modelación hidráulica y de calidad del agua en redes de agua potable”. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS), 284 págs. Editado por: Comisión Nacional del Agua-Subdirección General Técnica.

Webb, S. W. and van Bloemen Waanders, B.G. (2006) “High Fidelity Computational Fluid Dynamics for Mixing in Water Distribution Systems”. in Proceedings of the 8th Annual Water Distribution System Analysis Symposium, Cincinnati, OH, August 27-30, 2006.

Zheng Yi Wu. (2006) “Optimal Calibration Method, 1 for Water Distribution Water 2 Quality Model”. Journal of Environmental Science and Health Part A, 41:1–16, 2006.

**ANEXO 1.**

**COMPARACIÓN DE RESULTADO ENTRE EL MODELO  
EXPERIMENTAL Y LAS ECUACIONES DESARROLLADAS**

**(CAPÍTULO 2.)**

Tabla 2.4. Comparación entre resultados experimento y numéricos

RESULTADO EXPERIMENTAL					RESULTADO NUMÉRICO [salida 1 y salida 2]	
Prueba 1	GASTOS	CONCENTRACIÓN	MASA [mg/s]	MASA [mg/s]		
	[L/s]]	[mg/L]				
<b>Entrada1</b>	0.52	1.34	0.69	0.70		
<b>Entrada 2</b>	0.45	0.02	0.01			
<b>Salida 1</b>	0.25	<b>1.20</b>	0.30			
<b>Salida 2</b>	0.31	<b>1.00</b>	0.31	0.61		
					<b>1.41</b>	Ec. 39
					<b>1.13</b>	Ec. 38
<b>Prueba 2</b>						
<b>Entrada1</b>	1.40	0.43	0.60	0.65		
<b>Entrada 2</b>	1.35	0.04	0.05			
<b>Salida 1</b>	1.29	<b>0.20</b>	0.25			
<b>Salida 2</b>	1.46	<b>0.27</b>	0.29	0.55		
<b>Prueba 3</b>					<b>0.25</b>	Ec. 39
<b>Entrada1</b>	1.35	1.30	1.75	1.75	<b>0.22</b>	Ec. 38
<b>Entrada 2</b>	0.32	0.01	0.01			
<b>Salida 1</b>	1.04	<b>0.66</b>	0.68			
<b>Salida 2</b>	0.72	<b>1.30</b>	0.93	1.62		
					<b>0.84</b>	Ec. 39
<b>Prueba 4</b>					<b>1.22</b>	Ec. 38
<b>Entrada1</b>	1.00	1.30	1.3	1.30		
<b>Entrada 2</b>	0.32	0.01	0.01			
<b>Salida 1</b>	0.76	<b>0.65</b>	0.50			
<b>Salida 2</b>	0.56	<b>1.28</b>	0.72	1.21		
					<b>0.85</b>	Ec. 39
					<b>1.16</b>	Ec. 38

**ANEXO 2.**  
**RELACIÓN ENTRE EL TIEMPO DE VIAJE Y EL**  
**DECAIMIENTO DEL CLORO**  
**(CAPÍTULO 4.)**

Tuberías	Tiempo de viaje [hora]	Concentración [mg/L]
Pipe PV-5370Q	1.67	1.46
Pipe PV-5371Q	1.58	1.48
Pipe PV-5374Q	7.00	0.20
Pipe PV-5376Q	5.00	0.20
Pipe P-5377Q	1.92	1.38
Pipe P-5378Q	2.00	1.35
Pipe P-5379Q	2.08	1.31
Pipe P-5380Q	2.17	1.27
Pipe PV-5381Q	2.25	1.23
Pipe P-5382Q	2.33	1.20
Pipe P-5383Q	2.42	1.15
Pipe PV-5384Q	2.50	1.10
Pipe PV-5385Q	<b>6.00</b>	<b>0.20</b>
Pipe P-5386Q	<b>7.00</b>	<b>0.18</b>
Pipe P-5411Q	2.58	1.08
Pipe P-5412Q	2.67	1.05
Pipe P-5413Q	2.75	1.01
Pipe P-5414Q	2.83	1.00
Pipe PV-5415Q	2.92	0.97
Pipe P-5416Q	3.00	0.94
Pipe P-5417Q	3.08	0.92
Pipe P-5418Q	3.17	0.90
Pipe P-5419Q	3.25	0.86
Pipe P-5420Q	3.33	0.84
Pipe PV-5421Q	3.41	0.82
Pipe P-5422Q	3.50	0.81
Pipe P-5423Q	3.58	0.79
Pipe P-5424Q	3.66	0.78
Pipe PV-5425Q	3.75	0.76
Pipe P-5426Q	3.83	0.74
Pipe P-5427Q	3.91	0.72
Pipe P-5428Q	4.00	0.69
Pipe P-5429Q	4.08	0.68
Pipe P-5430Q	4.16	0.67
Pipe PV-5431Q	4.25	0.66
Pipe P-5432Q	4.33	0.65
Pipe P-5433Q	4.36	0.62
Pipe P-5434Q	4.44	0.61
Pipe P-5435Q	4.53	0.57
Pipe PV-5436Q	4.65	0.54



Pipe P-5437Q	4.73	0.53
Pipe PV-5438Q	4.81	0.51
Pipe P-5439Q	5.07	0.47
Pipe PV-5440Q	5.15	0.46
Pipe P-5441Q	5.23	0.45
Pipe P-5442Q	5.32	0.44
Pipe P-5443Q	5.4	0.42
Pipe PV-5466Q	5.25	0.43
Pipe P-5467Q	5.04	0.48
Pipe P-5468Q	4.88	0.50
Pipe P-5469Q	4.73	0.53
Pipe PV-5470Q	4.62	0.54
Pipe PV-5471Q	4.54	0.55
Pipe P-5472Q	4.46	0.57
Pipe P-5473Q	5.82	0.22
Pipe PV-5474Q	4.30	0.60
Pipe PV-5475Q	4.22	0.62
Pipe PV-5476Q	4.14	0.63
Pipe P-5477Q	4.05	0.65
Pipe PV-5478Q	3.86	0.70
Pipe P-5479Q	3.78	0.72
Pipe PV-5480Q	3.63	0.77
Pipe PV-5481Q	3.49	0.87
Pipe PV-5482Q	3.41	0.90
Pipe P-5483Q	3.31	0.92
Pipe PV-5484Q	2.94	0.98
Pipe P-5485Q	2.82	1.01
Pipe PV-5486Q	2.70	1.04
Pipe PV-5487Q	2.62	1.06
Pipe PV-5488Q	3.43	0.89
Pipe P-5489Q	3.67	0.83
Pipe PV-5490Q	3.93	0.78
Pipe PV-5491Q	4.36	0.67
Pipe P-5492Q	7.48	0.25
Pipe PV-5494Q	7.04	0.30
Pipe P-5495Q	10.05	0.13
Pipe PV-5497Q	11.6	0.07
Pipe P-8665Q	1.70	1.36
Pipe P-8666Q	7.00	0.18
Pipe P-8668Q	1.78	1.31
Pipe P-8670Q	1.83	1.41
Pipe P-8673Q	8.00	0.17

Pipe P-8674Q	8.00	0.17
Pipe P-8768Q	1.86	1.26
Pipe P-9057Q	1.67	1.46
Pipe P-9058Q	1.75	1.43
Pipe P-9059Q	1.75	1.43
Pipe P-9060Q	1.58	1.48
Pipe P-1707	2.57	0.96
Pipe P-1709	2.17	1.27
Pipe P-1710	2.36	1.13
Pipe P-1711	2.25	1.23
Pipe P-1712	2.33	1.17
Pipe P-1713	2.54	1.08
Pipe P-1714	2.42	1.14
Pipe P-1715	2.33	1.17
Pipe P-1716	2.54	1.06
Pipe P-1717	2.45	1.12
Pipe P-1718	2.47	1.08
Pipe P-1719	2.62	0.99
Pipe P-1720	2.72	0.97
Pipe P-1721	2.50	1.10
Pipe P-1722	2.58	1.05
Pipe P-1723	2.67	1.01
Pipe P-1724	2.78	0.92
Pipe P-1725	2.98	0.89
Pipe P-1726	2.98	0.85
Pipe P-1727	2.80	0.97
Pipe P-1728	2.72	0.99
Pipe P-1729	2.81	0.95
Pipe P-1730	2.9	0.89
Pipe P-1731	3.04	0.77
Pipe P-1732	3.05	0.78
Pipe P-1733	3.27	0.69
Pipe P-1734	3.24	0.68
Pipe P-1735	3.31	0.67
Pipe P-1736	4.12	0.53
Pipe P-1737	2.89	0.88
Pipe P-1738	2.98	0.82
Pipe P-1739	2.83	0.94
Pipe P-1740	2.96	0.87
Pipe P-1741	3.26	0.74
Pipe P-1742	4.47	0.35
Pipe P-1743	4.49	0.51

Pipe P-1744	4.22	0.49
Pipe P-1745	3.86	0.57
Pipe P-1746	4.42	0.39
Pipe P-1747	4.09	0.51
Pipe P-1748	4.26	0.41
Pipe P-1749	3.94	0.62
Pipe P-1750	4.48	0.40
Pipe P-1751	3.06	0.78
Pipe P-1752	3.98	0.71
Pipe P-1753	3.08	0.85
Pipe P-1754	3.4	0.69
<b>Pipe P-1755</b>	<b>6.86</b>	<b>0.19</b>
Pipe P-1756	4.61	0.50
Pipe P-1757	5.52	0.28
<b>Pipe P-1758</b>	<b>7.00</b>	<b>0.19</b>
<b>Pipe P-1759</b>	<b>6.81</b>	<b>0.20</b>
Pipe P-1760	3.76	0.70
Pipe P-1761	3.41	0.77
Pipe P-1762	4.16	0.62
Pipe P-1763	4.34	0.57
Pipe P-1764	4.61	0.52
Pipe P-1765	3.78	0.62
Pipe P-1766	3.70	0.66
Pipe P-1767	3.41	0.77
Pipe P-1768	3.16	0.85
Pipe P-1769	4.10	0.48
Pipe P-1770	3.19	0.74
Pipe P-1771	4.02	0.53
Pipe P-1772	5.16	0.28
Pipe P-1773	2.96	0.87
Pipe P-1774	4.38	0.52
Pipe P-1775	5.81	0.22
Pipe P-1776	4.53	0.48
Pipe P-1777	5.51	0.28
Pipe P-1778	4.78	0.45
Pipe P-1779	4.83	0.42
Pipe P-1780	5.03	0.36
Pipe P-1781	5.29	0.30
Pipe P-1782	<b>8.86</b>	<b>0.16</b>
Pipe P-1783	6.40	0.20
Pipe P-1784	<b>9.52</b>	<b>0.15</b>
Pipe P-1785	5.32	0.28

Pipe P-1786	<b>7.45</b>	<b>0.19</b>
Pipe P-1787	4.94	0.38
Pipe P-1788	5.44	0.28
Pipe P-1789	5.38	0.31
Pipe P-1790	5.89	0.22
Pipe P-1791	3.86	0.60
Pipe P-1792	4.15	0.52
Pipe P-1793	4.36	0.40
Pipe P-1794	4.87	0.33
Pipe P-1795	4.56	0.40
Pipe P-1796	5.01	0.42
Pipe P-1797	5.57	0.18
Pipe P-1798	6.17	0.15
Pipe P-1799	2.25	1.11
Pipe P-1800	2.75	0.81
Pipe P-1801	2.77	0.81
Pipe P-1802	3.16	0.60
Pipe P-1803	3.27	0.55
Pipe P-1805	4.18	0.49
Pipe P-1806	4.08	0.75
Pipe P-1807	4.25	0.58
Pipe P-1808	4.59	0.44
Pipe P-1809	4.64	0.48
Pipe P-1810	4.91	0.38
Pipe P-1811	4.08	0.56
Pipe P-1812	4.16	0.54
Pipe P-1813	4.5	0.45
Pipe P-1814	4.16	0.54
Pipe P-1815	4.70	0.44
Pipe P-1816	4.61	0.49
Pipe P-1817	4.35	0.56
Pipe P-1818	4.56	0.49
Pipe P-1819	4.45	0.49
Pipe P-1820	4.67	0.43
Pipe P-1821	4.85	0.40
Pipe P-1822	4.81	0.40
Pipe P-1823	5.24	0.33
Pipe P-1824	5.22	0.33
Pipe P-1825	4.85	0.41
<b>Pipe P-1826</b>	<b>9.45</b>	<b>0.10</b>
Pipe P-1827	5.52	0.35
Pipe P-1828	5.56	0.27

**ANEXO 3**  
**NÚMERO DE REYNOLDS CALCULADOS A PARTIR DE LOS**  
**GASTOS DE ENTRADA**  
**(CAPÍTULO 3)**

**Número de Reynolds: Con Q=0.09L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	0.68	0.32	0.18	0.11	0.08
<b>Viscocidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	8242	5639	4286	3348	2820

**Número de Reynolds: Con Q=0.10L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	0.75	0.35	0.20	0.12	0.09
<b>Viscocidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	9158	6266	4762	3720	3133

**Número de Reynolds: Con Q=0.12L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	0.90	0.42	0.24	0.15	0.11
<b>Viscocidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	10990	7519	5715	4465	3760

**Número de Reynolds: Con Q=0.14L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.06	0.49	0.29	0.17	0.12
<b>Viscocidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	12821	8772	6667	5209	4386

**Número de Reynolds: Con Q=0.15L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.13	0.53	0.31	0.19	0.13
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	13737	9399	7143	5581	4700

**Número de Reynolds: Con Q=0.19L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.43	0.67	0.39	0.24	0.17
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	17400	11905	9048	7069	5953

**Número de Reynolds: Con Q=0.20L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.51	0.71	0.41	0.25	0.18
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	18316	12532	9524	7441	6266

**Número de Reynolds: Con Q=0.23L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.73	0.81	0.47	0.29	0.20
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	21064	14412	10953	8557	7206

---

**Número de Reynolds: Con Q=0.24L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	1.81	0.85	0.49	0.30	0.21
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	21979	15038	11429	8929	7519

---

**Número de Reynolds: Con Q=0.30L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	2.26	1.06	0.61	0.37	0.26
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	27474	18798	14287	11161	9399

---

**Número de Reynolds: Con Q=0.36L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	2.71	1.27	0.73	0.45	0.32
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	32969	22558	17144	13394	11279

---

**Número de Reynolds: Con Q=0.24L/s**

	Diámetro 1 [m]	Diámetro 2 [m]	Diámetro 3 [m]	Diámetro 4 [m]	Diámetro 5 [m]
	0.013	0.019	0.025	0.032	0.038
<b>Area [m]</b>	0.00013	0.00028	0.00049	0.00080	0.00113
<b>Velocidad [m/s]</b>	3.17	1.48	0.86	0.52	0.37
<b>Viscosidad [m<sup>2</sup>/s]</b>	0.00000107				
<b>Reynolds</b>	38464	26317	20001	15626	13159

---



**ANEXO 4**  
**COMPARACIÓN DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL**  
**MODELO EXPERIMENTAL**  
**Y LOS RESULTADOS OBTENIDOS CON LAS ECUACIONES**  
**DESARROLLADAS**  
**(CAPÍTULO 3)**

**COMPARACIÓN DE RESULTADOS: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DESARROLLADA (SERIE DE MEZCLA PARCIAL). ENTRADAS DE 45°,60° Y 90°**

**Tabla 3.16. Comparación de resultados [caso de mezcla parcial]**

ESCENARIO 1	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL				ECUACIONES DESARROLLADAS			
	DATOS MEDIDOS				DATOS CALCULADOS			
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Salida 1	Salida 2	Error absoluto Salidas 1 [mg/L]	Error absoluto Salidas 2 [mg/L]
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.21	0.105	0.156	0.15				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.75	0.75	1.25	1.65	1.30	1.63	0.05	0.02
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.20	0.105	0.154	0.145				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.40	0.75	1.05	1.30	1.10	1.30	0.05	0.00
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.194	0.12	0.15	0.16				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.65	0.70	1.05	1.55	1.15	1.53	0.10	0.02
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.20	0.12	0.15	0.16				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.25	0.70	1.00	1.15	0.98	1.16	0.02	0.01
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.19	0.13	0.16	0.15				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.75	0.70	1.20	1.60	1.12	1.62	0.08	0.02
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.19	0.13	0.16	0.15				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	2.20	0.8	1.30	1.20	1.34	1.14	0.04	0.06
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.19	0.13	0.16	0.15				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.65	0.80	1.13	1.45	1.20	1.53	0.07	0.08
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.19	0.13	0.16	0.15				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.55	0.75	1.06	1.40	1.14	1.44	0.08	0.04
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.18	0.09	0.14	0.116				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	2.65	1.30	2.20	2.50	2.20	2.46	0.00	0.04
<b>GASTOS [L/s]</b>	0.18	0.09	0.14	0.116				
<b>CONCENTRACIÓN [mg/L]</b>	1.80	1.40	1.93	1.75	1.89	1.68	0.04	0.07

**COMPARACIÓN DE RESULTADOS: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DESARROLLADA. SERIE SIN MEZCLA. ENTRADAS DE 45°,60° Y 90°**

**Tabla 3.17. Comparación de resultados [caso sin mezcla]**

ESCENARIOS	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL				ECUACIONES DESARROLLADAS			
	DATOS MEDIDOS				DATOS CALCULADOS			
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Salida 1	Salida 2	Error absoluto Salidas 1 [mg/L]	Error absoluto Salidas 2 [mg/L]
GASTOS [L/s]	0.11	0.18	0.12	0.15				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.95	0.80	0.90	1.75	0.91	1.62	0.01	0.13
GASTOS [L/s]	0.105	0.18	0.12	0.15				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.35	0.90	1.10	1.20	1.12	1.13	0.02	0.07
GASTOS [L/s]	0.11	0.18	0.12	0.15				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	2.25	1.05	1.25	2.05	1.25	1.86	0.00	0.19
GASTOS [L/s]	0.10	0.19	0.13	0.15				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	2.80	1.15	1.31	2.50	1.52	2.31	0.21	0.19
GASTOS [L/s]	0.09	0.20	0.14	0.13				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.78	0.42	0.49	1.55	0.37	1.48	0.12	0.07
GASTOS [L/s]	0.09	0.20	0.14	0.13				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.10	0.40	0.43	0.94	0.43	0.91	0.00	0.03
GASTOS [L/s]	0.20	0.38	0.31	0.25				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.81	0.15	0.17	0.62	0.16	0.67	0.01	0.05
GASTOS [L/s]	0.20	0.38	0.31	0.25				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.50	0.15	0.15	0.40	0.17	0.41	0.02	0.01
GASTOS [L/s]	0.16	0.38	0.29	0.24				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.55	0.10	0.05	0.40	0.05	0.45	0.00	0.05

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DESARROLLADA

Serie mezcla completa. Gastos diferentes y misma concentración.

Tabla 3.18. Comparación de resultados [serie de mezcla completa]

ESCENARIO 1	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL				ECUACIONES DESARROLLADAS		
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Salida 1	Salida 2	Error absoluto [mg/L]
GASTOS [L/s]	0.16	0.22	0.247	0.12			
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.35	0.35	0.35	0.35	0.37	0.37	0.02
GASTOS [L/s]	0.19	0.19	0.23	0.13			
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.65	0.65	0.05
GASTOS [L/s]	0.24	0.24	0.24	0.24			
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.60	0.00
GASTOS [L/s]	0.25	0.16	0.25	0.15			
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.60	0.60	0.60	0.60	0.62	0.62	0.02
GASTOS [L/s]	0.32	0.05	0.14	0.14			
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.29	0.00
GASTOS [L/s]	0.176	0.26	0.14	0.14			
CONCENTRACIÓN [mg/l]	0.30	0.30	0.30	0.30	0.32	0.32	0.02

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS:

## DISPOSITIVO EXPERIMENTAL VS ECUACIÓN DESARROLLADA.

Serie mezcla completa (caso de una T y Y)

Tabla 3.19. Comparación de resultados (Caso T)

ESCENARIOS	MODELOS EXPERIMENTAL			ECUACION DESARROLLADA	
	DATOS MEDIDOS			DATOS CALCULADOS	
	Entrada 1	Entrada 2	Salida1	Salida1	Error absoluto [mg/L]
GASTOS [l/s]	0.10	0.19	0.29		
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.64	1.08	1.30	1.36	0.06
GASTOS [L/s]	0.08	0.15	0.22		
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.91	1.05	1.39	1.48	0.09
GASTOS [L/s]	0.12	0.20	0.313		
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.47	1.12	1.29	1.295	0.005
GASTOS [L/s]	0.11	0.20	0.31		
CONCENTRACIÓN [mg/L]	1.26	1.08	1.24	1.17	0.07

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y ECUACIÓN DESARROLLADA.

Serie mezcla completa. Gastos de entrada diferentes y concentración de cloro diferente.

Entrada a 180°.

$$Q_{e1} < Q_{e2}$$

$$C_{e1} > C_{e2}$$

Tabla 3.20. Comparación de resultados [Serie de mezcla completa, entrada a 180°]

ESCENARIO	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL				ECUACION DESARROLLADA		
	DATOS MEDIDOS				DATOS CALCULADOS		
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Salida 1	Salida 2	Error absoluto [mg/L]
GASTOS [l/s]	0.12	0.95	0.25	0.16			
CONCENTRACIÓN [mg/l]	1.65	0.95	1.10	1.10	0.99	0.99	0.11
GASTOS [l/s]	0.13	0.21	0.11	0.22			
CONCENTRACIÓN [mg/l]	1.60	0.35	1.04	0.94	0.96	0.96	0.08

## COMPARACIÓN DE RESULTADOS: DISPOSITIVO EXPERIMENTAL Y LAS ECUACIONES DESARROLLADAS

**Serie mezcla completa.** Gastos de entrada diferentes y concentración de cloro diferente

$$Q_{e1} > Q_{e2}$$

$$C_{e1} > C_{e2}$$

Tabla 3.21. Comparación de resultados [serie de mezcla completa, entrada a 180°]

ESCENARIOS	DISPOSITIVO EXPERIMENTAL DATOS MEDIDOS				DATOS CALCULADOS		Error absoluto Salidas 1 [mg/L]	Error absoluto Salidas 2 [mg/L]
	Entrada 1	Entrada 2	Salida 1	Salida 2	Salida 1	Salida 2		
GASTOS [L/s]	0.136	0.23	0.12	0.237				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.460	1.44	1.09	1.14	1.152	1.152	0.062	0.012
GASTOS [L/s]	0.136	0.23	0.12	0.24				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.550	1.73	1.35	1.40	1.384	1.384	0.034	0.016
GASTOS [L/s]	0.130	0.25	0.12	0.25				
CONCENTRACIÓN [mg/L]	0.550	2.01	1.71	1.70	1.610	1.610	0.100	0.09

**ANEXO 5**

**TABLA 4. RESULTADOS OBTENIDOS DURANTE LAS PRUEBAS DE  
DECAIMIENTO DEL CLORO (UNIVERSIDAD DE GUANAJUATO)**

**(CAPÍTULO 4)**

**Tabla 4. Resultados obtenidos durante las pruebas de decaimiento del cloro  
(Universidad de Guanajuato)**

<b>Gasto [L/s]</b>	<b>Diámetro [pulg]</b>	<b>Gasto [m<sup>3</sup>/s]</b>	<b>Tiempo [s]</b>	<b>Velocidad [m/s]</b>	<b>Concentración Inicial [mg/L]</b>	<b>Concentración final [mg/L]</b>	<b>Distancia [m]</b>
32.07	4	0.03207	<b>18.77</b>	3.96	0.85	<b>0.849</b>	25.87
27.32	4	0.02732	<b>22.05</b>	3.37	0.85	<b>0.85</b>	74.32
22.37	4	0.02237	<b>26.73</b>	2.78	0.85	<b>0.85</b>	81.51