

UNIVERSIDAD NACIONAL

Campus Omar Dengo

FACULTAD DE CIENCIAS EXACTAS Y NATURALES

ESCUELA DE QUÍMICA

“CARACTERIZACIÓN FÍSICA, QUÍMICA Y MICROBIOLÓGICA DEL AGUA EN EL ACUÍFERO POÁS PARA EL ESTABLECIMIENTO DE UNA RELACIÓN CON LAS ZONAS DE VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN HIDROGEOLOGICA”

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. Karina Vanessa Hernández Ugalde

Tutor:

Máster Rolando Sánchez Gutiérrez

Asesores:

M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez

Ph.D. Ricardo Sánchez Murillo

Heredia, Costa Rica

Abril, 2022

RESUMEN

El desarrollo urbano y agrícola en la parte alta de la cuenca del río Poás ocasionado en los últimos años aumenta el riesgo a la contaminación de las principales zonas de recarga de este acuífero. Con el fin de asegurar que el abastecimiento brindado a la población es seguro y determinar si existen zonas afectadas por la contaminación, se realizó la evaluación de la calidad del agua en el acuífero Poás.

Se realizaron 3 campañas de muestreo (septiembre del 2020, noviembre del 2020 y febrero del 2021), en las cuáles se determinaron parámetros físicos, químicos y microbiológicos como iones mayoritarios, metales traza, coliformes totales y *E. coli*. Se comprobó que los puntos muestreados cumplen, en la mayoría de los parámetros medidos, con la normativa nacional, a excepción del parámetro de pH, en el cual 2 de los sitios obtuvieron un valor por debajo de 6. Además, se encontró presencia de *E. coli* en 12 de los 18 sitios muestreados y coliformes totales en 14 de estos.

El agua presente en el acuífero Poás fue clasificada como “bicarbonatada cálcica y/o magnésica”, a excepción del punto RP01 el cual fue clasificado como tipo “mixto”, siendo afectado por las altas concentraciones de ion sulfato encontradas. Los puntos muestreados se clasificaron en 3 conglomerados los cuales son explicados principalmente por las características hidrogeoquímicas del acuífero. De las correlaciones obtenidas entre los parámetros analizados, solamente un 30% son significativas, presentando valores altos de correlación los iones mayoritarios, la alcalinidad, la dureza y los sólidos disueltos totales.

La concentración del ion nitrato se encontró por debajo del límite máximo admisible en la normativa nacional, sin embargo, diversos puntos muestreados superaron el valor alerta (25 mg/L), siendo un importante indicador de contaminación, el cual se asocia con la influencia de actividades agrícolas e infiltración de aguas residuales de la zona. Además, debido a la importante contaminación fecal encontrada, se recomienda trabajar en conjunto con los entes administradores del agua de estos sitios para verificar que los procesos de cloración se están realizando de manera correcta y verificar que posean y pongan en práctica planes de seguridad del agua con el fin de identificar y priorizar los peligros y eventuales riesgos que puedan llegar a comprometer la calidad e inocuidad del agua en los sistemas de abastecimiento.

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue realizado gracias al apoyo brindado por el Laboratorio de Hidrología Ambiental en conjunto con el Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico y Grupo de Investigación en Isótopos Estables, los cuales se encargaron de coordinar y brindar el apoyo en las giras de muestreo realizadas, así como de depositar su confianza en mi persona para formar parte del proyecto y poder desarrollar mi trabajo final de graduación.

Agradezco a mi tutor el Máster Rolando Sánchez Gutiérrez por el apoyo brindado durante todo el proceso, demostrando dedicación y disposición ante cualquier duda o consejo requerido para culminar de manera exitosa este trabajo. Además, agradezco a mis asesores M.Sc. Alicia Fonseca Sánchez y Ph.D. Ricardo Sánchez Murillo por ser un apoyo y guía en todo momento.

Agradezco al Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos el cual me permitió realizar los análisis químicos y físicos en sus instalaciones y a mis compañeros de laboratorio los cuales me brindaron todo el apoyo requerido durante las campañas de muestreo; así como al Laboratorio de Microbiología, el cual se encargó de colaborar en la realización de los análisis microbiológicos.

Por último, agradezco a mi familia y amigos por todo el cariño y apoyo brindado durante todos estos años de aprendizaje.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	ii
AGRADECIMIENTOS	iii
TABLA DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE CUADROS	vi
ÍNDICE DE FIGURAS	vi
ÍNDICE DE ANEXOS	viii
LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS	x
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	12
1.1. Antecedentes y justificación	12
1.2. Marco teórico	16
1.2.1. Agua subterránea	16
1.2.1.1. Calidad del agua subterránea	17
1.2.1.2. Parámetros físicos	18
1.2.1.3. Parámetros químicos	20
1.2.1.4. Parámetros microbiológicos	22
1.2.2. Acuíferos	23
1.2.3. Caracterización hidrogeoquímica	24
1.2.3.1. Diagrama de Piper	24
1.2.4. Contaminación hidrogeológica	26
1.2.4.1. Vulnerabilidad a la contaminación	26
CAPÍTULO II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS	28
2.1. Hipótesis	28
2.2. Objetivo general	28
2.3. Objetivos específicos	29
CAPÍTULO III: METODOLOGÍA	30
3.1. Descripción del área de estudio	30
3.2. Selección de puntos y frecuencia de muestreo	31
3.3. Análisis físicos, químicos y microbiológicos	32
3.4. Análisis de resultados	33

3.4.1. Validez de los resultados	33
3.4.2. Normativa nacional y aplicación del IRCACH	33
3.4.3. Caracterización hidrogeoquímica	34
3.4.4. Análisis estadístico descriptivo	34
3.4.5. Análisis estadístico multivariado	35
3.4.6. Análisis espacial	35
CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
4.1 Validez de los resultados	36
4.2 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos	37
4.2.1 Parámetros físicos	37
4.2.2 Parámetros químicos	39
4.2.3 Parámetros microbiológicos	46
4.3 Aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCACH)	47
4.4 Análisis de conglomerados	49
4.5 Clasificación hidrogeoquímica del agua presente en el Acuífero Poás	52
4.5.1 Diagrama de Piper	52
4.5.2 Diagrama de Gibbs	54
4.5.3 Relaciones Iónicas	55
4.6 Análisis de correlaciones	59
4.7 Análisis de Componentes Principales	61
4.8 Relación de los Indicadores de Contaminación Hidrogeológica con las Zonas de Vulnerabilidad	63
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	67
CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
ANEXOS	78

ÍNDICE DE CUADROS

Cuadro 1. Interpretaciones de las subregiones del Diagrama de Piper.	25
Cuadro 2. Resumen de las características físicas, químicas y microbiológicas del acuífero Poás.	37

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero Poás, Alajuela.	14
Figura 2. Interpretación de un Diagrama de Piper.	25
Figura 3. Potenciales amenazas de contaminación del agua subterránea.	26
Figura 4. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo.	31
Figura 5. Distribución espacial de los cationes analizados: sodio, calcio, magnesio y potasio, en mg/L	41
Figura 6. Distribución espacial de los aniones analizados: bicarbonato, sulfato, cloruro y nitrato.	44
Figura 7. Nivel de Riesgo encontrado en los puntos muestreados al aplicar el IRCACH, de acuerdo con la zona y el tipo de muestra obtenida.	49
Figura 8. Dendrograma de las muestras obtenidas del Acuífero Poás mediante análisis de conglomerados jerárquicos: grupo 1 (RP10, RP11, RP12, RP16 y RP18), grupo 2 (RP04, RP14, RP15 y RP19) y grupo 3 (RP01, RP02, RP03, RP05, RP06, RP08, RP13, RP20 y RP21).	50
Figura 9. Mapa del Acuífero Poás dividido por zonas de altitud de la cuenca y distribución de los sitios de muestreo clasificados por tipo de muestra y conglomerado obtenido.	51
Figura 10. Diagrama de Piper de los puntos de muestreo de la zona de estudio clasificados por conglomerados obtenidos.	53
Figura 11. Diagrama de Gibbs de los puntos de muestreo de la zona de estudio clasificados por conglomerados obtenidos	55

- Figura 12. Relaciones iónicas obtenidas para los puntos muestreados del acuífero Poás: a) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- , b) Ca^{2+} vs. HCO_3^- , c) $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ vs $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y d) Cl^- vs $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$. 57
- Figura 13. Relaciones iónicas para los puntos muestreados en el acuífero Poás: a) $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ vs. $\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$ y b) $\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$ vs. $\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$. 59
- Figura 14. Matriz de correlación de Spearman entre los parámetros analizados en la zona de estudio. 60
- Figura 15. Análisis de los componentes principales de los parámetros físicos y químicos del agua en el acuífero Poás. 62
- Figura 16. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo con respecto a las zonas de vulnerabilidad a la contaminación propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA, clasificados de acuerdo con el nivel de riesgo obtenido. 63
- Figura 17. Frecuencia de sitios de muestreo que presentaron niveles de riesgo "alto" y "muy bajo", al aplicar el IRCACH, de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación. 64
- Figura 18. Frecuencia de sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a: a) la concentración de nitrato y b) la concentración de CT, de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación. 65

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Ubicación e información general de los puntos de muestreo.	78
Anexo 2. Parámetros fisicoquímicos analizados en el acuífero Poás	79
Anexo 3. Concentración de los aniones y cationes analizados en el acuífero Poás.	81
Anexo 4. Diagramas de cajas de los parámetros físicos medidos (pH, temperatura, conductividad, potencial oxidación-reducción, turbiedad y sólidos disueltos totales) en el acuífero Poás.	83
Anexo 5. Diagramas de cajas de los parámetros químicos medidos (oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno (PSO) y dureza) en el acuífero Poás.	83
Anexo 6. Diagramas de cajas de los parámetros microbiológicos evaluados: Coliformes Totales y E. Coli en el acuífero Poás.	84
Anexo 7. Parámetros microbiológicos analizados en el acuífero Poás.	84
Anexo 8. Límites de detección y cuantificación de los iones y metales analizados.	86
Anexo 9. Puntaje, nivel de riesgo y calidad del agua obtenidos al aplicar el IRCACH al promedio de los datos obtenidos en los tres muestreos realizados.	87
Anexo 10. Porcentaje de recuperación obtenido para cada uno de los controles de lectura realizados.	88
Anexo 11. Balance iónico obtenido para cada uno de los muestreos realizados.	89
Anexo 12. Relaciones iónicas evaluadas en el Acuífero Poás.	90
Anexo 13. Coeficientes de correlación de Spearman obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados en el acuífero Poás.	92
Anexo 14. Resultados del análisis de componentes principales realizado con base en los datos obtenidos del acuífero Poás.	93
Anexo 15. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que presentaron niveles de riesgo "alto" y "muy bajo" de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.	93
Anexo 16. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a la concentración de nitrato de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.	93

Anexo 17. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a la concentración de coliformes totales de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación. 94

Anexo 18. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo con respecto a las zonas de vulnerabilidad a la contaminación propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA, clasificados de acuerdo con los conglomerados obtenidos. 94

LISTA DE ABREVIACIONES Y SÍMBOLOS

ASADAS	Asociaciones Administradoras de los Sistemas de Acueductos y Alcantarillados Comunes
SENARA	Servicio Nacional de Aguas Subterráneas Riego y Avenamiento
AyA	Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados
RCAP	Reglamento para la Calidad del Agua Potable
IRCACH	Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano
GAM	Gran Área Metropolitana
SETENA	Secretaría Técnica Nacional Ambiental
MAG	Ministerio de Agricultura y Ganadería
VMA	Valor Máximo Admisible
pH	Potencial de Hidrógeno
°C	Grados Celsius
SDT	Sólidos Disueltos Totales
μS/cm	MicroSiemens por centímetro
NMP/100 mL	Número más probable por cada cien mililitros
CT	Coliformes Totales
NTU	Unidades Nefelométricas de Turbidez
ORP	Potencial de Oxidación-Reducción
OD	Oxígeno Disuelto
GOD	Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table
HR	Humedad Relativa

LAMRHI-SIL	Laboratorio de Manejo del Recurso Hídrico y Grupo de Investigación en Isótopos Estables
LASEQ	Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos
LHA	Laboratorio de Hidrología Ambiental

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes y justificación

Las aguas subterráneas constituyen una de las principales fuentes hídricas para el consumo humano ya que contienen un volumen de agua superior en comparación al disponible como agua dulce superficial. A pesar de encontrarse en grandes cantidades, el agua superficial, no siempre tiene la calidad requerida para el consumo, ya sea por causas naturales o como consecuencia de la degradación antrópica.¹ Los acuíferos, al estar protegidos por los perfiles del suelo, cuentan con menor susceptibilidad a la contaminación, por lo que se considera como un suministro de agua económico y confiable para el ser humano.² Sin embargo, sólo unos pocos sistemas hidrogeológicos cuentan con volúmenes, rendimientos, accesibilidad y calidad de agua necesaria para abastecer las necesidades de consumo humano.

En Costa Rica, el abastecimiento de agua para consumo y/o actividades agrícolas e industriales, depende entre un 70% y un 80% de los mantos acuíferos.³ Los efectos del cambio climático y la contaminación de las aguas superficiales producto de actividades humanas como el crecimiento urbano, la agricultura y la ganadería han generado una mayor competencia poblacional por el acceso al agua, lo cual se ve reflejado en un aumento de la dependencia de los mantos acuíferos en los últimos años.³ La Gran Área Metropolitana (GAM), representa un 3% del territorio nacional y alberga un 54% de la población total del país; esta gran densidad poblacional junto con la escasez de planes de ordenamiento territorial, el manejo inadecuado de los desechos y las prácticas agrícolas intensivas, ocasionan una fuerte presión sobre los recursos hídricos,⁴ actualmente un 44% de las zonas con potencial alto de geopotencial hidrogeológica se ubican en esta región y en la parte norte del país, donde se desarrolla al menos un 60% de las actividades productivas nacionales.⁵

Estas importantes presiones generadas en los acuíferos volcánicos del Valle Central se han visto reflejadas en los últimos 20 años con el incremento de las concentraciones de ion nitrato producto de la infiltración de los drenajes de fosas sépticas y de la utilización de fertilizantes nitrogenados en las diversas actividades agrícolas de la zona.⁵ Los procesos de infiltración de las sustancias a través de los suelos y rocas, son relativamente lentos, ocasionando que los contaminantes puedan demorar varios años en alcanzar el nivel freático, por lo cual el incremento en las concentraciones de ion nitrato presentes en los acuíferos, indican

indirectamente, que otras sustancias potencialmente tóxicas para la salud humana pueden estar presentes en las aguas subterráneas de los acuíferos del Valle Central.⁴ Debido a esta problemática, el Laboratorio de Hidrología Ambiental de la Universidad Nacional se ha dedicado en los últimos años a realizar estudios acerca de la hidrogeoquímica de los acuíferos Barva y Colima en el Valle Central, encontrando altas concentraciones de ion nitrato, las cuales han alcanzado en diversas ocasiones la concentración máxima recomendada en la normativa nacional, confirmando de esta forma, la contaminación ocasionada producto de las actividades antropogénicas.⁶ Lo anterior representa un importante precedente para ampliar el monitoreo del ion nitrato y otros contaminantes en los suministros de agua pública de zonas con características similares.

Cerca de los acuíferos Barva y Colima, se encuentra el acuífero Poás ubicado en la parte oeste del Valle Central, el cual junto con los demás acuíferos de la zona está siendo utilizado para abastecer, en mayor o menor escala, a las poblaciones de la GAM.⁴ El cantón de Poás cuenta con 29 199 personas en total, de las cuales un 58% viven en zona urbana y un 42% en zona rural.⁷ La mayoría de esta población consume agua potable del acuífero Poás, suministrada por diversos entes administradores de acueductos, en su mayoría ASADAS, principalmente en los distritos de San Pedro, San Juan, San Rafael y Carrillos. La gran variedad de mantos acuíferos de la zona proporciona una gran disponibilidad del recurso hídrico para toda la población, sin embargo, diversas características han generado fuertes presiones sobre estos sistemas hídricos, aumentando la vulnerabilidad a la contaminación hidrogeológica.⁷ Las favorables condiciones climáticas de la zona promueven el desarrollo agrícola y ganadero, dando origen a fincas productoras de leche, sembradíos de fresas, cultivos de helechos, flores, café y caña en la mayoría del territorio cantonal. Asimismo, el desarrollo residencial ha ido incrementando en los últimos años, posicionando al cantón de Poás como un destino residencial para personas de otras zonas del país, ya que cuenta con las condiciones estructurales y de servicios para atraer nuevos residentes. Anudado a esto, el Parque Nacional Volcán Poás, posiciona al cantón como un punto estratégico para el turismo nacional e internacional, incrementando el desarrollo de proyectos turísticos y de comercio.⁷

Esta tendencia al desarrollo urbano y agrícola de la zona, junto con el limitado conocimiento de la dinámica hidrogeológica, hacen que el acuífero Poás sea una importante zona de

estudio. Además, existe una alta posibilidad de que las zonas de recarga de este acuífero se localicen en la parte alta de la región, donde la agricultura y la urbanización se extienden en mayor medida, aumentando el riesgo a la contaminación.⁸

En el 2003, el Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento (SENARA) en coordinación con la Municipalidad de Poás, el Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), la Secretaría Técnica Nacional Ambiental (SETENA) y otras instituciones, propusieron elaborar mapas de vulnerabilidad a la contaminación, como herramienta para la planificación del uso del territorio para la protección de los recursos hídricos subterráneos con base en la “Matriz de criterios de uso del suelo según la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos para la protección del recurso hídrico”.³

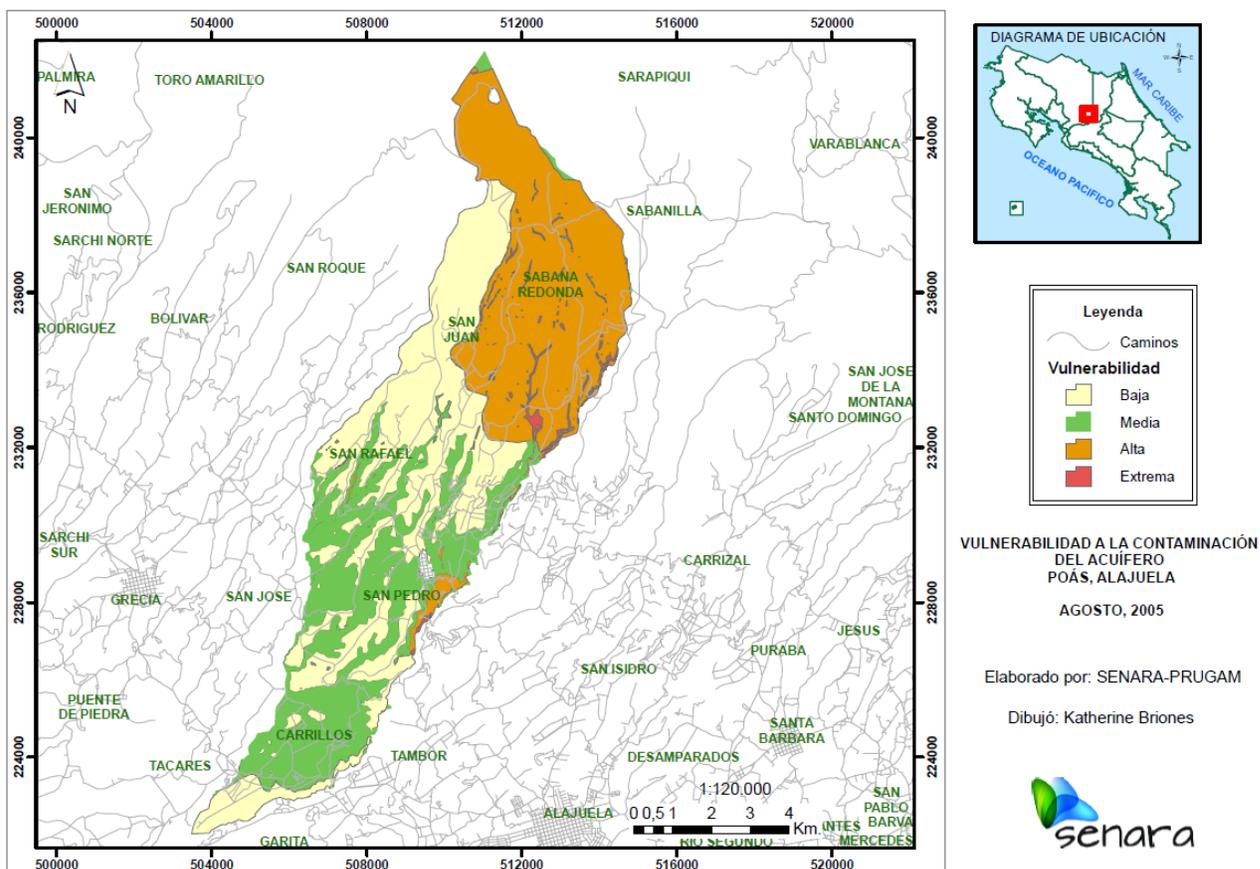


Figura 1. Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Acuífero Poás, Alajuela.

Como se puede observar en la figura 1, el mapa de vulnerabilidad a la contaminación del acuífero Poás presenta principalmente zonas categorizadas con una vulnerabilidad alta y media, principalmente en la parte alta del cantón. Sin embargo, la vulnerabilidad expresada en dichos mapas representa la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante según las características intrínsecas o propias del medio acuífero (según las propiedades naturales del terreno).³ Por esta razón, es de suma importancia complementar, mediante un estudio hidrogeoquímico, si existe correlación de los resultados obtenidos en los análisis físicos, químicos y microbiológicos con las diferentes zonas de vulnerabilidad propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA. Además, debido a los pocos estudios generados y a las importantes presiones ejercidas en el acuífero Poás en los últimos años, resulta importante conocer la calidad del agua subterránea, para asegurar que el abastecimiento brindado a la población de la zona es seguro y determinar si existen zonas afectadas por la contaminación.

1.2. Marco teórico

1.2.1. Agua subterránea

El agua subterránea se define como el agua presente debajo de la superficie terrestre en los poros del suelo y en las fracturas de las formaciones rocosas. Es considerada como un recurso clave en el mundo, ya que constituye el 97% de toda el agua dulce, la cual representa el 0,61% del agua total del planeta.⁹ Sin embargo, el comportamiento real del agua en el subsuelo es algo más complejo ya que se encuentra contenida en cuatro secciones diferentes: en el suelo, en la zona insaturada intermedia debajo del suelo, en la franja capilar y debajo de la capa freática. La región entre el suelo y la capa freática se conoce como zona no saturada, la cual contiene aire y agua, al contrario de la zona saturada, en la que todos los espacios se encuentran llenos de agua. La capa freática es el límite entre las zonas saturadas y no saturadas, y representa la superficie superior del agua subterránea donde la presión hidráulica es igual a la presión atmosférica.¹⁰ Debido a esta interacción agua-suelo, es importante conocer la geología de una región para comprender cómo el agua subterránea interactúa con los diferentes tipos de roca, física y químicamente, debido a que los tipos de roca tienen capacidades distintas para almacenar y transmitir agua, en función de su composición, propiedades de porosidad, permeabilidad y solubilidad.¹¹

En términos de volumen, el agua subterránea es el componente más importante del ciclo hidrológico terrestre, ya que representa casi toda el agua dulce utilizable, excluyendo el agua permanentemente encerrada en casquetes polares y glaciares. Sin embargo, el agua subterránea es el componente con el movimiento más lento en el ciclo hidrológico, con tiempos de residencia que varían desde unos pocos días hasta miles de años.¹⁰ Cuando esta es recargada, puede fluir hacia la superficie de forma natural, siendo descargada a través de manantiales y filtraciones. Gracias a estas descargas y mediante la construcción de pozos de extracción, el agua subterránea puede ser utilizada en el campo agrícola, municipal e industrial.⁹ Esto ha ocasionado que este recurso sea ampliamente utilizado en todo el mundo, hasta el punto de la sobreexplotación generada por la falta de conciencia de la población, la cual, generalmente no cuenta con el conocimiento de las características de los sistemas de agua subterránea.¹⁰

1.2.1.1. Calidad del agua subterránea

La calidad del agua se define como aquellas características físicas, químicas y biológicas necesarias para mantener los usos deseados por el ser humano, así como para conservar la integridad de los ecosistemas y la salud de la población.¹² El agua subterránea es un recurso vital para el suministro económico y seguro de agua potable en el medio urbano y rural, sin embargo, está experimentando una creciente amenaza de contaminación causada por la urbanización, el desarrollo industrial, las actividades agrícolas y mineras, comprometiendo de esta manera su calidad.¹³ Además, la calidad del agua subterránea es influenciada por las características hidrogeoquímicas de la zona, las cuales resultan de las interacciones multifacéticas de la geología, hidrogeología, hidrometeorología y topografía. Por esta razón, los estudios hidrogeoquímicos proporcionan una mejor comprensión de las posibles variaciones en la calidad.¹⁴

Una de las actividades más importantes para la gestión del recurso hídrico es el monitoreo periódico de los cuerpos de agua, ya que esta actividad permite la detección temprana de cambios en la calidad de dicho recurso.¹⁵ Para clasificar las aguas de acuerdo con su calidad, generalmente se utilizan datos de concentración de contaminantes medidos en campo que se comparan contra valores límite establecidos en instrumentos legales, los cuales se definen con base en criterios sobre los posibles usos del agua.¹⁶

En Costa Rica, con el fin de garantizar la inocuidad del agua potable y la salud de la población, se establece en el Decreto N° 38924-S el Reglamento para la Calidad del Agua Potable (RCAP), el cual regula aquellos parámetros físicos, químicos y microbiológicos que puedan representar un riesgo para la salud de la población, así como inconvenientes para la preservación de los sistemas de abastecimiento de agua potable.¹⁷

Por otro lado, el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ha propuesto el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH) con el fin de facilitar la interpretación del RCAP y establecer el posible riesgo para la salud del consumidor. Este índice se basa en la asignación de puntaje (de 1 a 31 puntos) a diversos ámbitos de concentración para los parámetros fisicoquímicos y o densidad de bacterias para los parámetros microbiológicos establecidos en el RCAP que sobrepasen el Valor Máximo

Admisible (VMA). Según el puntaje obtenido se definen cinco niveles de riesgo: Riesgo muy bajo (RMB), Riesgo bajo (RB), Riesgo intermedio (RI), Riesgo alto (RA) y Riesgo muy alto (RMA). Asimismo, cada nivel de riesgo sugiere recomendaciones y acciones a seguir para el mejoramiento de la calidad del agua y su utilización.¹⁸

1.2.1.2. Parámetros físicos

Los parámetros físicos permiten determinar de forma cualitativa el estado y el tipo de agua presente. Estas características pueden asociarse con contaminantes químicos, ya que la presencia de estos en el cuerpo de agua puede ocasionar variaciones significativas en dichos parámetros.¹⁹ Entre los principales parámetros físicos utilizados para evaluar la calidad del agua se encuentran los siguientes:

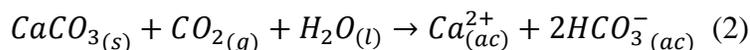
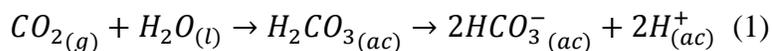
- **Temperatura:** Es una medida del grado de calor de un cuerpo, se expresa en unidades de grado centígrado (°C) y se mide con un termómetro de mercurio o digital.¹⁹ La temperatura repercute en la aceptabilidad de algunos componentes inorgánicos y contaminantes químicos que pueden afectar el sabor, de modo que el agua fría tiene, por lo general, un sabor más agradable que el agua tibia. La temperatura alta del agua promueve la proliferación de microorganismos y, además de los problemas de sabor, también aumenta el olor, el color y la corrosión.²⁰
- **Potencial de hidrógeno (pH):** El pH es una medida del contenido de ion hidrógeno en medio acuoso.¹⁹ El rango de pH natural en agua dulce se extiende desde 4,5 para aguas ácidas hasta más de 10,0 en aguas donde existe una intensa actividad fotosintética por algas. Sin embargo, el rango encontrado más común e idóneo oscila entre 6,5 y 8,0.²¹ Las aguas que poseen bajas cantidades de sólidos disueltos, son más vulnerables a sufrir cambios drásticos de pH inducidos por causas externas, debido a la baja capacidad amortiguadora que poseen.²¹ A pesar de que el pH no suele afectar directamente a los consumidores, representa uno de los parámetros operativos más importantes de la calidad del agua, debido a que un correcto control del pH en todas las fases del tratamiento del agua aseguran una clarificación y desinfección satisfactoria. Además, para que la desinfección con cloro sea eficaz, se recomienda que el pH sea menor que 8; no obstante, si el pH es muy bajo, el agua probablemente será corrosiva.²⁰

- Sólidos disueltos totales (SDT): Es una medida de la cantidad de sólidos presentes después de evaporar la fase acuosa a una temperatura superior a los 100 °C y se determinan por el método gravimétrico. En el agua para consumo humano la mayoría de los SDT consisten en sales, predominando el bicarbonato, cloruro, sulfato, nitrato, sodio, potasio, calcio y magnesio.¹⁹ La palatabilidad del agua con una concentración de SDT menor que 600 mg/L suele considerarse buena, sin embargo, a valores mayores a los 1000 mg/L esta disminuye significativamente. Además, la presencia de altas concentraciones de SDT pueden generar excesivas incrustaciones en tuberías, calentadores, calderas y electrodomésticos.²⁰
- Conductividad: Es la capacidad del agua para conducir una corriente eléctrica, la cual está relacionada con el contenido iónico de la muestra, que a su vez es una función de la concentración de sólidos disueltos ionizables. Además, resulta un indicador invaluable del rango probable en el que se encuentren los valores de dureza y alcalinidad.²¹ Se expresa en unidades de microsiemens por centímetro ($\mu\text{S}/\text{cm}$).¹⁹
- Turbiedad: Define el proceso de medición de la dispersión y absorción de la luz incidente por las partículas.²² Se expresa en unidades nefelométricas de turbiedad (NTU) y se mide en un turbidímetro. Es producida por materias en suspensión como arcilla o materia orgánica e inorgánica finamente divididas, compuestos orgánicos solubles coloreados, plancton y otros microorganismos.¹⁹ No se ha propuesto ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud para la turbiedad, sin embargo, la turbiedad media debe ser menor que 0,1 NTU para que el proceso de desinfección sea eficaz, esto debido a que las partículas pueden proteger a los microorganismos de los efectos de la desinfección, estimulando la proliferación de bacterias.²⁰
- Potencial de oxidación-reducción (ORP): Consiste en una expresión de la tendencia de la reversibilidad del sistema redox a ser oxidado o reducido. Los estudios del pE y el pH son básicos para la comprensión de los sistemas acuosos, ya que reflejan la especiación de diferentes elementos que pueden afectar directa o indirectamente los procesos químicos en el medio ambiente natural. En ambiente acuosos naturales el número de pares redox que contribuyen al ORP es limitado y se relaciona principalmente con $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$, $\text{Mn}^{4+}/\text{Mn}^{2+}$, $\text{SO}_4^{2-}/\text{HS}^-$, $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}_2$, $\text{O}_2/\text{H}_2\text{O}$, CO_2/CH_4 , así como algunas sustancias orgánicas complejas.²³

1.2.1.3. Parámetros químicos

La mayoría de las sustancias químicas presentes en el agua de consumo son potencialmente peligrosas para la salud sólo después de una exposición prolongada, esto debido a que los cambios en la calidad del agua se producen de forma progresiva, a excepción de las sustancias que se vierten o filtran de forma esporádica a corrientes de aguas superficiales o subterráneas, como por ejemplo el nitrato.²⁰ Entre los parámetros químicos más importantes a evaluar se encuentran:

- Oxígeno disuelto (OD): El oxígeno es un oxidante que se encuentra en la atmósfera y su solubilidad en el agua va a depender de la presión atmosférica a una temperatura dada, disminuyendo conforme aumenta la temperatura.¹⁹ El agotamiento del OD puede estimular la reducción por microorganismos del nitrato a nitrito y del sulfato a sulfuro. Además, puede generar un aumento en la concentración de hierro en disolución, provocando un cambio de color del agua al entrar en contacto con el aire.²⁰
- Alcalinidad: Este término se refiere a las concentraciones combinadas de hidróxido, carbonato y bicarbonato presentes en el agua, las cuales determinan la capacidad de esta para aceptar protones. Las concentraciones de estos iones van a depender de factores como el pH, la temperatura y el contenido total de sólidos disueltos.²⁴ El principal ion que le aporta alcalinidad al agua subterránea es el bicarbonato, el cual se forma por la descomposición del ácido carbónico (H_2CO_3) producido por la combinación del dióxido de carbono (CO_2) generado en los procesos biológicos con el agua (ecuación 1). Además, otra razón de la elevada concentración de bicarbonato en aguas de origen profundo es la disolución de minerales de carbonato de calcio (ecuación 2), como la calcita.¹⁹ La formación del ion bicarbonato en aguas naturales se observa en las ecuaciones 1 y 2.



- Dureza total: La dureza es causada por diversos iones metálicos polivalentes disueltos en el agua. Sin embargo, las elevadas concentraciones de los cationes calcio y

magnesio en comparación con los demás iones ocasionan que el concepto de “dureza total”, usualmente sea expresado como la cantidad equivalente de CaCO_3 .²⁵ Por lo general, el agua subterránea es más dura que el agua superficial, ya que en el suelo existen muchas fuentes de calcio, como por ejemplo: la calcita (CaCO_3), dolomita ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$), yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), fluorita (CaF_2), entre otros.¹⁹ En función del pH y la alcalinidad, una dureza del agua mayor a 200 mg/L puede provocar la formación de incrustaciones en calefacciones, sin embargo, las aguas blandas con una dureza menor a 100 mg/L pueden ser aún más corrosivas para las tuberías, debido a su baja capacidad de amortiguación.²⁰

- Aniones: Los aniones como nitrato, sulfato, fosfato, cloruro, fluoruro y cianuro pueden estar presentes en diversas concentraciones en el agua, presentando riesgos tóxicos para los sistemas acuáticos.²⁶ Uno de los principales aniones indicadores de contaminación antrópica es el ion nitrato. De forma natural se encuentra en bajas concentraciones, generalmente entre 5-9 mg/L.²¹ Sin embargo, la mayoría del nitrato encontrado en el agua es de origen antropogénico, proveniente de descargas de residuos y fertilizantes artificiales.²¹ Debido a sus propiedades físicas, no puede percibirse de forma organoléptica, incluso en concentraciones potencialmente peligrosas. El agua subterránea puede mantener disuelto grandes cantidades de ion nitrato debido a que por su naturaleza, no precipita en ninguna forma mineral y son altamente permeables en sedimentos o rocas fracturadas.²⁷ Otro anión indicador de contaminación antrópica es el ion cloruro, el cual posee orígenes por fuentes naturales en menor medida, como la lluvia, y por fuentes antropogénicas como el uso de fertilizantes inorgánicos, lixiviados de vertederos, efluentes de fosas sépticas, alimentos para animales y efluentes tanto industriales como domésticos, sin embargo, el cloruro no representa un peligro para la salud de la población y su consideración principal se relaciona con la palatabilidad,²¹ por lo tanto, el límite permitido de cloruro en el agua potable es de 250 mg/L a 1000 mg/L.²⁶
- Metales: La presencia de metales en el agua está relacionada generalmente con la escorrentía urbana ocasionada principalmente por el uso de automóviles, la producción industrial y la minería, la cual puede contener concentraciones significativas de plomo, zinc, cobre y, en menor medida, cromo, mercurio y níquel.

Además, la corrosión también puede contribuir en la incorporación de materiales metálicos al agua. Sin embargo, es importante señalar que las concentraciones naturales de metales en el agua pueden ser significativas, principalmente en el agua subterránea, la cual en muchos casos puede llegar a exceder de manera natural las concentraciones recomendadas,²⁴ representando una amenaza importante para la salud pública.²⁴ Por otro lado, ciertos metales como el Fe, Cu, Mn y Zn son esenciales para los organismos en muy bajas concentraciones, mientras que otros como As, Al, Cr, Pb y Ni son tóxicos y causan detrimento ambiental de los cuerpos de agua.²⁸

1.2.1.4. Parámetros microbiológicos

Uno de los principales problemas del agua subterránea se asocia con la contaminación microbiológica local que surge de la entrada de materia fecal en las aguas provenientes principalmente de efluentes de fosas sépticas, desechos orgánicos agrícolas y vertederos. El suelo juega un papel muy importante en la protección de las aguas subterráneas, ya que los gusanos y otros organismos son capaces de eliminar bacterias y virus por medio de la ingestión, además de las características de absorción y filtración del suelo que evitan que estos microorganismos lleguen al agua subterránea en zonas naturalmente protegidas.²¹ Los principales indicadores para la evaluación de la calidad microbiológica del agua son los coliformes fecales y la bacteria *Escherichia coli*. Los coliformes fecales se definen como un subgrupo de bacterias entéricas, que fermentan la lactosa a altas temperaturas de incubación (44,5 °C), por lo que se consideran termotolerantes. Entre estas se encuentran *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Citrobacter freundii* y *Enterobacter sp.*¹⁹ Si las fuentes de agua son tratadas inadecuadamente, estos patógenos pueden ingresar al sistema de distribución de agua potable. Esta intrusión de aguas no tratadas en las tuberías de agua puede ocurrir debido a periodos de presión negativas o por conexiones cruzadas con otras tuberías de agua no potable. La desinfección es una técnica utilizada para contrarrestar este problema de contaminación en el tratamiento público del agua, la cual permite eliminar o inactivar microorganismos patógenos, siendo importante tomar en cuenta que la presencia de un desinfectante residual en el sistema de distribución es fundamental para mantener un suministro de agua potable y seguro.²⁹

1.2.2. Acuíferos

Los acuíferos son el resultado de una larga y compleja historia de desarrollo geológico, lo que les confiere una alta heterogeneidad respecto a sus propiedades características como la permeabilidad, la porosidad y la composición mineral del material acuífero. Definir cada una de estas características es de suma importancia para conocer la composición química del agua subterránea y el comportamiento absorbente de los solutos, así como para delimitar correctamente las zonas de protección.³⁰ Estas formaciones geológicas cuentan con espacios conocidos como poros, los cuales se encuentran saturados y permiten un fácil movimiento del agua subterránea. Aquellos acuíferos que están formados por materiales a través de los cuales el agua puede pasar fácilmente se conocen como permeables, y aquellos por los que el agua es transportada con dificultad se denominan como semipermeables. Estos materiales que forman los acuíferos se clasifican en función de su potencial para soportar y transmitir agua en cuatro grandes grupos: (I) materiales no consolidados o sedimentos clásticos; (II) rocas sedimentarias porosas, (III) rocas volcánicas porosas; y (IV) rocas fracturadas.¹⁰ De acuerdo con la permeabilidad del material que los rodean, los acuíferos se pueden clasificar como no confinados, semiconfinados y confinados. Un acuífero no confinado o libre contiene como límite superior una superficie freática que fluctúa en respuesta a la recarga y a la descarga del agua, debido a que cuenta con capas continuas de materiales de alta permeabilidad intrínseca y que se extienden desde la superficie terrestre hasta la base del acuífero. Por el contrario, un acuífero confinado se genera a mayores profundidades, cuando se encuentra entre dos capas impermeables. Si la capa suprayacente cuenta con una baja permeabilidad, retardando el movimiento del agua, se conoce como acuitardo el cual, a pesar de no poder suministrar agua libremente a los pozos, puede transmitir una cantidad apreciable de agua hacia y desde los acuíferos adyacentes, particularmente en condiciones de estrés hidráulico. Si el acuitardo es suficientemente grueso y cuenta con el material adecuado, como arcilla arenosa, puede llegar a constituir un importante almacenamiento de agua subterránea. Por lo tanto, aquel acuífero “confinado” que se encuentre debajo de un acuitardo, se convierte en un acuífero semiconfinado, ocasionando un movimiento del agua horizontal dentro del acuífero y vertical a través del acuitardo o capa semipermeable.¹⁰

1.2.3. Caracterización hidrogeoquímica

La composición química de las aguas subterráneas depende de diversos factores como la composición de la precipitación de la zona, la mineralogía de la cuenca y los acuíferos, el clima y la topografía, lo que genera que existan diversos tipos de agua, los cuales pueden variar de manera espacial y temporal.³¹ Un método para delinear las rutas de flujo en los acuíferos es el uso de iones comúnmente presentes en las aguas subterráneas como trazadores naturales,³¹ siendo determinada a través de la medición de cationes como calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), potasio (K^+) y aniones como bicarbonato (HCO_3^-), sulfato (SO_4^{2-}), cloruro (Cl^-) y nitrato (NO_3^-).³² A partir de estas mediciones se dividen las muestras en grupos con características químicas similares que, posteriormente pueden correlacionarse con la ubicación, proporcionando información sobre la heterogeneidad y conectividad de los acuíferos, así como de los procesos físicos y químicos que controlan la química del agua, resultando en un esquema de clasificación robusto para la caracterización exitosa de los sistemas hidrogeológicos.³¹ De esta manera, los procesos hidrogeoquímicos ayudan a comprender la distribución y el origen del agua subterránea, la interacción agua-roca, las mezclas e interconexiones de agua de diferentes orígenes, los fenómenos de intrusión salina y las influencias antropogénicas sobre la calidad del agua subterránea.³²

1.2.3.1. Diagrama de Piper

La mayoría de los métodos gráficos utilizados en la caracterización hidrogeoquímica se diseñaron con el fin de representar simultáneamente la concentración total de sólidos disueltos y las proporciones relativas de ciertas especies iónicas principales. Se caracterizan por utilizar un número limitado de parámetros en comparación con otros métodos estadísticos que pueden utilizar todos los parámetros disponibles.³¹ El diagrama de Piper es la forma gráfica más utilizada, y consiste en una variante del diagrama ternario que utiliza un área de campo en forma de diamante para la proyección de triángulos catiónicos y aniónicos en un área común en el estudio de la hidrogeología. Un triángulo puede contener como máximo tres variables, ya que tiene tres ejes y, por lo tanto, es posible la asociación total de seis variables diferentes. Al trazar tres ejes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) expresados como porcentajes de cationes totales en meq/L, se obtiene un solo punto en el triángulo de cationes. En el otro triángulo se trazan los aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) de la misma manera. Estos dos

puntos, en cada uno dentro de los triángulos, se proyectan en un área central en forma de diamante.³³ En la figura 2 se observa que cada triángulo se divide en cuatro subregiones que definen la dominancia de los cationes y aniones, las cuales se especifican en el cuadro 1.

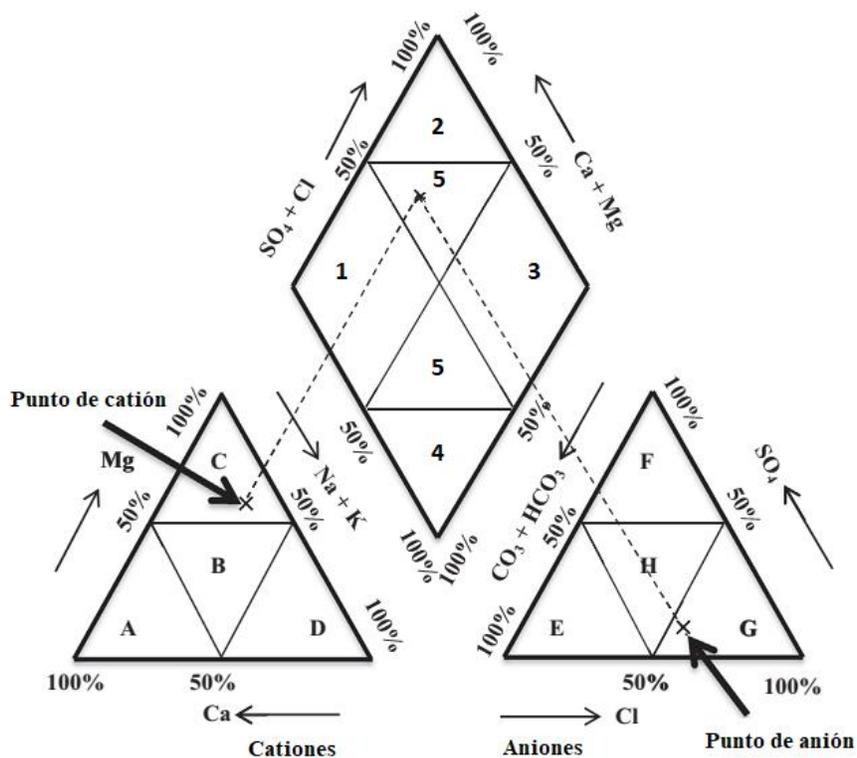


Figura 2. Interpretación de un Diagrama de Piper.³³

Cuadro 1. Interpretaciones de las subregiones del Diagrama de Piper.³³

Triángulos equiláteros		Diamante
Cationes	A: Tipo cálcico	1: Tipo bicarbonatada cálcica y/o magnésica
	B: Tipo no dominante	2: Tipo clorurada y/o sulfatada cálcica y/o magnésica
	C: Tipo magnésico	3: Tipo clorurada y/o sulfatada sódica
	D: Tipo sódico	4: Tipo bicarbonatada sódica
Aniones	E: Tipo bicarbonatado	5: Tipo mixto
	F: Tipo sulfatado	
	G: Tipo clorurado	
	H: Tipo no dominante	

Después de determinar la dominancia, los puntos de catión y anión en los triángulos base se transfieren al campo en forma de diamante, donde las imágenes proyectadas de los respectivos cationes y aniones se cruzan entre sí (figura 2). A su vez, este campo en forma de diamante se divide en cuatro subregiones más pequeñas, en la cual cada una corresponde

a una clasificación diferente de agua subterránea que permite evaluar la calidad general del agua subterránea y el proceso hidrogeoquímico adyacente.³³

1.2.4. Contaminación hidrogeológica

Los lixiviados generados por las actividades urbanas, industriales, agrícolas o mineras producen una gran carga de contaminantes sobre el subsuelo, los cuales, al no ser tratados correctamente, exceden la capacidad natural de atenuación del subsuelo y estratos suprayacentes. A pesar de que los perfiles naturales del subsuelo atenúan muchos contaminantes en forma activa, no todos son igualmente eficaces y el grado de atenuación va a variar según el tipo de contaminante y el proceso de contaminación que ocurra en un ambiente determinado, ocasionando que los acuíferos sean particularmente vulnerables a la contaminación, principalmente los acuíferos no confinados y los semiconfinados que cuentan con capas acuitardas relativamente delgadas y freáticas.¹³ En la figura 3 se ejemplifican los procesos comunes de contaminación del agua subterránea.

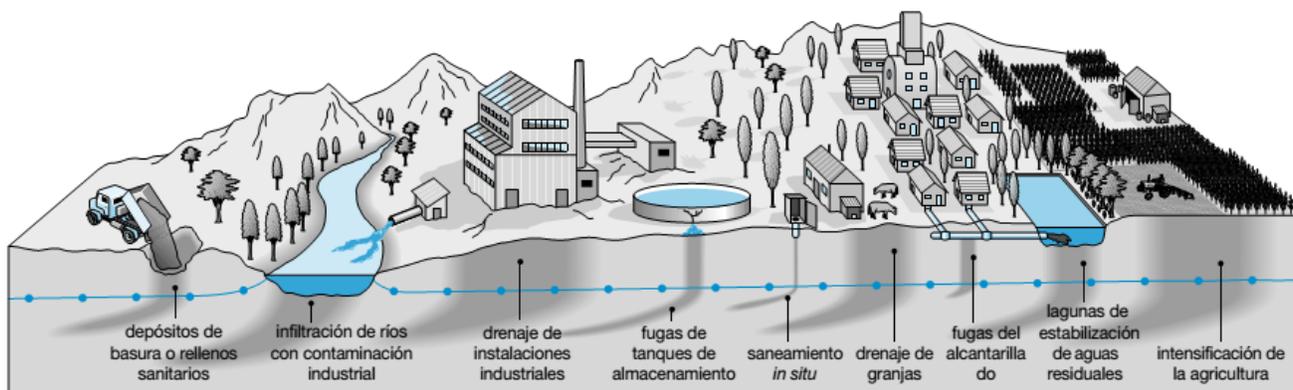


Figura 3. Potenciales amenazas de contaminación del agua subterránea.¹³

1.2.4.1. Vulnerabilidad a la contaminación

La vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero se define como aquellas características intrínsecas de los estratos que separan la zona saturada del acuífero de la superficie del terreno, lo cual determina la sensibilidad de un acuífero a ser afectado en forma adversa por una carga contaminante. De esta manera, la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero es función de la accesibilidad de la zona saturada del acuífero a la penetración de

contaminantes en un sentido hidráulico y de la capacidad de atenuación de los estratos suprayacentes a la zona saturada resultantes de la retención de los contaminantes.¹³

Existen diversas metodologías que permiten determinar la vulnerabilidad intrínseca, como, por ejemplo: GOD, Drastic, Epik, etc. La metodología Drastic es una de las herramientas más utilizadas para evaluar la vulnerabilidad intrínseca debido a su fácil aplicación, basándose en siete parámetros (profundidad del acuífero, recarga neta, medio acuífero, medio del suelo, topografía, impacto de la zona vadosa y conductividad hidráulica) a los cuáles se les asigna un rango y un peso específico con el fin de calcular el índice DRASTIC; entre mayor sea el valor obtenido, mayor es la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero.³⁴ Por otro lado, el método Epik es un método empleado exclusivamente para acuíferos kársticos, el cual toma en consideración cuatro características principales de este tipo de sistema hidrológico como el epikarst, la cobertura protectora, las condiciones de infiltración y el desarrollo de la red kárstica.³⁵ Este tipo de metodología está desarrollada para entornos kársticos en contextos climáticos e hidrogeológicos europeos, por lo cual, utilizarlo en regiones con diferentes condiciones climatológicas, puede generar distorsiones cartográficas importantes.³⁶ Por su parte, el método GOD es el más utilizado en Costa Rica debido a su facilidad de aplicación y a los tipos de datos requeridos.³ El método GOD (por sus iniciales en inglés: Groundwater hydraulic confinement, Overlaying strata, Depth to groundwater table) caracteriza la vulnerabilidad a la contaminación de acuíferos en función de los siguientes parámetros: grado de confinamiento hidráulico del acuífero en consideración, ocurrencia del sustrato suprayacente en términos de características litológicas y grado de consolidación para determinar su capacidad de atenuación de contaminantes y la profundidad al nivel del agua en acuíferos no confinados o la profundidad al techo de acuíferos confinados.¹³

CAPÍTULO II. HIPÓTESIS Y OBJETIVOS

2.1. Hipótesis

Las características hidrogeoquímicas del agua en el acuífero Poás difieren en función de la localización geográfica, siendo posible relacionar los indicadores de contaminación hidrogeológica con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación delimitadas en estudios anteriores.

2.2. Objetivo general

Evaluar la calidad del agua en el acuífero Poás, mediante parámetros físicos, químicos y microbiológicos con el fin de establecer una línea base en relación con la vulnerabilidad de contaminación hidrogeológica en el acuífero.

2.3. Objetivos específicos

Objetivo	Actividades
<p>1. Determinar la calidad del agua del acuífero Poás mediante indicadores físicos, químicos y microbiológicos para establecer el posible riesgo para la salud del consumidor.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Exploración de la zona para la identificación de las principales fuentes de abastecimiento para el consumo humano. 2. Realización de giras de muestreo 3. Ejecución de análisis físicos, químicos y microbiológicos de las muestras tomadas 4. Sistematización de los resultados obtenidos 5. Comparación de los resultados contra los valores establecidos en el Decreto N° 38924-S 6. Aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH)
<p>2. Realizar la caracterización hidrogeoquímica del agua presente en el acuífero Poás mediante la aplicación de relaciones e índices iónicas.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Cálculo de relaciones e índices entre los distintos parámetros analizados 2. Ejecución de los análisis de estadística descriptiva e inferencial para los parámetros analizados 3. Ejecución de análisis de estadística multivariada para los parámetros analizados 4. Elaboración de un diagrama de Piper 5. Elaboración de un diagrama de Gibbs
<p>3. Relacionar estadística y espacialmente las características del agua presente en el acuífero Poás con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.</p>	<ol style="list-style-type: none"> 1. Elaboración de mapas de distribución espacial de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de interés 2. Interpretación geoespacial del comportamiento de los principales constituyentes del agua en el acuífero Poás 3. Ejecución de pruebas estadísticas para determinar si existe relación entre los aumentos de concentración de indicadores de contaminación hidrogeológica con las zonas de vulnerabilidad

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Descripción del área de estudio

La cuenca del río Poás se extiende de noreste a suroeste y tiene una extensión territorial de aproximadamente 217,5 km² delimitada por la divisoria de aguas desde la laguna del Volcán Poás y la laguna del Volcán Barva hasta la confluencia del río Poás con el río Grande.³⁷ El cantón de Poás se localiza entre las coordenadas geográficas de 10° 06' 27" latitud Norte y 84° 14' 59" longitud Oeste. Según el Plan Cantonal de Desarrollo Humano Local de Poás 2016-2025, Poás cuenta con 29 199 personas en total, distribuidas en 5 distritos: San Pedro, San Juan, San Rafael, Carrillos y Sabana Redonda.⁷

Esta ubicación geográfica particular genera dos zonas con evidentes contrastes en sus condiciones climatológicas: i) la parte de mayor altitud, comprendida en las cercanías del Volcán Poás; y ii) la parte baja, en las confluencias de los ríos Prendas y Poás. La parte alta cuenta con un clima templado con promedios anuales entre los 15°C y 18°C, con presencia constante de nubosidad y una humedad relativa (HR) alta la cual alcanza un 95% en la época lluviosa y en general promedia el 90% como condición normal. No existe una época seca definida, por el contrario, las condiciones de precipitación durante todo el año en combinación con las bajas temperaturas provocan un ambiente húmedo a muy húmedo durante todos los meses. Por otra parte, en la parte baja de la zona de estudio se presenta una época seca y una época lluviosa bien marcadas y de condiciones extremas entre uno y otro período. La humedad relativa en esta zona promedia aproximadamente un 85% en la época lluviosa, en tanto que en la época más seca pueden registrarse valores de hasta 65%. Las temperaturas varían entre los 19°C y 23° C, con máximas de 24°C a 28°C. Estas condiciones climáticas favorables representan un factor que promueve las actividades agrícolas y ganaderas en la zona, por lo que se pueden encontrar fincas productoras de leche, sembradíos de fresas, cultivos de helechos y flores en las zonas altas y hasta el cultivo de café y caña de azúcar en la mayoría del territorio cantonal.⁷

El acuífero Poás está formado por depósitos cuaternarios del macizo volcánico Poás que han generado una serie de acuíferos colgados superiores que siguen groseramente la estratificación de los materiales volcánicos, y a mayor profundidad se localizan horizontes

lávicos que constituyen acuíferos semiconfinados y confinados, con una dirección de flujo de noreste a suroeste. La profundidad de los pozos que captan este acuífero es variable debido a la heterogeneidad presente, oscilando entre 24 y 170 metros ⁸

3.2. Selección de puntos y frecuencia de muestreo

Se realizaron 3 campañas de muestreo, una en época lluviosa (setiembre 2020), una en transición de seca a lluviosa (noviembre 2020) y una en época seca (febrero 2021). Para la selección de los puntos de muestreo se tomaron en consideración tanto la presencia de nacientes, las cuales en su mayoría son administradas por las ASADAS de la zona para el abastecimiento de agua potable, como pozos perforados inscritos en SENARA.

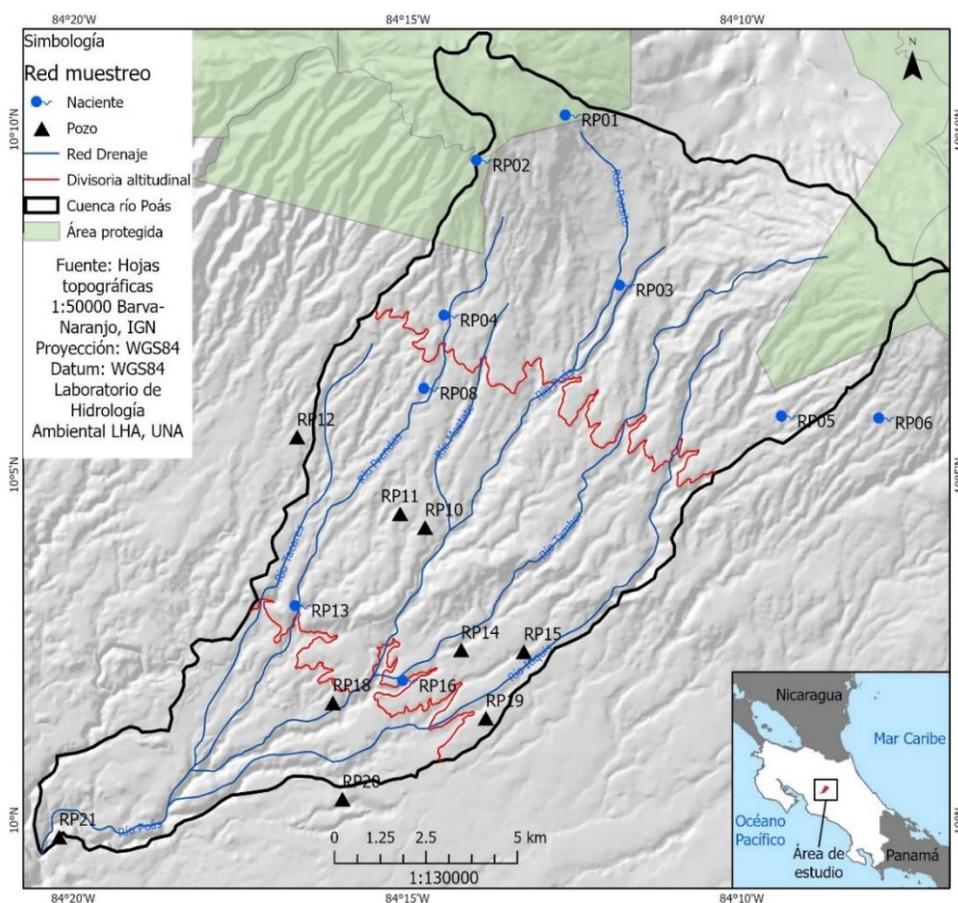


Figura 4. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo.

Como se puede observar en la figura 4, se seleccionaron 18 puntos de muestreo de manera aleatoria, distribuidos en la parte alta, media y baja de la cuenca. Primeramente, se realizaron giras de reconocimiento para identificar los principales puntos de abastecimiento, conocer la

accesibilidad a los mismos y obtener la georreferenciación de cada punto utilizando un GPS marca Garmin, modelo GPSMAP 64s, así como para solicitar los permisos para la toma de agua con el ente o la persona encargada. En el anexo 1 se detallan las coordenadas geográficas y otras características importantes de cada uno de los puntos de muestreo. En la parte alta de la cuenca se seleccionaron seis nacientes (RP01, RP02, RP04, RP05 y RP06), en la parte media se seleccionaron dos nacientes (RP08 y RP13) y seis pozos (RP10, RP11, RP12, RP14, RP15 y RP19) y de la parte baja se tomaron en consideración una naciente (RP16) y tres pozos (RP18, RP20 y RP21).

3.3. Análisis físicos, químicos y microbiológicos

Los análisis físicos y químicos como pH, temperatura, conductividad, turbiedad, oxígeno disuelto y ORP se realizaron in situ utilizando electrodos de campo y tomando como referencia los métodos del Standard Methods for Examination of Water and Wastewater 4500 H+B, 2550 B, 2510 B, 2130 B, 4500-0 G, 2580 B, respectivamente. Para los demás análisis químicos se recolectaron las muestras correspondientes en botellas de polietileno y se almacenaron bajo refrigeración a una temperatura menor o igual a los 6°C, las cuales fueron analizadas según el tiempo establecido en el método 1060 C.³⁸ Entre los análisis realizados se encuentran SDT, alcalinidad, dureza total, aniones (F^- , Cl^- , Br^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-}), metales mayoritarios (Ca, K, Na, Mg), metales minoritarios (Fe, Cu, Mn, Zn) y metales traza (As, Pb, Cd, Ni). Dichos análisis se basaron en los métodos 2540 C, 2320 B, 2340 C, 4110, 3111 B, 3113 B, respectivamente.³⁸ El análisis de coliformes totales (CT) y *E.coli* se realizó utilizando la técnica de fermentación en tubos múltiples con medio Fluorocult® a doble concentración e incubados 24-48h a 37°C de acuerdo con lo descrito por la OMS,³⁹ mientras que la determinación de la población microbiana se realizó utilizando la tabla 9221 II y 9221 IV del Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. Los análisis de SDT, alcalinidad, dureza total, metales minoritarios y metales traza fueron realizados en el Laboratorio de Análisis y Servicios Químicos (LASEQ) de la Escuela de Química, mientras que los análisis de cationes y aniones fueron realizados en el Laboratorio de Hidrología Ambiental (LHA) y los análisis de CT y *E. coli* fueron realizados por el Laboratorio de Microbiología, ambos pertenecientes a la Escuela de Ciencias Biológicas.

3.4. Análisis de resultados

3.4.1. Validez de los resultados

Para validar los resultados obtenidos y garantizar la integridad de las muestras a lo largo de los procesos de recolección, transporte y análisis se aplicaron procedimientos de control de calidad. Se realizaron muestras blanco de reactivos, las cuales fueron analizadas junto con las muestras de campo para evaluar la presencia o ausencia de contaminación de los instrumentos y de los reactivos. Además, se utilizaron disoluciones tampón estándar de pH 4 y 7 marca Hanna Instruments y patrones de conductividad de 1413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para calibrar y de 84 $\mu\text{S}/\text{cm}$ para verificar los electrodos por utilizar, así como materiales de referencia de 1000 mg/L de concentración para cada uno de los iones y metales analizados para la preparación de muestras control. En las muestras control se agrega una cantidad conocida de un material de referencia, con el fin de determinar el porcentaje de recuperación e identificar anomalías en el análisis realizado. Otro método utilizado para verificar la calidad de los análisis químicos realizados fue el cálculo del balance iónico, siendo su objetivo principal detectar errores sistemáticos o aleatorios en el análisis de las especies principales.⁴⁰ La sumatoria de componentes iónicos en términos de equivalentes se realiza como se muestra en la ecuación 1.⁴⁰

$$\text{Balance iónico} = \frac{(Na^+ + Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+}) - (HCO_3^- + Cl^- + SO_4^{2-} + NO_3^-)}{(Na^+ + Ca^{2+} + K^+ + Mg^{2+} + HCO_3^- + Cl^- + SO_4^{2-} + NO_3^-)} \times 100 \quad \text{Ecuación 1}$$

En la práctica, pueden existir diferencias entre ambas cifras debido a los errores acumulados en cada una de las determinaciones individuales y a las contribuciones iónicas menores que no se toman en cuenta. Por ende, el porcentaje de error admisible depende del valor de la conductividad eléctrica, el cual es mayor conforme disminuye la concentración de iones. Para valores menores a 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ el porcentaje de error admisible es de $\pm 30\%$, para valores entre los 50 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y los 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es de $\pm 10\%$, para valores entre 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es de $\pm 8\%$ y para valores mayores entre 500 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ es de $\pm 4\%$.⁴¹

3.4.2. Normativa nacional y aplicación del IRCACH

Obtenidos los resultados de los análisis fisicoquímicos y microbiológicos se realizó un análisis del cumplimiento regulatorio, por medio de la comparación de los resultados obtenidos con los valores establecidos en el Decreto N° 38924-S “Reglamento para la

Calidad del Agua Potable".¹⁷ Además, se aplicó el Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano en Costa Rica (IRCACH)¹⁸ propuesto por el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA), asignando un puntaje de riesgo a cada parámetro que sobrepasó el valor máximo admisible presente en los niveles 1, 2 y 3 del Reglamento para la Calidad del Agua Potable, utilizando como valor de comparación el promedio obtenido por punto de muestreo para cada parámetro evaluado. De acuerdo con el puntaje total obtenido, el riesgo se clasificó como muy bajo (RMB), bajo (RB), intermedio (RI), alto (RA) y muy alto (RMA).¹⁸

3.4.3. Caracterización hidrogeoquímica

Se obtuvieron relaciones entre los cationes (Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$) y los aniones (SO_4^{2-} , Cl^- , $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$) por medio de la elaboración de un Diagrama de Piper con el fin de determinar la clasificación hidrogeoquímica del agua presente en el acuífero Poás.⁴² Además, para identificar el mecanismo controlador de la química en el agua, se realizaron además diagramas de Gibbs, en los cuales se grafican las variaciones de las relaciones $(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+})$ para los cationes y $\text{Cl}^- / (\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ para los aniones en función del total de SDT.⁴³

Por otro lado, se calcularon las relaciones $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- , Ca^{2+} vs. HCO_3^- , $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ vs $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y Cl^- vs $(\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+})$ con el fin de evaluar los procesos de disolución de los principales minerales que influyen en las características hidrogeoquímicas del agua presente en el acuífero. Además, para explicar el comportamiento de iones indicadores de contaminación hidrogeológica, se obtuvieron las relaciones iónicas $\text{Cl}^- / \text{Na}^+$ vs. $\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$ y $\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$ vs. $\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$.

3.4.4. Análisis estadístico descriptivo

Se realizó un análisis estadístico descriptivo e inferencial de los datos obtenidos, incluyendo medidas de tendencia central y descriptivas como mediana, media, varianza, desviación estándar y rango intercuantílico.⁴⁴ Asimismo, se ejecutaron pruebas estadísticas, por medio de tablas de contingencia, para determinar si existe relación entre los aumentos de concentración de indicadores de contaminación hidrogeológica con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.⁴⁵

3.4.5. Análisis estadístico multivariado

Se incluyó un análisis estadístico multivariado con el fin de comprender la relación entre las variables medidas y facilitar su comparación y clasificación. Este tipo de análisis estadístico ayudó a responder la hipótesis referida a la variabilidad multidimensional de las unidades de estudio y sus causas de variación.⁴⁶ Existen diferentes herramientas que se pueden utilizar para realizar un análisis estadístico multivariado; entre las cuales destacan el análisis de conglomerados (AC) y el análisis de componentes principales (ACP).

Primeramente se realizó el AC con el fin clasificar los sitios de muestreo en grupos de acuerdo con las similitudes entre los parámetros físicos, químicos y microbiológicos medidos.³² Esta agrupación estadística obtenida permitió determinar si las características fisicoquímicas de los sitios de muestreo poseen una relación hidrogeoquímica y/o espacial.

Posteriormente, se utilizó la técnica de correlación no-paramétrica Spearman-rho, con el fin de determinar el grado de asociación, ya sea positiva o negativa entre las variables bajo estudio.⁴⁷ Una vez obtenido el grado de asociación se realizó el ACP, omitiendo aquellas variables que describen el mismo proceso o que están altamente correlacionadas, con el fin de permitir que las variables de mayor relevancia sean las que expliquen la variación del conjunto de datos en términos de pocas componentes, y de esta manera, asociar los clusters obtenidos en el AC con los parámetros que explican la variabilidad del conjunto de datos.

El análisis estadístico multivariado, así como el análisis gráfico, estadístico descriptivo e inferencial se realizó utilizando el lenguaje R.

3.4.6. Análisis espacial

Se elaboraron mapas de distribución espacial de parámetros físicos, químicos y microbiológicos de interés, utilizando el software ArcGIS MAP 10.3 con el fin de facilitar la interpretación geoespacial del comportamiento de los principales constituyentes del agua en el acuífero Poás.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Validez de los resultados

Con el fin de validar los resultados obtenidos, se realizó, además de la verificación y calibración de los equipos utilizados, pruebas de control de calidad. Primeramente, para el análisis de cationes, aniones, metales mayoritarios y metales traza, se realizaron controles de lectura, los cuales son disoluciones de una concentración conocida, preparados a partir de materiales de referencia de 1000 mg/L de acuerdo con el analito de interés. En el anexo 10 se muestran tanto la concentración teórica como experimental obtenidos, así como el porcentaje de recuperación de cada ion y metal analizado. El menor porcentaje de recuperación obtenido fue de 83% para el caso del plomo y el mayor fue de 103% para el níquel, los cuales se encontraron dentro del rango aceptable (entre 80% y 110%). Por otro lado, en el anexo 11 se muestran los resultados del balance iónico realizado. De acuerdo con la literatura, valores de porcentaje de error mayores a 5 % sugieren una significancia de error importante, siendo necesario excluir el análisis de ciertas aplicaciones interpretativas, sin embargo, cuando el total de cationes y de aniones es menor que 5 meq/L, se ha establecido que errores que excedan el 5 % son inevitables⁴⁸ debido a aquellas contribuciones iónicas menores que no se toman en cuenta, las cuales pueden afectar en mayor o menor medida a una muestra u otra, por lo cual diversos autores han llegado a considerar válidos datos que no sobrepasen el ± 20 %.⁴⁹ Debido a que todos los porcentajes de error se encontraron por debajo de este valor y a que por medio de los controles de lectura realizados se comprobó la correcta ejecución de los análisis, se decidió no descartar ninguna muestra con base en este parámetro.

4.2 Parámetros físicos, químicos y microbiológicos

En el cuadro 2 se presenta el resumen de los parámetros físicos, químicos y microbiológicos medidos en el acuífero Poás.

Cuadro 2. Resumen de las características físicas, químicas y microbiológicas del acuífero Poás.

Parámetro	Unidades	Promedio	Desviación estándar	Mínimo	Máximo	RCAP ^(c)
pH	--	6,46	0,46	5,15	7,49	6,5-8,5
T	°C	21,6	3,5	14,5	27,2	30
Conductividad	µS/cm	169,23	85,83	69,00	451,50	400
SDT	mg/L	82,81	37,93	26,00	204,00	1000
ORP	mV	251,34	73,03	103,50	399,00	--
Turbiedad ^(a)	NTU	1,02	1,41	< 0,02	6,85	--
OD	mg/L	5,17	1,57	2,59	8,12	--
Dureza	mg/L	46,55	22,85	2,60	96,10	400
Ca ²⁺	mg/L	12,4	5,40	5,1	23,6	100
Mg ²⁺	mg/L	5,0	1,86	1,84	8,57	50
Na ⁺	mg/L	4,8	2,2	1,4	11,3	200
K ^{+(a)}	mg/L	2,29	1,12	< 0,16	4,60	10
HCO ₃ ⁻	mg/L	42,6	19,3	8,5	74,5	--
NO ₃ ⁻	mg/L	12,56	12,13	0,46	48,34	50
SO ₄ ²⁻	mg/L	5,07	6,04	0,33	24,99	250
Cl ⁻	mg/L	2,47	1,54	0,22	6,83	250
F ^(a)	mg/L	0,13	0,10	< 0,015	0,41	0,7
Mn ^(b)	mg/L	--	--	ND	ND	0,5
Zn ^(b)	mg/L	--	--	< 0,020	0,57	3,0
Fe ^(b)	mg/L	--	--	ND	ND	0,3
Cu ^(b)	mg/L	--	--	ND	ND	2,0
As ^(b)	µg/L	--	--	ND	ND	10
Cd ^(b)	µg/L	--	--	ND	ND	3
Ni ^(b)	µg/L	--	--	ND	ND	20
Pb ^(b)	µg/L	--	--	ND	ND	10
Coliformes totales	NMP/100 mL	--	--	ND	1600	Ausente
<i>E. coli</i>	NMP/100 mL	--	--	ND	1600	Ausente

^(a) Se estimaron utilizando el método ROS.

^(b) > del 80% de los datos se encontraron por debajo del límite de cuantificación.

^(c) Valor máximo admisible según el Reglamento para la Calidad del Agua Potable.

4.2.1 Parámetros físicos

En el caso del pH se obtuvo un valor promedio de 6,46 con un rango de datos que oscila entre 5,15 y 7,49. De los 54 valores obtenidos, 8 se encontraron por debajo del valor recomendado por la normativa nacional, lo cual puede afectar la calidad estética del agua, aumentando su corrosividad y promoviendo la movilización de plomo y otros materiales de tuberías que pueden generar problemas en los sistemas de potabilización, así como presentar un riesgo para la salud pública.⁵⁰

Por otro lado, se obtuvieron valores de temperatura en un rango de 14,5°C a 27,2°C, con un promedio de 21,6°C, todos por debajo del valor máximo admisible (30°C) estipulado por la normativa nacional. La temperatura del agua subterránea presenta una estrecha relación con la temperatura del aire, la cual disminuye con la altitud.⁵¹ Los valores de temperatura más bajos reportados (menor a 20°C) corresponden a las muestras obtenidas de nacientes ubicadas en la parte alta de la cuenca, donde la temperatura del aire promedio oscila entre los 15°C y los 18°C. Mientras que los valores de temperatura más altos reportados correspondieron a pozos ubicados principalmente en la parte baja de la cuenca donde la temperatura del aire varía entre los 19°C y 23° C, con máximas de 24°C a 28°C.⁷

La conductividad eléctrica presentó un valor promedio de 169,2 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con un valor mínimo de 69,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un valor máximo de 451,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Se encontraron dos datos atípicos (410,0 y 451,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$), los cuales presentaron un valor mayor a 400 $\mu\text{S}/\text{cm}$, incumpliendo lo estipulado en la normativa nacional. Ambos datos fueron obtenidos de nacientes (RP02 y RP06) en el muestreo realizado en el mes de noviembre del año 2020. La variación de la conductividad depende de la concentración de iones disueltos como HCO_3^- , Ca^{2+} , Na^+ y K^+ , así como del tiempo de residencia del agua en el acuífero, el cual influye en la interacción del agua con las rocas.⁵²

El valor promedio de los SDT fue de 148,2 mg/L, con un valor mínimo de 61,5 mg/L y un valor máximo de 256,5 mg/L, siendo todos los datos menores a 1000 mg/L, valor máximo admisible del RCAP.

Para el caso del potencial redox (ORP) se obtuvo un valor promedio de 251 mV con un valor mínimo de 104 mV y un valor máximo de 399 mV. La normativa nacional no propone un valor máximo admisible para el ORP, sin embargo, en aguas naturales, el ORP puede variar de -500 mV a +700 mV, mientras que para aguas superficiales y subterráneas con una cantidad considerable de oxígeno disuelto, los valores pueden variar entre +100 mV y +500 mV.²²

Por otro lado, se determinó la turbiedad de las muestras de agua obtenidas in situ. Se obtuvieron valores en un rango de < 0,02 NTU a 6,85 NTU, con un valor promedio de 1,01 NTU. Todas las muestras obtenidas fueron menores a 5,00 NTU, valor máximo admisible en

la normativa nacional, a excepción de la muestra RP10 obtenida en el muestreo realizado en febrero del 2021, la cual también presentó valores altos de turbiedad en los muestreos realizados en setiembre y noviembre del 2020 (3,28 NTU y 4,60 NTU respectivamente). Estos valores de turbiedad pueden ser causados por partículas químicas y biológicas en suspensión, que, a pesar de no representar un riesgo significativo para la salud pública, puede ser un indicador de organismos patógenos presentes en el agua.⁵³

4.2.2 Parámetros químicos

El oxígeno disuelto medido in situ obtuvo un valor promedio de 5,17 mg/L con un rango de 2,59 mg/L a 8,12 mg/L. El valor más bajo (2,59 mg/L) fue obtenido en el punto RP16, tanto en el muestreo realizado en setiembre del 2020 como el realizado en febrero del 2021. Este punto corresponde a una naciente ubicada en la parte baja de la cuenca, la cual no se encuentra captada por ningún ente administrador de agua y se encuentra rodeada de viviendas y fincas ganaderas. En los muestreos realizados se pudo evidenciar baja circulación del agua y signos de contaminación alrededor de esta, como envases plásticos y desechos sólidos, por lo cual es de esperarse que sea el punto con menor cantidad de oxígeno disuelto, a pesar de tratarse de una naciente, donde se esperan que los niveles de OD sean mayores en comparación con el agua obtenida de pozos, debido al poco contacto de esta con el oxígeno atmosférico. El oxígeno disuelto no se encuentra normado a nivel nacional y la OMS no recomienda ningún valor de referencia basado en efectos sobre la salud.

La dureza fue un parámetro medido en el laboratorio, la cual obtuvo un valor promedio de 46,5 mg/L de CaCO₃ con un valor mínimo de 2,6 mg/L y un valor máximo de 96,1 mg/L. Todos los valores se encontraron por debajo de 400 mg/L, valor máximo admisible de acuerdo con el RCAP. De acuerdo con Sawyer y McCarty, si el agua es menor a 75 mg/L de CaCO₃, se puede considerar como “blanda”, si se encuentra entre 75 mg/L y 150 mg/L se considera “moderadamente dura”, entre 150 y 300 mg/L es un agua “dura” y si la dureza es mayor a 300 mg/L el agua se considera “muy dura”.⁵⁴ Gran parte de los puntos muestreados cuentan con aguas “blandas”, a excepción de los puntos RP04, RP14, RP15 y RP19, los cuales presentaron aguas “moderadamente duras” en los muestreos realizados en setiembre y noviembre del año 2020. Este cambio en la dureza del agua de la zona se asocia con las

formaciones de piedra caliza, las cuales pueden aumentar o disminuir en la capa superficial del suelo, ocasionando un aumento en la concentración de iones calcio y magnesio.⁵⁴

En la figura 5 se observa la distribución espacial de los cationes analizados. La abundancia promedio de los cationes mayoritarios en el acuífero Poás siguieron el siguiente orden: Ca^{2+} (12,4 mg/L) > Mg^{2+} (5,0 mg/L) > Na^+ (4,8 mg/L) > K^+ (2,3 mg/L).

El ion calcio se encontró en concentraciones entre 5,1 mg/L y 23,6 mg/L, cumpliendo con la normativa nacional en todos los puntos al ser menores a 100 mg/L, valor máximo admisible de acuerdo con el RCAP. El intercambio iónico de minerales de las rocas de la zona es una de las principales fuentes de calcio en las aguas subterráneas, la cual también puede deberse a la presencia de minerales de carbonato de calcio y sulfato de calcio como la calcita, la dolomita, el yeso y la anhidrita en el suelo.⁵⁵ Cuando se da el proceso de evaporación del agua del suelo, la concentración de estos minerales puede aumentar, promoviendo su infiltración en las aguas subterráneas.⁵⁵

Por su parte, el magnesio presentó un valor mínimo de 1,8 mg/L y un valor máximo de 8,6 mg/L, cumpliendo en todas las ocasiones con el RCAP al no superar los 50 mg/L en ningún sitio de muestreo. El magnesio puede estar presente en el agua subterránea debido a fuentes tanto naturales como antropogénicas. Entre las principales fuentes antropogénicas se destacan la aplicación de fertilizantes, la alimentación del ganado y todos los procesos industriales que utilicen magnesio en sus diferentes etapas.⁵⁶ Sin embargo, al encontrarse concentraciones bastante bajas de magnesio, se atribuye su presencia a la disolución de rocas minerales comunes como dolomita y magnetita.⁵⁶

El catión sodio presentó concentraciones entre los 1,4 mg/L y los 11,3 mg/L, todas menores a 200 mg/L, valor máximo admisible establecido en la normativa nacional. Monitorear la concentración de sodio en el agua subterránea es de suma importancia ya que, según la OMS, altas concentraciones de sodio pueden representar un riesgo para las personas que padecen enfermedades cardíacas, renales y circulatorias.²⁰ Altas concentraciones de sodio son signos de contaminación antropogénica debido a la infiltración de aguas residuales o de la escorrentía agrícola, sin embargo, al presentarse valores relativamente bajos, la presencia de

sodio se atribuye principalmente a la disolución de minerales de feldespato alcalino y a los procesos de intercambio iónico ocurridos en el acuífero.⁵⁷

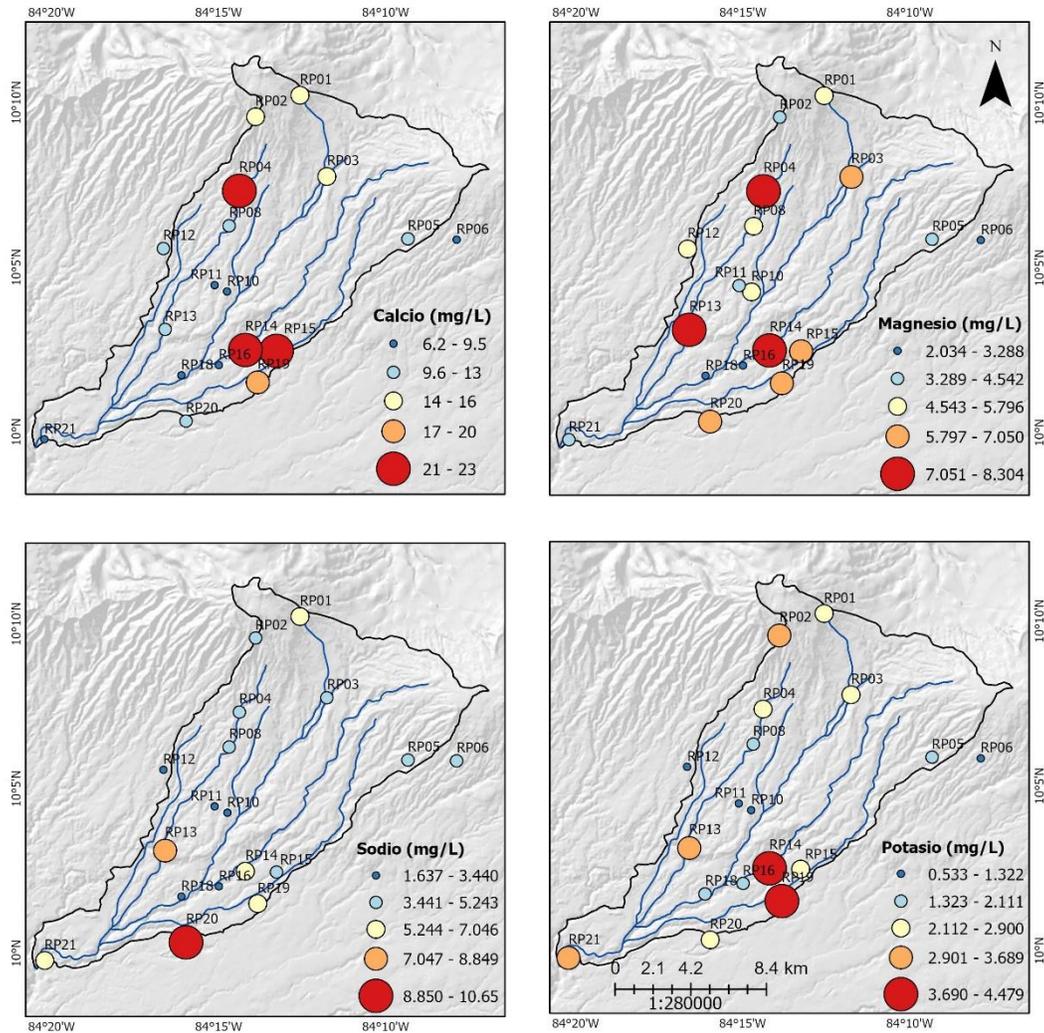


Figura 5. Distribución espacial de los cationes analizados: sodio, calcio, magnesio y potasio, en mg/L

Por último, el potasio fue el catión que se encontró en menor concentración, con un valor mínimo menor a 0,16 mg/L y un valor máximo de 4,60 mg/L, cumpliendo con lo estipulado en el RCAP, el cual establece 10 mg/L como el valor máximo admisible. El potasio es un nutriente esencial para todo organismo, sin embargo, en el caso de los humanos, si se ingiere en exceso puede comportarse como laxante,⁵⁷ siendo la contaminación antropogénica por fertilizantes la principal causante de altas concentraciones de potasio en el agua potable.⁵⁸ Por otro lado, la concentración relativamente baja de potasio en el agua subterránea, como

es el caso del acuífero Poás en los puntos muestreados, puede deberse a la disolución de diversos minerales que contienen potasio, como la ortoclasa, la microclina y la arcilla.⁵⁷

En la figura 6 se observa la distribución espacial de los aniones analizados. La abundancia promedio de los aniones en el acuífero Poás mostró la siguiente tendencia: HCO_3^- (47,6 mg/L) > NO_3^- (12,12 mg/L) > SO_4^{2-} (6,04 mg/L) > Cl^- (1,54 mg/L) > F^- (0,10 mg/L), siendo el ion bicarbonato el que predomina a lo largo del acuífero, sugiriendo que el agua subterránea es relativamente joven, recargándose rápidamente a través de rocas relativamente lixiviadas.⁵⁹

La concentración de ion bicarbonato es un parámetro que no se encuentra normado en el RCAP, sin embargo, aguas poco alcalinas pueden presentar valores de 40 mg/L de CaCO_3 , mientras que aguas que fluyen a través de zonas con gran cantidad de piedra caliza, pueden llegar a tener alcalinidades superiores a los 200 mg/L de CaCO_3 .⁶⁰ En el caso del acuífero Poás se obtuvieron valores en un rango de 8,5 mg/L a 74,5 mg/L de CaCO_3 , con un valor promedio de 42,6 mg/L. Como se puede observar en la figura 6, gran cantidad de los datos obtenidos se encuentran muy por debajo de 40 mg/L, lo cual evidencia el poco tiempo de residencia del agua dentro del acuífero.

Para el caso del ion nitrato, se obtuvieron valores entre 0,46 mg/L y 48,34 mg/L. Todos los puntos muestreados cumplieron con el RCAP, ya que los valores obtenidos fueron menores a 50 mg/L, valor máximo admisible; sin embargo, como se puede observar en la figura 6, los puntos RP04, RP14 y RP15 presentaron valores mayores a los 25 mg/L, valor alerta indicado en el RCAP, en al menos dos de los muestreos realizados. El punto RP14 obtuvo las concentraciones más altas de ion nitrato (43,4 mg/L, 44,5 mg/L y 48,3 mg/L) en las tres muestras tomadas, las cuales fueron muy cercanas al valor máximo admisible propuesto en el reglamento. En los últimos años la concentración de nitrato ha aumentado considerablemente en las aguas subterráneas a nivel mundial, debido al uso excesivo de fertilizantes, la infiltración de aguas residuales y desechos sólidos.⁶¹ Los agricultores tienden a proporcionar nitrógeno en exceso para maximizar el rendimiento de sus cultivos, sin embargo, debido a la carga negativa del nitrato, este no es absorbido en las partículas del suelo, por lo que puede ser transportado con facilidad desde la capa del suelo hasta los

acuíferos a través de la infiltración producto de la precipitación o el riego de cultivos.⁶² El exceso de nitrato en el agua potable es una amenaza para la salud pública ya que puede causar complicaciones en la salud, como el síndrome del bebé azul, cáncer, disminución del funcionamiento de la tiroides, daño reproductivo y abortos en mujeres.⁶³ El punto RP14 se encuentra localizado en el distrito de Tambor de Alajuela, el cual es una zona residencial que cuenta con aproximadamente 10992 habitantes, de acuerdo con un censo realizado en el 2011 por el Instituto Nacional de Estadística y Censos.⁶⁴ El desarrollo residencial incrementado en los últimos años promueve la infiltración de aguas residuales domésticas en la zona debido al mal tratamiento ocasionado por la carencia de una red de alcantarillado adecuada y un sistema centralizado de tratamiento de aguas residuales, siendo esta la principal problemática con la que se asocia la importante concentración de ion nitrato encontrada en comparación con los demás puntos del acuífero. A pesar de que la concentración de ion nitrato es regulada a nivel nacional y mundial, es necesario tomar medidas de mitigación en las fuentes donde existan plumas de concentración de ion nitrato. En las últimas décadas, se han propuesto diversas tecnologías para reducir el ion nitrato *in situ* y para el tratamiento de los suministros de agua potable, así como materiales emergentes para su eliminación,⁶¹ sin embargo, es necesario contar con una gestión integrada de la contaminación por nitrato de las aguas subterráneas que tome en cuenta medidas de reducción en la fuente, remediación *in situ* y reutilización de las aguas subterráneas contaminadas,⁶¹ por lo tanto se recomienda, como primera instancia, identificar las principales fuentes de ion nitrato con el fin de determinar las medidas de reducción y remediación necesarias. Un método ampliamente utilizado para trazar las principales fuentes de ion nitrato y los mecanismos de transformación bioquímica ha sido el análisis de los isótopos $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ y $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$, ya que dependiendo de la fuente de la que provenga el NO_3^- (fertilizantes sintéticos, nitrato producido por la nitrificación, fertilizantes de amonio y urea, aguas residuales o estiércol), así varía la composición de estos isótopos en el agua.⁶⁵

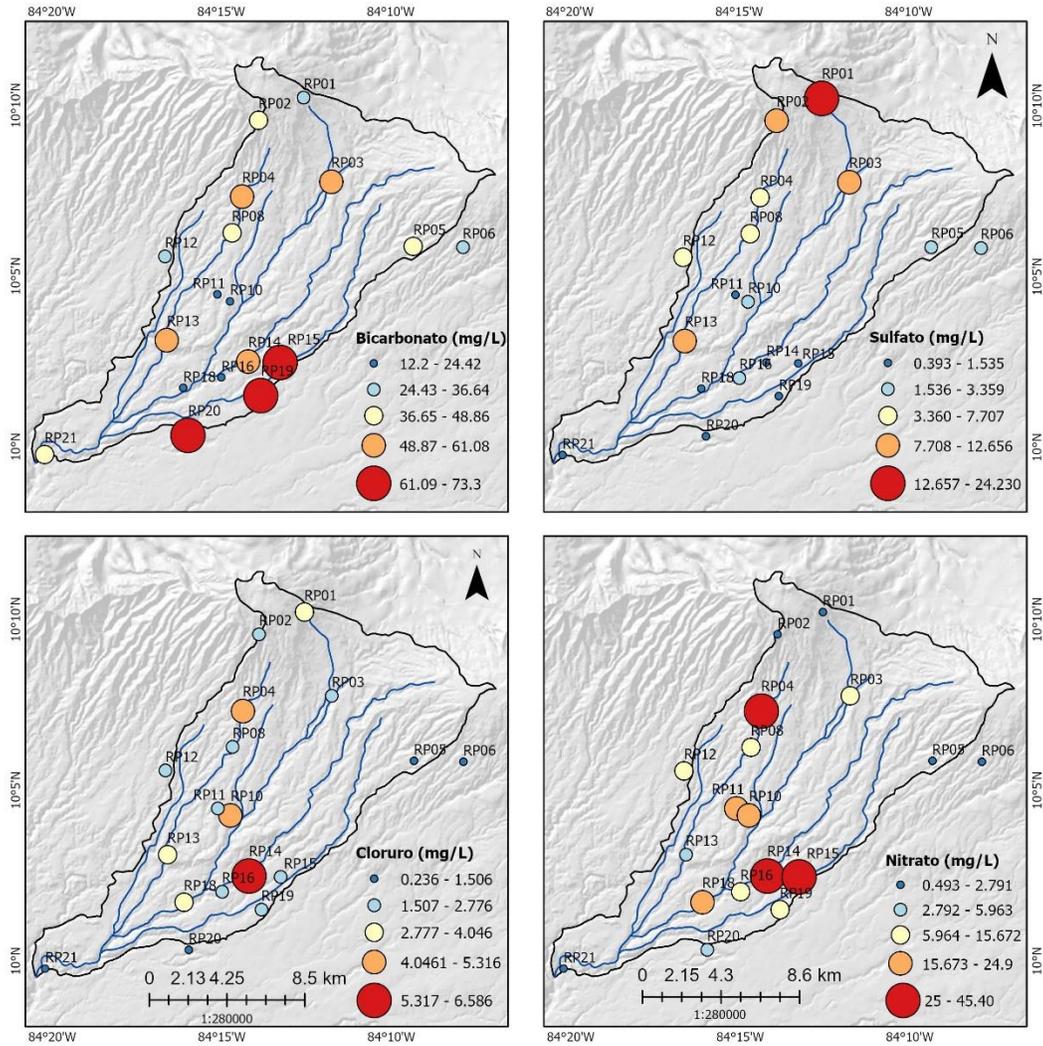


Figura 6. Distribución espacial de los aniones analizados: bicarbonato, sulfato, cloruro y nitrato.

Por otro lado, también se evaluó la concentración del ion sulfato presente en el acuífero, obteniéndose un valor promedio de 5,1 mg/L, con un rango de concentración entre los 0,3 mg/L y los 25,0 mg/L. Todos los sitios de muestreo se encontraron por debajo del valor máximo admisible (250 mg/L) de acuerdo con la normativa nacional, sin embargo, como se puede observar en la figura 6, tres de los valores reportados se encontraron muy cerca del valor alerta (25 mg/L). Estos valores corresponden a los muestreos realizados en el punto RP01, el cual presentó valores de 23,8 mg/L, 25,0 mg/L y 23,8 mg/L para las muestras tomadas en setiembre del 2020, noviembre del 2020 y febrero del 2021, respectivamente. A pesar de que el punto RP01 presentó concentraciones de ion sulfato mucho más elevadas en comparación con los otros puntos, no se considera como un riesgo hacia la salud humana, ya que nunca se han registrado efectos adversos, sin embargo, altas concentraciones de este ion

en el agua potable, puede causar alteraciones al gusto y efectos laxantes.⁶⁶ La presencia del ion sulfato se puede derivar tanto de fuentes naturales como antropogénicas. Entre las fuentes antropogénicas se destacan la infiltración de aguas residuales, fertilizantes, detergentes sintéticos y drenajes provenientes de minería⁶⁷; sin embargo, al ser el punto RP01 el más alto y encontrarse en una zona protegida, se descarta la posibilidad de que esté siendo afectado por actividades antropogénicas, por lo cual su alta concentración se atribuye a procesos naturales como por ejemplo la disolución de minerales de sulfato como el yeso, la oxidación de minerales de sulfuro como la pirita, la precipitación y la actividad volcánica⁶⁷, siendo esta última una posible influencia directa al encontrarse cerca del Parque Nacional Volcán Poás.

En cuanto al ion cloruro, se obtuvo un valor promedio de 2,5 mg/L, con un valor mínimo de 0,22 y un valor máximo de 6,8 mg/L, siendo todos los valores menores a 250 mg/L, valor máximo admisible de acuerdo con el RCAP. Los niveles de cloruro en aguas no contaminadas suelen ser inferiores a 10 mg/L e inclusive a veces se pueden encontrar valores por debajo de 1 mg/L, ya que altos niveles de cloruro son considerados como indicadores de contaminación.⁶⁸ El cloruro puede ser originado por fuentes antropogénicas como el uso de fertilizantes inorgánicos, lixiviados de vertederos, efluentes de fosas sépticas, efluentes industriales e intrusión salina en zonas costeras.⁶⁸ Como se puede observar en la figura 6, los puntos RP14 y RP04 presentaron las concentraciones más altas de ion cloruro, las cuales, a pesar de ser menores al valor máximo admisible, también presentaron valores superiores a los 25 mg/L de NO_3^- , siendo un posible indicador de contaminación antropogénica. Para los demás puntos que presentaron concentraciones mucho más bajas de ion cloruro, se relaciona la presencia de este ion con fuentes geogénicas relacionadas con procesos de disolución.⁶⁸

Por último, el anión con menor concentración reportada fue el fluoruro el cual presentó valores menores a 0,045 mg/L como mínimo y un valor de 0,41 mg/L como máximo, siendo todos los datos obtenidos menores a 0,7 mg/L, valor máximo admisible indicado en el RCAP. Según la OMS el agua subterránea con altos niveles de flúor ($> 1,5$ mg/L) afecta a más de 266 millones de personas en todo el mundo, causando fluorosis dental, esquelética y no esquelética y sus problemas de salud relacionados.⁶⁹ La presencia de fluoruros orgánicos e inorgánicos como fluoruro de calcio, fluoruro de sodio, fluorapatita y criolita, en rocas ígneas, sedimentarias, cenizas volcánicas, carbón y arcillas constituyen la principal fuente de

fluoruro en aguas subterráneas.⁷⁰ En los últimos años se han reportado numerosos casos sobre la presencia de elementos contaminantes, principalmente arsénico y fluoruro, provenientes de procesos naturales, como las cenizas volcánicas, que han afectado las aguas subterráneas en Argentina y el resto de América Latina,⁷⁰ por lo cual es de suma importancia monitorear regularmente la concentración de fluoruro y arsénico en zonas cercanas a la actividad volcánica, como es el caso del acuífero Poás.

Por último, se evaluó la presencia de metales minoritarios como cobre, hierro, manganeso y zinc, y de metales traza como arsénico, plomo, cadmio y níquel. Para todos los metales mencionados, se obtuvieron valores por debajo del límite de detección de la técnica analítica empleada, a excepción del zinc, el cual presentó valores cuantificables en los puntos RP10 (0,571 mg/L, 0,726 mg/L y 3,733 mg/L) y RP21 (0,446 mg/L y 0,692 mg/L) en al menos dos de los muestreos realizados. El valor máximo admisible indicado en la normativa nacional para el zinc es de 3,0 mg/L, por lo tanto, el único punto que incumplió con la normativa nacional fue el RP10, pozo ubicado en la zona media de la cuenca, el cual presentó una concentración de 3,733 mg/L en el muestreo realizado en febrero del 2021. Según la OMS, en aguas subterráneas, la concentración de zinc generalmente oscila entre 10-40 µg/L debido a las pocas cantidades de zinc presente en las rocas ígneas.⁷¹ Otros minerales que pueden aportar zinc a los acuíferos son los sulfuros como la esfalerita y la wurtzita.⁷¹ El zinc se encuentra comúnmente en el perfil del suelo y, en condiciones oxidantes, se transforma en sulfato de zinc, convirtiéndolo en uno de los metales más móviles en aguas subterráneas y por ende, es un indicador de contaminación, especialmente en aguas poco mineralizadas.⁷² En este caso en particular, al tratarse de un pozo, se cree que la elevada concentración de zinc provenga de la corrosión de la tubería y sus respectivos accesorios, ocasionando la lixiviación de este metal.

4.2.3 Parámetros microbiológicos

En la zona de estudio se evaluó la presencia de CT y *E. coli*, los cuales presentaron valores variables entre 0 y 1600 NMP/100 mL. De acuerdo con el RCAP, los valores para CT y *E. coli* deben ser ausentes, por lo tanto, los únicos sitios que cumplieron con la normativa

nacional en los 3 muestreos realizados fueron RP01 y RP05 para CT y RP01, RP02, RP03, RP05, RP10 y RP14 para *E. coli*.

Las bacterias coliformes se pueden encontrar tanto en desechos humanos como de animales, por lo cual son indicadores de posible presencia de patógenos en el agua potable, como por ejemplo *Escherichia coli* (*E. Coli*), *Giardia lamblia*, *Cryptosporidium* y algunas especies de virus, los cuales pueden ocasionar enfermedades gastrointestinales, respiratorias y neurológicas nocivas para la salud pública.⁷³

Una de las principales causas de contaminación por aguas residuales, son los tanques sépticos, los cuales, a pesar de liberar una cantidad relativamente pequeña de desechos al suelo, la gran utilización de estos sistemas a nivel nacional los convierte en una importante fuente de contaminación.⁷⁴ Añadido a esto, muchos de los sistemas sépticos se encuentran mal ubicados (muchas veces cerca de pozos), e inclusive muchos no son diseñados ni construidos de la manera correcta, de la mano con un mal mantenimiento por parte del dueño de la propiedad, provocando la contaminación del agua subterránea con bacterias, virus, nitratos, detergentes, aceites y productos químicos.⁷⁴ Cabe destacar que las muestras, tanto de nacientes como de pozos, fueron tomadas antes de la zona de desinfección, por lo cual es normal encontrar una baja presencia de coliformes totales y *E. coli*, sin embargo, debido su alta presencia, resulta importante verificar mediante estudios futuros, que el método de desinfección utilizado se esté realizando correctamente y en las cantidades adecuadas, con el fin de asegurar la salud pública. Además, otros factores que pueden promover este tipo de contaminación es la falta de protección y cuidado de las captaciones en las nacientes y la cercanía o presencia de animales, principalmente de ganado en la zona, por lo cual es de suma importancia instruir a las municipalidades encargadas acerca de los planes de seguridad del agua de manera que las condiciones de abastecimiento de agua sean seguras para la población.

4.3 Aplicación del Índice de Riesgo de la Calidad del Agua para Consumo Humano (IRCACH)

De los 34 parámetros definidos en el IRCACH, solamente no se evaluaron 9 de ellos, de los cuales 2 pertenecen a parámetros estéticos (color aparente y olor), 1 se clasifica como

parámetro operativo (cloro residual libre), el cual en este caso no aplica ya que todos los muestreos se realizaron antes del sistema de cloración, y 6 parámetros que se clasifican como de significado para la salud (selenio, aluminio, antimonio, cianuro, cromo y mercurio). Estos parámetros no fueron evaluados, ya que se encuentran fuera del alcance de esta investigación.

Al determinar el promedio por punto de muestreo, se obtuvo que solamente los parámetros de pH y CT contaron con puntos que sobrepasaron el valor máximo admisible propuesto por el RCAP, otorgando 1 punto a los sitios que incumplieron con el valor de pH (RP10 y RP18) y 21 puntos para para los sitios en los que se detectó la presencia de CT, los cuales no fueron detectados en solamente 4 puntos (RP01, RP02, RP03 y RP04). Al realizar la sumatoria de puntos obtenidos se determinó que únicamente 4 de los 18 puntos muestreados cuentan con un nivel de riesgo muy bajo (RMB), mientras que los demás puntos cuentan con un riesgo alto (RA) y se clasifican como no aptos para ingesta, siendo principalmente afectados por la presencia de CT.

A pesar de que todas las muestras fueron tomadas antes de los sistemas de desinfección, los resultados obtenidos en la aplicación de este índice evidencian que las amenazas de contaminación hidrogeológica existentes en la zona están afectando de manera importante la calidad del agua, por lo tanto se debe trabajar en forma integrada con la población y los entes administradores del agua potable para minimizar estas presiones y así, evitar que las cargas contaminantes continúen incrementando, de modo que lleguen a ser tan altas que, el agua aún después de ser tratada sea de alto riesgo para el consumo humano.

Como se puede observar en la figura 7, los 4 puntos muestreados clasificados como “riesgo muy bajo” pertenecen a nacientes, las cuales, al estar ubicadas en la zona alta de la cuenca, presentan menor influencia de potenciales fuentes de contaminación, sin embargo, dos de las seis nacientes ubicadas en la zona alta de la cuenca, si presentaron afectación por presencia de coliformes totales (RP04 y RP06). De estos dos puntos, destaca el punto RP04, el cual también presentó una concentración superior al valor alerta indicado en la normativa para el ion nitrato. Cerca de esta naciente se encuentran fincas en las cuales se da el cultivo de diversas plantaciones, lo cual es importante a tomar en consideración como factor de contaminación hidrogeológica.

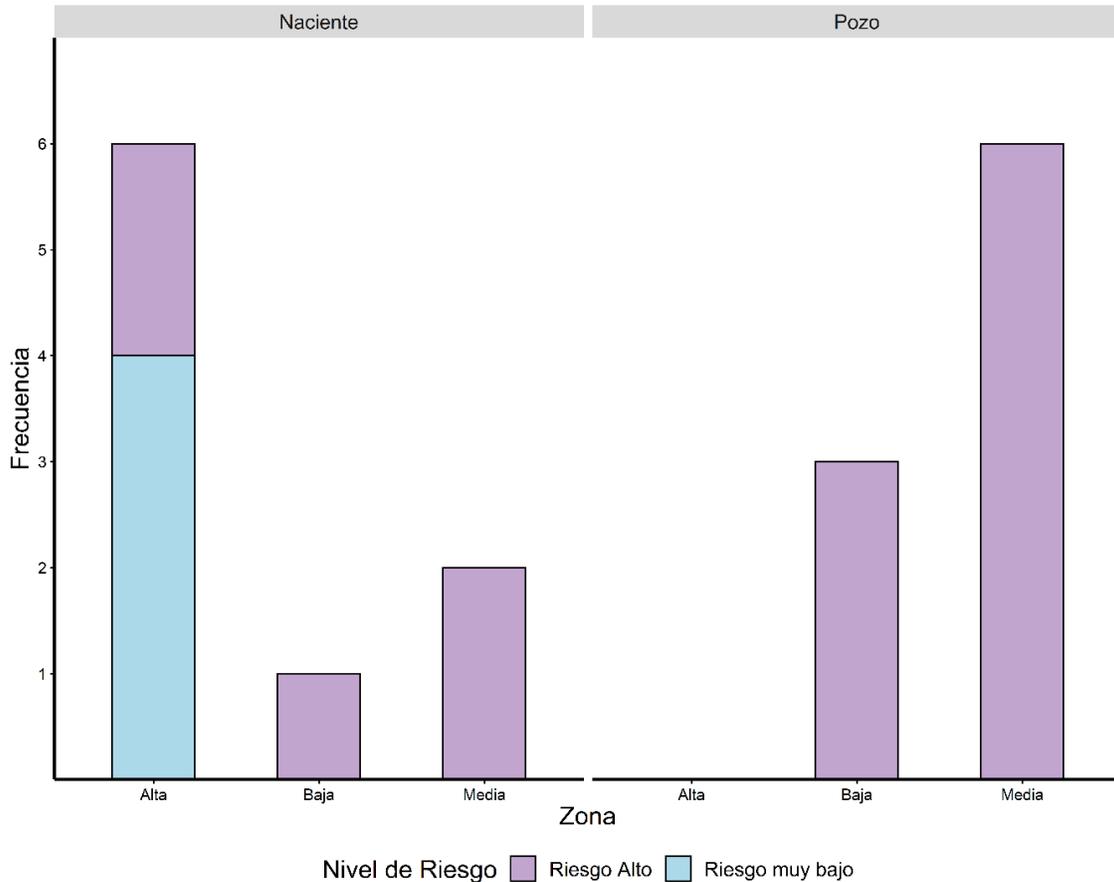


Figura 7. Nivel de Riesgo encontrado en los puntos muestreados al aplicar el IRCACH, de acuerdo con la zona y el tipo de muestra obtenida.

4.4 Análisis de conglomerados

Debido a la multivariabilidad de los datos obtenidos y a la cantidad de sitios de muestreo incluidos se realizó un análisis de conglomerados con el fin de agrupar el conjunto de datos de acuerdo con las similitudes encontradas entre los distintos parámetros evaluados, utilizando la distancia euclidiana como medida de similitud.⁷⁵ Para conocer el número óptimo de conglomerados para este estudio, se aplicó el método “*Gap statistic*”. Este método compara la variación entre conglomerados para diferentes valores de k con sus valores esperados para una distribución de referencia nula de los datos y escoge el número de conglomerados como el valor más pequeño de k tal que el estadístico de brecha se encuentre dentro de una desviación estándar de diferencia en $k+1$: $Gap(k) \geq Gap(k+1) - Sk+1$.⁷⁶

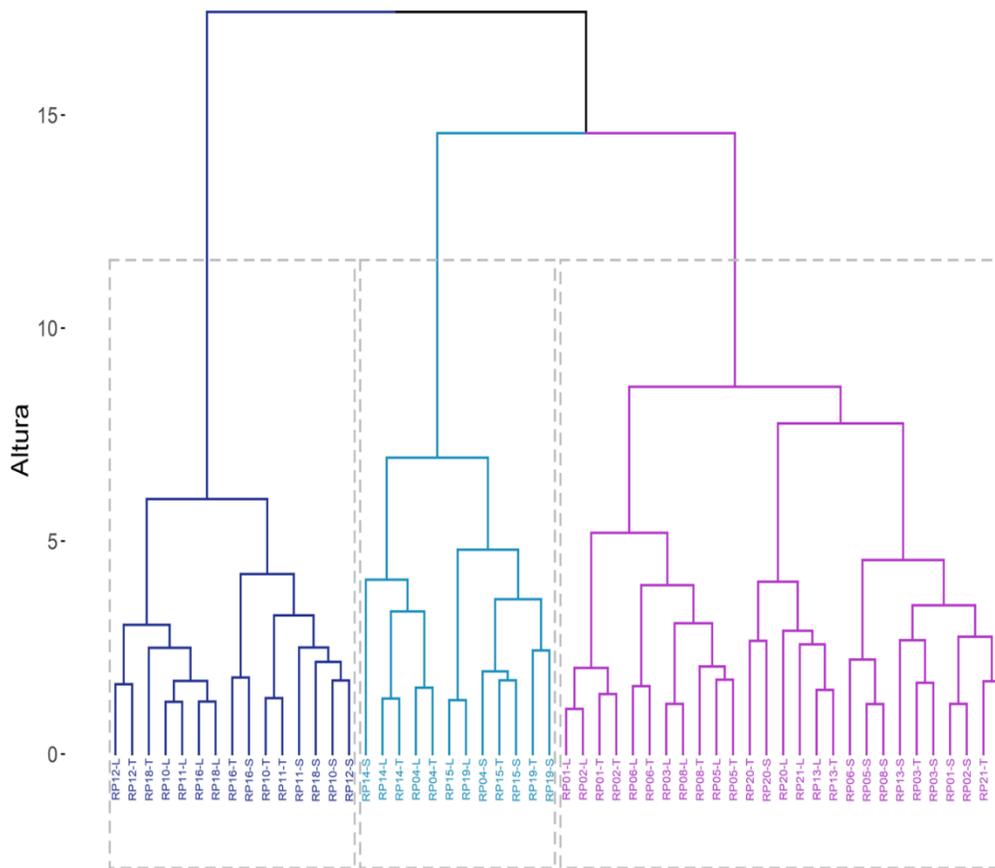


Figura 8. Dendrograma de las muestras obtenidas del Acuífero Poás mediante análisis de conglomerados jerárquicos: grupo 1 (RP10, RP11, RP12, RP16 y RP18), grupo 2 (RP04, RP14, RP15 y RP19) y grupo 3 (RP01, RP02, RP03, RP05, RP06, RP08, RP13, RP20 y RP21).

Posteriormente, para obtener los conglomerados respectivos, se realizó un dendrograma o diagrama de árbol, el cual es un tipo de agrupación jerárquica, en el que cada muestra es considerada inicialmente como un grupo de un solo elemento (hoja), luego, las dos muestras con características más similares se combinan en un nuevo grupo más grande (nodo). Este procedimiento se repite hasta que todas las muestras forman parte de un gran conglomerado (raíz).^{16,76} En la figura 8 se observa el dendrograma en el cual se muestran los tres grupos obtenidos, mientras que en la figura 9 se muestra su distribución espacial.

En el grupo 1 se encuentran los puntos RP10, RP11, RP12, RP16 y RP18 los cuales pertenecen a la zona media y baja de la cuenca, siendo todas muestras de pozos, a excepción de la muestra RP16, la cual pertenece a una naciente. En el grupo 2 se encuentran los puntos RP04, RP14, RP15 y RP19 ubicados en la zona alta y media de la cuenca, siendo todas muestras de pozos a excepción de la muestra RP04, la cual pertenece a una naciente. Estas

muestras se caracterizan por presentar valores altos de ion nitrato, un importante indicador de contaminación. Por último, en el grupo 3 se encuentran los puntos RP01, RP02, RP03, RP05, RP06, RP08, RP13, RP20 y RP21. De estos puntos, 5 se ubican en la parte alta de la cuenca (RP01, RP02, RP03, RP05, RP06), 2 en la parte media (RP08 y RP13) y 2 en la parte baja (RP20 y RP21).

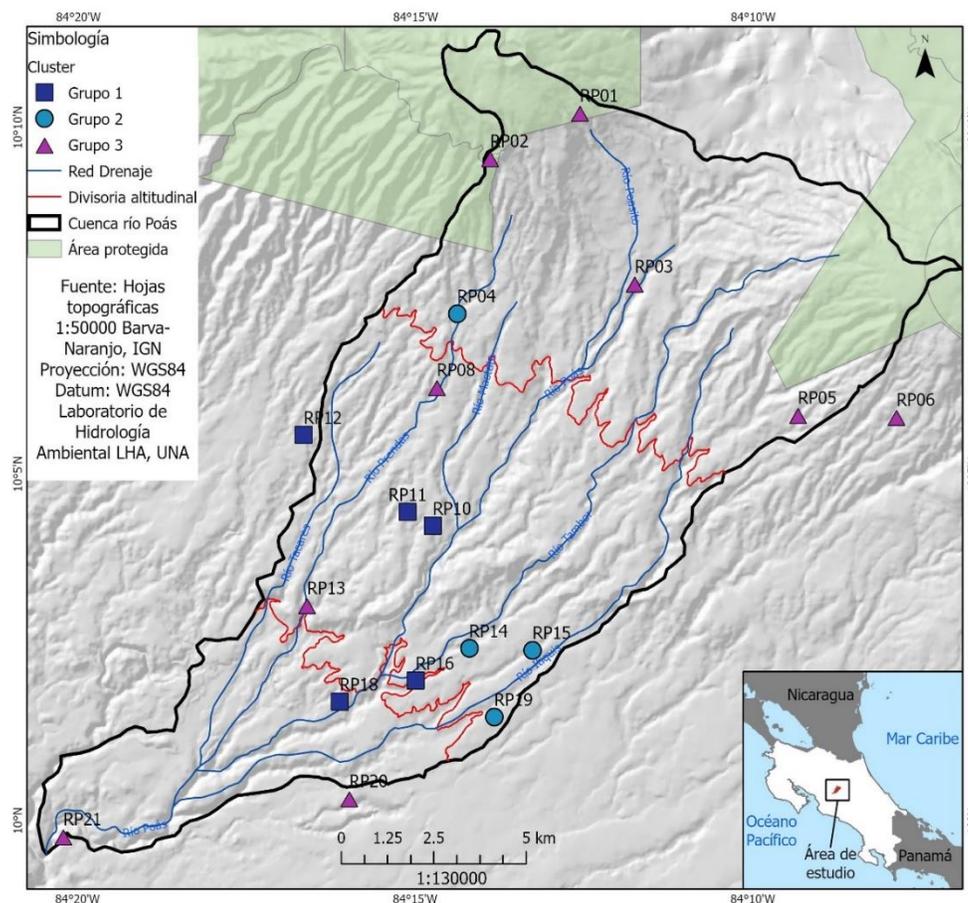


Figura 9. Mapa del Acuífero Poás dividido por zonas de altitud de la cuenca y distribución de los sitios de muestreo clasificados por tipo de muestra y conglomerado obtenido.

En la figura 9 se evidencia que este agrupamiento no concuerda con la división geoespacial de la cuenca, sin embargo, puede ser posible que este agrupamiento por características hidrogeoquímicas responda a conectividades hidráulicas y zonas de recarga presentes en el acuífero, las cuales podrían ser aproximadas en estudios futuros al complementar los resultados hidrogeoquímicos obtenidos con análisis isotópicos.

4.5 Clasificación hidrogeoquímica del agua presente en el Acuífero Poás

4.5.1 Diagrama de Piper

En la figura 10 se muestra el diagrama de Piper obtenido para los puntos de muestreo evaluados en el acuífero Poás. El ion nitrato no fue incluido en este análisis ya que se sospecha que la presencia de este ion en el acuífero procede mayormente de fuentes antropogénicas que alterarían la caracterización hidrogeoquímica natural del agua.

El ion bicarbonato (HCO_3^-) es la especie aniónica predominante, el cual fue mayor al 50% en todos los puntos, a excepción del punto RP01, el cual se clasificó a nivel aniónico como “no dominante” al presentar concentraciones muy similares de ion bicarbonato y ion sulfato (SO_4^{2-}), 48,9 % y 44,0 %, respectivamente. En cuanto a los conglomerados obtenidos, se pueden observar concentraciones aniónicas muy similares entre las muestras pertenecientes a los grupos 1 y 2, siendo las del grupo 1 relativamente menos predominantes en bicarbonato en comparación con el grupo 2. Adicionalmente, en el grupo 3 se observa un aumento en la predominancia del ion bicarbonato, el cual presentó un mayor porcentaje en las zonas bajas de la cuenca (94,7 % y 96,9 %) y un menor porcentaje en el punto más alto de la cuenca (48,9 %), además, conforme aumenta la concentración del ion bicarbonato, se observa una disminución en la concentración del ion sulfato, mientras que la concentración del ion cloruro se mantuvo muy similar en todos los puntos, siendo el anión con la predominancia más baja.

Por otro lado, las especies catiónicas presentaron mayor variabilidad, sin embargo, de los 18 puntos muestreados, 8 presentaron mayor predominancia en el catión calcio, siendo mayor al 50 %. Como se observa en la figura 10, de estos 8 puntos, 4 pertenecen al grupo 2, de manera que todos los puntos del segundo conglomerado fueron clasificados de tipo “cálcico”. En cuanto los grupos 1 y 3, a nivel catiónico las muestras fueron clasificadas en su totalidad como “no dominantes”, presentando predominancias muy variables, siendo el catión calcio el más abundante, seguido del catión magnesio, a excepción del punto RP10, perteneciente al grupo 1, el cual presentó mayor predominancia del catión magnesio en comparación con el calcio, 48,5 % y 39,9 % respectivamente. Además, cabe resaltar que en el conglomerado 1 se observa un ligero aumento en la abundancia del magnesio de la mano con la disminución de Na + K, siendo los 3 puntos con mayor predominancia de magnesio parte de la zona media de la cuenca.

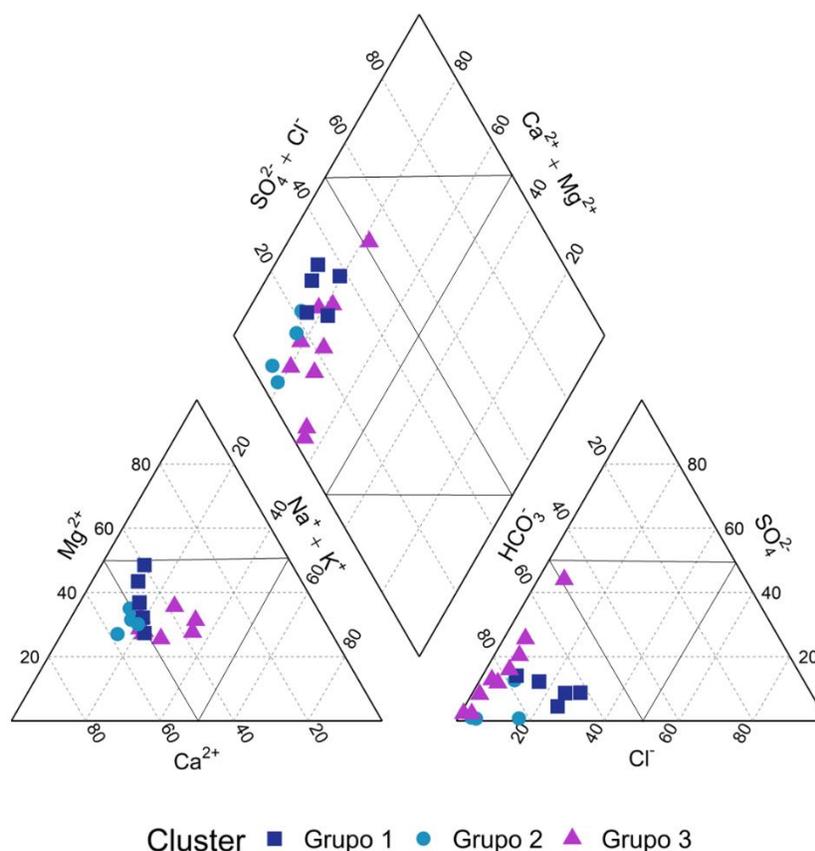


Figura 10. Diagrama de Piper de los puntos de muestreo de la zona de estudio clasificados por conglomerados obtenidos.

Por último, al proyectar la dominancia catiónica y aniónica en el área central en forma de diamante, se observa que todos los sitios de muestreo cuentan con agua de tipo “bicarbonatada cálcica y/o magnésica”, a excepción del punto RP01, el cual fue clasificado como tipo “mixto”, ubicado en la parte más alta de la cuenca. Este comportamiento particular de la hidrogeoquímica del punto RP01 se debe a las altas concentraciones de ion sulfato encontradas, las cuales, como se mencionó anteriormente, se pueden deber a la influencia del Volcán Poás, provocando mayor concentración de minerales sulfatados o sulfuros que al entrar en contacto con el agua con un ORP tipo oxidante generan una disolución significativa del ion sulfato. Sin embargo, las fuentes de ion sulfato pueden ser tan variadas, que resultaría interesante en estudios futuros analizar las concentraciones de los isótopos $\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$ y $\delta^{18}\text{O-SO}_4^{2-}$, con el fin de identificar las fuentes de sulfato y los procesos de los ciclos biogeoquímicos del azufre que influyen en este punto en particular.⁶⁷

Por otro lado, la dominancia de los cationes calcio y magnesio se atribuye a la disolución de carbonatos como dolomita y calcita, mientras que la abundancia del ion bicarbonato se relaciona con la meteorización de carbonatos y silicatos,⁷⁷ así como el intercambio iónico inverso y la disolución mineral.⁵⁵ Además, las aguas tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas se caracterizan por presentar una dureza temporal e indican que el agua subterránea del acuífero permanece en constante recarga.⁵⁵

4.5.2 Diagrama de Gibbs

En la figura 11 se observa el diagrama de Gibbs obtenido para los puntos de muestreo del Acuífero Poás. Mediante este diagrama se analizan los principales factores naturales que influyen en los mecanismos de formación del agua subterránea, los cuales deben ser estudiados con el fin de tener una mejor comprensión de los factores que afectan la química del agua, para una adecuada protección de la calidad y el adecuado desarrollo del recurso.⁵⁵ Según el diagrama propuesto por Gibbs, los tres mecanismos que influyen en la formación del agua subterránea son la meteorización, la precipitación y la evaporación.⁷⁸

Todas aquellas muestras con niveles bajos de SDT ($SDT \approx 10$ mg/L) y ratios de $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ o $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ cercanos a 1 reflejan la influencia de la precipitación atmosférica y ocupan la esquina inferior derecha del diagrama de Gibbs. Muestras con niveles medios de mineralización ($SDT \approx 70-300$ mg/L) y ratios de $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ o $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ menores a 0,5 reflejan la influencia de interacciones roca-agua, y se localizan en el lado izquierdo del área central del diagrama. Mientras que aquellas muestras con altos niveles de mineralización ($TDS > 300$ mg/L) y ratios de $Na^+/(Na^+ + Ca^{2+})$ o $Cl^-/(Cl^- + HCO_3^-)$ cercanos a 1 reflejan la influencia de la evaporación-cristalización y caen en la esquina superior derecha.⁷⁷

Como se puede apreciar en la figura 11, todas las muestras se ubican en el lado izquierdo del área central del diagrama, siendo la meteorización el mecanismo influyente en la formación del agua subterránea. De acuerdo con la secuencia de Chebotarev, la química del agua subterránea tiende a cambiar del tipo “bicarbonatada” al tipo “clorurada” conforme aumenta el tiempo de residencia del agua dentro del acuífero, generalmente acompañada de un cambio en el catión dominante de calcio a sodio, aumentando así la salinidad del agua. Esta

interacción agua-roca proyectada en el diagrama de Gibbs se relaciona con “aguas frescas”, indicando que el acuífero se encuentra en constante recarga, la cual se relaciona con la predominancia del ion bicarbonato, encontrada al inicio de la serie evolutiva propuesta por Chebotarev.⁷⁹

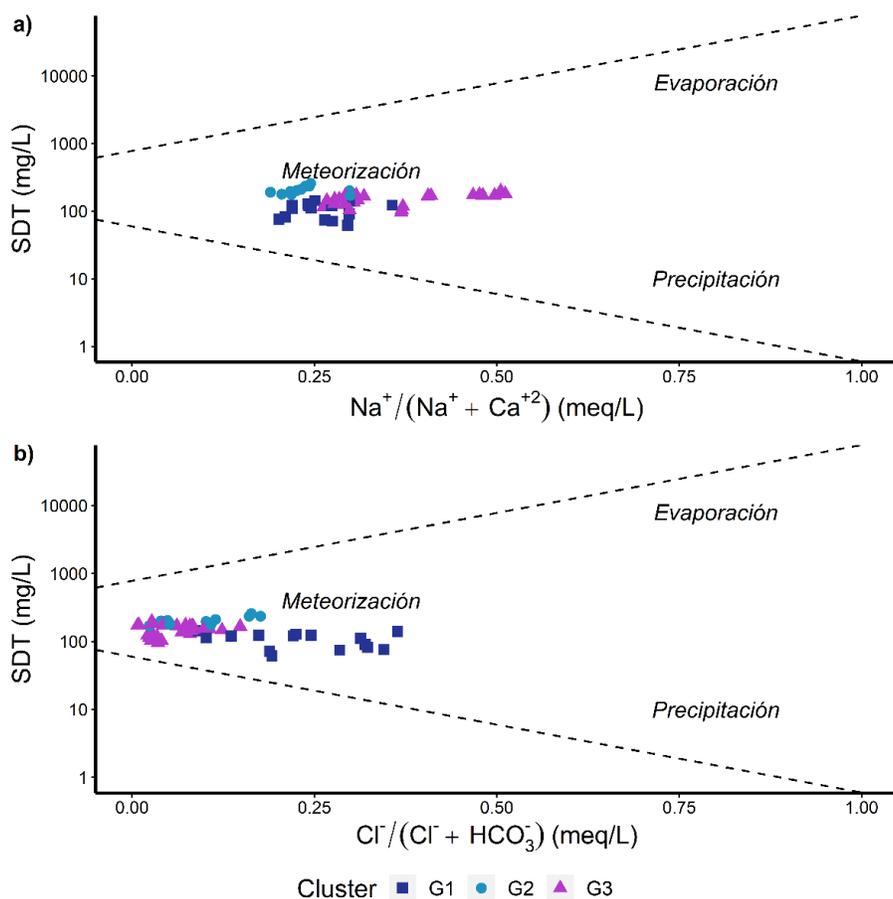
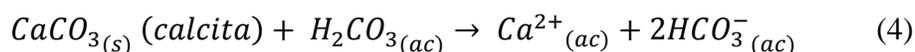
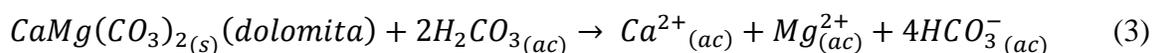


Figura 11. Diagrama de Gibbs de los puntos de muestreo de la zona de estudio clasificados por conglomerados obtenidos

4.5.3 Relaciones Iónicas

Como se determinó por medio del diagrama de Gibbs, las interacciones entre los minerales y el agua presente en el acuífero Poás juegan un papel importante en la evolución de la composición química de ésta, por lo tanto evaluar la relación entre los principales cationes y aniones puede revelar información valiosa sobre el proceso geoquímico.⁸⁰ A continuación, se muestran las principales relaciones iónicas obtenidas, las cuales se comparan con valores establecidos por diversos autores con el fin de proporcionar una idea de los procesos

geoquímicos que influyen en la composición y la calidad del agua potable. En la figura 12(a) se observa la relación $(Ca^{2+} + Mg^{2+})$ vs HCO_3^- . Debido a que el agua del acuífero Poás es en su mayoría del tipo bicarbonatada cálcica, se considera la disolución de minerales como la dolomita y la calcita como la principal fuente de iones calcio y bicarbonato en el agua, como se muestra en las ecuaciones 3 y 4.⁸¹



Sin embargo, si todos los iones Ca^{2+} y Mg^{2+} se derivaran de la disolución de carbonatos, la relación $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / HCO_3^-$ debería ser igual a 1, mientras que si se derivara únicamente de la disolución de dolomita, debería ser 1:2.⁸² En el caso del acuífero Poás se encontraron relaciones entre 0,84 y 4,52, siendo en su gran mayoría mucho mayores a 1, lo cual indica que existen otras fuentes de calcio y magnesio además de la disolución de dolomita, la cuales podrían deberse a fenómenos como el intercambio catiónico inverso y/o la disolución de yeso. Por otro lado, los puntos RP20 y RP21, ubicados en la zona baja de la cuenca, presentaron valores de relación menores a 1. Bajas concentraciones de calcio y magnesio se atribuyen a procesos químicos como el intercambio catiónico en el cual los cationes divalentes de $Ca^{2+} + Mg^{2+}$ son reemplazados por cationes monovalentes como Na^+ y K^+ .⁸²

La relación del Ca^{2+} vs. HCO_3^- (figura 12(b)) demuestra que también se genera la disolución de la calcita, la cual influye en la concentración de los iones bicarbonato y calcio. Si estos iones se originaran únicamente a partir de la calcita, la proporción de Ca^{2+} y HCO_3^- disueltos sería 1:2.⁸² Como se puede observar, existen valores que se encuentran prácticamente sobre esta línea, los cuales pertenecen a los puntos RP20 y RP21. En la figura 12(a) se pudo observar que estos puntos también presentaron bajas concentraciones de calcio y magnesio en comparación con el bicarbonato, atribuyéndose a procesos de intercambio catiónico, sin embargo, otra explicación a este comportamiento se puede deber a que en estos puntos predomina la disolución de calcita sobre la disolución de dolomita. El exceso de HCO_3^- con respecto al Ca^{2+} también puede provenir de la disolución de CO_2 de la atmósfera, el cual se disuelve en el agua de lluvia y, al infiltrarse en el suelo, queda atrapado en los espacios

porosos, principalmente en aquellos que cuentan con gran crecimiento radicular y presencia de materia orgánica en descomposición.⁸³ El CO_2 (g) reacciona con el agua para formar H_2CO_3 , el cual se disocia en iones HCO_3^- y H^+ , y luego el HCO_3^- en iones CO_3^{2-} y H^+ , siendo el HCO_3^- la especie dominante en aguas con valores de pH entre 6,5 y 10,0.⁸³

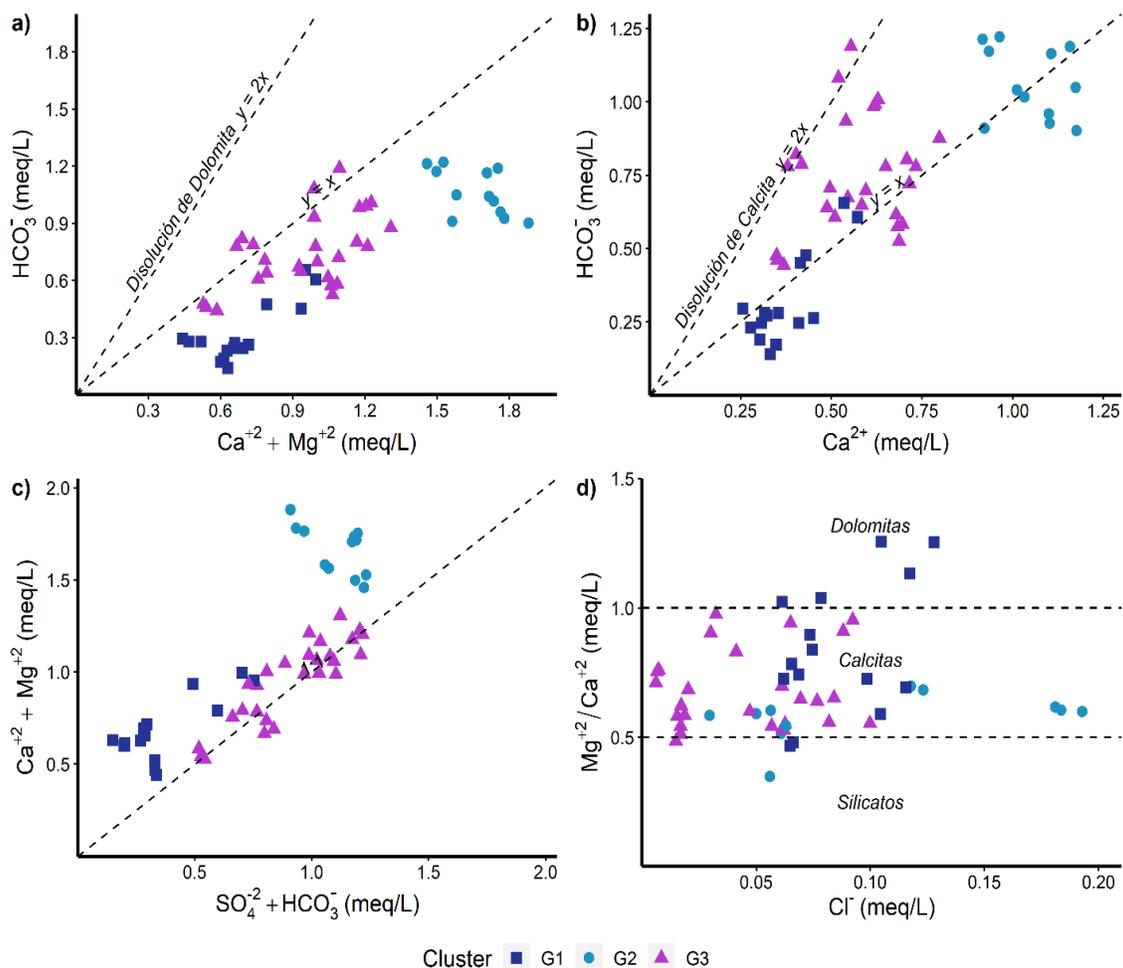


Figura 12. Relaciones iónicas obtenidas para los puntos muestreados del acuífero Poás: a) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs HCO_3^- , b) Ca^{2+} vs. HCO_3^- , c) $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ vs $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y d) Cl^- vs $\text{Mg}^{2+} / \text{Ca}^{2+}$.

En la figura 12(c) se muestra la relación iónica $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$ vs. $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ para los puntos muestreados del acuífero Poás en la cual, los puntos cercanos a la línea 1:1 representan aquellas muestras de agua subterránea que se ven mayormente influenciadas por la disolución de carbonatos y silicatos.⁸⁴ Como se observa en esta figura, los puntos pertenecientes al grupo 3, son los más cercanos a esta línea, por lo que la presencia de iones bicarbonato, calcio y magnesio en estas muestras, se debe principalmente a la disolución de dolomita y calcita, ya que, la disolución de yeso no es significativa en los puntos muestreados. Por otro lado, las

muestras pertenecientes a los grupos 1 y 2 se encuentran muy por encima de la línea 1:1, indicando que el agua de estos puntos se ve mayormente influenciada por procesos de intercambio iónico inverso, en el cual el sodio presente en el agua subterránea es reemplazado por iones calcio y magnesio en sitios de intercambio favorables en la matriz del acuífero, explicando de esta manera, las altas concentraciones de iones calcio y magnesio en comparación con los iones sodio y potasio.⁸⁵

Por otro lado, en la figura 12(d) se muestra la relación Cl^- vs $(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})$ en la cual se ejemplifica la disolución de los principales minerales que afectan la química del agua del acuífero Poás. Relaciones menores a 0,5 se asocian con la disolución de silicatos, la cual, como se puede observar, se presentó en casos muy aislados representados por los puntos RP05, RP15 y RP16 en al menos uno de los tres muestreos realizados. Por otro lado, la disolución de dolomitas se presenta en aquellos valores de relación mayores a 1, siendo los puntos RP10 y RP11, pertenecientes al grupo 1, los influenciados por este proceso. Por último, todos los valores encontrados entre 0,5 y 1,0 son asociados con la disolución de calcita, siendo este proceso el que afecta predominantemente la composición química del agua presente en el acuífero Poás.⁸⁶

Por último, con el fin de explicar el comportamiento de iones indicadores de contaminación hidrogeológica, se muestran las relaciones iónicas Cl^-/Na^+ vs. $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ (figura 13(a)) y $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ vs. $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ (figura 13(b)). La contaminación producto de actividades agrícolas se caracteriza por contar con relaciones $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ cercanas a 10 y relaciones $\text{SO}_4^{2-}/\text{Na}^+$ cercanas a 1,⁸⁷ mientras que las proporciones Cl^-/Na^+ mayores a 1 indican la influencia de evaporitas, como la disolución de halita, y aquellas relaciones menores a 1 (cercanos a 0,7) se relacionan con la influencia de lixiviados de tanques sépticos.⁸⁸ Por otro lado, las bajas proporciones de ion nitrato e ion cloruro en términos de sodio se relacionan con la influencia de silicatos y carbonatos.⁸⁸ Como se puede observar en la figura 13(a), las muestras se ubican alrededor de la línea $x=y$, evidenciando que las concentraciones de ion nitrato son influenciadas por la contaminación producto de actividades agrícolas,⁸⁹ siendo mayormente afectadas las muestras encontradas en el grupo 1, entre las cuales destacan los puntos RP10 y RP11, con valores de $\text{NO}_3^-/\text{Na}^+$ entre 3 y 5. Además, la mayoría de los sitios pertenecientes a este grupo, presentaron valores de Cl^-/Na^+ cercanos a 1, evidenciando la afectación producto de la

infiltración de aguas residuales en el acuífero. Dicha afectación disminuye en gran medida en el grupo 2, sin embargo, muestras con alto contenido de ion nitrato (RP14 y RP04) destacan con valores muy cercanos a 0,7.

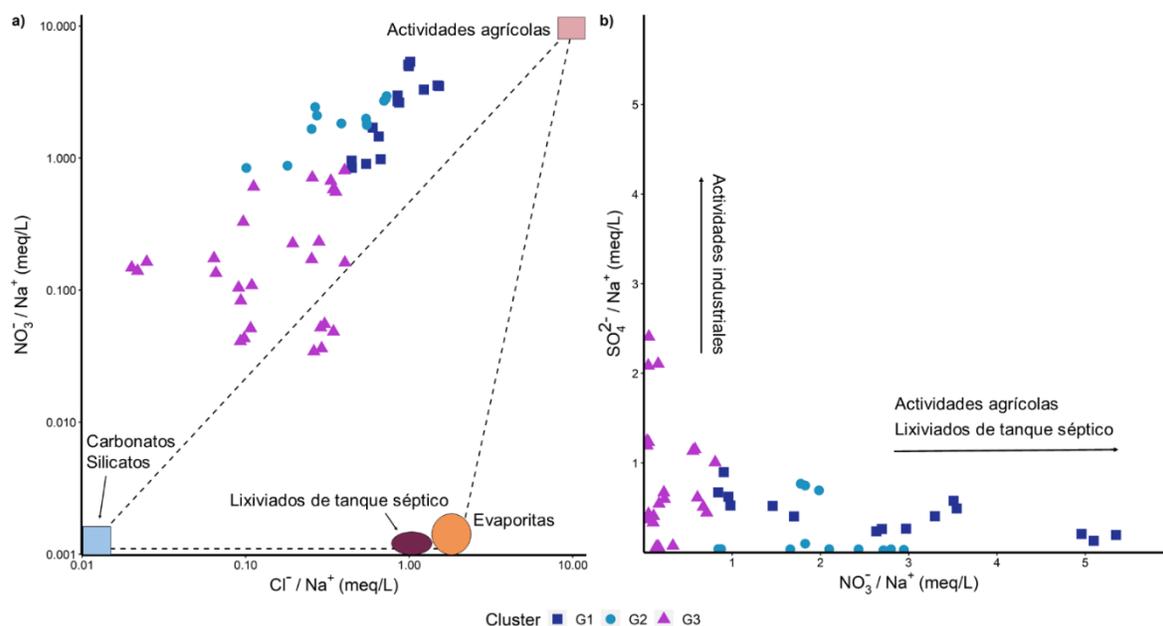


Figura 13. Relaciones iónicas para los puntos muestreados en el acuífero Poás: a) Cl^-/Na^+ vs. NO_3^-/Na^+ y b) NO_3^-/Na^+ vs. SO_4^{2-}/Na^+ .

Tanto en la figura 13(a) como 13(b) se observa que los puntos del grupo 3, son los que poseen menor influencia de contaminación hidrogeológica, concordando con las características hidrogeoquímicas descritas anteriormente, como menor concentración de ion nitrato, comprobando de esta forma, que la influencia de actividades agrícolas y lixiviados de tanques sépticos afectan de manera importante la calidad del agua del acuífero Poás.

4.6 Análisis de correlaciones

Con el fin de determinar si existen correlaciones monotónicas entre las variables estudiadas, se realizó una matriz de correlación mediante el método Spearman. En la figura 14 se observa el gráfico realizado con el fin de facilitar el entendimiento de dicha matriz.

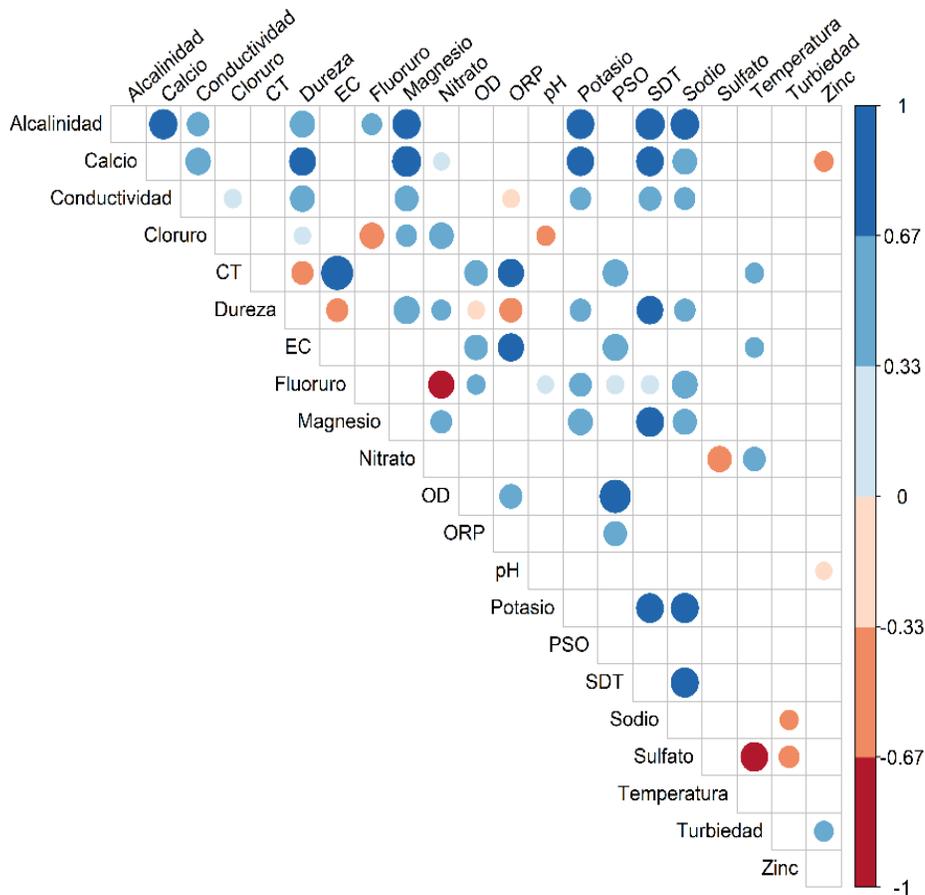


Figura 14. Matriz de correlación de Spearman entre los parámetros analizados en la zona de estudio (la escala describe los valores del coeficiente Rho; las casillas en blanco indican valores $p > 0,05$)

Las casillas en blanco representan aquellas correlaciones que no son estadísticamente significativas ($p > 0,05$), mientras que las casillas que poseen círculos coloreados hacen referencia a correlaciones significativas, en las cuales tanto la intensidad de su color como su dimensión representan si la correlación es alta, media o baja de acuerdo con la escala ubicada al lado derecho, haciendo la salvedad de que la diferencia entre colores únicamente indica si la correlación es positiva o negativa.

De un total de 231 posibles correlaciones, solamente 70 (30%) son significativas, de las cuales, 18 presentaron una alta correlación positiva y 2 presentaron una alta correlación negativa, destacando entre los valores más altos (mayores a $\pm 0,80$) las relaciones CT-EC, PSO-OD, SDT-alcalinidad, calcio-magnesio, sodio-alcalinidad y temperatura-sulfato. Las restantes relaciones que presentaron una alta correlación fueron principalmente entre los iones mayoritarios, la alcalinidad, la dureza y los SDT, lo cual es común en aguas

subterráneas debido a los procesos naturales de mineralización del agua explicados anteriormente.⁹⁰ Sin embargo, correlaciones estadísticamente significativas entre parámetros que no se atribuyen a la influencia de fuentes minerales como CT-EC, nitrato-cloruro, nitrato-fluoruro y nitrato-sulfato se asocian con procesos no naturales que están generando presión sobre el acuífero como los fertilizantes agrícolas, los efluentes de aguas residuales y las fosas sépticas generados por la actividad agrícola y la creciente urbanización en la zona.⁹¹

4.7 Análisis de Componentes Principales

Debido al amplio conjunto de datos en estudio, para el análisis de componentes principales se sometió a juicio crítico y objetivo, basándose en el análisis de correlaciones realizado anteriormente, la omisión de aquellas variables que describen el mismo proceso o que están altamente correlacionadas, con el fin de permitir que las variables de mayor relevancia sean la que expliquen la variación del conjunto de datos en términos de pocas componentes. De acuerdo con la regla de Kaiser⁹², se obtuvieron tres componentes considerados como significativos (valores de autovectores mayores a 1), entre los cuales se explica un 83% de la variación total del conjunto de datos. En el anexo 13 se muestran los valores de los autovectores (eigenvalue) obtenidos.

En la figura 15 se observa el gráfico que representa el factor de carga de cada variable dentro de los primeros dos componentes, el componente 1 (PC1), el cual representa un 39,1% de la variación total del conjunto de datos, y el componente 2 (PC2), el cual representa un 28,4%. En el caso del componente 1, se puede observar que 4 de las 10 variables que lo integran, poseen un factor de carga alto (mayor a 0,75), mientras que 2 de las variables poseen un factor de carga medio (0,50-0,75). Por ende, los parámetros de alcalinidad, SDT, potasio, sodio, dureza y fluoruro son los principales influyentes en la variabilidad de los datos, sugiriendo que la marcada diferencia de calidad y características hidrogeoquímicas de las muestras analizadas se debe a estas variables.

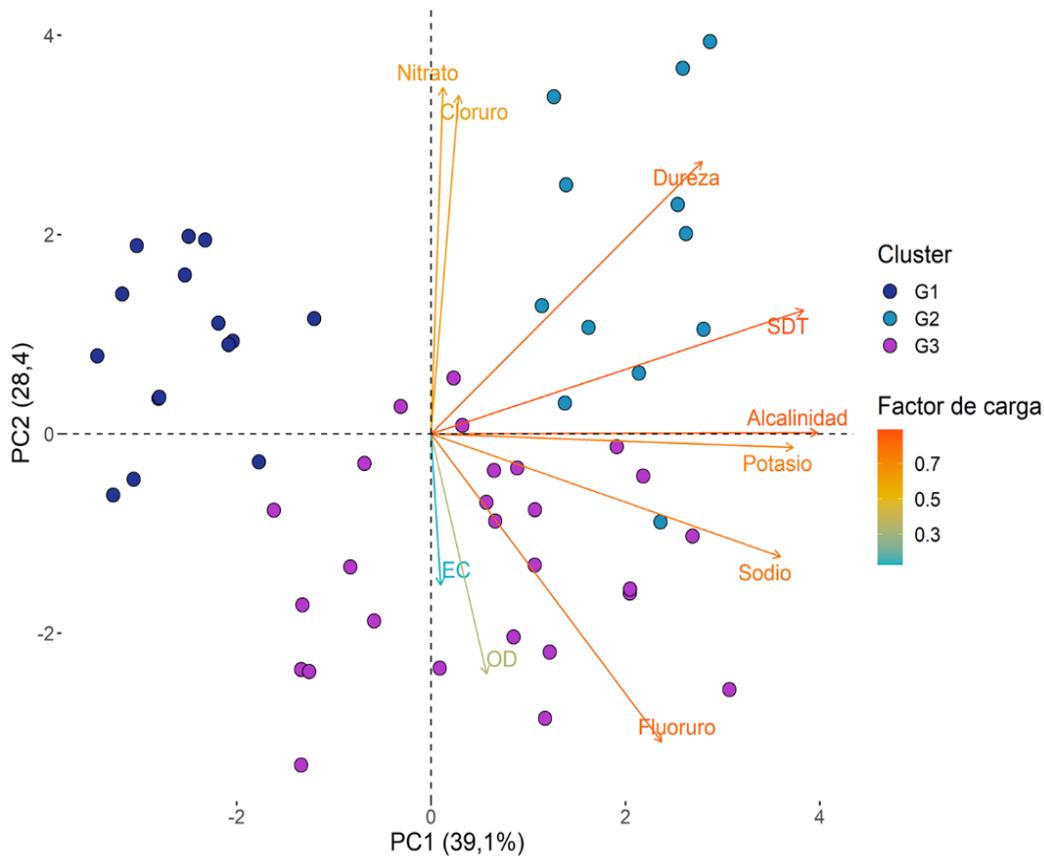


Figura 15. Análisis de los componentes principales de los parámetros físicos y químicos del agua en el acuífero Poás.

Por su parte, en el componente 2 se observan 2 variables con un factor de carga alto, nitrato y cloruro, los cuales, como se mencionó anteriormente se correlacionan de manera significativa y generalmente son asociados con el impacto de actividades antropogénicas que promueven el deterioro de la calidad del agua potable.

Por otro lado, en la figura 15 también se pueden observar las asociaciones de los clusters obtenidos en el análisis de conglomerados con los parámetros que explican la variabilidad de los datos. Las variables del componente 1 influyen en mayor medida al cluster 2 y al cluster 3, en los cuáles se agrupan los puntos muestreados con los valores más altos de alcalinidad, mientras que las variables del componente 2 influyen en mayor medida al cluster 1 y al cluster 2, agrupándose aquellos puntos con las concentraciones más altas de ion nitrato y, por ende, los más influenciados por la actividad antropogénica.

4.8 Relación de los Indicadores de Contaminación Hidrogeológica con las Zonas de Vulnerabilidad

En la figura 16 se observa la ubicación de los sitios de muestreo con respecto a las zonas de vulnerabilidad, clasificados de acuerdo con el nivel de riesgo obtenido al aplicar el IRCACH. Al analizar esta figura, se observa a simple vista que no existe una relación entre el nivel de riesgo y las zonas de vulnerabilidad a la contaminación, ya que los puntos que obtuvieron un riesgo muy bajo, se ubican en zonas de vulnerabilidad alta, media y baja, siendo el punto RP05 el único que coincide con el nivel de riesgo.

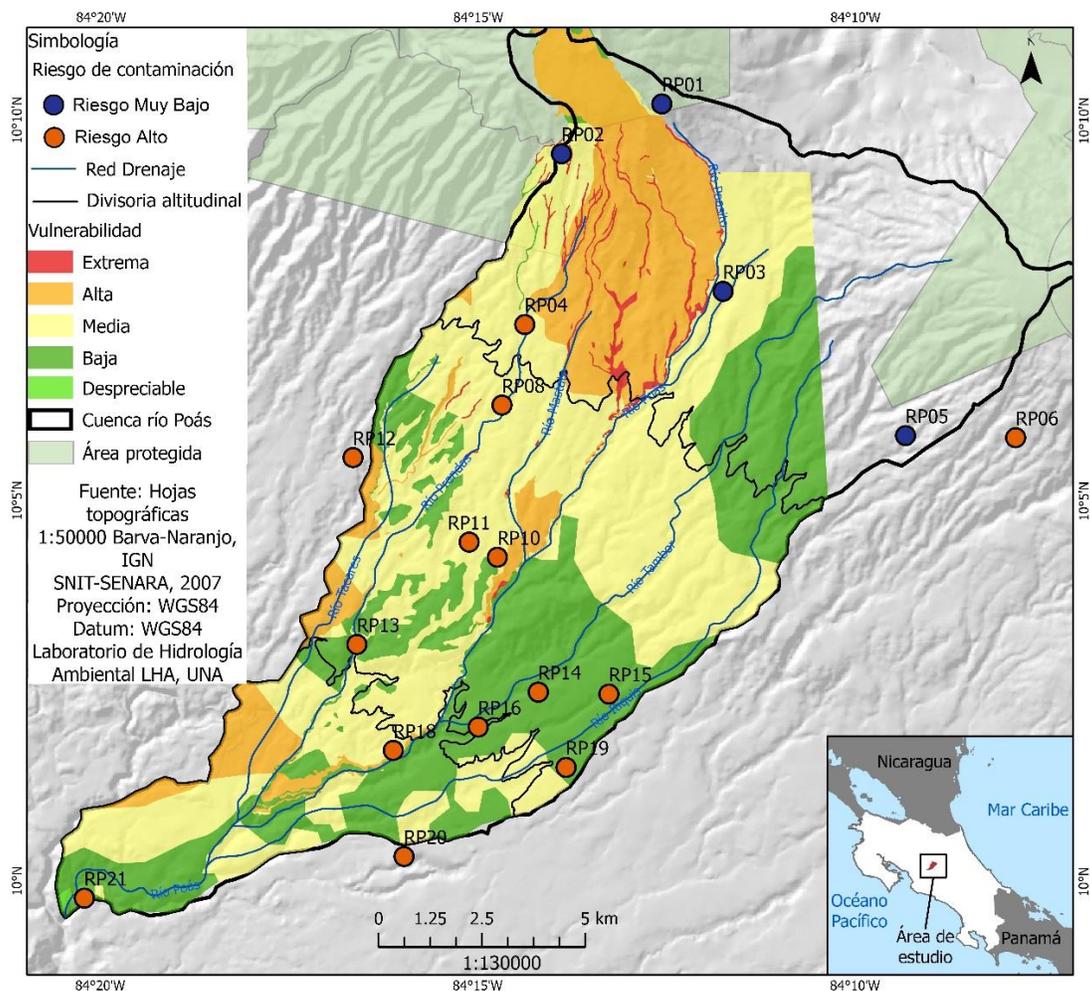


Figura 16. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo con respecto a las zonas de vulnerabilidad a la contaminación propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA, clasificados de acuerdo con el nivel de riesgo obtenido.

Por esta razón, con el fin de comprobar estadísticamente si existe alguna relación entre los aumentos de la concentración de indicadores de contaminación hidrogeológica con las zonas de vulnerabilidad, se realizaron tablas de contingencia para relacionar tanto los niveles de riesgo obtenidos como la concentración de nitrato y de CT encontrada en los puntos muestreados con las zonas de vulnerabilidad propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA. Estas tablas de contingencia juntos con los valores *chi* y *p* obtenidos se muestran en los anexos 15, 16 y 17.

En las figuras 17 y 18 se muestran los gráficos que representan los resultados obtenidos con base en las tablas de contingencia generadas.

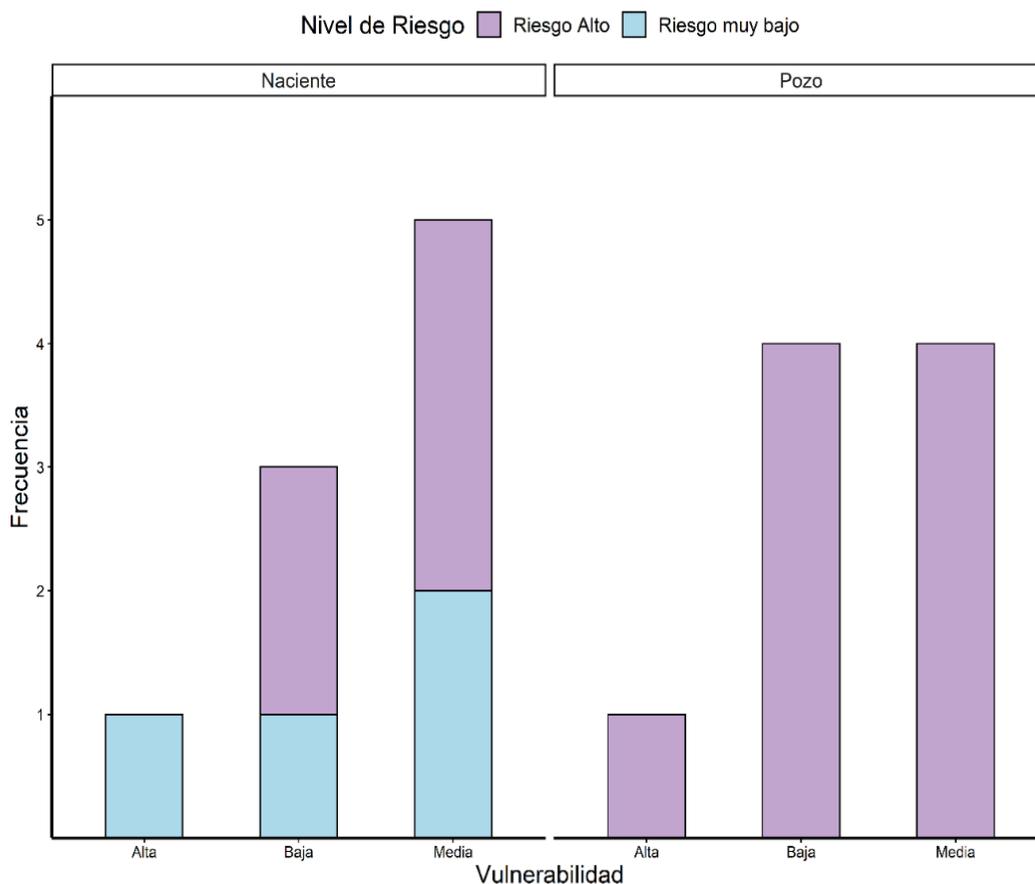


Figura 17. Frecuencia de sitios de muestreo que presentaron niveles de riesgo "alto" y "muy bajo", al aplicar el IRCACH, de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

Como se puede observar en la figura 17, de los dos puntos encontrados en zona de vulnerabilidad alta, uno se clasificó como “riesgo alto” y otro como “riesgo muy bajo”, siendo el punto RP01 el clasificado como “riesgo muy bajo”, el cual al encontrarse en el

punto más alto, se encuentra más alejado de la influencia antropogénica, viéndose reflejado en sus características fisicoquímicas y microbiológicas; mientras que el punto RP12, además de encontrarse en un sitio clasificado como altamente vulnerable, se encuentra en la zona media de la cuenca, donde las actividades antropogénicas ejercen mayor presión sobre el acuífero en comparación con la zona alta. Por su parte, en la zona de vulnerabilidad media, se muestrearon 9 puntos, de los cuales 7 se clasificaron como “riesgo alto” y 2 como “riesgo muy bajo”, siendo estos dos últimos los puntos RP02 y RP03 ubicados en la zona alta de la cuenca. Por último, de los 7 sitios muestreados en la zona de baja vulnerabilidad, solamente un sitio fue clasificado como “riesgo muy bajo”, mientras que los demás fueron clasificados como “riesgo alto”. Este sitio corresponde al punto RP05 ubicado nuevamente en la zona alta de la cuenca.

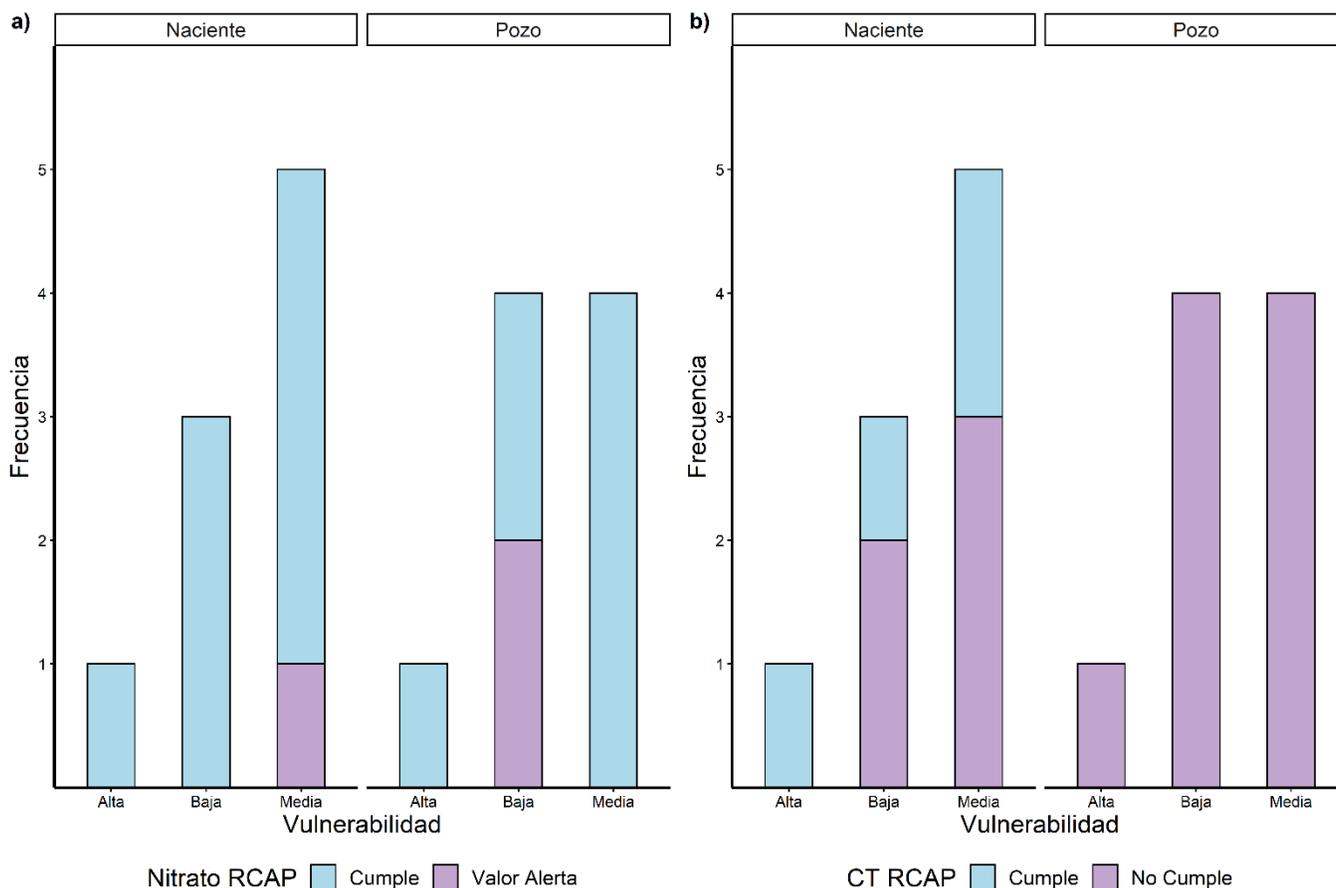


Figura 18. Frecuencia de sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a: a) la concentración de nitrato y b) la concentración de CT, de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

En la figura 18(a) se representan los sitios de muestreo que cumplieron con el “Reglamento de la Calidad para el Agua Potable” y los que presentaron un valor alerta (mayor a 25 mg/L) para el parámetro de concentración de ion nitrato con respecto a las zonas de vulnerabilidad. Se decidió tomar como punto de comparación la concentración de nitrato, ya que este ion es un importante indicador de contaminación, el cual se encontró en altas concentraciones a través del acuífero. Como se puede observar, de los valores alerta obtenidos (RP04, RP14 y RP15), 2 se ubican en la zona de baja vulnerabilidad, mientras que uno se ubica en la zona de vulnerabilidad media. Por su parte, en la figura 18(b) se muestra el cumplimiento de los sitios muestreados con respecto a la concentración de CT encontrada. Como se mencionó anteriormente, únicamente 4 de los 18 sitios muestreados presentaron ausencia en CT (RP01, RP02, RP03 y RP05), siendo este parámetro el que influyó en gran medida al calcular nivel de riesgo del IRCACH, ya que todos los puntos con presencia de CT fueron clasificados como “riesgo alto”.

Con base en estos datos presentados y con los valores *chi* y *p* obtenidos al realizar las tablas de contingencia, se observa que no existe una relación significativa entre las zonas de vulnerabilidad a la contaminación y los principales indicadores de contaminación, debido al alto riesgo de contaminación presentado en la mayoría de las muestras, influenciado principalmente por la importante concentración de coliformes encontrada, siendo esta una evidencia de que las principales fuentes de contaminación están influenciando de manera significativa la calidad del agua del acuífero Poás, siendo de suma importancia identificar en estudios futuros las principales fuentes de contaminación, como insumo para un manejo hídrico integrado de la zona, en el cual el agua pueda ser un recurso seguro y aprovechable para la población futura. Además, debido a que la vulnerabilidad a la contaminación no se relaciona de manera significativa con la calidad del agua se recomienda que, a la hora de planificar el uso del territorio, se tomen en cuenta, además de las propiedades intrínsecas del suelo de la zona, análisis fisicoquímicos que comprueben la calidad del agua potable, con el fin de que la protección de los recursos hídricos subterráneos sea llevada a cabo de manera íntegra.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se determinó que los puntos muestreados cumplen, en la mayoría de los parámetros medidos, con la normativa nacional, a excepción de los parámetros de pH, *E.coli* y coliformes totales.

Se evidenció que el agua presente en este acuífero posee una tendencia a ser blanda. Los iones más abundantes encontrados fueron el catión calcio y el anión bicarbonato, sin embargo, la concentración de bicarbonato encontrada fue por debajo de 40 mg/L, clasificando el agua como poco alcalina.

La concentración del ion nitrato se encontró por debajo del límite máximo admisible en la normativa nacional, sin embargo, diversos puntos muestreados superaron el valor alerta (25 mg/L), siendo un importante indicador de contaminación el cual se asocia con la influencia de actividades agrícolas e infiltración de aguas residuales de la zona, por lo tanto, como método para trazar las principales fuentes de ion nitrato, se recomienda utilizar el análisis de los isótopos $\delta^{15}\text{N-NO}_3^-$ y $\delta^{18}\text{O-NO}_3^-$ con el fin de proponer medidas que promuevan la reducción del ion nitrato en la fuente y la remediación in situ.

Se encontraron concentraciones de ion sulfato muy cercanas al valor alerta (25 mg/L) en el punto RP01. Debido a la diversidad de fuentes a las que se les puede atribuir la alta concentración de este ion, se recomienda en estudios futuros analizar las concentraciones de los isótopos $\delta^{34}\text{S-SO}_4^{2-}$ y $\delta^{18}\text{O-SO}_4^{2-}$, con el fin de identificar las principales fuentes de sulfato y los procesos de los ciclos biogeoquímicos del azufre que influyen en este punto en particular.

Para todos los metales analizados se obtuvieron valores por debajo del límite de cuantificación, a excepción del zinc, el cual presentó valores cuantificables en los puntos RP10 y RP21 en al menos dos de los muestreos realizados.

Se encontraron altas concentraciones de CT y *E. Coli* en la mayoría de los sitios muestreados. Al aplicar el IRCACH se determinó que 14 de los 18 puntos muestreados cuentan con un “riesgo alto”, siendo principalmente afectados por la presencia de CT. Esta alta concentración es indicativo de contaminación fecal, por lo cual se recomienda trabajar en conjunto con los entes administradores del agua de estos sitios para verificar que los procesos de cloración se

están realizando de manera correcta y verificar que posean y pongan en práctica planes de seguridad del agua con el fin de identificar y priorizar los peligros y eventuales riesgos que pueden llegar a comprometer la calidad e inocuidad del agua en los sistemas de abastecimiento.

Al realizar el análisis de conglomerados, se lograron clasificar los puntos muestreados en 3 grupos principales. En el grupo 1 se encontraron los puntos RP10, RP11, RP12, RP16 y RP18, en el grupo 2 se encontraron los puntos RP04, RP14, RP15 y RP19 y en el grupo 3 se encontraron los puntos RP01, RP02, RP03, RP05, RP06, RP08, RP13, RP20 y RP21. Estos grupos son explicados principalmente por las características hidrogeoquímicas del acuífero, a diferencia del grupo 2 en el cual se encontraron puntos ubicados en la zona alta y media de la cuenca caracterizados por presentar concentraciones altas de ion nitrato.

Por medio del diagrama de Piper se identificó que el agua de los puntos muestreados es de tipo “bicarbonatada cálcica y/o magnésica”, a excepción del punto RP01 el cual fue clasificado como tipo “mixto”, siendo afectado por las altas concentraciones de ion sulfato encontrada, mientras que por medio del diagrama de Gibbs se encontró que la meteorización es el principal mecanismo influyente en la formación del agua subterránea. Ambos hallazgos indican que el acuífero permanece en constante recarga, la cual se relaciona con la predominancia del ion bicarbonato.

La disolución de la calcita es el proceso que afecta predominantemente la composición química del agua presente en el acuífero Poás, mientras que la disolución de silicatos y de dolomitas influye en puntos muy aislados del acuífero. Además, por medio de las relaciones Cl^-/Na^+ vs. NO_3^-/Na^+ y NO_3^-/Na^+ vs. SO_4^{2-}/Na^+ se comprobó que las actividades agrícolas y lixiviados de tanques sépticos afectan de manera importante la calidad del agua del acuífero Poás, siendo mayormente afectados los sitios de muestreo pertenecientes a los grupos 1 (RP10, RP11, RP12, RP16 y RP18) y 2 (RP04, RP14, RP15 y RP19).

De las correlaciones obtenidas entre los parámetros analizados, solamente un 30% son significativas. Las relaciones que presentaron una alta correlación fueron principalmente entre los iones mayoritarios, la alcalinidad, la dureza y los SDT, lo cual es común en aguas subterráneas debido a los procesos naturales de mineralización del agua. Aquellas

correlaciones estadísticamente significativas entre parámetros que no se atribuyen a la influencia de fuentes minerales como CT-EC, nitrato-cloruro, nitrato-fluoruro y nitrato-sulfato se asocian con procesos no naturales que están generando presión sobre el acuífero.

De acuerdo con el análisis de componentes principales, se obtuvieron tres componentes consideradas como significativas las cuales explican un 83% de la variación total del conjunto de datos. El componente 1 indica que los parámetros de alcalinidad, SDT, potasio, sodio, dureza y fluoruro son los principales influyentes en la variabilidad de los datos, mientras que en el componente 2 las variables de nitrato y cloruro se asocian con el impacto de actividades antropogénicas que promueven el deterioro de la calidad del agua potable, las cuales afectan en mayor medida a los puntos pertenecientes a los grupos 1 y 2.

Con base en los resultados obtenidos se concluye que no existe una relación significativa entre las zonas de vulnerabilidad a la contaminación y los principales indicadores de contaminación, por lo cual, se rechaza la hipótesis planteada debido al alto riesgo de contaminación presentado en la mayoría de las muestras, influenciado principalmente por la importante concentración de CT encontrada, siendo esta una evidencia de que las amenazas a la contaminación hidrogeológica están afectando de manera significativa la calidad del agua del acuífero Poás. Por esta razón se recomienda que, a la hora de planificar el uso del territorio, se tomen en cuenta, además de las propiedades intrínsecas del suelo, análisis fisicoquímicos que comprueben la calidad del agua potable de la zona.

CAPÍTULO VI: REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- (1) Antón, D. J. *Ciudades Sedientas: Agua y Ambientes Urbanos En América Latina*; Editorial NORDAN, UNESCO: Montevideo, Uruguay, 1996.
- (2) Jarrín, A.; Salazar, J. G.; Martín, M. Evaluación Del Riesgo a La Contaminación de Los Acuíferos de La Reserva Biológica de Limoncocha, Amazonía Ecuatoriana. *Rev. Ambient. Água* **2017**, *12* (4), 652–665.
- (3) Agudelo, C.; Ramírez, R. *Guía Metodológica Para La Aplicación de La Matriz Genérica de Protección de Acuíferos*; Dirección de Investigación y Gestión Hídrica, SENARA: San José, Costa Rica, 2017.
- (4) Vargas, J. R.; Merino, J. F. Presente y Futuro de Las Aguas Subterráneas En El Valle Central. *Manejo Integr. Aguas Subterráneas* **2002**, 19–32.
- (5) Li, S. A.; Salguero, M. E. A.; Penón, M. L. Estado Del Conocimiento Del Agua Subterránea En Costa Rica. *Boletín Geológico y Min.* **2006**, *117* (1), 63–73.
- (6) Madrigal, H.; Fonseca, A.; Reynolds, J. Caracterización Hidrogeoquímica de Los Acuíferos Volcánicos Barva y Colima En El Valle Central de Costa Rica. *Tecnol. y Ciencias del Agua* **2017**, *8* (1), 115–132.
- (7) *Plan Cantonal de Desarrollo Humano Local de Poás 2016-2025*; Municipalidad de Poás: Equipo de Gestión Local del Plan de Desarrollo Humano Cantonal de Poás: Alajuela, Costa Rica, 2015.
- (8) Pérez, J. W. *Hidrogeología Del Área Oeste Del Valle Central*; Servicio Nacional de Aguas Subterráneas, Riego y Avenamiento: Área de Aguas Subterráneas: San José, Costa Rica, 2001.
- (9) Li, D.; Liu, S. Chapter 11 - Groundwater Quality Detection. In *Water Quality Monitoring and Management*; Li, D., Liu, S., Eds.; Academic Press, 2019; pp 269–302.
- (10) Gupta, S. K. Groundwater Hydrology. In *Modern Hydrology and Sustainable Water Development*; John Wiley & Sons, Ltd, 2010; pp 70–94.
- (11) Stone, A.; Lanzoni, M.; Smedley, P. Groundwater Resources. In *Water Science, Policy, and Management*; John Wiley & Sons, Ltd, 2019; pp 29–54.
- (12) Babiker, I. S.; Mohamed, M. A. A.; Hiyama, T. Assessing Groundwater Quality Using GIS. *Water Resour. Manag.* **2007**, *21* (4), 699–715. <https://doi.org/10.1007/s11269-006-9059-6>.
- (13) Foster, S.; Hirata, R.; Gomes, D.; D'ELia, M.; Paris, M. *Protección de La Calidad Del Agua Subterránea. Guías Para Empresas de Agua, Autoridades Municipales y Agencias Ambientales*; The World Bank: Washington, DC, 2002.

- (14) World Health Organization (WHO). *Protecting Groundwater for Health: Managing the Quality of Drinking-Water Sources*; Schmoll, O., Howard, G., Chilton, J., Chorus, I., Eds.; World Health Organization, 2006.
- (15) Castro, M.; Almeida, J.; Ferrer, J.; Diaz, D. Indicadores de La Calidad Del Agua: Evolución y Tendencias a Nivel Global. *Ing. Solidar*. **2014**, *10* (17), 111–124.
- (16) Herrera, J.; Rodríguez, S.; Solís, L.; Castro, F. Aplicación de Técnicas Quimiométricas Para Clasificar La Calidad de Agua Superficial de La Microcuenca Del Río Bermúdez En Heredia, Costa Rica. *Tecnol. en Marcha* **2009**, *22* (4), 75–85.
- (17) Presidente de la República y Ministra de Salud. *Decreto N° 32327-S: Reglamento Para La Calidad Del Agua Potable*; Costa Rica, 2005.
- (18) Mora, D.; Orozco, J.; Rivera, P.; Solís, Y.; Zúñiga, L.; Cambroner, D.; Urbina, A. Índice de Riesgo de La Calidad Del Agua Para Consumo Humano En Costa Rica. Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados: San José, Costa Rica 2018.
- (19) Zhen, B. Y. Calidad Fisico-Química y Bacteriológica Del Agua Para Consumo Humano de La Microcuenca de La Quebrada Victoria, Curubandé, Guanacaste, Costa Rica, Universidad Estatal a Distancia, 2009.
- (20) Organización Mundial de La Salud. *Guías Para La Calidad Del Agua de Consumo Humano*, Cuarta Ed.; Ginebra, 2011.
- (21) Concannon, C.; Clenaghan, C.; Cunningham, P.; Delaney, J.; Boyle, S. O.; Maccárthaigh, M.; Craig, M.; Quinn, R. *Water Quality in Ireland 2001-2003*; Environmental Protection Agency, 2005.
- (22) Chapman, D. *Water Quality Assessments: A Guide to the Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring*; F & FN Spon: Londres, 1996; pp 1–609.
- (23) Ríos-Mendoza, L. M.; Macías-Zamora, J. V.; Zirino-Weiss, A. R. Iridio: Una Opción Para Medir El Potencial Redox. *Ciencias Mar.* **2003**, *29* (4), 509–520.
- (24) Walker, P. J. WATER SUPPLIES | Chemical Analysis. In *Encyclopedia of Food Sciences and Nutrition*; Caballero, B., Ed.; Academic Press: Oxford, 2003; pp 6111–6117.
- (25) Rajesh, R.; Elango, L.; Brindha, K. Chapter 6 - Methods for Assessing the Groundwater Quality. In *GIS and Geostatistical Techniques for Groundwater Science*; Venkatramanan, S., Prasanna, M. V., Chung, S. Y., Eds.; Elsevier, 2019; pp 57–78.
- (26) Khan, S.; Ali, J. Chemical Analysis of Air and Water. In *Bioassays*; Häder, D.-P., Erzinger, G. S., Eds.; Elsevier, 2018; pp 21–39.
- (27) Pacheco, J.; Cabrera, A. Fuentes Principales de Nitrógeno de Nitratos En Aguas Subterráneas. *Ingeniería* **2003**, *7* (2), 47–54.
- (28) Barrientos, Y.; Méndez Mata, W.; Ruiz, S.; Perdomo, Y.; Iztúriz, A. Concentraciones

de Metales Mayoritarios y Trazas En Dos Cuerpos de Agua Del Estado Vargas, Venezuela; 2007.

- (29) Rodgers, M.; Boczek, L. Microbes and Water Quality in Developed Countries. In *Encyclopedia of Environmental Health (Second Edition)*; Nriagu, J., Ed.; Elsevier: Oxford, 2011; pp 370–376.
- (30) Stauffer, F. Groundwater Protection. In *Encyclopedia of Hydrological Sciences*; American Cancer Society, 2009.
- (31) Güler, C.; Thyne, G. D.; McCray, J. E.; Turner, K. A. Evaluation of Graphical and Multivariate Statistical Methods for Classification of Water Chemistry Data. *Hydrogeol. J.* **2002**, *10* (4), 455–474.
- (32) Sánchez, J. A.; Álvarez, T.; Pacheco, J. G.; González, R. A.; Carrillo, L. Caracterización Hidrogeoquímica de Las Aguas Subterráneas Del Sur Del Estado de Quintana Roo, México. *Rev. mex. cienc, geol* **2015**, *32* (1), 62–76.
- (33) Şen, Z. Chapter 5 - Groundwater Quality. In *Practical and Applied Hydrogeology*; Şen, Z., Ed.; Elsevier: Oxford, 2015; pp 279–339.
- (34) Abdeslam, I.; Fehdi, C.; Djabri, L. Application of Drastic Method for Determining the Vulnerability of an Alluvial Aquifer: Morsott - El Aouinet North East of Algeria: Using Arcgis Environment. *Energy Procedia* **2017**, *119*, 308–317. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.egypro.2017.07.114>.
- (35) Doerfliger, N.; Jeannin, P.-Y.; Zwahlen, F. Water Vulnerability Assessment in Karst Environments: A New Method of Defining Protection Areas Using a Multi-Attribute Approach and GIS Tools (EPIK Method). *Environ. Geol.* **1999**, *39* (2), 165–176. <https://doi.org/10.1007/s002540050446>.
- (36) Pereira, D. L.; Galvão, P.; Lucon, T.; Fujaco, M. A. Adapting the EPIK Method to Brazilian Hydro(Geo)Logical Context of the São Miguel Watershed to Assess Karstic Aquifer Vulnerability to Contamination. *J. South Am. Earth Sci.* **2019**, *90*, 191–203. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.12.011>.
- (37) Hernando, L. Recarga de Aguas Subterráneas En La Cuenca Del Río Poás. *Rev. Geográfica América Cent.* **1993**, *1* (27), 137–151.
- (38) APHA. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 22nd ed.; American Public Health Association: Washington, DC, 2012.
- (39) UNEP/WHO. *Water Quality Monitoring - A Practical Guide to the Design and Implementation of Freshwater Quality Studies and Monitoring Programmes.*; 1996.
- (40) Trick, J. K.; Stuart, M.; Reeder, S. Chapter 3 - Contaminated Groundwater Sampling and Quality Control of Water Analyses. In *Environmental Geochemistry (Second Edition)*; Vivo, B. De, Belkin, H. E., Lima, A., Eds.; Elsevier, 2018; pp 25–45. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63763-5.00004-5>.

- (41) Custodio, E.; Llamas, M. R. *Hidrología Subterránea Tomo I*, Segunda Ed.; Ediciones Omega S.A.: Barcelona, 1983.
- (42) Teng, W. C.; Fong, K. L.; Shenkar, D.; Wilson, J. A.; Foo, D. C. Y. Piper Diagram – A Novel Visualisation Tool for Process Design. *Chem. Eng. Res. Des.* **2016**, *112*, 132–145.
- (43) San Juan, R. A. Caracterización Hidrogeoquímica de Recursos Hídricos de La Cuenca de Santiago, Universidad de Chile, 2015.
- (44) Garriga, A. J.; Lubin, P.; Merino, J. M.; Padilla, M.; Recio, P.; Suárez, J. C. *Introducción Al Análisis de Datos*; Editorial UNED: Madrid, España, 2010.
- (45) NCSS. Contingency Tables Square Test <https://www.ncss.com/> (accessed Feb 13, 2022).
- (46) Balzarini, M.; Bruno, C.; Córdoba, M.; Teich, I. *Herramientas En El Análisis Estadístico Multivariado*; Escuela Virtual Internacional CAVILA, Ed.; Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba: Córdoba, Argentina, 2015.
- (47) Guillen, A.; Serrato, O. P. L.; Garnica, J. J. A. Correlación No-Paramétrica y Su Aplicación En La Investigaciones Científica Non-Parametric Correlation and Its Application in Scientific Research. *Int. J. Good Conscienc.* **2014**, *9* (2), 31–40.
- (48) Hem, J. D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. *U. S. Geol. Surv. Water Supply Pap. 2254* **1985**, 263 pp.
- (49) Kirk Nordstrom, D.; Blaine McCleskey, R.; Ball, J. W. Sulfur Geochemistry of Hydrothermal Waters in Yellowstone National Park: IV Acid-Sulfate Waters. *Appl. Geochemistry* **2009**, *24* (2), 191–207. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2008.11.019>.
- (50) DeSimone, L. A.; Pope, J. P.; Ransom, K. M. Machine-Learning Models to Map PH and Redox Conditions in Groundwater in a Layered Aquifer System, Northern Atlantic Coastal Plain, Eastern USA. *J. Hydrol. Reg. Stud.* **2020**, *30* (January), 100697. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2020.100697>.
- (51) Prada, S. N.; da Silva, M. O.; Cruz, J. V. Groundwater Behaviour in Madeira, Volcanic Island (Portugal). *Hydrogeol. J.* **2005**, *13* (5–6), 800–812. <https://doi.org/10.1007/s10040-005-0448-3>.
- (52) Matsuura, T.; Tebakari, T.; Oda, A.; Ueda, A. Flow Characteristics of Artesian Groundwater in Coastal Area of Kurobe River Basin, Toyama Prefecture, by Long-Term and Spatial Observation of Water Temperature and Electric Conductivity. *Groundw. Sustain. Dev.* **2021**, *13* (November 2020). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100555>.
- (53) WHO/UNICEF. Water Quality and Health - Review of Turbidity: Information for

regulators and water suppliers
https://www.who.int/water_sanitation_health/publications/turbidity-information-2017.pdf (accessed Apr 14, 2021).

- (54) Sawyer, C.; McCarty, P.; Parkin, G. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, Fifth Edit.; McGraw-Hill: United States, 2003.
- (55) Zakaria, N.; Anornu, G.; Adomako, D.; Owusu-Nimo, F.; Gibrilla, A. Evolution of Groundwater Hydrogeochemistry and Assessment of Groundwater Quality in the Anayari Catchment. *Groundw. Sustain. Dev.* **2021**, *12* (September 2020). <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100489>.
- (56) Khanoranga; Khalid, S. An Assessment of Groundwater Quality for Irrigation and Drinking Purposes around Brick Kilns in Three Districts of Balochistan Province, Pakistan, through Water Quality Index and Multivariate Statistical Approaches. *J. Geochemical Explor.* **2019**, *197*, 14–26. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2018.11.007>.
- (57) Keesari, T.; Ramakumar, K. L.; Chidambaram, S.; Pethperumal, S.; Thilagavathi, R. 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.* **2016**, *2–3*, 143–153. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsd.2016.08.001>.
- (58) Saha, N.; Rahman, M. S. Groundwater Hydrogeochemistry and Probabilistic Health Risk Assessment through Exposure to Arsenic-Contaminated Groundwater of Meghna Floodplain, Central-East Bangladesh. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **2020**, *206*, 111349. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111349>.
- (59) Yidana, S. M.; Bawoyobie, P.; Sakyi, P.; Fynn, O. F. Evolutionary Analysis of Groundwater Flow: Application of Multivariate Statistical Analysis to Hydrochemical Data in the Densu Basin, Ghana. *J. African Earth Sci.* **2018**, *138*, 167–176. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.026>.
- (60) Chapter 5 - Measurement of Water Quality. In *Environmental Engineering (Fourth Edition)*; Weiner, R. F., Matthews, R. A., Eds.; Butterworth-Heinemann: Burlington, 2003; pp 81–106. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/B978-075067294-8/50005-1>.
- (61) Xin, J.; Wang, Y.; Shen, Z.; Liu, Y.; Wang, H.; Zheng, X. Critical Review of Measures and Decision Support Tools for Groundwater Nitrate Management: A Surface-to-Groundwater Profile Perspective. *J. Hydrol.* **2021**, 126386. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126386>.
- (62) Kwon, E.; Park, J.; Park, W.-B.; Kang, B.-R.; Woo, N. C. Nitrate Contamination of Coastal Groundwater: Sources and Transport Mechanisms along a Volcanic Aquifer. *Sci. Total Environ.* **2021**, *768*, 145204. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.145204>.
- (63) Zhang, Q.; Qian, H.; Xu, P.; Li, W.; Feng, W.; Liu, R. Effect of Hydrogeological

Conditions on Groundwater Nitrate Pollution and Human Health Risk Assessment of Nitrate in Jiaokou Irrigation District. *J. Clean. Prod.* **2021**, 298, 126783. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126783>.

- (64) Instituto Nacional de Estadística y Censos. Censo. 2011. Población total por zona y sexo, según provincia, cantón y distrito. <https://www.inec.cr/censos/censos-2011> (accessed May 9, 2021).
- (65) Li, J.; Shi, Z.; Liu, M.; Wang, G.; Liu, F.; Wang, Y. Identifying Anthropogenic Sources of Groundwater Contamination by Natural Background Levels and Stable Isotope Application in Pinggu Basin, China. *J. Hydrol.* **2021**, 596, 126092. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.126092>.
- (66) Torres-Martínez, J. A.; Mora, A.; Knappett, P. S. K.; Ornelas-Soto, N.; Mählknecht, J. Tracking Nitrate and Sulfate Sources in Groundwater of an Urbanized Valley Using a Multi-Tracer Approach Combined with a Bayesian Isotope Mixing Model. *Water Res.* **2020**, 182, 115962. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.115962>.
- (67) Wang, H.; Zhang, Q. Research Advances in Identifying Sulfate Contamination Sources of Water Environment by Using Stable Isotopes. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2019**, 16 (11). <https://doi.org/10.3390/ijerph16111914>.
- (68) Kessasra, F.; Benabes, D.; Seraoui, S.; El Houda Chetibi, N.; Mesbah, M.; Khaled-Khodja, S.; Foughalia, A. Groundwater Flow and Chloride Transport Modeling of the Alluvial Aquifer of Lower Soummam Valley, Béjaia, North-East of Algeria. *J. African Earth Sci.* **2021**, 173, 104023. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.104023>.
- (69) Sahu, S.; Gogoi, U.; Nayak, N. C. Groundwater Solute Chemistry, Hydrogeochemical Processes and Fluoride Contamination in Phreatic Aquifer of Odisha, India. *Geosci. Front.* **2021**, 12 (3), 101093. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.10.001>.
- (70) Rondano Gómez, K.; López Pasquali, C. E.; Paniagua González, G.; Fernández Hernando, P.; Garcinuño Martínez, R. M. Statistical Evaluation of Fluoride Contamination in Groundwater Resources of Santiago Del Estero Province, Argentina. *Geosci. Front.* **2020**, 11 (6), 2197–2205. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.02.018>.
- (71) World Health Organization (WHO). *Guidelines for Drinking-Water Quality*, Fourth Edi.; Library Cataloguing-in-Publication Data Guidelines for Drinking-Water Quality, 2011.
- (72) Małecki, J. J.; Kadzikiewicz-Schoeneich, M.; Eckstein, Y.; Szostakiewicz-Hołownia, M.; Gruszczyński, T. Mobility of Copper and Zinc in Near-Surface Groundwater as a Function of the Hypergenic Zone Lithology at the Kampinos National Park (Central Poland). *Environ. Earth Sci.* **2017**, 76 (7), 276. <https://doi.org/10.1007/s12665-017-6527-7>.
- (73) Owusu, C.; Silverman, G. S.; Vinson, D. S.; Paul, R.; Baker, K. M.; Delmelle, E. M.

Predicting Coliform Presence in Private Wells as a Function of Well Characteristics, Parcel Size and Leachfield Soil Rating. *Sci. Total Environ.* **2021**, 758, 143701. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143701>.

- (74) USEPA. Groundwater Contamination. EPA, Washington DC. <https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/mgwc-gwc1.pdf> (accessed May 29, 2021).
- (75) Mattos, J. B.; Cruz, M. J. M.; De Paula, F. C. F.; Sales, E. F. Spatio-Seasonal Changes in the Hydrogeochemistry of Groundwaters in a Highland Tropical Zone. *J. South Am. Earth Sci.* **2018**, 88, 275–286. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2018.08.023>.
- (76) Kassambara, A. *Practical Guide to Cluster Analysis in R: Unsupervised Machine Learning*, First Edit.; Statistical Tools For High-Throughput Data Analysis (STHDA), 2017.
- (77) Wanda, E. M. M.; Chavula, G.; Tembo, F. M. Hydrogeochemical Characterization of Water Quality Evolution within Livingstonia Coalfield Mining Areas in Rumphi District, Northern Malawi. *Phys. Chem. Earth, Parts A/B/C* **2021**, 103045. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.pce.2021.103045>.
- (78) Gibbs, R. J. Mechanisms Controlling World Water Chemistry. *Science (80-.)*. **1970**, 170, 795–840.
- (79) Marandi, A.; Shand, P. Groundwater Chemistry and the Gibbs Diagram. *Appl. Geochemistry* **2018**, 97, 209–212. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.07.009>.
- (80) Hao, C.; Zhang, W.; Gui, H. Hydrogeochemistry Characteristic Contrasts between Low- and High-Antimony in Shallow Drinkable Groundwater at the Largest Antimony Mine in Hunan Province, China. *Appl. Geochemistry* **2020**, 117, 104584. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2020.104584>.
- (81) Zhang, Y.; Xu, M.; Li, X.; Qi, J.; Zhang, Q.; Guo, J.; Yu, L.; Zhao, R. Hydrochemical Characteristics and Multivariate Statistical Analysis of Natural Water System: A Case Study in Kangding County, Southwestern China. *Water* **2018**, 10 (1). <https://doi.org/10.3390/w10010080>.
- (82) Refat Nasher, N. M.; Humayan Ahmed, M. Groundwater Geochemistry and Hydrogeochemical Processes in the Lower Ganges-Brahmaputra-Meghna River Basin Areas, Bangladesh. *J. Asian Earth Sci.* X **2021**, 6. <https://doi.org/10.1016/j.jaesx.2021.100062>.
- (83) Carol, E. S.; Kruse, E. E. Hydrochemical Characterization of the Water Resources in the Coastal Environments of the Outer Río de La Plata Estuary, Argentina. *J. South Am. Earth Sci.* **2012**, 37, 113–121. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jsames.2012.02.009>.

- (84) Fu, C.; Li, X.; Ma, J.; Liu, L.; Gao, M.; Bai, Z. A Hydrochemistry and Multi-Isotopic Study of Groundwater Origin and Hydrochemical Evolution in the Middle Reaches of the Kuye River Basin. *Appl. Geochemistry* **2018**, *98*, 82–93. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2018.08.030>.
- (85) Zaidi, F. K.; Nazzal, Y.; Jafri, M. K.; Naeem, M.; Ahmed, I. Reverse Ion Exchange as a Major Process Controlling the Groundwater Chemistry in an Arid Environment: A Case Study from Northwestern Saudi Arabia. *Environ. Monit. Assess.* **2015**, *187* (10), 607. <https://doi.org/10.1007/s10661-015-4828-4>.
- (86) Sánchez-Gutiérrez, R.; Mena-Rivera, L.; Sánchez-Murillo, R.; Fonseca-Sánchez, A.; Madrigal-Solís, H. Hydrogeochemical Baseline in a Human-Altered Landscape of the Central Pacific Coast of Costa Rica. *Environ. Geochem. Health* **2020**, *42* (9), 2685–2701. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00501-5>.
- (87) Roy, S.; Gaillardet, J.; Allègre, C. J. Geochemistry of Dissolved and Suspended Loads of the Seine River, France: Anthropogenic Impact, Carbonate and Silicate Weathering. *Geochim. Cosmochim. Acta* **1999**, *63* (9), 1277–1292. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(99\)00099-X](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0016-7037(99)00099-X).
- (88) Gaillardet, J.; Dupré, B.; Louvat, P.; Allègre, C. J. Global Silicate Weathering and CO₂ Consumption Rates Deduced from the Chemistry of Large Rivers. *Chem. Geol.* **1999**, *159* (1), 3–30. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(99\)00031-5](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S0009-2541(99)00031-5).
- (89) Zhang, Y.; Dai, Y.; Wang, Y.; Huang, X.; Xiao, Y.; Pei, Q. Hydrochemistry, Quality and Potential Health Risk Appraisal of Nitrate Enriched Groundwater in the Nanchong Area, Southwestern China. *Sci. Total Environ.* **2021**, *784*, 147186. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147186>.
- (90) Sánchez-Gutiérrez, R.; Benavides-Benavides, C.; María, C.-V.; José, Q.-V. Water Quality for Human Consumption in a Rural Community: Case of Corral de Piedra, Guanacaste, Costa Rica. *Tecnol. en Marcha* **2020**, *33*, 3–16. <https://doi.org/10.18845/tm.v33i2.4165>.
- (91) Qin, R.; Wu, Y.; Xu, Z.; Xie, D.; Zhang, C. Assessing the Impact of Natural and Anthropogenic Activities on Groundwater Quality in Coastal Alluvial Aquifers of the Lower Liaohe River Plain, NE China. *Appl. Geochemistry* **2013**, *31*, 142–158. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2013.01.001>.
- (92) Kaiser, H. F. The Application of Electronic Computers to Factor Analysis. *Educ. Psychol. Meas.* **1960**, *20*, 141–151.

ANEXOS

Anexo 1. Ubicación e información general de los puntos de muestreo.

Nombre	Código	Ubicación		Profundidad del pozo (m)	Zona de altitud	Utilización del pozo o naciente
		Latitud	Longitud			
Naciente Poasito 1/2	RP01	-84,209433	10,17027	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente Cabecera Río Prendas	RP02	-84,231617	10,159336	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente La Chayotera	RP03	-84,195905	10,129227	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente Cabuyal	RP04	-84,239698	10,121936	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente Virgen de Lourdes 2	RP05	-84,1555445	10,0976491	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente Omar Ruíz #1	RP06	-84,1882058	10,0979352	-	Alta	Abastecimiento público
Naciente San Rafael	RP08	-84,2447041	10,1042135	-	Media	Abastecimiento público
Pozo Herminio Ugalde	RP10	-84,2457008	10,0709663	56	Media	Doméstico
Pozo Mario Gómez	RP11	-84,251944	10,074289	48	Media	Doméstico
Pozo Los Gemelos	RP12	-84,2609476	10,1064434	-	Media	Abastecimiento público
Naciente El Chorro	RP13	-84,276739	10,051839	-	Media	Abastecimiento público
Pozo Xenia Cascante	RP14	-84,2366652	10,0414425	78	Media	Doméstico
Pozo Finca Machito	RP15	-84,2210557	10,0410102	70	Media	Comercial
Naciente Don Pocho	RP16	-84,2499147	10,0337563	-	Baja	Sin uso
Pozo Lavacar Turrucare	RP18	-84,268659	10,028638	35	Baja	Comercial
Pozo Finca La Barvina	RP19	-84,2305047	10,0249547	36,5	Media	Doméstico
Pozo Fabio Baudrit	RP20	-84,3222432	9,99240948	101	Baja	Educativo
Pozo Ilena Castrillo	RP21	-84,3368595	9,99621063	79	Baja	Doméstico

Anexo 2. Parámetros fisicoquímicos analizados en el acuífero Poás

Muestra	Parámetro estadístico	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Turbiedad (NTU)	ORP (mV)	SDT (mg/L)	OD (mg/L)	PSO (%)	Dureza (mg/L)
RP01	Promedio	6,1	15,2	186,2	0,2	258,0	154,2	5,9	57,2	45,9
	Desviación estándar	0,2	1,1	47,0	0,3	100,7	10,5	1,9	18,1	18,0
	Mínimo	6,0	14,5	135,5	0,0	192,5	146,0	4,8	45,6	25,1
	Máximo	6,4	16,5	280,0	0,6	374,0	166,0	8,1	78,1	56,6
RP02	Promedio	6,3	16,6	227,0	0,3	220,2	159,5	5,2	61,6	45,2
	Desviación estándar	0,1	2,6	91,5	0,3	52,1	20,9	2,0	13,0	15,7
	Mínimo	6,2	14,5	132,0	0,0	182,0	135,5	3,7	53,3	27,2
	Máximo	6,4	19,6	410,0	0,7	279,5	173,5	7,4	76,6	56,3
RP03	Promedio	6,5	18,2	216,3	0,2	239,0	141,2	6,0	63,9	45,1
	Desviación estándar	0,3	2,4	64,7	0,2	72,3	10,2	1,3	14,0	14,8
	Mínimo	6,1	15,8	140,5	0,0	196,5	130,0	4,9	52,2	35,1
	Máximo	6,7	20,5	345,0	0,4	322,5	150,0	7,3	79,4	62,1
RP04	Promedio	6,5	20,5	252,0	0,4	240,2	193,8	4,8	55,4	78,3
	Desviación estándar	0,3	0,8	45,2	0,7	93,1	16,9	1,6	18,4	15,8
	Mínimo	6,3	19,7	200,5	0,0	182,0	176,0	3,7	39,9	60,5
	Máximo	6,8	21,2	342,0	1,2	347,5	209,5	6,7	75,8	90,8
RP05	Promedio	6,7	17,7	100,0	0,3	297,8	113,7	6,4	64,8	31,3
	Desviación estándar	0,5	0,2	4,8	0,2	62,4	9,8	1,2	13,3	16,2
	Mínimo	6,4	17,4	90,5	0,1	242,5	103,5	5,2	54,1	12,6
	Máximo	7,2	17,9	105,5	0,5	365,5	123,0	7,6	79,8	41,2
RP06	Promedio	6,9	16,9	207,7	0,8	255,2	105,3	5,5	56,1	30,5
	Desviación estándar	0,6	0,6	121,9	0,3	81,8	11,2	1,4	15,6	0,2
	Mínimo	6,2	16,4	84,0	0,5	199,0	95,5	4,1	40,1	30,3
	Máximo	7,5	17,6	451,5	1,0	349,0	117,5	6,9	71,3	30,6
RP08	Promedio	6,9	20,1	129,7	0,6	186,8	133,8	5,8	63,3	41,3
	Desviación estándar	0,1	0,7	10,0	0,6	96,1	3,8	1,3	13,7	16,6
	Mínimo	6,8	19,2	117,0	0,2	103,5	129,5	4,6	50,0	22,1
	Máximo	7,0	20,5	149,5	1,3	292,0	136,0	7,1	40,1	51,0
RP10	Promedio	6,0	22,5	111,2	4,9	276,3	104,2	4,9	77,3	33,5
	Desviación estándar	0,2	0,2	19,1	1,8	107,9	19,9	1,4	56,6	6,7
	Mínimo	5,8	22,4	75,5	3,3	196,0	82,0	3,4	16,0	25,8
	Máximo	6,2	22,7	141,0	6,9	399,0	120,5	6,2	72,0	38,1
RP11	Promedio	6,7	23,6	105,0	1,0	258,3	108,5	5,7	67,9	23,8
	Desviación estándar	0,3	1,2	25,2	1,3	97,2	28,2	1,9	21,1	18,3
	Mínimo	6,5	22,7	69,0	0,2	193,0	76,0	3,7	45,7	2,6
	Máximo	6,9	25,0	153,5	2,4	370,0	127,0	7,5	87,6	34,5
RP12	Promedio	6,3	23,0	145,8	0,6	183,0	125,2	4,8	53,7	38,7
	Desviación estándar	0,3	2,0	26,6	0,4	56,7	15,9	1,3	15,6	16,2
	Mínimo	6,0	21,8	119,0	0,1	129,0	112,5	3,6	41,2	21,4
	Máximo	6,5	25,3	199,0	1,0	242,0	143,0	6,1	71,2	53,5
RP13	Promedio	6,8	21,9	217,8	0,1	229,5	168,3	6,0	71,4	52,9

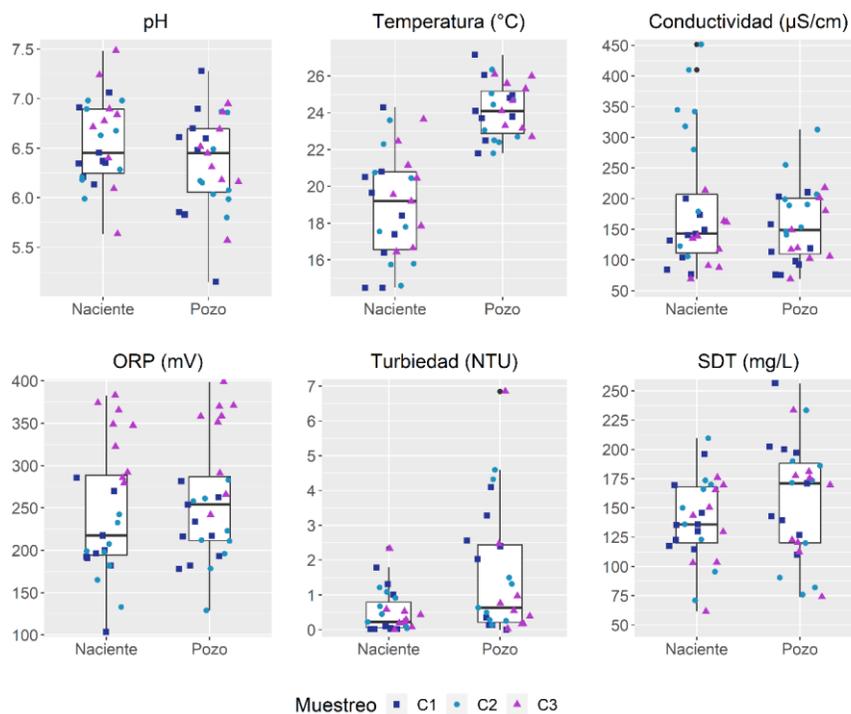
Muestra	Parámetro estadístico	pH	Temperatura (°C)	Conductividad (µs/cm)	Turbiedad (NTU)	ORP (mV)	SDT (mg/L)	OD (mg/L)	PSO (%)	Dureza (mg/L)
	Desviación estándar	0,3	0,9	50,2	0,1	83,9	2,5	1,7	14,8	16,4
	Mínimo	6,5	20,8	162,0	0,0	133,0	165,5	4,7	61,4	34,0
	Máximo	7,0	22,5	318,0	0,2	285,5	170,0	7,9	88,4	63,3
RP14	Promedio	6,3	24,7	247,0	1,4	270,3	241,2	4,5	54,9	85,5
	Desviación estándar	0,5	1,0	32,8	1,2	87,2	13,3	1,8	22,5	15,8
	Mínimo	5,9	23,7	210,5	0,2	217,0	233,5	3,3	39,5	67,4
	Máximo	6,9	25,6	312,5	2,6	371,0	256,5	6,6	80,7	96,1
RP15	Promedio	6,4	23,7	220,0	1,0	276,3	190,0	5,6	67,0	79,5
	Desviación estándar	0,8	0,5	17,5	0,9	68,8	12,5	1,8	19,9	18,8
	Mínimo	5,8	23,1	201,5	0,4	216,5	177,5	3,5	44,1	58,5
	Máximo	7,3	24,1	255,0	2,0	351,5	202,5	6,7	79,2	94,6
RP16	Promedio	6,3	23,9	108,3	1,7	271,8	85,0	2,8	32,1	29,8
	Desviación estándar	0,7	0,4	35,4	0,6	97,6	32,8	0,4	4,6	2,6
	Mínimo	5,6	23,6	69,0	1,1	200,0	61,5	2,6	29,2	27,9
	Máximo	7,1	24,3	179,0	2,3	383,0	122,5	3,2	37,5	31,6
RP18	Promedio	5,6	24,6	129,7	0,4	274,5	101,3	3,4	40,5	26,4
	Desviación estándar	0,5	0,2	39,6	0,3	75,9	34,1	1,1	13,4	14,5
	Mínimo	5,2	24,5	76,0	0,1	211,0	74,0	2,7	31,2	9,8
	Máximo	6,2	24,8	207,0	0,8	358,5	139,5	4,7	55,9	36,5
RP19	Promedio	6,6	23,3	156,2	3,6	208,8	185,2	4,5	53,4	67,7
	Desviación estándar	0,1	0,8	29,2	1,0	49,5	15,3	1,4	16,2	16,4
	Mínimo	6,5	22,5	98,1	2,5	178,5	169,5	3,0	36,1	48,9
	Máximo	6,7	24,1	190,5	4,3	266,0	200,0	5,8	68,2	78,7
RP20	Promedio	6,6	25,7	165,3	0,1	270,5	183,8	5,3	63,1	42,8
	Desviación estándar	0,4	0,6	12,1	0,1	17,9	12,0	1,8	17,1	14,4
	Mínimo	6,2	25,1	149,0	0,0	258,0	173,5	3,5	44,3	26,2
	Máximo	7,0	26,1	189,0	0,1	291,0	197,0	7,0	77,6	51,6
RP21	Promedio	6,5	26,5	121,0	0,8	307,5	172,7	5,9	74,4	28,7
	Desviación estándar	0,4	0,5	13,4	0,6	43,7	2,5	1,6	19,2	14,2
	Mínimo	6,1	26,1	102,5	0,3	281,5	171,0	4,0	52,3	12,3
	Máximo	6,9	27,2	147,0	1,5	358,0	175,5	6,8	86,5	37,8

Anexo 3. Concentración de los aniones y cationes analizados en el acuífero Poás.

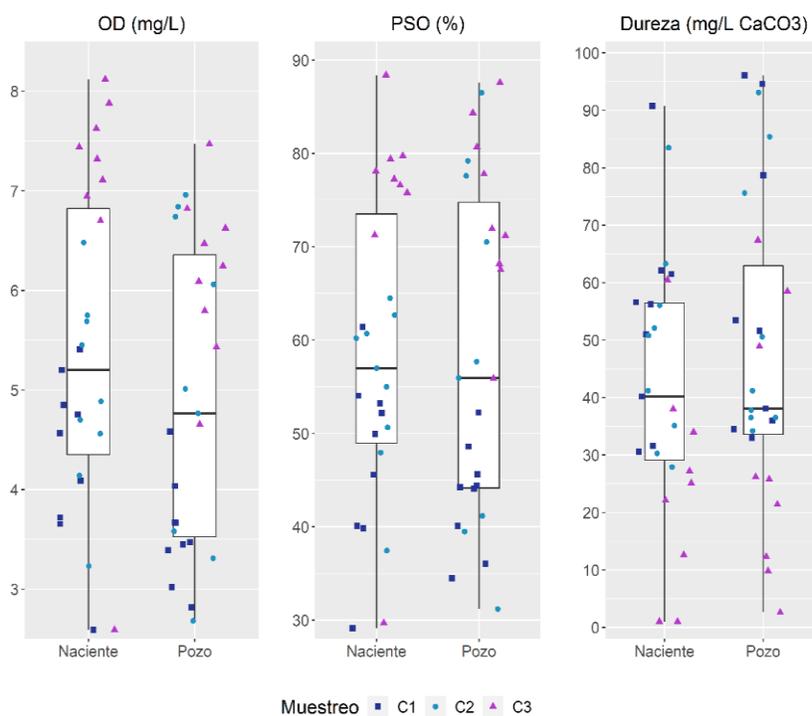
Muestra	Parámetro estadístico	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
RP01	Promedio	5,30	2,74	4,63	13,80	34,2	0,249	2,89	1,30	24,23
	Desviación estándar	0,49	0,14	0,08	0,14	1,9	0,036	0,66	1,02	0,66
	Mínimo	4,74	2,59	4,58	13,67	32,0	0,210	2,22	0,71	23,85
	Máximo	5,68	2,87	4,72	13,96	35,5	0,281	3,54	2,47	24,99
RP02	Promedio	4,95	3,04	4,41	13,65	43,0	0,207	2,13	0,55	12,66
	Desviación estándar	0,07	0,04	0,20	0,65	5,1	0,017	0,10	0,13	0,45
	Mínimo	4,87	2,99	4,19	13,02	37,5	0,197	2,01	0,46	12,14
	Máximo	5,00	3,07	4,57	14,33	47,5	0,227	2,20	0,70	13,00
RP03	Promedio	4,81	2,81	5,86	14,96	50,0	0,088	2,72	8,37	11,03
	Desviación estándar	0,15	0,14	0,32	0,93	3,1	0,010	0,26	1,81	0,83
	Mínimo	4,65	2,65	5,57	14,19	47,5	0,079	2,46	7,25	10,12
	Máximo	4,96	2,93	6,20	15,99	53,5	0,098	2,98	10,46	11,75
RP04	Promedio	5,01	2,52	8,30	19,81	60,3	0,047	4,24	25,16	7,71
	Desviación estándar	0,12	0,02	0,44	1,17	4,3	0,006	0,11	1,56	0,44
	Mínimo	4,91	2,50	7,79	18,47	55,5	0,041	4,17	23,51	7,21
	Máximo	5,15	2,54	8,57	20,68	63,5	0,052	4,37	26,61	8,03
RP05	Promedio	3,73	1,38	3,40	9,98	39,7	0,070	0,56	0,99	2,89
	Desviación estándar	0,09	0,64	0,36	0,22	3,1	0,012	0,04	0,12	0,23
	Mínimo	3,62	0,68	3,00	9,78	37,0	0,059	0,53	0,85	2,63
	Máximo	3,79	1,95	3,69	10,21	43,0	0,083	0,61	1,06	3,09
RP06	Promedio	4,06	1,28	2,37	7,14	28,0	0,311	0,62	0,49	3,36
	Desviación estándar	0,12	0,36	0,23	0,22	1,0	0,029	0,04	0,05	0,20
	Mínimo	3,98	0,94	2,17	6,99	27,0	0,282	0,60	0,46	3,24
	Máximo	4,19	1,65	2,62	7,39	29,0	0,339	0,66	0,55	3,59
RP08	Promedio	4,22	1,57	4,61	11,52	41,0	0,105	1,52	7,55	4,61
	Desviación estándar	0,05	0,46	0,35	0,52	1,5	0,011	0,74	0,68	0,69
	Mínimo	4,16	1,04	4,26	10,93	39,5	0,098	0,72	6,81	3,96
	Máximo	4,25	1,87	4,95	11,93	42,5	0,118	2,17	8,15	5,33
RP10	Promedio	1,93	0,53	4,93	6,68	18,8	0,022	4,13	17,83	1,93
	Desviación estándar	0,42	0,52	1,21	1,45	7,5	0,020	0,41	3,19	0,09
	Mínimo	1,58	0,12	4,23	5,57	14,0	0,010	3,71	14,96	1,86
	Máximo	2,39	1,11	6,32	8,32	27,5	0,045	4,53	21,27	2,03
RP11	Promedio	1,64	0,76	3,82	6,40	12,2	0,033	2,52	22,58	0,61
	Desviación estándar	0,22	0,34	0,23	0,29	4,0	0,020	0,31	2,26	0,16
	Mínimo	1,39	0,37	3,62	6,08	8,5	0,010	2,17	20,01	0,47
	Máximo	1,81	0,98	4,08	6,66	16,5	0,045	2,78	24,24	0,79
RP12	Promedio	3,36	1,15	4,88	10,27	35,3	0,032	2,47	8,18	5,10
	Desviación estándar	0,21	0,14	0,43	1,48	5,7	0,019	0,16	0,88	0,70

Muestra	Parámetro estadístico	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)	F ⁻ (mg/L)	Cl ⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)
	Mínimo	3,15	0,99	4,38	8,63	29,0	0,010	2,33	7,67	4,64
	Máximo	3,56	1,24	5,16	11,48	40,0	0,045	2,65	9,19	5,91
RP13	Promedio	7,76	3,49	7,06	12,46	60,7	0,172	2,90	4,38	9,80
	Desviación estándar	0,23	0,57	0,23	0,12	0,8	0,014	0,52	0,58	0,90
	Mínimo	7,56	2,84	6,81	12,35	60,0	0,157	2,31	3,71	9,11
	Máximo	8,01	3,90	7,27	12,59	61,5	0,185	3,27	4,75	10,82
	Promedio	5,97	3,89	8,29	22,56	56,7	0,054	6,59	45,41	0,39
RP14	Desviación estándar	0,10	0,10	0,25	0,87	1,8	0,005	0,22	2,59	0,06
	Mínimo	5,89	3,79	8,08	22,03	55,0	0,050	6,42	43,43	0,33
	Máximo	6,09	4,00	8,56	23,57	58,5	0,060	6,83	48,34	0,46
	Promedio	5,23	2,83	6,49	22,96	69,2	0,082	2,13	28,85	0,41
RP15	Desviación estándar	0,35	0,91	1,33	0,70	4,5	0,006	0,13	3,67	0,03
	Mínimo	4,84	2,11	4,95	22,17	64,0	0,079	1,98	24,72	0,38
	Máximo	5,53	3,86	7,30	23,51	72,5	0,089	2,24	31,72	0,42
	Promedio	2,32	1,39	2,03	6,19	17,3	0,047	2,28	8,65	2,33
RP16	Desviación estándar	0,07	0,08	0,21	1,00	0,6	0,006	0,07	2,50	0,27
	Mínimo	2,27	1,33	1,84	5,13	17,0	0,042	2,20	5,99	2,02
	Máximo	2,39	1,49	2,26	7,10	18,0	0,055	2,34	10,97	2,50
	Promedio	2,85	1,45	3,25	8,08	13,8	0,042	3,76	21,35	1,54
RP18	Desviación estándar	0,26	0,10	0,19	1,04	2,9	0,002	0,31	3,36	0,23
	Mínimo	2,60	1,34	3,06	6,98	10,5	0,041	3,49	18,48	1,29
	Máximo	3,13	1,54	3,45	9,04	16,0	0,045	4,10	25,04	1,75
	Promedio	5,50	4,48	6,76	18,81	73,3	0,152	1,61	15,67	0,60
RP19	Desviación estándar	1,86	0,12	0,15	0,48	1,6	0,017	0,50	0,82	0,09
	Mínimo	3,37	4,37	6,58	18,38	71,5	0,134	1,05	15,08	0,54
	Máximo	6,75	4,60	6,84	19,32	74,5	0,166	2,00	16,60	0,70
	Promedio	10,65	2,53	5,91	10,78	65,2	0,359	1,22	5,96	1,20
RP20	Desviación estándar	0,77	0,80	0,58	0,35	7,8	0,047	0,21	2,41	0,33
	Mínimo	9,82	1,84	5,45	10,41	57,0	0,318	1,07	4,11	1,00
	Máximo	11,33	3,41	6,56	11,10	72,5	0,411	1,46	8,69	1,57
	Promedio	6,88	3,00	3,60	8,02	48,5	0,198	0,24	2,79	0,92
RP21	Desviación estándar	0,10	0,31	0,22	0,38	1,3	0,015	0,02	0,19	0,02
	Mínimo	6,77	2,73	3,48	7,62	47,5	0,183	0,22	2,60	0,90
	Máximo	6,98	3,34	3,86	8,38	50,0	0,213	0,26	2,98	0,94
	Promedio									

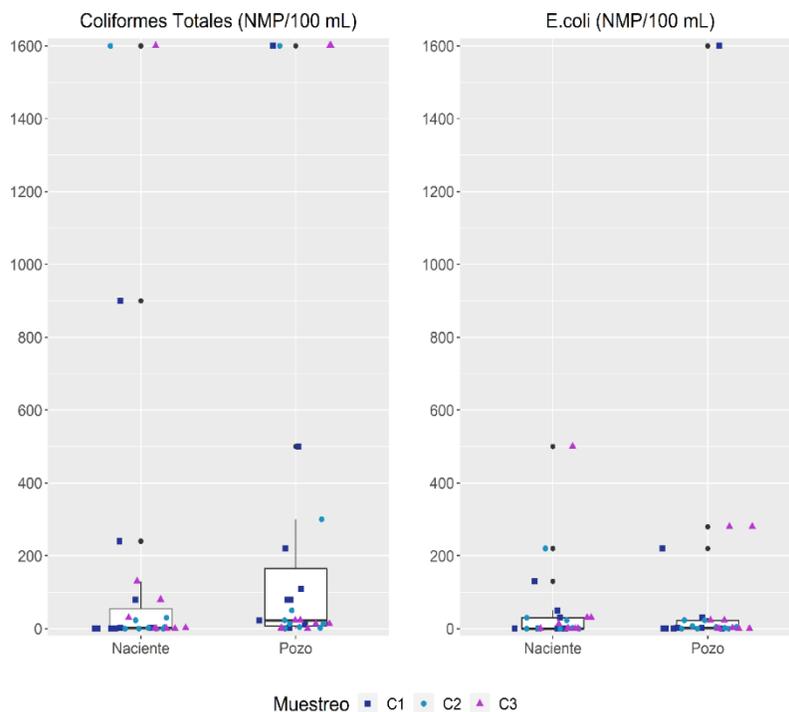
Anexo 4. Diagramas de cajas de los parámetros físicos medidos (pH, temperatura, conductividad, potencial oxidación-reducción, turbiedad y sólidos disueltos totales) en el acuífero Poás.



Anexo 5. Diagramas de cajas de los parámetros químicos medidos (oxígeno disuelto (OD), porcentaje de saturación de oxígeno (PSO) y dureza) en el acuífero Poás.



Anexo 6. Diagramas de cajas de los parámetros microbiológicos evaluados: Coliformes Totales y *E. Coli* en el acuífero Poás.



Anexo 7. Parámetros microbiológicos analizados en el acuífero Poás.

Muestra	Parámetro estadístico	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100 mL)
RP01	Promedio	0	0
	Desviación estándar	0	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	0	0
RP02	Promedio	1	0
	Desviación estándar	1	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	2	0
RP03	Promedio	1	0
	Desviación estándar	1	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	2	0
RP04	Promedio	78	34
	Desviación estándar	54	14
	Mínimo	23	23
	Máximo	130	50
RP05	Promedio	0	0
	Desviación estándar	0	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	0	0

Muestra	Parámetro estadístico	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100 mL)
RP06	Promedio	11	5
	Desviación estándar	16	7
	Mínimo	2	0
	Máximo	30	13
RP08	Promedio	328	20
	Desviación estándar	497	17
	Mínimo	4	0
	Máximo	900	30
RP10	Promedio	27	0
	Desviación estándar	46	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	80	0
RP11	Promedio	13	1
	Desviación estándar	9	2
	Mínimo	4	0
	Máximo	22	4
RP12	Promedio	1067	94
	Desviación estándar	923	161
	Mínimo	2	0
	Máximo	1600	280
RP13	Promedio	11	10
	Desviación estándar	17	17
	Mínimo	0	0
	Máximo	30	30
RP14	Promedio	27	0
	Desviación estándar	46	0
	Mínimo	0	0
	Máximo	80	0
RP15	Promedio	800	174
	Desviación estándar	700	134
	Mínimo	300	23
	Máximo	1600	280
RP16	Promedio	1147	283
	Desviación estándar	785	193
	Mínimo	240	130
	Máximo	1600	500
RP18	Promedio	62	2
	Desviación estándar	69	0
	Mínimo	13	2
	Máximo	110	2
RP19	Promedio	89	25
	Desviación estándar	114	4
	Mínimo	23	23

Muestra	Parámetro estadístico	Coliformes Totales (NMP/100 mL)	<i>Escherichia Coli</i> (NMP/100 mL)
RP20	Máximo	220	30
	Promedio	21	2
	Desviación estándar	26	4
	Mínimo	2	0
	Máximo	50	7
RP21	Promedio	545	542
	Desviación estándar	913	916
	Mínimo	13	4
	Máximo	1600	1600

Anexo 8. Límites de detección y cuantificación de los iones y metales analizados.

Parámetro	Límite de detección	Límite de cuantificación
Fluoruro (mg/L)	0,015	0,045
Cloruro (mg/L)	0,062	0,187
Nitrato (mg/L)	0,115	0,350
Sulfato (mg/L)	0,081	0,245
Sodio (mg/L)	0,160	0,484
Potasio (mg/L)	0,052	0,156
Magnesio (mg/L)	0,189	0,573
Calcio (mg/L)	0,277	0,840
Cobre (mg/L)	0,042	0,140
Hierro (mg/L)	0,140	0,468
Manganeso (mg/L)	0,031	0,105
Zinc (mg/L)	0,020	0,068
Arsénico (µg/L)	3,1	10,3
Cadmio (µg/L)	0,1	0,4
Níquel (µg/L)	2,0	6,8
Plomo (µg/L)	2,9	9,6

Anexo 9. Puntaje, nivel de riesgo y calidad del agua obtenidos al aplicar el IRCACH al promedio de los datos obtenidos en los tres muestreos realizados.

Muestra	pH	Cumplimiento RCAP	Puntaje IRCACH	Coliformes Totales (NMP/100)	Cumplimiento RCAP	Puntaje IRCACH	Puntaje Total IRCACH	Nivel de Riesgo	Calidad del Agua
RP01	6,15	Cumple	0	0	Cumple	0	0	Riesgo muy bajo	Apta
RP02	6,31	Cumple	0	0	Cumple	0	0	Riesgo muy bajo	Apta
RP03	6,51	Cumple	0	0	Cumple	0	0	Riesgo muy bajo	Apta
RP04	6,47	Cumple	0	78	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP05	6,75	Cumple	0	0	Cumple	0	0	Riesgo muy bajo	Apta
RP06	6,86	Cumple	0	11	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP08	6,91	Cumple	0	328	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP10	6,00	No Cumple	1	27	No Cumple	21	22	Riesgo Alto	No apta
RP11	6,74	Cumple	0	13	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP12	6,34	Cumple	0	1067	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP13	6,78	Cumple	0	11	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP14	6,34	Cumple	0	27	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP15	6,41	Cumple	0	800	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP16	6,30	Cumple	0	1147	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP18	5,63	No Cumple	1	62	No Cumple	21	22	Riesgo Alto	No apta
RP19	6,60	Cumple	0	89	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP20	6,60	Cumple	0	21	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta
RP21	6,51	Cumple	0	545	No Cumple	21	21	Riesgo Alto	No apta

Anexo 10. Porcentaje de recuperación obtenido para cada uno de los controles de lectura realizados.

Analito	Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3		
	Concentración experimental	Concentración teórica	Porcentaje de recuperación	Concentración experimental	Concentración teórica	Porcentaje de recuperación	Concentración experimental	Concentración teórica	Porcentaje de recuperación
Fluoruro (mg/L)	0,956	1,001	96 %	0,807	0,809	100 %	0,791	0,809	98 %
Cloruro (mg/L)	9,659	9,990	97 %	8,059	8,080	100 %	8,096	8,080	100 %
Nitrato (mg/L)	9,580	9,990	96 %	7,879	8,080	98 %	7,714	8,080	96 %
Sulfato (mg/L)	9,628	9,990	96 %	7,952	8,080	98 %	7,914	8,080	98 %
Sodio (mg/L)	15,191	15,140	100 %	9,901	10,000	99 %	9,767	10,000	98 %
Potasio (mg/L)	7,482	7,484	100 %	4,911	4,979	99 %	4,938	4,979	99 %
Magnesio (mg/L)	15,339	15,080	102 %	10,090	10,040	100 %	9,973	10,040	99 %
Calcio (mg/L)	15,262	15,080	101 %	9,990	10,000	100 %	9,624	10,000	96 %
Cobre (mg/L)	0,601	0,597	101 %	0,573	0,597	95 %	0,587	0,597	98 %
Hierro (mg/L)	1,011	0,981	101 %	0,851	0,981	87 %	0,867	0,981	88 %
Manganeso (mg/L)	0,366	0,393	93 %	0,386	0,393	99 %	0,340	0,393	87 %
Zinc (mg/L)	0,225	0,238	94 %	0,229	0,238	96 %	0,210	0,238	88 %
Arsénico (µg/L)	45,9	50,0	92 %	42,3	50,0	85 %	49,6	50,0	99 %
Cadmio (µg/L)	1,7	2,5	85 %	2,4	2,5	94 %	2,4	2,5	94 %
Níquel (µg/L)	25,3	25,0	101 %	25,5	25,0	102 %	25,7	25,0	103 %
Plomo (µg/L)	42,0	50,0	84 %	42,0	50,0	84 %	43,1	50,0	86 %

Anexo 11. Balance iónico obtenido para cada uno de los muestreos realizados.

Código Muestra	Muestreo 1			Muestreo 2			Muestreo 3		
	Sumatoria Cationes	Sumatoria Aniones	Porcentaje de error	Sumatoria Cationes	Sumatoria Aniones	Porcentaje de error	Sumatoria Cationes	Sumatoria Aniones	Porcentaje de error
RP01	1,4	1,2	8	1,4	1,2	5	1,3	1,1	10
RP02	1,3	1,1	10	1,3	1,1	7	1,4	1,1	13
RP03	1,4	1,2	8	1,5	1,2	9	1,6	1,3	10
RP04	2,0	1,7	7	1,9	1,6	8	2,0	1,7	8
RP05	0,9	0,7	12	1,0	0,8	11	1,0	0,8	12
RP06	0,7	0,6	12	0,7	0,6	12	0,8	0,6	11
RP08	1,2	1,0	10	1,2	0,9	11	1,2	0,9	13
RP10	0,7	0,6	7	0,7	0,7	4	1,1	1,0	5
RP11	0,8	0,8	0	0,7	0,6	9	0,7	0,6	9
RP12	1,1	0,9	9	1,0	0,8	9	1,2	0,9	13
RP13	1,6	1,3	9	1,6	1,4	9	1,7	1,4	9
RP14	2,1	1,8	8	2,1	1,9	6	2,3	1,9	9
RP15	2,1	1,7	12	1,9	1,6	7	2,0	1,7	7
RP16	0,6	0,6	1	0,7	0,5	9	0,6	0,5	10
RP18	0,8	0,6	11	0,9	0,8	4	0,9	0,7	9
RP19	1,9	1,5	10	1,8	1,5	8	1,9	1,5	12
RP20	1,5	1,2	11	1,5	1,2	12	1,7	1,3	12
RP21	1,0	0,9	10	1,1	0,9	8	1,1	0,9	12

Anexo 12. Relaciones iónicas evaluadas en el Acuífero Poás.

Muestreo	Código Muestra	$\text{HCO}_3^- / \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- / \text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$	
Setiembre 2020	RP01	0,54	0,84	1,01	1,085	0,048	0,344	2,085	
	RP02	0,59	0,91	1,18	1,047	0,034	0,261	1,245	
	RP03	0,69	1,13	1,13	1,166	0,578	0,343	1,154	
	RP04	0,61	1,03	1,44	1,716	1,984	0,544	0,694	
	RP05	0,80	1,19	1,14	0,756	0,104	0,090	0,334	
	RP06	0,90	1,36	0,97	0,528	0,041	0,093	0,370	
	RP08	0,73	1,23	1,21	0,926	0,672	0,332	0,511	
	RP10	0,37	0,83	2,33	0,627	3,509	1,522	0,577	
	RP11	0,41	0,84	2,29	0,658	4,958	0,994	0,209	
	RP12	0,69	1,23	1,26	0,954	0,842	0,446	0,671	
	RP13	0,84	1,60	1,00	1,177	0,172	0,253	0,544	
	RP14	0,52	0,84	1,91	1,780	2,714	0,701	0,027	
	RP15	0,68	1,03	1,46	1,753	1,659	0,253	0,037	
	RP16	0,67	1,15	1,31	0,442	1,701	0,597	0,404	
	RP18	0,29	0,49	3,02	0,600	2,632	0,869	0,238	
	RP19	0,83	1,32	1,19	1,458	0,876	0,180	0,040	
	RP20	1,09	2,08	0,90	0,989	0,174	0,064	0,045	
	RP21	1,17	2,05	0,84	0,666	0,140	0,022	0,063	
	Noviembre 2020	RP01	0,54	0,84	0,97	1,059	0,162	0,404	2,106
		RP02	0,78	1,20	0,96	0,995	0,036	0,291	1,194
		RP03	0,64	1,06	1,22	1,211	0,806	0,402	1,007
RP04		0,58	0,99	1,46	1,563	1,777	0,551	0,769	
RP05		0,90	1,42	1,02	0,784	0,083	0,093	0,370	
RP06		0,85	1,31	1,03	0,540	0,043	0,098	0,392	
RP08		0,69	1,11	1,28	0,934	0,711	0,255	0,446	
RP10		0,38	0,80	2,30	0,655	3,543	1,493	0,493	
RP11		0,22	0,42	4,22	0,630	5,097	0,988	0,133	
RP12		0,60	1,10	1,32	0,791	0,903	0,545	0,898	

Muestreo	Código Muestra	$\text{HCO}_3^- / \text{Mg}^{2+} + \text{Ca}^{2+}$	$\text{HCO}_3^- / \text{Ca}^{2+}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$	$\text{NO}_3^- / \text{Na}^+$	$\text{Cl}^- / \text{Na}^+$	$\text{SO}_4^{2-} / \text{Na}^+$
	RP13	0,82	1,60	0,99	1,205	0,225	0,194	0,672
	RP14	0,54	0,87	1,82	1,764	2,800	0,717	0,037
	RP15	0,66	0,89	1,50	1,581	2,431	0,266	0,037
	RP16	0,54	0,79	1,57	0,519	1,458	0,651	0,520
	RP18	0,35	0,60	2,46	0,694	2,971	0,850	0,268
	RP19	0,78	1,25	1,26	1,498	1,828	0,385	0,100
	RP20	0,94	1,73	1,02	0,989	0,328	0,096	0,077
	RP21	1,19	2,03	0,82	0,689	0,148	0,020	0,062
Febrero 2021	RP01	0,49	0,76	1,04	1,065	0,055	0,304	2,408
	RP02	0,66	1,01	1,10	1,091	0,052	0,287	1,234
	RP03	0,67	1,10	1,17	1,308	0,555	0,356	1,135
	RP04	0,59	0,98	1,47	1,736	1,827	0,550	0,747
	RP05	0,81	1,31	1,13	0,792	0,109	0,109	0,408
	RP06	0,76	1,20	1,13	0,585	0,051	0,107	0,429
	RP08	0,70	1,17	1,24	1,002	0,607	0,112	0,614
	RP10	0,48	1,09	1,90	0,935	3,297	1,229	0,406
	RP11	0,31	0,62	3,07	0,614	5,349	1,015	0,196
	RP12	0,61	1,06	1,42	0,997	0,957	0,444	0,624
	RP13	0,82	1,60	1,02	1,226	0,233	0,281	0,599
	RP14	0,48	0,77	2,07	1,881	2,945	0,728	0,031
	RP15	0,68	1,05	1,46	1,708	2,099	0,273	0,038
	RP16	0,60	0,88	1,42	0,468	0,980	0,670	0,527
	RP18	0,37	0,58	2,43	0,717	2,696	0,850	0,265
	RP19	0,80	1,27	1,24	1,527	0,842	0,101	0,040
	RP20	1,09	2,15	0,90	1,094	0,135	0,066	0,042
RP21	1,07	1,88	0,91	0,736	0,163	0,025	0,066	

Anexo 13. Coeficientes de correlación de Spearman obtenidos para los parámetros fisicoquímicos analizados en el acuífero Poás.

	HCO ₃ ⁻	Ca ²⁺	CE	Cl ⁻	CT	Dureza	EC	F ⁻	Mg ²⁺	NO ₃ ⁻	OD	ORP	pH	K ⁺	PSO	SDT	Na ⁺	SO ₄ ²⁻	Temp.	Turb.	Zn	
HCO ₃ ⁻	1																					
Ca ²⁺	0,7792	1																				
CE	0,4958	0,6288	1																			
Cl ⁻	-0,1405	0,2214	0,3169	1																		
CT	0,0953	0,0244	0,0094	-0,0667	1																	
Dureza	0,6179	0,6983	0,6006	0,282	-0,4793	1																
EC	0,0953	0,0244	0,0094	-0,0667	1	-0,4793	1															
F ⁻	0,4052	0,2025	0,1231	-0,5773	0,0876	-0,0329	0,0876	1														
Mg ²⁺	0,7655	0,8184	0,5621	0,4215	0,0618	0,665	0,0618	0,0341	1													
NO ₃ ⁻	0,1373	0,2745	0,2546	0,5906	0,1237	0,3676	0,1237	-0,6678	0,454	1												
OD	0,1456	0,1719	0,0115	-0,249	0,5476	-0,2984	0,5476	0,3385	0,1348	-0,2235	1											
ORP	-0,0303	-0,0852	-0,2986	-0,1107	0,6683	-0,5158	0,6683	0,1271	-0,0986	-0,0372	0,5202	1										
pH	0,2437	0,0244	-0,0218	-0,3497	0,0671	-0,0842	0,0671	0,2771	0,112	-0,1526	0,1832	-0,0905	1									
K ⁺	0,7639	0,7296	0,4466	-0,0079	0,1489	0,4483	0,1489	0,4931	0,6037	-0,0182	0,1092	0,0292	0,183	1								
PSO	0,2198	0,18	0,0605	-0,236	0,6223	-0,2482	0,6223	0,3122	0,1949	-0,1254	0,9533	0,536	0,1861	0,18	1							
SDT	0,8414	0,7517	0,5041	0,0651	-0,0336	0,6877	-0,0336	0,3157	0,754	0,2675	0,0287	-0,0643	0,0697	0,7491	0,1163	1						
Na ⁺	0,8009	0,5917	0,4392	-0,1621	0,0552	0,4474	0,0552	0,6579	0,5664	-0,1635	0,1822	0,0663	0,1877	0,7711	0,2472	0,7708	1					
SO ₄ ²⁻	-0,136	0,0626	0,0817	0,1158	-0,229	-0,0861	-0,229	0,2306	-0,0217	-0,5854	0,157	-0,2142	0,0202	-0,0072	0,0228	-0,2119	0,0285	1				
Temp.	0,1522	-0,1469	-0,0958	0,025	0,3583	-0,0501	0,3583	-0,2077	0,073	0,503	-0,2062	0,2528	-0,0348	0,0743	-0,0219	0,2414	0,1427	-0,7485	1			
Turb.	-0,1552	-0,1888	-0,1305	-0,0044	0,1199	-0,094	0,1199	-0,2267	-0,1564	0,2428	-0,2448	-0,0734	-0,0987	-0,0999	-0,2008	-0,1325	-0,348	-0,4229	0,2573	1		
Zn	-0,2058	-0,361	-0,205	0,0499	-0,0119	-0,127	-0,0119	-0,1604	-0,1329	0,0237	-0,0005	0,132	-0,2786	-0,2155	0,0698	-0,1405	-0,1238	-0,1626	0,2156	0,3675	1	

Anexo 14. Resultados del análisis de componentes principales realizado con base en los datos obtenidos del acuífero Poás.

Parámetro	PC1	PC2	PC3
OD	0,134	-0,565	0,603
SDT	0,898	0,290	0,049
Alcalinidad	0,932	0,003	0,072
Dureza	0,654	0,640	-0,239
Fluoruro	0,556	-0,725	-0,223
Cloruro	0,066	0,796	0,301
Nitrato	0,029	0,814	0,459
Sodio	0,842	-0,289	-0,060
Potasio	0,873	-0,032	0,098
EC	0,023	-0,356	0,871
Eigenvalue	3,905	2,844	1,551
% Variancia Total	39,1	28,4	15,5
% Acumulativo	39,1	67,5	83,0

Anexo 15. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que presentaron niveles de riesgo "alto" y "muy bajo" de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

Vulnerabilidad	Nivel de Riesgo			Prueba chi-cuadro de Pearson	
	Riesgo Alto	Riesgo Muy Bajo	Total	Valor X ²	Valor p
Alta	1	1	2	1,1481	0,5633
Baja	6	1	7		
Media	7	2	9		
Total	14	4	18		

Anexo 16. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a la concentración de nitrato de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

Vulnerabilidad	Nitrato RCAP			Prueba chi-cuadro de Pearson	
	Cumple	Valor Alerta	Total	Valor X ²	Valor p
Alta	2	0	2	1,3143	0,5183
Baja	5	2	7		
Media	8	1	9		
Total	15	3	18		

Anexo 17. Tabla de contingencia de los sitios de muestreo que cumplieron con el Reglamento para la Calidad del Agua Potable respecto a la concentración de coliformes totales de acuerdo con las zonas de vulnerabilidad a la contaminación.

Vulnerabilidad	CT RCAP			Prueba chi-cuadro de Pearson	
	Cumple	No Cumple	Total	Valor X ²	Valor p
Alta	1	1	2	1,1481	0,5633
Baja	1	6	7		
Media	2	7	9		
Total	4	14	18		

Anexo 18. Mapa de la zona de estudio y distribución de los sitios de muestreo con respecto a las zonas de vulnerabilidad a la contaminación propuestas en el Mapa de Vulnerabilidad a la Contaminación del Cantón de Poás elaborado por SENARA, clasificados de acuerdo con los conglomerados obtenidos.

