

Artículo publicado en el Repositorio Institucional del IMTA

<i>Título</i>	Modelo de calidad del agua en redes de distribución.
<i>Autor / Adscripción</i>	Víctor H. Alcocer Yamanaka Velitchko Tzatchkov Instituto Mexicano de Tecnología del Agua  Felipe I. Arreguín Cortés Comisión Nacional del Agua
<i>Publicación</i>	Ingeniería Hidráulica en México, 19(2): 77-88
<i>Fecha de publicación</i>	2004
<i>Resumen</i>	Se presenta un modelo de calidad del agua potable en una red de distribución, el cual incluye tuberías de tres pulgadas de diámetro y mayores. La aplicación se realizó en la zona norte de Culiacán, Sinaloa, México. Se determinó la constante de primer orden de reacción del cloro con el agua y la de reacción con la pared del tubo. Se realiza una comparación de resultados entre medición y modelo.
<i>Identificador</i>	<a href="http://hdl.handle.net/123456789/743">http://hdl.handle.net/123456789/743</a>

# Modelo de calidad del agua en redes de distribución

Víctor H. Alcocer-Yamanaka  
Velitchko Tzatchkov

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua

Felipe I. Arreguín-Cortés

Comisión Nacional del Agua

*Se presenta un modelo de calidad del agua potable en una red de distribución, el cual incluye las tuberías de tres pulgadas de diámetro y mayores. La aplicación se realizó en la zona norte de Culiacán, Sinaloa, México, que cuenta con una población de 61,500 habitantes. Se determinó la constante de primer orden de reacción del cloro con el agua,  $k_a = 0.0988 \text{ horas}^{-1}$ , y la de reacción con la pared del tubo  $k_p = 0.4140 \text{ m/día}$  para un diámetro de 16 pulgadas, y  $k_p = 0.1509 \text{ m/día}$  para 10 pulgadas. Con lo anterior, para el caso de la ciudad de Culiacán, los valores del coeficiente total de decaimiento  $k$  son de 0.2478 a 0.189  $\text{horas}^{-1}$ . La comparación de resultados entre medición y modelo muestra que en 70.83% del total de los puntos se tienen diferencias menores al 25%. En la región uno del sitio de aplicación, los resultados presentan diferencias menores al 20% en el 90% de los nodos.*

**Palabras clave:** modelos de calidad del agua, redes de agua potable, decaimiento del cloro, calibración de modelos, desinfección con cloro, simulación, programas de cómputo, reacción del cloro.

## Introducción

Existen referencias (Rossman *et al.*, 1994), (Clark *et al.*, 1995), (Tzatchkov y Arreguín, 1996), (Vasconcelos *et al.*, 1997), y (Ozdemir y Ucak, 2002), que muestran que la calidad del agua dentro de un sistema de distribución cambia en su trayectoria desde las fuentes de abastecimiento hasta la toma domiciliaria. El cloro utilizado como desinfectante decae una vez introducido en la red y existe el peligro de que ciertas partes de ella queden desprotegidas, con el correspondiente riesgo para la salud de la población. Actualmente, la mayoría de los organismos operadores de agua potable en México determinan la dosis necesaria del desinfectante en fuentes y eventuales estaciones de reinyección a través de monitoreos periódicos en la red.

Se aplica cierta dosis en la fuente y se mide en diferentes puntos de la red para ver si la concentración

es suficiente. Sin embargo, resulta imposible realizar muestreos en toda la red, lo que genera incertidumbre en la concentración del desinfectante en muchos tramos del sistema (incluso en aquellos con tubería principal). Para garantizar la calidad del agua en las redes de distribución de agua potable es necesario tener concentraciones específicas de los parámetros establecidos dentro de la norma NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites máximos permisibles de los parámetros del agua para consumo humano. Por ejemplo, el cloro residual, utilizado como desinfectante, tiene límites permisibles de 0.20 a 1.50 mg/l. Vale la pena mencionar que no siempre la menor concentración se presenta en las zonas más alejadas a las fuentes de abastecimiento, pues el decaimiento es proporcional al tiempo de residencia del agua dentro de la red; esto es, pueden presentarse concentraciones reducidas de cloro en zonas con velocidad baja o bien en tanques de almacena-

miento. Por otro lado, el control de la concentración del desinfectante puede ser complicado cuando la red es abastecida por varias fuentes a la vez.

Existen modelos matemáticos que simulan el comportamiento de la calidad del agua en las redes de distribución que, implementados en computadoras, hacen posible predecir la concentración del cloro (u otro parámetro fisicoquímico del agua) bajo diferentes escenarios de operación en todos los puntos de la red y con esto garantizar una adecuada calidad del agua en todo el sistema. Se han propuesto varios modelos de este tipo (AWWARF y EPA, 1991; AWWARF, 1996; Tzatchkov *et al.*, 1994; Tzatchkov y Arreguín, 1996; Tzatchkov, 1996; Tzatchkov *et al.* 2000; Tzatchkov *et al.*, 2002; Chávez *et al.*, 1998, y Chávez *et al.* 2000), pero la mayoría de ellos se han probado en redes pequeñas o en sistemas grandes muy simplificados, es decir, considerando solamente las tuberías principales. Cabe señalar que un modelo de calidad del agua es útil precisamente en redes grandes y tomando en cuenta todas las tuberías. En redes pequeñas, los tiempos de residencia hidráulica son cortos y no se produce un decaimiento apreciable del desinfectante (Tzatchkov *et al.*, 1994). Una situación similar se presenta en modelos de redes grandes, cuando se incluyen solamente las líneas principales, donde las velocidades del flujo son altas y, por lo tanto, el tiempo de residencia es corto. También es común la existencia de redes donde la velocidad del flujo es baja y los recorridos del agua son largos en las tuberías de diámetro pequeño (llamadas tuberías secundarias o tuberías de distribución), que es donde están conectados los usuarios y en donde importa saber si la concentración del desinfectante es suficiente.

Este trabajo presenta algunos resultados de un estudio patrocinado por la Comisión Nacional del Agua, y que se enfoca a la implementación y calibración de un modelo de calidad del agua en una ciudad grande (Culiacán, Sinaloa), incluyendo todas las tuberías en la red (de tres pulgadas y mayores). La terminación exitosa de este estudio da la pauta para la futura aplicación del modelo en la república, con los beneficios que eso genera para los organismos operadores del país (Alcocer *et al.*, 2002).

### **Beneficios de la implementación del modelo en una ciudad**

1. Permite analizar el comportamiento del desinfectante en la red.
2. Hace posible definir diferentes estrategias para garantizar la calidad del agua en la red.
3. Provee las herramientas para determinar la dosificación óptima de cloro en las fuentes y plantas,

y, en su caso, la necesidad de unidades auxiliares de inyección secundaria.

4. Identifica las partes potencialmente problemáticas de la red y las medidas a tomar para solucionar el problema.
5. Permite conocer la calidad del agua resultante de la mezcla de aguas de diversas fuentes de abastecimiento dentro de la red.
6. Puede usarse para investigar las causas en una baja de calidad del agua
7. Analiza el comportamiento de sustancias químicas en la red y, en caso de un posible accidente de contaminación, determina quiénes serían los usuarios afectados y el tiempo de transporte del contaminante. Lo anterior ayudará a los operadores a conocer el tiempo disponible para reaccionar e iniciar acciones correctivas.
8. Optimiza la ubicación de los puntos de muestreo de la calidad del agua en la red.
9. El modelo hidráulico que se implementa como parte del modelo de calidad del agua puede ser usado en otros proyectos, como sectorización de la red, establecimiento de distritos hidrométricos para control de pérdidas de agua potable, mejoras en la distribución y otros.
10. En general, proporciona un conocimiento detallado del funcionamiento hidráulico y de la calidad del agua en la red de distribución, lo cual, a su vez, repercute en otros beneficios provenientes de un mejor control y una operación más consciente.

### **Modelo numérico**

El modelo matemático de la calidad del agua en redes de agua potable se compone de dos submodelos: uno hidráulico, que calcula los gastos y las velocidades del flujo en los tramos en la red, y otro fisicoquímico (submodelo de calidad del agua propiamente), que calcula la concentración de la sustancia modelada en los puntos de la red, usando los resultados del modelo hidráulico. En el presente estudio, como submodelo hidráulico se utilizó el Sistema de Cómputo para el Análisis y Diseño de Redes (SCADRED®) del Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (Tzatchkov e Izurieta, 1996). El SCADRED® permite graficar la red de agua potable en el ambiente de AutoCAD®, introduciendo a la vez los datos de diámetros de tuberías, coeficientes de rugosidad, elevaciones de los nodos, dimensiones de tanques, bombes, dotación de agua potable (en l/hab.-día) y otros. Usando estos datos, el SCADRED® obtiene el gasto, la velocidad y la pérdida de carga en cada tubería de la red, así como la elevación piezométrica y la presión en cada nodo, para

los casos de flujo permanente y no permanente. En esta primera etapa del proyecto, el análisis se limitó a flujo permanente, correspondiente a la hora de máxima demanda en la red; en una segunda etapa se realizará el análisis de flujo no permanente (análisis dinámico).

Como submodelo de calidad del agua se implementó un nuevo módulo dentro del SCADRED®, basado en los métodos descritos en Tzatchkov y Arreguín (1996) de cálculo de la calidad del agua con flujo permanente. Este módulo consiste en lo siguiente (ilustración 1):

1. Introducción de datos. Se introducen por medio de dos archivos: nodos o cruces de concentración conocida (ilustración 2), y coeficientes de decaimiento (ilustración 3).

2. Simulación o corrida.
3. Visualización de resultados en archivos con tablas por tramos y por nodos (ilustración 4).

En la ilustración 4 se aprecia la concentración calculada con el modelo para cada nodo, la influencia que tiene la fuente ubicada en el nodo 8,000 sobre el consumo en los nodos, y los tiempos máximos, medios y mínimos de traslado del agua dentro de las tuberías, desde la fuente hasta cada nodo. El modelo obtiene una tabla para cada nodo con concentración conocida en la red.

### Sitio de aplicación del modelo

La zona seleccionada se ubica al norte de la ciudad de Culiacán, Sinaloa, que corresponde al sector II de la

Ilustración 1. Red de distribución de la zona norte digitalizada e incorporación del menú de calidad del agua dentro del sistema SCADRED®.

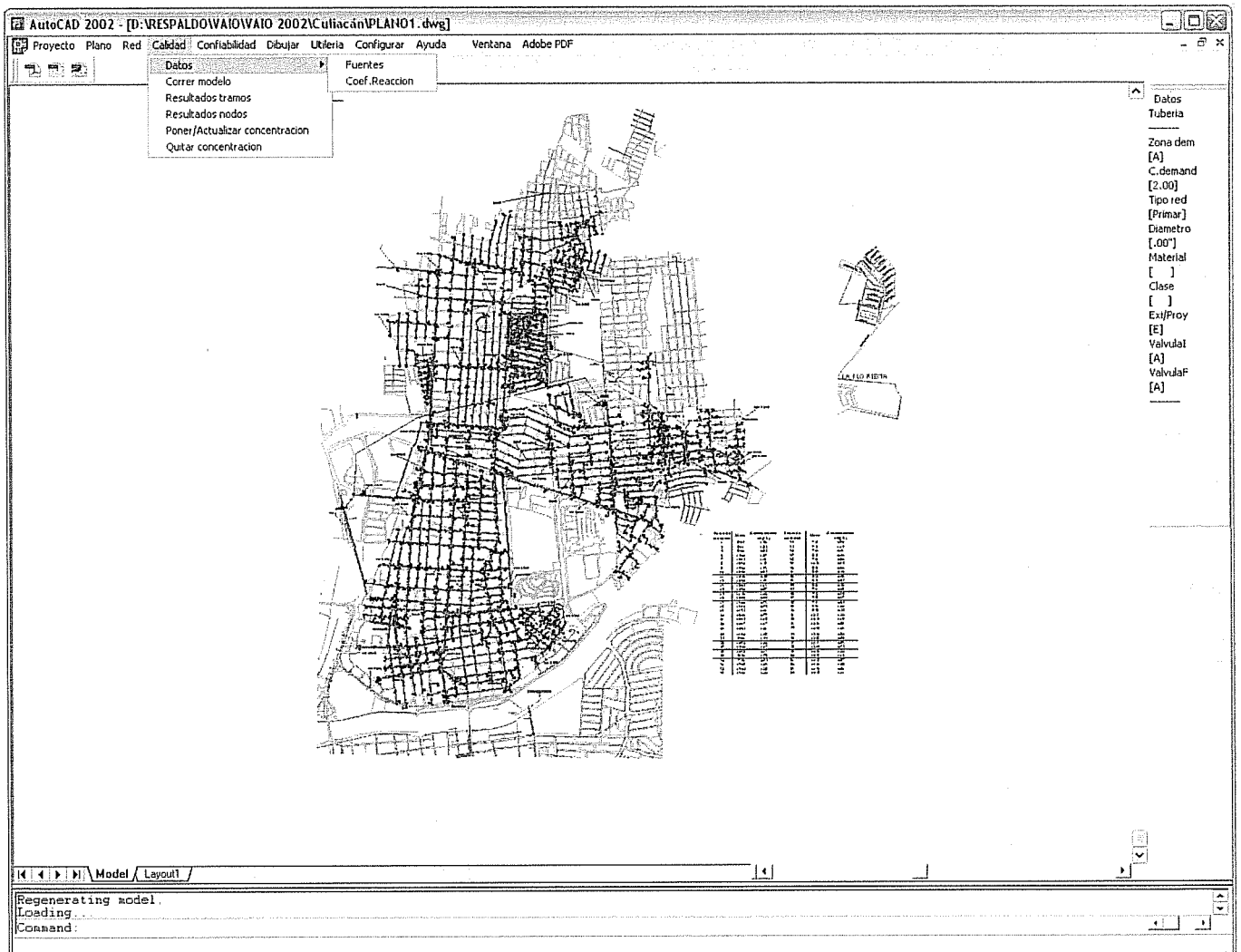


Ilustración 2. Contenido del archivo de concentración dada del nuevo módulo del SCADRED@.

Crucero	Concentración (mg/L)
8,000	1.67
3,004	1.65
8,011	1.42

misma (ilustración 5). Por su cercanía con el mar, la topografía del terreno presenta elevaciones entre los cuarenta y ochenta metros sobre el nivel del mar (msnm). La población de la zona actual es de 61,500 habitantes, aproximadamente, determinada con base en el número de tomas en la zona y el índice de hacinamiento por toma de 4.20 hab./toma (JAPAC, 2002).

Las principales fuentes de abastecimiento de la zona son las plantas potabilizadoras Isleta I y II, y una batería compuesta por ocho pozos. La estructura de regulación es el Tanque Zona Norte, ubicado sobre la cota 80.09, que tiene capacidad de 2,000 m<sup>3</sup> y una altura máxima de 6.30 m. La red de agua potable está seccionada en dos regiones: uno y dos, siendo el límite entre éstas la calle Universitarios. La región uno de la zona se abastece por la batería de ocho pozos y la dos, por dos plantas potabilizadoras.

La Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán (JAPAC) maneja puntos de monitoreo constante (llamadas ruta fija) de la concentración del cloro en la zona norte (ver cuadro 1 e ilustración 6).

### Modelación hidráulica

Para la construcción del modelo hidráulico se requirió de una gran cantidad de información. Parte de ésta fue

Ilustración 3. Contenido del archivo de coeficiente de reacción en las tuberías del nuevo módulo del SCADRED@.

Material	Diámetro (mm)	Diámetro (pulg.)	Clase	Coefficiente de decaimiento (1/hora)
"A.C."	200	8	"A-7"	0.0638
"A.C."	250	10	"A-7"	0.0638
"Acero"	500	20	"A-7"	0.0638
"Acero"	450	18	"A-7"	0.0638
"Acero"	350	14	"A-7"	0.0638
"P.V.C."	50	2	"RD26"	0.0638
"P.V.C."	100	4	"RD26"	0.0638
"P.V.C."	150	6	"RD26"	0.0638
"Válv."	250	10	"RedPr"	0.0638

proporcionada por la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, como se describe a continuación:

- Información general de la zona (población, consumo, ubicación de las fuentes de abastecimiento, etcétera).
- Planos digitales en AutoCAD® de la zona de estudio con el trazo de la red.
- Medición de gasto en fuentes de abastecimiento.
- Medición de cloro en puntos fijos.

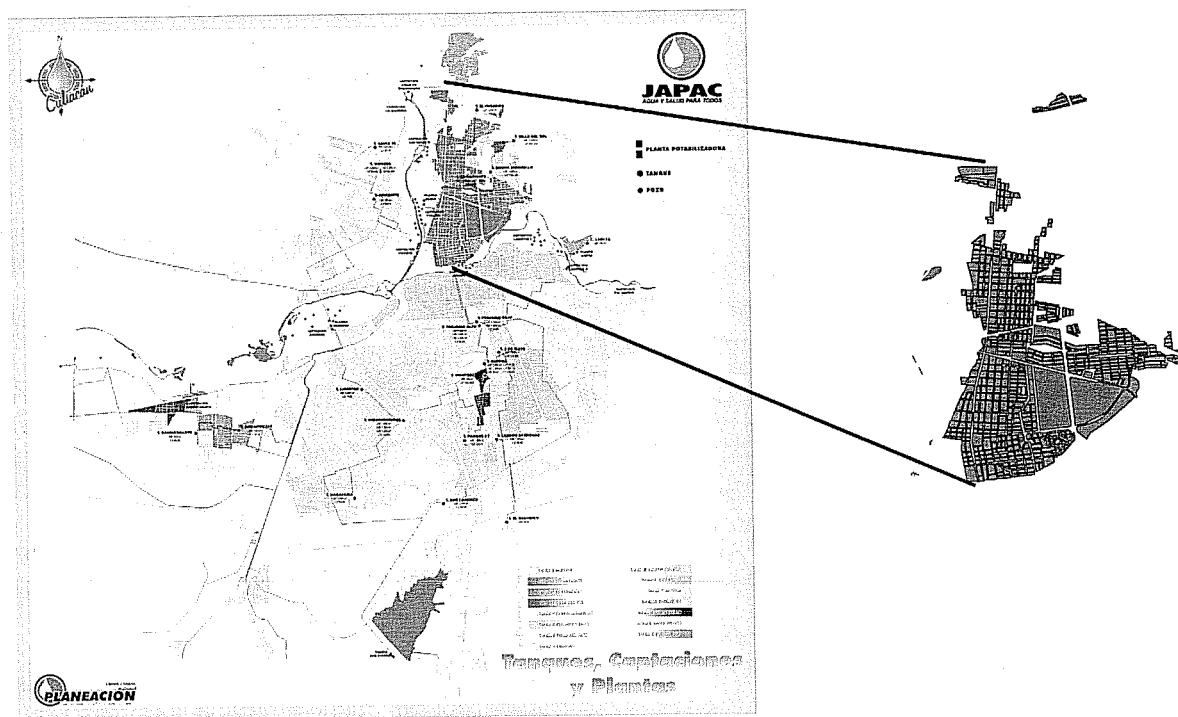
La zona norte se compone de 24 colonias, la Universidad Autónoma de Sinaloa y el Jardín Botánico, con un total de 14,643 tomas. Dentro de la zona no existe influencia industrial y la dotación que impera en el sitio se estima en 290 l/hab./día.

El trazo de la red de abastecimiento de agua potable y demás datos (elevación, población, demanda, coeficiente de rugosidad y otros) se introdujeron en el

Ilustración 4. Contenido del archivo de resultados para los nodos del nuevo módulo del SCADRED@.

Resultados para la fuente: nodo 8,000					
Nodo	Concentración (mg/L)	Influencia (%)	Tiempos de viaje		
			Máximo (h)	Mínimo (h)	Medio (h)
88	1.2	0.02	21.30		5.34
89	1.3	0.02	20.16		4.20
90	1.3	0.02	20.10		4.15
93	1.3	0.03	19.80		3.84
94	1.3	0.96	18.53		2.57

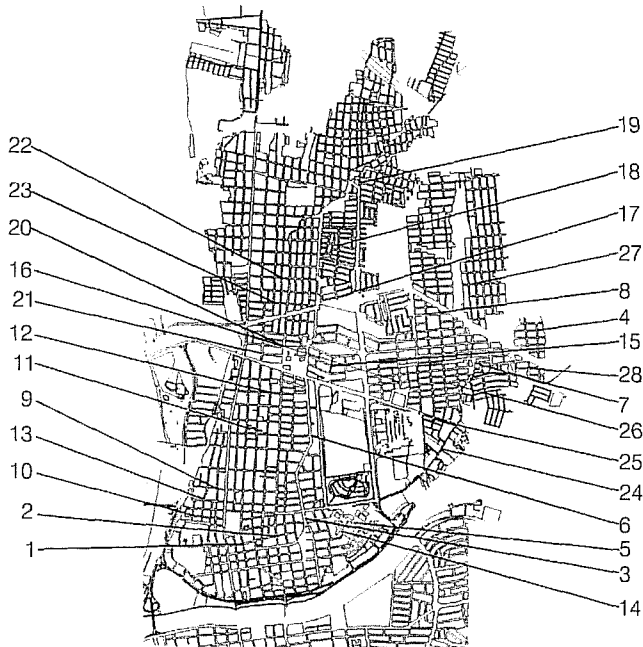
Ilustración 5. Ubicación de la zona norte de Culiacán, Sinaloa, sitio de aplicación del modelo de calidad del agua.



Cuadro 1. Monitoreo de cloro residual en puntos fijos, JAPAC, 2002.

Punto de muestreo	Colonia	Cloro residual medido	Punto de muestreo	Colonia	Cloro residual medido
1	Chapultepec	1.15	17	Pedregal	0.53
2		1.01			
3		0.75			
4	Col. Buena Vista	0.86	18	Lomas del Sol	0.58
5	Burócrata	0.25	19	Juan de Dios Bátiz	0.83
6		0.65			
7	Rubén Jaramillo	0.83	20	Ignacio Allende	0.85
8		1.25	21		0.96
9	Gabriel Leyva	1.01	22	6 de Enero	0.74
10		0.98	23		0.77
11	Tierra Blanca	0.95	24	La Lima	1.29
12		0.92			
13	Agricultores	0.93	25	Santa Margarita	1.05
14	Fovissste Chapultepec	0.45	26	Obrero Campesina	1.36
15	Villa Universidad	0.67	27	Rosario Uzarra	1.02
			28		1.07
16	Universitarios	0.71			

**Ilustración 6. Ubicación de los puntos de muestreo permanente realizado por la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, Sinaloa.**



programa de cómputo SCADRED® (ilustración 1). La red resultó con 1,503 nodos y 1,735 tramos, un tanque de regulación —zona norte— y tres fuentes de abastecimiento: batería de pozos y plantas potabilizadoras Isleta I y II.

### Calibración hidráulica

La calibración hidráulica del modelo consiste en ajustar los valores de los parámetros hidráulicos, con el objetivo de obtener una coincidencia satisfactoria entre los valores de las variables, producto de las simulaciones del modelo con los medidos en el sistema real. Para efectuar esta actividad se realiza lo siguiente:

1. Se proponen valores iniciales de los parámetros.
2. Se realiza una simulación con el modelo, considerando los parámetros del punto uno.
3. Se hacen mediciones en la red de distribución.
4. Se comparan los valores obtenidos en campo y gabinete, y en los casos en que las diferencias son importantes se modifican los parámetros de entrada del modelo (ver inciso uno).
5. Los incisos 2 al 4 se repiten hasta obtener una tolerancia aceptable.

Los parámetros que se calibran son los siguientes: demanda y coeficiente de cortante (fricción). Y los que se miden son gasto, presión y nivel del agua.

Durante el mes de octubre de 2002 se realizó una campaña de mediciones con personal de la JAPAC, a fin de calibrar el modelo hidráulico. Las actividades llevadas a cabo fueron las siguientes:

1. Recorridos en campo del sitio de aplicación del modelo (zona norte de la ciudad) para identificar los puntos de medición.
2. Medición de caudal en fuentes de abastecimiento y estructuras de regulación:
  - Tanque Zona Norte.
  - Complejo Isleta: batería de pozos y plantas potabilizadoras Isleta I y II.
  - Líneas de alimentación directa a la red de la zona norte.
3. Medición continua de presión en 18 diferentes puntos de la red de distribución, con una duración promedio de 12 horas (ilustraciones 7 y 8).

Los resultados obtenidos indican que las plantas potabilizadoras (fuentes de abastecimiento de la zona Isleta I y II) tienen una producción de 102 y 108 l/s, respectivamente; por su parte, la batería de pozos (ocho en total) mantiene un caudal total de 197 litros por segundo.

### Medición de la concentración del cloro en campo

#### Puntos de medición

Los puntos de medición de cloro se ubicaron en las siguientes fuentes de abastecimiento: plantas potabilizadoras Isleta I y II, batería de pozos y Tanque Zona Norte; en algunos tramos representativos con distintos diámetros y longitudes, así como en extremos y algunos puntos dentro de los circuitos, con un total de sesenta y cuatro (ilustración 9).

Vale la pena mencionar que las muestras de cloro se tomaron dentro de las casas, en cocinas o baños, en las áreas exteriores, y en las llaves de entrada, así como en válvulas en las fuentes de abastecimiento.

#### Equipo de medición

La determinación en campo del cloro residual se realizó con el apoyo de la JAPAC, con equipos portátiles de medición digital para cloro libre basados en la determinación colorimétrica (*Pocket Colorimeter*) con DPD.

Ilustración 7. Presiones en puntos 1 a 6 de la zona norte.

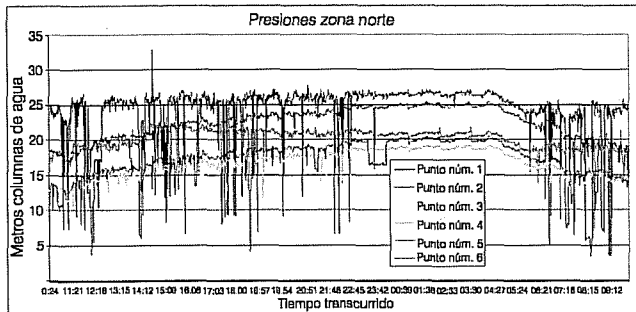
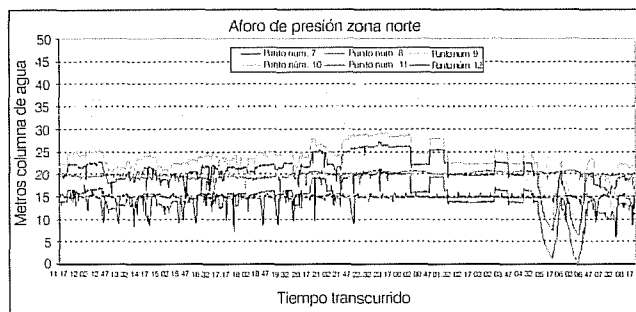


Ilustración 8. Presiones en puntos 7 a 12 de la zona norte.



### Medición de la reacción del cloro con el volumen de agua, coeficiente $k_a$

Para obtener la constante de reacción con el agua se utilizaron las 64 muestras. La metodología empleada consistió en tomar las muestras de agua, almacenándolas en frascos limpios, para posteriormente medir a diferentes intervalos de tiempo la concentración del cloro. Con el proceso anterior se obtienen las mediciones necesarias para determinar la reacción del cloro con el agua (se excluye la reacción con la pared del tubo). Después se procesan los datos de las mediciones a través de un programa de ajuste, con el objetivo de obtener una curva que represente el decaimiento de la sustancia (ilustración 10). El ajuste se realiza a través de la siguiente ecuación exponencial:

$$C = C_0 \cdot e^{-k_a t} \quad (1)$$

donde  $k_a$  es el coeficiente de reacción del cloro con el agua.

El coeficiente  $k_a$  se obtiene a partir de las curvas de cada uno de los 64 puntos de monitoreo. Los valores del coeficiente varían de 0.6931 a 0.0519 horas<sup>-1</sup>; asimismo,

la concentración del cloro decae hasta valores cercanos a cero en un promedio de 23.66 horas. Lo anterior es considerando todas las muestras, incluso aquellas en las cuales la concentración inicial es baja ( $> 0.20$  mg/l), donde ya se produjo la parte importante del decaimiento. En el cuadro 2 se presentan los resultados obtenidos para el punto de muestreo de la planta potabilizadora Isleta I, para diferentes tiempos de medición, los intervalos de lectura (diferencia), el tiempo acumulado de dichos intervalos, y la concentración medida y la ajustada a través del programa.

Para obtener una constante media representativa de reacción del cloro con el agua correspondiente a la zona de estudio, se consideraron aquellos puntos de monitoreo que presentan una concentración inicial alta, debido a que en este caso el cloro alcanza un desarrollo total representativo para el ajuste de la curva exponencial (Alcocer et al. 2002). Con lo anterior se obtiene la constante  $k_a = 0.09881$  horas<sup>-1</sup> para la zona de estudio. Este último valor es superior a los reportados por Rossman et al. (1994) [ $k_a = 0.0229$  horas<sup>-1</sup>] en Cherry Hill/Brushy Plains, Estados Unidos de América. Esto se debe a que la reacción está en función de las condiciones particulares de cada zona, como temperatura, contenido de materia orgánica, edad de las tuberías, operación del sistema y compuestos orgánicos, entre otros. Tzatchkov et al. (2004) presentan una manera alternativa para caracterizar el decaimiento del cloro por reacción con el agua, con el uso de dos constantes de decaimiento:  $k_1$  y  $k_2$ .

### Medición en tramos para determinar el coeficiente total de decaimiento $k$

El cloro decae también por reacción con la pared de las tuberías; para modelar el efecto conjunto de la reacción del cloro con el agua y la pared se utiliza un coeficiente total de decaimiento  $k$ . Para obtenerlo, se seleccionaron dos tramos de red primaria (sin tomas) de diámetro constante y se midió la concentración en los extremos de cada uno de ellos junto con el caudal. Las mediciones se realizaron en las tuberías que salen de las plantas potabilizadoras Isleta I y II. Los resultados obtenidos a partir de las mediciones se describen en el cuadro 4.

Aplicando la ecuación  $C = C_0 \cdot e^{-k \frac{L}{V}}$  que describe el decaimiento total, donde  $L$  es la longitud del tramo y  $V$  la velocidad del flujo, se obtienen los valores mostrados en el cuadro 4.

Comparado con la literatura, se obtienen valores del mismo orden de magnitud que los presentados por AWWARF (1996).



Ilustración 9. Ubicación de puntos de muestreo de cloro correspondientes a las regiones 1 y 2.

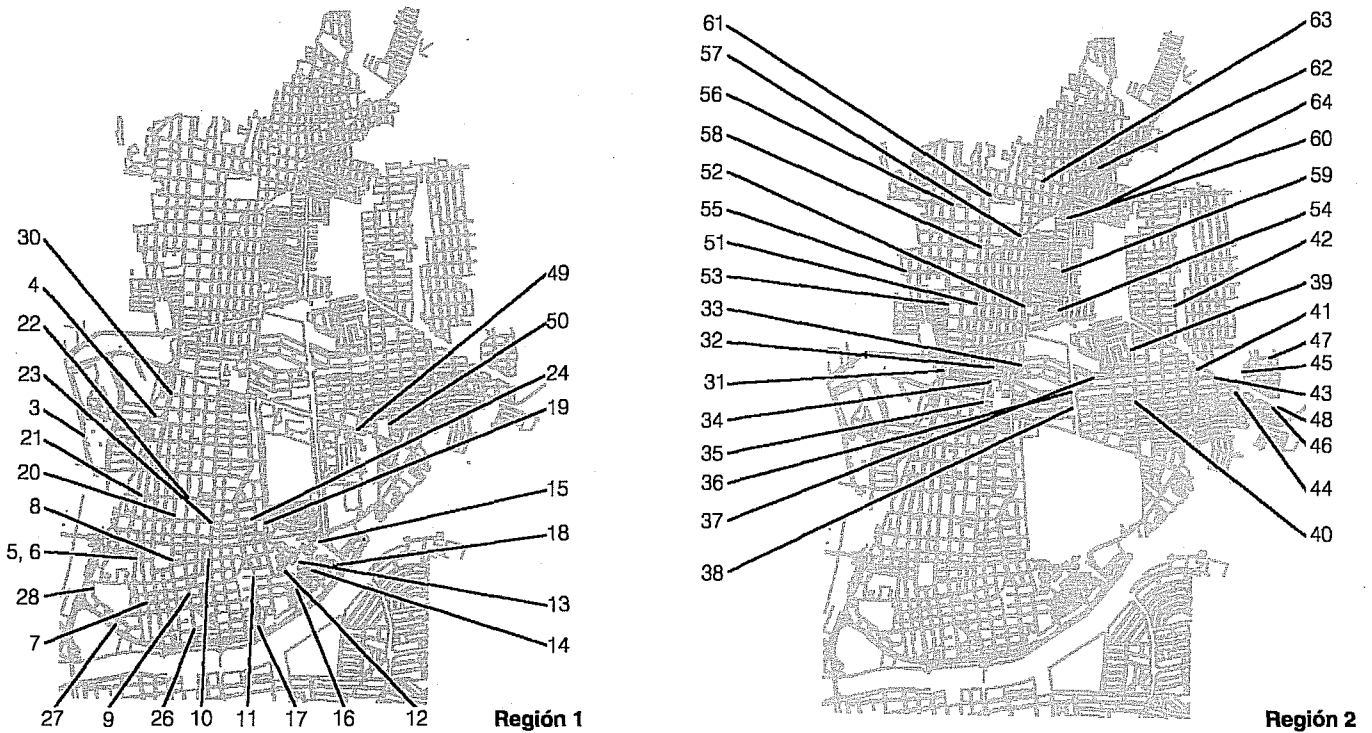
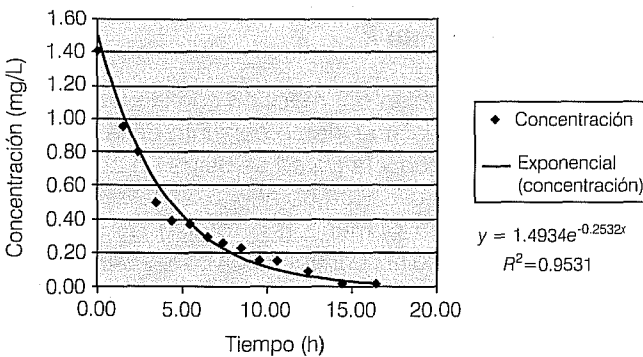


Ilustración 10. Curva de decaimiento de cloro en reacción con el agua para el punto 1.

$C_0 = 1.021$ ,  $k_d = 0.1229$



$$k_r = Sh \frac{D}{d} \quad (2)$$

donde:

$k_r$  = coeficiente de transferencia de masa.

$Sh$  = número de Sherwood.

$D$  = difusión molecular del cloro en el agua,  $D = 1.25 \times 10^{-9} \text{ m}^2/\text{s}$ .

$d$  = diámetro de la tubería.

El número de Sherwood se calcula de la forma siguiente:

$$Sh = 0.023 R^{0.83} Sc^{0.333} \quad \text{para } R > 2300 \quad (3)$$

### Cálculo de la reacción con la pared de la tubería

El coeficiente de transferencia de masa entre el flujo de agua y la pared,  $k_p$ , se obtiene a través del siguiente procedimiento (Tzatchkov, 1996):

Se calcula el coeficiente de transferencia de masa  $k_r$ , Edwards *et al.* (1976).

$$Sh = 3.65 + \frac{0.0668 (d/L)(R Sc)}{1 + 0.04 [(d/L)(R Sc)]^{2/3}} \quad \text{para } R < 2300 \quad (4)$$

siendo  $R$  el número de Reynolds y  $Sc$  el número de Schmidt:

Cuadro 2. Mediciones de concentración de cloro en el punto 1, planta potabilizadora Isleta I.

Potabilizadora "Isleta I"

Hora	Intervalo (h)	Tiempo desde el inicio (h)	Concentración (mg/L)	Concentración ajustada (mg/L)
08:05	00:00	0.00	1.42	1.02
09:35	01:30	1.50	0.96	0.85
10:30	00:55	2.42	0.81	0.76
11:30	01:00	3.42	0.50	0.67
12:30	01:00	4.42	0.40	0.59
13:30	01:00	5.42	0.37	0.52
14:30	03:00	8.42	0.30	0.36
15:30	03:00	11.42	0.26	0.25
16:30	03:00	14.42	0.23	0.17
17:40	03:00	17.42	0.16	0.12
18:40	03:00	20.42	0.16	0.08
20:30	03:00	23.42	0.09	0.06
22:30	03:00	26.42	0.02	0.04
00:30	03:00	29.42	0.02	0.03

Cuadro 3. Medición de concentración de cloro para obtener el coeficiente *k*.

Diámetro pulgadas	Caudal (L/s)	Velocidad (m/s)	C inicial (mg/L)	C final (mg/L)	Longitud (m)
16	199	1.5341	1.09	0.94	3,000
10	47	0.9276	2.00	1.89	1,000

Cuadro 4. Valores del coeficiente de decaimiento total del cloro *k*.

Diámetro pulgadas	<i>k</i> horas <sup>-1</sup>	día <sup>-1</sup>
16	0.2478	5.928
10	0.189	4.534

$$Sc = \frac{\nu}{D} \quad (5)$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática,  $\nu=1.01 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

Los cálculos anteriores se resumen en el cuadro 5.

Posteriormente se despeja el coeficiente de transferencia de masa entre el flujo de agua y la pared,  $k_p$ , de la ecuación siguiente:

$$k = k_a + \frac{k_p k_r}{r_{hi} (k_p + k_r)} \quad (6)$$

donde:

$k$  = coeficiente global de decaimiento. Éste considera los efectos producidos en el agua y la pared de la tubería.  
 $r_{hi}$  = radio hidráulico de la tubería.

Cabe recordar que el valor del coeficiente de reacción con el agua en este caso es  $k_a = 0.09881 \text{ horas}^{-1}$ . Por lo anterior, y apoyándose en los valores obtenidos de  $k$  (ver cuadro 5), se obtiene el coeficiente de reacción con las paredes de la tubería (ver cuadro 6).

Los valores anteriores obtenidos de  $k_p$ , comparados con 0.15 y 0.45 m/día, provenientes de la literatura clásica de Rossman *et al.* (1994), resultan ser del mismo orden de magnitud.

**Comparación de resultados de concentración de cloro (modelo versus medición)**

Comparando los resultados obtenidos por el modelo matemático y las mediciones en campo anteriormente mencionadas, se observa que en el 70.83% del total de los puntos se tienen diferencias en porcentaje menores

Cuadro 5. Valores del coeficiente de transferencia de masa  $k_{tr}$ .

Diámetro pulgadas	Número de Reynolds	$D$ (m <sup>2</sup> /s)	Número de Sherwood	$K_{tr}$ (m/s)
16	619126	0.003844	13697.53	0.00004213
10	233961	0.001452	6107.38	0.00003006

Cuadro 6. Valores del coeficiente de reacción con las paredes de la tubería,  $k_p$ .

Diámetro pulgadas	Radio hidráulico (m)	$k_{tr}$ (m/h)	$k$ horas	$k_a$ (m/día)	$k_p$ (m/día)
16	0.1016	0.1517	0.2478	2.3715	0.4140
10	0.0635	0.1082	0.1889	2.3715	0.1509

al 25%. Vale la pena mencionar que en la región uno de la zona de estudio se presenta mayor precisión, pues el 90% de los nodos presentan diferencias menores al 20%. Lo anterior corrobora que la calibración hidráulica es adecuada en esa zona de aplicación. En la ilustración 11 se presenta la comparación de los resultados entre las mediciones realizadas en campo y los valores obtenidos a partir del modelo SCADRED®.

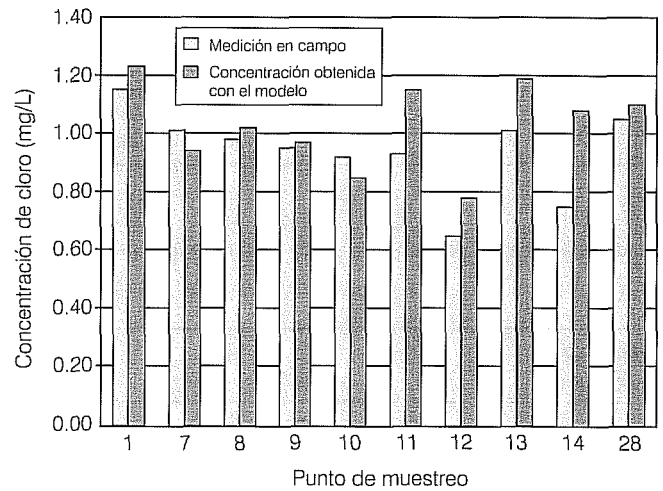
### Conclusiones

El modelo de calidad del agua propuesto es capaz de determinar la concentración de cloro aun en redes de distribución de gran tamaño, como el aplicado en la zona norte de Culiacán, Sinaloa.

Dentro del submodelo hidráulico se alcanzó una calibración de 77%, aproximadamente. La región uno presentó diferencias de presión menores de 1 mca en la mayoría de los puntos.

Por su parte, en el submodelo de calidad del agua, la constante de reacción del cloro con el agua fue de  $k_a = 0.09881$  horas<sup>-1</sup>; este valor es superior al reportado por Rossman *et al.* [ $k_a = 0.0229$  horas<sup>-1</sup>] en 1994. Lo anterior se debe a condiciones particulares de cada zona, como temperatura, edad de las tuberías, operación del sistema, contenido de compuestos orgánicos y otros. Con el monitoreo realizado se comprobó que existe un decaimiento notable en la zona de estudio. La concentración de cloro en las fuentes resulta cuatro o cinco veces mayor en comparación con los puntos más alejados.

Ilustración 11. Comparación de mediciones y el modelo matemático de calidad del agua en la zona de estudio de la ciudad de Culiacán.



La constante de reacción del cloro con la pared ( $k_p$ ) resultó de 0.4140 m/día y 0.1509 m/día en diámetros de tubería de 16 y 10 pulgadas, respectivamente. Estos valores resultan ser del mismo orden de magnitud que los reportados por Rossman *et al.* (1994).

Para el caso de la ciudad de Culiacán, los valores del coeficiente total de decaimiento  $k$  varían de 0.2478 a 0.189 horas<sup>-1</sup> que, comparados con la literatura, son similares a los presentados por AWWARF (1996). La precisión del modelo se afecta por un sinnúmero de factores, destacando dos de ellos: la confiabilidad del catastro de la red, la calibración hidráulica y de calidad del agua de

la red de distribución. Vale la pena mencionar que la simulación se realizó en estado permanente, razón por la cual se tienen imprecisiones cercanas al 25% en el total de los nodos. Sin embargo, confirma que la modelación en estado permanente tiene un porcentaje de confiabilidad alto y muestra una idea general de cantidad y calidad del agua dentro de la red de distribución. En la región uno del sitio de aplicación, la precisión en la concentración de cloro medida en campo, comparada con la obtenida a partir del modelo de calidad del agua, resultó del 90%, lo anterior se debe a la mejor calibración hidráulica realizada en el lugar. La dosis de cloro aplicada en las fuentes de abastecimiento alcanza a cubrir la zona de estudio; sólo en dos colonias se presentan concentraciones similares al límite mínimo establecido en la normatividad mexicana, por lo que en caso de existir nuevos asentamientos cercanos a las zonas mencionadas será necesario plantear y ubicar un punto alterno de dosificación de cloro o buscar otra solución.

## Agradecimientos

Se reconoce el apoyo de la Junta de Agua Potable y Alcantarillado de la ciudad de Culiacán (JAPAC), en especial a las siguientes personas: contador público Wilfredo Acosta Salazar (gerente general) e ingenieros Joel Félix Díaz, Rubén Darío Servín, Manuel Luna Fernández, Jaime Barreda Vidales, Abel Román López, Blas Reyes Zazueta, René Zambrano Meraz y Jorge Beltrán Palomares, así como al personal del laboratorio de Calidad del Agua, y a todo el personal de las Gerencias de Planeación y de Operación del propio organismo.

Recibido: 03/03/2003  
Aprobado: 08/01/2004

## Referencias

- ALCOCER Y., V.H., TZATCHKOV, V. FELICIANO G., D., MEJÍA M., E. y MARTÍNEZ O., E. *Implementación y calibración de un modelo de calidad del agua en sistemas de agua potable*. Informe técnico. Jiutepec, México: Comisión Nacional del Agua e Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 2002, 219 páginas.
- AWWARF. American Water Works Association Research Foundation. *Characterization and modeling of chlorine decay in distribution systems*. American Water Works Research Foundation, 1996.
- AWWARF y EPA. American Water Works Association Research Foundation. Environmental Protection Agency. Water quality modeling in distribution systems. *Conference proceedings*. Cincinnati, Ohio: American Water Works Research Foundation y Environmental Protection Agency, 4 y 5 de febrero de 1991.
- CHÁVEZ Z., C., FUENTES M., O.A. y OSNAYA, R.J. Modelo para obtener la concentración del cloro en las redes de tuberías. *Memorias del XVI Congreso Nacional de Hidráulica*. Colección Avances en Hidráulica 6. Morelia, Michoacán, México, 2000, pp. 265- 270.
- CHÁVEZ Z., C., OSNAYA, R.J., FUENTES M., G.E. Modelo para obtener la concentración del cloro en las redes de tuberías. *Memorias del XVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*. Vol. 1. Colección Avances en Hidráulica 1. Oaxaca, Oaxaca, México, 1998, pp. 873-882.
- CLARK, R., ROSSMAN, L. y WYMER, L. Modeling distribution system water quality: regulatory implications. *Journal of water resources planning and management*. Vol. 121, núm. 6, noviembre-diciembre, 1995, pp. 423-428.
- EDWARDS, D.K., DENNY, V.E. y MILLS, A.F. *Transport process*. New York: McGraw Hill, 1976.
- JAPAC. *Información proporcionada por las Gerencias de Planeación y Operación*. Junta de Agua Potable y Alcantarillado de Culiacán, 2002.
- OZDEMIR, O. y UCAK, A. Simulation of chlorine decay in drinking water distribution systems. *Journal of environmental engineering*. Vol. 128, núm. 1, enero, 2002, pp. 31-39.
- ROSSMAN, L., CLARK, R. y GRAYMAN, W. Modeling chlorine residuals in drinking-water distribution systems. *Journal of environmental engineering ASCE*. Vol. 120, núm. 4, julio-agosto, 1994, pp. 803-820.
- TZATCHKOV, V., ARREGUÍN C., F.I., BONILLA T., R.C. y OSNAYA B., X. *Modelo de simulación de la calidad del agua en redes de distribución*. Informe técnico. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, 1994.
- TZATCHKOV, V., Modelo numérico del decaimiento del cloro en redes de agua potable con flujo no permanente. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 3, septiembre-diciembre de 1996, pp. 53-60.
- TZATCHKOV, V. y ARREGUÍN C., F.I. Modelo de calidad del agua en redes de distribución con flujo permanente. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 1, enero-abril de 1996, pp. 61-70.
- TZATCHKOV, V., ALDAMA R., A.A. y ARREGUÍN C., F.I. Modelación numérica de la advección y dispersión de solutos en redes de distribución de agua potable. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XV, núm. 3, septiembre-diciembre de 2000, pp. 101-115.
- TZATCHKOV, V., ALDAMA R., A.A. y ARREGUÍN C., F.I. Advection-dispersion-reaction modeling in water distribution networks. *Journal of water resources planning and management*. ASCE, septiembre-octubre de 2002, pp. 334-342.
- TZATCHKOV, V. e IZURIETA D., J.L. Sistema de cómputo para el análisis y diseño óptimo de redes de

distribución de agua potable. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XI, núm. 2, enero-abril de 1996, pp. 55-63.

TZATCHKOV, V., ALCOCER Y., V.H. y ARREGUÍN C., F.I. Decaimiento del cloro por reacción con el agua en redes

de distribución. *Ingeniería hidráulica en México*. Vol. XIX, núm. 1, enero-marzo de 2004, pp. 41-51.

VASCONCELOS, J., ROSSMAN, L., GRAYMAN, W., BOULUS, P., CLARK, R. *Kinetics of chlorine decay*. Journal AWWA. Vol. 89, Issue 7, 1997, pp. 54-65.

#### Abstract

ALCOCER-YAMANAKA, V.H., TZATCHKOV, V. & ARREGUÍN-CORTÉS, F.I. *Distribution network water quality model*. Hydraulic engineering in Mexico (in Spanish). Vol. XIX, no. 2, April-June, 2004, pp. 77-88.

The implementation and calibration of a distribution network water quality model in a city is presented. For the first time in Mexico, the model includes all network pipes (3 inches in diameter and larger). The model application was carried out in the northern zone of Culiacán, Sin., with a population of 61,500. The network layout and other relevant data were introduced in the SCADRED® computer system of the Mexican Institute of Water Technology (IMTA). The flow at the supply sources and the pressure at 18 points in the network were measured during 12 hours. In order to calibrate the water quality model, samples were taken from 64 different network points, obtaining the first-order bulk flow chlorine reaction rate constant  $k_a = 0.09881 \text{ hour}^{-1}$ . The first-order pipe wall chlorine reaction rate constant  $k_p$  was also determined, resulting in  $k_p = 0.4140 \text{ m/day}$  for 16-inch-diameter pipes and  $k_p = 0.1509 \text{ m/day}$  for 10-inch-diameter pipes. This way, for Culiacán, Sin., the total chlorine decay coefficient  $k$  value was obtained as 0.2478 to 0.189  $\text{hour}^{-1}$ . For 70.83% of the points measured, the difference between the model predictions and the field measurements is less than 25%. In the southern region of the model's application site, this difference is less than 20% for 90% of the points.

**Keywords:** water quality models, drinking water distribution networks, chlorine decay, model calibration, chlorine disinfection, simulation, computer programs, chlorine reaction.

#### Dirección institucional de los autores:

M. en I. Víctor H. Alcocer-Yamanaka  
Dr. Velitchko Tzatchkov

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua,  
Coordinación de Tecnología Hidráulica,  
Paseo Cuauhnáhuac 8532,  
colonia Progreso,  
62550 Jiutepec, Morelos, México,  
teléfono: + (52) (777) 329 3600, extensiones 206 y 898,  
valcocer@tlaloc.imta.mx, velitchk@tlaloc.imta.mx.

Dr. Felipe I. Arreguín-Cortés

Comisión Nacional del Agua,  
Avenida Insurgentes Sur 2140, 1er. piso,  
Colonia Chimalistac, Delegación Álvaro Obregón,  
CP 01070 México, D.F.,  
teléfono: + (52) (55) 5481 4280,  
felipe.arreguin@cna.gob.mx.