



Original

EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA EN CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EN SAN JOSÉ, COSTA RICA, PERIODO 2017-2018

Evaluation of climatic seasonal influence on the quality of water for human consumption in a San José (Costa Rica) supply system, 2017-2018

Eric Morales¹, Melissa Solano², Ricardo Morales^{3,4}, Liliana Reyes¹, Kenia Barrantes¹, Rosario Achí¹, Luz Chacón¹

- (1) Instituto de Investigaciones en Salud (INISA), UCR
- (2) Facultad de Microbiología, UCR
- (3) Ministerio de Salud de Costa Rica
- (4) Escuela de Tecnologías de Salud, Facultad de Medicina, UCR

Recibido: Marzo 2019 | Aceptado: Mayo 2019

RESUMEN

Objetivo: Analizar el estado y la influencia de la variabilidad climática en la calidad del agua de un sistema de abastecimiento para consumo humano en San José, Costa Rica, captado en cuatro microcuencas del cantón Vásquez de Coronado, en el periodo 2017-2018, para brindar recomendaciones al operador y promover la protección de la población abastecida

Métodos: Estudio descriptivo de los parámetros de calidad básicos de agua para consumo humano (Escherichia coli, coliformes fecales, turbidez, conductividad, pH, color, temperatura y cloro residual). Los análisis se realizaron siguiendo el Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Se delimitaron las zonas de captación utilizando sistemas de información geográfica. Se utilizó estadística descriptiva e inferencial para describir la calidad del agua y su variabilidad espacial y estacional.

Resultados: La concentración de coliformes fecales en el agua superficial fue > 103 NMP/100 mL y la turbidez > 5 UTN en el 76% de las muestras. En la red de distribución se encontraron concentraciones de cloro residual y turbidez (> 5 UTN) por encima de los límites recomendados para agua de consumo humano. Se encontró diferencias significativas en todos los parámetros básicos de calidad de agua entre las distintas zonas de captación ($p < 0,05$ en todos los casos), así como entre épocas climáticas por zona de captación.

Conclusión: Estos resultados indican que se está utilizando agua de calidad inadecuada para uso y consumo humano, por lo cual se recomienda un monitoreo intensivo y sectorizado de las fuentes para localizar puntos de contaminación.

Palabras claves: abastecimiento de agua, salud ambiental, enfermedades transmitidas por el agua, recurso hídrico.

ABSTRACT

Objective: Analyze the water quality and the influence of the climatic variability in supply system for the human consume in San José, Costa Rica, in four catchment areas in Vasquez de Coronado in the period 2017-2018 to give recommendations to the operator and promote the protection of the supplied population.

Methods: Descriptive study of the basic parameters of the drinking water (Escherichia coli, fecal coliforms, turbidity, conductivity, pH, color, temperature, and residual chlorine). The analyses were done following Standard Methods for the examination of Water and Wastewater. The catchment areas were delimited using geographic information systems (GIS). Descriptive and inferential statistic was used to describe the water quality, spatial and seasonal variability.

Results: The concentration of fecal coliforms in the catchment areas was $> 10^3$ NMP/100 mL and the turbidity > 5 UTN in 76% of the samples. In the distribution system were found concentrations of the residual chlorine and turbidity (> 5 UTN) above according to recommended limits for drinking water in the country. The results showed significant differences in all of the basic parameters of the water quality between catchment areas ($p < 0,05$ in all cases) and between climatic periods for catchment areas.

Conclusion: These results indicate that water of inadequate quality is being used for human use and consumption, for which reason intensive and sectorized source monitoring is recommended to locate contamination points.

Keywords: water supply, environmental health, waterborne diseases, water resources.



INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico es fundamental para el desarrollo humano, su gestión incide directamente la calidad de vida de las poblaciones y su contaminación puede generar pérdidas económicas cuantiosas (1). Se estima que alrededor del mundo cada año se presentan 1700 millones de casos de diarrea infantil que ocasionan la muerte de 525 mil niños (2).

Para la prevención de estos riesgos la calidad del agua de consumo humano debe ser controlada y monitoreada. La calidad del agua se define por medio de la medida de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos según las necesidades de su uso. Además, de las características económicas, hidrología predominante y biota de la región (3).

En Costa Rica existe el Reglamento para la Calidad del Agua Potable, (decreto número 38924-S, 2015), donde se definen los parámetros básicos para determinar la calidad de mínima del agua aceptable. Entre estos parámetros se encuentran coliformes fecales, *Escherichia coli*, pH, turbidez, conductividad, temperatura, color, cloro (agua tratada), sabor (agua tratada), olor (4). Por otro lado, el clima es un factor global que influye en las cuencas hidrográficas. Las fluctuaciones climáticas pueden influir en el acceso y calidad del agua, lo cual, puede llevar al uso de fuentes inapropiadas en periodos de escasez y aumentar el riesgo de la presencia de microorganismos patógenos en los sistemas de abastecimiento de agua de consumo humano (5).

Se ha descrito que la calidad microbiológica y química del agua se ve afectada particularmente por eventos climáticos extremos, como tormentas e inundaciones, donde se ha observado un aumento en la concentraciones de patógenos y turbidez en cuerpos de agua superficiales, causado por el aumento de la escorrentía (6).

Adicionalmente, la precipitación promueve el lavado de los suelos y resuspensión de los lechos de los ríos; e influye sobre los vertidos de aguas residuales domésticas e industriales, lo que aumenta la probabilidad de alteraciones repentinas en la calidad del agua de estos cuerpos (7).

Este estudio analizó la calidad del agua en un sistema de abastecimiento en San José, midiendo parámetros microbiológicos y fisicoquímicos en agua cruda y tratada, en diferentes periodos del año (época lluviosa y seca), con el fin de evaluar como ésta puede verse afectada en el tiempo desde las zonas de captación hasta su llegada al consumidor.

MÉTODOS

Muestreo

El estudio se realizó entre febrero 2017- marzo 2018 en un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano incluyendo sus cuatro zonas de captación (Durazno o D, Lupe o L, Honda 1 o H1 y Honda 2 o H2), la salida de la planta de tratamiento (S) y un punto bajo de la red de distribución (R). Se realizó un total de 27 muestreos en 54 semanas (cada 15 días), incluyendo época seca y lluviosa.

Las muestras fueron recolectadas de acuerdo Standard Methods for the



EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA EN CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EN SAN JOSÉ, COSTA RICA, PERIODO 2017-2018

Examination of Water and Wastewater (SMEWW) (8) y el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, número 38924-S (4). Una vez recolectadas fueron transportadas en condiciones adecuadas (en un lapso menor a 2 h) para su análisis.

Análisis fisicoquímicos

El análisis de los parámetros fisicoquímicos se realizó según el SMEWW (8) incluyendo aquellos descritos en el Reglamento para la Calidad de Agua Potable, número 38924 (4). La temperatura y el cloro en agua tratada se midieron in situ (utilizando un termómetro Fluke®, modelo 62 MAX y medidor de cloro Hanna®, modelo HI 93414, aparato 4500 de SMEWW). Los análisis restantes se realizaron en el INISA: pH (pHmetro Thermo Orion®, modelo 420 A, apartado 4500), turbidez (usando un medidor de turbidez Hanna®, modelo HI 93414, apartado 2130), conductividad (usando un electrodo de platino marca Hach®, modelo Sension 5, apartado 2510). Todos los análisis estaban acreditados bajo la Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005.

Análisis de indicadores fecales

La cuantificación de la coliformes fecales y *Escherichia coli* se realizó con la técnica de fermentación por tubos múltiples de acuerdo con el método 9221 de la SMEWW, apartado 9221 (8), acreditado por la Norma INTE-ISO/IEC 17025:2005. Se determinó la concentración de coliformes fecales y *E. coli* por número más probable (NMP/ 100 mL).

Descripción de variables climáticas

Los datos de precipitación y temperatura diaria de las zonas de

captación fueron obtenidos del Instituto Meteorológico Nacional (IMN). La estación meteorológica se localiza en Patio de Agua, Coronado, a una latitud norte de 09° 58' 37", longitud oeste de 83° 58' 12" y altitud de 1690 m.s.n.m.

Datos geomorfológicos

Las cuencas hidrológicas fueron delimitadas utilizando modelos digitales de elevación (DEM) recopilados de Reverb ECHO y LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) de la NASA (Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio) (9), y el Atlas de Costa Rica 2014 (10). La delimitación de las cuencas se realizó con el software ArcGIS 10.3. utilizando la herramienta de hidrología del paquete análisis espacial siguiendo los modelos morfométricos utilizados por Farfán (11).

Análisis de datos

La determinación de las diferencias en la calidad del agua entre las zonas de captación, la planta de tratamiento y en la red de distribución se realizó por medio de un análisis de varianza ($p \leq 0,05$), utilizando los paquetes `pastecs` (<https://cran.r-project.org/web/packages/pastecs/index.html>), `psych` (<https://cran.r-project.org/web/packages/psych/index.html>) y `PMCMRplus` (<https://cran.r-project.org/web/packages/PMCMRplus/index.html>) del software R Studio. Se analizó normalidad de los datos (prueba Shapiro) y homogeneidad de varianzas (prueba de Bartlett) para la selección de la prueba estadística, cuando se cumplían los supuestos se utilizó el análisis de varianza de un factor (ANOVA) (12), conjunto a una

prueba posthoc (Tukey) para determinar si la diferencia entre las medias de los grupos era significativa dentro de su homogeneidad (12).

Se utilizó el análisis Kruskal-Wallis para las variables que no presentaron normalidad, ni tenían varianzas homogéneas. En este caso, la hipótesis nula considera que todas las poblaciones poseían la misma locación (12). Se utilizó la prueba de Nemeyi para determinar cuáles eran los grupos diferentes.

RESULTADOS

Caracterización de las zonas de captación

El sistema de abastecimiento de agua para consumo humano se alimenta de cuatro zonas de captación: D (área 9,07 Km²), L (área 2,14 Km²), H1 (área 2,00 Km²) y H2 (área 1,10 Km²) (Figura 1). Las zonas (745 m),

H1 (648 m) y H2 (432 m) presentan bajo desnivel altitudinal y D (1523 m) un medio desnivel altitudinal.

El modelo geomorfológico determinó que las cuencas en estudio poseen una forma de rectangular-oblogada a rectangular alargada, son poco montañosas, poseen una alta densidad de drenaje (>5 Km/Km²), con un rango medio de ordenes (1-6). Además la geomorfología del D difiere de las demás zonas de captación ya que presenta mayor desnivel, pendiente, densidad de drenaje y número de órdenes.

El orden de suelo predominante fue andisol y la mayor parte de las zonas de captación fueron clasificadas como bosque montano bajo y la parte alta del D como bosque pluvial montano de acuerdo con a la clasificación de Holdridge (13)

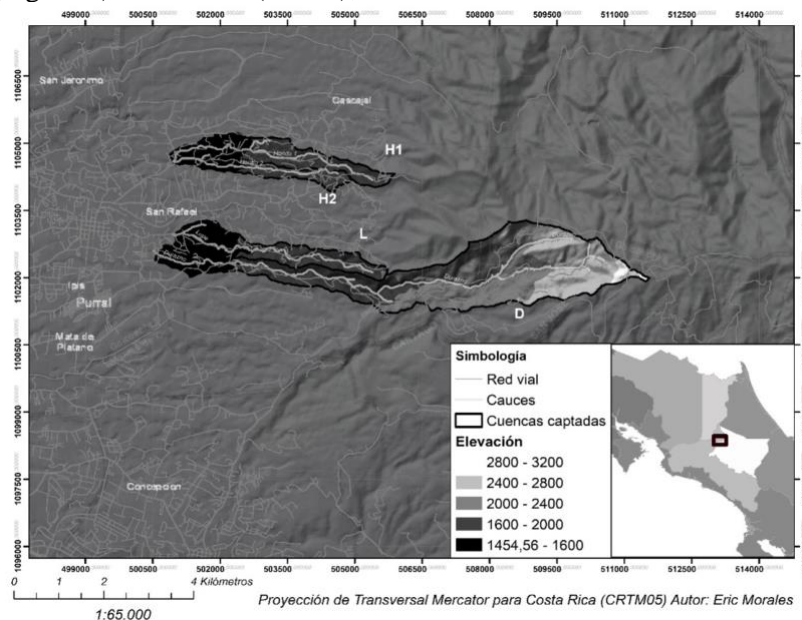


Figura 1. Localización y geomorfología de las zonas de captación de un sistema de abastecimiento en el Gran Área Metropolitana.

Descripción y análisis de indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos de las zonas de captación, la salida de la planta de tratamiento y la red de distribución

En aguas superficiales, indicadores microbiológicos, turbidez y temperatura fueron los únicos parámetros fisicoquímicos que se encontraron fuera de los límites de aceptabilidad definidos en la legislación costarricense para agua potable (Cuadro 1).

La red de distribución (RD) y la salida de la planta de tratamiento (SPT) mostraron valores aceptables de turbidez. En promedio la turbiedad a la salida de la planta fue de 1,0 UNT

encontrándose dentro de los parámetros establecidos, al igual que el pH (7,0) que presentó un comportamiento regular.

La turbiedad y el color en la red de distribución estuvieron fuera de los límites admisibles en el 39% y 90% de los casos respectivamente, de manera similar a las zonas de captación (Cuadro 1).

El cloro en la RD se encontró fuera de los límites admisibles en el 56 % de las muestras (promedio 0,28±0,16 mg/L, aceptable 0,3 – 0,6 mg/L), con ello se puede suponer el posible ingreso de material en la red de distribución (14).

Cuadro 1. Estadísticos descriptivos de indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos en las zonas de captación, salida de la planta de tratamiento y red de distribución.

Punto	ED ^b	Parámetro fisicoquímico				Indicadores microbiológicos		
		Turbidez (NTU)	pH	Conductividad (µS/cm)	Temperatura (°C)	Color (UPC)	CF ^c (NMP/100 mL)	EC ^c (NMP/100 mL)
D	P±D E	12,36±19,84	7,7±0,19	229,7±37,56	15,26±1,44	55,74±70,50	5610±8189	3783±5643
	M	6,72	7,72	220,00	15,40	35,00	2400	1700
	R	1,28 - 79,10	7,21 - 7,98	173,50 - 308,00	12,20 - 18,00	10,00 - 295,00	240 - 35000	220 - 24000
L	P±D E	9,09±21,86	7,56±0,21	174,29±12,18	16,73±1,53	45,56±82,84	10206±13226	16953±46070
	M	3,04	7,61	175,40	17,00	25,00	5400	5400
	R	1,39 - 116,00	7,07 - 7,88	144,7 - 197,10	13,00 - 19,40	10,00 - 445,00	54 - 54000	350 - 240000
HI	P±D E	3,92±3,84	7,56±0,15	149,05±15,91	15,60±1,11	19,07±18,45	6406±7242	4689±4406
	M	3,84	7,58	150,20	15,60	15,00	3500	3500
	R	0,66 - 14,60	7,22 - 7,83	113,80 - 176,60	13,60 - 18,00	0,00 - 75,00	350 - 33000	170 - 17000
H2	P±D E	4,90±5,73	7,68±0,15	153,72±18,45	16,21±1,13	25,19±24,98	11139±13226	9905±18077
	M	2,79	7,68	155,80	16,20	20,00	5400	4600
	R	1,13 - 28,00	7,31 - 7,95	114,70 - 186,40	13,90 - 18,40	0,00 - 125,00	460 - 92000	460 - 92000
SPT ^a	P±D E	1,01±0,47	6,95±0,25	210,56±20,77	16,93±1,32	1,11±4,00	0,13±0,69	0,13±0,69
	M	0,92	6,95	209,00	16,80	0,00	0	0
	R	0,23 - 2,78	6,55 - 7,77	163,90 - 250,00	13,80 - 20,00	0,00 - 20,00	0,00 - 3,60	0,00 - 3,60
RD	P±D E	6,20±6,82	7,01±0,21	189,09±34,03	20,71±2,30	20,93±29,61	0,04±0,21	0,00±0,00
	M	4,16	7,00	190,40	20,40	10,00	0	0
	R	0,66 - 27,80	6,61 - 7,35	85,70 - 238,00	16,00 - 25,00	0,00 - 125,00	0,00 - 1,10	0,00 - 0,00
Valor admisible^d		5,00	6,00-8,00	400,00	18-30	<5	No detectable	No detectable

a SPT=Salida de la planta de tratamiento, RD= Red de distribución; b ED= Estadística descriptiva, P±DE= Promedio ± desviación estándar, M= mediana y R= rango; c CF=Coliformes fecales, EC= Escherichia coli, T= Turbiedad, C= Conductividad, Temp= Temperatura, d Valor admisible según el Reglamento para la Calidad de Potable, número 38924. *Los valores marcados en negro se encuentran fuera de los valores admisibles



En SPT y RD los indicadores microbiológicos se encontraron concentraciones por encima de los límites aceptables (Reglamento para la Calidad del Agua Potable, número 38924) en el 7,4 % de las muestras (Cuadro 1).

En las concentraciones de coliformes fecales y E. coli (Cuadro 1) se observó fluctuaciones influenciadas por la variabilidad climática (Figura 2)

encontrándose mayores concentraciones de coliformes fecales y E. coli fuera de los límites aceptables de calidad de agua en las zonas de captación (Cuadro 1).

El análisis de varianza se realizó para determinar si existen diferencias entre las zonas de captación; y entre la salida de la planta de tratamiento y la red, los resultados se encuentran en el Cuadro 2.

Cuadro 2. Análisis de varianza de los parámetros de calidad de agua estudiados de acuerdo a las mediciones de agua cruda (entre las zonas de captación) y agua tratada (entre la salida de la planta de tratamiento y la red de distribución).

Variable	Agua cruda		Agua tratada		
	Valor de p	Prueba	Valor de p	Prueba	
Turbidez	0,0030	Kruskal Wallis	0,0005		
Temperatura	0,0004	ANOVA	<0,0001		
Potencial de hidrógeno	0,0043	ANOVA	0,4050		
Conductividad	<0,0001	Kruskal Wallis	0,0077		T-test pareada
Color	0,0030	Kruskal Wallis	0,0019		
Cloro	NA	NA	<0,0001		
Coliformes fecales	0,2246	Kruskal Wallis	0,5115		
<i>Escherichia coli</i>	0,0500	Kruskal Wallis	0,3265		

*Valores significancia estadística. 1. Probabilidad <0,05.

En las zonas de captación se observaron diferencias significativas en todos los parámetros fisicoquímicos del agua en los cuatro cuerpos de agua ($p < 0,05$, en todos los casos), mientras no se observaron diferencias significativas en los parámetros microbiológicos (Cuadro 2). Al realizar pruebas pos hoc (Tukey y Nemenyi) en las variables que presentaron diferencias significativas en el análisis de varianza (Cuadro 3) se observó que el punto de captación D presentó un comportamiento diferente con respecto al resto de las

zonas de captación, mientras que H1 y H2 son muy similares desde el punto de vista fisicoquímico.

Se observó diferencias en los resultados de los indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos en la época lluviosa y seca, en las zonas de captación (Figura 2). Las diferencias más notables se encontraron para coliformes fecales, E. coli y turbidez, presentando un aumento de la concentración en la época lluviosa y un aumento de la conductividad durante la época seca.

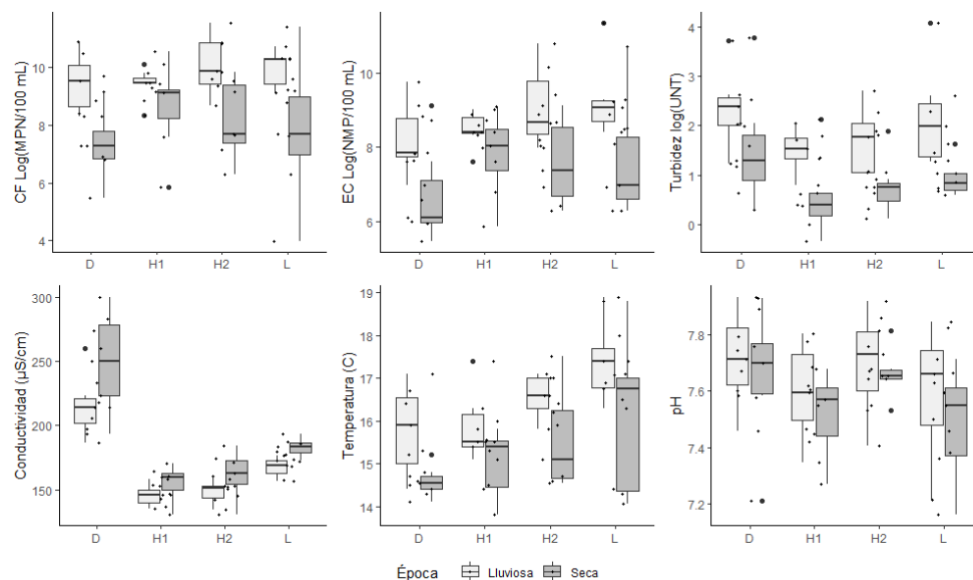


EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA EN CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EN SAN JOSÉ, COSTA RICA, PERIODO 2017-2018

Cuadro 3. Prueba de Tukey y Nemenyi de las pruebas de varianza para los factores fisicoquímicos medidos en las zonas de captación

Fuentes	Parámetros fisicoquímicos				
	Turbidez	Temp.	pH	Conductividad	Color
<i>Durazno vs Lupe</i>	0,4664	0,0005	0,0305	0,0031	0,6719
<i>Durazno vs Honda 1</i>	0,0063	0,7706	0,0323	<0,0001	0,0013
<i>Durazno vs Honda 2</i>	0,0590	0,0428	0,9887	<0,0001	0,0411
<i>Lupe vs Honda 1</i>	0,2992	0,0113	1,0000	0,0015	0,0596
<i>Lupe vs Honda 2</i>	0,7336	0,4778	0,0688	0,0189	0,4478
<i>Honda 1 vs Honda 2</i>	0,8930	0,3244	0,0726	0,8984	0,7535
Prueba	<i>Nemenyi</i>	<i>Tukey</i>	<i>Tukey</i>	<i>Nemenyi</i>	<i>Nemenyi</i>

*Los valores significancia estadística. 1. Probabilidad <0,05.



CF=Coliformes fecales, EC= Escherichia coli, D, H1, H2 y L= zonas de captación, los gráficos muestran la desviación estándar y los puntos las observaciones.

Figura 2. Comportamiento de los indicadores microbiológicos y parámetros fisicoquímicos en las zonas de captación según época climática (lluviosa y seca).

DISCUSIÓN

En el presente estudio, la variabilidad y diferencias obtenidas en los resultados de los parámetros fisicoquímicos y microbiológicos en las zonas de captación, denota la influencia del micro ambiente sobre la calidad del agua. Se determinó que una mayor variabilidad

geomorfológica entre zonas está relacionada a diferencias en los parámetros fisicoquímicos, por ejemplo, la zona de captación D presentó diferencias estadísticamente significativas en los parámetros fisicoquímicos con respecto a las demás zonas de captación, y también es la que presentó mayores diferencias

geomorfológicas (Figura 1, Cuadros 1, 2 y 3). Mientras que no se encontró diferencias significativas en los parámetros fisicoquímicos obtenidos de las zonas de captación H1 y H2, siendo a su vez las zonas de captación geomorfológicamente más similares (Tablas 1, 2 y 3).

El aumento en las concentraciones de coliformes fecales, E. coli y turbiedad observado durante la época lluviosa (Figura 2), se puede deber a la escorrentía provocada por la precipitación que aumenta la turbiedad y los microorganismos contenidos en partículas sedimentables (6).

Las concentraciones de coliformes fecales observadas durante el estudio (hasta 92000 NMP/100 mL) clasifica a las zonas de captación como 4 y 5, lo que implica que no deben utilizarse para consumo humano aun cuando se aplique tratamiento avanzado (15).

El agua superficial con altas concentraciones de indicadores fecales que pueden sugerir la presencia de patógenos a los cuales la población se puede exponer mediante procesos como por ejemplo: dispersión de micelas higroscópicas, uso del agua para el riego de cultivos o consumo de animales (16).

En cuanto a la conductividad, se observó que fue significativamente mayor en la zona de captación D con respecto a las demás (Cuadro 1, 2 y 3, Figura 2), lo que se podría atribuir a la cantidad de sales disueltas en este cuerpo de agua. Por otra parte, la marcada disminución de la conductividad durante la época lluviosa (Figura 2), podría deberse a la dilución de estas sales, lo cual se tiene

a observar tras las primeras lluvias (6).

Hubo diferencia significativa en el pH entre las zonas de captación (Tablas 1, 2 y 3), pero no entre las épocas del año (Figura 2), por tanto, el pH no se ve influenciado por la estacionalidad, siendo el único parámetro que muestra este comportamiento, por lo que se observa que la influencia de la estacionalidad climática en la calidad de agua de las zonas de captación estudiadas. Entre las zonas de captación, D presenta los cambios notables entre la época lluviosa y seca (Figura 2).

Para SPT y RD los resultados se encontraron dentro de lo esperado, en cuanto al cumplimiento de los estándares básicos de calidad de agua, debido al uso de la tecnología potabilización (Floculación inorgánica, filtración rápida y desinfección) utilizada que presenta una alta eficiencia en remoción de sólidos (17).

El aumento de la turbiedad en RD (Cuadros 1 y 2), puede deberse a la intrusión de materiales por rupturas en las tuberías, fluctuaciones drásticas en la presión que desprendan biopelículas o mantenimiento deficiente de la red provocando lixiviación de tuberías corroídas (14,18,19).

Este aumento de la turbiedad en la tubería implica el aumento de la demanda de cloro, disminuyendo la concentración de cloro libre en la tubería (7). Los altos valores de turbiedad encontrados en RD y las bajas concentraciones de cloro residual podrían deberse al ingreso de material externo al sistema de abastecimiento (Cuadro 1) (14). Al



EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA EN CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EN SAN JOSÉ, COSTA RICA, PERIODO 2017-2018

igual que la diferencia entre la concentración de cloro en SPT y RD (Cuadro 2).

El proceso de desinfección utilizado en la planta de tratamiento es la cloración, en el cual se espera la eliminación del 99,9% de las bacterias a una concentración de 0,08 mg*min/L a pH 7, según lo descrito en la literatura (17). La presencia de bacterias en el agua podría deberse a factores como alta carga de materia orgánica, fugas en la conducción que permiten el ingreso de material externo al tratamiento o la deficiencia en algún proceso (coagulación-floculación, sedimentación o filtración) (7,14).

Entre las principales limitaciones en el presente estudio se encuentra que los muestreos se realizaron en puntualmente en las zonas de captación y en la red de distribución. La sectorización en ambos casos hubiese permitido detectar puntos críticos de contaminación.

CONCLUSIONES

El presente estudio muestra resultados alarmantes de un sistema de abastecimiento de agua para consumo humano en el área de estudio. Según lo dispuesto en el Reglamento para la Clasificación de Cuerpos de Agua Superficiales ninguna de las cuatro zonas de captación en estudio son aptas para consumo humano, con respecto a los indicadores microbiológicos (coliformes fecales). Las variaciones climáticas mostraron una influencia relevante en la calidad del agua, donde se observó un

decrecimiento de la misma durante la época lluviosa. Por esta razón, se deben extremar medidas de tratamiento durante este periodo. Asimismo, se recomienda la vinculación del monitoreo ambiental con el sistema de vigilancia epidemiológica, considerando la influencia de variables ambientales, como el clima y el paisaje, en servicios como el agua para consumo humano.

Se observó una disminución en la calidad del agua tratada tras su ingreso a la red, encontrándose diferencias significativas entre los parámetros fisicoquímicos del agua de la salida de la planta de tratamiento y la red de distribución.

Entre las principales causas del empobrecimiento de agua se pudieron encontrar rupturas en las tuberías que permiten el ingreso de material extraño, cambios en la presión que promueve el desprendimiento de la biopelícula en la tubería o infraestructura en mal estado que incorpora subproductos como corrosión al sistema (14), en razón de ello, se recomienda la evaluación de estas variables.

Para el operador y autoridades, los resultados de este estudio destacan la importancia de realizar monitoreo sectorizado y localizar las actuales fuentes de contaminación en las zonas de captación y en la red, así como la necesidad de valorar la aptitud de estos cuerpos de agua para el consumo humano actualmente.

Referencias

1. Waters E, Hamilton A, Sidhu H, Sidhu L, Dunbar M. Zoonotic

Transmission of Waterborne Disease: A Mathematical Model. Bull Math Biol.

- 2016;78(1):169–83.
2. OMS. Enfermedades diarreicas [Internet]. 2019. Available from: <https://www.who.int/es/news-room/fact-sheets/detail/diarrhoeal-disease>
 3. Goncharuk V. Drinking Water Physics, Chemistry and Biology. Swintzerland: Springer International Publishing; 2014. 446 p.
 4. Poder Ejecutivo de Costa Rica. Reglamento para la Calidad del Agua Potable N° 38924-S [Internet]. Diario Oficial La Gaceta, 38924-S Costa Rica; 2015 p. 1–49. Available from: http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=80047&nValor3=101480&strTipM=TC
 5. Ballester F, Díaz J, Moreno JM. Cambio climático y salud pública: escenarios después de la entrada en vigor del Protocolo de Kioto. Gac Sanit [Internet]. 2006;20(Supl 1):160–74. Available from: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0213911106715801>
 6. Cizek AR, Characklis GW, Krometis L-A, Hayes JA, Simmons OD, Di Lonardo S, et al. Comparing the partitioning behavior of Giardia and Cryptosporidium with that of indicator organisms in stormwater runoff. Water Res. 2008;42:4421–38.
 7. Montoya C, Loaiza D, Torres P, Cruz CH, Escobar JC. EFECTO DEL INCREMENTO EN LA TURBIEDAD DEL AGUA CRUDA SOBRE LA EFICIENCIA DE PROCESOS CONVENCIONALES DE POTABILIZACIÓN. Rev EIA [Internet]. 2011;(16):137–48. Available from: <http://search.ebscohost.com/login.aspx?direct=true&db=zbh&AN=71890438&lang=es&site=ehost-live>
 8. APHA. Standard Methods for the examination of water and wastewater. 23rd ed. Bair R, Eaton A, Rice E, Bridgewater L, editors. Washintong, D.C: American Public Health Association; 2017. 9(89)-9(96).
 9. NASA. Reverb Echo [Internet]. 2019. Available from: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>
 10. Ortiz-Malavasi E. Atlas de Costa Rica. Cartago, Costa Rica: Instituto Tecnológico de Costa Rica; 2014.
 11. Farfán F, Ferreira S, Brandan M. Caracterización y Red de Drenaje de la Subcuenca del Río Tin-Tin, PN. Los Cardones, Salta. Univ Nac Salta [Internet]. 2010;5(7):15. Available from: <http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/v160/pdf/ciencia16-1.pdf>
 12. Steel R, Torrie J. Principles and procedures of statistics with special reference to the biological sciences. McGraw-Hill, editor. New York, Toronto, London: McGraw-Hill; 1960. 473 p.
 13. Holdridge LR. Life zone ecology. 1st ed. Tropical Science Center, editor. San José, Costa Rica: Tropical Science Center; 1967. 149 p.
 14. Lee E., Schwab K. Deficiencias in drinking water distribution systems in developing countries. J Water Health [Internet]. 2005;3(2):109–27. Available from: http://www.ncbi.nlm.nih.gov/entrez/query.fcgi?cmd=Retrieve&db=PubMed&dopt=Citation&list_uids=16075938
 15. Poder Ejecutivo. Reglamento para la evaluación y clasificación de la calidad de cuerpos de agua superficiales. La Gaceta No. 178 2007 p. 1–21.
 16. Soller J, Eftim S, Wade T, Ichida A, Clancy J, Johnson T, et al. Use of



EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA ESTACIONALIDAD CLIMÁTICA EN CALIDAD DEL AGUA DE CONSUMO HUMANO EN UN SISTEMA DE ABASTECIMIENTO EN SAN JOSÉ, COSTA RICA, PERIODO 2017-2018

quantitative microbial risk assessment to improve interpretation of a recreational water epidemiological study. *Microb Risk Anal.* 2016;1:2–11.

17. OMS. Guías para la Calidad de Agua Potable- 4th ed. Organización Mundial de la Salud, editor. Organización Mundial de la Salud. Geneva: Organización Mundial de la Salud; 2011. 564 p.

18. Pérez A, Amézquita CP, Torres P. Identificación y priorización de peligros como herramientas de la gestión del riesgo en sistemas de distribución de agua potable. *Ing Univ Bogotá.* 2012;16(2):449–69.

19. Moe CL, Rheingans RD. Global challenges in water, sanitation and health. *J Water Health.* 2006;4(SUPPL. 1):41–58.