

UNIVERSIDAD NACIONAL

"Campus Omar Dengo"

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUIMICA

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL RECURSO HÍDRICO EN LA MICROCUENCA  
DEL RÍO CAÑUELA COMO INSUMO PARA EL FORTALECIMIENTO DE LAS  
CAPACIDADES DE GESTIÓN EN LA ASADA DE CONCEPCIÓN DE SAN RAMÓN,  
ALAJUELA.

Trabajo sometido a consideración del Tribunal  
Examinador de la Escuela de Química, como requisito  
parcial para optar por el grado de Licenciatura en Química  
Industrial

Bach. Marian de los Ángeles López Esquivel

Tutor:

Dr. Leonardo Mena Rivera

Asesores:

M.Sc. Ilena Vega Guzmán

M.Ed. Rolando Sánchez Gutiérrez

Heredia

Febrero, 2025

## **AGRADECIMIENTOS**

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la ASADA de Concepción de San Ramón por permitirme realizar mi proyecto, al Laboratorio del Manejo del Recurso Hídrico de la Universidad Nacional, a mi tutor de tesis, el Dr. Leonardo Mena por su invaluable orientación y apoyo durante todo este proceso. Su conocimiento y paciencia han sido fundamentales para el desarrollo de este trabajo así como el de mis asesores M.Sc. Ilena Vega y M.Ed. Rolando Sánchez. Finalmente, quiero dedicar un agradecimiento especial a mi familia, cuyo amor y apoyo incondicional me han motivado a seguir adelante en cada etapa de este proyecto.

## RESUMEN

Las organizaciones comunitarias de la gestión del agua desempeñan un papel importante en la prestación de servicios de agua a nivel global. Sin embargo, existe cierta incertidumbre respecto a su capacidad para mantener el suministro de agua potable considerando los escenarios socioeconómicos y climáticos tanto actuales como futuros.

Este trabajo presenta una evaluación detallada de la calidad de agua del sistema de distribución de una Asociación Administradora de Sistemas de Acueductos y Alcantarillados (ASADA) en Concepción de San Ramón, Costa Rica. Se analizaron los parámetros fisicoquímicos básicos de control operativo, iones mayoritarios, metales traza y coliformes totales en las fuentes de agua, así como en los puntos en la red de distribución (casas de habitación) durante un período de un año. También se llevaron a cabo evaluaciones de riesgo en las nacientes y una caracterización de la calidad del agua superficial en la microcuenca.

Se encontró que el agua se suministraba con los estándares de calidad adecuados para consumo humano. Sin embargo, se observaron variaciones espaciales y temporales; especialmente, en las nacientes, esto a pesar de encontrarse en un área relativamente reducida. En su mayoría, la composición del agua estuvo relacionada con procesos de interacción agua-roca, pero se encontraron signos tempranos de contaminación antropogénica. Las nacientes presentaron concentración de  $\text{NO}_3^-$  por encima de los niveles naturales, así como contaminación por coliformes totales y *E. coli* en el 37% y 18% de los casos, respectivamente. La calidad del agua de los ríos mostró una composición distinta en comparación con las nacientes, en particular, se observó una disminución de la calidad del agua río abajo que coincide con la influencia antropogénica que reciben las nacientes.

Los hallazgos de este estudio proporcionaron información útil acerca de cómo se puede utilizar la información sobre la calidad del agua, no solo para los procesos regulatorios, sino también para mejorar la gestión del agua por parte de las ASADAS. Este tipo de información es vital para garantizar la seguridad hídrica a la población.

Los resultados de este estudio se publicaron en la revista *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society* (López-Esquivel et al, 2024)

## I. Tabla de contenido

<b>II. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>8</b>
2.1 ANTECEDENTES Y JUSTIFICACIÓN .....	8
2.2 MARCO TEÓRICO .....	11
2.2.1 <i>Ciclo hidrológico y agua para consumo humano</i> .....	11
2.2.2 <i>Cuenca hidrográfica</i> .....	12
2.2.3 <i>Calidad del agua</i> .....	13
2.2.4 <i>Caracterización hidrogeoquímica</i> .....	17
2.3 OBJETIVOS .....	19
2.3.1 <i>Objetivo general</i> .....	19
2.3.2 <i>Objetivos específicos</i> .....	19
<b>III. METODOLOGÍA .....</b>	<b>20</b>
3.1 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO .....	20
3.2 ENCUESTAS.....	21
3.3 CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA .....	22
3.4 CONTROL DE CALIDAD Y ANÁLISIS DE DATOS .....	23
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....</b>	<b>25</b>
4.1 SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA Y USO DE LA TIERRA .....	25
4.2 CALIDAD DEL AGUA EN LAS VIVIENDAS Y NACIENTES.....	27
4.3 EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AGUA DEL RÍO .....	29
4.4 FACTORES DETERMINANTES DE LA COMPOSICIÓN DEL AGUA EN LAS NACIENTES Y EN EL RÍO 30	
4.5 RECOMENDACIONES PARA MEJORAR LA GESTIÓN DEL AGUA .....	36
<b>V. CONCLUSIONES.....</b>	<b>40</b>
<b>VI. FUENTES BIBLIOGRAFICAS .....</b>	<b>42</b>
<b>VII. ANEXOS .....</b>	<b>52</b>

## ÍNDICE DE CUADROS

TABLA 1. ANÁLISIS DE RIESGO DE LAS NACIENTES EN LA ASADA DE CONCEPCIÓN DE SAN RAMON, COSTA RICA EN 2017. ....	26
TABLA 2. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN LAS VIVIENDAS DE CONCEPCIÓN DE SAN RAMÓN, COSTA RICA.....	52
TABLA 3. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DE AGUA DETERMINADOS EN LAS NACIENTES EN EL RÍO CAÑUELA, SAN RAMÓN, COSTA RICA.....	53
TABLA 4. RESUMEN DE LOS PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO CAÑUELA, SAN RAMÓN, COSTA RICA.....	54
TABLA 5. VALORES MEDIOS (M) Y DESVIACIÓN ESTÁNDAR (SD) POR NACIENTE PARA EL DIAGRAMA DE GIBBS.....	55

## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. SITIOS DE MUESTREO DENTRO DE LA CUENCA DEL RÍO CAÑUELA EN CONCEPCIÓN DE SAN RAMÓN, COSTA RICA. ....	21
FIGURA 2. DIAGRAMA DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA PARA CONSUMO DE LA ASADA EN CONCEPCIÓN DE SAN RAMÓN, COSTA RICA. ....	21
FIGURA 3. CONCENTRACIÓN DE VARIOS PARÁMETROS EN LAS NACIENTES (S) Y HOGARES (H) EN EL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE AGUA DE LA ASADA DE CONCEPCIÓN DE SAN RAMÓN, COSTA RICA. ....	28
FIGURA 4. DIAGRAMA DE PIPER QUE MUESTRA LA COMPOSICIÓN DE LAS AGUAS DE LAS NACIENTES EN LA MICROCUENCA DEL RÍO CAÑUELA EN SAN RAMÓN, COSTA RICA. ....	31
FIGURA 5. RELACIONES DE (A) $[CA^{2+} + MG^{2+}] / [HCO_3^- + SO_4^{2-}]$ , (B) $[CA^{2+} + MG^{2+}]/HCO_3^-$ , (C) $CA^{2+} /MG^{2+}$ , (D) $NA^+ /CL^-$ , (E) $CAI_2/CAI_1$ , Y (F) $[CA^{2+} + MG^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}]/[NA^+ + K^+ - CL^-]$ EN LAS NACIENTES. VALORES MEDIOS (MEQ L <sup>-1</sup> ) $\pm 1\Sigma (N = 4)$ . ....	33
FIGURA 6. ANÁLISIS DE COMPONENTES PRINCIPALES LA COMPOSICIÓN FÍSICA Y QUÍMICA DE (A) LAS NACIENTES Y EL RÍO, Y (B) LAS CARGAS DE LOS PARÁMETROS. ....	34
FIGURA 7. DENDROGRAMA DE CONGLOMERADOS QUE MUESTRA LA AGRUPACIÓN DE LOS SITIOS DE NACIENTES (S) Y RÍOS (S) EN LA CUENCA DEL RÍO CAÑUELA EN SAN RAMÓN, COSTA RICA. ....	35
FIGURA 8. RELACIONES DE (A) $[NO_3^- /CL^-] /CL^-$ , Y (B) $[SO_4^{2-}/NA^+] / [NO_3^-/NA^+]$ EN LOS NACIENTES Y EN EL AGUA DE LOS RÍOS. VALORES MEDIOS (MEQ L <sup>-1</sup> ) $\pm 1\Sigma (N = 4)$ . ....	36

## LISTA DE ABREVIACIONES

ASADAS	Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes
VMA	Valor Máximo Admisible
pH	Potencial de Hidrógeno
C	Grados Celsius
SDT	Sólidos Disueltos Totales
$\mu\text{S/cm}$	Micro Siemens por centímetro
NMP/100 mL	Número más probable por cada 100 mililitros
CT	Coliformes Totales
POR	Potencial de Oxidación - Reducción
OD	Oxígeno Disuelto
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
OCSAS	Organizaciones comunitarias de servicios de agua y saneamiento
CAAR	Comités Administrativos de Acueductos Rurales
EDTA	cido Etilendiaminotetraacético
N.D.	No detectable
M	Valor Medio
CV	Coefficiente de desviación
LC	Límite de cuantificación
ACP	Análisis de componentes principales
AC	Análisis de conglomerados
CP	Componente principal
PTAR	Planta de tratamiento de aguas residuales

## **II. Introducción**

### **2.1 Antecedentes y justificación**

La gestión sostenible de los recursos hídricos sigue siendo un reto a nivel mundial (Hering e Ingold, 2012; Marks et al., 2020; Onestini, 2011), especialmente, en lo referente a acceso al agua potable y saneamiento. Aproximadamente una cuarta parte de la población mundial carece de acceso a agua para consumo humano gestionada de forma segura, mientras que más de la mitad, alrededor de 4,200 millones de personas, carece de acceso a servicios de saneamiento adecuados (WHO, 2021). En respuesta a estas problemáticas, los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) de las Naciones Unidas mencionan que para el año 2030 se busca reducir la desigualdad en acceso a agua potable (United Nations, 2015). Esto representa un desafío considerable, particularmente para economías en desarrollo o en las comunidades rurales, donde las limitaciones económicas, técnicas y de capital humano dificultan la gestión eficaz de los recursos hídricos (Mena-Rivera y Quirós-Vega, 2018; Patton et al., 2020).

Para solventar algunos de los problemas que limitan el acceso al agua potable y al saneamiento, tanto a nivel nacional como internacional se han implementado un modelo de gestión comunitaria del agua (Machado et al., 2019; Tanto y Simatele, 2017). El cual busca mejorar la prestación de servicios de la administración del agua delegando la responsabilidad a personas de la comunidad que trabajan en el marco de un comité formal (Schouten, 2003). Las Organizaciones Comunitarias de Servicios de Agua y Saneamiento (OCSAS) son responsables de: a) garantizar procesos inclusivos en la toma de decisiones, b) proporcionar capacitación, mantenimiento y apoyo técnico; por ejemplo, mantenimiento constante del sistema de distribución de agua, y c) garantizar la estabilidad financiera para mantener adecuadamente la operación del sistema de distribución (Day, 2009; Mihelcic y Schweitzer, 2012). En Costa Rica estas asociaciones prestan un servicio público y el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) es el ente encargado de velar que cumplan con los principios de servicio público mediante la fiscalización, asesoría y controles de calidad de agua (MINAET, 2012).

Estas estructuras operan de manera parcialmente descentralizadas y tienen como objetivo ser más eficientes y eficaces, al mismo tiempo que fomentan un sentido de pertenencia en la comunidad que, en última instancia, podrían mejorar la conservación de los recursos hídricos de manera prolongada (Chowns, 2015; Day, 2009; Kativhu et al., 2018). Es importante ya que se enfatiza en los ODS (Bartram et al., 2018). Sin embargo, a pesar de las potenciales ventajas de este tipo de sistemas, existe cierta incertidumbre sobre su capacidad para garantizar la seguridad hídrica a corto y largo plazo (Chowns, 2015; Stedman et al., 2009).

La eficacia de las OCSAS se ha evaluado principalmente en función de la mejora de la infraestructura y la gestión administrativa (Machado et al., 2022; Madrigal-Ballesteros et al., 2013; Nowicki et al., 2022). No obstante, por lo general se excluyen aspectos relacionados con la calidad del agua y los factores que la afectan; por ejemplo, las características intrínsecas de la cuenca hidrográfica, cambios en el uso de la tierra, desarrollo de actividades antropogénicas y variabilidad climática (Alexander et al., 2007; Meybeck, 2005). Sin embargo, el monitoreo de las propiedades del agua es primordial para garantizar el cumplimiento con los estándares de agua potable, mejorar el funcionamiento del sistema de distribución y garantizar la seguridad hídrica (Charles et al., 2020; da Luz y Kumpel, 2020; Nowicki et al., 2020). A pesar de su importancia, los datos sobre la calidad del agua son escasos o poco accesibles (WHO, 2022) y no siempre son utilizados de la forma más eficaz (Kumpel et al., 2020; Timmerman et al., 2010; Ward et al., 1986). Adicionalmente, las fuentes de abastecimiento y los sistemas de distribución son altamente susceptibles a episodios de contaminación, ejemplos de contaminación de los sistemas de distribución de agua así como de las fuentes de abastecimiento han sido reportados tanto a nivel nacional como internacional (Burri et al., 2019; Hoque et al., 2021 y Mora et al., 2023). El riesgo de utilizar agua no apta para consumo humano es más probable en las zonas rurales de los países en vías de desarrollo, donde operan la mayoría de las OCSAS (Bain et al., 2014). Por ende, la implementación de programas integrales de monitoreo de la calidad del agua, en conjunto con una adecuada interpretación de la información es necesaria para mejorar aún más la efectividad de estas organizaciones.

En los últimos años, Costa Rica ha logrado avances significativos en la prestación de servicios de acceso a agua potable y saneamiento (PEN, 2018). Por ejemplo, en cuanto al suministro de agua, aproximadamente el 99,8% de la población tiene acceso al agua, y el 89,5% recibe agua que cumple con los estándares de consumo humano (Mora et al., 2023). Por otro lado, la cobertura en los servicios de saneamiento continua en aumento, pero a un ritmo más lento (Vaux et al., 2020). Los tanques sépticos son el sistema de tratamiento típico para aguas que fueron utilizadas ya sean domésticas o industriales, el alcantarillado sanitario representa solo el 23,8% de las cuales un 17,6% son tratadas antes de ser vertidas a los sistemas fluviales mediante plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR) (Mora et al., 2023). El país enfrenta varios desafíos que podrían comprometer la seguridad hídrica en un futuro cercano, como el uso inadecuado de la tierra, el aumento de la contaminación antropogénica y el cambio climático (Bower, 2013). En particular, las prácticas agrícolas inapropiadas y el desarrollo urbano deficiente han contribuido históricamente a la degradación de la calidad del agua (Mena-Rivera et al., 2017; Mena-Rivera et al., 2018; Sánchez-Gutiérrez et al., 2023). Además, la falta de inversión en infraestructura adecuada (Esquivel-Hernández et al., 2018) y la fuerte variabilidad climática en la región centroamericana (Hund et al., 2018; Sánchez-Murillo et al., 2020) se destacan como las principales amenazas para la gestión adecuada de los recursos hídricos en el país.

En Costa Rica, las OCSAS administran alrededor de 1500 acueductos que abastecen de agua a aproximadamente 1,0 millón de personas. Esto representa el 26,5% del suministro total de agua potable (Mora et al., 2023). Las OCSAS operan la mayoría de los acueductos en el marco de los Comités Administrativos de Acueductos Rurales (CAAR) y las Asociaciones para la Administración de Sistemas de Acueducto y Alcantarillado Sanitario (ASADAS), ambas son organizaciones sin fines de lucro. No obstante solo esta última es autorizada y auditada por el Instituto de Acueductos y Alcantarillados (AyA); la institución gubernamental responsable de la prestación de los servicios de abastecimiento de agua para consumo humano y saneamiento (Madrigal-Ballesteros et al., 2013; Madrigal et al., 2011).

A pesar de que los CAAR y las ASADAS juegan un papel importante en el suministro de agua potable, algunos de estos acueductos se encuentran en condiciones de alta

vulnerabilidad. Por ejemplo, el 58% de las OCSAS no toman ninguna medida para proteger las fuentes de agua, a pesar de que el 87% de los sistemas se abastecen de nacientes y aguas superficiales que pueden ser de mala calidad o muy susceptibles a contaminación (PEN, 2019), a nivel nacional el uso de fuentes de agua que no cumplen con los estándares requeridos para fines de consumo humano se ha documentado previamente (Gómez-Cruz et al., 2019; Mena-Rivera y Quirós-Vega, 2018; Sánchez-Gutiérrez et al., 2020a; Sánchez-Gutiérrez et al., 2020b). Sumado a esto, el 34% de los acueductos no realizan ningún control de la calidad del agua que distribuyen y el 25% no cuentan con desinfección continua (PEN, 2019), por lo que existe cierta incertidumbre sobre si una parte de las OCSAS están brindando agua apta para consumo de la población.

Con el objetivo de fortalecer los planes de mejora de las OCSAS, es necesario generar información de manera periódica sobre la calidad del agua en los sistemas de abastecimiento, de fuentes hídricas y las aguas superficiales, acompañadas de una adecuada interpretación. En este trabajo, se investigó el papel del monitoreo de la calidad del agua en el apoyo a la gestión integrada del agua. Para ello se presentó una evaluación del desempeño de la ASADA de Concepción de San Ramón, Costa Rica con base a su capacidad para abastecer de agua apta para consumo humano. La evaluación incluye información espacial y temporal sobre la calidad del agua desde las fuentes hídricas hasta el punto de uso, complementada con un análisis de riesgo de la infraestructura del acueducto. Los datos de calidad del agua se interpretaron mediante análisis hidrogeoquímico y de técnicas de estadística multivariada. También se presentó una evaluación de la calidad del agua en el río principal de la microcuenca, como un posible indicador de las influencias antropogénicas en el área de estudio. Este trabajo tiene como objetivo principal mostrar los desafíos que enfrentan las OCSAS, desde una perspectiva de calidad del agua, para garantizar la gestión sostenible de los recursos hídricos del país.

## **2.2 Marco Teórico**

### **2.2.1 Ciclo hidrológico y agua para consumo humano**

El ciclo hidrológico es un proceso natural del agua donde presenta cambios tanto en su origen (agua subterránea y superficial) como en su estado (sólido, líquido y gaseoso) entre la atmósfera, los cuerpos de agua y el suelo, el agua superficial (ríos, manantiales, océanos) se evapora hacia la atmósfera como consecuencia de la radiación solar y el viento, el vapor generado se condensa y forma las nubes, estas pueden causar precipitaciones con las que el agua regresa nuevamente a la superficie donde se vuelve a evaporar, es interceptada por las plantas, se infiltra o fluye a una fuente de agua superficial formado grandes masas de agua; el agua infiltrada abastece la humedad del suelo y recarga los depósitos subterráneos, estos afloran como una naciente y es transportada por escorrentía hacia los ríos hasta llegar a los océanos, la que queda retenida en la capa vegetal regresa a la atmósfera por transpiración (Villón, 2004). El ciclo natural del agua ha sufrido cambios debido al impacto de actividades antropogénicas como la urbanización, la producción industrial, las actividades agrícolas, la explotación de aguas subterráneas, entre otras. Este impacto tiene como consecuencia la escasez de los recursos hídricos y la degradación de la calidad del agua (Lu et al., 2016; Oki et al., 2006; Lewis y Maslin, 2015).

Las principales fuentes de agua para consumo humano son las fuentes de agua dulce, siendo el agua subterránea la principal fuente de abastecimiento, pues el agua superficial no cuenta con la calidad mínima necesaria para el consumo humano de forma segura, ya que está más expuesta a la contaminación por crecimiento urbano, industria, agricultura y al impacto del cambio climático (Antón., 1996; Agudelo et al, 2017). Por el contrario, las aguas subterráneas al estar protegidas por capas de suelo son más confiables (Jarrín et al., 2017). Por ejemplo, Costa Rica depende en un 23% de pozos, un 70% son nacientes y un 7% de agua superficial para el abastecimiento de agua para consumo humano (Mora et al., 2023).

### **2.2.2 Cuenca hidrográfica**

Las cuencas hidrográficas se definen como un área en la superficie terrestre en donde el agua proveniente de las precipitaciones y del afloramiento de las aguas subterráneas que se originan de forma natural, son transportadas mediante escorrentía siguiendo un curso bien definido y fluyen hacia un punto común, ya sea un río, lago o el océano (Villón, 2004).

Algunas de las características y funciones de las cuencas incluyen: constituyen sumideros de CO<sub>2</sub>, regulan la recarga hídrica de las aguas subterráneas y superficiales, conservan la biodiversidad de la flora y la fauna, proveen espacio para el desarrollo socioeconómico y cultural, en donde algunas de estas actividades tienen influencia directa con la calidad del agua (Vásconez et al., 2019).

La gestión del recurso hídrico dentro de una cuenca hidrográfica tiene como objetivo primordial el beneficio de la población local, ya que las diferentes actividades, como consumo humano, riego, navegación, recreación, o uso en las industrias dependen de la calidad de agua y a su vez el uso define las especificaciones y límites de los parámetros de la calidad del agua suministrada por una cuenca. Por lo tanto, es necesario la creación de programas, planes y proyectos para el mejoramiento de los recursos en la cuenca hidrográfica, con el fin de prevenir la deterioro ambiental o recuperar ambientes degradados. Para alcanzar estas metas es importante incorporar a todos los actores involucrados dentro de la cuenca en la gestión del recurso y la toma de decisiones como lo son el sector productivo, los consumidores, la población en general y las autoridades gubernamentales (Vásconez et al., 2019).

### **2.2.3 Calidad del agua**

La calidad del agua se define como las características físicas, químicas y biológicas que debe cumplir el recurso hídrico para su uso seguro en una o más actividades socioeconómicas específicas, y que a su vez permita conservar la integridad de los ecosistemas (Babiker et al., 2007). Los parámetros de la calidad del agua brindan amplia información sobre la naturaleza y el origen de las especies químicas del agua, así como de posibles contaminantes. El uso de suelo es uno de los principales factores que afectan la calidad del agua, ya que las actividades socioeconómicas que se desarrollan dentro de una cuenca hidrográfica pueden alterar las condiciones de los sistemas de hidrológicos (Gburek y Folmar, 1999; Mander et al., 1998).

Las actividades socioeconómicas pueden generar contaminación desde fuentes puntuales, como lo son el vertido directo al cauce de río de aguas residuales y desechos industriales no

tratados; así como en fuentes no puntuales, siendo la agricultura una de las principales contribuyentes debido al elevado uso de plaguicidas y fertilizantes que pueden ser transportados por escorrentía hacia las aguas superficiales (Cárdenas y Cárdenas, 2009). La calidad del agua también se deteriora por el cambio climático. Este, por ejemplo, puede reducir o aumentar las precipitaciones variando el volumen de agua superficial, e induciendo un aumento o disminución en la concentración de contaminantes según corresponda (Echeverría y Cantillo, 2013).

En Costa Rica, el Decreto N° 38924-S “Reglamento para la Calidad del Agua Potable” establece los límites para los parámetros físicos, químicos y microbiológicos que aseguran la inocuidad del agua para un uso seguro por parte de la población (SCIJ, 2020). En el caso de aguas superficiales, los valores recomendados se establecen en el Decreto No. 33903-MINAE-S “Reglamento para la Evaluación y Clasificación de cuerpos de aguas superficiales” (DIGECA, 2022). En general, entre los principales parámetros físicos están:

- **Color:** La causa principal es la presencia de materia orgánica natural y la materia húmica que puede producir un color amarillo-café. También puede deberse a la presencia de algunos metales como el hierro, coloides como arcillas y algas o residuos industriales como ligninas, taninos u algún otro desecho químico que genere color (APHA et al., 2012).
- **Turbiedad:** es causada por materia en suspensión o coloidal como arcillas, materia orgánica e inorgánica dividida finamente o microorganismos como el plancton (APHA et al., 2012).
- **Sólidos totales, disueltos y suspendidos:** Se refiere a sólidos disueltos aquellos sólidos se encuentran entre el rango de 0,01  $\mu\text{m}$  a 1,0  $\mu\text{m}$ . Los sólidos totales incluyen tanto a los sólidos disueltos como a los suspendidos. Estos últimos corresponden a aquellos que no pueden ser filtrados por flitros con tamaño de poro de 1,2  $\mu\text{m}$  (Metcalf y Eddy, 2014).
- **Temperatura:** es una medida de calor de un cuerpo, este parámetro relaciona tanto la temperatura del aire como la del agua, así como de los cambios climáticos. Además,

influye en otros parámetros de calidad de agua como el pH, el oxígeno disuelto y la conductividad (Metcalf y Eddy, 2014).

- Oxígeno disuelto: La principal fuente de oxígeno del agua es la atmósfera, sin embargo, la concentración de éste varía continuamente por la temperatura, actividad biológica, turbulencia, entre otros (APHA et al., 2012). Concentraciones menores a 5 mg/L O<sub>2</sub>, pueden afectar la vida acuática ya sea generando problemas reproductivos, de crecimiento y mortalidad (Hocking, 2006).
- pH: refleja el equilibrio químico del agua, se cuantifica en una escala logarítmica de la concentración de iones hidronio en disolución acuosa (Metcalf & Eddy, 2014).

Los parámetros químicos se relacionan con el tipo y origen del agua, así como con la contaminación por agentes externos como fertilizantes o metales pesados provenientes de actividades industriales, minería, entre otros. Entre los parámetros químicos se encuentran:

- Dureza: Es causada por elementos alcalinotérreos principalmente calcio y magnesio. Se consideran aguas blandas aquellas en donde las concentraciones sean inferiores a 60 mg L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub> y duras cuando la concentración sea mayor a 200 mg L<sup>-1</sup> CaCO<sub>3</sub> (Harris, 2007). La principal fuente de dureza en el agua es la roca caliza como el sulfato de calcio, que es liberado por la acción erosiva del viento y el agua. El magnesio proviene principalmente de las dolomitas (Baird, 2004).
- Alcalinidad: se refiere a la capacidad amortiguadora del agua y se expresa como mg/L de CaCO<sub>3</sub> (APHA et al., 2012). Estudios revelan que cambios bruscos en la concentración de alcalinidad son tóxicos para especies invertebradas en medios acuáticos como la *Daphnia magna* y *Ceriodaphnia dubia* (López et al., 2014; Bogart et al., 2016).
- Nutrientes: Entre los principales nutrientes se encuentra el NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, el NO<sub>2</sub><sup>-</sup>, el NH<sub>4</sub><sup>+</sup> y el fósforo. La presencia de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> o NO<sub>2</sub><sup>-</sup> en el agua se debe tanto a fuentes naturales por acción de bacterias nitrificantes (Cárdenas & Erazo, 2013), como a fuentes de origen antropogénico principalmente a la agricultura, debido a la presencia de compuestos nitrogenados en algunos fertilizantes. Las bacterias nitrificadoras producen NH<sub>4</sub><sup>+</sup> a partir de la descomposición de materia orgánica, obteniendo una

concentración promedio en las aguas superficiales de 0,11 mg/L  $\text{NH}_4^+$  (Stanley et al., 2004). Además, el amonio puede introducirse por actividad de industrias o aguas negras y agricultura provocando procesos de eutrofización en las aguas. Comúnmente el fósforo se encuentra en forma de fosfatos en las aguas naturales y residuales como ortofosfatos, fosfatos condensados (piro, meta y otras polifosfatos) y fosfatos enlazados orgánicamente, estos se pueden encontrar disueltos, en forma de partículas o en organismos acuáticos (Iqbal et al., 2006). En un ambiente natural las concentraciones son bajas por lo tanto altas concentraciones reflejan principalmente residuos de fertilizantes utilizados en la agricultura (Aminot, 1996)

Además de los indicadores físicos y químicos, los parámetros que evidencian contaminación por factores microbiológicos incluyen:

- Coliformes totales: Bacilo Gram negativo, oxidasas negativas no esporágenas, comprenden géneros de *Escherichia*, *Citrobacter*, *Klebsiella* y *Enterobacter*. (EPA, 2001).
- Coliformes fecales: se consideran dentro de esta clasificación a bacilos anaerobios facultativos, gram negativos no generadores de endosporas, así como *Enterobacter* que incluye a *Escherichia coli*, la *Klebsiella pneumoniae*, patógenos importantes que se alojan en el tracto digestivo de animales y humanos. La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos recomienda un máximo de 200 unidades de formación de colonias (UCF)/100mL para aguas superficiales (EPA, 2001).
- Virus como el *enterovirus*, *adenovirus*, *virus de hepatitis A y E*, *rotavirus* y *norovirus*: Estos virus causan brotes con una amplia gama de síntomas, desde gastroenteritis leve a grave hasta meningitis, enfermedades respiratorias, parálisis o hepatitis. La mayoría de los virus transmitidos por vía fecal-oral son altamente resistentes en el ambiente acuático, donde pueden persistir en niveles altos a pesar de los procesos de descontaminación comúnmente utilizados para el agua potable y el tratamiento de aguas residuales (Kin et al., 2012; Kotwal et al., 2014).

- Protozoarios, quistes u ooquistes como el *Cryptosporidium parvum*: Son paracitos protozoarios que afectan el tracto intestinal de animales y personas. El mayor medio de transmisión es el agua y es un problema mundial grave de la seguridad del agua para consumo humano debido a que poseen resistencia a los tratamientos convencionales del agua como la cloración (Carey et al., 2004)

#### 2.2.4 Caracterización hidrogeoquímica

El estudio de la hidrogeoquímica busca determinar el origen de la composición química de las aguas subterráneas y su relación con la composición química de las rocas; por ejemplo, en procesos de disolución de minerales donde las aguas subterráneas se enriquecen con iones  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ , y  $\text{Mg}^{2+}$  (Garrels y Christ, 1965). Por ende, la presencia de ciertos iones en el agua se puede relacionar con procesos físicos y químicos, así como con fuentes de contaminación.

Los iones cloruro, por ejemplo, están estrechamente relacionados con el fenómeno de intrusión salina (Kessasra et al., 2021). El origen de los iones sulfato puede deberse a la disolución de sales de yeso y la oxidación de las piritas (Wang et al., 2019), mientras para el  $\text{NO}_3^-$  se debe principalmente a actividad humana, mientras que la presencia del ion sodio se debe principalmente a la disolución de minerales de feldespato alcalino (Keesari., 2016). El potasio también se ve estrechamente relacionado a actividades agrícolas (Saha et al., 2020). Las relaciones entre algunos de estos iones refleja las interacciones del entorno con las aguas subterráneas, de las cuales se encuentran:

- $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$ : se refiere a la relación entre la calcita y la dolomita y su grado de acidez.
- $\text{Ca}^{2+}/\text{Na}^+$ : relación entre la calcita y fuentes de sodio como la halita.
- $\text{K}^+/\text{Na}^+$ : relacionada con el intercambio iónico entre el agua y el suelo, arcillas o rocas.
- $\text{HCO}_3^-/\text{Cl}^-$ : relación entre la calcita y fuentes de sodio como la halita.
- $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$ : relación entre el yeso y la halita.

Para clasificar las aguas según su hidrogeoquímica se utiliza el contenido de iones más abundante. Por lo que podemos encontrar aguas bicarbonatadas, donde predominan el ion bicarbonato, aguas sulfatadas o aguas cloradas, o bien por los cationes como aguas cálcicas, magnésicas o sódicas. Otra herramienta importante son los diagramas de Piper-Hill-Langelier (Sen et al., 2015). Estos son una representación gráfica de la composición química de las aguas con respecto a los iones que la componen para así determinar el origen y clasificar las aguas con respecto a su ion dominante. Se compone de dos triángulos equiláteros ubicados a los laterales y un rombo en el centro; cada triángulo está compuesto de los cationes y aniones del agua, donde cada vértice corresponde al 100% de la concentración (meq/L) de cada especie. Mientras que en el rombo se representa la composición general del agua. Los dos diagramas de Gibbs son una representación gráfica de las variaciones de las relaciones catiónicas  $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$  y aniónicas  $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$  en función de los sólidos disueltos totales, estos diagramas permiten identificar los principales procesos hidrogeoquímicos en el agua subterránea como la interacción agua-roca, la precipitación y la evaporación (Gibbs, 1970).

## **2.3 Objetivos**

### **2.3.1 Objetivo general**

Evaluar la calidad del recurso hídrico en la microcuenca del Río Cañuela como insumo para el fortalecimiento de las capacidades de gestión en la ASADA de Concepción de San Ramón, Alajuela.

### **2.3.2 Objetivos específicos**

1. Identificar los principales factores de riesgo que podrían influir en la calidad del agua para consumo humano en la microcuenca del Río Cañuela en San Ramón, Alajuela.
2. Realizar un análisis espacial y temporal de la calidad del agua para consumo, subterránea y superficial en la microcuenca del río Cañuela en San Ramón, Alajuela.
3. Identificar acciones que contribuyan a la adecuada gestión del recurso hídrico la microcuenca del Río Cañuela en San Ramón, Alajuela.

### III. Metodología

#### 3.1 Descripción del área de estudio

La cuenca del río Cañuela se ubica en Concepción de San Ramón, cantón perteneciente a la provincia de Alajuela, Costa Rica (Figura 1). La cuenca drena un área de aproximadamente 9,5 km<sup>2</sup> con una altitud que oscila entre 970 m y 1 630 m. El río fluye desde el noreste hasta el suroeste, donde desemboca en el río Grande. La cuenca subyace a rocas andesíticas y basálticas del Cenozoico y la geomorfología se caracteriza por laderas escarpadas inestables de terreno irregular. El clima se caracteriza por una estación seca (noviembre a mayo) y una estación húmeda (junio a octubre). La temperatura media anual y la precipitación son de 20,7 °C y 1 470 mm, respectivamente. El río Cañuela es una subcuenca que pertenece a la cuenca del río Grande de Tárcoles, esta última se considera una región socioeconómica importante para el país, así como de una alta incidencia de conflictos hídricos (Esquivel-Hernández et al., 2018).

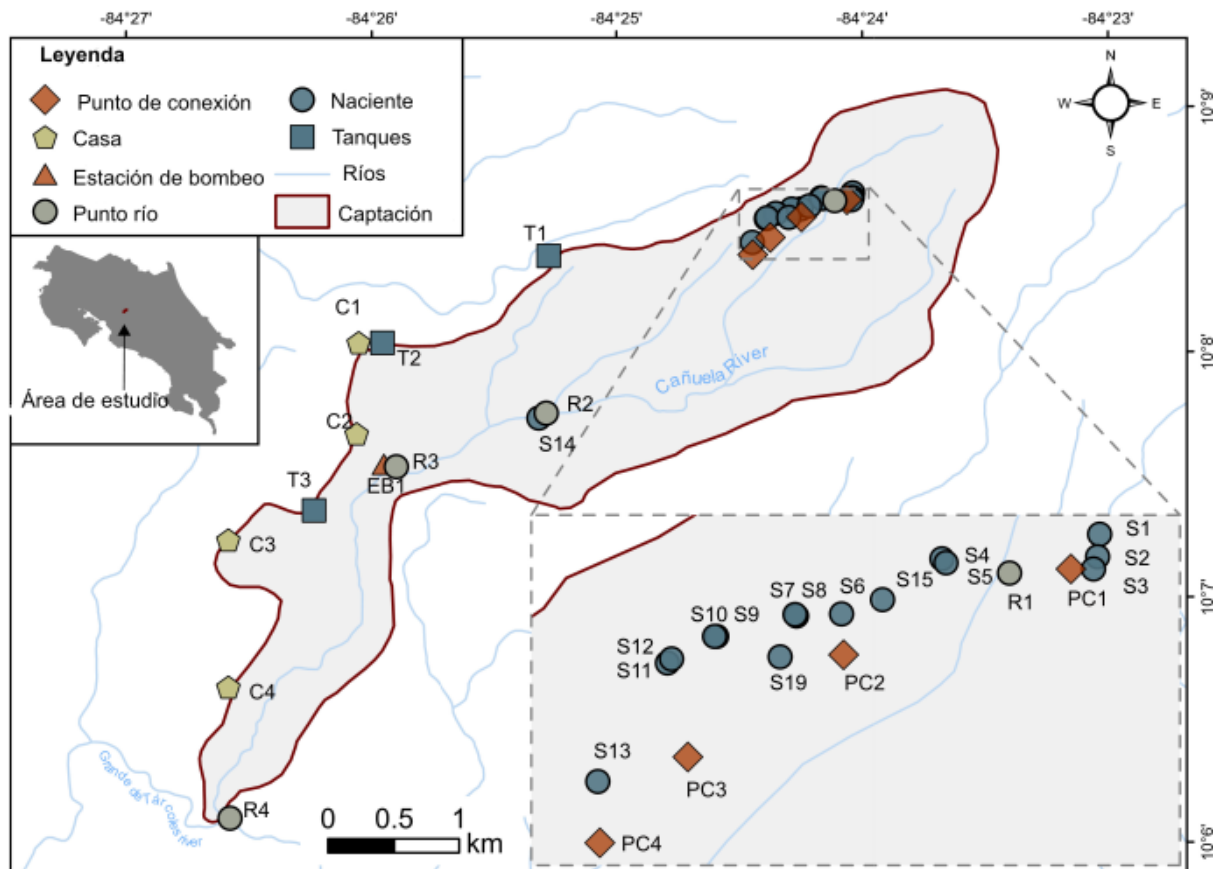


Figura 1. Sitios de muestreo dentro de la cuenca del río Cañuela en Concepción de San Ramón, Costa Rica.

El suministro de agua en Concepción de San Ramón es provisto por la ASADA local (Figura 2). El sistema de distribución actual está conformado por 16 nacientes, identificadas desde la S1 a la S15 y la S19, cuatro puntos de conexión, (PC1 a PC4) una estación de bombeo (EB) y tres tanques de almacenamiento (T1 a T3), distribuyendo agua a cuatro sectores diferentes que comprenden 71 viviendas y otros edificios municipales, se encuentra dividido en dos subunidades. En la primera subunidad, en la parte superior de la cuenca, el agua se transporta por gravedad a través de un sistema compuesto por cuatro puntos de conexión (PC) y 15 nacientes. Los PC se definen como cámaras independientes que no drenan ninguna naciente; por ejemplo, el agua de la naciente S1 se descarga en la cámara de la naciente S2, esta última no se considera un PC. El agua de este sistema se almacena en el tanque 1 (T1, capacidad 150 m<sup>3</sup>) y se distribuye a los sectores 1 y 2. Además, una fracción del agua se transporta y almacena en el tanque 2 (T2, capacidad 75 m<sup>3</sup>). En la segunda subunidad, situada en el centro de la cuenca, el agua del S14 se bombea al tanque 3 (T3, capacidad 300 m<sup>3</sup>) y se distribuye a los sectores 3 y 4. Este sistema solo funciona cuando hay niveles bajos de agua en las subunidades superiores (T1 y T2). El agua se desinfecta por cloración antes de su distribución en el tanque correspondiente.

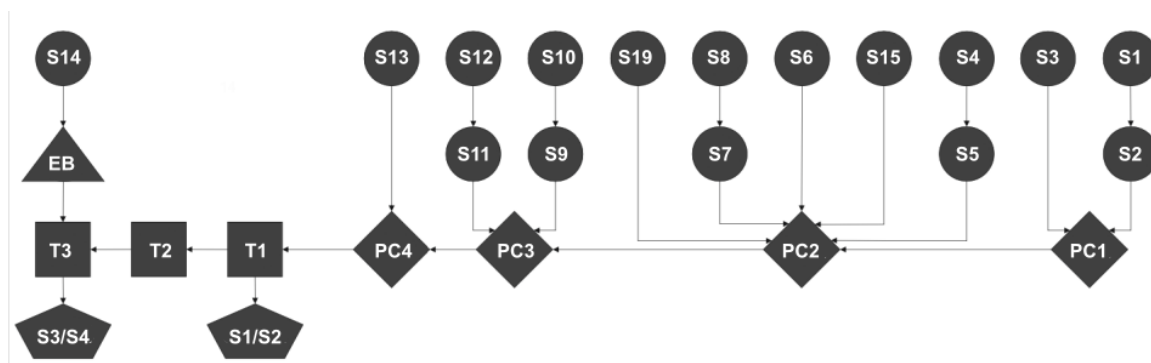


Figura 2. Diagrama del sistema de distribución de agua para consumo de la ASADA en Concepción de San Ramón, Costa Rica.

### 3.2 Encuestas

Se realizó una evaluación de la accesibilidad, el monitoreo y las condiciones de

infraestructura del sistema de distribución, mediante una evaluación del riesgo de las nacientes donde se dividió entre la zona de protección (es decir, 100-150 m de radio) y la cámara de la naciente (Meuli y Wehrle, 2001) . También se aplicó un instrumento de encuesta semiestructurado en las fincas cercanas ( $n = 13$ ) para recopilar información sobre las prácticas agrícolas y la identificación de posibles fuentes de contaminación.

### **3.3 Caracterización física, química y microbiológica del agua**

Se utilizó una base de datos que incluye información sobre los parámetros físicos, químicos y microbiológicos de las nacientes ( $n = 60$ ), hogares ( $n = 16$ ) y el río Cañuela ( $n = 16$ ). Esta fue construida durante cuatro campañas de muestreo (octubre de 2016 y febrero, abril y junio de 2017), las ubicaciones de los sitios se muestran en la Figura 1.

Las muestras para el análisis físico, químico y microbiológico se recolectaron en frascos de polietileno de alta densidad (HDPE) y frascos esterilizados no reutilizables, respectivamente. Las botellas de HDPE se lavaron previamente con HCl al 3% m/v y agua desionizada. Antes de recolectar las muestras del sistema de distribución de agua potable (es decir, en los hogares), las tuberías se purgaron durante al menos 5 minutos. Todas las muestras de agua se transportaron al laboratorio dentro de las 12 h posteriores a la recolección y se almacenaron a  $<6$  °C. La temperatura, el pH y la conductividad se midieron *in situ* utilizando equipos portátiles multiparámetro Hanna Instruments HI98121 y HI98311 (RI, EE. UU.), respectivamente y la turbidez se midió en un equipo Oakton T100 (Ill, USA). Los sólidos disueltos totales (SDT) se determinaron por gravimetría a 180 °C con previa filtración a través de filtros de 0,45  $\mu\text{m}$  (Isopore <sup>TM</sup>, Merck Millipore). La dureza y la alcalinidad total se determinaron mediante titulación con disoluciones estándar de EDTA y H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>, respectivamente. Para el análisis de Cl<sup>-</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, K<sup>+</sup>, Na<sup>+</sup> y Mg<sup>2+</sup> se utilizó la técnica de cromatografía por intercambio iónico (Thermo ICS 5000, CA, USA). La concentración de metales traza (Cu, Fe, Mn y Zn) se determinó mediante espectrometría de absorción atómica con llama de aire-acetileno, y el Pb se midió utilizando horno de grafito con efecto Zeeman (Perkin Elmer AAnalyst 800, CT, USA). Los análisis microbianos (coliformes totales y *Escherichia coli*) se realizaron en el Laboratorio de Biotecnología de la Universidad

Nacional, Costa Rica, siguiendo la técnica de fermentación por tubos múltiples (SMEWW 9221 E y 9223 B) con medio Fluorocult®, a concentración doble.

Las muestras de agua de río se caracterizaron utilizando parámetros adicionales que incluían oxígeno disuelto (OD), sólidos totales (ST), demanda bioquímica de oxígeno (DBO), amonio ( $\text{N-NH}_4^+$ ), y fósforo total. La dureza, alcalinidad total y análisis microbiológicos no se incluyeron en la caracterización del agua del río. Para las muestras de agua de río, el oxígeno disuelto y la temperatura se midieron *in situ* utilizando una sonda YSI ProODO (OH, EE. UU.), mientras que la conductividad se midió con una sonda portátil Thermo Orion Star A222 (MA, EE. UU.). La concentración de ST se determinó por gravimetría a 105 °C. La DBO se determinó mediante la prueba de incubación de 5 días (20 °C en oscuridad) y el método de Winkler modificado.  $\text{N-NH}_4^+$  y fósforo total se analizaron espectrofotométricamente en un equipo Thermo Aquamate 2000E (Cambridge, Reino Unido) siguiendo los métodos de azul de indofenol y cloruro de estaño, respectivamente. Las muestras de agua fueron digeridas previamente con ácido ( $\text{H}_2\text{SO}_4/\text{K}_2\text{S}_2\text{O}_8$ ) para el análisis de fósforo. Por último, todos los procedimientos analíticos siguieron las directrices de métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales de acuerdo con el Standard Methods for the Examination of Water and Waste Water (APHA et al., 2012).

### **3.4 Control de calidad y análisis de datos**

Los instrumentos y equipos se calibraron utilizando los estándares trazables del National Institute of Standard and Technology (NIST). En cada lote de análisis se realizaron blancos, controles de recuperación y curvas de calibración. Para cada muestra se estimó el balance iónico y aquellas con un error superior al 10% no se incluyeron en el análisis estadístico (nacientes,  $n = 4$ ). Los límites de cuantificación (LC) se calcularon como la señal del blanco más diez veces su desviación estándar y se calcularon los límites de detección (Miller & Miller, 2000).

La estadística descriptiva de los parámetros que incluyeron valores por debajo del LC se calculó utilizando el método ROS (regression on order statistics) (Helsel, 2012). Se excluyeron del análisis estadístico las variables que tenían un porcentaje de valores por debajo del LC superior al 60%. Las diferencias en los valores promedio por temporada se

estimaron mediante una prueba de permutación (Good, 1994). Se aplicó un análisis de conglomerados (AC) y un análisis de componentes principales (ACP) para identificar similitudes espaciales en la composición del agua de las nacientes y el río, así como para identificar los parámetros que influyen en la agrupación de los sitios. La idoneidad de la base de datos para el ACP se comprobó mediante las pruebas de esfericidad de Kaiser-Meyer-Olkin y Bartlett ( $p < 0,05$ ). Las características hidrogeoquímicas se estimaron mediante el diagrama de Piper (Piper, 1944), el diagrama de Gibbs (Gibbs, 1970), las relaciones iónicas y los índices de cloroalcalino (CAI1 y CAI2) (Schoeller, 1977). Los análisis estadísticos se realizaron en R 3.5.1 (R Core Team 2018).

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 Sistema de distribución de agua y uso de la tierra

La evaluación del riesgo de las nacientes mostró que se encontraban en buenas condiciones (Tabla 1). Las nacientes están localizadas en áreas públicas o en terrenos que son propiedad de la ASADA local, sin embargo, no hubo restricciones de acceso más allá de la dificultad debido a lo irregular del terreno. Ninguna de las nacientes tenía cercas alrededor de las zonas de protección internas (es decir, en un radio de 10-20 m), y los árboles a menudo estaban muy cerca de las cámaras de captación, lo que aumenta el riesgo de daños. La mayoría de las nacientes tenían un drenaje razonable, excepto las nacientes S7, S19 y S12 donde había poco o ningún tipo de drenaje. Las cámaras de las nacientes se encontraron bien construidas, ya que no se observaron fugas y contaban con tapas en buen estado. Sin embargo, ninguna de las cámaras estaba adecuadamente ventilada, además, las cámaras S1 y S13 presentaban algunos sedimentos, aunque no lo suficiente como para causar obstrucciones en las tuberías. No se pudo acceder a las cámaras S8 y S12 y, por lo tanto, no fueron evaluadas. También se identificó que la naciente S13 se desconecta manualmente del sistema de suministro de agua durante la temporada de lluvias debido al aumento de los contaminantes causados por el aumento de la escorrentía. La calidad y cantidad del agua se pueden medir fácilmente en cualquier naciente; sin embargo, cuando se realizó el trabajo de campo, no se observó equipo de monitoreo instalado para este tipo de mediciones.

Tabla 1. Análisis de riesgo de las nacientes en la ASADA de Concepción de San Ramon, Costa Rica en 2017.

<b>Factores</b>	<b>%</b>
<i>Zona de protección</i>	
Presencia de valla en la zona de protección	0
Drenaje en condiciones aceptables	81
Fugas en las nacientes	0
Acceso público	100
<i>Cámara de la naciente</i>	
Fuga en la cámara	0
Tapa en buen estado	94
Bloqueos en la tubería	0
Ventilación adecuada	0
Presencia de sedimentos en la cámara	94
La calidad del agua se puede medir	94
La cantidad de agua se puede medir	94

El área de las fincas dentro del zona de estudio varió de 0,5 a 10 ha. El suelo se utiliza para la agricultura (79%), la ganadería (14%) y la conservación/reforestación (7%). La mayor parte del área agrícola está cubierta por plantaciones de café, que suelen requerir fertilizantes que contienen nutrientes como nitrógeno, fósforo y potasio (NPK), insecticidas y herbicidas, estos productos se aplican constantemente durante todo el año. Por otro lado, la ganadería incluye el ganado vacuno y gallinas. Se reportó que el agua de los ríos no suele utilizarse en estas actividades económicas, sino ocasionalmente para limpiar herramientas o diluir plaguicidas. La mayoría de los agricultores han recibido capacitación en producción agrícola (80%). La producción total abastece el mercado local (52%), la agroindustria (31%), los mercados internacionales (8%) y el autoconsumo (8%).

La mayoría de las fincas mantuvieron una zona de protección ribereña informal (92%). Desde 3 a 100 metros, a lo largo del cauce del río, sin embargo, cambia según la zona de la finca y la pendiente del terreno. La percepción del estado del río fue mayoritariamente

prístina, con pocas alteraciones (69%) y los principales riesgos identificados fueron la descarga de aguas residuales de las fincas (38%), la escorrentía (23%), los residuos sólidos (15%), los agroquímicos (8%) y la deforestación (8%). Solo el 23% de las fincas tienen casas en la propiedad, que generalmente son utilizadas por los agricultores durante la temporada de cosecha. El número de trabajadores depende de la época del año, la demanda y la capacidad de producción de la finca, aunque es esperable un mínimo de dos personas ocupando el terreno de forma permanente durante todo el año. Todos los hogares tienen fosas sépticas, y solo en un caso, se mencionó que las aguas grises se descargan directamente al suelo cercano. Ninguno de los encuestados ha recibido alguna queja sobre eventos de contaminación relacionados con su propia actividad económica. El 92% de los encuestados se consideraba parte de la ASADA local.

#### **4.2 Calidad del agua en las viviendas y nacientes**

El resumen de las condiciones físicas, químicas y microbiológicas del agua en las casas y las nacientes se muestra en la Figura 3. La estadística descriptiva de todos los parámetros se presenta en las Tablas 2 y 3, respectivamente. Los iones disueltos se encontraron en bajas concentraciones. La alcalinidad, que suele ser representativa de estos iones, osciló entre 96,8 y 122,2 mg L<sup>-1</sup> y entre 71,5 y 150,0 mg L<sup>-1</sup> en las casas y nacientes, respectivamente. La concentración promedio de la dureza osciló entre 53,8 mg L<sup>-1</sup> y 70,2 mg L<sup>-1</sup> en las casas y entre 44,8 mg L<sup>-1</sup> y 71,8 mg L<sup>-1</sup> en las nacientes. Los metales trazas (Cu, Fe, Mn, Zn y Pb) se encontraron por debajo de los límites de cuantificación. Los coliformes totales y *E. coli* fueron encontrados únicamente en una muestra de las casas, ambos con una concentración de 1,9 NMP 100 mL<sup>-1</sup>. En las nacientes los coliformes totales y *E. coli* estuvieron presentes en el 34% y 14% de las muestras, respectivamente.

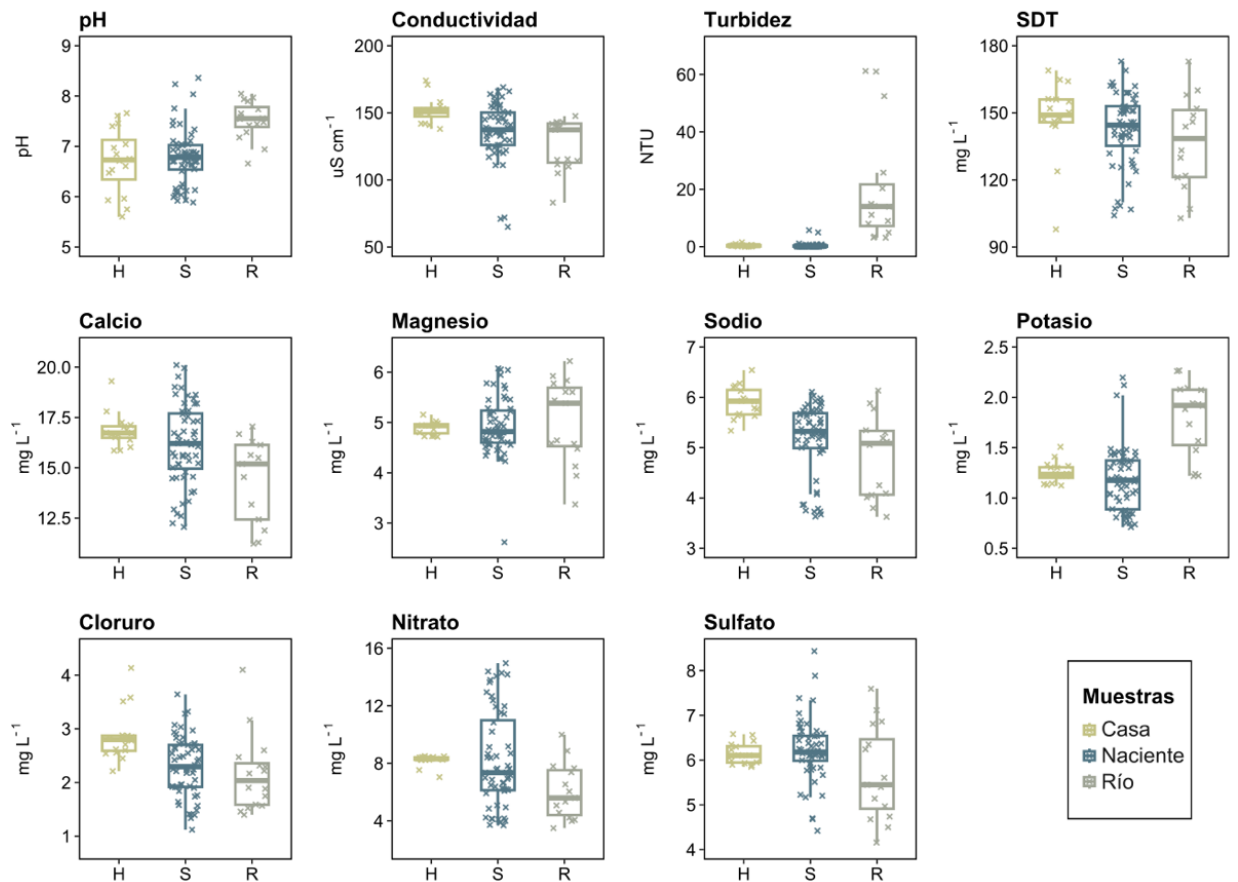


Figura 3. Concentración de varios parámetros en las nacientes (S) y hogares (H) en el sistema de distribución de agua de la ASADA de Concepción de San Ramón, Costa Rica.

A pesar de las variaciones observadas en la composición del agua entre el punto de uso y la fuente de abastecimiento, en su mayoría no fueron significativas ( $p > 0,05$ ). Solo se encontraron diferencias significativas en los valores promedio para la conductividad ( $p = 0,0084$ ), el  $\text{Cl}^-$  ( $p = 0,0006$ ) y el  $\text{Na}^+$  ( $p = 0,0003$ ). Estos parámetros podrían estar relacionados como residuos del proceso de cloración, siendo este el principal proceso de tratamiento del agua para consumo en Costa Rica (SCIJ, 2020). En cuanto a la variabilidad espacial y estacional, las diferencias espaciales entre casas no fueron significantes ( $p > 0,05$ ) y se observó un efecto estacional significativo solo para el pH ( $p = 0,0011$ ). Por el contrario, la mayoría de los indicadores de calidad del agua en las nacientes presentaron diferencias espaciales significativas ( $p < 0,05$ ); excepto para el pH ( $p = 0,597$ ), conductividad ( $p = 0,073$ ),  $\text{NO}_3^-$  ( $p = 0,053$ ) y turbidez ( $p = 0,3$ ). Las diferencias estacionales significativas en

las nacientes solo se observaron para el pH ( $p < 0,0001$ ), turbidez ( $p < 0,0001$ ) y dureza ( $p = 0,0410$ ). Estos resultados sugieren que la composición del agua en las nacientes permanece mayormente constante durante todo el año.

Las variaciones espaciales y temporales en la composición del agua en las casas no fueron significativas, y fueron menores que las variaciones de las nacientes (ver Figura 3). La composición del agua en las nacientes se debe principalmente por los procesos de interacción roca-agua durante la recarga de las aguas subterráneas, sin embargo, las nacientes mostraron concentraciones significativamente distintas para la mayoría de los parámetros evaluados. Esto fue parcialmente inesperado debido a que el área de estudio es relativamente pequeña y la infraestructura de las cámaras de las nacientes era adecuada. La mayoría de las nacientes se agrupan en la zona noroeste de la microcuenca (Figura 1), pero en varias se observaron signos tempranos de contaminación de origen antropogénico. Las fuentes potenciales incluyen fertilizantes y contaminación fecal, como lo demostró la concentración de  $\text{NO}_3^-$  y *E. coli*, respectivamente.

#### **4.3 Evaluación de la calidad del agua del río**

El resumen de los parámetros de calidad del agua superficial se muestran en la Figura 3 Sin embargo, no se realizó una comparación estadística entre las concentraciones de los parámetros en el agua del río y las nacientes y/o las casas debido a que esta agua no se utiliza para consumo humano. Adicionalmente, se evaluaron los parámetros de OD, ST, DBO, N- $\text{NH}_4^+$  y fósforo total, los cuales se resumen en la Tabla 4. Se encontraron altos niveles de oxígeno con un promedio de  $8,32 \text{ mg L}^{-1}$  ( $DE = 0,41$ ). Los ST variaron de 86,0 a  $173,0 \text{ mg L}^{-1}$ . La DBO y el N- $\text{NH}_4^+$  se encontraron mayoritariamente por debajo de los límites de cuantificación ( $< 2 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$  y  $< 0,07 \text{ mg L}^{-1} \text{ N}$ , respectivamente), sin embargo se encontraron altas concentraciones de DBO durante una campaña de muestreo en la estación seca para la desembocadura del río ( $31,1 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$ ), junto con una alta concentración de fósforo total ( $6,13 \text{ mg L}^{-1} \text{ P-PO}_4^{3-}$ ) y de otros iones mayoritarios, esto puede deberse a que en las zonas bajas del río se encuentran la mayor cantidad de fincas utilizadas para la agricultura y por lo tanto un aumento uso de fertilizantes y la consecuente descarga de estos

aumentan las concentraciones de nutrientes en el río (Abascal et al., 2022). Durante el período de muestreo, el promedio de fósforo total fue de 0,52 mg L<sup>-1</sup>.

En general, se observó una tendencia decreciente en la calidad del agua del río. Se obtuvieron diferencias espaciales para turbidez ( $p = 0,046$ ), Mg<sup>2+</sup> ( $p = 0,025$ ), K<sup>+</sup> ( $p = 0,005$ ), Na<sup>+</sup> ( $p = 0,046$ ), SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> ( $p = 0,021$ ) y FT ( $p = 0,001$ ). Por otro lado, los parámetros que mostraron una variación estacional significativa son OD ( $p = 0,005439$ ), SDT ( $p = 0,04398$ ), Ca<sup>2+</sup> ( $p = 0,03497$ ), Mg<sup>2+</sup> ( $p = 0,03994$ ) y Na<sup>+</sup> ( $p = 0,04491$ ). Las concentraciones de estos parámetros se mantuvieron más altas durante la estación seca, al igual que en las nacientes y las casas. Las concentraciones de los metales trazas (Cu, Fe, Mn, Zn y Pb) se encontraron por debajo de los límites de cuantificación.

#### **4.4 Factores determinantes de la composición del agua en las nacientes y en el río**

Se realizaron análisis hidrogeoquímicos y multivariados para estudiar la variabilidad espacial en la composición del agua, se utilizaron los valores promedio debido a que las diferencias estacionales fueron en su mayoría no significativas. En todas las nacientes los cationes mayoritarios siguieron la tendencia Ca<sup>2+</sup> > Mg<sup>2+</sup> > Na<sup>+</sup> > K<sup>+</sup>. En el caso de los aniones mayoritarios, las tendencias fueron HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > Cl<sup>-</sup> para el 53% de las muestras y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> > SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> > NO<sub>3</sub><sup>-</sup> > Cl<sup>-</sup> para el 47% restante. La secuencia de iones mayoritarios es típica de las aguas subterráneas con tiempos de residencia cortos (Chebotarev, 1955); sin embargo, la presencia de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> refleja un probable impacto de las actividades antropogénicas. Tendencias similares fueron encontradas a nivel nacional en otros estudios en el Pacífico Central y Norte, así como en el Valle Central de Costa Rica (Madrigal-Solís et al., 2022; Sánchez-Gutiérrez et al. 2020a; Sánchez-Gutiérrez et al. 2020b). Esto sugiere una similitud en las estructuras de los acuíferos, los mecanismos de recarga y las presiones ambientales.

Se utilizó el diagrama de Piper para caracterizar el tipo de agua subterránea, clasificándola como HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>-Ca<sup>2+</sup>-Mg<sup>2+</sup> (Figura 4). Esta composición del agua está influenciada principalmente por los procesos de meteorización de las rocas, como lo indica

la concentración de SDT ( $M = 142,7 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $DE = 16,2$ ) contra la relación  $\text{Na}^+ / [\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+}]$  ( $M = 0,218$ ,  $DE = 0,015$ ), o la relación  $\text{Cl}^- / [\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-]$  ( $M = 0,058$ ,  $DE = 0,020$ ).

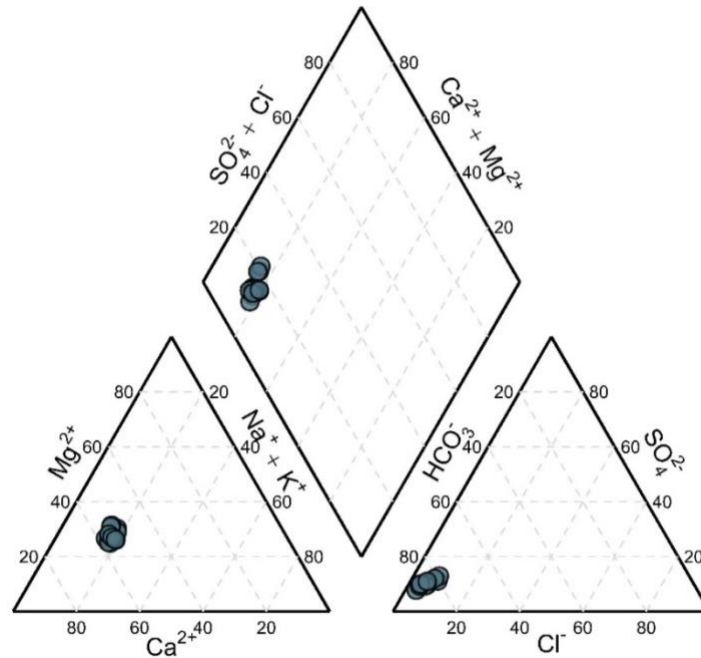


Figura 4. Diagrama de Piper que muestra la composición de las aguas de las nacientes en la microcuenca del río Cañuela en San Ramón, Costa Rica.

Las fuentes potenciales de iones mayoritarios se evaluaron mediante relaciones iónicas (en  $\text{meq L}^{-1}$ ). La relación entre el contenido de  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  y  $[\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$  sugiere que la disolución de calcita, dolomita o minerales de sulfato (ejemplo el yeso o anhidrita) podría ser el principal contribuyente de estos iones en los nacientes (Figura 4a). Para  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]$  frente a la relación  $\text{HCO}_3^-$  se observa que la mayoría de las muestras se ubican por encima de la línea 1:1 (Figura 5b), lo que sugiere que el origen para  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  es más probable por la disolución de rocas carbonatadas. Esto se analizó más a fondo utilizando las relaciones entre el  $\text{Ca}^{2+}$  contra el  $\text{Mg}^{2+}$ . Los valores obtenidos se relacionan con la meteorización de silicatos ( $> 2$ ), calcitas (entre 2 y 1) y dolomitas ( $< 1$ ) (Mayo & Loucks, 1995; Subramani et al., 2010). Las muestras se encontraron por encima y por debajo de la relación 2:1 (Figura 5c), lo que indica la meteorización de calcitas y silicatos, asimismo, la geología de la zona de estudio también refleja la presencia de silicatos. Las fuentes de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  se infieren de la relación

$\text{Na}^+/\text{Cl}^-$ , en este caso, las muestras se agruparon por encima de la línea 1:1, indicando un exceso de  $\text{Na}^+$  (Figura 5d). Es probable que este comportamiento se encuentre relacionado con los procesos de meteorización de silicatos y/o intercambio iónico (Ghesquière et al., 2015; Liu et al., 2019). Al mismo tiempo, esta tendencia muestra una baja probabilidad de presencia de halita o el aporte significativo de  $\text{Cl}^-$  de fuentes antropogénicas.

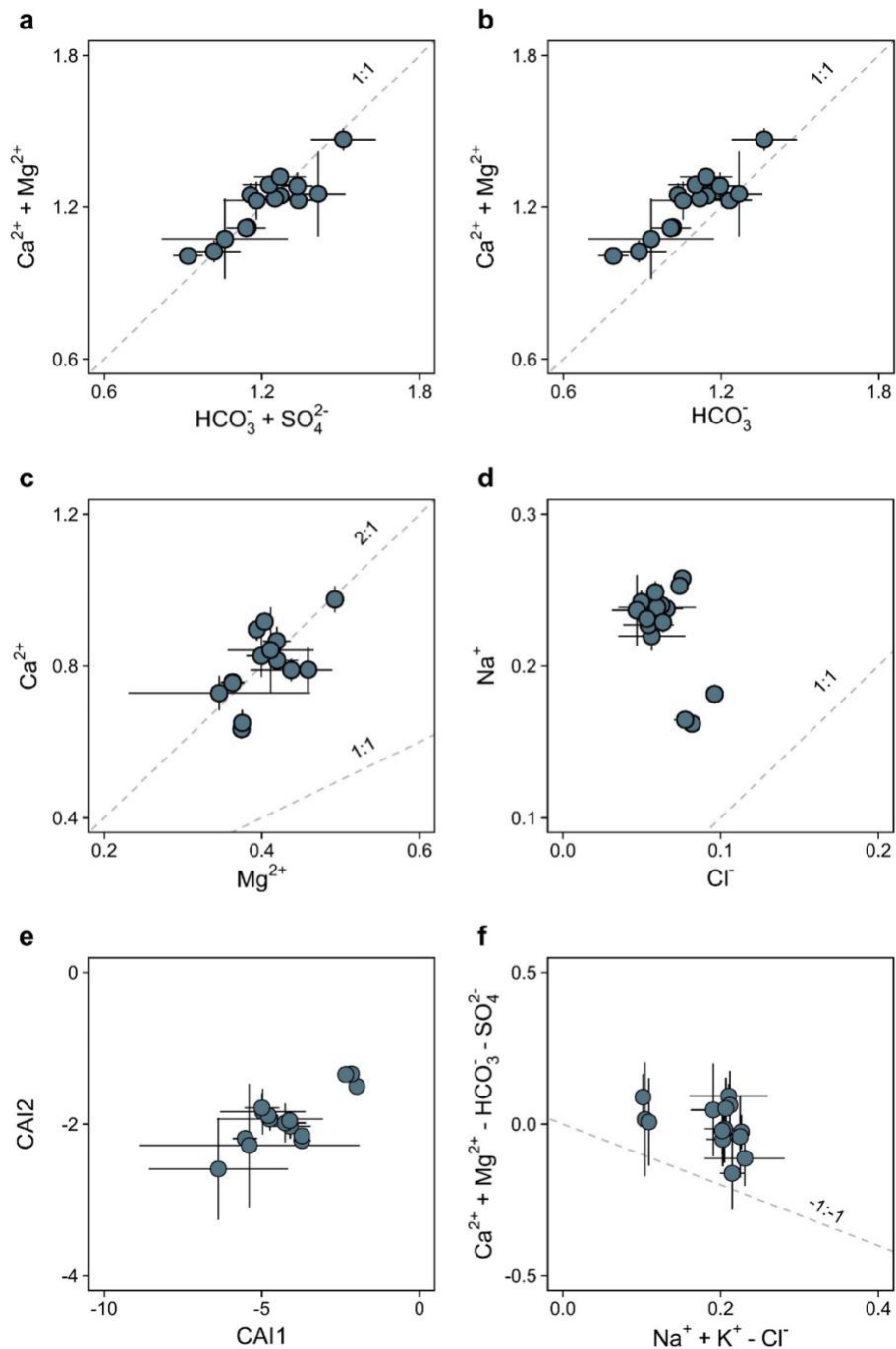


Figura 5. Relaciones de (a)  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}] / [\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}]$ , (b)  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}]/\text{HCO}_3^-$ , (c)  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ , (d)  $\text{Na}^+ / \text{Cl}^-$ , (e)  $\text{CAI2}/\text{CAI1}$ , y (f)  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}]/[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-]$  en las nacientes. Valores medios ( $\text{meq L}^{-1}$ )  $\pm 1\sigma$  ( $n = 4$ ).

Las reacciones de intercambio iónico entre el agua subterránea y el material subyacente se evaluaron utilizando el índice de cloroalcalino (CAI). Los valores negativos son un indicador de un intercambio iónico normal donde el  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  se adsorben en las superficies minerales, liberando  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  al agua. Por el contrario, los valores positivos indican la sorción de  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  tras la liberación de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (intercambio iónico inverso) (Madriral-Solís et al., 2022). Los valores negativos obtenidos sugieren un intercambio iónico normal (Figura 5e), este proceso también conduce a un aumento en la concentración de  $\text{Na}^+$  y/o  $\text{K}^+$  en el agua, lo que podría explicar la alta concentración de  $\text{Na}^+$  en relación con  $\text{Cl}^-$ .

La contribución del intercambio iónico a la hidrogeoquímica de las nacientes se deriva de la relación entre  $[\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^- - \text{SO}_4^{2-}]$  y  $[\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^-]$  (Figura 5f). Las muestras no siguen la pendiente -1, que suele ser un indicador de un intercambio catiónico significativo (Fisher & Mullican, 2012). En cambio, se observó una pendiente de -0,49397, esto sugiere una contribución parcial de los procesos de intercambio catiónico a la influencia de la composición del agua. Estos resultados, junto con las relaciones de  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  sugieren que las fuentes de cationes en el agua son predominantemente la disolución de minerales que contienen carbonatos, con una contribución menor de la meteorización de silicatos, seguida de un intercambio iónico normal.

Los principales parámetros que influyen en la composición distintiva del agua entre el río y las nacientes se evaluaron mediante ACP (Figura 6). El componente principal 1 explicó el 44,3% de la varianza total y presentó cargas positivas para  $\text{Na}^+$ , conductividad,  $\text{Ca}^{2+}$ , SDT y  $\text{Mg}^{2+}$ . El componente principal 2, que explica el 27,4% de la varianza, presentó cargas positivas para  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , pH, turbidez y  $\text{SO}_4^{2-}$ . El componente principal 3 explicó el 10,3% de la varianza total, destacando la contribución de  $\text{NO}_3^- - \text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ . Los tres componentes principales presentaron valores propios mayores que 1. En general, el componente principal 1 destaca la distribución espacial del creciente contenido de iones en el agua (desde el noreste

hacia la desembocadura del río), mientras que el componente principal 2 y el 3, probablemente indican la influencia de las actividades antropogénicas.

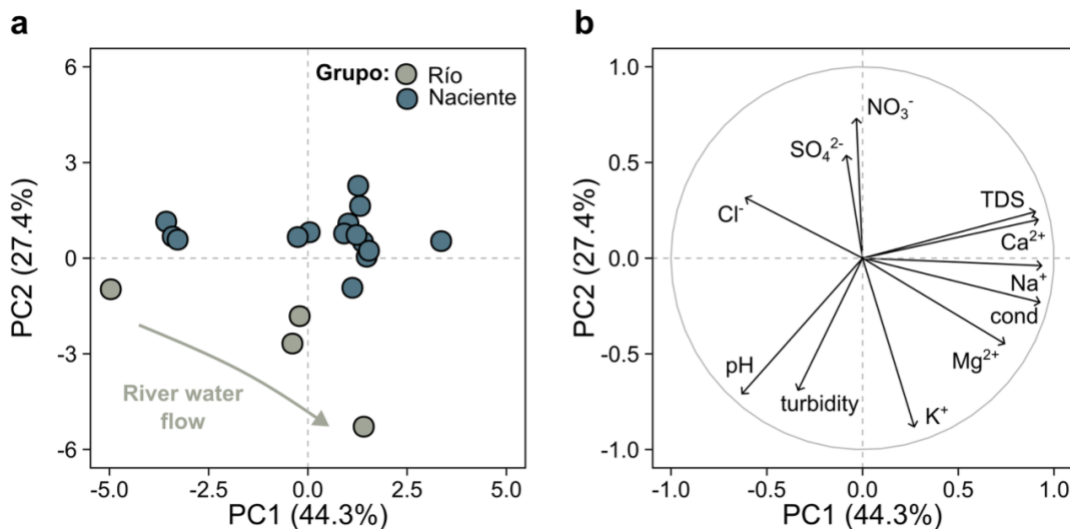


Figura 6. Análisis de componentes principales la composición física y química de (a) las nacientes y el río, y (b) las cargas de los parámetros.

Mediante el análisis de conglomerados, las muestras de nacientes y ríos se clasificaron en tres grupos (Figura 7). El primer grupo (A) comprende las nacientes ubicadas en el lado noreste de la cuenca ( $n = 3$ ) y el punto de río en la parte superior del área de estudio, este grupo se caracteriza por valores altos de pH y Cl<sup>-</sup>. El segundo grupo (B) está formado por nacientes en el área noroeste ( $n = 11$ ), estas nacientes mostraron altas concentraciones de iones y SDT. No obstante, dos nacientes, S4 y S5, presentaron una mayor concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en comparación con las otras nacientes dentro del mismo grupo. El tercer grupo (C) incluyó una naciente y el resto de los puntos de río ( $n = 3$ ). En general, el agua de río se caracterizó por un mayor pH y turbidez, pero también mostró una tendencia creciente en la concentración de K<sup>+</sup> aguas abajo.

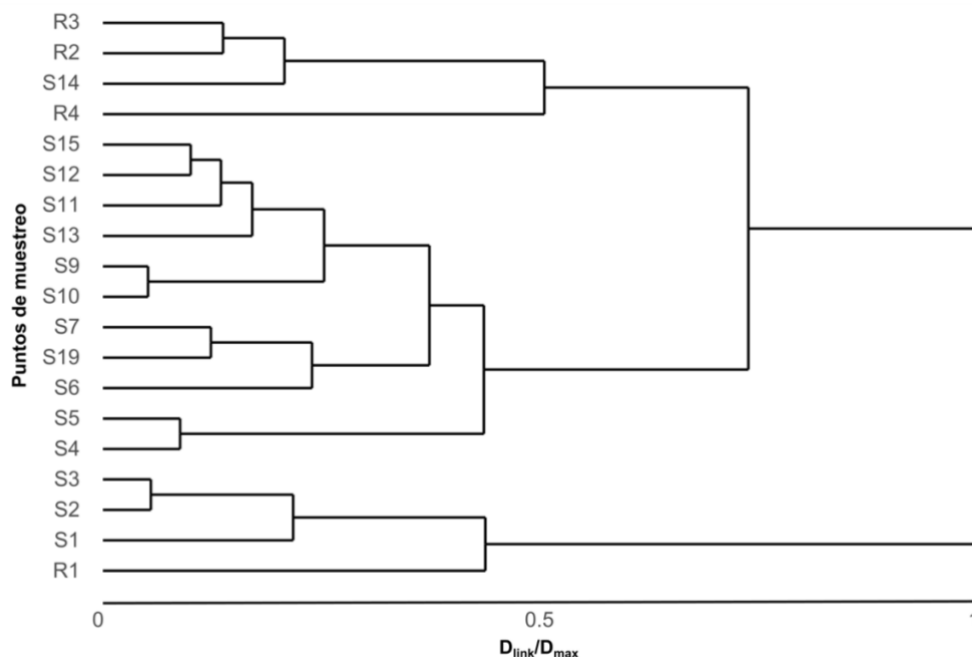


Figura 7. Dendrograma de conglomerados que muestra la agrupación de los sitios de nacientes (s) y ríos (S) en la cuenca del río Cañuela en San Ramón, Costa Rica.

La presencia de  $\text{NO}_3^-$  en algunas nacientes podría atribuirse principalmente a fuentes antropogénicas, el  $\text{NO}_3^-$  normalmente se encuentra en aguas naturales en concentraciones inferiores a  $10 \text{ mg L}^{-1}$  (Xiao et al., 2022). Las concentraciones que superan este umbral pueden provenir del estiércol del ganado, las aguas residuales no tratadas, los lixiviados de los vertederos y la aplicación de fertilizantes ricos en N para la agricultura (Abascal et al., 2022). En el Valle Central de Costa Rica se ha demostrado que, debido a la falta de instalaciones centralizadas en el tratamiento de aguas residuales, los principales contribuyentes de  $\text{NO}_3^-$  a las aguas subterráneas están relacionados con el estiércol y las fugas de las fosas sépticas (Sánchez-Gutiérrez et al., 2023). Sin embargo, dado que esta área de estudio es principalmente semiurbana, otras fuentes relacionadas con actividades económicas (es decir, agrícolas, ganaderas) y naturales (suelos nitrogenados de áreas boscosas) podrían generar un aporte importante.

Para distinguir entre estas potenciales fuentes de contaminación, es posible utilizar la relación  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$ . Las aguas no contaminadas presentan un bajo contenido tanto de  $\text{NO}_3^-$  como de  $\text{Cl}^-$ , mientras que una relación elevada se atribuye a la contaminación por

fertilizantes (Abascal et al., 2022). Además, una relación baja de  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  con incremento de  $\text{Cl}^-$  puede indicar fuentes de estiércol y aguas residuales (Huang et al., 2022; Su et al., 2020). En las nacientes, el  $\text{NO}_3^-$  superó el umbral natural en el 37% de las muestras, con valores de hasta  $14,97 \text{ mg L}^{-1}$ . Cuatro nacientes (S4, S5, S12 y S13) presentaron valores altos de  $\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-$  pero bajo para  $\text{Cl}^-$ , lo que sugiere una posible influencia de los fertilizantes (Figura 8a). Debido a que el  $\text{NO}_3^-$  en conjunto con el  $\text{SO}_4^{2-}$  destacaron en el análisis de ACP, su relación se evaluó mediante radios normalizados de  $\text{Na}^+$  (Figura 8b). Algunas muestras poseen una relación  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$  cercana a 1, un valor que comúnmente refleja la influencia agrícola y de aguas residuales (Roy et al., 1999), sin embargo, hubo una ligera tendencia al aumento del  $\text{NO}_3^-$ . El análisis isotópico de diferentes iones ( $^{15}\text{N}-\text{NO}_3^-$ ,  $^{18}\text{O}-\text{NO}_3^-$ ,  $^{34}\text{S}-\text{SO}_4^{2-}$  y  $^{18}\text{O}-\text{SO}_4^{2-}$ ) son necesarios para discernir de una manera más precisa de la fuente de ambos iones.

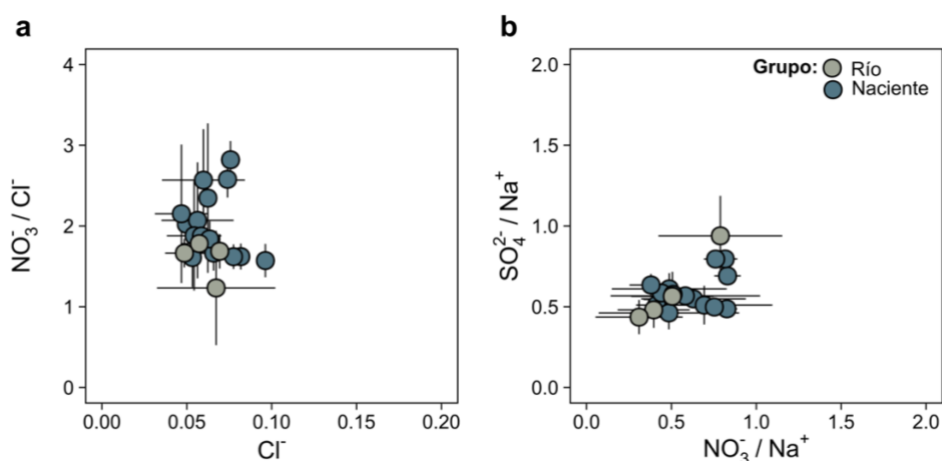


Figura 8. Relaciones de (a)  $[\text{NO}_3^-/\text{Cl}^-]/\text{Cl}^-$ , y (b)  $[\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+]/[\text{NO}_3^-/\text{Na}^+]$  en las nacientes y en el agua de los ríos. Valores medios ( $\text{meq L}^{-1}$ )  $\pm 1\sigma$  ( $n = 4$ ).

#### 4.5 Recomendaciones para mejorar la gestión del agua

El agua suministrada por la ASADA de Concepción de San Ramón presentó altos niveles de cumplimiento de las normas locales e internacionales para el consumo humano. Esto se logra mediante una adecuada inversión en infraestructura, operación y mantenimiento del sistema de distribución, además del uso de agua de múltiples fuentes (nacientes).

La infraestructura de las cámaras de las nacientes fue aceptable, pero es necesario definir una zona de protección e instalar vallas para minimizar el riesgo de interferencia por personas ajenas a la ASADA (miembros de la comunidad, entre otros) y proteger la instrumentación, en caso de ser instalada, además, se identificó la necesidad de rotular de forma clara cada una de las nacientes. Entre otras recomendaciones se puede mencionar: mantener la pintura de las cámaras de captación en óptimas condiciones, sustituir las tapas metálicas por tapas de fibra de vidrio, mejorar la ventilación de las cámaras y establecer un plan de limpieza, al menos durante la estación seca. Es necesario cambiar cerraduras, candados y llaves para ingresar a las cámaras de captación de las nacientes. Se debe eliminar árboles o arbustos con raíces profundas de las zonas de protección internas en las nacientes ya que podrían dañar la infraestructura, en particular la red de tuberías, además de realizar monitoreos regulares para identificar cualquier crecimiento que pueda poner en riesgo la infraestructura. También se debe aumentar el área de drenaje dentro de la cámara de captación en algunas de las nacientes, con el objetivo de reducir la turbidez, la concentración de sólidos totales y los contaminantes durante la temporada de lluvias, al disminuir el riesgo de infiltración de aguas superficiales. Se debe realizar una evaluación de riesgo para la naciente S8, ya que no se pudo acceder a esta, de igual forma, también se debe mejorar el acceso a la naciente S12. Por último, se debe realizar un análisis de costo-beneficio para evaluar si la compra de equipos adicionales para medir algunos de los parámetros físicos y químicos de la calidad del agua *in situ* es rentable a largo plazo.

Las nacientes por sí solas no pueden considerarse como una fuente de agua potable, pues requieren de otros procesos como desinfección, sin embargo, no se observó contaminación por agentes microbiológicos en las casas de habitación, lo que destaca el buen desempeño del tratamiento de desinfección. Los coliformes totales y *E. coli*, son un indicador de contaminación del agua por materia fecal humana o animal y son responsables de causar enfermedades gastrointestinales o malestar como diarrea, náuseas y dolor de cabeza (Paruch & Mæhllum, 2012., Hunter, 2003). Por este motivo es importante que la ASADA preste atención al adecuado funcionamiento del sistema de cloración y establezca la dosis óptima de cloro mediante estudios que tomen en consideración las variaciones de caudales durante el año, además, es recomendable crear una estrategia para el manejo adecuado de las aguas residuales domésticas o por actividad ganadera.

El impacto de actividades agrícolas también se observó en la disminución de la calidad del agua del río, la concentración de fósforo total y la mayoría de los cationes aumentaron aguas abajo; en particular, el  $K^+$ . En zonas donde se realiza agricultura intensiva se suelen utilizar cantidades excesivas de fertilizantes, en donde tanto el fósforo como potasio pueden ser lixiviados o transportados por escorrentía a los cuerpos de agua superficial (Liu et al., 2021; Skowron et al., 2018). Esto coincide con el uso actual del suelo en la cuenca, ya que predominan las plantaciones de café y la ganadería. Sin embargo, es necesario realizar estudios de parámetros de calidad de agua adicionales para cuantificar el impacto de estas actividades en la calidad del agua.

Se deben buscar estrategias para limitar el uso de agroquímicos y migrar a prácticas de agricultura sostenible donde se reduzca la aplicación y residuos de fertilizantes y pesticidas. Además, se debe promover el uso de abonos y pesticidas orgánicos, así como otras alternativas naturales para el control de plagas. Para lograrlo es fundamental realizar capacitaciones, charlas, talleres, y actividades de sensibilización ambiental dirigidas a los agricultores, propietarios de las fincas y otros actores locales que incentiven la producción limpia. También, es importante compartir esta información de calidad del agua en la microcuenca con la comunidad para generar conciencia y a la vez tomar en consideración la opinión de los propietarios de las fincas en la toma de decisiones. Por último, de ser posible se debe promover la adquisición de los terrenos aledaños a las nacientes que suministran el agua a la ASADA para asegurar la protección de las cámaras, e incentivar a los propietarios de las fincas contar con un perímetro de protección del río.

Los resultados generales de la calidad del agua son de interés para la ASADA local, no solo para fines regulatorios y operativos, sino también para la planificación y gestión futura. Un análisis normativo de los datos de calidad del agua en las casas de habitación sugiere que la ASADA proporciona agua potable gestionada de forma segura, se puede llegar a una conclusión similar al comparar los datos de las nacientes con la normativa de agua potable; destacando la necesidad de realizar un proceso de desinfección. En este caso, se espera que la ASADA adopte las medidas necesarias para garantizar el funcionamiento satisfactorio del

tratamiento de desinfección. Este tipo de acciones están relacionadas con rol de la ASADA como proveedor de servicios de agua, por lo que recomendaciones similares pueden surgir del monitoreo que brinda el AyA; por lo general, cada tres años (para incluir un número similar de parámetros al que se presenta en este estudio).

Sin embargo, una interpretación más amplia de los datos de calidad del agua proporciona información sobre los procesos naturales que modifican la composición del agua de las nacientes, así como sobre las posibles fuentes de contaminación. Esto se ve respaldado por la evaluación de la calidad del agua del río, para hacer frente a estas potenciales amenazas al recurso hídrico, la ASADA debe asumir un papel más orientado hacia la gestión de los recursos hídricos y su conservación. En este caso, es importante tener en cuenta el marco legal que regula las OCSAS, esto se debe a que podría ser necesario un enfoque participativo y multisectorial en el que se involucre al gobierno central, los gobiernos locales, otras organizaciones de gestión de la comunidad de agua, los agricultores, la industria y el sector académico, sin embargo, las OCSAS deben asumir un papel protagónico en la planificación y el desarrollo de esas iniciativas.

## V. CONCLUSIONES

Este estudio ha demostrado que el monitoreo integral de la calidad del agua ser una herramienta valiosa para apoyar a las OCSAS. En este caso la ASADA de Concepción de San Ramón, los datos obtenidos sobre la calidad de agua tanto en río, nacientes y hogares revelaron que: a) La ASADA provee agua de calidad potable a la población gestionada de manera segura. b) la composición principal del agua de las nacientes proviene de los procesos de interacción agua – roca durante la recarga de las aguas subterráneas. c) Las nacientes presentaron signos tempranos de contaminación de fuentes no localizadas, siendo el principal factor de riesgo identificado la agricultura. Los análisis de la calidad del agua de las nacientes demuestran un aumento en las concentraciones de  $\text{NO}_3^-$  que es un parámetro estrechamente ligado a la contaminación proveniente de los fertilizantes empleados, además la agricultura es la principal actividad productiva en la zona. d) En cuanto a las diferencias espaciales y estacionales en las muestras de agua para casas y las nacientes, el estudio permitió determinar que no hay diferencias significativas espaciales en la calidad del agua en las casas, sólo se encontró un parámetro (pH) con diferencia significativa en el análisis temporal.

Es importante señalar que el monitoreo en este estudio se limitó a dos campañas por temporada durante un año hidrológico, por lo tanto, la calidad del agua puede cambiar significativamente por diferencias espaciales y temporales; especialmente, durante los períodos de fuertes lluvias o sequías. Se esperaba que estos cambios sean más notorios en el río que en las nacientes o en los hogares.

Entre las recomendaciones discutidas que contribuyen a la adecuada gestión del recurso hídrico la microcuenca del Río Cañuela en San Ramón, Alajuela, están: mejorar la infraestructura, ventilación, drenaje, seguridad física y área de protección de las nacientes y las cámaras de captación, así como migrar a una agricultura más limpia que minimice el uso de agroquímicos y fomente el uso de abonos orgánicos. Se recomienda que la ASADA tome un rol más participativo en el manejo del recurso hídrico en la zona. Por ejemplo, en la articulación de acciones de capacitación y concientización de todos los actores que

participan en la gestión del agua en la cuenca. Esto con el objetivo de prevenir, mantener y mejorar el servicio de distribución y saneamiento de agua potable brindado por la ASADA.

## VI. FUENTES BIBLIOGRAFICAS

- Abascal, E., Gomez-Coma, L., Ortiz, I., & Ortiz, A. (2022). Global diagnosis of nitrate pollution in groundwater and review of removal technologies. *Sci Total Environ*, 810, 152233. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.152233>
- Agudelo, C.; Ramírez, R. (2017). *Guía Metodológica Para La Aplicación de La Matriz Genérica de Protección de Acuíferos; Dirección de Investigación y Gestión Hídrica*. SENARA.
- Alexander, R. B., Boyer, E. W., Smith, R. A., Schwarz, G. E., & Moore, R. B. (2007). The Role of Headwater Streams in Downstream Water Quality. *J Am Water Resour Assoc*, 43(1), 41-59. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2007.00005.x>
- Aminot, A & F. Andrieux. (1996). Concept and determination of exchangeable phosphate in aquatic sediments. *Waters Res.* 30.
- Antón, D. J. (1996) *Ciudades Sedientas: Agua y Ambientes Urbanos En América Latina*; Editorial NORDAN, UNESCO
- APHA, AWWA, & WEF. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (W. Lipps, E. Braun-Howland, & T. Baxter, Eds. 24th ed. ed.)*. APHA Press.
- Babiker, I. S.; Mohamed, M. A. A.; Hiyama, T. (2007). Assessing Groundwater Quality Using GIS. *Water Resour. Manag.*, 21 <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>.
- Bain, R., Cronk, R., Hossain, R., Bonjour, S., Onda, K., Wright, J., Yang, H., Slaymaker, T., Hunter, P., Pruss-Ustun, A., & Bartram, J. (2014). Global assessment of exposure to faecal contamination through drinking water based on a systematic review. *Trop Med Int Health*, 19(8), 917-927. <https://doi.org/10.1111/tmi.12334>
- Baird, C. (2004). *Química Ambiental*. Reverté S.A.
- Bartram, J., Brocklehurst, C., Bradley, D., Muller, M., & Evans, B. (2018). Policy review of the means of implementation targets and indicators for the sustainable development goal for water and sanitation. *npj Clean Water*, 1(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-018-0003-0>
- Blair, R. C., Higgins, J. J., Karniski, W., & Kromrey, J. D. (1994). Multivariate Behavioral A Study of Multivariate Permutation Tests Which May Replace Hotelling 's T2 Test in Prescribed Circumstances. *Multivariate Behavioral Research*, 29(2), 141–163. doi: [https://doi.org/10.1207/s15327906mbr2902\\_2](https://doi.org/10.1207/s15327906mbr2902_2)
- Bogart, S., Woodman, S., Steinkey, D., Meays, C Pyle, G. (2016). Rapid changes in waterhardness and alkalinity: Calcite formation is lethal to *Daphnia magna*. *Science Total Environ*, 559. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.03.137>

- Bower, K. M. (2013). Water supply and sanitation of Costa Rica. *Environmental Earth Sciences*, 71(1), 107-123. <https://doi.org/10.1007/s12665-013-2416-x>
- Burri, N. M., Weatherl, R., Moeck, C., & Schirmer, M. (2019). A review of threats to groundwater quality in the anthropocene. *Sci Total Environ*, 684, 136-154. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.236>
- Cárdenas, G., Cárdenas, J. (2009). *Agricultura, urbanización y agua*. IICA.
- Cárdenas, R & Erazo, M. (2013). *Ecología: Impacto de la problemática ambiental actual sobre la salud y el ambiente*. Ecoe Ediciones.
- Carey, C.M., Trevors (2004). Biology, persistence and detection of *Cryptosporidium parvum* and *Cryptosporidium hominis* oocyst. *Water Research*, 38
- Charles, K. J., Nowicki, S., & Bartram, J. K. (2020). A framework for monitoring the safety of water services: from measurements to security. *npj Clean Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00083-1>
- Chebotarev, I. I. (1955). Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 8(1-2), 22-48. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(55\)90015-6](https://doi.org/10.1016/0016-7037(55)90015-6)
- Chowns, E. (2015). Is Community Management an Efficient and Effective Model of Public Service Delivery? Lessons from the Rural Water Supply Sector in Malawi. *Public Administration and Development*, 35(4), 263-276. <https://doi.org/10.1002/pad.1737>
- da Luz, N., & Kumpel, E. (2020). Evaluating the impact of sampling design on drinking water quality monitoring program outcomes. *Water Res*, 185, 116217. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116217>
- Day, S. J. (2009). Community-based water resources management. *Waterlines*, 28(1), 47-62. <https://doi.org/10.3362/1756-3488.2009.005>
- Digea. (25 de setiembre, 2022). “Reglamento para la clasificación y evaluación de la calidad de los cuerpos de aguas superficiales”. [http://www.digea.go.cr/sites/default/files/de-33903reglamento\\_evaluacion\\_clasificacion\\_cuerpos\\_de\\_agua\\_0.pdf](http://www.digea.go.cr/sites/default/files/de-33903reglamento_evaluacion_clasificacion_cuerpos_de_agua_0.pdf)
- Echeverría, J; Cantillo, B. (2013). El agua en Costa Rica. *Ambientales*, 45.
- Esquivel-Hernández, G., Sánchez-Murillo, R., Birkel, C., & Boll, J. (2018). Climate and Water Conflicts Coevolution from Tropical Development and Hydro-Climatic Perspectives: A Case Study of Costa Rica. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 54(2), 451-470. <https://doi.org/10.1111/1752-1688.12617>
- EPA. (2001). *Parameters of Water Quality. Interpretation and Standards* (2nd ed.). Environmental Research Unit: Ireland.

- Fisher, R. S., & Mullican, I. I. W. F. (2012). Hydrochemical Evolution of Sodium-Sulfate and Sodium-Chloride Groundwater Beneath the Northern Chihuahuan Desert, Trans-Pecos, Texas, USA. *Hydrogeology Journal*, 5(2), 4-16. <https://doi.org/10.1007/s100400050102>
- Garrels, R.M & Christ, C.L. (1965). *Solutions, Minerals and Equilibria*. W. H. Freeman.
- Gburek, W., Folmar, G. (1999). Flow and chemical contributions to streamflow in an upland watershed: a baseflow survey. *Journal of Hydrology*. 217. [https://doi.org/10.1016/S0022-1694\(98\)00282-0](https://doi.org/10.1016/S0022-1694(98)00282-0)
- Ghesquière, O., Walter, J., Chesnaux, R., & Rouleau, A. (2015). Scenarios of groundwater chemical evolution in a region of the Canadian Shield based on multivariate statistical analysis. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 4, 246-266. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.06.004>
- Gibbs, R. J. (1970). Mechanisms controlling world water chemistry. *Science*, 170(3962), 1088-1090. <https://doi.org/10.1126/science.170.3962.1088>
- Gómez-Cruz, A., Moraga-López, G., Calderón-Sánchez, H., Núñez-Solís, C., Madrigal-Solís, H., & Fonseca-Sánchez, A. (2019). Evaluación de la amenaza de contaminación al agua subterránea y áreas de protección a manantiales en las subcuencas Maravilla-Chiz y Quebrada Honda, Cartago, Costa Rica. *Uniciencia*, 33(2), 76-97. <https://doi.org/10.15359/ru.33-2.6>
- Good, P. (1994). *Permutation Tests: A Practical Guide to Resampling Methods for Testing Hypotheses* (1st ed.). Springer New York, NY. <https://doi.org/10.1007/978-1-4757-2346-5>
- Harris, D. (2007). *Análisis Químico Cuantitativo*. Reverté, S.A.
- Helsel, D. R. (2012). *Statistics for censored environmental data using Minitab and R* (2nd ed.). Wiley.
- Hering, J. G., & Ingold, K. M. (2012). Water management. Water resources management: what should be integrated? *Science*, 336(6086), 1234-1235. <https://doi.org/10.1126/science.1218230>
- Hocking, M. (2006). *Handbook of Chemical Technology and Pollution Control: Dissolved Oxygen* (3th ed.). Academic Press: USA.
- Hoque, S. F., Peters, R., Whitehead, P., Hope, R., & Hossain, M. A. (2021). River pollution and social inequalities in Dhaka, Bangladesh. *Environmental Research Communications*, 3(9). <https://doi.org/10.1088/2515-7620/ac2458>
- Huang, X., Jin, M. G., Ma, B., Liang, X., Cao, M. D., Zhang, J., Zhang, Z. X., & Su, J. W. (2022). Identifying nitrate sources and transformation in groundwater in a large subtropical basin under a framework of groundwater flow systems. *Journal of Hydrology*, 610. <https://doi.org/ARTN 127943>

10.1016/j.jhydrol.2022.127943

- Hund, S. V., Allen, D. M., Morillas, L., & Johnson, M. S. (2018). Groundwater recharge indicator as tool for decision makers to increase socio-hydrological resilience to seasonal drought. *Journal of Hydrology*, 563, 1119-1134. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.05.069>
- Hunter, P. (2003). Drinking water and diarrhoeal disease due to *Escherichia coli*. *Journal Of Water And Health*, 1(2), 65-72. <https://doi.org/10.2166/wh.2003.0008>
- Iqbal, M.Z., E.J. Brown & M.E. Clayton. (2006). Distribution of phosphorus in a biologically restricted lake in Iowa, USA. *J. Hydrol.* 326.
- Jarrín, A.; Salazar, J. G.; Martín, M. (2017). Evaluación Del Riesgo a La Contaminación de Los Acuíferos de La Reserva Biológica de Limoncocha, Amazonía Ecuatoriana. *Rev. Ambient. Agua* 2017, 12.
- Kativhu, T., Mazvimavi, D., Tevera, D., & Nhapi, I. (2018). Implementation of Community Based Management (CBM) in Zimbabwe: The dichotomy of theory and practice and its influence on sustainability of rural water supply systems. *Physics and Chemistry of the Earth*, 106, 73-82. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2018.05.003>
- Keesari, T.; Ramakumar, K. L.; Chidambaram, S.; Pethperumal, S.; Thilagavathi, R. (2016) Understanding the Hydrochemical Behavior of Groundwater and Its Suitability for Drinking and Agricultural Purposes in Pondicherry Area, South India – A Step towards Sustainable Development. *Groundw. Sustain. Dev.* 2–3. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.08.001>.
- Kessasra, F.; Benabes, D.; Seraoui, S.; El Houda Chetibi, N.; Mesbah, M.; Khaled- Khodja, S.; Foughalia, A. (2021). Groundwater Flow and Chloride Transport Modeling of the Alluvial Aquifer of Lower Soummam Valley, Béjaia, North-East of Algeria. *J. African Earth Sci.* 173. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104023>.
- Kim SJ, Si J, Lee JE, Ko G. (2012). Temperature and humidity influences on inactivation kinetics of enteric viruses on surfaces. *Environ. Sci. Tech- nol.* 46. <http://dx.doi.org/10.1021/es3032105>.
- Kotwal G, Cannon JL. (2014). Environmental persistence and transfer of enteric viruses. *Curr. Opin. Virol.* 4. <http://dx.doi.org/10.1016/j.coviro.2013.12.003>
- Kumpel, E., MacLeod, C., Stuart, K., Cock-Esteb, A., Khush, R., & Peletz, R. (2020). From data to decisions: understanding information flows within regulatory water quality monitoring programs. *npj Clean Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-00084-0>
- Lewis, S.L., Maslin, M.A., (2015). Defining the anthropocene. *Nature.* 519.

- Liu, J. T., Gao, Z. J., Wang, M., Li, Y. Z., Shi, M. J., Zhang, H. Y., & Ma, Y. Y. (2019). Hydrochemical characteristics and possible controls in the groundwater of the Yarlung Zangbo River Valley, China. *Environmental Earth Sciences*, 78(3). <https://doi.org/ARTN76>  
10.1007/s12665-019-8101-y
- Liu, L., Zheng, X., Wei, X., Kai, Z., & Xu, Y. (2021). Excessive application of chemical fertilizer and organophosphorus pesticides induced total phosphorus loss from planting causing surface water eutrophication. *Sci Rep*, 11(1), 23015. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-02521-7>
- López, C., Hyne, R., Patra, R., Ramasamy, S., Pablo, F., Julli, M., Keffor, B.J. (2014). Bicarbonate toxicity to *Ceriodaphnia dubia* and the freshwater shrimp *Paratya australiensis* and its influence on zinc toxicity. *Environ. Toxicol. Chem.* 33. <https://doi.org/10.1002/etc.2545>
- López-Esquivel, M., Mena-Rivera, L., Sánchez-Gutiérrez, R., Vega-Guzmán, I., & Swinscoe, T. H. A. (2024). Performance evaluation of a community-based water management organisation using integrated water quality monitoring. *AQUA — Water Infrastructure, Ecosystems and Society*, 73(9), 1917-1929. <https://doi.org/10.2166/aqua.2024.203>
- Lu, S.B., Zhang, X.L., Bao, H.J., Skitmore, M., (2016). Review of social water cycle research in a changing environment. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 63.
- Machado, A., dos Santos, J., Alves, L., & Quindeler, N. (2019). Contributions of Organizational Levels in Community Management Models of Water Supply in Rural Communities: Cases from Brazil and Ecuador. *Water*, 11(3). <https://doi.org/10.3390/w11030537>
- Machado, A. V. M., Oliveira, P. A. D., & Matos, P. G. (2022). Review of Community-Managed Water Supply-Factors Affecting Its Long-Term Sustainability. *Water*, 14(14). <https://doi.org/ARTN2209>  
10.3390/w14142209
- Madrigal-Ballesteros, R., Alpízar, F., & Schlüter, A. (2013). Public perceptions of the performance of community-based drinking water organizations in Costa Rica. *Water Resources and Rural Development*, 1-2, 43-56. <https://doi.org/10.1016/j.wrr.2013.10.001>
- Madrigal-Solís, H., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo-Pérez, I., Fonseca-Sánchez, A., Calderón-Sánchez, H., Quesada-Hernández, L., & Gómez-Cruz, A. (2022). Discriminant model and hydrogeochemical processes for characterizing preferential flow paths in four interconnected volcanic aquifers in Costa Rica. *Hydrogeology Journal*, 30(8), 2315-2340. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02557-7>

- Madrigal, R., Alpizar, F., & Schluter, A. (2011). Determinants of Performance of Community-Based Drinking Water Organizations. *World Development*, 39(9), 1663-1675.  
<https://doi.org/10.1016/j.worlddev.2011.02.011>
- Mander, U., Kull, A., Tamm, V., Kuusemets, V., Karjus, R. (1998) Impact of climatic fluctuations and land use change on runoff and nutrient losses in rural landscape. *Landsc Urban Plan.* 41. [https://doi.org/10.1016/S0169-2046\(98\)00061-9](https://doi.org/10.1016/S0169-2046(98)00061-9).
- Marks, S. J., Clair-Caliot, G., Taing, L., Bamwenda, J. T., Kanyesigye, C., Rwendeire, N. E., Kemerink-Seyoum, J. S., Kansime, F., Batega, D. W., & Ferrero, G. (2020). Water supply and sanitation services in small towns in rural–urban transition zones: The case of Bushenyi-Ishaka Municipality, Uganda. *npj Clean Water*, 3(1).  
<https://doi.org/10.1038/s41545-020-0068-4>
- Mayo, A. L., & Loucks, M. D. (1995). Solute and Isotopic Geochemistry and Ground-Water Flow in the Central Wasatch Range, Utah. *Journal of Hydrology*, 172(1-4), 31-59.  
[https://doi.org/10.1016/0022-1694\(95\)02748-E](https://doi.org/10.1016/0022-1694(95)02748-E)
- Mena-Rivera, L., & Quiros-Vega, J. (2018). Assessment of drinking water suitability in low income rural areas: a case study in Sixaola, Costa Rica. *J Water Health*, 16(3), 403-413.  
<https://doi.org/10.2166/wh.2018.203>
- Mena-Rivera, L., Salgado-Silva, V., Benavides-Benavides, C., Coto-Campos, J., & Swinscoe, T. (2017). Spatial and Seasonal Surface Water Quality Assessment in a Tropical Urban Catchment: Burío River, Costa Rica. *Water*, 9(8). <https://doi.org/10.3390/w9080558>
- Mena-Rivera, L., Vásquez-Bolaños, O., Gómez-Castro, C., Fonseca-Sánchez, A., Rodríguez-Rodríguez, A., & Sánchez-Gutiérrez, R. (2018). Ecosystemic Assessment of Surface Water Quality in the Virilla River: Towards Sanitation Processes in Costa Rica. *Water*, 10(7).  
<https://doi.org/10.3390/w10070845>
- Metcalf & Eddy. (2014). *Wastewater Engineering Treatment and Resource Recovery: Wastewater Characteristics* (5th ed.); McGraw-Hill: USA.
- Meuli, C., & Wehrle, K. (2001). *Spring catchment (1st ed.)*. Niedermann AG; SKAT, Swiss Centre for Development Cooperation in Technology and Management.
- Meybeck, M. (2005). Looking for water quality. *Hydrological Processes*, 19(1), 331-338.  
<https://doi.org/10.1002/hyp.5778>
- Mihelcic, J. R., & Schweitzer, R. W. (2012). Assessing sustainability of community management of rural water systems in the developing world. *Journal of Water, Sanitation and Hygiene for Development*, 2(1), 20-30. <https://doi.org/10.2166/washdev.2012.056>

- Miller, J. N & Miller, J. C. (2000). *Statistics and chemometrics for analytical chemistry* (4th ed.). Prentice Hall.
- MINAET (2012, 14 de junio). Decreto Ejecutivo N°37169-S-MINAET.  
<https://www.aya.go.cr/centroDocumetacion/catalogoGeneral/Reglamento%20de%20Asadas%20-%20Modificación%20Decreto%20No%2035529.pdf>
- Mora-Alvarado, D., Portuguesez-Barquero, C. F., Rivera- Navarro,P. (2023). *Agua para consumo humano y saneamiento en Costa Rica al 2022*.
- Nowicki, S., Bukachi, S. A., Hoque, S. F., Katuva, J., Musyoka, M. M., Sammy, M. M., Mwaniki, M., Omia, D. O., Wambua, F., & Charles, K. J. (2022). Fear, Efficacy, and Environmental Health Risk Reporting: Complex Responses to Water Quality Test Results in Low-Income Communities. *Int J Environ Res Public Health*, 19(1).  
<https://doi.org/10.3390/ijerph19010597>
- Nowicki, S., Koehler, J., & Charles, K. J. (2020). Including water quality monitoring in rural water services: why safe water requires challenging the quantity versus quality dichotomy. *npj Clean Water*, 3(1). <https://doi.org/10.1038/s41545-020-0062-x>
- Oki, T., Kanae, S., (2006). Global hydrological cycles and world water resources. *Sci-Ence*. 313
- Onestini, M. (2011). Water Quality and Health in Poor Urban Areas of Latin America. *International Journal of Water Resources Development*, 27(1), 219-226.  
<https://doi.org/10.1080/07900627.2010.537244>
- Paruch, A. M., & Mæhlum, T. (2012). Specific features of Escherichia coli that distinguish it from coliform and thermotolerant coliform bacteria and define it as the most accurate indicator of faecal contamination in the environment. *Ecological Indicators*, 23, 140-142. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.03.026>
- Patton, H., Krometis, L.-A., & Sarver, E. (2020). Springing for Safe Water: Drinking Water Quality and Source Selection in Central Appalachian Communities. *Water*, 12(3).  
<https://doi.org/10.3390/w12030888>
- PEN. Balance de Armonía con la Naturaleza. (2019). San José, C.R.: Programa Estado de la Nación.
- Piper, A. M. (1944). A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, 25(6).  
<https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>
- Roy, S., Gaillardet, J., & Allègre, C. J. (1999). Geochemistry of dissolved and suspended loads of the Seine river, France: Anthropogenic impact, carbonate and silicate weathering.

- Geochimica et Cosmochimica Acta*, 63(9), 1277-1292. [https://doi.org/Doi 10.1016/S0016-7037\(99\)00099-X](https://doi.org/Doi%2010.1016/S0016-7037(99)00099-X)
- Saha, N.; Rahman, M. S. (2020) Groundwater Hydrogeochemistry and Probabilistic Health Risk Assessment through Exposure to Arsenic-Contaminated Groundwater of Meghna Floodplain, Central-East Bangladesh. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, 206. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111349>.
- Sánchez-Gutiérrez, R., Benavides-Benavides, C., Chaves-Villalobos, M., & Quirós-Vega, J. (2020). Calidad del agua para consumo humano en una comunidad rural: caso Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica. *Revista Tecnología en Marcha*. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4165>
- Sanchez-Gutierrez, R., Mena-Rivera, L., Sanchez-Murillo, R., Fonseca-Sanchez, A., & Madrigal-Solis, H. (2020). Hydrogeochemical baseline in a human-altered landscape of the central Pacific coast of Costa Rica. *Environ Geochem Health*, 42(9), 2685-2701. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00501-5>
- Sanchez-Gutierrez, R., Sanchez-Murillo, R., Esquivel-Hernandez, G., Birkel, C., Boll, J., Rojas-Jimenez, L. D., & Castro-Chacon, L. (2023). Nitrate Legacy in a Tropical and Complex Fractured Volcanic Aquifer System. *Journal of Geophysical Research-Biogeosciences*, 128(8). <https://doi.org/10.1029/2023JG007554>
- Sánchez-Murillo, R., Esquivel-Hernández, G., Corrales-Salazar, J. L., Castro-Chacón, L., Durán-Quesada, A. M., Guerrero-Hernández, M., Delgado, V., Barberena, J., Montenegro-Rayó, K., Calderón, H., Chevez, C., Peña-Paz, T., García-Santos, S., Ortiz-Roque, P., Alvarado-Callejas, Y., Benegas, L., Hernández-Antonio, A., Matamoros-Ortega, M., Ortega, L., & Terzer-Wassmuth, S. (2020). Tracer hydrology of the data-scarce and heterogeneous Central American Isthmus. *Hydrological Processes*. <https://doi.org/10.1002/hyp.13758>
- Şen, Z. Chapter 5. (2015). Groundwater Quality. In *Practical and Applied Hydrogeology*; Şen, Z., Ed.; Elsevier.
- Schouten, T. (2003). *Community Water, Community Management*. Practical Action Publishing Ltd.
- Schoeller, H. (1977). Geochemistry of groundwater. Ch. 15, pp 1–18. In *Groundwater studies—an international guide for re-search and practice*. Paris: UNESCO.
- SCIJ, (10 de agosto 2022). *Reglamento para la calidad de agua potable*. [http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm\\_texto\\_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80047](http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=80047)
- Skowron, P., Skowrońska, M., Bronowicka-Mielniczuk, U., Filipek, T., Igras, J., Kowalczyk-Juško, A., & Krzepiłko, A. (2018). Anthropogenic sources of potassium in surface water: The case

- study of the Bystrzyca river catchment, Poland. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 265, 454-460. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.006>
- Stanley, C., Skrobialowski, V., Scott, V., Mize, D., Demcheck, D. (2004). *Environmental setting, water quality, and ecological indicators of surface-water quality in the Mermentau River Basin, southwestern Louisiana, 1998-2001*. USGS
- Stedman, R., Lee, B., Brasier, K., Weigle, J. L., & Higdon, F. (2009). Cleaning Up Water? Or Building Rural Community? Community Watershed Organizations in Pennsylvania\*. *Rural Sociology*, 74(2), 178-200. <https://doi.org/10.1111/j.1549-0831.2009.tb00388.x>
- Su, C., Zhang, F., Cui, X., Cheng, Z., & Zheng, Z. (2020). Source characterization of nitrate in groundwater using hydrogeochemical and multivariate statistical analysis in the Muling-Xingkai Plain, Northeast China. *Environ Monit Assess*, 192(7), 456. <https://doi.org/10.1007/s10661-020-08347-6>
- Subramani, T., Rajmohan, N., & Elango, L. (2010). Groundwater geochemistry and identification of hydrogeochemical processes in a hard rock region, Southern India. *Environmental Monitoring and Assessment*, 162(1-4), 123-137. <https://doi.org/10.1007/s10661-009-0781-4>
- Tantoh, H. B., & Simatele, D. (2017). Community-based water resource management in North-west Cameroon: the role of potable water supply in community development. *South African Geographical Journal*, 99(2), 166-183. <https://doi.org/10.1080/03736245.2016.1208589>
- Timmerman, J. G., Beinart, E., Termeer, K., & Cofino, W. (2010). Analyzing the data-rich-but-information-poor syndrome in Dutch water management in historical perspective. *Environ Manage*, 45(5), 1231-1242. <https://doi.org/10.1007/s00267-010-9459-5>
- United Nations, 2015. Transforming our world: the 2030 Agenda for sustainable development. A/RES/70/1. New York: United Nations.
- Vásconez, M., Mancheno, A., Álvarez, C., Prehn, C., Cevallos, C., Ortiz, L. (2019). *Cuencas hidrográficas*. (1st ed). Universidad Politécnica Salesiana
- Vaux, H., Vammen, K., Bernex, N., Fabrega, J., Forde, M., Roldan, G., & Torregrosa, M. L. (2020). The Challenges of Managing the Urban Waters of the Americas. *Environment: Science and Policy for Sustainable Development*, 62(2), 14-29. <https://doi.org/10.1080/00139157.2020.1708170>
- Villón, M. (2004). *Hidrología* (1<sup>st</sup> ed.). Editorial Tecnológica de Costa Rica.
- Ward, R. C., Loftis, J. C., & McBride, G. B. (1986). The “data-rich but information-poor” syndrome in water quality monitoring. *Environmental Management*, 10(3), 291-297. <https://doi.org/10.1007/bf01867251>

- Wang, H.; Zhang, Q. (2019). Research Advances in Identifying Sulfate Contamination Sources of Water Environment by Using Stable Isotopes. *Int. J. Environ. Res. Public Health*, 16. <https://doi.org/10.3390/ijerph16111914>.
- WHO, UNICEF, World Bank. *State of the world's drinking water: an urgent call to action to accelerate progress on ensuring safe drinking water for all*. Geneva: World Health Organization; 2022.
- WHO, UNICEF. *Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2020: five years into the SDGs*. Geneva: World Health; 2021.
- Xiao, Y., Hao, Q. C., Zhang, Y. H., Zhu, Y. C., Yin, S. Y., Qin, L. M., & Li, X. H. (2022). Investigating sources, driving forces and potential health risks of nitrate and fluoride in groundwater of a typical alluvial fan plain. *Science of the Total Environment*, 802. <https://doi.org/ARTN 149909>  
10.1016/j.scitotenv.2021.149909

## VII. Anexos

Tabla 2. Resumen de los parámetros de calidad del agua en las viviendas de Concepción de San Ramón, Costa Rica.

Parámetro	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
pH	pH	6,71	5,60	7,66	0,65
Conductividad	$\mu\text{S cm}^{-1}$	151,8	138,0	174,0	9,8
Turbidez	NTU	0,43	0,04	1,57	0,39
SDT	mg/L	147,9	98,0	169,0	16,9
Dureza	mg/L	60,3	53,8	70,2	5,9
	$\text{CaCO}_3$				
Alcalinidad	mg/L	107,3	96,8	122,2	6,93
	$\text{CaCO}_3$				
$\text{Ca}^{2+}$	mg/L	16,84	15,86	19,30	0,83
$\text{Mg}^{2+}$	mg/L	4,90	4,72	5,16	0,13
$\text{Na}^+$	mg/L	5,91	5,34	6,54	0,31
$\text{K}^+$	mg/L	1,26	1,12	1,51	0,11
Bicarbonato	mg/L	66,3	59,0	74,5	4,27
Cloruro	mg/L	2,87	2,21	4,13	0,48
Nitrato	mg/L	8,21	7,04	8,50	0,38
	$\text{NO}_3^-$				
Sulfato	mg/L	6,14	5,85	6,58	0,24
Cu	mg/L	-	-	<0,15	-
Fe	mg/L	-	-	<0,58	-
Mn	mg/L	-	-	<0,24	-
Zn	mg/L	-	-	<0,10	-
Pb	$\mu\text{g/L}$	-	-	<0,14	-
Coliformes totales	MPN/100 mL	-	N.D.	1,9	-
<i>E. coli</i>	MPN/100 mL	-	N.D.	1,9	-

Tabla 3. Resumen de los parámetros de calidad de agua determinados en las nacientes en el Río Cañuela, San Ramón, Costa Rica.

Parámetro	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Temperatura	°C	19,8	19,1	21,4	0,49
pH	pH	6,78	5,89	8,36	0,55
Conductividad	μS/cm	136,4	65,0	169,0	21,7
Turbidez <sup>1</sup>	NTU	0,44	<0,02	5,76	0,99
SDT	mg/L	142,7	104,0	173,0	16,2
Dureza	mg/L	59,3	44,8	71,8	6,9
	CaCO <sub>3</sub>				
Alcalinidad	mg/L	107,8	71,5	150,0	17,0
	CaCO <sub>3</sub>				
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	16,17	12,06	20,10	2,01
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	4,93	2,62	6,07	0,58
Na <sup>+</sup>	mg/L	5,17	3,63	5,68	0,72
K <sup>+</sup>	mg/L	1,18	0,71	2,20	0,48
Li <sup>+</sup>	mg/L	-	-	<0,015	-
Bicarbonato	mg/L	66,61	43,60	91,40	12,75
Cloruro	mg/L	2,30	1,12	3,64	0,56
Nitrato	mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8,22	3,69	14,97	3,34
Sulfato	mg/L	6,22	4,42	8,44	0,69
Cu	mg/L	-	-	<0,15	-
Fe	mg/L	-	-	<0,58	-
Mn	mg/L	-	-	<0,24	-
Zn	mg/L	-	-	<0,10	-
Pb	μg/L	-	-	<0,14	-
Coliformes totales	NMP/100 mL	-	N.D.	1270	-
<i>E. coli</i>	NMP /100 mL	-	N.D.	780	-

<sup>1</sup>Estimado usando el método ROS. MPN: Número más probable N.D.: No detectable.

Tabla 4. Resumen de los parámetros de calidad del agua en el río Cañuela, San Ramón, Costa Rica.

Parámetro	Unidad	Promedio	Mínimo	Máximo	Desviación estándar
Temperatura	°C	18,42	1,40	20,90	4,63
pH	pH	7,52	6,66	7,78	0,38
Conductividad	μS cm <sup>-1</sup>	133,1	83,1	240,6	34,2
Turbidez	NTU	20,06	3,16	61,20	20,01
SDT	mg/L	130,5	86,0	173,0	26,1
OD	mg/L	8,32	7,89	9,28	0,41
DBO <sup>1</sup>	mg/L O <sub>2</sub>	-	<2	31,11	-
Ca <sup>2+</sup>	mg/L	14,21	7,66	22,20	3,42
Mg <sup>2+</sup>	mg/L	5,18	3,32	7,33	0,99
Na <sup>+</sup>	mg/L	4,89	2,80	7,77	1,21
K <sup>+</sup>	mg/L	2,46	1,22	12,52	2,70
Cloruro	mg/L	2,15	1,40	22,20	0,71
Nitrato	mg/L NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5,75	1,38	9,99	2,21
Amonio	mg/L N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	-	<0,07	0,213	-
Sulfato	mg/L	5,69	4,16	7,60	1,03
Fósforo total	mg/L P-PO <sub>4</sub> <sup>3-</sup>	0,52	0,066	6,13	1,50
Cu	mg/L	-	-	<0,15	-
Fe	mg/L	-	-	<0,58	-
Mn	mg/L	-	-	<0,24	-
Zn	mg/L	-	-	<0,10	-
Pb	μg/L	-	-	<0,14	-
Coliformes totales	NMP/100 mL	3551,1	4,4	23050,0	6701,2
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	1626,5	4,4	4880,0	1496,6

<sup>1</sup>Estimación usando el Método de ROS DBO: Demanda bioquímica de oxígeno OD: Oxígeno disuelto. MPN: Número más probable.

Tabla 5. Valores medios (M) y desviación estándar (SD) por nacimiento para el diagrama de Gibbs.

Nacimiento	TDS		Na <sup>+</sup> / (Na <sup>+</sup> + Ca <sup>2+</sup> )		Cl <sup>-</sup> / (Cl <sup>-</sup> + HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	
	M	SD	M	SD	M	SD
S1	124,7	5,9	0,200	0,005	0,097	0,021
S2	117,9	13,8	0,204	0,004	0,094	0,005
S3	112,0	8,1	0,202	0,005	0,081	0,009
S4	152,3	8,6	0,223	0,002	0,064	0,003
S5	155,3	12,1	0,216	0,001	0,061	0,002
S6	156,3	4,8	0,203	0,002	0,041	0,002
S7	148,0	3,6	0,217	0,014	0,041	0,005
S9	142,8	11,5	0,233	0,008	0,060	0,006
S10	146,7	4,7	0,239	0,001	0,061	0,009
S11	149,0	19,3	0,225	0,002	0,042	0,005
S12	148,8	6,1	0,227	0,008	0,053	0,008
S13	146,2	19,2	0,232	0,019	0,055	0,022
S14	145,0	11,7	0,231	0,023	0,037	0,015
S15	150,7	11,5	0,210	0,004	0,052	0,022
S19	144,0	6,2	0,208	0,006	0,043	0,011

Encuesta realizada a los propietario de la fincas cercanas al río



UNIVERSIDAD NACIONAL  
Facultad de Ciencias Exactas y Naturales  
Escuela de Química  
Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico

**Encuesta para identificación de actividades productivas en la microcuenca del río Cañuela, Concepción San Ramón.**

Proyecto de Graduación: “Evaluación de la calidad del agua subterránea y superficial en la microcuenca del río Cañuela en Concepción, San Ramón, Alajuela”  
Estudiante Tesiaria: Marian López Esquivel

**Objetivo de la encuesta:** Determinar las principales actividades productivas en la microcuenca del Río Cañuela. .

Fecha: \_\_\_\_\_  
Nombre de la persona encuestadora: \_\_\_\_\_

*Nota: la información que usted suministre es confidencial y será utilizada únicamente con fines académicos en el desarrollo del trabajo final de graduación de la estudiante de la Escuela de Química Marian López Esquivel.*

**Instrucciones. Marque con una equis (X) la(s) casilla (s) según corresponda o complete el espacio en blanco.**

**I Parte: Información general**

Nombre de la persona encuestada: \_\_\_\_\_  
Cantón: \_\_\_\_\_ Distrito: \_\_\_\_\_

1. En relación a la actividad productiva la persona informante es

- ( ) Persona administradora ( ) Persona encargada  
( ) Persona productora ( ) Otra \_\_\_\_\_

2. Área del terreno (m<sup>2</sup> o hectáreas, manzanas) de la finca \_\_\_\_\_

3. Dentro de la finca existe alguna área protegida (bosque, reforestación, regeneración natural, charral?)

- ( ) Si (pase a la pregunta 4) ( ) No sabe (pase a la pregunta 5)  
( ) No (pase a la pregunta 5)

4. Área de terreno protegida (m<sup>2</sup> o hectáreas, manzanas)

\_\_\_\_\_ ( ) No sabe

5. Hay una vivienda en su actividad productiva?

( ) Si ( ) No (Pase a la pregunta 9)

6. Cuántas personas habitan la vivienda?

\_\_\_\_\_

7. Dónde vierten las aguas grises (ducha, pilas, lavatorios, lavaplatos)?

( ) Descarga directa al río  
( ) Tanque séptico ( ) Suelo  
( ) Otro \_\_\_\_\_ ( ) Caño o asequia

8. Donde vierten las aguas negras?

( ) Descarga directa al río ( ) Suelo  
( ) Tanque séptico ( ) Caño o asequia  
( ) Otro \_\_\_\_\_ ( ) Letrina

9. Ha dejado una distancia con vegetación natural para la protección del río?

( ) Si ( ) No sabe (pase a la preg 11)  
( ) No (pase a la preg 11)

10. Cuántos metros de protección?

\_\_\_\_\_ ( ) No sabe

11. Actividades productivas que realiza (puede marcar varios)

( ) Cultivo ( ) Área protegida.  
( ) Producción de animales (chancheras, polleras, ganado) ( ) Otro \_\_\_\_\_

12. Breve descripción de la actividad.

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_

13.Cuál es la principal actividad productiva?

( ) Agricultura ( ) Ganado Porcino  
( ) Acuicultura (peces) ( ) Manejo y protección de bosque natural  
( ) Avicultura (aves) ( ) Otro \_\_\_\_\_  
( ) Ganado vacuno



24. Han tenido alguna queja producto de esta actividad productiva?

( ) Si  
( ) No

( ) No sabe

II Parte. Actividades productivas en la finca

Agricultura						
25. Tipo de cultivo	26. Área aproximada de cada uno (hectáreas, metros cuadrados, manzanas etc)	27. Insumos agropecuarios para cada tipo de cultivo (agroquímico, químico, abonos, fertilizantes, herbicidas)	28. Para cada tipo de insumo agropecuario o indique: época de aplicación del agroquímico o (época lluviosa- época seca).	29. Para cada tipo de insumo agropecuario o indique: modo de aplicación (seco o diluido)	30. Para cada tipo de insumo agropecuario indique: cantidad aproximada que compra o adquiere por año	
					peso	volumen
Cebolla						
Chile						
Culantro						
Café						
Tomate						
Otro						

31. Meses de mayor productividad (cosecha)

---



---



---

32. Utiliza el agua del río para riego?

- ( ) Si ( ) No sabe  
 ( ) No

33. Utiliza algún insumo orgánico?

- ( ) Fertilizante ( ) Plaguicida  
 ( ) Control de maleza ( ) Fungicida  
 ( ) Insecticida ( ) Ninguno

34. Los residuos agrícolas generados son tratados como?

- ( ) Cobertura vegetal ( ) Otro \_\_\_\_\_  
 ( ) Abono ( ) No se trata  
 ( ) Alimento para animales

35. Si aplica agroquímicos con bomba, utiliza el agua del río para preparar la dilución y lavar los implementos necesarios?

- ( ) Si ( ) No

Producción de animales				
36. Tipo de producción (pollos, gallinas, cerdos, ganado, equinos)	37. Cuántos animales manejan?	38. Requiere de agua del río para mantener su actividad?	39. Para qué utiliza el agua del río en la actividad? Dar de beber, lavado, limpieza en general, otros.	40. La granja de producción es (jaula, piso, pastoreo, semiestabulado, estabulado)
Ejemplo: gallinas	25	no	Beber, lavado	jaula

41. La finca cuenta con (Indicar el área aproximada en el espacio en blanco)

- ( ) Corrales \_\_\_\_\_ ( ) Salas de ordeño \_\_\_\_\_  
 ( ) Gallineros \_\_\_\_\_ ( ) Silos \_\_\_\_\_  
 ( ) Plantas de proceso \_\_\_\_\_ ( ) Tanques de almacenamiento de agua \_\_\_\_\_  
 ( ) Porquerizas \_\_\_\_\_

42. Que productos de limpieza utiliza en sus instalaciones?( Jabón, detergente, cloro, desinfectante, carbolina...)

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Detergente                       | <input type="checkbox"/> Productos naturales (Vinagre, Bicarbonato, limón) |
| <input type="checkbox"/> Desinfectante comercial          | <input type="checkbox"/> Otros _____                                       |
| <input type="checkbox"/> Lejía (Carbolina, cloro, potasa) |  |

43. Cada cuanto tiempo se realiza la limpieza de las instalaciones?

\_\_\_\_\_

44. Las aguas de lavado y residuales se vierten:

- |   |  |
|---|--|
| <input type="checkbox"/> Directamente al río sin tratamiento previo | <input type="checkbox"/> Laguna de sedimentación (sólidos que se depositan por gravedad) |
| <input type="checkbox"/> Directamente al río con tratamiento previo | <input type="checkbox"/> Otros _____   |
| <input type="checkbox"/> Tanque séptico                             |  |
| <input type="checkbox"/> Laguna de oxidación (aireada)              |  |

45. Indique el volumen aproximado de residuos líquidos que vierte su actividad productiva?

\_\_\_\_\_

No sabe

46. El agua para las actividades de la finca provino de...

- |                                       |                                   |
|---------------------------------------|-----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Un acueducto | <input type="checkbox"/> Naciente |
| <input type="checkbox"/> Río          | <input type="checkbox"/> Pozo     |
| <input type="checkbox"/> Otro _____   |                                   |

47. Ha recibido capacitación en

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> Producción agrícola | <input type="checkbox"/> Administración |
| <input type="checkbox"/> Producción pecuaria | <input type="checkbox"/> No recibió     |

48. Ha realizado análisis de laboratorio de

- |                                   |   |
|-----------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> Suelos   | <input type="checkbox"/> Animales                       |
| <input type="checkbox"/> Aguas    | <input type="checkbox"/> Calidad de insumos o productos |
| <input type="checkbox"/> Cultivos | <input type="checkbox"/> No ha realizado                |

III Parte. Manejo de desechos sólidos.

49. Conoce el tipo de residuos sólidos que se generan en la actividad productiva?

- |                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Si | <input type="checkbox"/> No sabe |
| <input type="checkbox"/> No |                                  |

50. Se miden la cantidad de residuos sólidos generados

- |                             |                                  |
|-----------------------------|----------------------------------|
| <input type="checkbox"/> Si | <input type="checkbox"/> No sabe |
| <input type="checkbox"/> No |                                  |

51. Se almacenan los residuos sólidos en la empresa que usted labora?

- Si  No sabe  
 No

52. Se acostumbra a tirar algunos de los residuos sólidos que se generan al río?

- Si  No sabe  
 No  
IV Parte.

53. Conoce el cuerpo de agua (río, quebrada, otro) más cercano?

- Si  No sabe  
 No

54. Realiza la actividad productiva acciones en las riberas del río para su protección?

- Si  
 No

55. Se considera usted parte de la ASADA de su comunidad?

- Si  
 No

MUCHAS GRACIAS POR SU COLABORACIÓN

