

Research Article

# Quality Analysis of Atmospheric Deposits in Networks with Intermittent Service

## Análisis de Calidad de Depósitos Atmosféricos en Redes con Servicio Intermitente

Daniel Chuquin<sup>1\*</sup>, Gloria Miño<sup>2</sup>, Juan Chuquin<sup>2</sup>, and Santiago Chuquin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera de Ingeniería Química, Ecuador

<sup>2</sup>Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Mecánica, Ecuador

### ORCID

Daniel Chuquin: 0000-0001-9637-3140

IV INTERNATIONAL  
CONGRESS OF  
ENGINEERING FACULTY OF  
MECHANICS (IV COINTI  
2021)

Corresponding Author: Daniel  
Chuquin; email:  
daniel.chuquin@esPOCH.  
edu.ec

Published: 31 August 2022

Production and Hosting by  
Knowledge E

© Daniel Chuquin et al. This  
article is distributed under the  
terms of the [Creative  
Commons Attribution  
License](#), which permits  
unrestricted use and  
redistribution provided that  
the original author and  
source are credited.

### Abstract

In Latin America, the installation of atmospheric reservoirs is frequent due to various policies related to water availability and management. This type of infrastructure, in addition to modifying the hydraulic behavior of the network, significantly alters water quality, conditioning its microbiological characteristics and exposing the user to health problems. The hydraulic characterization of reservoirs has been widely approached in terms how their filling/emptying cycles are reproduced; however, several factors have not been taken into account – those which modify the disinfectant concentrations in the reservoirs, either improving or impairing the water quality. In the present work, the Epanet Toolkit model is developed and applied to analyze loss in the quality of the water in the tanks as an effect of chlorine concentrations available in the main network and based on different intradomiciliary hydraulic peculiarities such as the change in the pattern of demands, the variation of the regulation volume, the operation of the valve that controls the level in the cisterns, among others.

**Keywords:** *atmospheric deposits, water quality, intermittent networks.*

### Resumen

En América Latina es frecuente por diversas políticas referentes a la disponibilidad y gestión del agua, la instalación de depósitos atmosféricos. Este tipo de infraestructuras, además de modificar el comportamiento hidráulico de la red, alteran significativamente la calidad del agua condicionado sus características microbiológicas y exponiendo al usuario a problemas de salubridad. La caracterización hidráulica de los depósitos ha sido ampliamente abordada desde el punto de vista de la forma en la cual se reproducen sus ciclos de llenado/vaciado, sin embargo, no han tenido en cuenta diversos factores que modifican las concentraciones de desinfectante en los depósitos, ya sea que promuevan un post mejoramiento o un empobrecimiento de esta, en términos de calidad. En el presente trabajo, se desarrolla aplica el modelo del Toolkit de Epanet para analizar la pérdida de calidad del agua en los depósitos en función de las condiciones de concentración de cloro disponible en la red principal y en base a distintas peculiaridades hidráulicas intradomiciliarias como son el cambio en el patrón de demandas, la variación del volumen de regulación, la forma de operación de la válvula que controla el nivel en las cisternas, entre otras.

**Palabras Clave:** *depósitos atmosféricos, calidad del agua, redes intermitentes.*

 OPEN ACCESS



## 1. Introducción

Los depósitos atmosféricos constituyen una de las principales infraestructuras presentes en redes con servicio intermitente, su uso se vuelve frecuente en países en vías de desarrollo, como es el caso de América Latina, donde en varias zonas al estar condicionadas por su topografía, disponibilidad del fluido o falta de recursos económicos, disponer del agua las 24 horas es prácticamente insostenible. En base a las estadísticas disponibles de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) y la Organización Mundial de la Salud (OMS), en el año 2010 y 2011 México y Brasil respectivamente reportaron que el 40% de la población en algún momento del año sufrieron recortes temporales y/o ocasionales en el suministro [1].

En condiciones, donde la discontinuidad del servicio es habitual, el uso de depósitos privados tiene la finalidad de almacenar el agua en los periodos de disponibilidad del recurso para compensar la escasez cuando no está disponible [2,3]. Por tal razón, los usuarios en lo posible almacenan grandes volúmenes de agua en depósitos (regulados por válvulas de flotación proporcionales) que por lo general están sobredimensionados, dando lugar a que el sistema se vuelva dependiente de la altura de agua y más no de la demanda en cada nudo.[4]

El agua potable debe cumplir con un requisito mínimo de calidad [5]., sin embargo, en la etapa final de distribución el mantenimiento de la concentración de desinfectante residual es compleja, dado que depende entre otros factores de: a) parámetros que actúan como fuente o sumidero de desinfectante, b) temperatura del agua, c) material y estado de conservación de las tuberías, d) tiempo de residencia en la red. En este sentido, el problema se vuelve incontrolable para la empresa gestora cuando el agua ingresa a las cisternas y/o depósitos. Dado que el almacenamiento por periodos prolongados aumenta el tiempo de residencia del agua en la red, la degradación del desinfectante por tanto disminuye la concentración residual disponible en el medio para la inactivación de microorganismos patógenos. Para el caso de la desinfección con cloro, la OMS (2004) recomienda que la concentración de cloro para que se alcance buenos rendimientos en la desinfección debe ser como mínimo 0.5 mg Cl/L después de un tiempo de contacto de 30 minutos y a pH menores que 8.

Sin embargo, como señala [6]. en la actualidad pocos son los estudios que han caracterizado las condiciones de calidad hidráulica y de agua en los sistemas de suministro intermitente, a pesar del impacto y al riesgo de contaminación que introducen en el medio.

Mohamed & Gad indagaron en la pérdida de calidad de agua en depósitos, pero únicamente estudiaron la pérdida en función del volumen del depósito, y del cambio en



el ciclo de bombeo utilizando patrones de demanda diurna establecidas por American Water Works Association (AWWA) [7].

Este trabajo amplía la conceptualización ejemplificada por Mohamed & Gad para su posterior incorporación en estudios futuros de modelación de redes intermitentes. El primer objetivo es: analizar la influencia de la calidad del agua de la red principal y estimar una concentración a partir de la cual, el almacenamiento del agua no altere su calidad final, a tal punto que no sea apta para consumo. El segundo objetivo es determinar la influencia de la válvula de flotación (proporcional, todo/nada) que controla el caudal de entrada al depósito subterráneo (cisterna) en la conservación de la calidad del agua. El tercer objetivo es determinar la influencia del volumen del depósito en la calidad del agua y finalmente mediante un análisis se determinará el factor que más altera las características de la calidad del agua.

El sector de la red ejemplificada que se utilizó fue adaptado a partir de la red de abastecimiento de agua potable de Riobamba-Ecuador, donde el 55% de la población cuenta con un servicio continuo de 18 – 24 horas, 38% racionalizado en 3 horarios, 5% durante 12 horas y 2% por medio de tanqueros.

## 1.1. Antecedentes

El comportamiento hidráulico de los depósitos ha sido abordado en varias investigaciones [4,8-11]. Los trabajos se basaron en el estudio de la distribución inequitativa del agua en la red a partir de diferentes escenarios de escasez del agua, y en la determinación de los errores de las curvas de medición de los contadores a partir de la evaluación de las pérdidas aparentes por el efecto de amortiguamiento que introducen los depósitos en el patrón de demandas y en la subestimación de las tasas de flujo que ingresan a través del medidor.

Ahora, si bien existe un enfoque conceptualizado de los parámetros incidentes del proceso de llenado de los depósitos. La complejidad, el cambio en la curva de modulación de la demanda y el aumento del tiempo de residencia del agua, dificultan el control en la calidad del fluido que es consumido por los usuarios. Independiente de la geometría y del tipo de operación de los depósitos, no están en la capacidad de conservar la calidad del agua [12]. En este aspecto, pocos son los estudios que han investigado la pérdida de calidad en depósitos atmosféricos residenciales a través de modelos, donde prevalece la investigación realizada por [7]. en la cual a través de una simulación en un periodo extendido de 48 horas para un edificio de 12 pisos, aplicando el modelo de calidad de EPANET desarrollado por, análisis [13], ó la influencia del tamaño de los depósitos y el cambio en el volumen de renovación, en la degradación



del cloro y la edad del agua. De igual manera destaca el trabajo realizado por Lemke & DeBoer quienes desarrollaron un modelo aplicando el software CompTank para estudiar la degradación del cloro en función de: los ciclos de llenado/vaciado, concentración del influente y de los coeficientes de degradación [14].

Por el contrario, otros estudios existentes se focalizan en campañas de monitoreo y análisis de laboratorio para estudiar: la influencia de la temperatura y tiempo de almacenamiento en el aumento de la actividad microbiana [15]; la influencia de los depósitos en la variación de los parámetros de calidad antes y después del almacenamiento [16]; la influencia de los materiales de construcción de los depósitos y de su respectivo mantenimiento en la pérdida de calidad física, química y microbiológica del agua [17]; los efectos del servicio intermitente en depósitos de almacenamiento de agua en Tamale(Gana) [18]; el tipo de mezcla y patrones de demanda en depósitos elevados a escala de laboratorio comparando los resultados mediante técnicas computacionales [19]; la calidad del agua del grifo, depósitos privados y dispensadores de agua filtrada analizando el cloro libre residual, color, turbidez, pH, conductividad, patógenos(E.Choli), sólidos totales [20].

## 1.2. Depósitos atmosféricos

La aplicabilidad de cualquier modelo de calidad y la incertidumbre de este, en todo momento estará ligado a la capacidad de precisión y reproducibilidad de los parámetros hidráulicos de una red o instalación. En este sentido, el análisis se desarrolla una vez que el agua ingresa a los depósitos atmosféricos que son instalados ya sea por debajo del nivel del suelo(cisternas), en los puntos más alto de la instalación (depósitos elevados) o en su defecto y en el peor escenario en ambos sitios a la vez. Una vez almacenada el agua en los depósitos, la hidráulica del sistema en general ya no es controlada por la entidad gestora sino más bien depende del modo de fluctuación del nivel en los depósitos a partir de los ciclos de llenado/vaciado de los mismos. En consecuencia, el almacenamiento de agua supone una pérdida adicional de concentración de cloro libre para la desinfección, y el problema tomará mayor fuerza si los depósitos se encuentran en malas condiciones por falta de mantenimiento, convirtiéndose en un foco puntual de contaminación.

## 1.3. Modelo de calidad

Considerando los balances de conservación de la masa en depósitos (Ec.1), y asumiendo la mezcla completa en los tanques [21], la degradación del cloro ha sido cuantificada a



partir de cinéticas de primer orden, considerando los efectos de la temperatura como factor determinante en la variación del coeficiente de degradación del cloro[22], a partir de la ecuación de Arrhenius (Ec.2):

$$\frac{d(VC)}{dt} = \sum Q_{in}C_{in} - \sum Q_d C - k_T C$$

Ecuación.1: Balances de conservación de la masa en depósitos

$$k_T = k_{b20} * e^{\left(\frac{E_A}{R(20-T)}\right)}$$

Ecuación.2: Variación del coeficiente de degradación del cloro donde  $V$  volumen del depósito,  $C$  concentración de cloro en el medio,  $C_{in}$  concentración de cloro del  $Q_{in}$ ,  $k_T$  constante de degradación del cloro corregida por la temperatura,  $k_{b20}$  constante de degradación a 20°C,  $E_A$  energía de activación del cloro,  $R$  constante universal de los gases y  $T$  la temperatura.

## 2. Materiales y Métodos

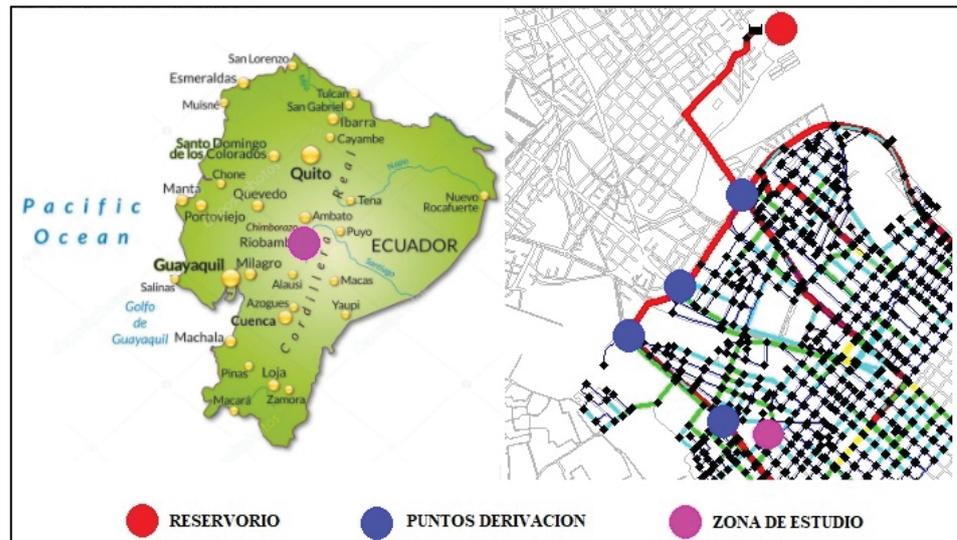
### 2.1. Caso de estudio

El modelo hidráulico y de calidad fue aplicado en un sector de la red Saboya de Riobamba, Ecuador (Figura 1). El escenario para la modelación fue adaptado a partir de un sector “Bonilla Abarca” de la red Saboya. Se analizaron 10 domicilios en conjunto (Figura 2,3) para examinar los efectos negativos que involucra el almacenamiento de agua en los depósitos.

Se analizó diferentes situaciones:

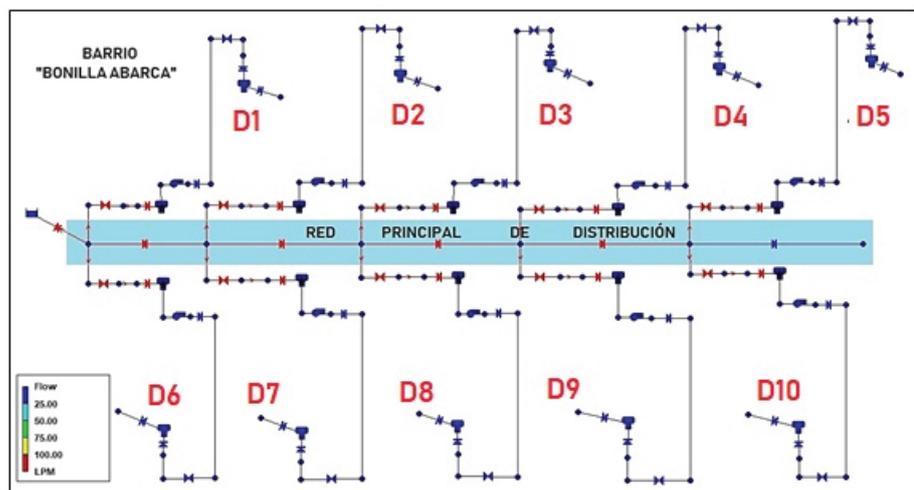
- 1) Cómo evoluciona la concentración de cloro [Cl] en función de la calidad de la red principal.
- 2) La influencia de la válvula de flotación (proporcional, todo/nada) que controla el caudal de entrada al depósito subterráneo en la calidad final del agua.
- 3) La influencia del volumen del depósito en la calidad final del agua.

Con base al estudio preliminar de la zona, se determinó que la característica común en el diseño hidráulico de los domicilios es la presencia de depósitos atmosféricos tanto subterráneos (cisternas) como elevados (Figura 3), típico de sistemas con suministro intermitente[23].



**Figure 1**

*Zona geográfica – Esquematzación Red Saboya.*

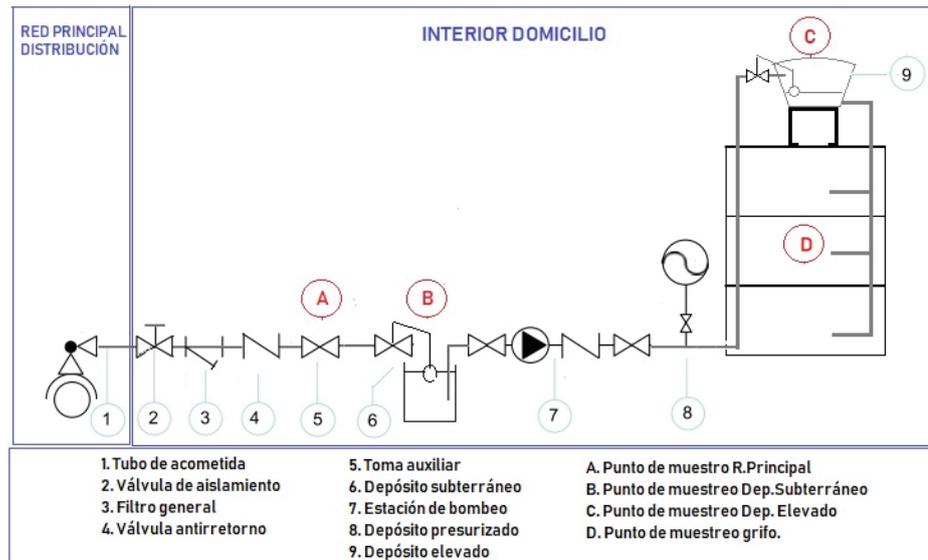


**Figure 2**

*Modelo esquematizado en EPANET.*

## 2.2. Estándares de la calidad del agua

Los análisis comparativos y estadísticos de los resultados de la modelación se realizó con base en la norma NTE INEN 1 108:2006 (INEN, 2006) y en función de lo guía de la OMS (WHO, 2011). La norma técnica ecuatoriana en los requisitos de agua potable establece que el límite máximo permisible del cloro libre residual en la red debe estar en el rango de 0.3 – 1.5 mg /L, mientras que la OMS recomienda que el cloro libre debe ser como mínimo 0.2 mg/L en las extremidades de la red y 0.5 - 1 mg/L después de al menos 30 minutos de contacto para que la cloración sea efectiva.



**Figure 3**

*Esquematación hidráulica de las instalaciones.*

### 2.3. Análisis estadístico de los datos

Los análisis de los resultados se desarrollaron con el software StatGraphics (STATPOINT TECHNOLOGIES, 2014) y en forma similar a los estudios de Kumpel & Nelson, (2016); Erickson et al., (2017) con un intervalo de confianza del 95% y un nivel de significancia de 5% ( $p < 0.05$ ) se usó la media como medida de la tendencia central y se realizaron pruebas estadísticas para el estudio de la concentración e influencia de los factores que modifican la calidad del agua.

### 2.4. Aplicación del método

Se consideró como condición normal (C.N) de funcionamiento las siguientes características hidráulicas y de calidad:

1. Volumen cisterna = 2000 L, controlado por válvula proporcional.
2. Volumen depósito elevado = 1000 L.
3. El cloro residual libre de la red principal (0.5 mg Cl/L).
4. Estaciones de bombeo (0.5 - 3 HP) in situ, operadas con interruptores en función de los niveles de los depósitos elevados.
5. Calidad inicial de los depósitos y cisternas = 0.56 mg Cl/L. No se considera cloraciones in situ.

6. Demanda base = 8.46 L/min.

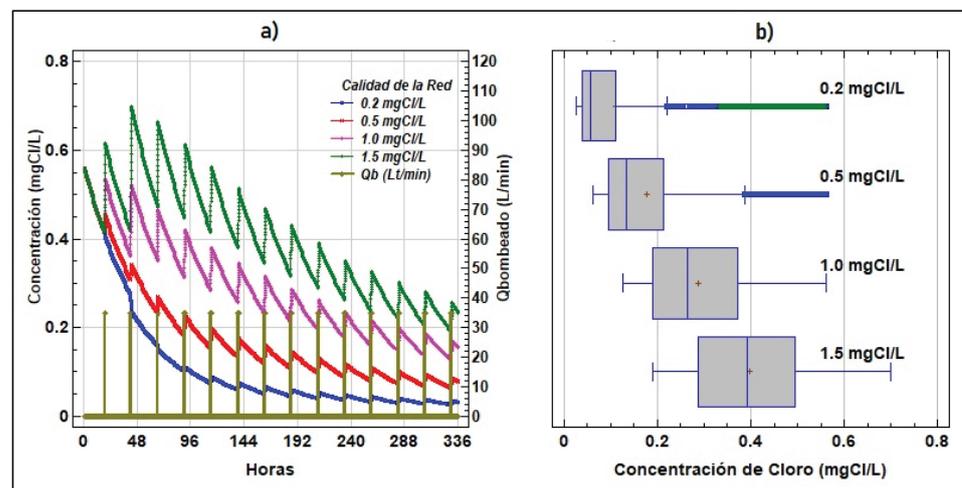
El estudio de la evolución de cloro en los depósitos se realizó para un periodo de simulación de 336 horas (14 días) a escala minutil.

### 3. Resultados

#### 3.1. Análisis de la influencia de la concentración de cloro de la red principal

La Figura 4 es el resultado de 4 escenarios que ejemplifican la evolución de cloro en los depósitos privados en función de la calidad existente de la red (1.5;1;0.5;0.2 mg/L).

En el mejor de los casos, como lo especifica la OMS, el nivel mínimo de cloro residual que garantiza las condiciones salubres del agua potable es de 0.2 mg/L, y en el caso más favorable una concentración de cloro libre residual típico en las zonas próximas a la fuente de 1.5 mg Cl/L.



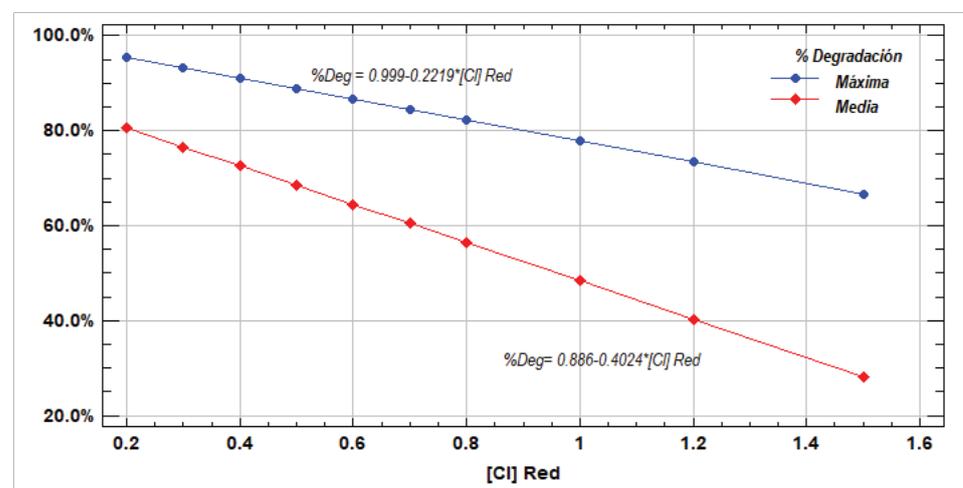
**Figure 4**

(a) Evolución del cloro en los depósitos en función de la calidad de la red principal; (b) Rango de Variación de la [Cl] en los depósitos.

Como resulta evidente la incidencia de la [Cl] en la red es un factor trascendental en la calidad final del agua, la tendencia que se observa es una disminución gradual de la concentración que tiende a mejorar cuando las estaciones de bombeo (intradomicilarias) entran en funcionamiento renovando el agua de los depósitos. Esto es notorio en los casos que la [Cl] en la red es superior a 0.5 mg/L (Figura 4a) donde la tendencia es el aumento y posterior disminución de la concentración en los depósitos casi proporcional, lo que indica que la concentración disponible en la red es mayor a la de los depósitos



(Escenario 3 y 4: 1.0 y 1.5 mg Cl/L) favoreciendo su aumento y por tanto asegurando una concentración mínima dentro del rango de 0.2 – 0.5 mg Cl/L. Lo contrario, sucede en los escenarios 1 y 2 (0.2 y 0.5 mg Cl/L) donde se observan rangos de variación mínima de [Cl] de (0.05 – 1) y (0.1 – 0.21 mg Cl/L) respectivamente (Figura 4b). En estos 2(dos) escenarios, a pesar de que se dispone de bombeos continuos al depósito elevado no existe una recuperación de los niveles de concentración considerables, lo que indica que el agua disponible de la red ([Cl] = 0.2 mg/L) no garantiza una mezcla, entre el agua almacenada en el depósito y la disponible para el bombeo, que favorezca en gran medida el aumento de [Cl]. Estos escenarios ilustrados, demuestran por un lado la ventaja de disponer agua de adecuada calidad en las zonas próximas al depósito de cabecera, mientras que, por otro lado, demuestra la vulnerabilidad a desarrollar problemas de calidad en zonas donde la concentración de cloro disponible en la red no garantiza una [Cl] superior a 0.2 mg/L una vez almacenada en los depósitos privados. A diferencia de zonas estratégicamente localizadas, donde la calidad del agua almacenada se mantiene en buenas condiciones cerca de 240 horas (Escenario 3 y 4), el problema es evidente para usuarios situados a varios kilómetros del depósito principal a partir del tercer día de almacenamiento (80 horas). En la Figura 5 se observan los porcentajes medios y máximo de reducción de concentración en los depósitos. Como se observa existe una tendencia de reducción lineal del porcentaje de degradación a medida que incrementa la [Cl] de la red de distribución.



**Figure 5**

Porcentajes medios y máximos de degradación de [Cl] en los depósitos en función de la calidad de la red de distribución.

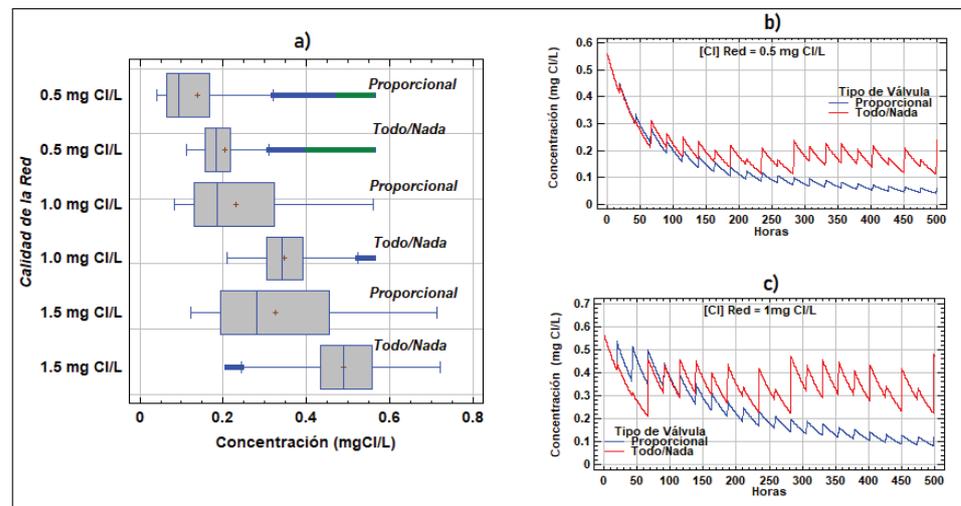


### 3.2. Análisis del tipo de válvula (proporcional, T/N) que controla el nivel de la cisterna

En este análisis en base a la simulación se precisa que durante las primeras horas de simulación la válvula todo-nada(T/N) da lugar a concentraciones bajas de cloro. En casos donde el nivel de agua en la cisterna (controladas por válvula T/N) no permitan la admisión de caudal entrante, no existirá una mezcla con el agua proveniente de la red durante las horas que no se alcance el mínimo nivel para que se abra la válvula y por tanto el agua sufre un proceso de degradación sin posibilidad de renovación hasta que se produzca el primer ciclo de llenado (Figura 6c). No obstante, existe un punto de inflexión donde la evolución de cloro en el sistema sigue una clara tendencia una vez que se ha estabilizado el modelo a partir de las condiciones iniciales de simulación y se observa un aumento de los niveles de concentración en los depósitos que son incluso mejores en contraposición con lo que sucede cuando se emplean válvulas de flotación proporcionales para el control del nivel.

A priori, las válvulas proporcionales permiten una renovación constante del agua de la cisterna que es bombeado al depósito superior, sin embargo, en periodos donde la demanda es baja el aumento en [Cl] no es relevante a diferencia de lo que sucede en las válvulas T/N. Con base en la Ec.1 el término de la izquierda ( $dc/dt$ ) es proporcional al caudal admitido por la válvula y en consecuencia aumenta cuando el término ( $Q_{in}C_{in}$ ) es mayor. Por tanto, cuando la válvula T/N está completamente abierta permite la entrada de mayores volúmenes de agua que mejoran considerablemente la concentración en la cisterna y a posteriori por bombeo en los depósitos superiores. Lo comentado, se evidencia en la Figura 6b, donde superadas las 60 horas de almacenamiento (estabilización del modelo), la calidad del agua en los depósitos mejora considerablemente y sigue una clara tendencia en aumento y disminución en función de los ciclos de arranque/paro del sistema de bombeo.

Además, como se observa en la Figura 6a, independiente de la [Cl] en la red principal los rangos de fluctuación de las concentraciones de cloro en los depósitos mejoran cuando los niveles de agua en la cisterna son controlados con válvulas de flotación T/N, minimizando así, el problema de pérdida de calidad del agua. Asimismo, es importante indicar que a pesar de que la concentración de cloro aumenta a niveles elevados (1 mg/L, Figura 6c) con el uso de válvulas proporcionales no se recuperan los niveles de concentración mínima debido a que la concentración final (C) del término  $dc/dt$  de la Ec.1, aumenta a razón de ( $Q_{in}C_{in}$ ) pero a la vez disminuye por ( $kb^*C$ ), siendo más determinante este último término respecto al segundo porque el caudal de entrada es relativamente pequeño y no existe un aumento considerable y por otro lado la



**Figure 6**

(a) Rango de variación de la  $[Cl]$  en función del tipo de válvula que controla el nivel de agua y de la calidad de la red; (b & c) Evolución de la  $[Cl]$  para cada tipo de válvula cuando la calidad de la red es 0.5 mg/L y 1.0 respectivamente.

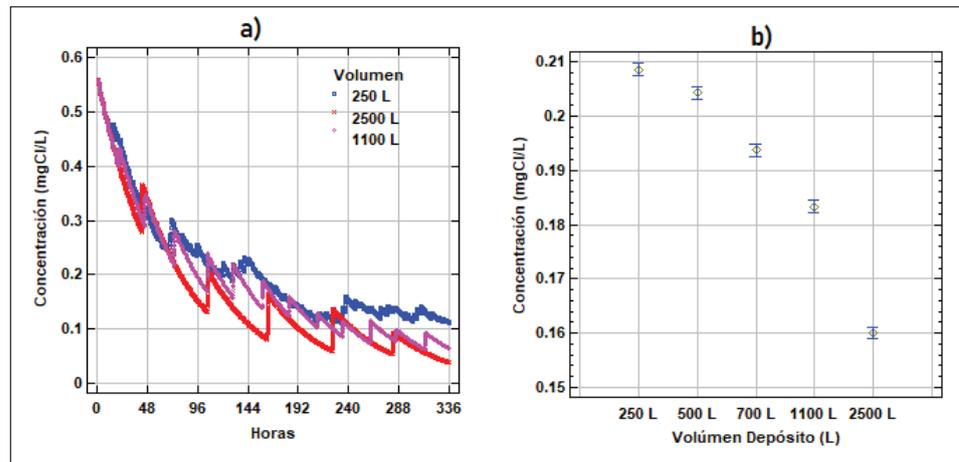
velocidad de reacción de degradación se incrementa (por el aumento de concentración disponible) promoviendo la desaparición gradual del cloro. Lo contrario sucede con las válvulas T/N, donde a pesar de que la velocidad de reacción se mantiene respecto al caso anterior, los caudales aportantes son elevados y por tanto el término  $Q_{in}C_{in}$  tiene mayor repercusión que la degradación, aumentando así los niveles de concentración.

### 3.3. Análisis de la influencia del volumen del depósito

El aumento del volumen total del depósito incrementa el tiempo de residencia del agua en la red e indirectamente según la Ec.1 la concentración de cloro por efectos del tiempo aumenta según la constante  $k_b$  ( $\text{dia}^{-1}$ ). Sin embargo, la pérdida de calidad empieza a ser evidente cuando hay grandes variaciones respecto al volumen de regulación que al ser mayor disminuye los ciclos de operación de las bombas y la entrada de agua en mejores condiciones de calidad al depósito. Es decir que, la calidad está condicionada tanto por el ciclo de arranques de la bomba que dan lugar al término  $(Q_{in}C_{in})$  de la Ec.1, como por la cinética de degradación ( $k_b \cdot C$ ). En consecuencia, si las tasas de llenado y vaciado de los depósitos y los niveles de concentraciones de cloro a la entrada del depósito son bajas ( $<0.4$  mg/L) no habrá el recambio de agua suficiente que promueva la recuperación de los niveles internos de concentración. Por tanto, manteniendo un mismo patrón de demanda el sobredimensionamiento de un tanque puede afectar en forma considerable la calidad del agua. En la Figura 7 se observa la curva de evolución para diferentes volúmenes, la concentración disminuye en depósitos mal



dimensionados a tasas mayores a tal punto que como se puede ver que se alcanza niveles por debajo de 0.1 mg/L (V=2500 L).



**Figure 7**

(a & b) Evolución y Rango de variación de la [Cl] en función del volumen del depósito.

En efecto, depósitos que almacenan agua por largos periodos de tiempo cuando existen patrones de consumo muy bajos minimizan la renovación de agua en los depósitos y por ende la concentración de cloro libre residual disponible, aumentando el riesgo de contaminación. Las [Cl] y los porcentajes de degradación media se detallan en la Tabla 1, además tal y como se observa en la Figura 7b aproximadamente la concentración media en los depósitos disminuye linealmente a medida que aumenta el volumen del depósito.

**Table 1**

Concentración promedio del cloro en depósitos de diferente volumen.

Volumen(L)	[Cl] Depósito	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	%Degradación Media	%Degradación Máxima
250 L	0.209	0.103	0.110	0.56	62.75%	80.37%
500 L	0.204	0.107	0.075	0.56	63.53%	86.52%
700 L	0.194	0.103	0.090	0.56	65.41%	83.94%
1100 L	0.183	0.112	0.061	0.56	67.26%	89.02%
2500 L	0.160	0.117	0.038	0.56	71.41%	93.23%

Elaborado por: Autor.



### 3.4. Análisis del factor más determinante

Como se ha desarrollado en el análisis previo, existen diferentes factores que modifican las características de la calidad del agua disponible a los usuarios, siendo el más perjudicial el sobredimensionamiento de los depósitos para una demanda base determinada que se mantiene constante con el tiempo. El aumento de los tiempos de residencia en la red, y la disminución de ciclos que renuevan los volúmenes de agua en los depósitos merman la posibilidad de generar mezclas que permitan la recuperación de los niveles de concentración de cloro, dificultando en este sentido alcanzar niveles mínimos que garanticen la inocuidad de microorganismos dando lugar a la contaminación del agua, cuyo desenlace es la falta de potabilización y la aparición de problemas en la salud de los usuarios.

En la Tabla 2 se resumen los factores, mediante un análisis de comparación de muestras, que se han considerado en el estudio. En ella, se detallan las concentraciones medias, desviaciones estándar, límites máximos y mínimos de concentraciones, porcentajes de pérdida de calidad.

Como se ha comentado y como se confirma en la Tabla 2 el factor que promueve a la mayor degradación del cloro es el aumento de la capacidad de volumen en el depósito (F3), respecto a las condiciones normales (C.N) de funcionamiento ( $V=1000$  L) el porcentaje de degradación media aumenta en un 4.24%, mientras que el factor que contribuye a garantizar la calidad final del agua es el aumento de concentración en la red principal (F1), la cual disminuye el porcentaje de degradación respecto a las C.N en 9.79%.

Los resultados se corroboran con el análisis de los percentiles (Tabla 3). Cuando el volumen del depósito (F3) aumenta el 50% de capacidad, el 75% de las concentraciones se encuentran por debajo de 0.176 mg Cl/L, lo cual no garantiza la concentración mínima recomendada por la OMS.

Es importante destacar a la vez, que el tipo de válvula que controla el nivel de los depósitos constituye un factor importante en la recuperación de los niveles de concentración, cuando se emplean válvula todo/nada (F2) el 50% de los datos toman valores por debajo de 0.1886 mg/L, en contraposición con las C.N (válvulas proporcionales) donde el 50% de los datos adquieren valores por debajo de 0.1348 mg/L.

## 4. Conclusiones

Este trabajo analiza los impactos en las condiciones de calidad de agua en los depósitos elevados típicos de redes de distribución con servicio intermitente. El modelo empleado



**Table 2**

Resumen estadístico de los factores que modifican las [Cl].

Factor	COD.	Calidad	Recuento	Porcentaje (%)	Promedio	Desviación Estándar	Mínimo	Máximo	% Medio Reducción [Cl]
Condiciones Normales	C.N	Mala	14670	72.77%	0.1762	0.1123	0.06	0.56	68.52%
		Regular	2478	12.29%					
		Óptima	3012	14.94%					
		Total	20160	100.00%					
> [Cl] en la Red	F1	Mala	10111	50.15%	0.2328	0.108	0.093	0.56	58.43%
		Regular	5016	24.88%					
		Óptima	5033	24.97%					
		Total	20160	100.00%					
Válvula Todo/Nada	F2	Mala	11400	56.55%	0.215	0.091577	0.1065	0.56	61.51%
		Regular	5862	29.08%					
		Óptima	2898	14.38%					
		Total	20160	100.00%					
> Volumen Depósito	F3	Mala	15567	77.22%	0.152	0.1184	0.0466	0.56	72.76%
		Regular	1892	9.38%					
		Óptima	2701	13.40%					
		Total	20160	100.00%					

**Nota:** Para la comparación F1 (Se aumentó la concentración de cloro respecto a las C.N en un 50%), F2 se modificó la válvula proporcional por válvula T/N , F4 (Se aumentó el volumen del depósito respecto a las C.N en un 50%). **Elaborado por:** Autor.

**Table 3**

Análisis de percentiles de los factores estudiados.

Percentiles	C.N	F1	F2	F3
1.00%	0.0667	0.0985	0.1121	0.0493
5.00%	0.0745	0.1126	0.1221	0.0569
10.00%	0.0803	0.1213	0.1327	0.0624
25.00%	0.0958	0.1451	0.1546	0.0767
50.00%	0.1348	0.1996	0.1886	0.0998
75.00%	0.2127	0.2997	0.2381	0.1766
90.00%	0.3521	0.4046	0.3441	0.3629
95.00%	0.4386	0.4575	0.4337	0.4270
99.00%	0.5295	0.529	0.5295	0.5295

**Elaborado por:** Autor.

para el análisis fue el Toolkit de Epanet, el cual fue adaptado para estudiar el comportamiento hidráulico y de calidad en base a situaciones reales de domicilios localizados



en Riobamba, Ecuador. Se analizaron 3 escenarios en función de factores que pueden modificar las condiciones de calidad en los depósitos. Además, se realizó un análisis estadístico de estos escenarios para determinar el factor más representativo en el aumento o disminución de las concentraciones de cloro disponible.

La aplicación del modelo confirma los efectos negativos relevantes que introducen los depósitos en la calidad del agua, siendo el principal resultado el incumplimiento con los criterios de potabilización del agua y dando paso a posibles problemas de carácter sanitario en la población. Los resultados del análisis se indican en los siguientes puntos:

1. Los usuarios próximos al depósito de cabecera son los que recibirán el agua con los mejores parámetros de calidad ( $[Cl] = 1.5 \text{ mg Cl/L}$ ), los cuales garantizan que el agua por su paso en los depósitos cumpla con los requisitos mínimos establecidos por la OMS ( $0.2 \text{ mg Cl/L}$ ), sin embargo, la  $[Cl]$  en las extremidades de la red por su degradación en el sistema caerá a  $0.2 - 0.5 \text{ mg Cl/L}$  lo cual representa que aproximadamente el 75% de las concentraciones en los depósitos a lo largo del tiempo estén por debajo de  $0.21 \text{ mg/L}$ .
2. Las válvulas T/N permiten recuperar los niveles de concentración de cloro en los depósitos con mayor magnitud respecto a las válvulas proporcionales. Por el volumen de agua admitido ( $Q_{in} C_{in}$ ), según las ecuaciones que gobiernan la variación de concentración, permiten una mayor restitución de esta. El porcentaje de pérdida de concentración media para las válvulas T/N y proporcionales es de 61.51 y 68.52% respectivamente.
3. La pérdida de calidad de agua empieza a ser evidente cuando hay grandes variaciones respecto al volumen de regulación (volumen del depósito), cuando el volumen es mayor disminuyen los ciclos de operación de las bombas y la entrada de agua en mejores condiciones de calidad al depósito.
4. El factor que más afecta a la pérdida de calidad es el aumento del volumen de almacenamiento. Si el volumen aumenta el 50% de su capacidad, la pérdida de concentración aumenta 4.24 %.

Para mejorar la calidad del agua en puntos alejados en los depósitos de cabecera (redes con servicio intermitente) deben incorporarse en la red puntos estratégicos de reinyección de cloro, para garantizar que la calidad del agua una vez que ingresa a los depósitos y/o cisternas (después del proceso de degradación y/o volatilización del cloro) sea apta para consumo.

Desarrollos futuros, se centrarán en la incorporación de la calidad del agua en depósitos privados en la modelación de redes con servicio intermitente donde se tome



en cuenta la optimización en función de las relaciones existentes entre la eficiencia energética y los costos que involucra satisfacer los criterios de potabilidad del agua.

## References

- [1] Nelson KL, Perroni EA, Buss S. Suministro intermitente en el contexto de esfuerzos por mejorar el abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe Suministro intermitente en el contexto de esfuerzos por mejorar el abastecimiento de agua potable en América Latina y el Caribe [Internet]. 2017 [cited 2018 Feb 16]. Available from: <https://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/8027/Suministro-intermitente-en-el-contexto-de-esfuerzos-por-mejorar-el-abastecimiento-de-agua-potable-en-America-Latina-y-el-Caribe-Lecciones-de-un-estudio-de-caso-en-Arraijan-Panama.pdf?sequence=2>
- [2] Cobacho R, Arregui F, Cabrera E, Jr EC. Private water storage tanks: Evaluating their inefficiencies. *Water Practice & Technology*. 2008 [cited 2017 Nov 29];3(1). Available from: <http://www.ita.upv.es/idi/descargaarticulo.php?id=173>
- [3] Criminisi A, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G. Evaluation of the apparent losses caused by water meter under-registration in intermittent water supply. *Water Science and Technology*. 2009;60(9):2373–2382.
- [4] De Marchis M, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G, Napoli E, Notaro V. Modeling of distribution network filling process during intermittent supply. In: *Integrating Water Systems - Proceedings of the 10th International on Computing and Control for the Water Industry, CCWI 2009* [Internet]; 2009 Sep 1–3; Sheffield, UK. Boca Raton, FL: CRC Press; 2010; p. 189–194.
- [5] Kruger E. Water quality deterioration in potable water reservoirs relative to chlorine decay. South Africa: Water Research Commission; 2001. 78 p. Report No.: 921/1/01. Available from: <https://www.wrc.org.za/wp-content/uploads/mdocs/921-1-01.pdf>
- [6] Erickson JJ, Smith CD, Goodridge A, Nelson KL. Water quality effects of intermittent water supply in Arraijan, Panama. *Water Research*. 2017;114:338–350.
- [7] Mohamed HI, Gad AAM. Effect of cold-water storage cisterns on drinking-water quality. *Journal of Water Resources Planning and Management*. 2011;137(5):448–455.
- [8] Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G. Analysis of intermittent supply systems in water scarcity conditions and evaluation of the resource distribution equity indices. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*. 2007;103:635–644.



- [9] De Marchis M, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G, Napoli E, Notaro V. Analysis of the impact of intermittent distribution by modelling the network-filling process. *Journal of Hydroinformatics* [Internet]. 2011 [cited 2017 Nov 27];13(3):358. Available from: <https://iris.unipa.it/retrieve/handle/10447/76190/77924/2010 - Hydroinformatics.pdf>
- [10] De Marchis M, Fontanazza CM, Freni G, La Loggia G, Notaro V, Puleo V. A mathematical model to evaluate apparent losses due to meter under-registration in intermittent water distribution networks. *Water Science and Technology: Water Supply*. 2013;13(4):914–923.
- [11] Puleo V, Milici B. Water losses dynamic modelling in water distribution networks. *AIP Conference Proceedings* [Internet]. 2015 [cited 2018 Apr 10];1702(180004). Available from: <https://doi.org/10.1063/1.4938953>
- [12] Basile N, Fuamba M, Barbeau B. *Water Distribution Systems Analysis 2008* [Internet]. Reston, VA: American Society of Civil Engineers; 2009. Optimization of water tank design and location in water distribution systems. [cited 2017 Nov 29]. p. 1–13. Available from: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/41024%28340%2932>
- [13] Clark RM, Rossman LA, Wymer LJ. Modeling distribution system water quality: Regulatory implications. *Journal of Water Resources Planning and Management* [Internet]. 1995 [cited 2017 Nov 29];121(6):423–428. Available from: <http://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281995%29121%3A6%28423%29>
- [14] Lemke A, DeBoer DE. Effect of storage tank mixing on water quality. Brookings, SD: Water and Environmental Engineering Research Center, South Dakota State University; 2012.
- [15] Evison L, Sunna N. Microbial regrowth in household water storage tanks. *Journal AWWA*. 2001; September:85–94.
- [16] Jensen PK, Ensink JHJ, Jayasinghe G, van der Hoek W, Cairncross S, Dalsgaard A. Domestic transmission routes of pathogens: The problem of in-house contamination of drinking water during storage in developing countries. *Tropical Medicine & International Health* [Internet]. 2002 [cited 2018 Mar 16];7(7):604–509. Available from: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/12100444>
- [17] Schafer CA, Mihelcic JR. Effect of storage tank material and maintenance on household water quality. *Journal AWWA*. 2012;104(9):49–50.
- [18] Alexandra D, Renwick V. The effects of an intermittent piped water network and storage practices on household water quality in Tamale, Ghana [Internet]. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology; 2013



- [cited 2017 Nov 27]. Available from: [http://web.mit.edu/watsan/Docs/StudentTheses/Ghana/2013/Thesis\\_D\\_Vacs\\_Renwick\\_FINAL\\_5-31-13.pdf](http://web.mit.edu/watsan/Docs/StudentTheses/Ghana/2013/Thesis_D_Vacs_Renwick_FINAL_5-31-13.pdf)
- [19] Hernandez-Lopez RD, Tzatchkov VG, Martin-Dominguez A, Alcocer-Yamanaka VH. Study of hydraulics and mixing in roof tanks used in intermittent water supply. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development* [Internet]. 2016;6(4):547–554. Available from: <http://washdev.iwaponline.com/cgi/doi/10.2166/washdev.2016.147>
- [20] Kordach A, Chardwattananon C, Wongin K, Chayaput B, Wongpat N. Evaluation on the quality of Bangkok tap water with other drinking purpose water. *The First Conference of the International Water Association IWA for Young Scientist in Poland “Water, Wastewater and Energy in Smart Cities”* [Internet]; Cimochowicz-Rybicka M, editor. 2018 Feb 6 [cited 2018 Mar 20];30:01011. Available from: <https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/20183001011>
- [21] Rossman LA. The effect of advanced treatment on chlorine decay in metallic pipes. *Water Research*. 2006 [cited 2018 Jan 11];40(13):2493–2502. Available from: [https://ac.els-cdn.com/S0043135406002788/1-s2.0-S0043135406002788-main.pdf?\\_tid=7adf3ac4-f6a8-11e7-8115-00000aab0f01&acdnat=1515659094\\_28664087628f229b1b2ee975a58978fd](https://ac.els-cdn.com/S0043135406002788/1-s2.0-S0043135406002788-main.pdf?_tid=7adf3ac4-f6a8-11e7-8115-00000aab0f01&acdnat=1515659094_28664087628f229b1b2ee975a58978fd)
- [22] Monteiro L, Viegas RMC, Covas DIC, Menaia J. Modelling chlorine residual decay as influenced by temperature. *Water and Environment Journal*. 2015;29(3):331–337.
- [23] Mastaller M, Klingel P. Adapting the IWA water balance to intermittent water supply and flat-rate tariffs without customer metering. *J Water Sanit Hyg Dev* [Internet]. 2017;7(3):396–406. Available from: <http://washdev.iwaponline.com/lookup/doi/10.2166/washdev.2017.1163516846>