

Prospección de la demanda de cloro en pozos de suministro de Valladolid, Yucatán

Grisel Anahí Cervantes-Cocom*, Anahí Koh Balam, Edwin Edilberto Poot Pech, Camilo Gabriel Chan-Ceh, Freddy Lizandro Cante Loeza

Instituto Tecnológico Superior de Valladolid, Dirección Carretera Valladolid - Tizimín Km 3.5 Tablaje Catastral No. 8850, Valladolid, Yucatán, C.P. 97780

Fecha de recepción: 5 de diciembre de 2022 - Fecha de aceptación: 17 de abril de 2023

Resumen

Los sistemas municipales abastecen a las localidades en su mayoría con tratamiento a partir de cloro. Sin embargo, la verificación de la efectividad del proceso es muy limitada. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivos determinar la calidad del agua de suministro en tomas domiciliarias y calcular concentraciones efectivas o demanda de Cl_2 de tres pozos de suministro de Valladolid, Yucatán. Contar con estos historiales es importante debido a que en muchos de los sistemas municipales no se realizan mediciones periódicas para determinar la demanda, pues la calidad del agua varía espacial y temporalmente. Los parámetros pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), TDS (mg/L), Cloro libre (mg/L) se determinaron en diez puntos las dosis efectivas de cloro demandadas por las aguas extraídas para suministro poblacional de tres pozos de abastecimiento, y coliformes fecales y totales en treinta colonias de Valladolid. Para los pozos, se realizaron curvas de cloro con el fin de obtener dosis óptimas por medio ajustes o regresiones de las concentraciones de Cl_2 y cloro libre residual. El cloro libre determinado en las muestras de casa habitación presentaron concentraciones menores a las necesarias (0.10 a 0.25 mg/L) en cuatro puntos de diez para un efecto residual que mitigue la presencia de patógenos. De las colonias muestreadas 23 de las 30 dieron resultado positivo a las pruebas presuntiva y confirmativa de coliformes Totales y fecales. Para 0.3 mg/L de cloro libre residual que inactive incluso *Giardia lamblia*, las dosis determinadas de Cl_2 a partir de hipoclorito de sodio al 13% mediante los mejores ajustes fueron 41.51 mg/L en Sisal, 26.62 mg/L en San Francisco y 86.42 mg/L en Zaciabil.

Palabras claves: Cloración; sistemas de abastecimiento de agua; aguas subterráneas

Prospecting for chlorine demand in supply Wells in Valladolid, Yucatán

Abstract

The municipal systems supply the localities mostly with treatment based on chlorine. However, verification of the effectiveness of the process is very limited. Therefore, this study had the objectives of determining the quality of supply water in household intakes and calculating effective concentrations of Cl_2 demand from three supply well in Valladolid, Yucatan. Having these dates is

*grisel.cc@valladolid.tecnm.mx

important because in many of the municipal systems periodic measurements are not carried out to determine the demand, recognizing that this activity must be carried out habitually, since the quality of the water varies spatially and temporally. The parameters pH, temperature ($^{\circ}\text{C}$), conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$), TDS (mg/L), free chlorine (mg/L), were determined at ten points (houses adjacent to the target well), the effective doses of chlorine demanded by the water extracted for population supply from three supply wells, and fecal and total coliforms in thirty colonies of Valladolid. For the wells, chlorine curves were made in order to obtain optimal doses through adjustments or regressions of the concentrations of Cl_2 and residual free chlorine. The free chlorine determined in the house samples presented lower than necessary concentrations in four points out of ten for a residual effect that mitigates the presence of pathogens. Of the colonies sampled, 23 of the 30 gave positive results to the presumptive and confirmatory tests for total and fecal coliforms. For 0.3 mg/L residual free chlorine to inactivate even *Giardia lamblia*, the Cl_2 doses determined from 13% sodium hypochlorite using best regressions were 41.51 mg/L in Sisal, 26.62 mg/L in San Francisco y 86.42 mg/L in Zaciabil.

Keywords: Chlorination; water supply systems; groundwater

Introducción

Se sabe que grandes epidemias han surgido y se han propagado por la contaminación del agua, pues en estado natural es el hábitat de microorganismos y sustancias que pueden provocar enfermedades, cuando no se aplica algún tratamiento de desinfección (Comisión estatal del agua de Guanajuato, 2006). Una de las técnicas más utilizadas de tratamiento del agua es la cloración, que consiste en emplear hipoclorito debido al bajo costo, facilidad de obtención en el mercado y fácil mantenimiento residual en la red de distribución (Pérez, 1981). Pero, es importante mencionar que, así como favorece la desinfección del agua el uso inadecuado de esta sustancia, puede llegar a generar sustancias genotóxicas y cancerígenas. Es por ello que, en la localidad de Valladolid, Yucatán se llevó a cabo una serie de muestreos en pozos de abastecimiento, así como en casas habitación en las que se realizaron análisis microbiológicos (coliformes fecales, totales y *E. Colli*) y fisicoquímicos (principalmente cloro total y cloro residual), para determinar dosis para desinfección al mismo tiempo que se comparaba si los parámetros se encontraban dentro del límite permisible de acuerdo a la normatividad mexicana.

Asociada a la litología, nivel freático, el tipo de suelo y la alta presencia de cenotes y grandes

fisuras el acuífero kárstico de Yucatán es desde vulnerable a muy vulnerable (Moreno Gómez *et al.*, 2019). De ahí la importancia de tratar adecuadamente los efluentes residuales domésticos. A causa de los virus, bacterias y protozoarios presentes en las aguas residuales (Howe *et al.*, 2017) que pueden contaminar las fuentes de suministro. Como evidencia en un estudio (Méndez *et al.*, 2015) en el que se evaluó la calidad de agua subterránea en 106 pozos de abastecimiento de Yucatán, midiendo coliformes y enterococos se determinó que el 83% de los pozos exceden la normatividad mexicana y el 84.9% tuvieron contaminación fecal. Entonces, el tratamiento de las aguas de abastecimiento es suma importancia para prevenir enfermedades infecciosas. Los agentes de desinfección en general son: cloro libre, cloro combinado (cloraminas), dióxido de cloro, ozono y luz ultravioleta (Howe, *et al.*, 2017). Pero, la cloración es el método más común para desinfección debido a que ha demostrado ser efectivo contra virus, hongos y bacterias. También, es efectivo debido a su efecto residual, característica que otros métodos de desinfección no poseen (CONAGUA, 2016). Además, si se desea implementar las técnicas de determinación son rápidas, lo que representa una ventaja sobre otros métodos.

La química del cloro elemental (Cl_2) tiene una fuerte tendencia a reducirse, para el proceso de desinfección, es de relevancia el ácido hipocloroso (HOCl) formado por hidrólisis del cloro (Weber, et al., 2017). Por su parte de acuerdo a lo detallado por Manahan (2014) las dos especies químicas formadas por el cloro en el agua, HOCl y el ión hipoclorito (OCl^-), se conoce como cloro libre disponible. Siendo el cloro libre disponible muy eficaz para matar a las bacterias.

Howe *et al.* (2017) describen la cloración añadiendo hipoclorito de sodio al agua, el HOCl es predominante por debajo de 7.6 de pH y un OCl^- por encima del mismo valor, siendo el primero con una cinética de desinfección más rápida y, es más potente que el OCl^- . El mismo autor menciona que las reacciones de desinfección son oxidaciones que convierten el cloro a ion cloruro mientras los microorganismos se neutralizan. Así, el cloro residual total es la suma del residual de cloro combinado y cualquier residual de cloro libre.

Una de las ventajas más relevantes de la cloración es que mejora la calidad del agua de consumo, pues el cloro (Cl) reacciona con el NH_3 , Fe, Mn, sulfuros y algunas sustancias orgánicas, pero, si la dosificación es equívoca y existe presencia de sustancias como los fenoles también puede intensificar el sabor y olor de materiales orgánicos (APHA *et al.*, 1992). Entonces, al sobrepasar ciertos límites se generan subproductos como los trihalometanos (THM), los cuales son clasificados como cancerígenos (Sawyer *et al.*, 2000). Por lo tanto, es importante conocer el mecanismo de desinfección de la cloración, debido a que la cloración a pesar de ser una barrera para las enfermedades de origen hídrico (CONAGUA, 2016), es muy reactivo con los compuestos presentes en el agua, los cuales pueden interferir con la desinfección (Messina Baas, 2006). Por lo tanto, es una necesidad innegable realizar muestreos y determinar periódicamente la demanda de desinfectante

para dosificar de forma efectiva y cuidar la salud de la población.

Las enfermedades infecciosas originadas por el agua como: fiebre tifoidea, paratifoidea, disentería, helmintiasis, y cólera, entre muchas otras (Comisión Nacional del Agua, 2018) se encuentran asociadas a microorganismos provenientes de desechos fecales de humanos y de animales. El acceso a agua potable de calidad sin agentes patógenos es crucial para la reducción de la mortalidad y morbilidad entre la población menor de cinco años. En muestreos de estudios de calidad de agua, realizados en el estado de Yucatán durante 2002 y 2003 (Pacheco Ávila & Cabrera Sansores, 2013), la calidad microbiológica, de las muestras de agua de los sistemas municipales de abastecimiento, se clasificaron como aceptables en 45%, contaminadas en 23%, peligrosas en 18% y muy contaminadas en 14%. Con respecto a Valladolid Yucatán, se encontró como contaminada, y aunque es muy probable la variación de las características del agua a nivel temporal, es innegable que ha existido riesgo para la salud pública, por lo que se debe cuidar y establecer como prioritaria la desinfección del agua para abastecimiento. Por lo tanto, este estudio tuvo como objetivo analizar parámetros fisicoquímicos para evaluar la efectividad del tratamiento y al mismo tiempo determinar las dosis idóneas de cloro para la desinfección de las aguas de abastecimiento en Valladolid, Yucatán. Las características de las aguas se midieron de muestras obtenidas de casas habitación, para estimar si existían diferencias en las dosis requeridas entre los pozos de abastecimiento y las concentraciones de las dosis que generen un efecto residual.

Metodología

Las muestras de casas habitación de 30 colonias destinadas a los análisis microbiológicos se tomaron siguiendo los procedimientos de la NMX-AA-042-SCFI-2015 (Secretaría de economía, 2015). De igual

manera se ejecutaron las técnicas para la enumeración de coliformes totales, coliformes fecales y *escheriquia coli* obteniendo el número más probable para diagnosticar el suministro de agua en 30 colonias. En la primera etapa se empleó lactosa y caldo lauril sulfato de sodio, en la segunda etapa caldo bilis verde brillante para confirmar la presencia de coliformes fecales y totales. Posteriormente en la tercera etapa se observó la presencia de microorganismos gran negativos y positivos en caldo lauril y nutritivo. Por último, se usó medio EC inoculado a partir de positivos de verde brillante con el fin de confirmar coliformes fecales termo tolerantes.

Para la colecta de agua se purgaron las tuberías de los pozos durante tres minutos mediante las válvulas de salida y se tomaron las muestras en bidones de 20 L y previamente reposados en HCl al 15% durante 24 horas y aclarados con agua destilada. La toma de muestras de los grifos de las casas habitación para la medición de parámetros fisicoquímicos se realizó de acuerdo a la NOM-014-SSA1-1993 (SSA, 1993). Las muestras se almacenaron en neveras que mantenían las muestras tomadas en botellas ámbar de 1 L previamente lavadas y a no más de 4°C.

Se tomaron diez muestras aleatorias de tomas domiciliarias de las colonias aledañas a los tres pozos de suministro autorizados por el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Valladolid para determinar las concentraciones de cloro residual y parámetros fisicoquímicos in situ. Para determinar la demanda de cloro se llevaron a cabo tres muestreos autorizados por el Sistema de Agua Potable y Alcantarillado de Valladolid, en la misma cantidad de pozos de

suministro (Tabla 1). Los muestreos se realizaron en los meses de octubre, noviembre y diciembre de 2022. Para determinar el tamaño de la muestra de las tomas domiciliarias se consultó la norma PROY NOM-250-SSA1-2014 (SSA, 2014), sin embargo, debido a que se muestrearon tres pozos de suministro de las colonias Sisal, San Francisco y Zaciabil (Tabla 1), se tomó en cuenta la población de las colonias mencionadas.

Con el propósito de determinar las concentraciones idóneas para desinfección, se tomaron las muestras de los pozos y se practicaron curvas de titulación con un total de 31 puntos preparadas de acuerdo a las siguientes concentraciones 0, 3.9, 4.94, 5.98, 7.02, 7.93, 8.97, 10.01, 10.92, 11.96, 13, 13.91, 14.95, 15.99, 16.9, 17.94, 18.98, 19.89, 20.93, 21.97, 22.88, 24.05, 24.96, 26, 27.04, 27.95, 28.99, 29.9, 30.94, 31.98 y 33.02 en mg/L de Cl₂ obtenidos a partir de NaOCl al 13% con 130g/L de cloro disponible como Cl₂. Estas concentraciones fueron determinados en pruebas o ensayos previos durante el 2021.

De cada uno de los puntos de las curvas se determinó el cloro total y cloro libre. La medición de cloro total se realizó mediante el método yodométrico (4500-Cl B) (APHA *et al.*, 1992), se valoró con una solución patrón de tiosulfato de sodio (Na₂S₂O₃) usando almidón como indicador. Para la medición del cloro residual libre, se utilizó una adaptación del método EPA DPD 330.5 (United States Environmental Protection Agency, 1983) tanto en las curvas de cloración de los pozos de abastecimiento como en las tomas de agua domiciliarias.

Tabla 1. Coordenadas de pozos de extracción.

Pozo de extracción	Coordenadas	
Pozo 1 SISAL	-88.21376	20.681115

Pozo 2 S. FRANCISCO	-88.18139	20.688918
Pozo 3 ZACIABIL	-88.19832	20.67254

El análisis de cloro residual de las tomas domiciliarias se realizó inmediatamente después de recabar cada muestra para evitar la volatilización del cloro, también se evitó el exceso de luz y agitación (APHA, et al., 1992) y si las concentraciones superaban el intervalo de detección del fotómetro se recurrió a diluciones agua destilada-muestra, en proporciones de 20:80. In situ los parámetros determinados fueron: conductividad ($\mu\text{S}/\text{cm}$), pH, temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxígeno (mg/L) y sólidos disueltos totales (mg/L) empleando el potenciómetro modelo HI98122-5.

Para conocer la dosis idónea por pozo se realizaron las regresiones de las curvas de Cl_2

(mg/L) contra el cloro residual (mg/L), con ajustes potencial, exponencial, logarítmico y lineal. Una vez obtenidas las ecuaciones se determinaron las dosis de Cl_2 para una concentración de cloro libre residual propuesta como 0.3 mg/L.

Resultados

Para las muestras de casa habitación los parámetros fisicoquímicos presentan especial relevancia en cuanto al cloro libre (Tabla 2), tres muestras presentaron concentraciones muy bajas que se presumió no cumplían con el efecto residual necesario para desinfección.

Tabla 2. Resultados obtenidos en los análisis fisicoquímicos de casas habitación en Valladolid, Yucatán

Número de casa	Parámetros <i>In Situ</i>					
	pH	Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)	Conductividad ($\mu\text{S}/\text{m}$)	TDS (mg/L)	Cloro Libre (mg/l)	cloro total
C1 ZACIABIL	6.7	27.1	990	480	0.6	0.7
C2 ZACIABIL	6.8	36.5	1060	520	0.09	0.12
C3 ZACIABIL	6.7	29.7	1020	490	0.55	0.65
C4 SAN JUAN	6.7	29.3	990	480	0.49	0.6
C5 JARDINES DE SAN FRANCISCO	6.5	34.4	760	360	0.1	0.01
C6 JARDINES DE SAN FRANCISCO	6.9	28.4	750	350	0.14	0.16
C7 JARDINES DE SAN FRANCISCO	6.7	30.2	730	340	0.04	0.06
C8 SISAL	7.2	28.4	960	460	0.03	0.03
C9 SISAL	6.8	30.1	1030	500	0.04	0.04
C10 SISAL	6.7	29.4	960	460	0.23	0.17

La demanda de cloro, en el pozo de Sisal presentó un punto de quiebre con una

concentración de 49.92 mg/L de cloro total y cloro residual de 0.15 mg/L, para los demás

pozos las gráficas generadas no permitieron observar y establecer clara y gráficamente un punto de quiebre. Sin embargo, a partir de regresiones de las curvas de demanda de cloro de los pozos de suministro en las que se graficó la dosis de Cl₂ (mg/L) contra cloro residual (mg/L), se establecieron regresiones que permitieron establecer modelos a partir de curvas de titulación de treinta mediciones de demanda de cloro por pozo. Así, es posible determinar las dosis de Cl₂ (mg/L) mediante el o los mejores ajustes de las curvas obtenidas

por muestreo y asociadas al pozo correspondiente, que presenten los mejores coeficientes de determinación reflejando mayor bondad de ajuste y por lo tanto fiabilidad para determinar la dosis de cloro con base al cloro residual libre deseado, después de aproximadamente una hora de contacto para eliminar patógenos. Entonces los resultados de los modelos obtenidos se presentan en la Tabla 3 de los cuales es posible obtener concentraciones de cloro para cumplir con la desinfección de las aguas de suministro.

Tabla 3. Modelos de cloro residual libre de los pozos de suministro en Valladolid, Yucatán

REGRESIONES								
Pozo	Potencial	Exponencial		Logarítmica		Lineal		R ²
	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	R ²	Ecuación	
SISAL	$y=0.0089x^{0.9707}$	0.858	$y=0.069e^{0.0354x}$	0.937	$y=0.282\ln(x)-0.6592$	0.669	$y=0.0108x-0.078$	0.863
SAN FRANCISCO	$y=0.0037x^{1.3218}$	0.961	$y=0.067e^{0.0458x}$	0.930	$y=0.4604\ln(x)-1.1214$	0.805	$y=0.0172x-0.158$	0.945
ZACIABIL	$y=0.0031x^{1.2496}$	0.851	$y=0.0495e^{0.0435x}$	0.371	$y=0.2579\ln(x)-0.5983$	0.7635	$y=0.0098x-0.547$	0.851

La variable independiente es dosis de Cl₂(mg/L).

Concentraciones de 0.25 mg/L a 0.3 mg/L son aceptables como cloro residual libre para desinfección, para 0.3 mg/L las dosis determinadas de Cl₂ mediante los mejores ajustes son 41.51 mg/L en Sisal, 26.62 mg/L en San Francisco y 86.42 mg/L en Zaciabil.

Con base a los resultados de los análisis microbiológicos que corresponden a la primera

y segunda etapa se calculó el número más probable (Tabla 4). Cabe resaltar que se realizaron los cálculos aplicables a pruebas para la determinación de Coliformes Totales, Coliformes Fecales Termotolerantes y *E. Coli* con series de tres para un 95% de nivel de confianza.

Tabla 4. Resultados de pruebas presuntivas y confirmativas para coliformes fecales y totales.

Muestra	Colonia	NMP Prueba presuntiva	NMP Prueba confirmativa
P1M1	COL. CENTRO	0	0
P2M2	COL. XLA-PAC	0	0
P3M3	COL. PUESTA DEL SOL	9	9
P4M4	COL. FLAMBOYANES	21	21
ETAPA 6			
P5M5	COL. OAXAQUEÑA	4	4

P6M6	COL. FLAMBOYANES	4	4
ETAPA 2			
P7M7	COL. SISAL	11	4
P8M8	COL. CRUZ VERDE	4	4
P9M9	COL. SACIABIL	4	4
P10M10	COL. SAN JUAN	11	11
P11M11	COL. SAN FRANCISCO	≥2400	≥2400
P12M12	COL. MILITARES	4	4
P13M13	COL. SANTA ANA	4	4
P14M14	COL. JARDINES DE ORIENTE	0	0
P15M15	COL. SANTA CRUZ	240	240
P16M16	COL. SANTA ANA	0	0
P17M17	COL. FERNANDO NOVELO	6	6
P18M18	COL. CANDELARIA	3	3
P19M19	COL. LOL BEH	4	4
P20M20	COL. LAS PALMAS	4	4
P21M21	COL. FLOR CAMPESTRE	0	0
P22M22	COL. LOL ORQUÍDEAS	0	0
P23M23	COL. SAN ISIDRO I	3	3
P24M24	COL. SAN ISIDRO II	3	3
P25M25	COL. SAN PABLO Y SAN ANTONIO	4	4
P26M26	COL. BACALAR	23	23
P27M27	COL. EMILIANO ZAPATA	0	0
P28M28	COL. CUPULES	9	9
P29M29	COL. X-CORAZÓN	23	23
P30M30	COL. SAN CARLOS	93	93

Los resultados de la tercera etapa que consistió

en la observación en microscopio a partir de los cultivos de las primeras etapas, dieron resultado positivo 23 de las 30 colonias muestreadas. Por su parte el medio EC únicamente dio resultado positivo en la colonia San Francisco.

Discusión

Independientemente del método de desinfección empleado, hallar las concentraciones para el tratamiento de agua en sistemas municipales es cuestión de seguridad, de ahí la importancia de aplicar técnicas de análisis considerando la temporalidad, que arrojen resultados sobre dosis efectivas, a causa de que la concentración de contaminantes puede variar en las escalas temporal o espacial.

A raíz de lo anterior, cada estudio de calidad de

agua ejecutado, es un recurso para la toma de decisiones, del uso y protección del recurso hídrico. Los estudios de calidad de agua en la región oriente del estado de Yucatán siguen siendo escasos. Recientemente se han estudiado la potencial influencia de la temporada de lluvia en la calidad de agua potable y usos de la tierra, contrastándose las siguientes cuestiones: el agua subterránea es diluida en la temporada de lluvias; no todos los parámetros fisicoquímicos medidos durante las temporadas presentan el mismo comportamiento; la química de los pozos someros se ve más afectados que los pozos de abastecimiento municipal; y por último los diferentes usos que tiene el territorio de estudio influyen en la calidad del agua que se tiene en

cada pozo municipal muestreado (Long *et al.*, 2018). Es necesario realizar más análisis de la efectividad de los tratamientos desinfectantes en las aguas de consumo. Contar con programas de monitoreo de parámetros fisicoquímicos de los pozos de suministro público para construir bases de datos, y manejo geostadístico, son de gran importancia en países con sistemas kársticos, para evaluar el estado hidro geoquímico de las aguas subterráneas a fin de administrar y salvaguardar los recursos de agua potable para su aprovechamiento sustentable (Mendizabal *et al.*, 2011) así mismo, algunos países además monitorean el cloro residual en sus redes de sistema de abastecimiento. Por ejemplo, en India, con cloro residual 0.27 ± 0.7 mg/L (Philipp *et al.*, 2019) y Pakistán (Hashmin *et al.*, 2009) con 0.27 ± 0.42 mg/L, se monitorean datos que se correlacionan con los coliformes totales para evaluar efectividad. Precisamente es la medición de cloro residual en el sistema de suministro de Valladolid en treinta colonias lo que resultó en 23 puntos con resultados positivos de pruebas presuntivas y confirmativas para coliformes fecales y totales.

Por otra parte, países como China, se invierte para realizar investigación sobre el efecto de una segunda cloración en el crecimiento de las bacterias patógenas, empleándose innovadores analizadores portátiles rápidos de cloro residual que tienen un rango de medida de 0.01-5mg/L (Zhao, et al., 2020). En otros estudios se pretende estudiar la efectividad de los sistemas de cloración para la desinfección e inactivación de virus y bacterias resistentes como *Cryptosporidium hominis* y *Giardia lamblia* presentes en fuentes de abastecimiento en países en vías de desarrollo como Panamá (Orner *et al.*, 2017). También, se han implementado estrategias para aumentar el acceso al agua clorada por medio de dosificadores en los que el cloro libre residual fue detectable el 97% del tiempo (Powers *et al.*, 2021).

En Canadá se ha demostrado (Rand *et al.*, 2014) que el mantenimiento de una concentración de cloro libre de 0.30 mg/L o superior reduce sustancialmente la aparición de bacterias heterotróficas que pueden superar las 500 UFC/ml. El mismo autor señala que este residual es más alto que la que el usual de 0.20 mg/L de cloro libre, por ello es importante conocer el sistema de abastecimiento con el objeto de suministrar agua de alta calidad y optimizar el rendimiento del reactivo de desinfección.

Así, los proyectos relacionados con la cloración de sistemas de abastecimiento, presentan prioridades como: a) fortalecer las cadenas locales de suministro de cloro, b) validar los modelos comerciales y la sostenibilidad financiera, c) herramientas de detección para monitorear los niveles de cloro en tiempo real y las fallas potenciales de los sistemas, y por último d) diseñar cloradores (Lindmark et al. 2022). Y, por consiguiente, parte del objetivo de este proyecto, se cumplió a raíz del monitoreo de las concentraciones de cloro libre residual en las tomas de suministro y se propone que en Valladolid se dosifique hasta detectar concentraciones de cloro residual de hasta 0.3 mg/L.

En Valladolid, los resultados de las determinaciones de cloro libre, en cuatro de los 10 puntos de muestreo se encontró concentraciones de cloro residual por debajo de 0.10 mg/L, indispensable para mitigar la proliferación de patógenos en el agua y debajo del necesario para tener un efecto residual desinfectante.

En el estado de Yucatán se ha determinado la calidad bacteriológica del agua subterránea en los pozos de abastecimiento de las cabeceras municipales y el municipio de Valladolid fue parte del porcentaje que sobrepaso límites permisibles (Méndez Novelo *et al.*, 2015). Lo anterior destaca la necesidad de atender la eficacia de la desinfección con los recursos al alcance, pues, en algunos países no toda la

población cuenta con acceso al agua potable, por diversas razones tales como la falta de: electricidad, infraestructura, conocimientos técnicos, recursos económicos, o de suministro de productos químicos para la desinfección. Entonces, la eliminación de contaminantes microbianos mediante la desinfección es indispensable para garantizar que el agua se gestiona de forma segura. Pues, es posible encontrar *E. Coli* en las muestras de grifo y almacenamiento. Por lo tanto, se requiere modelos de prestación de servicios y cadenas de suministro confiables a partir de la cloración, que tienen potencial para el acceso al agua de manera segura (Crider et al. 2022).

Los campos de pozos de abastecimiento en Yucatán se han medido para encontrar patrones espaciales y temporales de iones mayoritarios o de contaminantes, los niveles elevados de nitratos presentes en el agua subterránea de Yucatán son atribuidos a las actividades agrícolas, por el uso de fertilizantes para el pastoreo de ganado y el cultivo de hortalizas (Pacheco et al., 2001). Estudios realizados en la zona oriente indican que recibe entre 800-1200 mm de precipitación en temporada de lluvias, debido a la lixiviación que ocasionan las intensas lluvias incrementa el riesgo de transporte de materia orgánica al acuífero (Delgado et al., 2010) que son la fuente de agua para potabilización. Además, el crecimiento de la población en las principales ciudades de la Península de Yucatán, así como las actividades turísticas significarían un aumento del consumo público, doméstico e industrial del recurso agua, según las proyecciones de afectación del cambio climático en la recarga del acuífero al año 2030 (Rodríguez Huerta et al., 2019) de ahí la importancia de optimizar el tratamiento del agua y evitar enfermedades transmitidas por esta.

De acuerdo a los resultados de cloro residual, es indispensable que se inspeccione la desinfección del agua con el fin de evitar riesgo a la salud de la población. La efectividad de la cloración es directamente proporcional al

control que se ejerza para asegurarse de proporcionar la dosis adecuada al caudal de abastecimiento. La creciente contaminación dificulta la dosificación, por lo tanto, es necesario el monitoreo constante de la calidad de agua y análisis para determinar los niveles necesarios sin sobrepasar las dosis y aunado a la contaminación orgánica generar subproductos que afectan a la salud de la población. Pues, el monitoreo de especies de DPB que no sean THM4 es rara en países de bajos recursos, donde las fuentes de agua pueden degradarse debido a una infraestructura de saneamiento deficiente y descargas de aguas residuales no controladas (Furst K.E. et al. 2019). Además, de los DPB también es importante medir amoniaco que sugiere la presencia de contaminantes más graves, como patógenos, productos farmacéuticos, productos para el cuidado personal, productos de limpieza o plaguicidas (Zhang et al., 2012) y nitrato que con concentraciones por arriba de 5 mg/L indican contaminación reciente, ya sea por desechos domésticos, de animales o la escorrentía (Ramírez 2011). Así, con técnicas y equipo adecuado se puede capacitar inclusive a personal no especializado para verificar sistemas de desinfección.

Conclusiones

Se determinó el cloro residual en diez puntos de muestreo de los cuales tres presentaron concentraciones menores a las necesarias para un efecto residual que mitigue la presencia de patógenos. Los análisis microbiológicos asociados a coliformes fecales, totales y *E. coli*, resultaron en 23 colonias de 30 con resultados positivos para coliformes fecales y totales, y solo una colonia para *E. coli*. Para la desinfección de las aguas de abastecimiento en Valladolid, Yucatán, las concentraciones de Cl_2 para la presencia de 0.3 mg/L de cloro residual, obtenidas mediante ajustes potenciales, exponenciales, logarítmicos y lineales de curvas de cloración son 41.51 mg/L en Sisal, 26.62 mg/L en San Francisco y 86.42 mg/L en Zaciabil.

Este estudio se limitó a parámetros fisicoquímicos y microbiológicos, por lo que en un futuro sería idóneo aplicar estudios de determinación de subproductos de desinfección. En Yucatán el uso de sumideros para captar los efluentes de aguas residuales es muy común. Por lo tanto, es razonable concluir que existe infiltración de las aguas residuales de sumideros conectados a pozos.

Al Tecnológico Nacional de México por el recurso adquirido mediante la Convocatoria 2022: Proyectos de investigación científica, desarrollo tecnológico e innovación.

Al gobierno municipal de municipio de Valladolid, Yucatán por permitir acceso a los pozos de abastecimiento y toma de muestras de agua.

Agradecimientos

Referencias

- APHA, AWWA & WPCF, 1992. Métodos Normalizados para el Análisis de Aguas Potables y Residuales. Madrid: Ediciones Díaz de Santos, S. A..
- Comisión Nacional del Agua, 2018. Estadísticas del agua en México. [En línea] Available at: http://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2018.pdf
- CONAGUA, 2016. Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Desinfección para Sistemas de Agua Potable y Saneamiento. México D.F: Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales ISBN: 978-607-626-023-4.
- Crider Y.S, Sainju S., Shrestha R., Clair-Caliot G., Schertenleib A., Kunwar B. M., Bhatta M.R., Marks S.J. y Ray I. (2022). Evaluación de la cloración pasiva a nivel del sistema en sistemas de agua por tubería alimentados por gravedad en zonas rurales de Nepal. *Ciencia y tecnología ambiental* 56 (19), 13985-13995. DOI: 10.1021/acs.est.2c03133
- Delgado, C., Pacheco, J., Cabrera, A., Batllori, E., Orellana, R. & Bautista, F. (2010). Quality of groundwater for irrigation in tropical kasrts environment: the case of yucatán, México. *Agricultural Water Mangement*, pp. 1423-1433. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2010.04006>
- Furst K.E., Coyte R.M., Madera M., Vengosh A. y Mitch G.A. (2019). Subproductos de desinfección en Rajasthan, India: ¿Son los trihalometanos un indicador suficiente de la exposición a subproductos de desinfección en países de bajos ingresos?
- Hashmin, I., Farooq Shaukat & Qaiser, S. (2009). Chlorination and water quality monitoring within a public drinking water supply in Rawalpindi Cantt ((wrestridge and Tech) area, Pakistan. *Environmental monitoring Assessment*, pp. 393-403. <https://doi.org/10.1007/s10661-008-0592-z>
- Howe, Kerry J., Hand, David W., Crittenden, John C., Trusell, R. Rhodes, Tchobanoglous, George (2017). Principios de tratamiento del agua. Distrito Federal: Cengage Learning Editores, S.A. de C.V.
- Lindmark M, Cherukumilli K., Crider Y.S., Marcenac P., Lozier M., Voth-Gaeddert L., Lantagne D.S, Mihelcic J.R, Zhang Q.M., Just C. y Pickering M.J.(2022) *Ciencia y tecnología ambiental* 56 (13), 9164-9181. DOI: 10.1021/acs.est.1c08580

- Long, David T., Pearson, Amber L., Voice, Thomas C., Polanco Rogriguez, Angel G., Sanchez Rodriguez, Cuauhtemoc E., Xagorarakí, Irene., Concha Valdez, Fanny G., Puc Franco, Miguel., Rzotkiewicz, Amanda T., Lopez Cetz, R. (2018). Influence of rainy season and land use on drinking water quality in a karst landscape, State of Yucatán, México. *Applied Geochemistry*, 265-277. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.09.020>
- Manahan, S. E. (2014). *Introducción a la Química Ambiental*. Barcelona: Reverté.
- Méndez Novelo, R. I., Pacheco Ávila, J. G., Castillo Borges, E. R., Cabrera Sansores, A., Vázquez Borges, E., Cabañas Vargas, D. D. (2015). Calidad microbiológica de pozos de abastecimiento de agua potable en Yucatán. *Ingeniería, Revista Académica*, 19(1), 51-61. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46750924005>
- Mendizabal, I., Stuyfzand, P. J. & Wiersma, A. P. (2011). Hydrochemical system analysis of public supply well fields, to reveal water-quality patterns and define groundwater bodies: The netherlands. *Hydrogeology Journal*, Issue 19, 83-100. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0614-0>
- Messina Baas, O. (2006). Consecuencias de la desinfección con cloro del agua para consumo humano [Tesis, Universidad Nacional Autónoma de México]. Repositorio institucional <http://132.248.9.195/pd2007/0614507/0614507.pdf>
- Moreno Gómez, M., Martínez-Salvador, C., Walid Mouland, A., Liedl, R., Stefan, C., & Pacheco, J. (2019). First Steps into an Integrated Karst Aquifer vulnerability Approach (IKAV). *Intrinsic Groundwater Vulnerability Analysis of the Yucatan Karst, México*. *water*, 11(1610). doi: <https://doi.org/10.3390/w11081610>
- Organización Mundial de la Salud (2018). *Guías para la calidad del agua de consumo humano*. 4ta ed. Ginebra: Organización Mundial de la Salud.
- Orner, K. D., Calvo, A., Zhang, J. & Mihelcic, J. R. (2017). Effectiveness of in-line chlorination in a developing world gravity-flow water supply. *Waterlines*, 36(2). <https://doi.org/10.3362/1756-3488.16-00016>.
- Pacheco Ávila, J. G. & Cabrera Sansores, S. A. (2013). Calidad del agua Subterránea en el estado de Yucatán despues del Huracán Isidore. Mérida(Yucatán): Fondo Mixto de Fomento a la Investigación Científica y tecnológica CONACYT-Gobierno del estado de Yucatán.
- Pacheco, J., Marin, L., Cabrera , A., Steinich, B. & Escolero, O. (2001). Nitrate temporal and spatial patterns in 12 water-supply wells, Yucatán, México. *Environmental Geology*, 708-715. <https://doi:10.1007/s002540000180>
- Philipp, O., Malakar, P., Sandhu, C., Grishek, T., Kumar Sharma, S., Chandra kimothi, P., Nüske, G., Wagner, M., Goldmaier, A. & Benz, F. (2019). Combination of River Bank Filtration and Solar driven Electro Chlorination Assuring safe Drinking water Supply for River Bound Communities in India. *Water*, 122, 1-17. <https://doi:10.3390/w11010122>
- Powers J.E., McMurry C., Gannon S., Drolet A., Oremo J., Kliein L., Crider Y., Davis J. y Pickering A.J. (2021). Diseño, rendimiento y demanda de un novedoso dosificador de cloro en línea para aumentar el acceso al agua segura. *npj Agua Limpia* 4, 4. <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00091-1>

- Ramírez, C. A. S., 2011. Calidad del agua: Evaluación y diagnóstico. 1era ed. Medellín: Ediciones de la U.
- Rand, J. L., Gagnon, G. A. & Knowles, A. (2014). Establishing minimum free chlorine residual concentration for microbial control in a municipal drinking water distribution system. *Water Practice & Technology*, 9(4), 491-501. [https://doi: 10.2166/wpt.2014.055](https://doi.org/10.2166/wpt.2014.055)
- Rodriguez Huerta, E., Rosas Casals, M. & Hernandez Terrones, L. M. (2019). Water societal metabolism in the Yucatan Peninsula. The impact of climate change on the recharge of the groundwater by 2030. *Journal of Cleaner Production*, 235, 272-287. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.06.310>
- Sawyer, C., Perry, M. & Gene, p. (2000). Química para ingeniería ambiental. s.l.:s.n.
- Secretaria de Desarrollo Social, 2017. Informe anual sobre la pobreza y rezago social 2017: Espita, Yucatán. [En línea] Available at: http://diariooficial.gob.mx/SEDESOL/2017/Yucatan_032.pdf
- SSA, 1993. NOM-014-SSA1-1993. procedimientos Sanitarios para el muestreo de Agua, para uso y consumo humano en sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados.. [En línea] Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/014ssa13.html>
- SSA, 1994. NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.. [En línea] Available at: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- SSA, 2014. ROY NOM-250-SSA1-2014, Agua para uso y consumo humano. Límites máximos permisibles de la calidad del agua y requisitos sanitarios que deben cumplir los sistemas de abastecimiento de agua públicos y privados, su control y vigilancia. Procedimiento sanitario. [En línea] Available at: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5356607&fecha=15/08/2014
- United States Environmental Protection Agency, 1983. Methods for Chemical Analysis of Water and Wastes. [En línea] Available at: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyPDF.cgi/30000Q10.PDF?Dockey=30000Q10.PDF>
- Weber, Walter J., Borchardt, Jack A., Canale, Raymond P., Cleasby, John L., Cruver, James E., Dick, Richard I., Donahue, Francis M., Charles, O'Melia R. & Posselt, Hans S. (2017). Control de la calidad del agua procesos fisicoquímicos. Barcelona: Editorial Reverte, S.A..
- Zhang, H., Zhang, Y., Shi, Q., Hu, J., Chu, M., Yu, J., & Yang, M. (2012). Study on Transformation of Natural Organic Matter in Source Water during Chlorination and Its Chlorinated Products using Ultrahigh Resolution Mass Spectrometry. *Environmental Science & Technology*, 4396-4402. <https://doi.org/10.1021/es203587q>
- Zhao, L., Wang Liu, Y., Li, N., Yan Fan, X. & Li, X. (2020). Response of bacterial regrowth, abundant and rare bacteria and potential pathogens to secondary chlorination in secondary water supply system. *Science of the Total Environment*, 719,137499. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137499>