

**DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO  
RESIDUAL ENTRE LA RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE  
DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS**

**BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHÁN**

**Asesor:**

**Ing. JUAN SALDARRIAGA**



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
Bogotá D.C.  
Enero 2002**



## TABLA DE CONTENIDO

<b>CAPÍTULO 1</b>	<b>INTRODUCCION</b>	<b>4</b>
<b>CAPÍTULO 2</b>	<b>OBJETIVOS</b>	<b>6</b>
2.1	OBJETIVO GENERAL	6
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	6
<b>CAPÍTULO 3</b>	<b>ANTECEDENTES</b>	<b>7</b>
<b>CAPÍTULO 4</b>	<b>MARCO TEÓRICO</b>	<b>9</b>
4.1	PROCESO DE DESINFECCIÓN	9
4.1.1	<i>Velocidad de la Desinfección</i>	9
4.1.2	<i>Factores determinantes en el proceso de desinfección</i>	11
4.1.3	<i>Desinfección del Agua con Coro</i>	12
4.2	DESCRIPCIÓN GENERAL DE LOS SISTEMAS DE CAPTACIÓN, ALMACENAMIENTO Y DISTRIBUCIÓN DE AGUA EN BOGOTÁ	16
4.2.1	<i>Plantas de Tratamiento Abastecedoras</i>	16
4.3	SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	18
<b>CAPÍTULO 5</b>	<b>METODOLOGÍA DE MEDICIÓN DEL CLORO RESIDUAL LIBRE EN EL AGUA</b>	<b>19</b>
5.1	SELECCIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO PARA CLORO RESIDUAL	19
5.2	MUESTREO Y ALMACENAMIENTO	20
5.3	MÉTODOS DE ANÁLISIS	20
5.3.1	<i>Método Yodométrico I</i>	20
5.3.2	<i>Método Amperométrico de Titulación</i>	22
5.3.3	<i>Método Amperométrico de titulación de bajo nivel</i>	23
5.3.4	<i>Método Titulométrico de la DFD ferrosa</i>	23
5.3.5	<i>Método Colorimétrico de la DFD</i>	24
5.3.6	<i>Método de la Siringaldacina</i>	25
5.3.7	<i>Técnica yodométrica del electrodo</i>	25
5.4	ESCOGENCIA DEL MÉTODO DE ANÁLISIS	26
<b>CAPÍTULO 6</b>	<b>DESCRIPCIÓN DEL PROCEDIMIENTO DE MUESTREO</b>	<b>28</b>



---

6.1	ESCOGENCIA DE PUNTOS DE MEDICIÓN _____	28
6.2	DESCRIPCIÓN DEL MÉTODO DE MUESTREO _____	31
<b>CAPÍTULO 7 MODELACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO _____</b>		<b>33</b>
<b>CAPÍTULO 8 ANÁLISIS DE VARIABLES _____</b>		<b>36</b>
8.1	DEFINICIÓN DE VARIABLES _____	36
8.1.1	<i>Edad de los Tanques</i> _____	38
8.1.2	<i>Frecuencia de Lavado</i> _____	39
8.1.3	<i>Material de construcción de los Tanques</i> _____	40
8.1.4	<i>Tiempo de Retención Hidráulica</i> _____	41
8.1.5	<i>Otras Variables</i> _____	43
8.2	ANÁLISIS ESTADÍSTICO DE VARIABLES _____	44
8.2.1	<i>Estadística descriptiva</i> _____	44
8.2.2	<i>Gráficas cruzadas</i> _____	45
8.2.3	<i>Análisis de Correlación de Variables</i> _____	47
8.2.4	<i>Análisis de la Regresión</i> _____	48
<b>CAPÍTULO 9 RESULTADOS DE MEDICIONES DE CLORO RESIDUAL EN BOGOTA _____</b>		<b>51</b>
9.1	DISTRIBUCIÓN DE CLORO SEGÚN E.A.A.B. _____	51
9.2	COMPARACIÓN VALORES E.A.A.B. CON VALORES OBTENIDOS EN LA RED DE DISTRIBUCIÓN ANTES DE LOS TANQUES _____	55
9.3	VALORES DE CONCENTRACIONES DE CLORO DESPUÉS DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO 57	
<b>CAPÍTULO 10 CONCLUSIONES _____</b>		<b>58</b>
<b>REFERENCIAS _____</b>		<b>60</b>
<b>ANEXO 1 - FIGURAS _____</b>		<b>62</b>
<b>ANEXO 2 - TABLAS _____</b>		<b>78</b>
<b>ANEXO 3 - IMÁGENES _____</b>		<b>91</b>
<b>ANEXO 4 - PLANOS _____</b>		<b>95</b>



---

## **Capítulo 1      INTRODUCCION**

---

El cloro es utilizado como una herramienta en la desinfección del agua, cualquier cambio en su grado óptimo de concentración facilita la aparición de patógenos que deterioran la calidad del agua potable.

Hoy en día la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá mantiene un fuerte monitoreo de las variaciones del cloro residual presente en la red como una medida de control de calidad destinada al bienestar del usuario, pero lo cierto es que muchos usuarios no toman el agua directamente de la red de distribución, por lo que en muchas ocasiones, dicho control resulta insuficiente para garantizar la calidad del agua es imposible.

El uso de tanques de almacenamiento domiciliarios es una de las principales razones del deterioro de la calidad del agua, al igual que la contaminación producida por grietas en los tubos de la red y las rupturas en las juntas. En Bogotá, los tanques de almacenamiento domiciliarios tienen dos usos: el primero y más frecuente es el de tanque de almacenamiento y posterior bombeo del agua a pisos superiores, esto se debe a las bajas presiones que se manejan en ciertos sitios de la red y a las construcciones de varios pisos.

El segundo uso es el de tanque de reserva, el agua solo se utiliza cuando existe una suspensión en el suministro de la red distrital, 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. Es de suponer que los tiempos de retención del agua en dichos tanques pueden llegar a ser muy altos, lo cual genera una disminución en las concentraciones de cloro residual, el cual ya para este momento ha variado su concentración con respecto a la concentración inicial existente en la planta de tratamiento. Esta sola condición provocaría graves consecuencias para la salud de los usuarios.



Los tanques de almacenamiento domiciliarios son considerados seguros, algunas personas podrían afirmar que la calidad del agua no varía si se encuentra aislada de cualquier agente contaminante, lo cierto es, que los tanques se pueden ver afectados por factores externos que deterioran directamente la calidad del agua que consumimos.

Esta investigación pretende mostrar un análisis técnico de las variaciones del cloro residual presente en el agua, producidas por los tanques de almacenamiento domiciliarios, con relación a mediciones de éste en la red de distribución distrital y posibles factores presentes en los tanques que puedan ser considerados fuente de contaminación y en consecuencia afecten directamente la calidad del agua y por ende la salud de todos los usuarios de la red.



---

## **Capítulo 2      OBJETIVOS**

---

### **2.1    *Objetivo General***

---

Realizar una evaluación de los cambios en la calidad del agua generados en los tanques de almacenamiento domiciliarios, mediante la comparación de las variaciones que ocurren entre el contenido de cloro residual en la red de distribución antes del tanque y el contenido de cloro residual en el agua después del tanque, es decir, la red de distribución interna de los usuarios. A su vez, se quiere establecer posibles soluciones a dichas variaciones para reducir la posibilidad de crecimiento de patógenos que eventualmente puedan afectar la salud de los usuarios.

### **2.2    *Objetivos Específicos***

---

- Realizar un inventario de los diferentes tipos de tanques de almacenamiento utilizados en Bogotá, y sus características.
- Realizar un diagnóstico sobre el estado físico de los tanques de almacenamiento de agua potable en la ciudad.
- Determinar la distribución del cloro residual en la red matriz de agua potable de Bogotá.
- Encontrar la relación entre la variación del cloro residual y el tiempo de retención del agua en los tanques.
- Identificar los diferentes factores que generan las variaciones del cloro en los tanques, y a su vez, proponer diversas soluciones para evitar el deterioro en la calidad del agua.
- Comparar las mediciones de cloro residual realizadas sobre la red de distribución y las mediciones de cloro realizadas por la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, esto con el fin de verificar su veracidad.



---

## **Capítulo 3      ANTECEDENTES**

---

En la Universidad de los Andes se han desarrollado varias tesis enfocadas al mejoramiento de las condiciones del agua potable; éstas han estado destinadas a la creación de soluciones y medidas de contingencia que provean mayor facilidad de control sobre la red de distribución.

Estas tesis son las siguientes:

- Optimización del cloro residual en la red de acueducto de Bogotá. 2001.
- Localización de fuentes contaminantes en redes de agua potable. 1999.
- Modelación de Cloro residual y de la propagación de contaminantes en redes de distribución. 1996.

En lo referente a tanques de almacenamiento domiciliarios, no se ha realizado ningún trabajo específico en la universidad. No se ha analizado el comportamiento del cloro residual cuando el agua pasa de la red al tanque, quedando totalmente aislada. Se realizó una tesis en 1995: "Evaluación de sistemas para el almacenamiento de agua potable en zonas rurales y manual de diseño y construcción de tanques en mampostería" pero el tema no corresponde específicamente a lo que se busca con este trabajo.

La Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá ha presentado una serie de documentos en los cuales se sugiere a los usuarios la mejor forma de realizar un buen mantenimiento de los tanques de almacenamiento con el fin de evitar cualquier tipo de contaminación en el agua que genere una reducción de la concentración de cloro residual y en consecuencias graves para la salud de los usuarios. Se explican temas acerca de cómo mantener el agua pura, causas de contaminación en tanques de almacenamiento, aunque de una manera no específica, y también, se explica cómo realizar limpiezas adecuadas en los tanques.



El Decreto 475 de 1998, por el cual se expiden las normas técnicas de calidad de agua potable, presenta en los artículos 9, 10, 20, 21, 22 y 23, normas que se relacionan directamente con el presente trabajo, en general, se presentan todos los requerimientos concernientes al buen mantenimiento de las condiciones sanitarias óptimas del agua potable.



---

## **Capítulo 4      MARCO TEÓRICO**

---

Para determinar las causas del decaimiento de la calidad del agua en los tanques de almacenamiento domiciliarios es necesario tener en cuenta los factores que intervienen en el proceso de purificación del agua y su distribución, haciendo énfasis en la desinfección inicial de ésta y en el mantenimiento 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 localizadas justo antes de los sitios de consumo.

### **4.1      *Proceso de Desinfección***

---

El proceso de desinfección está diseñado para la reducción aleatoria de un número de microorganismos patógenos. Algunos otros procesos en el tratamiento de agua, como filtración, coagulación, floculación, y sedimentación, pueden remover patógenos, pero esa no es su función principal.

#### **4.1.1      *Velocidad de la Desinfección***

El proceso de desinfección del agua no es instantáneo sino que se realiza progresivamente, con más o menos velocidad a través del tiempo. El proceso se considera terminado cuando el 100% de los organismos que se tratan de destruir han muerto. La forma como este proceso se realiza puede describirse matemáticamente, considerando que se trata de una reacción de primer orden y que por tanto el número de organismos destruidos en la unidad de tiempo es proporcional al número de organismos remanentes en el tiempo  $t$  considerado. En otras palabras, si  $n$  es el número de organismos y  $K$  la velocidad de reacción la explica la ecuación:



$$\frac{-dn}{dt} = Kn$$

Esta es la ley de Chick.

Integrando el primer término de esta expresión entre  $n$  (número de organismos en el tiempo  $t=0$ ) y  $n$  (número de organismos en el tiempo  $t=t$ ) y el segundo, entre  $t=0$  y  $t=t$ , se obtiene:

$$\int_{n_0}^n \frac{dn}{n} = -K \int_0^t dt$$

$$\log n - \log n_0 = -Kt$$

$$\frac{n}{n_0} = e^{-Kt}$$

Si se toman logaritmos:

$$t = \frac{-2.303}{K} \log \frac{n}{n_0}$$

Por tanto, según este modelo, el tiempo necesario para matar un determinado tipo de organismos con un desinfectante es directamente proporcional al logaritmo de la relación de organismos remanente ( $n$ ) sobre organismos iniciales ( $n_0$ ).

Sin embargo, no siempre el proceso de destrucción de microorganismos es una reacción de primer orden, y por tanto, se presentan frecuentemente desviaciones en la ley de Chick. Por ejemplo, la eliminación de quistes de *E. histolítica* con cloro libre y yodo, tiene una cinética de primer orden, pero la supervivencia de bacterias entéricas, así como de algunos virus no sigue dicho comportamiento, pues la tasa de destrucción ( $\log n/n_0$ ) aumenta o disminuye con el tiempo debido a diferentes factores como presencia de otras sustancias, errores experimentales, entre otros. Por tanto, la Ley de Chick tiene más que todo valor de referencia para evaluar el comportamiento de un determinado proceso de desinfección, donde se conoce  $n/n_0$  y se requiere calcular la constante de desinfección ( $k$ ).



## 4.1.2 Factores determinantes en el proceso de desinfección

### 4.1.2.1 Relación Concentración – Tiempo

La eficiencia de la reacción depende de la relación entre el tiempo de contacto y la cantidad de desinfectante dosificado. Según el tipo de desinfectante decrecerá más o menos rápidamente el poder bactericida, a medida que se va disminuyendo la concentración. Para encontrar el tiempo de contacto  $t$  necesario para matar un determinado número de organismos se utiliza la expresión de Watson:

$$t = \frac{K}{C^n}$$

$k$  = constante de la desinfección

$C$  = concentración del desinfectante en mg/l

$n$  = coeficiente que expresa la eficiencia del bactericida del desinfectante (coeficiente de disolución).

### 4.1.2.2 Temperatura

Dado que las bacterias pueden vivir sólo a determinadas temperaturas, es lógico que la desinfección sea afectada por este factor. Las altas temperaturas en el agua, generan mayor eficiencia y rapidez en el proceso de desinfección, lo que produce un mayor  $K$ .

La siguiente ecuación relaciona la constante de desinfección con la temperatura:

$$K = K_{20}(1 + \theta)^{T-20}$$

$K$  = constante de desinfección a  $T^{\circ}\text{C}$ .

$K_{20}$  = Constante a  $20^{\circ}\text{C}$ .

$T$  = temperatura en  $^{\circ}\text{C}$ .

$\theta$  = factor que varía entre 0.06 y 0.08.



#### **4.1.2.3 Potencial Hidrógeno - pH**

Así como la temperatura, el pH es determinante en las bacterias, ya que éstas son altamente susceptibles a este. Potenciales muy altos o muy bajos pueden resultar fatales por lo que el pH óptimo de los organismos se encuentra alrededor de 7. el pH del agua también es decisivo en la eficiencia de los desinfectantes, ya que la mayoría de estos poseen rangos de pH para los cuales se logra la máxima efectividad bactericida.

#### **4.1.2.4 Número y Tipo de Organismos**

El número de organismos no es relevante en el proceso de desinfección si el pH y la temperatura se mantienen iguales. Por otro lado, el tipo de organismo si influye en el proceso, ya que cada organismo tiene características propias que lo hacen más o menos vulnerable a determinado desinfectante.

#### **4.1.3 Desinfección del Agua con Cloro**

La cloración es el proceso de desinfección que reúne mayores ventajas: es eficiente, fácil de aplicar y deja efecto residual que se puede medir por dos sistemas muy simples y al alcance de todos.<sup>1</sup> Tiene la desventaja de ser corrosivo y especialmente, en algunos casos, formar subproductos posiblemente peligrosos para la salud y producir un sabor desagradable en el agua<sup>2</sup>.

El cloro y sus compuestos son usados en el proceso de desinfección en forma de gas comprimido bajo presión o disueltos en agua, soluciones de hipoclorito de sodio o hipoclorito de calcio. Las tres formas son equivalentes químicamente debido al equilibrio que existe entre gas molecular disuelto y los productos disociados de los compuestos de hipoclorito.

---

<sup>1</sup> JORGE ARBOLEDA VALENCIA. Teoría y Práctica de la purificación del agua TOMO 2. Tercera Edición.

<sup>2</sup> AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. Water quality and Treatment. Fourth Edition.



#### 4.1.3.1 Características físicas del cloro

En la Tabla 4-1 se presentan algunas de las características del cloro libre y algunos de sus compuestos:

SÍMBOLO O FÓRMULA	Cl <sub>2</sub>	Cl <sub>2</sub>	NaOCl	Ca(OCl) <sub>2</sub>
Peso molecular (gr)	70,9	70,9	74,45	142,99
Estado	Gas	Líquido	Líquido	Granular
Color	Verde	Verde	Amarillo	Amarillo
Peso específico (aire=1, agua=1)	2.48 0°C	1.41 (20°C)	1,2	0,8
Punto de Congelación		-100,98		
Punto de licuefacción (ebullición)	-34.5°C(1 at)	-35.5°C(1 at)		
Cloro disponible	99,80%	99,80%	12 - 15 %	70%
Forma de empaque		Cilindros de 100, 150 y 2000lb	Barriles	Barriles, sacos
Materiales que resisten el ataque	Seco: hierro negro, cobre y acero. Húmedo: vidrio, plata, caucho.	Seco: hierro negro, cobre y acero. Húmedo: PVC, teflón, polietileno.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.	Cerámica, vidrio, plástico o caucho.

Tabla 4-1 Características del Cloro

#### 4.1.3.2 Reacciones del Cloro en agua

La química de la cloración es bastante; al agregar cloro al agua, lo primero que ocurre es que este se hidroliza reaccionando con el H<sub>2</sub>O, luego se combina con el amoníaco presente y con la materia orgánica, así como con ciertas sustancias químicas para producir una gran diversidad de compuestos, algunos de los cuales tienen propiedades desinfectantes y otros no. Se pueden considerar reacciones de hidrólisis y de oxido-reducción.

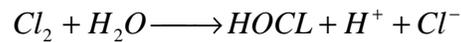


## **Reacciones Hidrolíticas:**

En la hidrólisis el cloro reacciona con la molécula de agua para producir ácido hipocloroso (HOCL) e ion hipoclorito (OCL). A estos compuestos se les llama cloro libre.

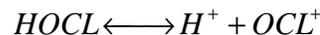
El cloro residual se forma en dos etapas:

1. Hidrólisis, que se efectúa en fracciones de segundo:



$$K_H = \frac{[H^+][HOCL][Cl^-]}{Cl_2(aq)}$$

2. Disociación, en que el ácido hipocloroso, inestable parcialmente, se ioniza así:



Queda entonces en el agua parte del cloro residual como HOCL y otra como OCL<sup>-</sup> que resulta de la ionización del ácido hipocloroso. La proporción en que existe uno y otro depende directamente del pH y tiene mucha importancia por cuanto el HOCL es un bactericida poderoso, mientras que el OCL<sup>-</sup> es un bactericida muy pobre.

$$K_a = \frac{[H^+][OCL^-]}{[HOCL]}$$

El cloro libre total es igual a:



$$Ct = (HOCL) + (OCL^-)$$

Reemplazando en la fórmula anterior tenemos:



$$Ct = (HOCL) * \left(1 + \frac{ka}{H^+}\right)$$

Tomándose como valor típico para pKa, o  $-\log Ka$  de 7,6.

### **Reacciones de Oxido-Reducción:**

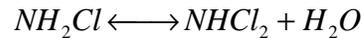
Como el cloro es un fuerte oxidante puede reaccionar con muchas sustancias orgánicas e inorgánicas presentes en el agua y en especial con los compuestos nitrogenados.

En esta serie de reacciones, el cloro puede perder o ganar electrones, y según suceda una u otra cosa, los productos que se forman son utilizables como desinfectantes o no.

El cloro reacciona con nitrógeno amoniacal para formar cloraminas. Las más frecuentes son las monocloraminas ( $NH_2Cl$ ) y dicloraminas ( $NHCl_2$ ). Ambas tienen poco poder bactericida, menos al del ácido hipocloroso, pero en cambio son mucho más estables y por lo tanto su efecto dura más tiempo en el agua. En ciertas condiciones puede aparecer tricloruro de nitrógeno o tricloramina. Las cloraminas son tóxicas para los peces y pueden ser perjudiciales para algunas personas, por ejemplo, para pacientes en diálisis.

Las reacciones serían las siguientes:

A partir de la monocloramina se forma la dicloramina así:



Y a partir de la dicloramina se forma la tricloramina sí:



La distribución en el agua entre uno y otro tipo de cloramina depende del pH, de la temperatura y de la proporción que existe entre el cloro y el amoníaco expresado como nitrógeno.

## **4.2 Descripción general de los sistemas de Captación, Almacenamiento y Distribución de Agua en Bogotá**

---

### **4.2.1 Plantas de Tratamiento Abastecedoras**

La Red de distribución de agua potable deriva el agua de cuatro fuentes principales de abastecimiento:

#### **4.2.1.1 Sistema Chingaza**

Está ubicado sobre la cordillera oriental, 50 Km. al Oriente de Santa Fe de Bogotá, y está compuesto por:

- a. El embalse de Chuza de 250 millones de metros cúbicos de capacidad.
- b. Las conducciones del agua cruda que se dividen en los túneles a presión y a flujo libre en una longitud total de 32 kilómetros.
- c. La tubería de Simaya que tiene una longitud de 4.5 kilómetros, hasta su entrega en la Planta Francisco Wiesner a través del sifón del Teusacá.



El sistema fue construido para aportar un caudal de 14 metros cúbicos por segundo. En la actualidad, este sistema está complementado por el Sistema de Bombeo San Rafael inaugurado en diciembre de 1996 y que tiene una capacidad instalada de suministro de 20 metros cúbicos por segundo. El Sistema de Bombeo San Rafael es la alternativa de servicio a la ciudad cuando, por efecto de mantenimientos a los túneles del Sistema Chingaza o cuando se presenten situaciones de emergencia en dichos túneles sea necesario suspender el servicio.

Estos dos sistemas surten la Planta Francisco Wiesner cuya capacidad actual de tratamiento es de 14 metros cúbicos por segundo.

#### **4.2.1.2 Sistema Vitelma**

Este sistema de abastecimiento está ubicado al sur oriente de Santa Fe de Bogotá y está compuesto por los embalses Los Tunjos, Chisacá y La Regadera, con una capacidad agregada de almacenamiento de 11.1 millones de metros cúbicos, las conducciones La Regadera - Vitelma y la tubería del río San Cristóbal. Y las plantas de tratamiento de Vitelma y la Laguna.

La producción máxima de este sistema es de 1.35 metros cúbicos por segundo para abastecer la franja sur y oriental de la ciudad.

#### **4.2.1.3 Sistema Tibitoc**

La Planta de Tratamiento de Tibitoc se surte de las aguas del río Bogotá, el cual ha recibido aguas arriba las descargas de los embalses del Sisga y de Tominé, del río Checua que recibe las descargas del embalse del Neusa y del río Teusacá a través del embalse de Aposentos.

Actualmente Esta planta tiene una capacidad instalada de 10.4 metros cúbicos por segundo.



#### **4.2.1.4 Sistema San Diego**

La planta de tratamiento de San Diego se alimenta del río San Francisco, por gravedad, a través de una conducción en tubería de acero de 14 pulgadas. Su capacidad de producción es de apenas 0.14 metros cúbicos por segundo y surte, principalmente, el centro de la ciudad.

### **4.3 Sistema de Distribución**

---

La red de distribución de agua potable a la ciudad de Bogotá está dividida en lo que se denominan las redes matrices compuestas por:

- Túneles como los de Usaquén Santa Bárbara y los Rosales.
- Las redes matrices propiamente dichas como las líneas Silencio - Casablanca. Silencio - Vitelma y línea a Suba que son usualmente tuberías en acero de gran diámetro.
- Redes intermedias con diámetros de 12 a 48 pulgadas.
- Y las redes menores de distribución para diámetros inferiores a 12 pulgadas y los tanques de compensación como el tanque El Silencio, el tanque de Casablanca entre otros.



---

## **Capítulo 5      METODOLOGÍA DE MEDICIÓN      DEL CLORO RESIDUAL LIBRE EN EL AGUA**

---

### **5.1      Selección del Método de muestreo para Cloro Residual**

---

La elección de los métodos de medición del cloro residual libre en el agua depende de factores como la fuente de ésta y las concentraciones de cloro residual esperadas; también es necesario tener en cuenta la presencia de algunas características presentes en el agua que afectan los resultados de las mediciones de cloro, a éstas propiedades se les denomina interferencias. Algunas interferencias son la turbiedad, el color, agentes oxidantes, variaciones de pH y variaciones de temperatura. Según esto, cada método tiene sus requisitos y se aplica según las restricciones físicas y químicas presentes en el agua.

Para aguas naturales y tratadas se tienen los siguientes métodos:

- a. Los métodos yodométricos son buenos para medir cloro residual en concentraciones mayores a 1 mg/l, pero no sirven cuando se tienen interferencias o bajas concentraciones.
- b. El método de titulación amperométrica es un método estándar de comparación para la determinación del cloro libre o combinado. No se afecta por interferencias pero es un poco más complicado de realizar que los otros, por lo que es necesaria mayor experiencia en el tema.
- c. El método de titulación DFD ferrosa provee un procedimiento de titulación para la determinación del cloro libre y para la estimación de las fracciones presentes de cloro libre y combinado.
- d. La técnica yodométrica del electrodo proporciona valores sobre cloro residual libre, cloro total y cloro combinado, no se afecta por el incremento de algunas interferencias como el aumento de las monocloramias pero si por su combinación con nitritos y manganeso.



---

## **5.2 Muestreo y Almacenamiento**

---

El cloro en soluciones acuosas es muy inestable, el contenido de este decrece rápidamente en muestras o soluciones débiles.

Se debe tener mucho cuidado en la manipulación de las muestras, ya que no se requiere mucho esfuerzo para variar los valores de cloro presentes en ésta, por ejemplo, las exposiciones a la luz del sol o a luces fuertes y la generación de movimientos bruscos (agitación), pueden contribuir al decaimiento acelerado de la concentración de cloro en el agua, lo cual arruinaría la muestra y ya no sería representativa.

Por estas razones, es necesario realizar las mediciones de cloro residual libre justo después de tomarse la muestra, evitar mucha luz y la agitación. Si no es posible realizar el análisis in situ, es necesario tomar la muestra evitando exceso de aire en el recipiente, y almacenarla en neveras por un máximo de dos horas, después de este tiempo los se debe desechar la muestra.

---

## **5.3 Métodos de Análisis**

---

A continuación se explican en detalle los procedimientos para la realización de cada uno de los métodos de análisis mencionados anteriormente.

### **5.3.1 Método Yodométrico I**

El cloro libera yodo a partir de las soluciones de yoduro de potasio a pH 8 o inferior. El yodo libre se valora con una solución patrón de tiosulfato de sodio con almidón como indicador. En la utilización de este método se deben tener en cuenta interferencias como las formas oxidadas de manganeso y otros agentes oxidantes. Es preferible una titulación ácida porque algunas formas de cloro combinado no



reaccionan a pH 7. La concentración detectable mínima de cloro residual se aproxima a 40 microgramos de Cl si se utiliza tiosulfato de sodio y una muestra de 1000 ml. Para concentraciones inferiores a 1mg/l no se puede determinar el punto final del indicador (almidón).

#### Reactivos:

- Ácido Acético
- Yoduro de Potasio, KI
- Tiosulfato de Sodio patrón
- Titulante de Tiosulfato de sodio estándar
- Solución indicadora de almidón
- Yodo patrón
- Yodo patrón diluido

#### Procedimiento:

Primero se define el volumen de muestra a utilizar, si el rango de valores de cloro está entre 1 y 10 mg/l se toman 500 ml de muestra. Se colocan 5 ml de ácido acético para bajar el pH de la muestra a 3 o 4, después se añade el yoduro de potasio. Después se procede a titular con tiosulfato y se añade 1 ml de almidón para valorar la muestra hasta que desaparezca el azul que produce el tiosulfato. Se debe corregir el valor obtenido en la titulación con un blanco por las impurezas oxidantes o reductoras del reactivo.

#### Cálculos:

Para determinar los valores de cloro residual total disponible en la muestra de agua se realiza el siguiente cálculo:

$$mgCl = \frac{(A + -B) * N * 35.450}{mlmuestra}$$

A = titulación en ml para la muestra

B = titulación en ml para el blanco

N = Normalidad del Tiosulfato de Sodio



### 5.3.2 Método Amperométrico de Titulación

Este método se puede utilizar para determinar el cloro total y puede diferenciar entre el cloro libre y el combinado. También se puede ver las fracciones de cloramina y dicloramina.

El cloro libre existente se titula a un pH de 6.5 a 7.5, ya que en este rango el cloro combinado reacciona lentamente. La determinación del cloro residual libre se realiza a un pH de 7.5 porque la reacción se vuelve inactiva con un pH mayor. El método no proporciona valores exactos si existen interferencias tales como presencia de nitrógeno y dióxido o trióxido de cloro. Los reactivos presentes en el proceso son una solución titulante de óxido de fenilarsina, una solución buffer de fosfato, yoduro de potasio y solución buffer de acetato.

Reactivos:

- Titulante de óxido de fenilarsina
- Solución tampón de fosfato
- Solución de yoduro potásico
- Solución tampón de acetato

Procedimiento:

Para concentraciones de cloro de 2 mg/l o menos se utiliza una muestra de 200 ml de volumen y para niveles de cloro por encima de 2mg/l se utiliza una muestra de 100 ml o menor. Se ajusta el pH con 1 ml de solución tampón de fosfato y se procede a titular con fenilarsina patrón.

Cálculos:

Los valores de cloro residual se obtienen después de la titulación con la siguiente fórmula:

$$mgCl = \frac{A * 200}{mlmuestra}$$

Donde:

A = ml de óxido de fenilarsina en la titulación



### 5.3.3 Método Amperométrico de titulación de bajo nivel

Este método se utiliza para la medición de cloro residual en concentraciones menores a 0.2 mg/l, el método puede medir hasta 10 µg/l. Se utiliza una solución titulante diluida y un procedimiento gráfico para determinar el punto final.

Reactivos:

- Biyodato de potasio 0.002 256 N
- Yoduro de Potasio
- Titulante de óxido de fenilarsina de baja concentración
- Solución tampón de acetato

Procedimiento:

Primero se debe seleccionar el volumen de la muestra; para muestras que contengan menos de 2 mg/l se utiliza una muestra de 200 ml. El procedimiento es el mismo que el método anterior y adicionalmente es necesario realizar un proceso gráfico para encontrar el punto de equivalencia del titulante.

Cálculos:

$$mgCl = \frac{A * N * 200}{B * 0.000564}$$

Donde:

A = ml de titulante en el punto de equivalencia

B = volumen del muestra en ml

N = normalidad del óxido de fenilarsina

### 5.3.4 Método Titulométrico de la DFD ferrosa

Se utiliza una solución de N,N-dietil-p-fenilendiamina (DFD) como indicador del método titulométrico con FAS (sulfato de amonio). El cloro libre reacciona con el indicador DFD y produce un color rojo, sobre el cual se realiza la titulación. En este método se debe tener un control cuidadoso del pH para obtener resultados exactos.



Se debe titular en el momento en el que se forma el color rojo. Un pH demasiado alto hace que el oxígeno disuelto interfiera sobre el color rojo.

Reactivos:

- Solución tampón de fosfatos
- Solución indicadora DFD
- Titulante de sulfato ferroso de amonio patrón o FAS

Procedimiento:

Se toman 5 ml de solución tampón de fosfatos, se añaden 100 ml de muestra y se agrega 5 ml de la solución indicadora DFD, inmediatamente se debe titular con FAS. Lo mínimo que se puede detectar con este método es 18 µg/l de Cl.

Cálculos:

Para una muestra de 100 ml, 1 ml de FAS patrón titulante es igual a 1 mg/l de Cloro residual libre.

### 5.3.5 Método Colorimétrico de la DFD

Es una versión colorimétrica de la DFD y utiliza los mismos principios; la diferencia radica en la forma de titulación, se reemplaza el sulfato ferroso de amonio por un procedimiento colorimétrico.

Equipos:

- Equipo fotométrico: espectrofotómetro, fotómetro de filtro.
- Material de Vidrio

Reactivos:

Se utilizan los mismos reactivos que en el método de la titulación DFD ferrosa,

Procedimiento:



Para medir el cloro residual libre con este método se coloca 0.5 ml de solución buffer y 0.5 ml de indicador DFD en un tubo de ensayo o el recipiente del fotómetro. Se añade 10 ml de muestra y se lee el color inmediatamente con el equipo.

### **5.3.6 Método de la Siringaldacina**

Esta prueba mide valores de cloro libre en un rango de 0.1 a 10 mg/l. La siringaldacina es oxidada por el cloro libre para dar un producto coloreado, el cual es ligeramente soluble en agua. Se recomiendan pHs de 6.5 a 6.8.

Equipo:

- Equipo colorimétrico: fotómetro de filtro, espectrofotómetro.

Reactivos:

- Agua sin demanda de cloro
- Indicador de siringaldacina
- 2-propanol
- Buffer
- Solución de Hipoclorito

Procedimiento:

Primero de debe calibrar el fotómetro con soluciones estándar de hipoclorito, se debe ajustar a medida que pasa el tiempo debido al envejecimiento del reactivo. Para el análisis de cloro libre se debe tomar un tubo de ensayo con capacidad de 5 ml con 3 ml de muestra, a este se añade 0.1 ml de buffer y 1 ml de indicador de siringaldacina y se mezcla. Esta solución se analiza en el espectrofotómetro y se mide su absorbancia. Este resultado se comprara con la curva de calibrado del aparato para obtener el valor de cloro en mg por litro.

### **5.3.7 Técnica yodométrica del electrodo**



Este método mide el potencial eléctrico del yodo que se libera cuando se agrega yoduro de potasio a una muestra acidificada. Se utiliza un pHmetro y dos electrodos platino-yoduro.

Equipos:

- Electrodos

Reactivos:

- Solución buffer de pH 4
- Agua sin demanda de cloro
- Solución de yoduro de potasio
- Yodato de potasio patrón

Procedimiento:

Se debe preparar una curva de calibrado de potencial contra concentración, esta curva se construye a partir de mediciones de concentración de cloro realizadas sobre solución patrón y sobre un blanco. Se toma un volumen de muestra que no contenga más de 0.5 mg de cloro, se le añade 1 ml de solución buffer y 1 mililitro de yoduro de potasio. Se agita y se ajusta el pH con adición de ácido acético. Esta muestra se pone en un vaso de precipitados donde se introducen los electrodos y se registra el potencial una vez este se haya estabilizado.

#### **5.4 Escogencia del Método de Análisis**

---

Para elegir el método de muestreo más apropiado para este proyecto, se tuvieron en cuenta diferentes factores que podían influir directamente sobre los resultados; primero se analizó la forma como se debían realizar los muestreos; era importante contar con un método que facilitara la preparación de las muestras in situ, debido a las características del cloro residual en el agua, como se explicó en el numeral 5.3.



La ubicación de los puntos de muestreo fue otro de los factores importantes tenidos en cuenta. Las grandes distancias entre punto y punto hacían imposible el traslado del sitio de muestreo al laboratorio para realizar los análisis en un tiempo prudente sin que se deteriorara la muestra. Ver Ilustración 6-1.

También se tuvieron en cuenta las facilidades de acceso a los diferentes métodos de análisis de cloro residual utilizados en los diferentes laboratorios, los diferentes equipos que utilizan algunos métodos son de difícil acceso en la mayoría de los laboratorios de la ciudad, por esta razón, fueron descartados inmediatamente.

Se decidió utilizar el método de la DFD ferrosa o titulación con FAS, el cual se ajustó perfectamente a las características del experimento y proporcionó datos confiables con errores mínimos. La preparación de los reactivos se realizó en el Centro de Innovación y Desarrollo Tecnológico - CITEC de la Universidad de los Andes, lo cual facilitó aún más la utilización del método.



---

## **Capítulo 6      DESCRIPCIÓN      DEL      PROCEDIMIENTO      DE MUESTREO**

---

### **6.1      Escogencia de Puntos de Medición**

---

Para la escogencia de los sitios de medición, se tuvieron en cuenta diferentes aspectos que influyen directamente sobre la representatividad de los datos.

Inicialmente se buscó una distribución homogénea de puntos sobre la ciudad, es decir, diferentes puntos repartidos estratégicamente desde el norte hasta el sur; después, estos puntos se agruparon según la fuente de abastecimiento, de esta forma se esperaba mayor facilidad al hacer comparaciones con el nivel de cloro inicial en la red. También se tuvieron en cuenta los lugares en donde la Empresa de Acueducto y Alcantarillado tiene ubicadas sus pilas de medición de calidad de agua, con el fin de comparar la veracidad de los datos de la E.A.A.B.

Otro factor importante en la elección de los sitios de muestreo fue el fácil acceso a los tanques de almacenamiento. Por lo general, la tubería de la red de distribución distrital entra directamente a los tanques y no se acostumbra a dejar una llave externa, lo que hace imposible tomar la muestra antes del tanque; por esta razón, fueron eliminados algunos sitios elegidos inicialmente, solo en algunos edificios con esta característica fue posible realizar la medición.

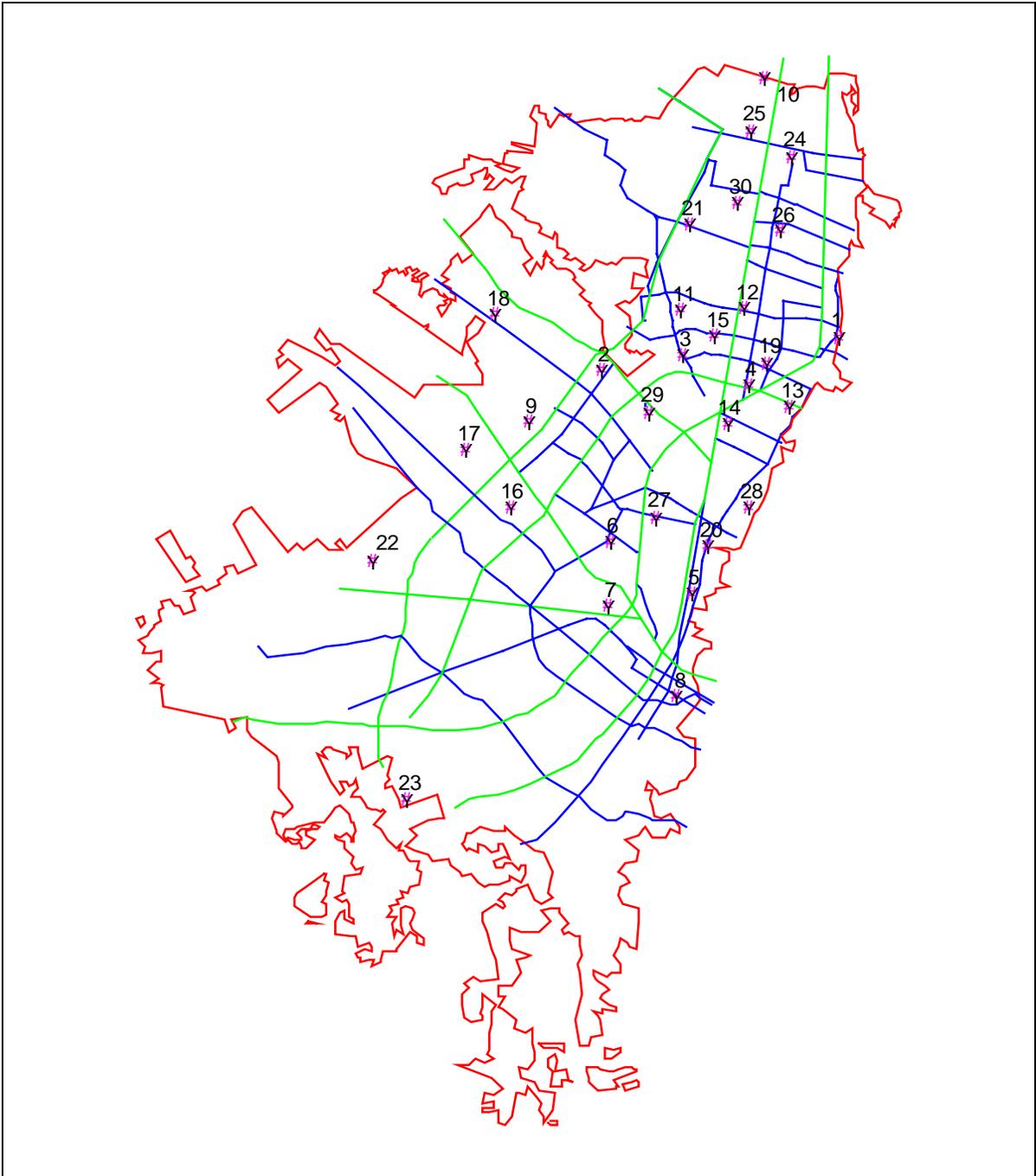
La Tabla 6-1 muestra la ubicación de los puntos de muestreo escogidos. La Tabla 1 del Anexo 2, describe en detalle la ubicación de dichos puntos.



ID	Puntos de muestreo
1	Transversal 6 # 125-40 T-4
2	Calle 77A # 68C-16
3	Calle 106B # 43A-50
4	Calle 100 # 17-76
5	Carrera 7ª. # 43-33
6	Calle 45 # 38A-16
7	Calle 22 F # 35-41
8	Carrera 4a. 18-50
9	Calle 59A # 75A-31
10	Carrera 47A # 186-35
11	Carrera 49 # 119-49
12	Carrera 31 # 126-65
13	Carrera 8ª # 99-22
14	Carrera 20 # 85-52
15	Calle 115 # 37-40
16	Calle 68D # 41-48
17	Calle 39 # 77C-90
18	Calle 73 # 99B-21
19	Calle 108ª # 16-42
20	Calle 64 # 4-18
21	Carrera 154 A # 136A-65
22	Calla 7 A # 89A – 76
23	Calle 52 A # 24C – 41
24	Calle 169 # 35-28
25	Calle 173 # 47-41
26	Diagonal 145 # 31A-40
27	Carrera 26 # 58-56
28	Carrera 2 E # 70-60
29	Diagonal 152 # 42-04
30	Ave 81 # 48-95

**Tabla 6-1 Ubicación de puntos de Muestreo**

La Ilustración 6-1 es una representación gráfica de los puntos de muestreo, los cuales se ubican sobre un plano de Bogotá que contiene las principales avenidas de la ciudad. Ver Plano 1, Anexo 4.



**Ilustración 6-1 Ubicación puntos de medición**



## 6.2 Descripción del método de muestreo

Los muestreos se basaron en la toma de dos o tres muestras de agua por sitio de medición; la primera muestra se tomó directamente de la red de distribución, es decir, antes de entrar a los tanques de almacenamiento domiciliarios, la segunda muestra se tomó después del tanque, en algunos casos fue necesario tomar una tercera muestra, por lo general, después del tanque, debido a que la variación del cloro era considerable en un espacio de tiempo relativamente corto.

Las muestras se tomaron en recipientes de plástico, tratando de dejar la mínima cantidad de aire posible en estos para evitar una posible volatilización del cloro. Las muestras se analizaron in situ con el método de la titulación DFD ferrosa, explicado anteriormente, con este método se realizó una lectura real del cloro residual libre presente en el agua y se disminuyó el posible error en las mediciones. La Ilustración 6-2 muestra el montaje para la medición in situ del cloro residual libre en las diferentes muestras de agua.



**Ilustración 6-2 Equipo de Medición: Método DFD**



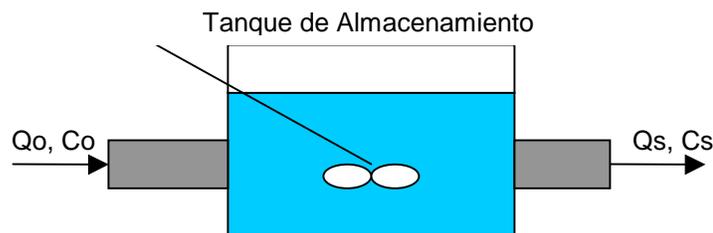
Los datos recolectados durante la realización de las pruebas fueron registrados en un formato que se diseñó teniendo en cuenta las variables que se querían analizar desde el principio y que se esperaba fueran significativas en el proceso del decaimiento del cloro residual. Ver Tabla 2 y Tabla 3, Anexo 2.

Para cada muestra de agua se midió el potencial de hidrógeno o pH, el cual se considera un factor importante para la correcta utilización del método de titulación escogido. Los valores de cloro residual y pH se encuentran descritos en la Tabla 4, Anexo 2.



## Capítulo 7 MODELACIÓN DEL TANQUE DE ALMACENAMIENTO

De acuerdo con la forma en que se realizaron las mediciones, se puede afirmar que cada tanque de almacenamiento domiciliario se comporta como un reactor completamente mezclado (RCM), es decir, que toda el agua que se encuentra en el tanque tiene la misma concentración de cloro residual. A medida que el agua entra en el tanque se mezcla inmediatamente (tiempo cero) y cambia su concentración de entrada, igualándola a la concentración de salida. En este caso no se puede suponer un comportamiento flujo pistón, ya que no se hizo un seguimiento en el tiempo de la masa de agua para calcular el decaimiento del cloro residual presente en dicha masa.



**Diagrama 7-1 Representación de un Tanque de Almacenamiento como RCM**

El Diagrama 7-1 ilustra el comportamiento del tanque. A continuación se realiza un balance de masas, basado en el diagrama anterior con el fin de encontrar la ecuación que explica el comportamiento de las concentraciones de cloro en el tanque.

Para plantear el balance de masa sobre el tanque se deben distinguir las siguientes variables: área y profundidad del tanque, caudal de entrada y de salida, concentraciones de cloro a la entrada y a la salida del tanque y el tiempo de retención hidráulica que está implícito en las variables de volumen y caudal.

Teniendo en cuenta esto se obtienen el siguiente planteamiento del balance:



$$\frac{dC_s V}{dt} = Q_0 C_0 - Q_s C_s - K C_s V - V_s A C_s$$

Donde:

$Q_0$  = caudal de entrada al tanque, o caudal de consumo

$Q_s$  = caudal de salida

$C_0$  = concentración de cloro a la entrada del tanque, es decir en la red de abastecimiento.

$C_s$  = concentración de cloro a la salida del tanque

$V$  = volumen del tanque

$V_s$  = velocidad de sedimentación de partículas

$A$  = área del tanque

$K$  = constante de primer orden de decaimiento

Se supone que el caudal que entra es el mismo que sale, así, dividiendo por el volumen se obtiene la siguiente expresión:

$$\frac{dC_s}{dt} = \frac{1}{T} (C_0 - C_s) - K C_s - \frac{V_s}{H} C_s$$

Donde:

$T$  = tiempo de residencia hidráulico encontrado a partir de la relación entre volumen y caudal.

$H$  = profundidad del tanque

Teniendo en cuenta que el experimento no se realizó a lo largo del tiempo, es decir, no importa la variación del cloro en el tiempo, se debe suponer un estado permanente, es decir,  $dC/dt$  se debe igualar a cero.

La ecuación toma la siguiente forma:

$$C_s * \left( \frac{1}{T} + K + \frac{V_s}{H} \right) = C_0 * \frac{1}{T}$$



Despejando se obtiene:

$$C_s = \frac{\frac{1}{T} C_0}{K + \frac{1}{T} + \frac{V_s}{H}}$$

Finalmente esta expresión describe el cambio en la concentración de cloro en los tanques muestreados.

La velocidad de sedimentación de partículas que están en el agua,  $V_s$ , es un valor desconocido, no se midió durante los muestreos ya que no se consideró que fuera una variable importante para el fin de la investigación. Por esta razón, se agruparon las expresiones  $K$  y  $V_s/H$  en una sola variable llamada  $K'$ , obteniéndose una nueva expresión para el cambio de concentraciones en el tanque:

$$C_s = \frac{\frac{1}{T} C_0}{\frac{1}{T} + K'}$$

$$C_s = \frac{C_0}{1 + K'T}$$

Esta ecuación se utilizó treinta veces, una vez para cada sitio de muestreo. Utilizando los valores de cloro residual obtenidos a partir de cada uno de los tanques muestreados y se obtuvieron diferentes valores para  $K'$ , los resultados se encuentran en la Tabla 8, Anexo 2.



---

## **Capítulo 8      ANÁLISIS DE VARIABLES**

---

### **8.1    Definición de Variables**

---

La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, E.A.A.B., tiene el compromiso de garantizar la calidad del agua en las redes de distribución de la ciudad; una vez el agua deja la red principal de distribución, es decir, entra a las edificaciones, la calidad del agua es responsabilidad del usuario. Los tanques de almacenamiento son culpables de la mayor parte de la contaminación del agua que utilizamos. Esto se debe a los malos diseños, pésimo mantenimiento y en consecuencia, a un deterioro avanzado de las estructuras.



**Imagen 8-1 Tanque de Almacenamiento Subterráneo en mal estado**



Durante la realización de los muestreos se observaron algunas características físicas de los tanques. Ver Anexo 3.

Se encuestó a los administradores de las edificaciones sobre las prácticas de limpieza de los tanques; para esto se diseñó un formato que se presenta en la Tabla 2, Anexo 2. Algunas de estas características físicas se pueden considerar posibles causas del decaimiento del cloro residual en los tanques de almacenamiento.

Se comprobó el poco cuidado que se le da a los tanques. En la Imagen 8-3 se muestra el estado de un tanque un día después de haber sido lavado. Es notoria la diferencia en la claridad del agua, con el agua del tanque en la Imagen 8-1, en ese caso el tanque fue lavado hace 2 años.



**Imagen 8-2 Tanque de almacenamiento en buen estado**

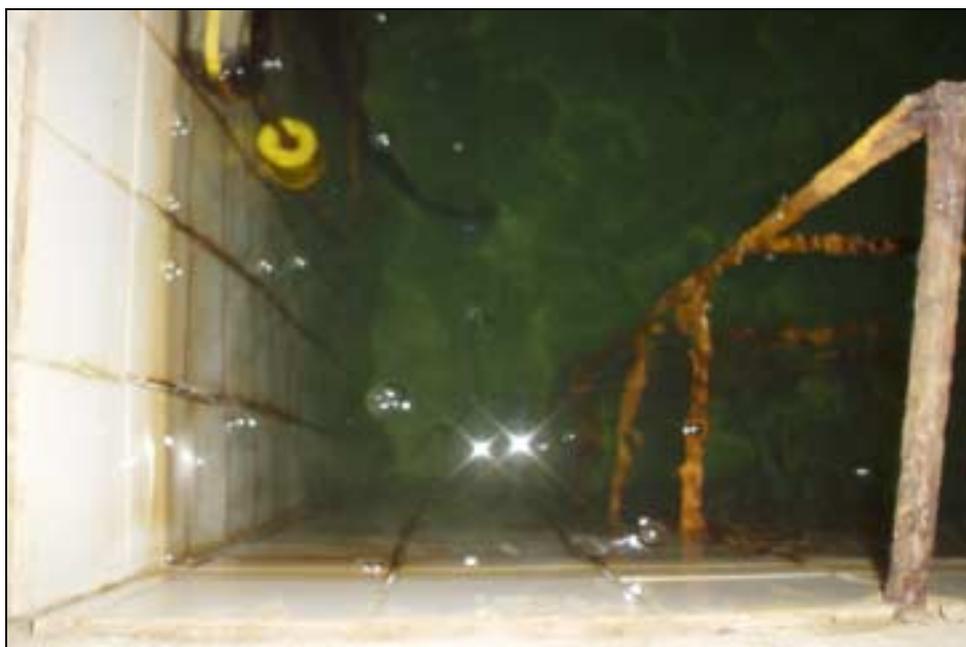
A continuación se explican los criterios de selección de variables y cálculo de las mismas.



### 8.1.1 Edad de los Tanques

Como se explicó anteriormente, para la escogencia de los tanques, donde se realizaron los muestreos, no se tuvo en cuenta la edad de las edificaciones, por lo que se obtuvo un rango de edades muy grande que varía entre 6 meses y 25 años de edad para los tanques de almacenamiento.

Se pudo observar un gran deterioro de los tanques en las edificaciones con edades muy altas, y teniendo en cuenta algunos factores que se observaron como la existencia de fugas por deterioro, posibles fallas en la impermeabilización de los tanques y formación de biopelículas, se concluyó que la edad de los tanques puede ser una variable importante en la explicación del decaimiento del cloro residual y posterior baja en la calidad del agua en la red de distribución final del usuario.



**Imagen 8-3 Deterioro en las paredes y escalera de un tanque de 10 años de edad**

Para un análisis posterior, los valores de la variable *edad de tanques* se encuentran en años.



### 8.1.2 Frecuencia de Lavado

Debido a la contaminación que se produce en los tanques por la acumulación de partículas que vienen en el agua, por sedimentos y por suciedad producida por el ambiente, se hace necesario un lavado periódico de los tanques para evitar contaminación adicional del agua. También es importante un mantenimiento periódico de las estructuras que mantienen el nivel de agua constante en los tanques.



**Imagen 8-4 Sistema de Autorregulación del Tanque - Flotador**

Aunque la Empresa de Acueducto y Alcantarillado ha lanzado campañas para fomentar el lavado de tanques, esta acción todavía es pasada por alto en la ciudad. Aún así, en muchos de los sitios donde se tomaron muestras de agua se realiza un lavado periódico del tanque.

Los datos obtenidos tienen una gran variación en el tiempo, por lo tanto, es posible realizar un análisis sobre ellos y encontrar su influencia, si la hay, sobre el decaimiento del cloro residual en el agua.



Para un análisis posterior, los valores de la variable *tiempo de lavado* se encuentran en meses.

### 8.1.3 Material de construcción de los Tanques

Aunque la mayoría de los tanques observados están contruidos en concreto, se encontraron algunos tanques contruidos en Asbesto-Cemento y otros en PVC.



**Imagen 8-5 Tanque Subterráneo en Concreto**

Con el fin de encontrar una relación más acertada entre el decaimiento del cloro residual en el agua y los materiales de construcción de los tanques, se decidió utilizar, los coeficientes de reacción pared-rugosidad  $F$  dados para cada material. Estos coeficientes explican el decaimiento del cloro explicado producido por el aumento de la rugosidad en la pared de los tanques.



Según el programa EPANET se tiene<sup>3</sup>:

$$R = \frac{A}{V} K_w C^n$$

Donde

R = tasa instantánea de reacción (masa/volumen/tiempo)

K<sub>w</sub> = coeficiente tasa de reacción

A/V = área superficial por unidad de volumen; 4/D

C = concentración (masa/volumen)

n = orden de la reacción, que para el cloro se asume un decaimiento de primer orden, es decir, n = 1.

La interacción pared-rugosidad F se encuentra implícita en el coeficiente K<sub>w</sub>. Para reacciones de primer orden, como la del cloro, se utilizan valores de 0 hasta 1.5 m/día<sup>4</sup> y se puede calcular utilizando las siguientes ecuaciones:

Hazen – Williams  $K_w = \frac{F}{C}$

Darcy – Weisbach  $K_w = \frac{-F}{\log e / d}$

Chezy – Manning  $K_w = Fn$

F se debe calcular con medidas experimentales, sus valores se encuentran tabulados<sup>5</sup>.

#### 8.1.4 Tiempo de Retención Hidráulica

Los tiempos de retención hidráulica son una relación entre el volumen del tanque y el caudal de consumo que está entrando y saliendo del tanque.

<sup>3</sup> EPANET 2 Users Manual in Adobe PDF Format. Water Supply and Water Resources Division. U.S. Environmental Protection Agency's National Risk Management Research Laboratory.

<sup>4</sup> ROSSMAN LEWIS A. CLARK ROBERT M. GRAYMAN WALTER M. Modeling Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems Journal of environmental Engineering, vol 120, No. 4.

<sup>5</sup> FABIO PARDO. Tesis - Optimización del Cloro Residual en la Red de Acueducto de Bogotá. Universidad de los Andes. 2001.



$$TRH = \frac{\text{Volumen}}{\text{Caudal}}$$



**Imagen 8-6 Estancamiento del Agua por grandes tiempos de retención hidráulica**

#### **8.1.4.1 Cálculo de Volúmenes**

Encontrar los volúmenes de los tanques en cada sitio de muestreo fue una de las tareas más difíciles de realizar para esta investigación. La mayoría de los tanques en cuestión son subterráneos y el acceso a ellos fue muy limitado, por lo que no fue posible observar las dimensiones de estos en su totalidad. En algunos sitios de muestreo fue necesario acudir a planos de las edificaciones, en otros, simplemente confiar en el conocimiento de las personas encargadas del mantenimiento de los mismos. En aquellos sitios donde fue posible, se midieron las paredes del tanque con un metro de cinta y se hizo lo mismo para conocer su profundidad.



#### **8.1.4.2 Cálculo de Caudales**

Para conocer los caudales de entrada a cada uno de los sitios de muestreo se utilizó una base de datos de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá E.A.A.B., la cual se compone de 1,583,607 direcciones en la ciudad de Bogotá, y para cada dirección existe el registro del consumo de agua durante las seis últimas vigencias hasta Julio de 2002 de cada una de estas direcciones. Ver Tabla 5, Anexo 2.

Una vigencia es un espacio de tiempo en el que se toman las diferentes lecturas de los medidores en cada dirección, la explicación a cada código de vigencia se realiza en detalle en la Tabla 6, Anexo 2.

Fue necesario analizar cada dirección y comprobar el número de apartamentos y locales que se surten de agua del tanque del cual se tomó la muestra, esto con el fin de obtener los caudales exactos que se mueven a través del tanque de almacenamiento muestreado.

Los tiempos de retención hidráulica están dados en días. Ver Tabla 7, Anexo 2.

#### **8.1.5 Otras Variables**

Otras características fueron observadas en los tanques durante el desarrollo de la investigación; se midió el pH del agua y se caracterizaron los tanques según su ubicación en las edificaciones, elevada o subterránea.

Estas variables no serán tenidas en cuenta en un análisis posterior ya que la mayoría de los tanques son subterráneos y no hay una muestra representativa de tanques elevados que permita realizar una comparación confiable. El pH solo fue medido para asegurar el buen funcionamiento del método de análisis de cloro residual escogido, no se esperaba realizar una comparación con el decaimiento de la concentración de cloro, debido a que la forma como fue medido no proporcionaba una precisión aceptable.



## 8.2 *Análisis Estadístico de Variables*

### 8.2.1 Estadística descriptiva

Se decidió eliminar la variable  $K'$ , planteada inicialmente en la modelación del tanque, y se utilizó directamente el tiempo de retención hidráulico. La aplicación del modelo se facilitó reemplazando la variable de rugosidad pared-agua  $K'$ , que definía el material del tanque, por variables denominadas dummy, que dividen la variable material en variables de acuerdo al tipo de material presente de cada tanque muestreado (Concreto y PVC).

En la Tabla 8.1 se muestran las principales estadísticas descriptivas de las variables analizadas. Este análisis se realiza con todos los valores obtenidos en las mediciones. La variable decaimiento del cloro residual corresponde a la resta entre los valores del cloro en la red de distribución distrital y la red interna de los usuarios, es decir, después del tanque.

	<b>Decaimiento del cloro residual (mg/L)</b>	<b>Tiempo de lavado (meses)</b>	<b>Edad (años)</b>	<b>Material</b>	<b>TRH días</b>
Media	0,60	13,14	11,95	0,30	4,77
Error típico	0,05	3,50	1,29	0,12	0,75
Desviación estándar	0,25	19,18	7,06	0,65	4,12
Varianza de la muestra	0,06	367,96	49,80	0,42	16,94
Rango	1,00	95,50	25,50	2,00	20,74
Mínimo	0,10	0,50	0,50	0,00	0,07
Máximo	1,10	96,00	26,00	2,00	20,81

**Tabla 8-1 Estadística Descriptiva**

Se puede observar que los valores para el cloro residual en el agua tienen una gran variabilidad, la media indica que existen varios valores por encima de 0.6 mg/L, el cual se puede considerar un valor alto dentro de lo esperado. Así mismo es



interesante analizar los resultados de las otras variables, en particular, el TRH. La media del TRH es muy baja (4.7 días) comparativamente con los tiempos de retención que se presentan en la ciudad. Los tanques se diseñan como espacio de almacenamiento de agua y fácilmente los TRH superan los 10 días, este valor duplica el obtenido estadísticamente en la Tabla 8-1, lo cual podría ser un indicador de la influencia directa de esta variable sobre el decaimiento del cloro residual en el agua.

### 8.2.2 Gráficas cruzadas

A continuación se grafica el decaimiento en la concentración de cloro residual en las muestras, contra tres variables que se presume afectan directamente dicho decaimiento.

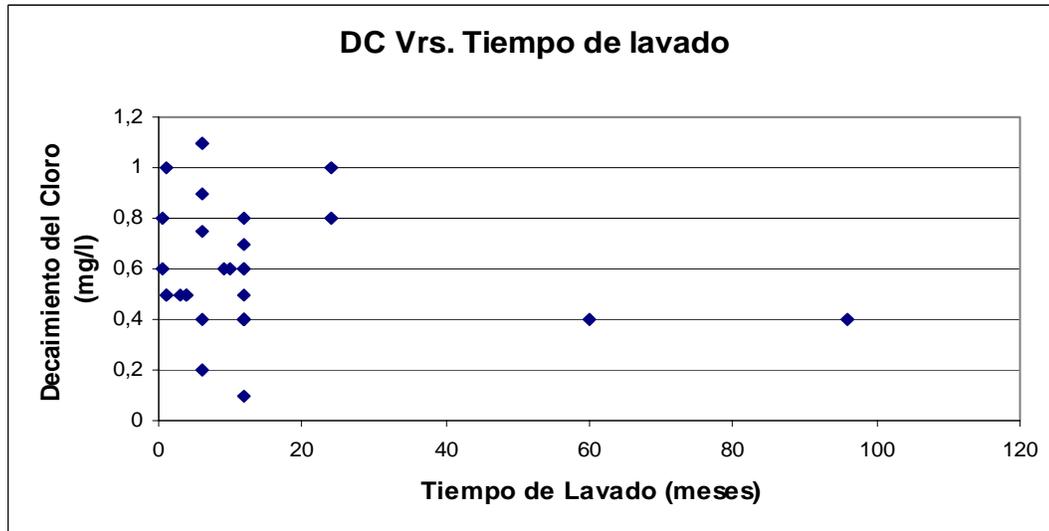


Figura 8-1 Comportamiento del decaimiento del Cloro residual por Tiempo de lavado

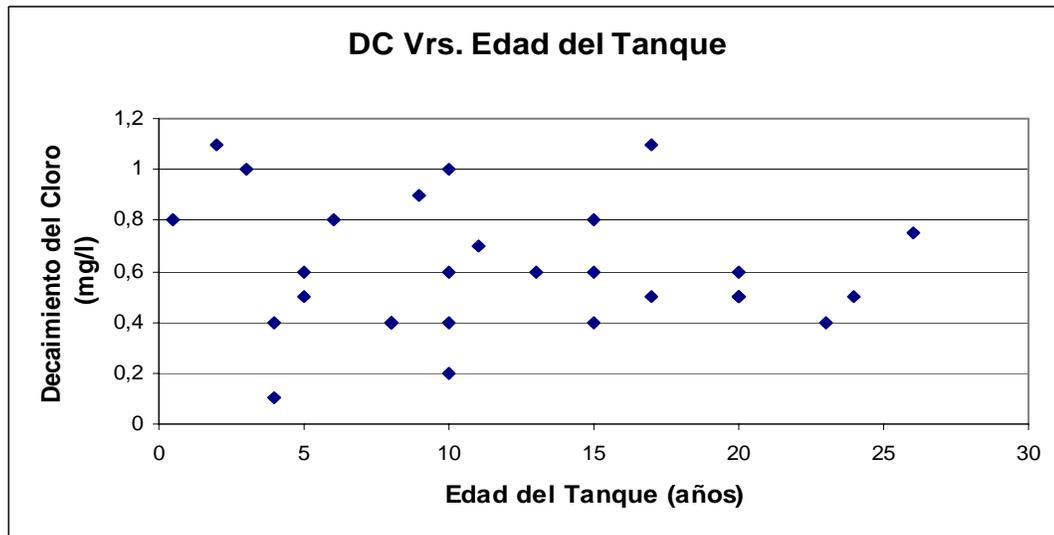


Figura 8-2 Comportamiento del decaimiento del cloro residual por edades de los tanques

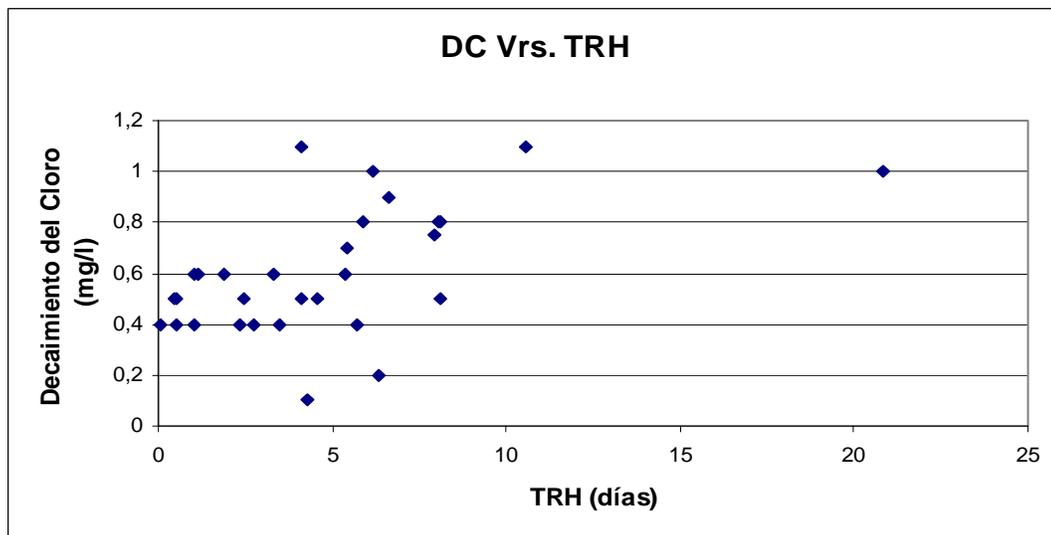


Figura 8-3 Comportamiento del decaimiento del cloro residual por TRH

La Figura 8-1 muestra la relación entre el decaimiento y el tiempo de lavado de los tanques. Se puede observar que la distribución de puntos no sigue ningún patrón; existen varios puntos que se salen totalmente de cualquier explicación lógica, como



un tiempo de lavado de 8 años que equivale a un decaimiento de 0.4 mg/L, y un tiempo de lavado de 30 días que equivale a un decaimiento de 1 mg/L.

La Figura 8-2 muestra la relación entre el decaimiento del cloro y la edad de los tanques, al igual que en el tiempo de lavado, los puntos no siguen un patrón definido, hay una dispersión de valores muy grande que no permiten concluir nada de esta gráfica.

La Figura 8-3 muestra la relación entre el decaimiento del cloro y el tiempo de retención hidráulica de los tanques, a diferencia de las otras dos variables, en este caso si es posible encontrar una tendencia en los valores, a excepción de unos pocos puntos la gráfica muestra que a medida que se aumentan los TRH los valores de cloro aumentan, es decir, hay un mayor decaimiento de este en las muestras observadas.

Estos análisis gráficos permiten realizar una aproximación general al comportamiento de las variables. Es necesario realizar un análisis estadístico detallado para lograr una mejor estimación de parámetros y encontrar el comportamiento real de las variables.

### **8.2.3 Análisis de Correlación de Variables**

Adicionalmente se realizó el análisis de correlación entre las variables que influyen el decaimiento. Recuérdese que el coeficiente de correlación mide el grado de asociación lineal entre dos variables. En la Tabla 8-2 se muestra la matriz de correlaciones de las variables.



	<i>DC</i>	<i>T de Lavado</i>	<i>Edad</i>	<i>Material</i>	<i>TRH</i>
<i>DC</i>	1,00000				
<i>T de Lavado</i>	-0,18953	1,00000			
<i>Edad</i>	-0,11136	-0,00120	1,00000		
<i>Material</i>	0,14508	0,07660	0,07090	1,00000	
<i>TRH</i>	0,54080	-0,30153	-0,32243	-0,02101	1,00000

**Tabla 8-2 Matriz de correlaciones de las variables.**

De los coeficientes de correlación que se observan en la tabla, solo el que corresponde a las variables DC y TRH es significativo. Para esto se realizó una prueba estadística de Pearson la cual rechaza la hipótesis nula de que es estadísticamente cero. Esto indica que hay un alto grado de asociación lineal positiva entre estas dos variables; a medida que TRH aumenta, también lo hace el DC.

Para los coeficientes de correlación entre las variables DC y T de Lavado y entre las variables DC y Edad, se encontró que son negativos, es decir, a medida que aumenta el tiempo de lavado y aumenta la edad, el decaimiento en las concentraciones de cloro residual en el agua se hace menor. Sin embargo, se encontró que estos coeficientes no son significativos a un nivel de confianza del 95%.

El análisis de correlación solo considera el grado de asociación lineal entre dos variables. Este análisis no tiene en cuenta otras variables y el objetivo final de la investigación es hallar los factores que determinan el DC. Debido a lo anterior, es necesario incluir en el análisis estadístico más variables. Para lograr esto se utilizará el análisis de regresión.

#### **8.2.4 Análisis de la Regresión**

El objetivo es encontrar evidencia estadística referente a los factores que determinan el decaimiento en el cloro residual. Para esto se corrió un primer modelo



econométrico con variable dependiente DC y con variables independientes tiempo de lavado, edad del tanque, material (dummy) y tiempo de retención hidráulica (TRH). El modelo es el siguiente:

$$DC_i = \beta_0 + \beta_1 TL_i + \beta_2 Ed_{adi} + \beta_3 TRH_i + \beta_4 Concreto_i + \beta_5 PVC_i + U_i$$

Con  $i = 1, 2, \dots, 30$

Los resultados del modelo se presentan a continuación:

Variable	Coefficiente	Error Estándar	T	P >  t
Constante	0,52897	0,17582	3,00861	0,00608
Tiempo de lavado	-0,00034	0,00257	-0,13444	0,89418
Edad del tanque	0,00208	0,00646	0,32252	0,74985
TRH*	0,03352	0,01139	2,94230	0,00711
Concreto	-0,12451	0,13925	-0,89419	0,38010
PVC	-0,07946	0,20271	-0,39198	0,69853

**Tabla 8-3 Resultados regresión. Variable Dependiente: DC**

Número de observaciones 30,  $R^2 = 0.329$   
\*Variable significativa al 5%

Los datos de entrada del modelo estadístico se presentan en la Tabla 12, Anexo 2.

Para la corrida del modelo de regresión se utilizó el paquete estadístico SPSS 10.5. El modelo es significativo a nivel global, mostrando que las variables independientes, en conjunto, explican la variabilidad de la variable dependiente. Esto a un nivel de confianza del 90%.

A nivel de variables individuales se puede establecer que estas presentan los signos esperados. Sin embargo solo la variable TRH es significativa a un nivel de confianza del 1%. Para esta variable el modelo muestra que si se aumenta el tiempo de retención hidráulica en una unidad, es decir en 1 día, la variable DC aumenta en 0.03335234. Por último, el R2 del modelo no es aceptable (0.32) mostrando que el



modelo no representa un buen ajuste. Esto se explica por la gran variabilidad en las concentraciones de cloro residual presentes en las redes de distribución de la ciudad.

Según los resultados del modelo y presentados en la Tabla 8-3, se puede concluir a partir de este modelo de regresión, que la variabilidad en el DC es explicada sólo por la variabilidad en el TRH. Las demás variables consideradas no influyen en el decaimiento del cloro residual en el agua.



---

## **Capítulo 9      RESULTADOS DE MEDICIONES DE CLORO RESIDUAL EN BOGOTA**

---

La empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá posee cerca de 150 puntos de muestreo de agua, éstos se encuentran repartidos sobre toda la red de distribución de la ciudad y se denominan pilas de muestreo.

La frecuencia de los muestreos depende de la ubicación de las pilas; por ejemplo, las pilas al inicio de la red, desde cada planta y después de tanques de almacenamiento de gran capacidad como el de Usaquén, tienen mayor frecuencia de muestreo. Esto se debe al gran control que se tiene sobre la calidad del agua y a la necesidad de hacer análisis propios como medio de comparación y control de la información suministrada directamente por las plantas de tratamiento; otras pilas de menor importancia como la pila E.A.A.B., situada cerca de Corferias, son muestreadas en promedio 3 veces por mes.

### **9.1      Distribución de Cloro según E.A.A.B.**

---

Con ayuda del Laboratorio Central de Aguas Blancas de la E.A.A.B. se obtuvo la información correspondiente a 12 pilas de medición para el año 2002, desde Enero a Septiembre, y en algunos casos, debido a la gran cantidad de información resultado de la alta frecuencia de muestreo, se tienen datos para los últimos seis meses (Abril, Mayo, Junio, Julio, Agosto, Septiembre). Además, se obtuvieron otros valores promedio para varias pilas de medición distribuidas por toda Bogotá. En total se analizaron 38 pilas de la E.A.A.B. Ver Tabla 9 y Tabla 10, Anexo 2.

La distribución de las 38 pilas analizadas se muestra en el Plano 2, Anexo 4. Los valores del cloro residual libre y pH para cada una de las 12 pilas, corresponden a las Figuras 1 a 24, Anexo 1.





Debido a la dificultad que genera tratar de mantener valores constantes de cloro en la red de distribución, se ha optado por asegurar unos valores mínimos en la red, estos límites son establecidos por el Decreto 475 de 1998 y constituyen la mejor forma de monitorear la calidad del agua en lo referente a cloro residual. El límite inferior se establece en 0.2 mg/L de cloro residual libre y el superior en 1.0 mg/L, estos límites son un poco bajos en comparación con valores de otros países, pero cumplen con las normas mínimas sanitarias del país.

El análisis de las figuras muestra una serie de picos distribuidos temporalmente en intervalos más o menos homogéneos de 30 días, se podría suponer que el decaimiento del cloro residual libre no sigue ningún patrón y es imposible explicar su comportamiento, y aunque es una afirmación válida, los picos se explican por las cantidades de cloro que se agregan en las plantas de tratamiento durante el proceso de desinfección, así, se monitorea continuamente el agua efluente de las plantas y su comportamiento en la red, si se nota un decaimiento por debajo de la norma, se aumenta la cantidad de cloro agregado al agua, si este decaimiento no es significativo, probablemente el déficit se habrá cubierto la próxima vez que se realice el muestreo.

Este proceso está basado en la experiencia adquirida y el conocimiento de las redes. Debido a la falta de la implementación de programas que modelen calidad del agua y optimicen los procesos de potabilización del agua en Bogotá, no ha sido posible mantener un control más real del comportamiento del cloro residual en la red.

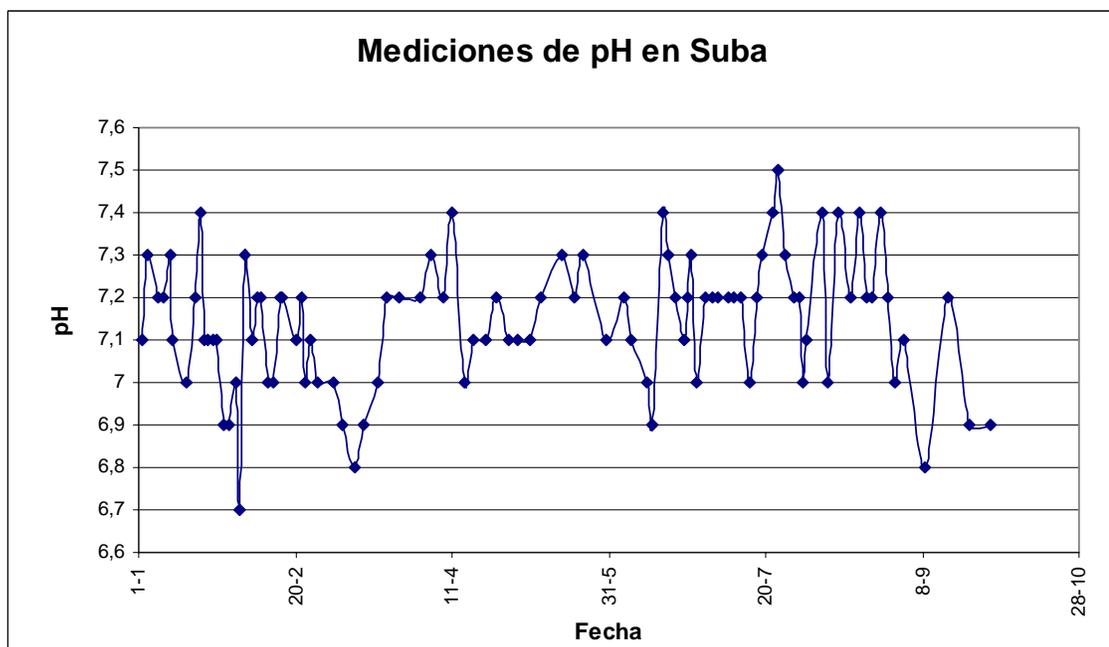
Como parámetro de control del agua también se estudió el potencial de Hidrógeno característico; su comportamiento es un factor importante que debe ser necesariamente monitoreado. Un aumento o una disminución elevada en su valor, podría hacer reaccionar diferentes compuestos presentes en el agua y dar pie a nuevos compuestos no deben estar presentes en el agua.



Aunque este no es un estudio detallado del comportamiento del pH en el agua, fue necesaria la realización de una caracterización de las aguas muestreadas según este. El proceso se hizo necesario dado que el método de muestreo utilizado (Titulométrico con FAS) requiere que los valores de pH se mantengan entre 6.5 y 7.5.

Los valores de pH medidos por la E.A.A.B. no presentan mayores variaciones, se podría establecer el rango entre 6.7 y 7.5, lo cual es un rango muy pequeño si tenemos en cuenta que el pH de una solución puede variar muy fácil ante la presencia de cualquier otro agente que la reduzca o la oxide.

Para nuestro ejemplo, Suba, las variaciones de pH fueron mínimas (Figura 9-2), se movieron en el rango establecido previamente, al igual que la mayoría de pilas. Ver Anexo 1.





---

## **9.2 Comparación valores E.A.A.B. con valores obtenidos en la red de distribución antes de los Tanques**

---

Para la comparación de los valores de cloro residual medidos antes de los Tanques de almacenamiento y los medidos por la E.A.A.B., se asignaron los sitios de muestreo a las pilas de medición de la E.A.A.B. más cercanas. El criterio para realizar la asignación se basó en el análisis de las rutas de flujo del agua en la red de distribución distrital, teniendo en cuenta su lugar de procedencia<sup>6</sup>, ya que se espera un mayor decaimiento del cloro a medida que el agua permanece más tiempo en la red.

Según esto, se eligieron 17 pilas de medición, las más cercanas a cada uno de los puntos de muestreo, posteriormente se asignó cada uno de los 30 puntos a su pila correspondiente. Estos resultados se muestran en la Tabla 11, Anexo 2 y se ilustran en el Plano 3, Anexo 4.

De la Figura 25 a la 41, Anexo 1, se comparan las mediciones de cloro residual en la red; el rombo azul corresponde a las mediciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación y el cuadrado rosado son los valores promedio de cloro residual medidos por la E.A.A.B durante un período de tiempo considerable, relativo a la frecuencia de muestreo para cada pila.

Se puede observar que solo tres mediciones realizadas antes de los tanques coincidieron con las mediciones de las pilas; La Perseverancia, Quiroga y el Parque Nacional presentan errores muy bajos en comparación con las otras pilas de medición. La tendencia de los resultados es a ser superior a los medidos por la Empresa, pero no sigue ningún patrón. Las diferencias entre mediciones varían entre 0.2 y 0.4 mg/ L para la mayoría de las pilas, con algunas excepciones como la

---

<sup>6</sup> Manual de Operación de la Red Matriz de Bogota: Hacia un sistema experto. Mauricio Velastegui Torres. Carlos Eduardo Rivera. Noviembre de 2002.



pila de Villa del Prado y la Pila de Bulevar Niza, que presentan valores superiores a 0.6 mg/L .

Estas diferencias entre valores de Cloro residual en la red y las mediciones, se representan gráficamente mediante el uso de curvas de isocloración, estas curvas muestran la distribución del cloro residual en la red y se asemejan a unas curvas de nivel sobre el terreno. Estas curvas se trazaron para la serie de valores promedio de la E.A.A.B. y para los valores medidos antes de los tanques y después de ellos. Ver Planos del 4 al 8, Anexo 4.

Como se puede ver en los planos, no es posible establecer alguna relación entre los datos medidos en los Tanques y los valores recolectados por la E.A.A.B. Los valores comparados son muy diferentes, y las curvas encontradas no son similares. Se esperaban ciertas diferencias entre curvas, pero siempre tratando de buscar un patrón, en este caso los planos no se pueden comparar entre si, cada uno representa una distribución de cloro residual diferente en la ciudad según sea el caso específico analizado.

No se puede explicar exactamente el por qué de las variaciones en la concentración de cloro residual, pero se puede afirmar que parte de la razón se encuentra en los grandes errores que se cometen durante la realización de los muestreos, errores en el desarrollo del método, la falta de características físicas óptimas en las redes de distribución que eviten la presencia de interferencias. Factores ajenos al proceso del agua, como la hora a la que se tomaron las muestras y el día específico en que se realizó el muestreo, también tienen un efecto directo sobre los resultados.

Todas estas variables son importantes en la disminución del error. Como se explicó anteriormente en el Capítulo 5, el cloro residual es un compuesto volátil afectado fácilmente por las características físicas y químicas del medio.



---

### **9.3 Valores de Concentraciones de Cloro después de los Tanques de Almacenamiento**

---

Los valores de las concentraciones de cloro residual obtenidos en la red interna de los usuarios son muy bajos en comparación con las concentraciones en la red de distribución distrital. Se tiene un decaimiento promedio de 0.6 mg/l; según esto, es posible que el agua en las redes internas de los usuarios se encuentre más expuesta a agentes patógenos que puedan contaminarla. Esta contaminación es producto de la falta de un nivel aceptable de cloro residual

Aunque los valores de cloro residual obtenidos se encuentran dentro de los rangos establecidos por la Ley<sup>7</sup>, la pérdida en cloro residual, ocasionada por factores controlables, es muy grande. La E.A.A.B., no tiene control sobre la calidad del agua en las redes internas de los usuarios; por esta razón, no fue posible realizar una comparación entre mediciones similar a la que se hizo para la red de distribución distrital.

El Plano 7, Anexo 4, muestra la distribución del cloro residual en la red interna de los usuarios.

---

<sup>7</sup> Decreto 475 de 1998



---

## **Capítulo 10 CONCLUSIONES**

---

Los valores de cloro residual libre en la red de distribución distrital son aceptables y se mantienen dentro de rangos aceptables. Se puede afirmar que la calidad del agua en la ciudad es muy alta, ya que se mantiene un control estricto sobre esta por parte de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá.

El agua que se consume en las casas proviene de los tanques de almacenamiento domiciliarios; existe gran probabilidad de que esta agua sea de mucha menor calidad en comparación con la que viene directamente de la red de distribución distrital, ya que se espera que su concentración de cloro residual sea mucho menor que el valor inicial controlado, debido a la cantidad de tiempo del agua en la red.

Es probable una disminución en las concentraciones de cloro residual en el agua, una vez esta ha pasado por los tanques. La idea es minimizar dicha disminución mediante la optimización de los factores que influyen directamente en este proceso. Esta labor no es fácil, comenzando por la dificultad que existe en la modelación del cloro, su comportamiento y distribución es muy variable.

Los tanques domiciliarios analizados son, en su mayoría, muy grandes, y su uso no se restringe a la ganancia en presión para pisos superiores, sino también, se utilizan como lugar de almacenamiento. Este resultado se puede extender a toda la ciudad; por esta razón, es imposible para la entidad encargadas de la potabilización del agua, mantener unos estándares de calidad mínimos en la red de distribución interna de los usuarios.

Según los análisis estadísticos realizados en el Capítulo 8, la variable más importante en el decaimiento del cloro es el Tiempo de Retención Hidráulico; este resultado era esperado, ya que largos tiempos generan estancamiento del agua y la existencia de grandes áreas superficiales, por los grandes volúmenes, influyen en la rápida volatilización del cloro.



También se encontró que el tiempo de lavado de los tanques no influye drásticamente en el decaimiento del cloro residual. Este resultado es interesante, ya que a esta variable se le atribuyen todos los problemas del agua. La última campaña de la Empresa de Acueducto y Alcantarillado en esta área, se basa en la idea de tomarse el agua directamente de la red siempre y cuando exista un lavado periódico de los tanques de almacenamiento; lo cierto es que en algunos de los sitios muestreados se encontraron valores de cloro residual muy bajos e tanques lavados recientemente, un mes en promedio. Esto ratifica la preponderancia de la variable TRH sobre las otras.

Se puede afirmar que los materiales de los tanques tampoco tienen gran influencia en el decaimiento; es necesario revisar nuevamente el análisis utilizando mayor cantidad de datos, ya que la mayoría de los tanques analizados se encuentran contruidos en concreto y no hay una representatividad muy alta de los otros materiales (PVC y Asbesto-Cemento). La edad de los tanques está muy relacionada con el material, aunque en el análisis no se dio ninguna multicolinealidad, ya que se espera que a medida que pase el tiempo y aumente el uso de los tanques, los materiales se vayan desgastando y contaminen el agua, por lo que existiría un aumento en el decaimiento del cloro, aún así, los tanques analizados no mostraron gran afectación por esta variable.

Finalmente, como una ayuda al mejoramiento de la calidad del agua en la red de distribución interna del usuario, se recomienda una optimización del diseño hidráulico de los tanques, ya que la forma como fluye el agua a través de estos, genera zonas muertas que contribuyen enormemente a su estancamiento, y en consecuencia, generan una disminución de los valores de cloro residual y por consiguiente una disminución de la calidad del agua.

Mientras se desarrollan diseños de tanques hidráulicamente eficientes, se debe tratar de disminuir el tamaño de los tanques; como se explicó anteriormente, una disminución en el volumen de los tanques se traduciría en una disminución del TRH, ya que no se presentan mayores variaciones en los caudales de consumo.



## **REFERENCIAS**

Reporte del la E.A.A.B. *Requisitos de los instrumentos para la medición del cloro residual libre*. NP-052. 16 de Junio de 2000.

Reporte del la E.A.A.B. *Calidad del agua potable*. NS-067. 24 de Octubre de 2001.

Reporte del la E.A.A.B. *Preparación, manipulación de reactivos*. NS-070. 24 de Junio de 2001.

Reporte del la E.A.A.B. *Mediciones de Agua Potable, definiciones y clasificación*. NT-001. 16 de Junio de 2000.

Proyecto de la E.A.A.B. *Historia y evaluación del agua potable en la ciudad de Bogotá*. 1992.

MARIA L. CASTRO. *Uso del cloro para la desinfección del agua para consumo*. 1992.

MINISTERIO DE SALUD. *Decreto número 475: Por el cual se expiden las normas técnicas de calidad del agua potable*. 1998.

ROSSMAN LEWIS A. CLARK ROBERT M. GRAYMAN WALTER M. Modeling Chlorine Residuals in Drinking Water Distribution Systems Journal of environmental Engineering, vol 120, No. 4.

ARBOLEDA JORGE. *Teoría y práctica de la desinfección del agua*. Acodal 1992.

AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION. *Water quality and Treatment*. Fourth Edition.



---

FABIO PARDO. Tesis - Optimización del Cloro Residual en la Red de Acueducto de Bogotá. Universidad de los Andes. 2001.

MAURICIO VELASTEGUI – CARLOS RIVERA. Tesis - Manual de operación de la red matriz de Bogotá: Hacia un Sistema Experto. Noviembre de 2002.



## ***Anexo 1 - Figuras***



Las figuras presentadas a continuación (1 a 24) ilustran los valores de cloro residual y pH medidos por la E.A.A.B. en diferentes pilas ubicadas en diferentes puntos de la ciudad de Bogotá. El intervalo de tiempo utilizado varía de pila a pila, esto se debe a las diferencias en las frecuencias de medición:

FIGURA 1

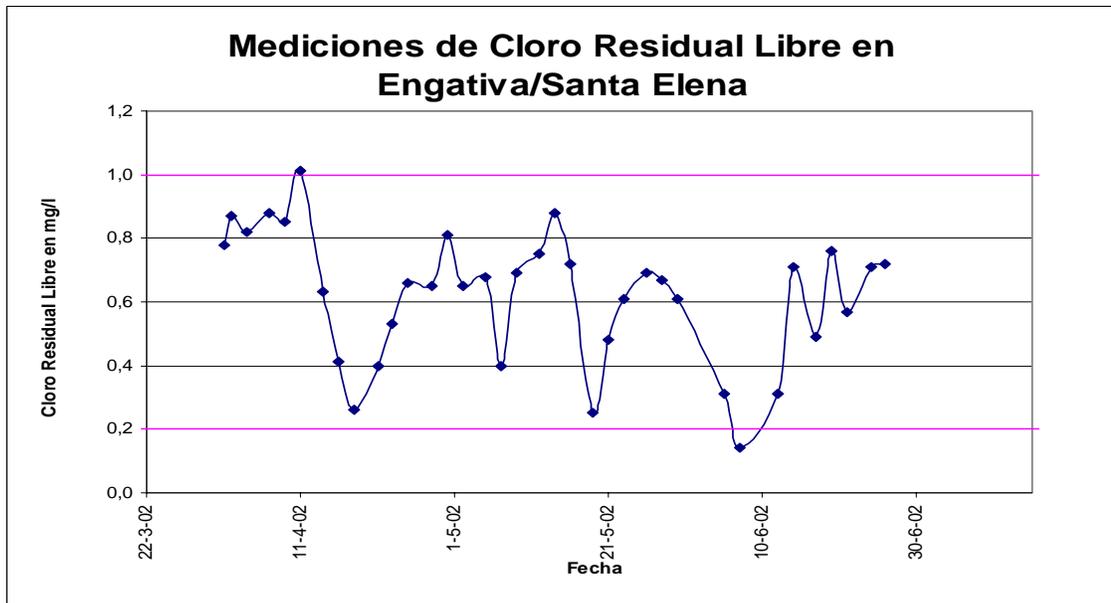


FIGURA 2

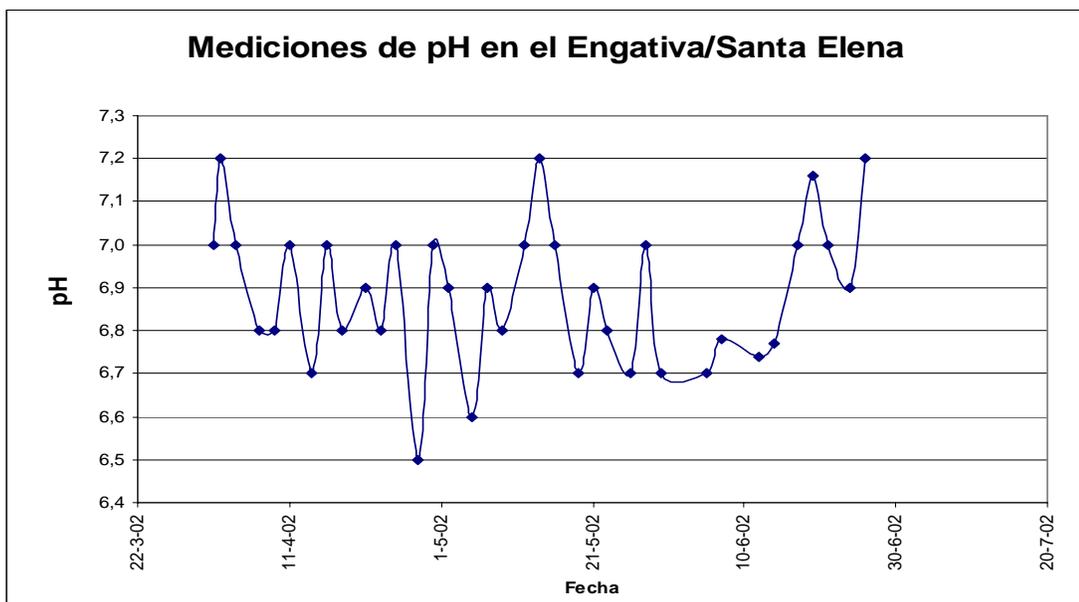




FIGURA 3

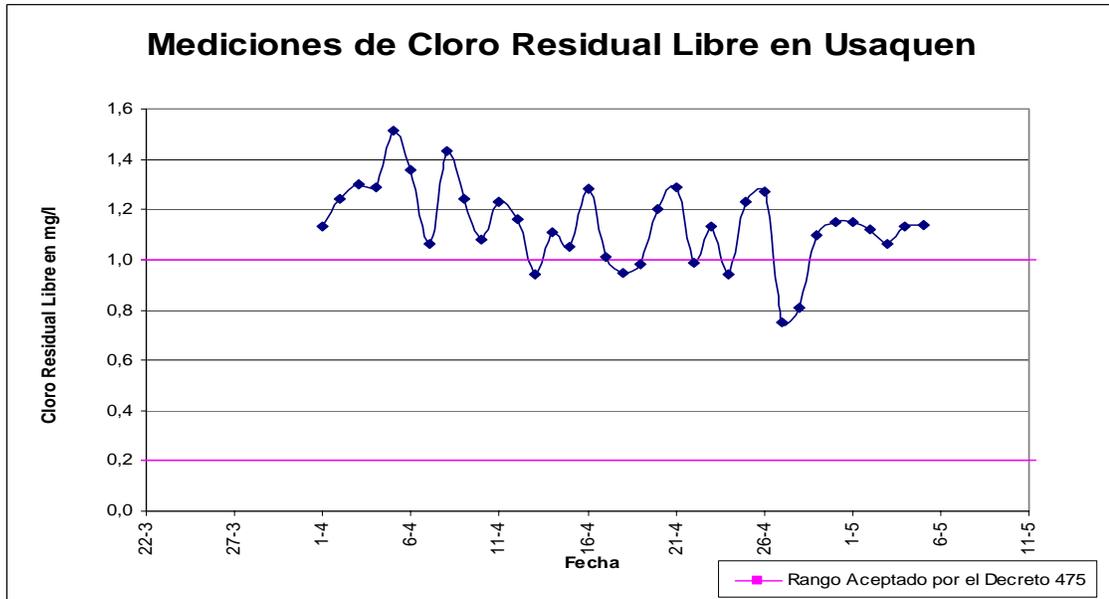


FIGURA 4

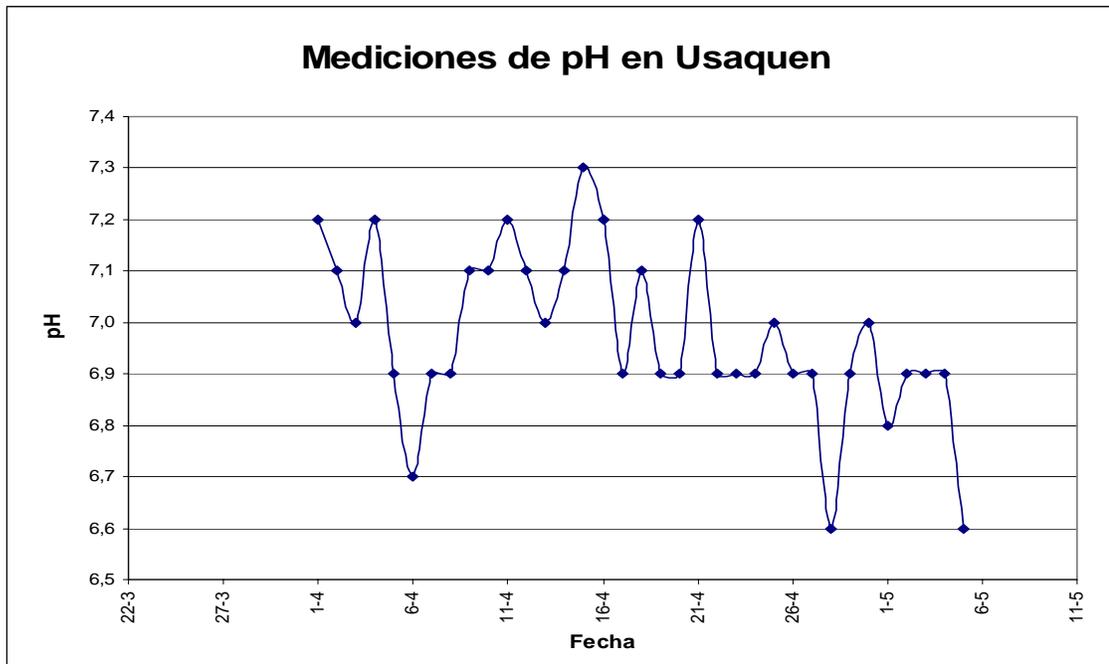




FIGURA 5

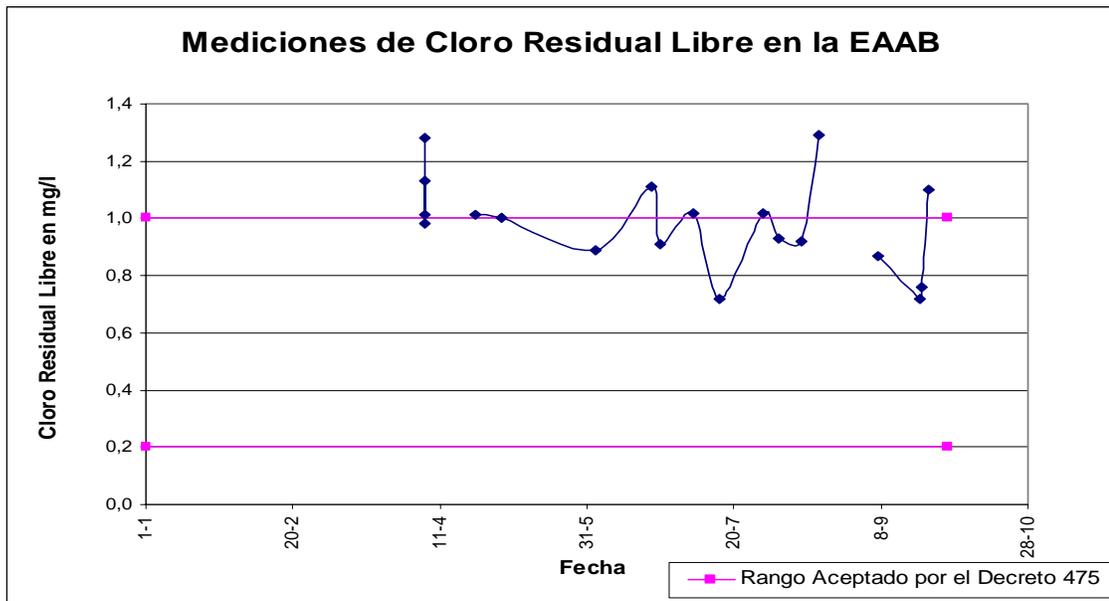


FIGURA 6

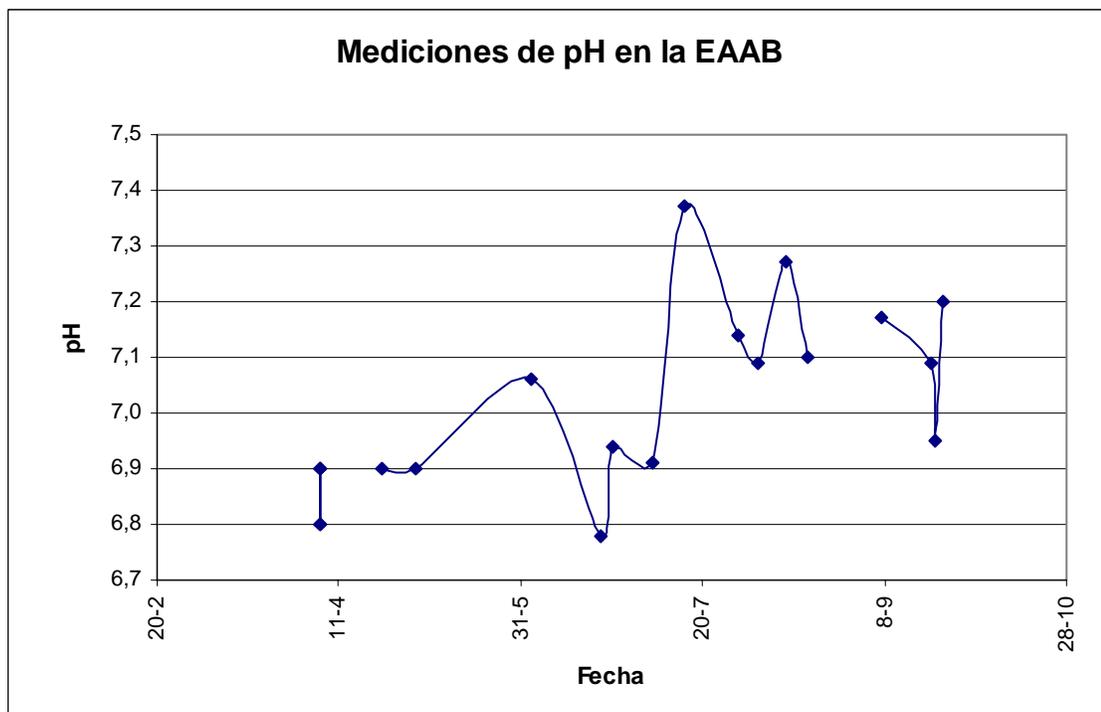




FIGURA 7

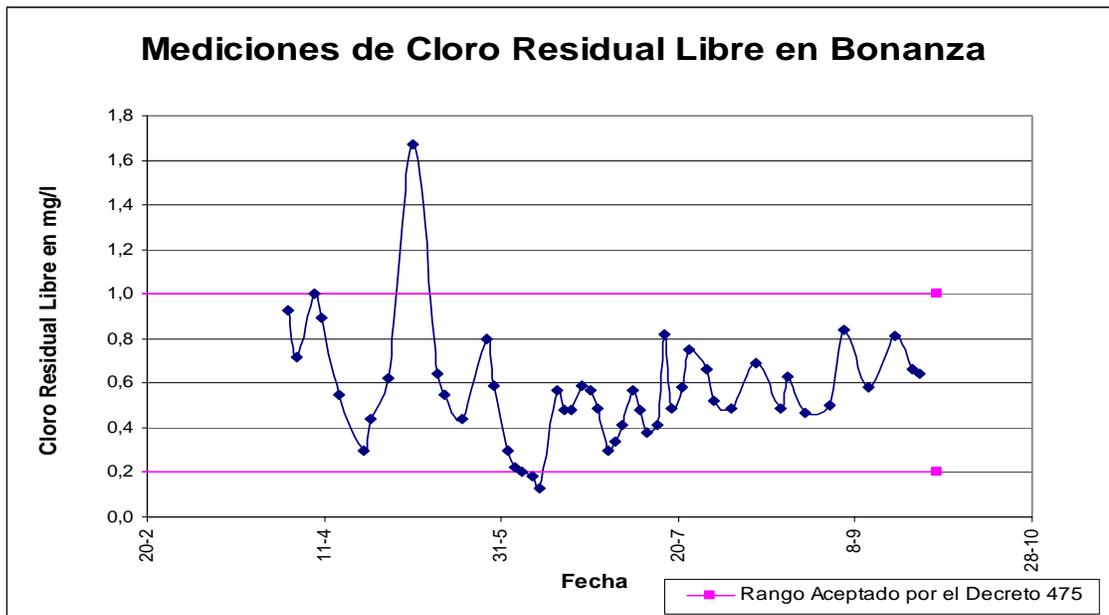


FIGURA 8

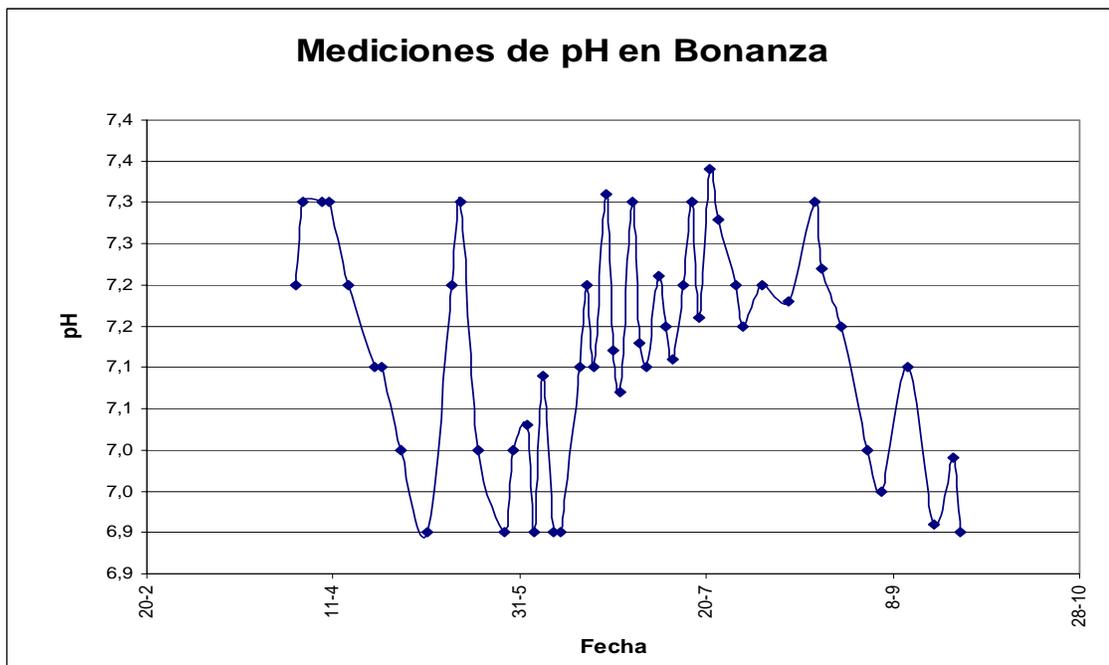




FIGURA 9

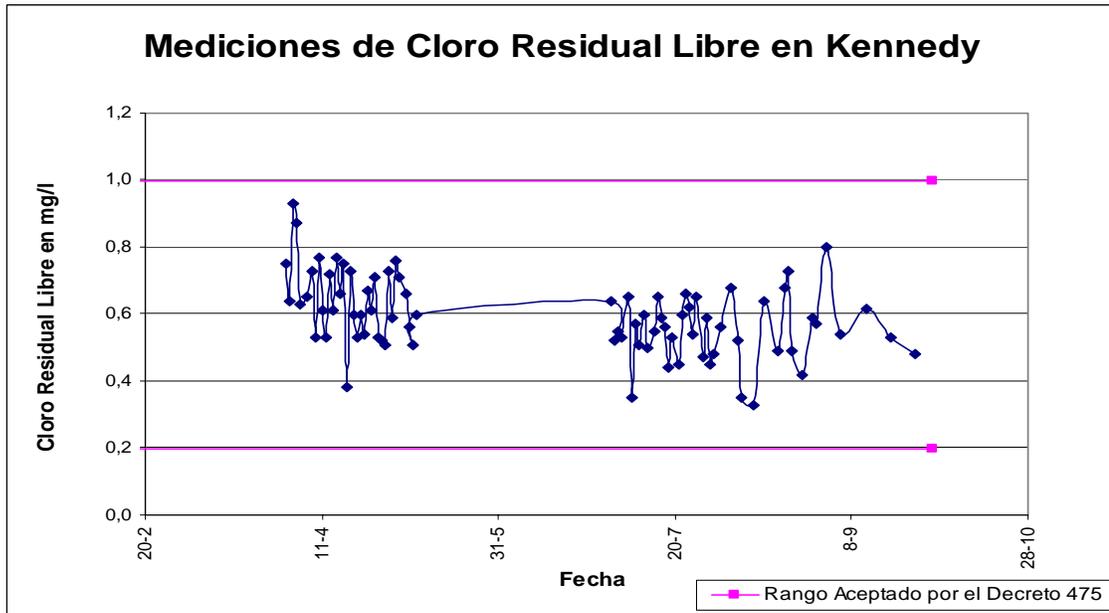


FIGURA 10

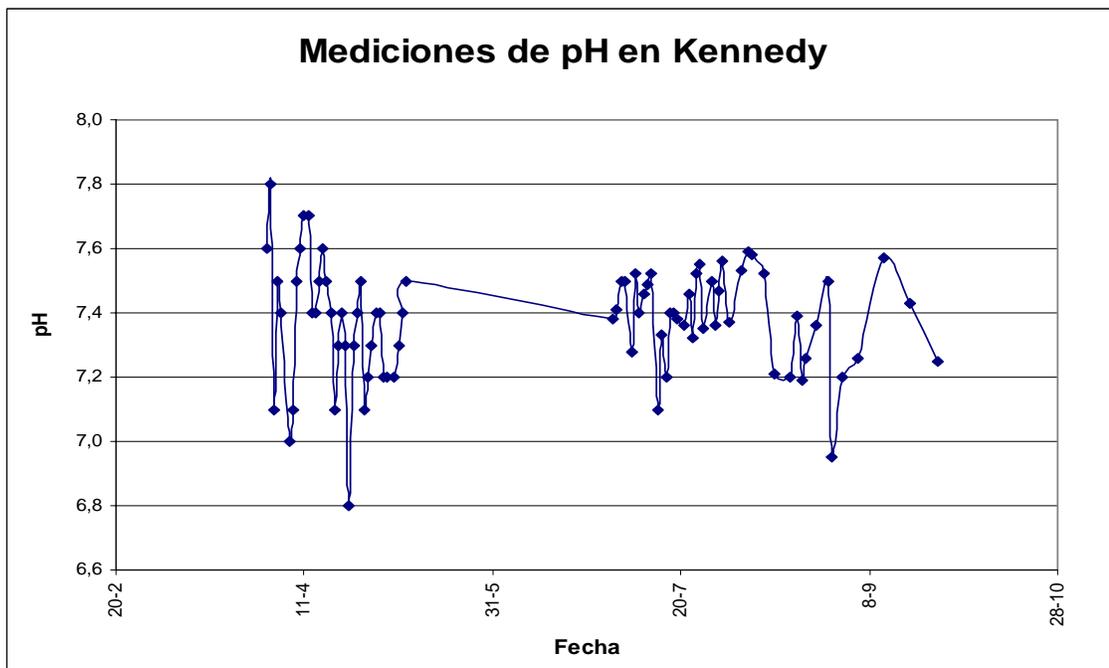




FIGURA 11

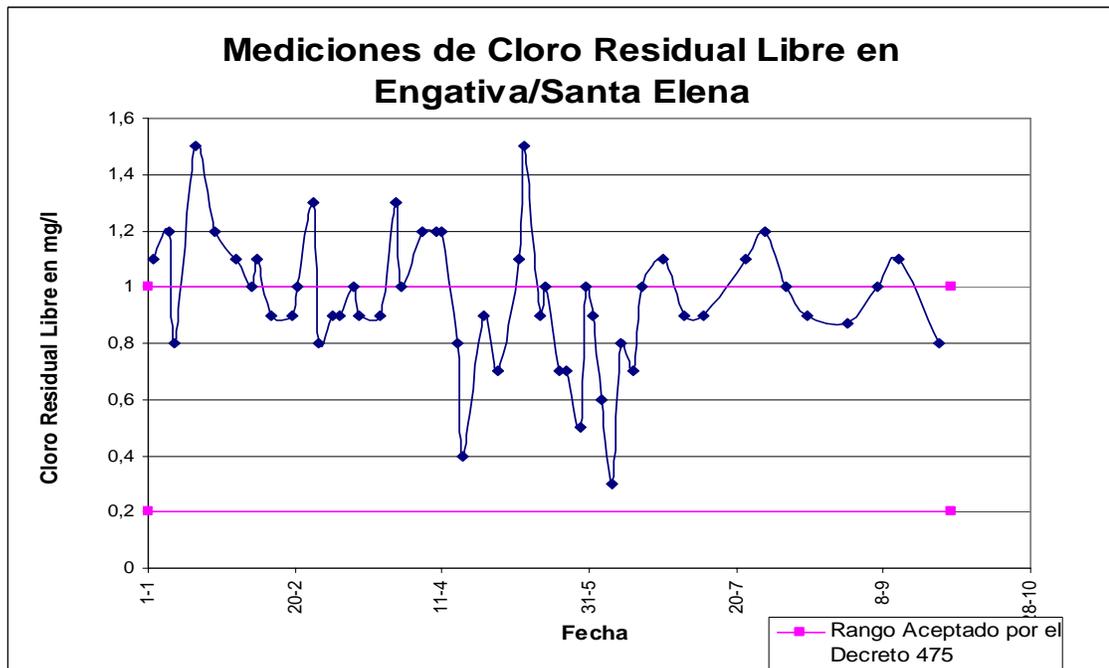


FIGURA 12

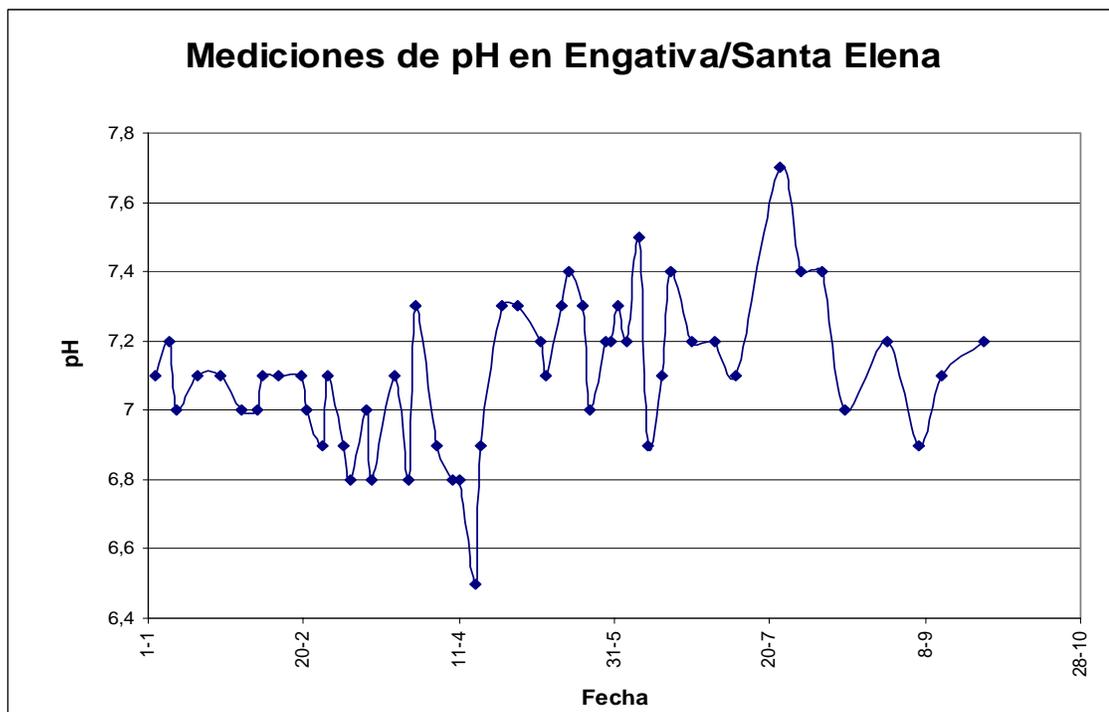








FIGURA 17

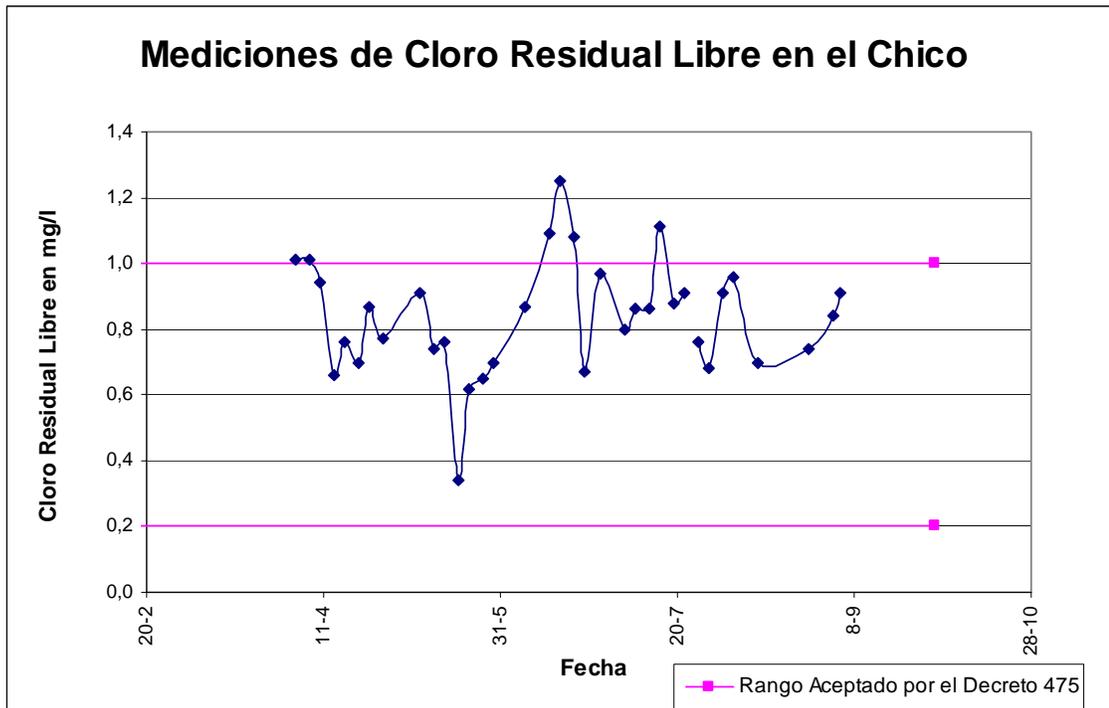


FIGURA 18

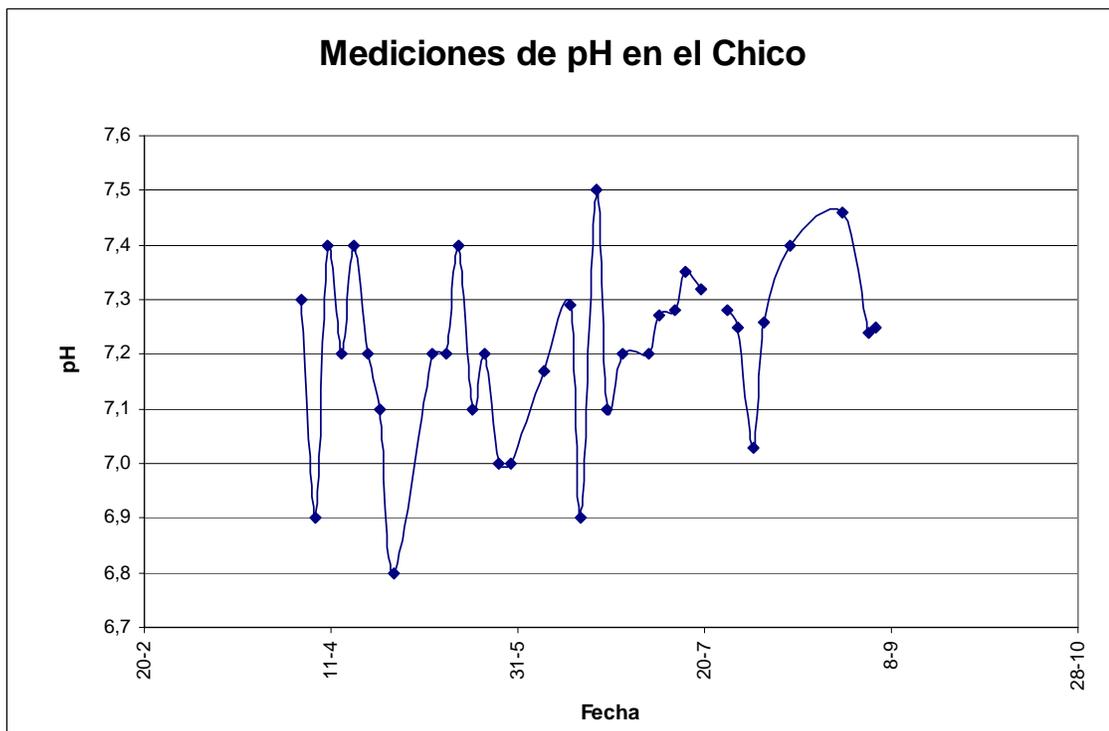






FIGURA 21

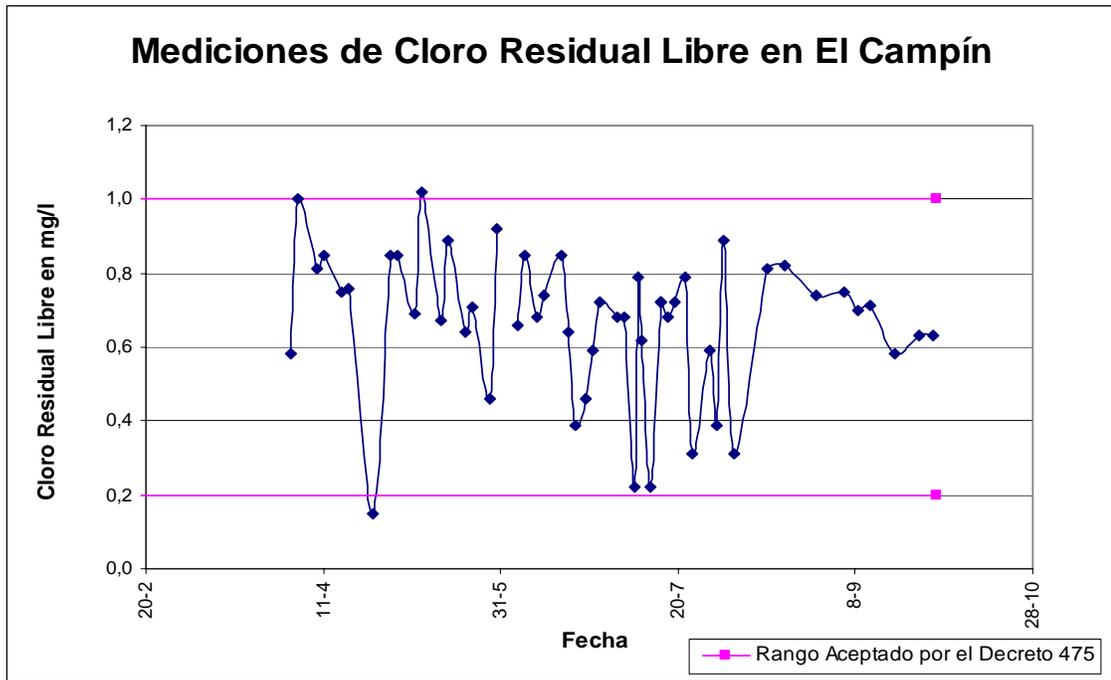
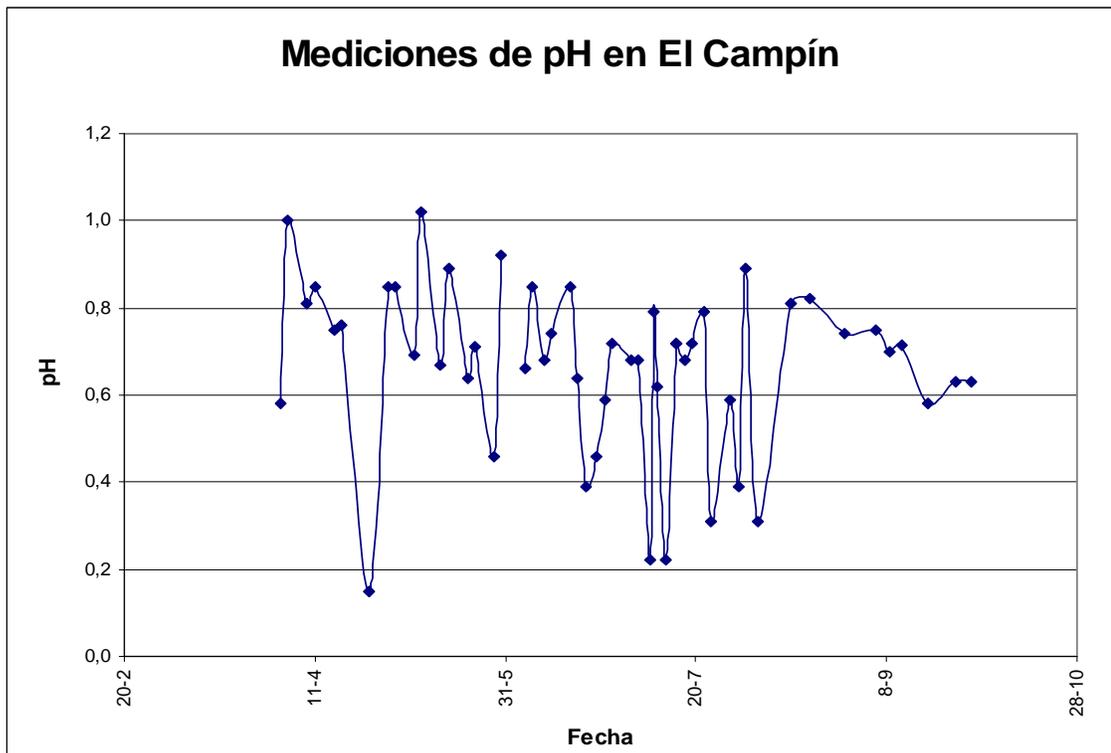


FIGURA 22







En las siguientes figuras se compara las mediciones de cloro residual en la red; el rombo azul corresponde a las mediciones realizadas durante el desarrollo de esta investigación y el cuadrado rosado son los valores promedio de cloro residual medidos por la E.A.A.B durante un período de tiempo considerable, relativo a la frecuencia de muestreo para cada pila. En algunos puntos se tienen más de dos rombos azules, esto se debe a una asignación de varios tanques medidos a una misma pila.

FIGURA 25

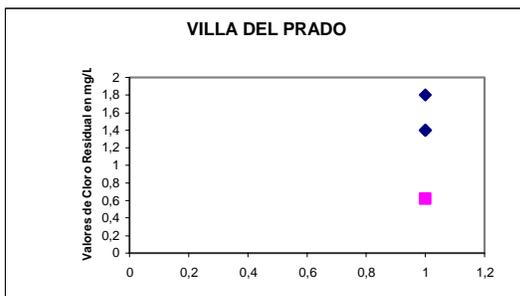


FIGURA 26

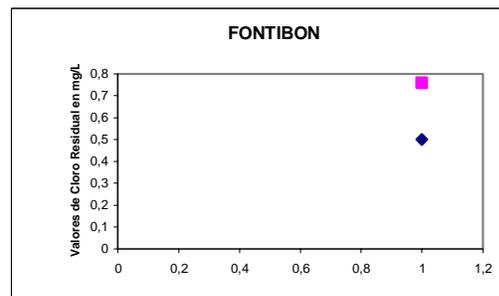


FIGURA 27

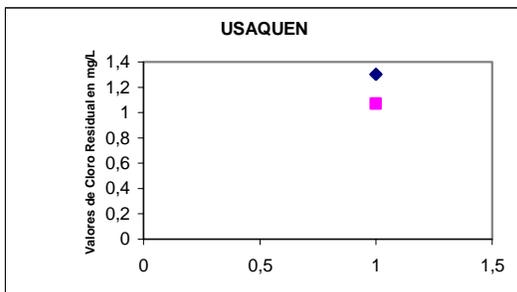


FIGURA 28

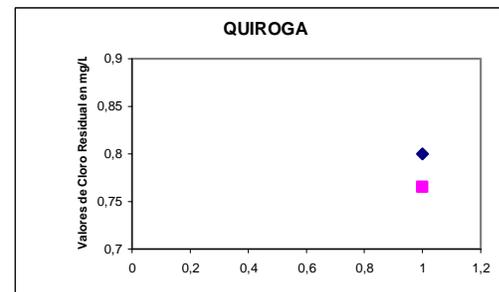


FIGURA 29

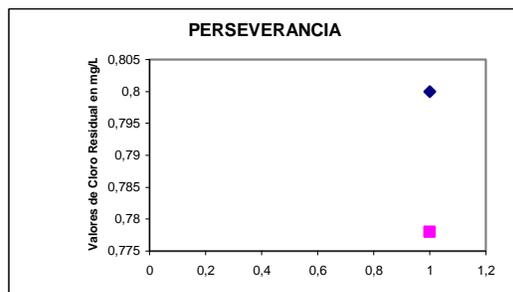


FIGURA 30

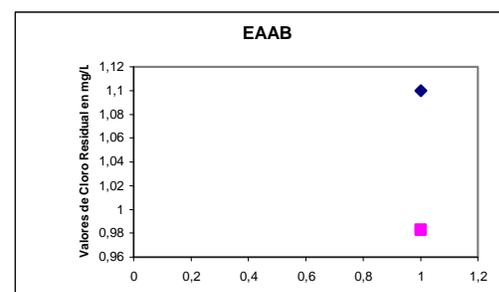




FIGURA 31

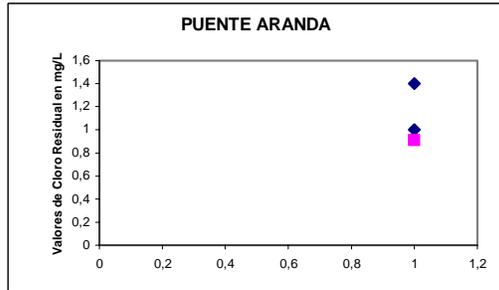


FIGURA 32

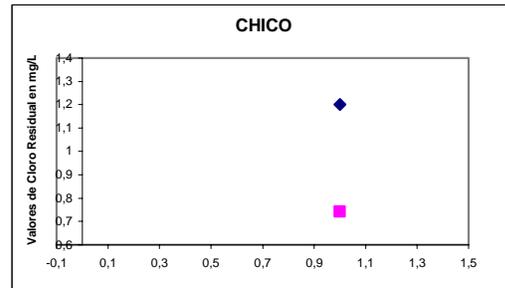


FIGURA 33

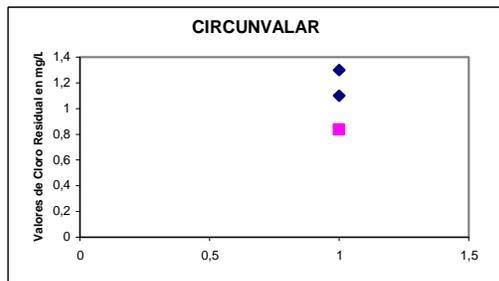


FIGURA 34

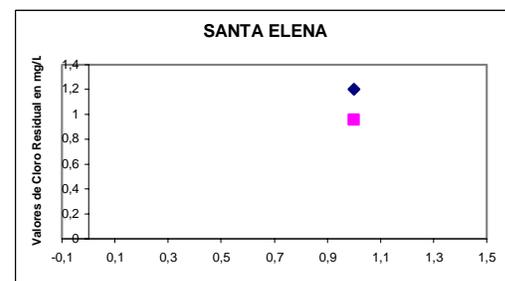


FIGURA 35

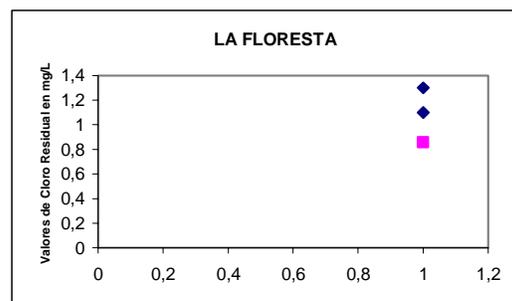


FIGURA 36

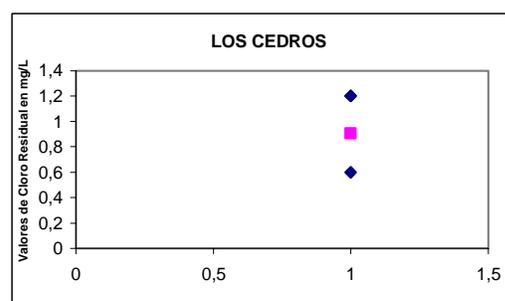




FIGURA 37

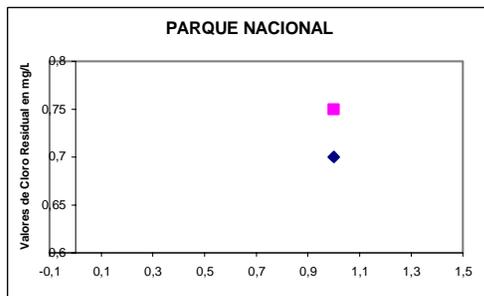


FIGURA 38

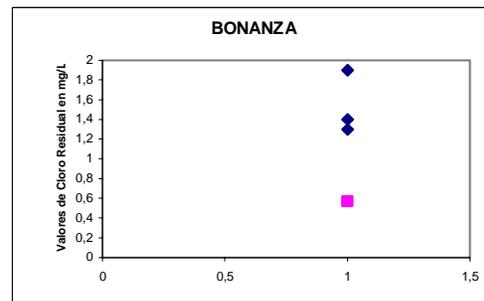


FIGURA 39

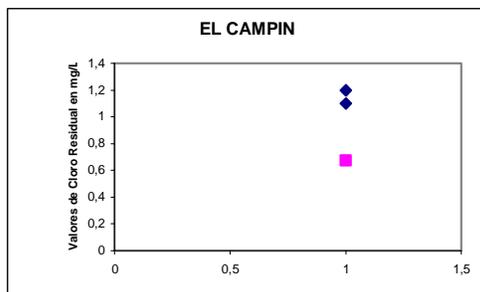


FIGURA 40

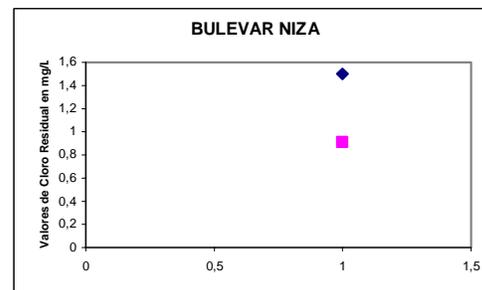
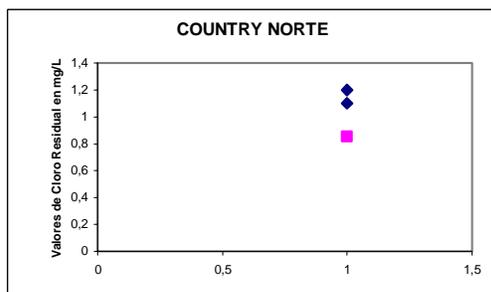


FIGURA 41





## ***Anexo 2 - Tablas***



**Tabla 1**

**UBICACIÓN DE LOS SITIOS DE MUESTREO ESCOGIDOS**

ID	DIRECCIÓN	COORDENADAS	
		X	Y
1	Tr 6 125-40 T-4	105527,6	111416,2
2	CI 77A 68C-16	98828,7	110398,7
3	CI 106B 43A-50	101144,7	110846,7
4	CII 100 17-76	102977,9	109961,7
5	Cr 7a. 43-33	101381,6	103817,8
6	CI 45 38A-16	99109,24	105350,8
7	CI 22 F 35-41 I	99030,33	103416,4
8	Cra. 4a. 18-50	100972,1	100730,1
9	CII 59A No. 75A-31	96802,67	108902,3
10	Carrera 47A # 186-35	103414,8	119078,2
11	Carrera 49#119-49	101069,8	121851
12	Carrera 31#126-65	102891,4	112289,2
13	Carrera 8A#99-54	104148,3	109321,7
14	Carrera 20 # 85 - 52	102437,3	108840,3
15	Calle 115#37-40	102023,2	111453,8
16	KR068D #041-50	96280,92	106363,3
17	Calle 39 # 77C-90	95053,83	108067,3
18	Calle 73#99B-21	95874,86	112093,7
19	Calle 108A#16-42	103530,20	110641,50
20	Calle 64 # 4-18	101841,5	105222,3
21	Carrera 154 A #136A-65	101330,3	114751
22	Calla 7 A # 89A - 76	92457,63	104790,3
23	Calle 52 A# 24C - 41	93379,01	97699,74
24	Calle 169#35-28	104187,7	116756
25	Calle 173#47-41	103049,2	117525
26	Diagonal 145#31A-40	103884,5	114550,3
27	Carrera 26#58-56	100383,7	106060,3
28	KR002 E #070A-47	103013	106363,3
29	Diagonal 152 # 42-04	100177,2	109187,2
30	Ave 81 # 48-95	102677,3	115406,3



Tabla 2

FORMATO PARA LA REALIZACIÓN DE PRUEBAS

GENERAL		INFORMACIÓN SOBRE TANQUES							MEDICIONES DE CLORO RESIDUAL					
ID	DIRECCIÓN	TIPO DE VIVIENDA (edificio o casa)	ELEVADO (0)	SUBTERRÁNEO (1)	MATERIAL DEL TANQUE	EDAD (AÑOS)	NÚMERO DE APTOS	VOLUMEN (M3)	TIEMPO DE LAVADO EN MESES	pH	EN LA RED MUNICIPAL	pH	DESPUÉS DEL TANQUE	HORA DE REALIZACIÓN DEL ENSAYO
1	Tr 6 125-40 T-4 App 502													
2	Cl 77A 68C-16													
3	Cl 106B 43A-50 Ap 501													
4	Cll 100 17-76													
5	Cr 7a. 43-33 Ap 906													
6	Cl 45 38A-16 Int. 1 Ap 101													
7	Cl 22 F 35-41 Int. 2 Ap. 202													
8	Cra. 4a. 18-50 Ap 1607													
9	Cll 59A No. 75A-31													
10	Carrera 47A # 186-35													
11	Carrera 49#119-49													
12	Carrera 21#126-65													
13	Carrera 8A#99-54													
14	Calle 86 con 20													
15	Calle 115#37-40													
16	Calle 68 con 49 (salitre)													
17	Ave 24 # 77C-90													
18	Calle 73#99B-21													
19	Calle 108A#16-42													
20	Calle 64 con 5													
21	Carrear 154 A #136A-65 Int 3													
22	Calla 7 A # 89A - 76 Apto 5012A													
23	Calle 52 A# 24C - 41													
24	Calle 169#35-28													
25	Calle 173#47-41													
26	Diagonal 145#31A-40													
27	Carrera 26#58-56													
28	Calle 70 con primera													
29	Diagonal 152 # 42-04													
30	Ave 81 # 48-95													



**Tabla 3**  
**CARACTERÍSTICAS DE LOS TANQUES ANALIZADOS**

ID	DIRECCIÓN	TIPO DE VIVIENDA	ELEVADO (0)	SUBTERRÁNEO (1)	MATERIAL DEL TANQUE	EDAD (AÑOS)	NÚMERO DE APTOS	VOLUMEN (M3)	TIEMPO DE LAVADO EN MESES
1	Tr 6 125-40 T-4	edif		1	Concreto	8	58	50	12
2	CI 77A 68C-16	casa	0		Concreto	20	1	0,5	4
3	CI 106B 43A-50	edif	0	1	Asbesto-Cemento	15	11	32	12
4	CII 100 17-76	edif	0	1	PVC	2	15	50	6
5	Cr 7a. 43-33	edif	0	1	Concreto	10	68	100	6
6	CI 45 38A-16	edif		1	Concreto	10	298	150	9
7	CI 22 F 35-41 I	edif		1	Concreto	11	68	144	12
8	Cra. 4a. 18-50	edif		1	Concreto	26	215	280	6
9	CII 59A No. 75A-31	edif		1	Concreto	5	212	280	12
10	Carrera 47A # 186-35	edif		1	Concreto	10	82	180	24
11	Carrera 49#119-49	edif	0	1	PVC	13	71	40	10
12	Carrera 31#126-65	edif		1	Concreto	6	12	50	24
13	Carrera 8A#99-54	edif		1	Concreto	20	52	40	12
14	Carrera 20 # 85 - 52	edif		1	Concreto	4	13	30	12
15	Calle 115#37-40	edif		1	Concreto	17	41	60	6
16	KR068D #041-50	edif		1	Concreto	10	71	108	12
17	Calle 39 # 77C-90	casa	0		Asbesto-Cemento	8	1	1	96
18	Calle 73#99B-21	casa	0		Concreto	23	1	0,25	60
19	Calle 108A#16-42	edif		1	Concreto	0,5	18	90	0,5
20	Calle 64 # 4-18	edif		1	Concreto	3	41	100	1
21	Carrera 154 A #136A-65	edif		1	Concreto	20	47	45	3
22	Calla 7 A # 89A - 76	edif		1	Concreto	4	242	240	12
23	Calle 52 A# 24C - 41	edif		1	Concreto	15	140	180	12
24	Calle 169#35-28	edif		1	Concreto	5	54,5	120	0,67
25	Calle 173#47-41	casa	0		Asbesto-Cemento	24	1	0,5	4
26	Diagonal 145#31A-40	edif		1	Concreto	17	18	32	1
27	Carrera 26#58-56	edif		1	Concreto	8	11	5,625	12
28	KR002 E #070A-47	edif		1	Concreto	9	20	75	6
29	Diagonal 152 # 42-04	edif		1	Concreto	15	211	240	6
30	Ave 81 # 48-95	edif		1	PVC	20	111	240	1



Tabla 4

VALORES DE CLORO Y PH PARA LOS SITIOS MUESTREADOS

ID	DIRECCIÓN	CLORO LIBRE				
		pH	EN LA RED MUNICIPAL	pH	DESPUÉS DEL TANQUE	Hora
1	Tr 6 125-40 T-4	7-8	1,3	7-8	0,9	9:00
2	CI 77A 68C-16	5,8	1,4	5,8	0,9	9:25
3	CI 106B 43A-50	6-7	1,1	6-7	0,3	10:30
4	CII 100 17-76	6-7	1,2	6-7	0,1	11:20
5	Cr 7a. 43-33	7-8	0,7	6-7	0,5	7:45
6	CI 45 38A-16	5-6	1,1	5-6	0,5	9:00
7	CI 22 F 35-41 I	6-7	1,1	6-7	0,4	8:00
8	Cra. 4a. 18-50	6-7	0,8	6-7	0,05	10:45
9	CII 59A No. 75A-31	6-7	1,3	6-7	0,8	8:15
10	Carrera 47A # 186-35	7-8	1,4	5-6	0,4	8:15
11	Carrera 49#119-49	6-7	1,5	6-7	0,9	9:45
12	Carrera 31#126-65	6-7	1	6-7	0,2	9:30
13	Carrera 8A#99-54	6-7	1,2	6-7	0,6	10:55
14	Carrera 20 # 85 - 52	6-7	1,1	6-7	1	7:00
15	Calle 115#37-40	6-7	1,3	6-7	0,2	12:00
16	KR068D #041-50	6-7	1,4	6-7	1	11:30
17	Calle 39 # 77C-90	6-7	0,5	6-7	0,1	12:35
18	Calle 73#99B-21	6-7	1,2	6-7	0,8	11:30
19	Calle 108A#16-42	6-7	1,3	5-6	0,5	11:00
20	Calle 64 # 4-18	6-7	1,1	7-8	0,1	8:15
21	Carrera 154 A #136A-65	5-6	1,2	5-6	0,7	9:15
22	Calla 7 A # 89A - 76	6-7	1	6-7	0,6	1:15
23	Calle 52 A# 24C - 41	6-7	0,8	6-7	0,2	11:45
24	Calle 169#35-28	6-7	1,4	6-7	0,8	7:30
25	Calle 173#47-41	6-7	1,8	6-7	1,3	7:15
26	Diagonal 145#31A-40	5-6	1,2	5-6	0,7	9:15
27	Carrera 26#58-56	7	1,2	7	0,8	11:30
28	KR002 E #070A-47	7	1,3	7-8	0,4	8:45
29	Diagonal 152 # 42-04	7	1,9	7	1,5	8:25
30	Ave 81 # 48-95	5-6	0,6	5-6	0,1	12:00



**Tabla 5**

**CÁLCULO DE CAUDALES DE CONSUMO EN M3/DIA PARA CADA TANQUE MUESTREDO**

DIRECCION	CICLO	ULT-CMO	CMO-VIG2	CMO-VIG3	CMO-VIG4	CMO-VIG5	CMO-VIG6	CMOHIST	PROMEDIO
TV006 #125-40	VN	51,650	48,483	43,917	50,817	47,483	53,933	46,150	49,381
CL077A #068C-16	TN	1,133	1,283	1,000	1,050	0,817	0,950	1,117	1,039
CL106B #043A-50	QN	4,550	4,367	4,117	3,600	2,900	4,117	4,150	3,942
CL045 #038A-16	PN	142,967	144,100	138,667	155,800	168,633	144,400	138,383	149,094
CL022F #035-41	RN	21,233	26,317	26,500	31,317	27,533	26,783	25,817	26,614
CL059A #075A-31	AN	43,254	76,661	69,661	74,797	73,881	72,424	72,000	68,446
KR047A #186-35	TN	19,050	21,700	32,567	34,050	35,167	32,750	34,317	29,214
CRA 49 N 119 49	RN	34,600	35,167	34,167	34,233	32,800	39,767	35,033	35,122
KR020 #085-52	MN	6,000	5,717	6,567	7,433	8,617	7,733	7,900	7,011
CL115 #037-40	QN	14,117	15,617	14,167	15,133	13,933	14,500	14,700	14,578
KR068D #041-50	PN	36,383	36,733	38,567	40,750	41,300	41,933	39,417	39,278
CL073A #099B-21	FN	0,433	0,467	0,533	0,633	0,500	0,500	0,550	0,511
CL108A #016-42	NN	12,067	0,317	0,350	3,567	0,000	2,117	0,867	3,069
KR054A #136A-65	UN	20,533	17,733	18,017	16,683	18,550	18,150	17,950	18,278
CL007A #084-76	UN	37,517	43,250	42,717	44,517	41,000	43,367	42,617	42,061
CL052A S #024C-41	DN	28,900	37,100	42,683	32,183	32,700	27,883	38,367	33,575
CL169 #035-28	EN	62,300	61,733	61,567	64,150	68,317	64,933	62,300	63,833
CL173 #047-41	SN	0,900	0,850	0,900	0,950	1,050	1,017	0,883	0,944
DG145 #031A-40	CN	3,750	4,267	3,433	3,633	4,300	4,367	4,033	3,958
KR026A #058-56	PN	2,300	0,983	2,517	2,483	2,933	3,183	2,650	2,400
KR002 E #070A-47	SN	12,883	10,450	11,850	11,300	10,433	11,133	12,033	11,342
DG152 #042-04 IN 1	SN	44,767	74,683	73,067	73,583	73,000	74,933	73,033	69,006
AC081 #048-95 IN 1	QN	47,217	55,800	53,617	52,267	52,133	53,000	52,400	52,339
KR007 #043-33	SN	16,683	12,567	17,167	15,867	17,433	14,717	15,300	15,739
KR008A #099-22	VN	10,067	11,617	12,767	12,033	12,633	12,883	12,417	12,000
KR004 #018-50	QN	27,900	35,400	36,167	37,900	35,783	38,083	37,067	35,206
AC100 #017-76	NN	4,117	3,667	4,067	5,267	5,717	5,567	5,767	4,733
CL064 #004-18	VN	2,983	4,633	4,683	5,550	5,533	5,450	4,783	4,806
KR031 #126-65	BN	5,617	6,617	6,100	6,217	6,233	6,533	6,317	6,219
CL039 #077C-90	RN	24,636	14,233	11,983	12,467	13,000	13,133	12,900	14,909



**Tabla 6**

**CÓDIGO DE CICLOS DE MEDICIÓN DE CAUDALES**

<b>CÓDIGO DE CICLO</b>	<b>DÍAS</b>
AN	59
DN	60
K0	60
KN	60
LN	60
MN	60
NN	60
PN	60
QN	60
R	60
RN	60
S	60
S0	60
SN	60
TD	60
TN	60
TY	60
UN	60
VN	60
X	180
Z	30
CN	60
EN	60
FN	60
BN	60



**Tabla 7**  
**VALORES DE LAS VARIABLES**

ID	DELTA DE CLORO (MG/L)	TIEMPO DE LAVADO (MESES)	EDAD DEL TANQUE (AÑOS)	MATERIAL DEL TANQUE	CAUDAL DE CONSUMO M3/DIA	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (V/Q) DÍAS
1	0,4	12	8	0	49,3806	1,0125
2	0,5	4	20	0	1,0389	0,4813
3	0,8	12	15	1	3,9417	8,1184
4	1,1	6	2	2	4,7333	10,5634
5	0,2	6	10	0	15,7389	6,3537
6	0,6	9	10	0	149,0944	1,0061
7	0,7	12	11	0	26,6139	5,4107
8	0,75	6	26	0	35,2056	7,9533
9	0,5	12	5	0	68,4463	4,0908
10	1	24	10	0	29,2139	6,1615
11	0,6	10	13	2	35,1222	1,1389
12	0,8	24	6	0	6,2194	8,0393
13	0,6	12	20	0	12,0000	3,3333
14	0,1	12	4	0	0,0000	4,2789
15	1,1	6	17	0	0,0000	4,1159
16	0,4	12	10	0	39,2778	2,7496
17	0,4	96	8	1	0,0000	0,0671
18	0,4	60	23	0	0,5111	0,4891
19	0,8	0,5	0,5	0	0,0000	5,8643
20	1	1	3	0	4,8056	20,8092
21	0,5	3	20	0	18,2778	2,4620
22	0,4	12	4	0	42,0611	5,7060
23	0,6	12	15	0	33,5750	5,3611
24	0,6	0,7	5	0	63,8333	1,8799
25	0,5	4	24	1	0,9444	0,5294
26	0,5	1	17	0	3,9583	8,0842
27	0,4	12	8	0	2,4000	2,3438
28	0,9	6	9	0	11,3417	6,6128
29	0,4	6	15	0	69,0056	3,4780
30	0,5	1	20	2	52,3389	4,5855



**Tabla 8**  
**VALORES DE K'**

ID	DIRECCIÓN	CONCENTRACIÓN DE CLORO INICIAL	CONCENTRACIÓN DE CLORO FINAL	TIEMPO DE RETENCIÓN HIDRÁULICA (DÍAS)	VALOR DE K'
1	Tr 6 125-40 T-4	1,3	0,9	1,0125	0,43894
2	Cl 77A 68C-16	1,4	0,9	0,4813	1,15432
3	Cl 106B 43A-50	1,1	0,3	8,1184	0,32847
4	Cll 100 17-76	1,2	0,1	10,5634	1,04133
5	Cr 7a. 43-33	0,7	0,5	6,3537	0,06296
6	Cl 45 38A-16	1,1	0,5	1,0061	1,19276
7	Cl 22 F 35-41 I	1,1	0,4	5,4107	0,32343
8	Cra. 4a. 18-50	0,8	0,05	7,9533	1,88601
9	Cll 59A No. 75A-31	1,3	0,8	4,0908	0,15278
10	Carrera 47A # 186-35	1,4	0,4	6,1615	0,40575
11	Carrera 49#119-49	1,5	0,9	1,1389	0,58537
12	Carrera 31#126-65	1	0,2	8,0393	0,49756
13	Carrera 8A#99-54	1,2	0,6	3,3333	0,30000
14	Carrera 20 # 85 - 52	1,1	1	4,2789	0,00000
15	Calle 115#37-40	1,3	0,2	4,1159	0,00000
16	KR068D #041-50	1,4	1	2,7496	0,14547
17	Calle 39 # 77C-90	0,5	0,1	0,0671	0,00000
18	Calle 73#99B-21	1,2	0,8	0,4891	1,02222
19	Calle 108A#16-42	1,3	0,5	5,8643	0,00000
20	Calle 64 # 4-18	1,1	0,1	20,8092	0,48056
21	Carrera 154 A #136A-65	1,2	0,7	2,4620	0,29012
22	Calla 7 A # 89A - 76	1	0,6	5,7060	0,11684
23	Calle 52 A# 24C - 41	0,8	0,2	5,3611	0,55958
24	Calle 169#35-28	1,4	0,8	1,8799	0,39896
25	Calle 173#47-41	1,8	1,3	0,5294	0,72650
26	Diagonal 145#31A-40	1,2	0,7	8,0842	0,08836
27	Carrera 26#58-56	1,2	0,8	2,3438	0,21333
28	KR002 E #070A-47	1,3	0,4	6,6128	0,34025
29	Diagonal 152 # 42-04	1,9	1,5	3,4780	0,07667
30	Ave 81 # 48-95	0,6	0,1	4,5855	1,09039



**Tabla 9**

**UBICACIÓN DE LAS PILAS DE MEDICIÓN DE CLORO DE LA E.A.A.B**

No.	NOMBRE	UBICACIÓN	COORDENADAS	
			ESTE	NORTE
1	Villa-Prado	Calle 170 autopista norte CAI 93	103450	117160
2	Usaquen	Calle 110 No 11-20	104260	110500
3	La - Floresta	Calle 100 avenida suba esquina sur oriental	101350	110200
4	Serena	Calle 90 carrera 86 CAI	98108	112611
5	El Dorado	Aeropuerto el Dorado	93700	110800
6	Fontibon	Carrera 98 calle 20	92391	108138
7	EAAB	Calle 22b carrera 40	98500	103540
8	Kennedy	Calle 41D sur # 81 - 05 estacion 8 de policia	90902	102582
9	Molinos del Sur	Carrera 5 U No. 49-17 sur CAI	95511	95407
10	Bosa	Calle 60 S No. 88I-15 Estacion de Bomberos	97959	101629
11	Puente-Aranda	Carrera 60 Sur 15 - 80 frente al Cai	96280	104170
12	Suba	Calle 144 # 91-49 cada	99200	116075
13	Soacha	Calle 13 No. 8-46 estacion de policia de Soacha	94245	99898
14	Perseverancia	Calle 33 # 6-37	101195	102508
15	Country Sur	Avenida 10 con calle 27 sur	97641	97217
16	Quiroga	Avenica Caracas calle 36 sur	95493	97773
18	Veraguas	Avenida ciudad de quito No 5C - 34	97707	101113
19	Los Rosales	Carrera 6 con calle 81	103200	107285
20	El refugio	Carrera 3 # 86 - 00	103720	107680
21	Circunvalar	Calle 76 A carrera 1 CAI 30	103171	106649
22	Bonanza	Diagonal 72A # 71-30	98134	110084
23	Aures	Calle 131 No 102 B-06	97660	115420
24	Villa Claudia	Av 68 av 1 de mayo	94376	101692
25	La Candelaria	Diagonal 62 sur # 30- 45	92042	97126
26	Juan Rey	Calle 68 sur No 15A - 95 este	98510	90580
27	Monteblanco	Calle 93 sur No 50 - 50 este	95905	99757
28	Las cruces	Avenida 7 # 1 - 36 parque CAI 44	99610	98860
42	Kennedy	Carrera 86 con Diagonal 48 sur	90237	102708
44	Santa Elena	Carrera 91 Calle 75 noroeste	95898	112580
47	Country Norte	Carrera 19 Calle 93	102699	109270
48	Bulevar Niza	Calle 129 Carrera 52	100696	112835
49	Chico	Carrera 4 con Calle 70	102543	106237
54	Santa Fe	Carrera 22 con Calle 11	98708	101388
56	El Campin	Calle 53 B con Carrera 44	99370	105347
77	Los Cedros	Diagonal 142 Transversal 32	103301	114191
106	Parque Nacional	Calle 39 carrera 6	101483	103328
132	Chico	Carrera 3 # 92 - 00	104183	108211



**Tabla 10**

**MEDICIONES DE CLORO LIBRE REALIZADAS POR LA E.A.A.B EN BOGOTÁ DESDE ENERO DE 2002 A SEPTIEMBRE DE 2002**

No. Pila de Medición	NOMBRE	UBICACIÓN	PROMEDIO		MÁXIMO		MÍNIMO		DESVIACIÓN ESTÁNDAR		VARIANZA	
			pH	Libre	pH	Libre	pH	Libre	pH	Libre	pH	Libre
1	Villa-Prado	Calle 170 autopista norte CAI 93	6,89	0,62	7,2	1,01	6,5	0,14	0,170	0,205	0,029	0,042
2	Usaquen	Calle 110 No 11-20	6,98	1,07	7,6	1,52	6,6	0,17	0,170	0,160	0,033	0,034
3	La - Floresta	Calle 100 avenida suba esquina sur oriental	7,23	0,86	8,7	1,50	6,3	0,10	0,460	0,245	0,211	0,060
4	Serena	Calle 90 carrera 86 CAI	7,21	0,81	8,6	1,50	6,7	0,10	0,371	0,231	0,138	0,053
5	El Dorado	Aeropuerto el Dorado	7,93	0,53	9,1	1,10	6,9	0,10	0,604	0,204	0,365	0,042
6	Fontibon	Carrera 98 calle 20	7,40	0,76	8,9	1,30	6,7	0,10	0,392	0,314	0,154	0,099
7	EAAB	Calle 22b carrera 40	7,01	0,98	7,4	1,29	6,78	0,72	0,168	0,160	0,028	0,026
8	Kennedy	Calle 41D sur # 81 - 05 estacion 8 de policia	7,24	0,76	8,3	1,23	6,4	0,10	0,222	0,164	0,049	0,027
9	Molinos del Sur	Carrera 5 U No. 49-17 sur CAI	7,30	0,71	7,8	1,06	6,3	0,30	0,239	0,152	0,057	0,023
10	Bosa	Calle 60 S No. 88I-15 Estacion de Bomberos	7,29	0,75	9,1	1,22	6,7	0	0,353	0,239	0,125	0,057
11	Puente-Aranda	Carrera 60 Sur 15 - 80 frente al Cai	7,26	0,91	9,7	1,30	6,8	0,06	0,339	0,231	0,115	0,053
12	Suba	Calle 144 # 91-49 cada	7,18	0,82	7,5	1,40	6,7	0,20	0,149	0,177	0,023	0,062
13	Soacha	Calle 13 No. 8-46 estacion de policia de Soacha	7,23	0,66	8,2	1,13	6,9	0	0,223	0,218	0,050	0,047
14	Perseverancia	Calle 33 # 6-37	7,21	0,78	8,8	1,25	6	0	0,380	0,224	0,145	0,050
15	Country Sur	Avenida 10 con calle 27 sur	7,18	0,81	8,6	1,27	6,3	0,10	0,285	0,170	0,08,1	0,029
16	Quiroga	Avenida Caracas calle 36 sur	7,18	0,77	8,0	1,10	5,8	0,40	0,375	0,153	0,140	0,023
18	Veraguas	Avenida ciudad de quito No 5C - 34	7,08	0,88	8,8	1,26	6,3	0,33	0,322	0,178	0,104	0,032
19	Los Rosales	Carrera 6 con calle 81	7,07	0,72	7,8	1,20	6,3	0	0,227	0,214	0,052	0,046
20	El refugio	Carrera 3 # 86 - 00	7,08	0,84	7,2	1,20	6,4	0,109	0,175	0,150	0,031	0,023
21	Circunvalar	Calle 76 A carrera 1 CAI 30	7,03	0,84	7,6	1,23	6,4	0,40	0,227	0,155	0,051	0,024
22	Bonanza	Diagonal 72A # 71-30	7,12	0,57	7,3	1,67	6,9	0,13	0,134	0,122	0,018	0,063
23	Aures	Calle 131 No 102 B-06	7,17	0,94	8,2	1,50	5,4	0	0,391	0,289	0,153	0,084
24	Villa Claudia	Av 68 av 1 de mayo	7,15	0,76	7,8	1,30	6,5	0,3	0,229	0,184	0,052	0,034
25	La Candelaria	Diagonal 62 sur # 30- 45	7,17	0,76	7,5	1,14	5,5	0,13	0,308	0,156	0,095	0,024
26	Juan Rey	Calle 68 sur No 15A - 95 este	7,00	0,68	7,2	0,84	6,8	0,52	0,283	0,226	0,080	0,051
27	Monteblando	Calle 93 sur No 50 - 50 este	7,20	0,60	8,8	1,20	6,2	0	0,525	0,279	0,276	0,078
28	Las cruces	Avenida 7 # 1 - 36 parque CAI 44	7,10	0,79	8,4	1,21	6,3	0,3	0,237	0,189	0,056	0,036
42	Kennedy	Carrera 86 con Diagonal 48 sur	7,38	0,59	7,8	0,93	7	0,33	0,176	0,114	0,031	0,013
44	Santa Elena	Carrera 91 Calle 75 noroeste	7,11	0,96	7,7	1,50	6,5	0,30	0,214	0,236	0,046	0,056
47	Country Norte	Carrera 19 Calle 93	7,20	0,85	7,4	1,12	6,83	0,31	0,119	0,149	0,014	0,022
48	Bulevar Niza	Calle 129 Carrera 52	7,13	0,91	7,6	1,44	6,63	0,43	0,176	0,212	0,031	0,045
49	Chico	Carrera 4 con Calle 70	7,21	0,84	7,5	1,25	6,8	0,34	0,163	0,172	0,027	0,030
54	Santa Fe	Carrera 22 con Calle 11	7,26	0,59	7,6	0,86	7	0,21	0,148	0,125	0,018	0,015
56	El Campin	Calle 53 B con Carrera 44	7,17	0,67	7,4	1,02	4,6	0,15	0,466	0,208	0,149	0,037
77	Los Cedros	Diagonal 142 Transversal 32	7,21	0,91	7,7	1,39	6,9	0,32	0,141	0,208	0,024	0,044
106	Parque Nacional	Calle 39 carrera 6	6,90	0,75	7,1	1,00	6,7	0,40	0,183	0,252	0,033	0,063
132	Chico	Carrera 3 # 92 - 00	7,14	0,74	7,7	1,18	6,5	0,10	0,254	0,264	0,064	0,700



Tabla 11

**COMPARACIÓN DE LAS MEDICIONES DE CLORO EN LA RED ANTES DE LOS TANQUES Y LAS  
 PILAS DE LA E.A.A.B**

No. Pila de Medición	ID de mediciones en Tanques	NOMBRE	UBICACIÓN	PROMEDIO		Diferencia entre mediciones de tanques con la EAAB	VARIANZA
				pH	Libre		
1		Villa-Prado	Calle 170 autopista norte CAI 93	6,89	0,62		0,24359
	10		Carrera 47A # 186-35	7-8	1,4	0,78	
	24		Calle 169#35-28	6-7	1,4	0,78	
	25		Calle 173#47-41	6-7	1,8	1,18	
2		Usaquen	Calle 110 No 11-20	6,98	1,07		0,01771
	1		Tr 6 125-40 T-4	7-8	1,3	0,23	
	19		Calle 108A#16-42	6-7	1,3	0,23	
3		La - Floresta	Calle 100 avenida suba esquina sur oriental	7,23	0,86		0,04945
	3		Cl 106B 43A-50	6-7	1,1	0,24	
	15		Calle 115#37-40	6-7	1,3	0,44	
6		Fontibon	Carrera 98 calle 20	7,40	0,76		0,03302
	17		Calle 39 # 77C-90	6-7	0,5	-0,26	
7		EAAB	Calle 22b carrera 40	7,01	0,98		0,00689
	7		Cl 22 F 35-41 I	6-7	1,1	0,12	
11		Puente-Aranda	Carrera 60 Sur 15 - 80 frente al Cai	7,26	0,91		
	22		Calle 7 A # 89A - 76	6-7	1	0,22	0,28284
	16		KR068D #041-50	6-7	1,4	0,49	
14		Perseverancia	Calle 33 # 6-37	7,21	0,8		0,00024
	8		Cra. 4a. 18-50	6-7	0,8	0,02	
16		Quiroga	Avenida Caracas calle 36 sur	7,18	0,765		0,00061
	23		Calle 52 A# 24C - 41	6-7	0,8	0,04	
21		Circunvalar	Calle 76 A carrera 1 CAI 30	7,027	0,84		0,05392
	28		KR002 E #070A-47	7	1,3	0,46	
	20		Calle 64 # 4-18	6-7	1,1	0,26	
22		Bonanza	Diagonal 72A # 71-30	7,12	0,57		0,30153
	2		Cl 77A 68C-16	5,8	1,4	0,83	
	9		Cl 59A No. 75A-31	6-7	1,30	0,73	
	29		Diagonal 152 # 42-04	7	1,9	1,33	
44		Santa Elena	Carrera 91 Calle 75 noroeste	7,11	0,96		0,03174
	18		Calle 73#99B-21	6-7	1,2	0,24	
47		Country Norte	Carrera 19 Calle 93	7,20	0,85		0,03195
	4		Cl 100 17-76	6-7	1,2	0,35	
	14		Carrera 20 # 85 - 52	6-7	1,1	0,25	
48		Bulevar Niza	Calle 129 Carrera 52	7,13	0,91		0,17547
	11		Carrera 49#119-49	6-7	1,5	0,59	
56		El Campin	Calle 53 B con Carrera 44	7,17	0,67		0,07902
	6		Cl 45 38A-16	5-6	1,1	0,43	
	27		Carrera 26#58-56	7,00	1,20	0,53	
77		Los Cedros	Diagonal 142 Transversal 32	7,21	0,91		0,06179
	21		Carrera 154 A #136A-65	5-6	1,2	0,29	
	26		Diagonal 145#31A-40	5-6	1,20	0,29	
	30		Ave 81 # 48-95	5-6	0,60	-0,31	
	12		Carrera 31#126-65	6-7	1	0,09	
106		Parque Nacional	Calle 39 carrera 6	6,90	0,75		0,00073
	5		Cr 7a. 43-33	7-8	0,7	-0,05	
132		Chico	Carrera 3 # 92 - 00	7,14	0,74		0,10442
	13		Carrera 8A#99-54	6-7	1,2	0,46	



Tabla 12

VARIABLES DEL MODELO

ID	DC	Tiempo de lavado (meses)	EDAD (AÑOS)	TRH días	Concreto	PVC
1	0,4	12	8	1,0125	1	0
2	0,5	4	20	0,4813	1	0
3	0,8	12	15	8,1184	0	1
4	1,1	6	2	10,5634	0	0
5	0,2	6	10	6,3537	1	0
6	0,6	9	10	1,0061	1	0
7	0,7	12	11	5,4107	1	0
8	0,75	6	26	7,9533	1	0
9	0,5	12	5	4,0908	1	0
10	1	24	10	6,1615	1	0
11	0,6	10	13	1,1389	0	0
12	0,8	24	6	8,0393	1	0
13	0,6	12	20	3,3333	1	0
14	0,1	12	4	4,2789	1	0
15	1,1	6	17	4,1159	1	0
16	0,4	12	10	2,7496	1	0
17	0,4	96	8	0,0671	0	1
18	0,4	60	23	0,4891	1	0
19	0,8	0,5	0,5	5,8643	1	0
20	1	1	3	20,8092	1	0
21	0,5	3	20	2,4620	1	0
22	0,4	12	4	5,7060	1	0
23	0,6	12	15	5,3611	1	0
24	0,6	0,7	5	1,8799	1	0
25	0,5	4	24	0,5294	0	1
26	0,5	1	17	8,0842	1	0
27	0,4	12	8	2,3438	1	0
28	0,9	6	9	6,6128	1	0
29	0,4	6	15	3,4780	1	0
30	0,5	1	20	4,5855	0	0



## ***Anexo 3 - Imágenes***



Imagen 1

Entrada a un Tanque de Almacenamiento a nivel – Cuarto de Bombas



Imagen 2

Vista Interna del Tanque





Imagen 3

Vista Interna de Tanque Subterráneo en mal Estado



Imagen 4

Tipo de Acceso 2 a Tanque Subterráneo





Imagen 5

Vista 2 del Sistema de llenado del Tanque – Flotador



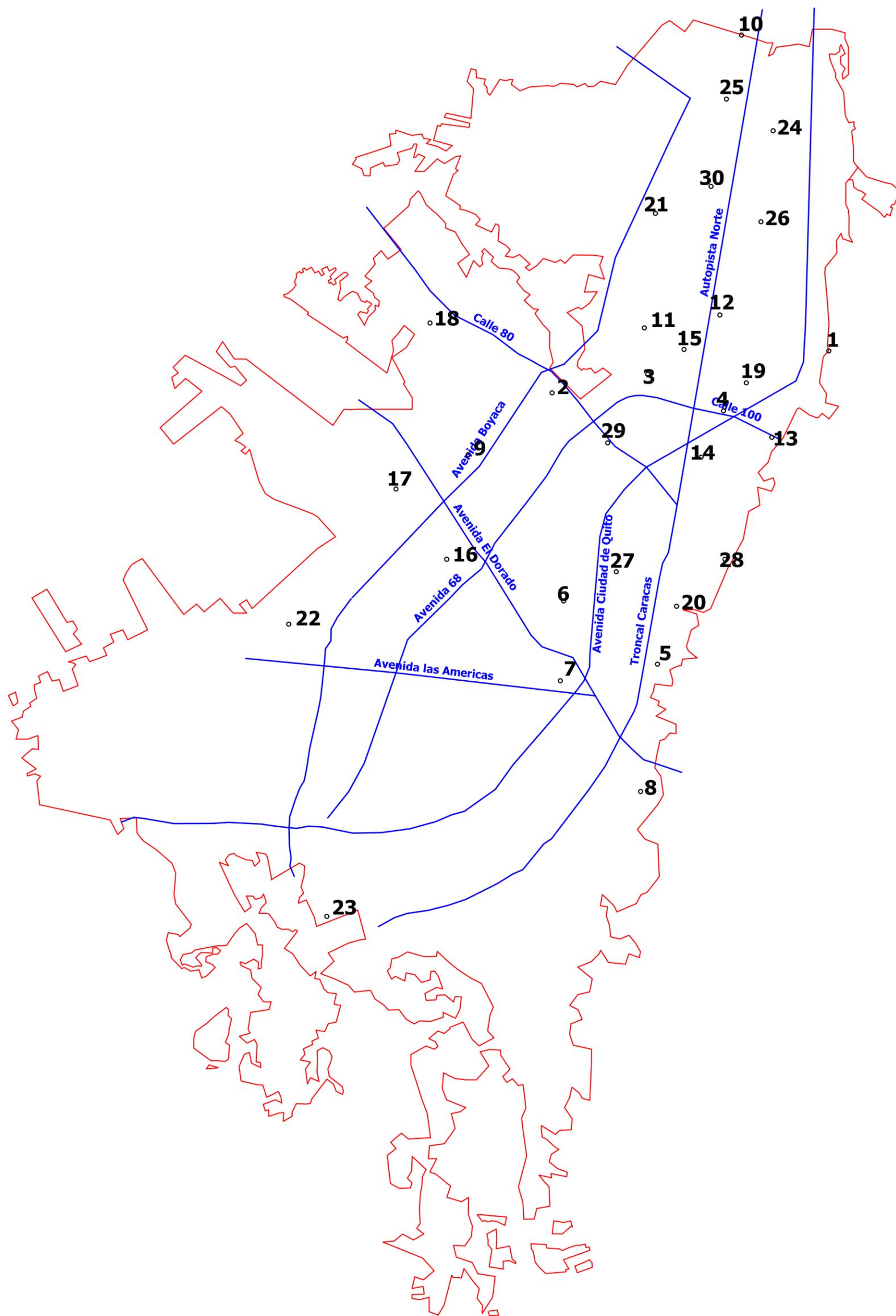
Imagen 6

Vista 1 de la Escalera de Limpieza





## ***Anexo 4 - Planos***

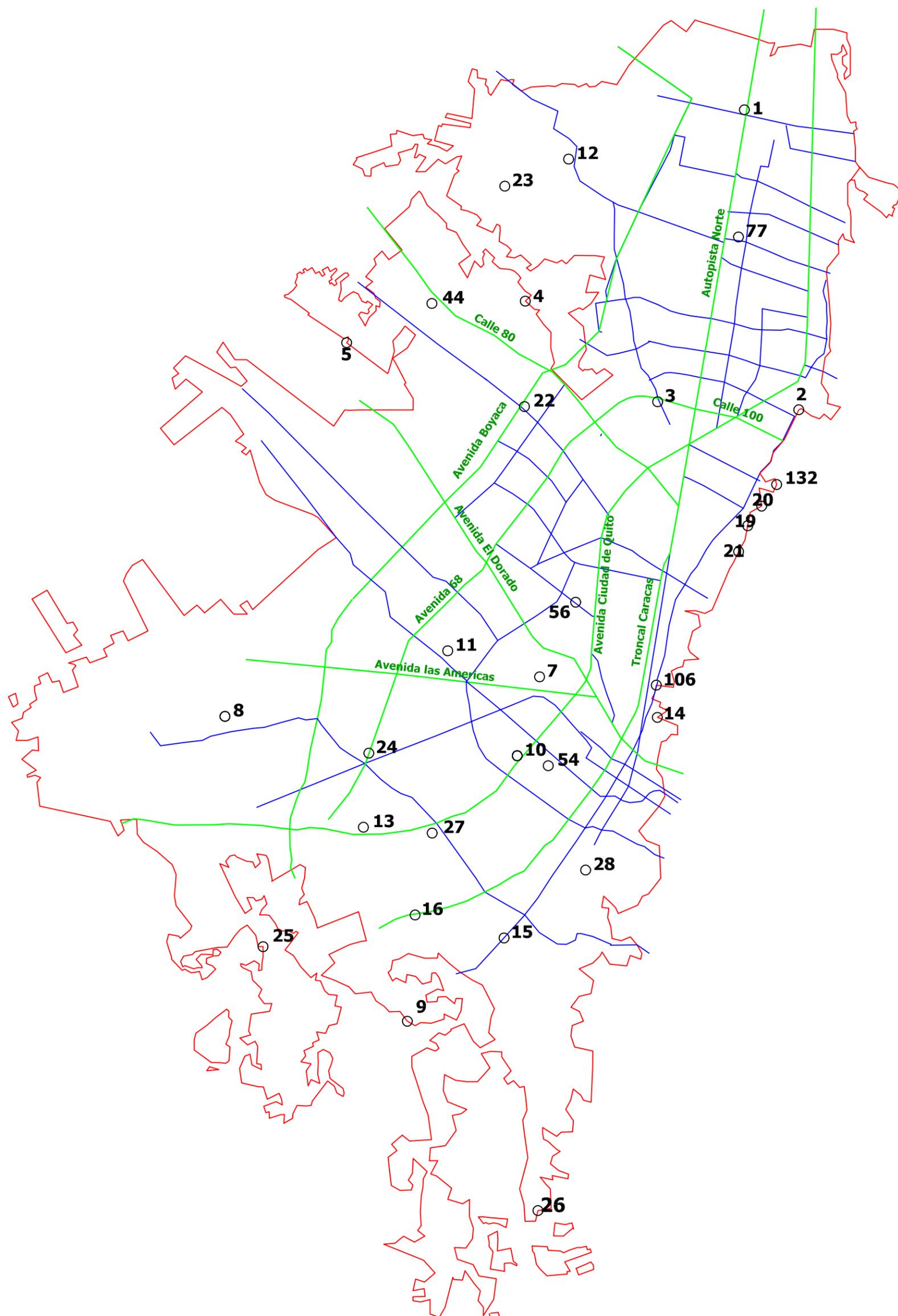


**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS

Plano: UBICACIÓN DE LOS TANQUES DE ALMACENAMIENTO DOMICILIARIOS

Fecha: <b>DICIEMBRE 2002</b>	Plano No: <b>1</b>	Escala: <b>1 : 100000</b>	Observaciones: Pilas de medición del acueducto para las que se tenían valores promedio de pH y cloro residual	Convenciones: <span style="color: blue;">—</span> Vías Principales <span style="color: red;">—</span> Límites de la Ciudad <span style="border: 1px solid black; border-radius: 50%; display: inline-block; width: 10px; height: 10px; vertical-align: middle;"></span> Tanques de Almacenamiento
Preparado por: <b>BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN</b>		Revisado por: <b>JUAN SALDARRIAGA</b>		

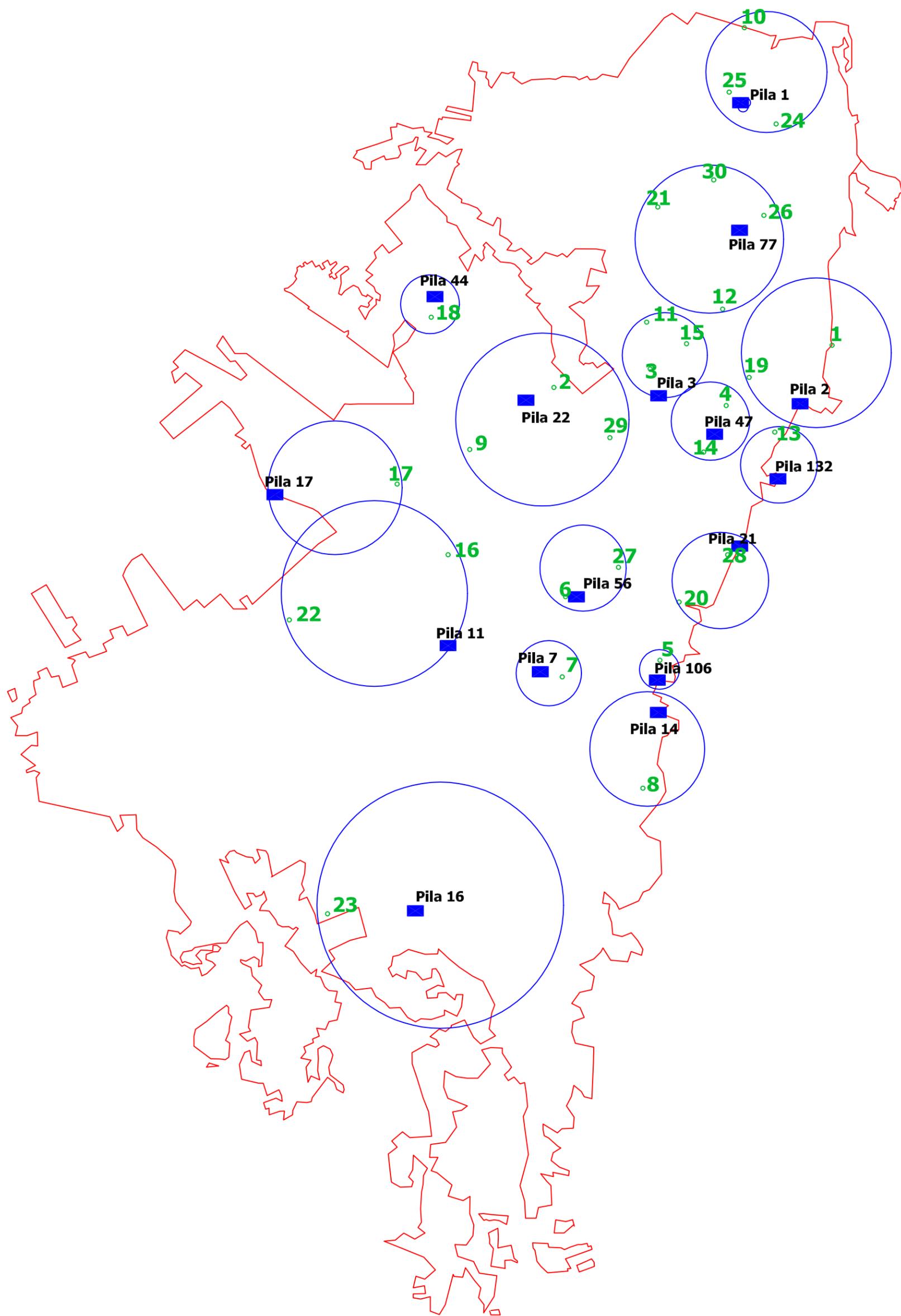


**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

**DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS**

Plano: **PILAS DE MEDICION DEL LA EMPRESA DE ACUEDUCTO Y ALCANTARILLADO EN BOGOTA**

Fecha: DICIEMBRE 2002	Plano No: 2	Escala: 1 : 100000	Observaciones: Pilas de medición del acueducto para las que se tenían valores promedio de pH y cloro residual	Convenciones: <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: green;">—</span> Vías Principales</li> <li><span style="color: blue;">—</span> Vías Secundarias</li> <li><span style="color: red;">—</span> Límites de la Ciudad</li> <li>○ Pila de Medición de la E.A.A.B</li> </ul>
Preparado por: BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN	Revisado por: JUAN SALDARRIAGA			



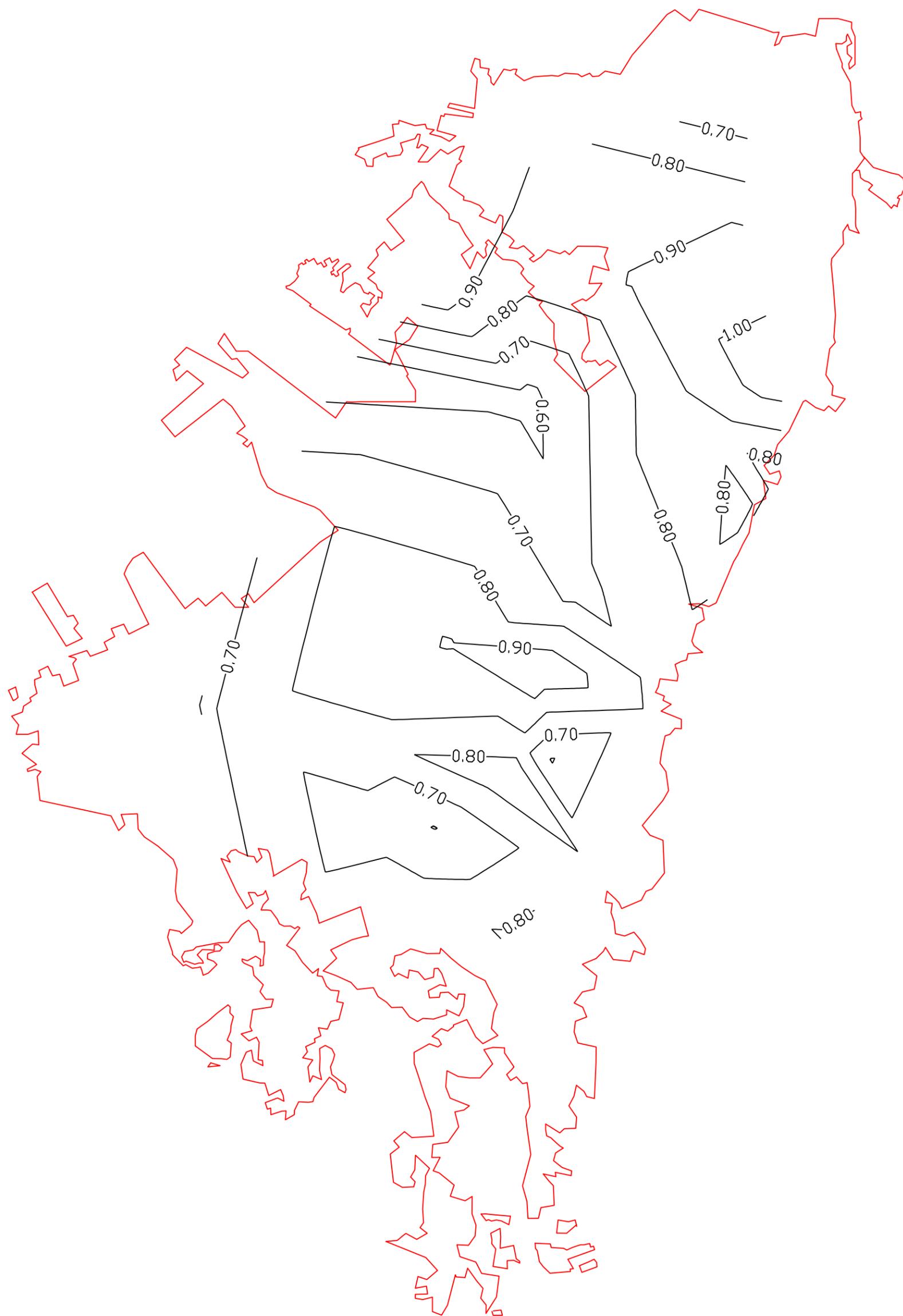
**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

**DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED INTERNA DEL USUARIO**

Plano:

ASIGNACIÓN DE TANQUES A PILAS DE MEDICIÓN

Fecha: DICIEMBRE 2002	Plano No: 3	Escala: 1 : 100000	Observaciones: Para hacer la comparación con la información del acueducto, se escogieron las pilas más cercanas a los tanques	Convenciones: <ul style="list-style-type: none"> <li> Radio de alcance de la pila de medición</li> <li> Límites de la Ciudad</li> <li> Pilas de Medición Escogidas</li> <li> Ubicación de los Tanques</li> </ul>
Preparado por: BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN	Revisado por: JUAN SILDARRIAGA			



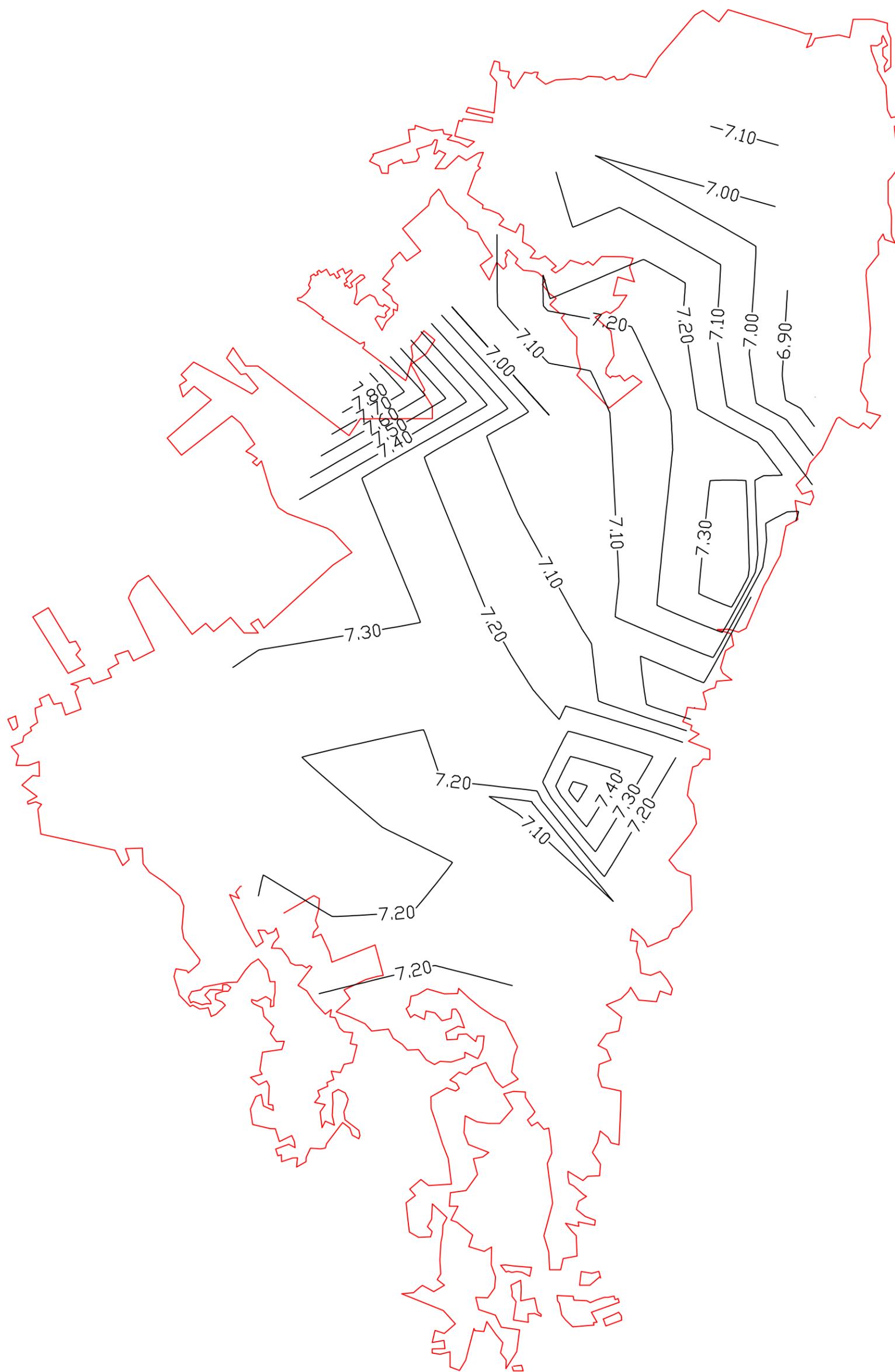
**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS

Plano:

DISTRIBUCION DE CLORO RESIDUAL EN LA RED DISTRITAL

Fecha: DICIEMBRE 2002	Plano No: 4	Escala: 1 : 100000	Observaciones: Distribución de cloro según mediciones de cloro residual de la E.A.A.B.	Convenciones: — Curvas de Isocloración — Límites de la Ciudad
Preparado por: BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN	Revisado por: JUAN SILDARRIAGA			

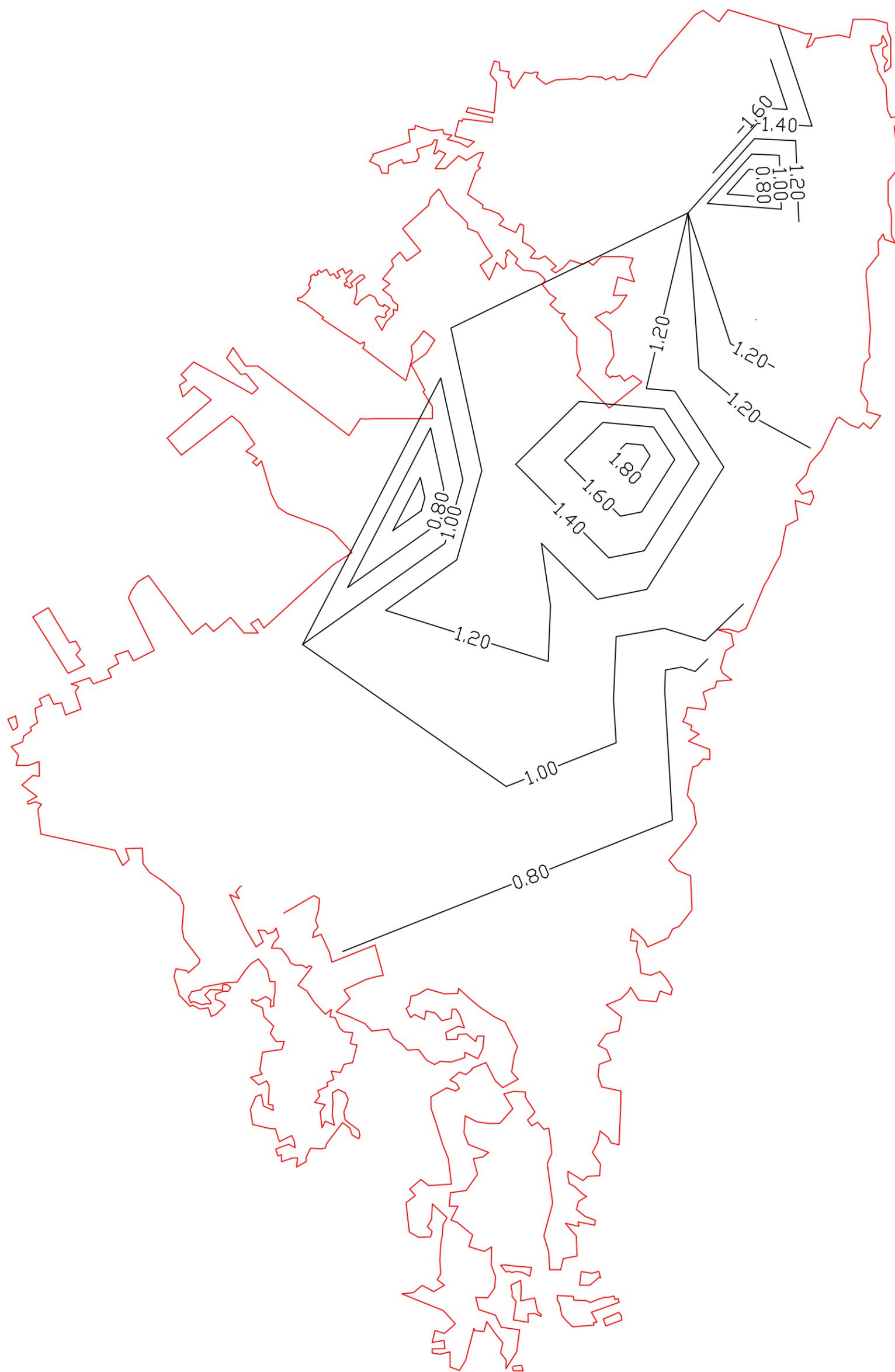


**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS

Plano: MEDICIONES PROMEDIO DE PH EN LA RED

Fecha: DICIEMBRE 2002	Plano No: 5	Escala: 1 : 100000	Observaciones: Curvas que describen la distribución del pH del agua en Bogotá	Convenciones: — Curvas de IsopH — Límites de la Ciudad
Preparado por: BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN	Revisado por: JUAN SALDARRIAGA			

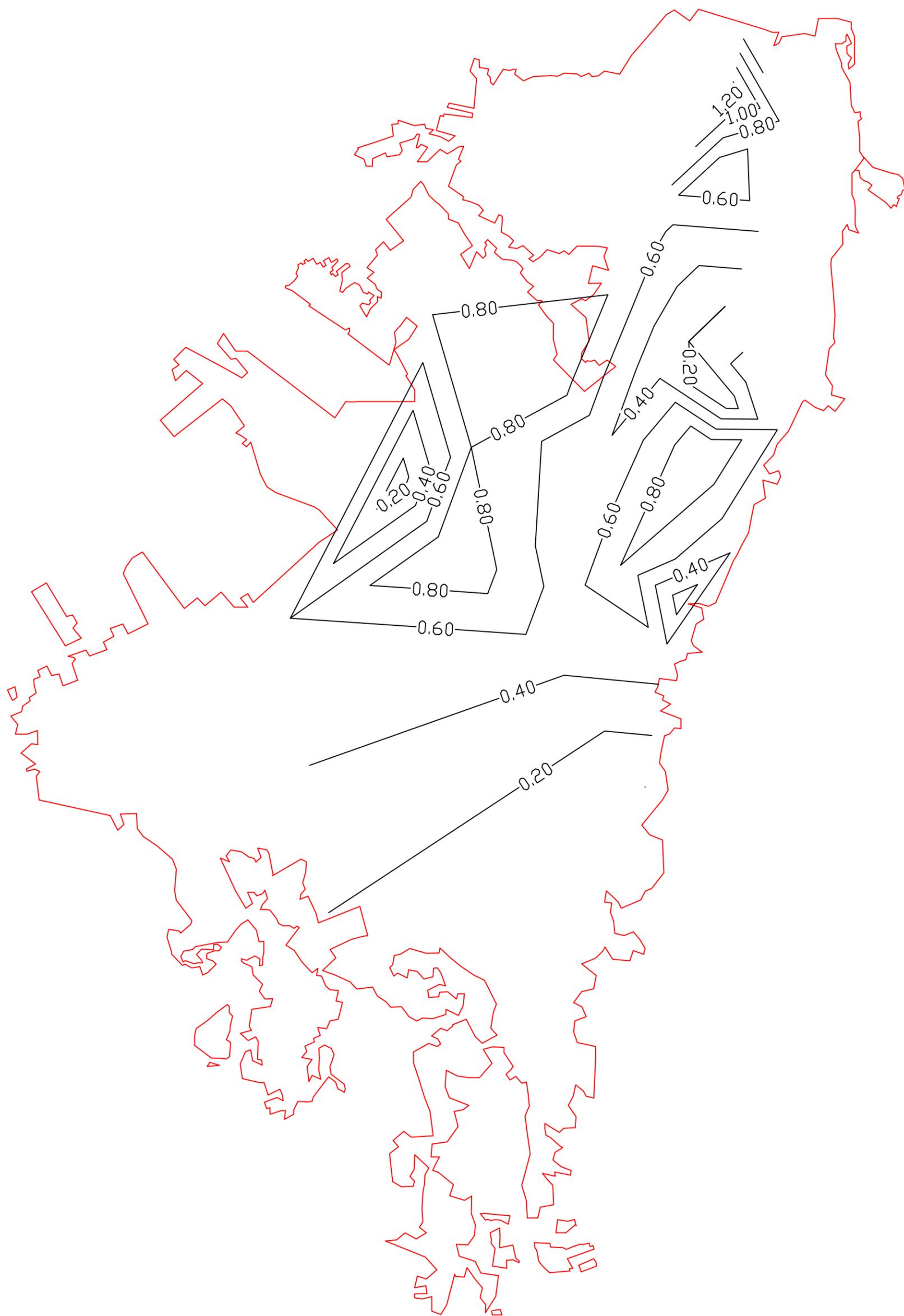


**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS

Plano: DISTRIBUCIÓN DE CLORO EN LA RED DISTRITAL

Fecha: <b>DICIEMBRE 2002</b>	Plano No: <b>6</b>	Escala: <b>1 : 100000</b>	Observaciones: Curvas de Isocloración basadas en valores tomados en la red distrital antes de llegar a los tanques de almacenamiento	Convenciones: — Curvas de Isocloración — Límites de la Ciudad
Preparado por: <b>BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN</b>	Revisado por: <b>JUAN SALDARRIAGA</b>			

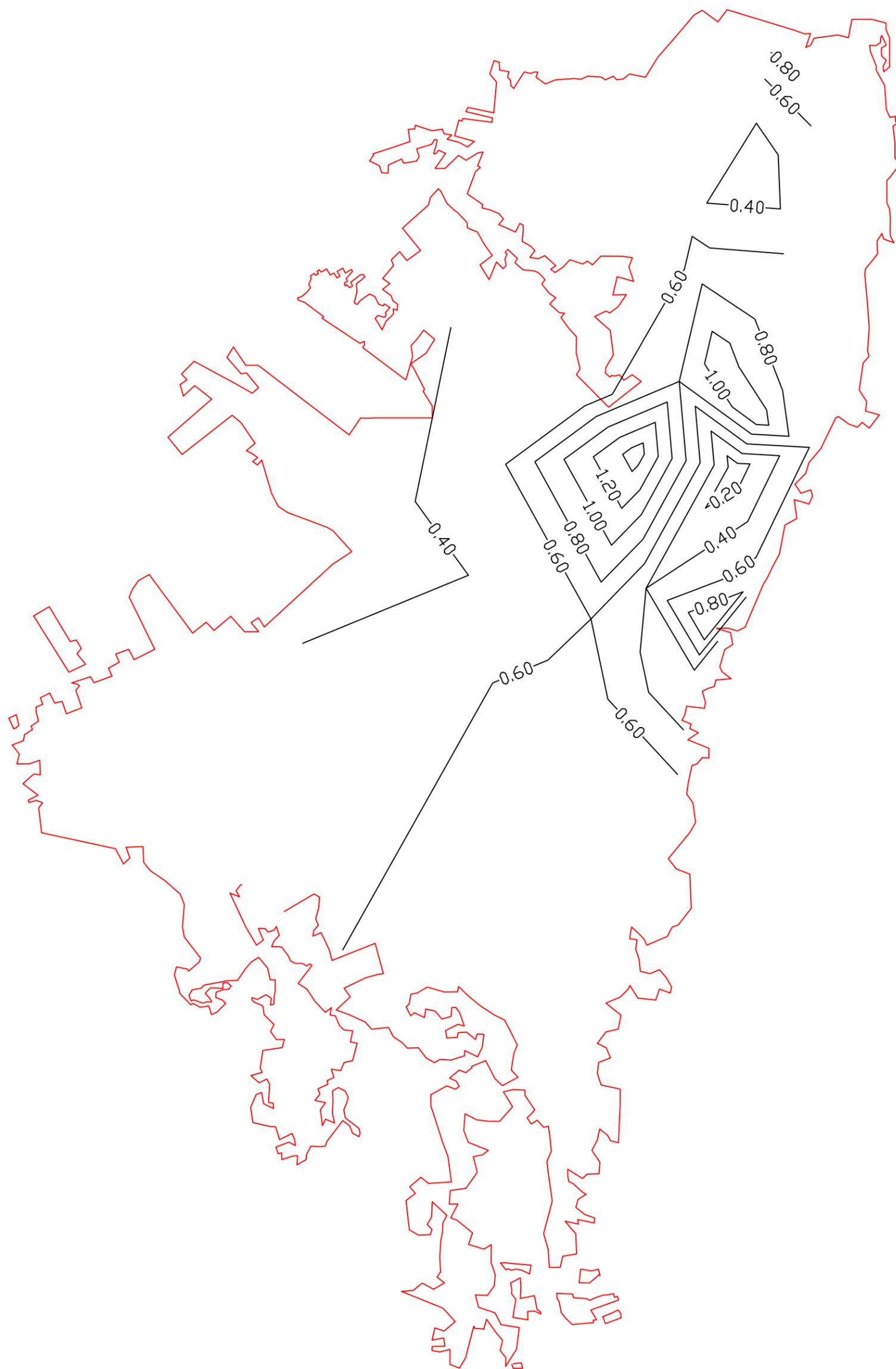


**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS

Plano: DISTRIBUCIOÓN DE CLORO EN LA RED FINAL DEL USUARIO

Fecha: <b>DICIEMBRE 2002</b>	Plano No: <b>7</b>	Escala: <b>1 : 100000</b>	Observaciones: Curvas de distribución de cloro basadas en las mediciones realizadas después de los tanques de almacenamiento	Convenciones: — Curvas de Isocloración — Límites de la Ciudad
Preparado por: <b>BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN</b>	Revisado por: <b>JUAN SALDARRIAGA</b>			



**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**  
 FACULTAD DE INGENIERÍA  
 DEPARTAMENTO DE INGENIERIA CIVIL Y  
 AMBIENTAL

**DECAIMIENTO DE LA CALIDAD DEL AGUA POR VARIACIONES DEL CLORO RESIDUAL ENTRE LA  
 RED DE DISTRIBUCIÓN DISTRITAL Y LA RED DE DISTRIBUCIÓN INTERNA DE LOS USUARIOS**

Plano: DECAIMIENTO DEL CLORO RESIDUAL

Fecha: <b>DICIEMBRE 2002</b>	Plano No: <b>8</b>	Escala: <b>1 : 100000</b>	Observaciones: Decaimiento del cloro residual en la red final como efecto de los tanques de almacenamiento	Convenciones: — Curvas de Isocloración — Límites de la Ciudad
Preparado por: <b>BEATRIZ ELENA DIAZ MERCHAN</b>		Revisado por: <b>JUAN SALDARRIAGA</b>		