

<https://revistas.ucr.ac.cr/index.php/ingenieria/index>

www.ucr.ac.cr / ISSN: 2215-2652

Ingeniería

Revista de la Universidad de Costa Rica

ENERO/ JUNIO 2023 - VOLUMEN 33 (1)



EDITORIAL
UCR

Caracterización hidroquímica de aguas subterráneas dentro del área de cobertura del caudal Cajamarca, Bolivia

Hydrochemical characterization of groundwater within the Cajamarca flow coverage area, Bolivia

David Santiago Rocha Echalar

Universidad Privada del Valle, Sucre, Bolivia

e-mail: red3004189@est.univalle.edu

Código Orcid: 0000-0003-0087-9070

Joaquín Humberto Aquino Rocha

Universidade Federal de Río de Janeiro, Río de Janeiro, Brasil

e-mail: joaquinaquinorocha@gmail.com

Código Orcid: 0000-0002-3383-6379

Nahúm Gamalier Cayo Chileno

Universidad Privada del Valle, Cochabamba, Bolivia

e-mail: nahum.cayo.chileno@gmail.com

Código Orcid: 0000-0003-4350-1174

Recibido: 5 de mayor de 2022

Aceptado: 19 de agosto de 2022

Resumen

El trabajo tiene por objetivo analizar y evaluar la calidad del agua subterránea de la ciudad de Sucre, Bolivia, específicamente del área de cobertura del caudal Cajamarca. La metodología consistió inicialmente en la caracterización del área de estudio: localización, topografía, geología, marco hidrológico, hidrogeológico y precipitación pluvial. Posteriormente, se seleccionaron y tomaron muestras de siete pozos (P1-P7). Se realizaron los análisis microbiológicos, organolépticos, químicos e hidroquímicos, además de la evaluación para su uso en el área agrícola. Fueron considerados los requisitos mínimos del control de la calidad del agua para consumo humano de la Norma Boliviana 512, Ley N° 1333 del Medio Ambiente y las guías para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud. Los resultados demuestran que todos los pozos cumplen con los requerimientos establecidos en los parámetros químicos. Sin embargo, los siete pozos se ven comprometidos en la caracterización microbiológica y organoléptica. Respecto al análisis hidroquímico, se observa que la mayoría de las muestras pertenecen al grupo $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ con un contenido iónico relativamente elevado. Por otra parte, sólo los P2 y P7 son aptos para uso agrícola; mientras que, los P3 y P4 pueden ser empleadas bajo ciertas condiciones. Si bien la explotación de aguas subterráneas puede ser una alternativa a la demanda de agua, se debe realizar un análisis detallado de sus características y, si fuera necesario, un tratamiento para su uso.

Palabras Clave:

Análisis hidroquímico, análisis microbiológico, análisis organoléptico, análisis químico, calidad del agua, uso agrícola.



Abstract

The objective of this research work is to analyze and evaluate the quality of groundwater in the city of Sucre, Bolivia, specifically in the area covered by the Cajamarca flow. The methodology consisted initially in the characterization of the study area: location, topography, geology, hydrological and hydrogeological framework and rainfall. Subsequently, samples were selected and taken from seven wells (P1-P7). Microbiological, organoleptic, chemical and hydrochemical analyses were performed, as well as evaluation for agricultural use. The minimum requirements for water quality control for human consumption of Bolivian Standard 512, Law No. 1333 of the Environment and the guidelines for drinking water quality of the World Health Organization were considered. The results show that all the wells meet the requirements established in the chemical parameters. However, the seven wells are compromised in the microbiological and organoleptic characterization. Regarding the hydrochemical analysis, it is observed that most of the samples belong to the $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ group with a relatively high ionic content. On the other hand, only P2 and P7 are suitable for agricultural use, while P3 and P4 can be used under certain conditions. Although groundwater exploitation can be an alternative to water demand, a detailed analysis of its characteristics and, if necessary, a treatment for its use should be carried out.

Keywords:

Agricultural use, chemical analysis, hydrochemical analysis, microbiological analysis, organoleptic analysis, chemical analysis, water quality.

1. INTRODUCCIÓN

El acceso al agua potable (o segura) es uno de los factores más importantes para mejorar la salud pública y la calidad de vida de los seres humanos [1]–[4]. Sin embargo, el suministro de agua potable no siempre está disponible y es un recurso limitado, que representa un problema actual [5]–[9]. Ante ello, una de las soluciones planteadas es la explotación de aguas subterráneas a través de pozos [10].

Mora y Portuguez Barquero [11] señalan que se debe garantizar tanto los servicios de acceso como la calidad del agua para el consumo humano, esto a través de la captación de agua superficial y subterránea (pozos), al cumplir con los parámetros de calidad, continuidad, cantidad, costo y cobertura (5C). En países en vías de desarrollo, se utilizan indicadores conocidos como Índices de Calidad del Agua (ICA) que, a través de parámetros, permiten realizar un monitoreo y análisis de este recurso [12], [13].

En los últimos años, ha existido una sobreexplotación de los mantos acuíferos, situación que se da cuando la tasa de extracción es mayor o igual a la tasa de recarga [14], [15]. Para una gestión adecuada de las aguas subterráneas, es necesario, además, considerar los riesgos potenciales [16], ya que al estar expuestas al medio natural pueden llegar a estar en contacto con microorganismos patógenos [17]; nitratos, contaminante más común en los acuíferos [18], entre otros [19].

La ciudad de Sucre, Bolivia, ha presentado un considerable incremento poblacional [20] en los últimos años, especialmente en las áreas periurbanas, lo que ha provocado un aumento en la demanda de agua potable. Adicionalmente, la Empresa Local de Agua Potable y Alcantarillado Sucre - ELAPAS ha informado que las fuentes de agua explotadas (Cajamarca y Ravelo) son susceptibles a reducción de caudal en épocas de estiaje (agosto a diciembre). Si bien la ELAPAS tiene acceso a fuentes superficiales, el uso de aguas subterráneas ha sido una alternativa para reducir el déficit de agua potable. Sin embargo, se ha observado una explotación indiscriminada de esta fuente en diversos puntos de la ciudad de Sucre, Bolivia, sin que se haya comprobado si se cumple con los criterios de calidad.

En este contexto, el siguiente trabajo tiene como objetivo caracterizar la calidad del agua subterránea presente en el área de cobertura del caudal Cajamarca de la ciudad de Sucre, verificando el atendimento a los requisitos recomendados de calidad para consumo humano, específicamente la Norma Boliviana 512 [21], Ley N° 1333 del Medio Ambiente [22] y las guías para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud [23].

2. CARACTERIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de cobertura del caudal Cajamarca comprende los Distritos 3 y 4 de la ciudad de Sucre, Bolivia (Fig. 1), denominadas como zonas periurbanas, con una superficie de 16.67 km² y una población aproximada de 22 083 habitantes [20]. Los distritos en estudio son espacios rurales continuos a las áreas urbanas con superficies no urbanas (distritos 1 y 2). Ambos distritos se caracterizan por concentrar el 30 % de la población del municipio (80 981 habitantes) y por tener una tasa neta de migración de 6.58 % [20], [24]. Los distritos presentan industrias medianas

y un reducido territorio destinando a la agricultura, destacando el cultivo de maíz, trigo, papa y leguminosas.

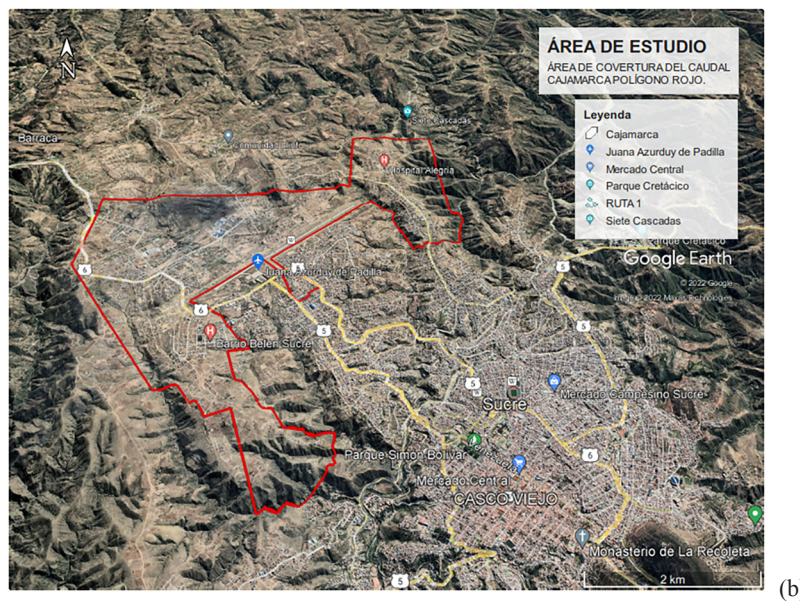
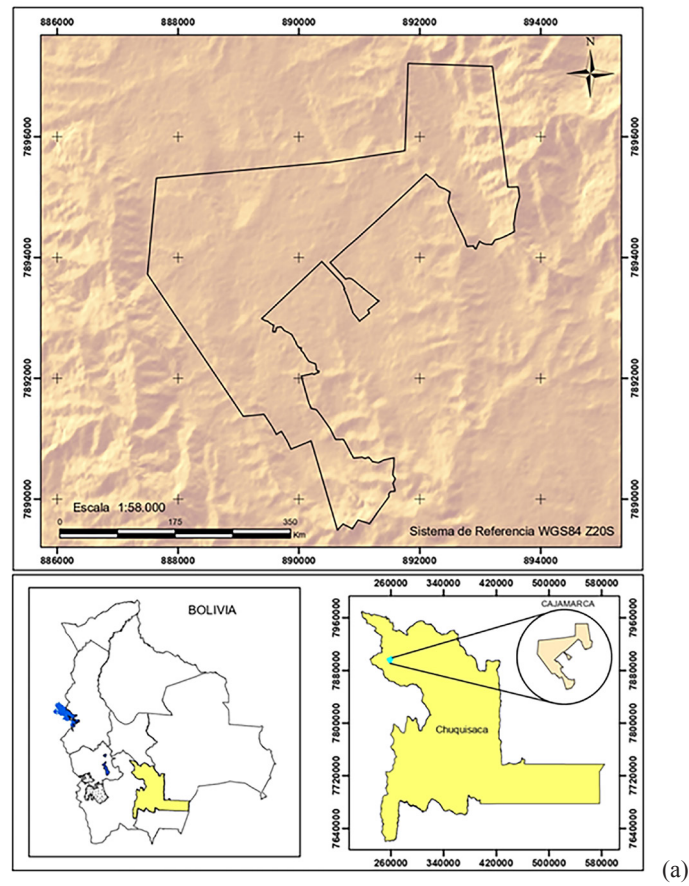


Fig. 1. Área de estudio: a) Ubicación geográfica y b) Ubicación vista satelital [25].

En el sector, se tiene acceso a los servicios de energía eléctrica y agua potable, esta última solo tiene cobertura del 20 % por parte de ELAPAS. El 87.88 % de los domicilios está conectado a la red de alcantarillado sanitario municipal; mientras que, el restante, evacua a los ríos colindantes [20], situación presentada desde los primeros asentamientos hasta la actualidad. Si bien no existe información oficial y estudios previos sobre estos ríos colindantes, todos presentan características del tipo effluente: topografía (llanuras aluviales), se encuentran en las nacientes y el curso de agua no es elevada (en época no lluviosa), indicando que no toda el agua que se infiltra en la cuenca va a incrementar el flujo subterráneo de los acuíferos [26].

La distribución de agua potable en la ciudad, remarcando que el área de estudio se encuentra en las zonas aledañas de los distritos 1 y 2 (zonas céntricas de la ciudad) son, por lo tanto, espacios rurales contiguos a las áreas urbanas, con superficies no urbanizadas.

La topografía del área de estudio es variable y pertenece al sistema geomorfológico de la cordillera Andina Oriental, distinguiéndose las siguientes unidades de paisaje: serranías de amplitud baja a media; relieves abruptos y quebrados; piedemontes; colinas medias a altas, y serranías de origen coluvio-aluvial [27]. Existe un control geológico estructural en la región, puesto que los bajos topográficos coinciden con altos sinclinales abiertos y los altos topográficos coinciden con anticlinales de estructura rocosa (en algunos casos maciza). Por tanto, es visible la formación de cuencas locales y regionales que indican la posibilidad de constituirse en acuíferos con una elevada recarga, constituyéndose en fuentes de circulación de agua con una porosidad secundaria importante para el almacenamiento de agua subterránea [26].

La elevación más alta del área de estudio es de 3 076 m.s.n.m. la elevación más baja es 2 733 m.s.n.m., en el límite del área, con una altura media de 2 905 m.s.n.m (Fig. 2a). Las pendientes en el área de estudio van de 11.64° a 156.24° (Fig. 2b). Toda la información topográfica fue generada mediante imágenes satelitales, las cuales fueron descargadas y procesadas en el Sistema de Información Geográfica ArcGIS.

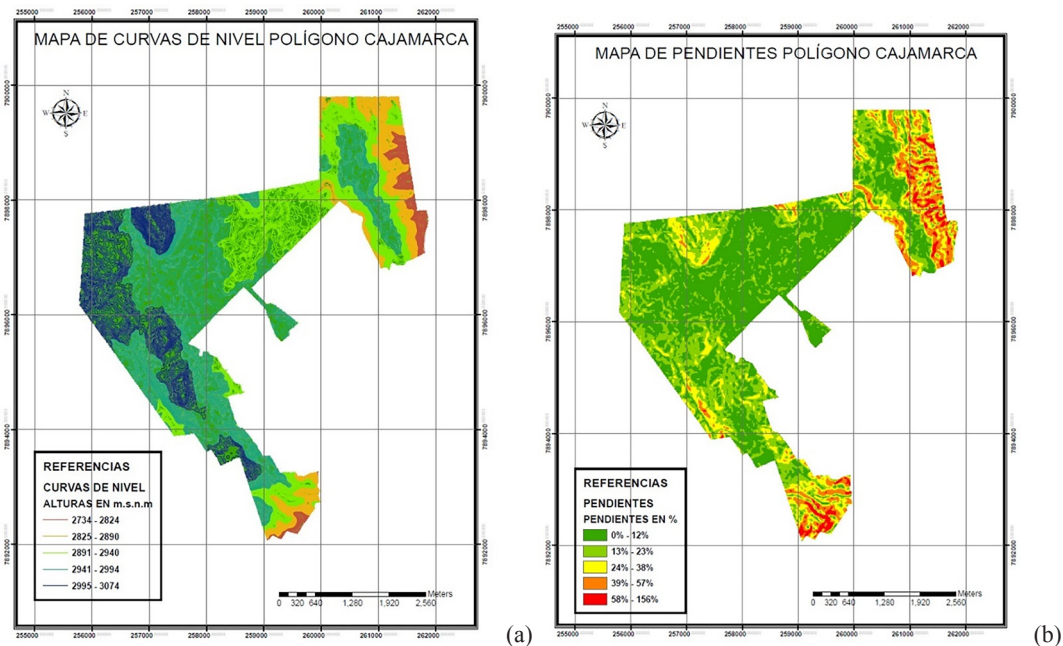


Fig. 2. a) Curvas de nivel y b) Pendientes del área de estudio.

La Fig. 3 presenta el mapa geológico del área en estudio. La predominancia es de material rocoso fracturado, correspondiente al sistema ordovícico – cretácico. Las formaciones presentes son de edad paleozoica y del sistema silúrico con afloramientos de lutitas y areniscas friables de color amarillo pálido, intercaladas con pizarras gris oscuras a negruzcas compactadas. Asimismo, se observa una intercalación de roca cuarcítica con alto grado de silificación y la presencia de cuarzo lechoso a manera de delgadas vetillas, lo cual contribuye a un comportamiento impermeable de los sedimentos rocosos, especialmente a los 100 m de profundidad de perforación [26].

Respecto al marco hidrológico (Fig. 4), la zona es atravesada por las microcuencas asociadas a las cuencas menores de los ríos Cachi Mayu y Quirpinchaca, pertenecientes a la macrocuenca del Río de la Plata. La red hidrológica de la ciudad de Sucre se caracteriza por presentar varias corrientes o flujos de ríos que recorren de forma paralela entre sí, denominado drenaje paralelo. Este último es caracterizado por las formaciones de altas pendientes que forman valles angostos y profundos, como es el caso de las estructuras de la faja subandina. Por las particularidades topográficas de la región y la formación litológica de los suelos, el agua tiende a escurrir rápidamente; por lo tanto, las aguas subterráneas pueden estar concentradas en depósitos aglomerádicos con recargas de aguas meteóricas desde las cabeceras [28].

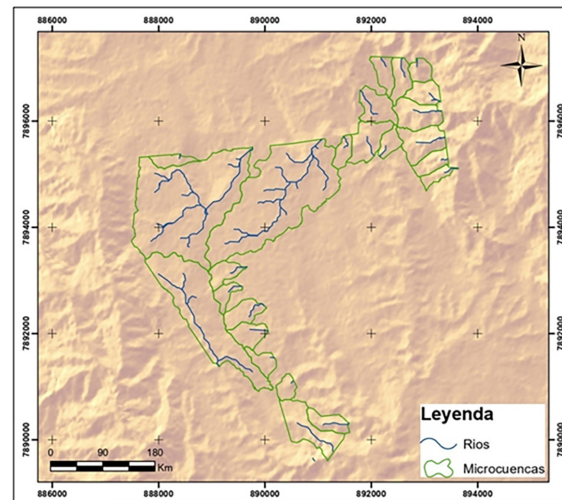
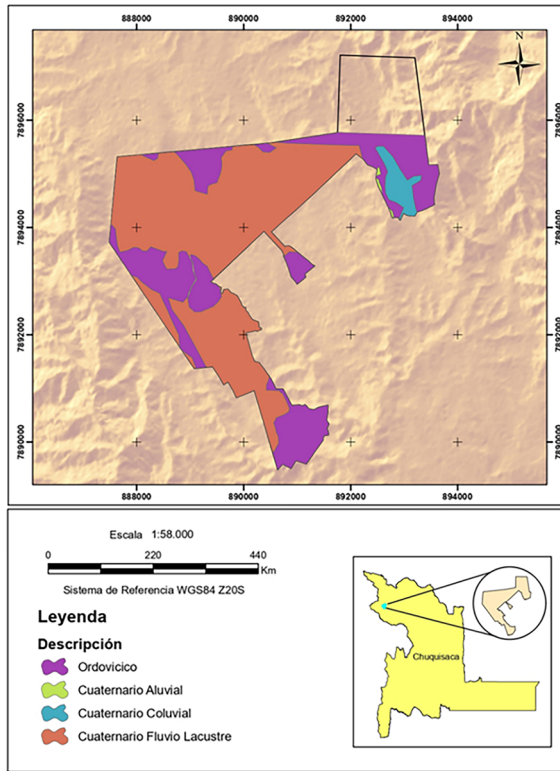
Respecto al marco hidrogeológico, en general en la región, está conformada por rocas paleozoicas (antiguas) y sedimentos cuaternarios (recientes); el sistema de acuífero encontrado en la ciudad está compuesto por dos unidades hidrogeológicas: a) un acuífero somero no confinado (libre), con material de grano heterogéneo formado principalmente por limos, arenas y gravas con un espesor que varía en algunos lugares de 5.5 m a profundidades de 36 m, y b) profundo, acuífero semiconfinado que se encuentra por debajo del primero en una capa más profunda y de mayor espesor, se constituye por rocas metamórficas fracturada (pizarras y cuarcitas) y rocas sedimentarias (limotitas y lutitas) [28].

Los datos de precipitación pluvial se presentan en el CUADRO I, correspondiente a los datos registrados en la estación más antigua de la ciudad, emplazada en el aeropuerto “Juana Azurduy de Padilla” que provee datos en forma ininterrumpida desde 1975, ubicada a 19°03’18” (latitud), 65°13’18” (longitud) y a 2 903 m.s.n.m.

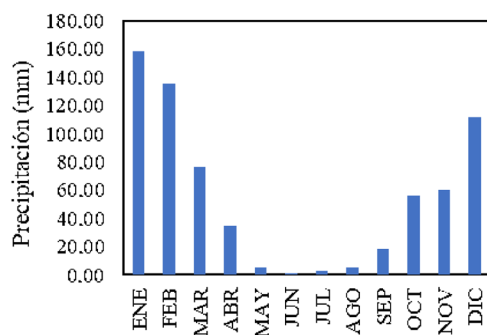
CUADRO I
PRECIPITACIÓN PLUVIAL

Precipitación media anual	770.6 mm
Precipitación media mensual - Época lluviosa (noviembre a marzo)	125.8 mm
Precipitación media mensual - Época seca (abril a octubre)	20.2 mm

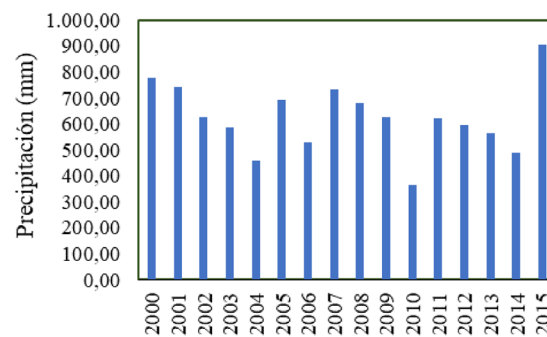
Los meses de mayor precipitación son los de diciembre, enero, febrero y marzo con 69.89% de las precipitaciones totales (época lluviosa), y los meses con menos precipitación son mayo, junio, julio y agosto con 2.3 %.



La Fig. 5a y 5b presentan los datos de precipitación media mensual y anual para el periodo 2000-2015.



(a)



(b)

Fig. 5. (a) Precipitación media mensual y (b) Precipitación anual.

La temperatura media anual es 16.75 °C, la temperatura máxima y mínima absoluta es 18.99 °C y 4.3 °C, respectivamente [30]. Las temperaturas medias mensuales para el periodo de 2000-2015 se presentan en la Fig. 6.

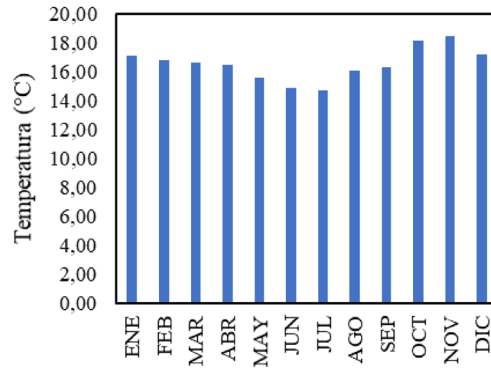


Fig. 6. Temperatura media mensual.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

El procedimiento adoptado para cumplir con el objetivo de la siguiente investigación se detalla en la Fig. 7.

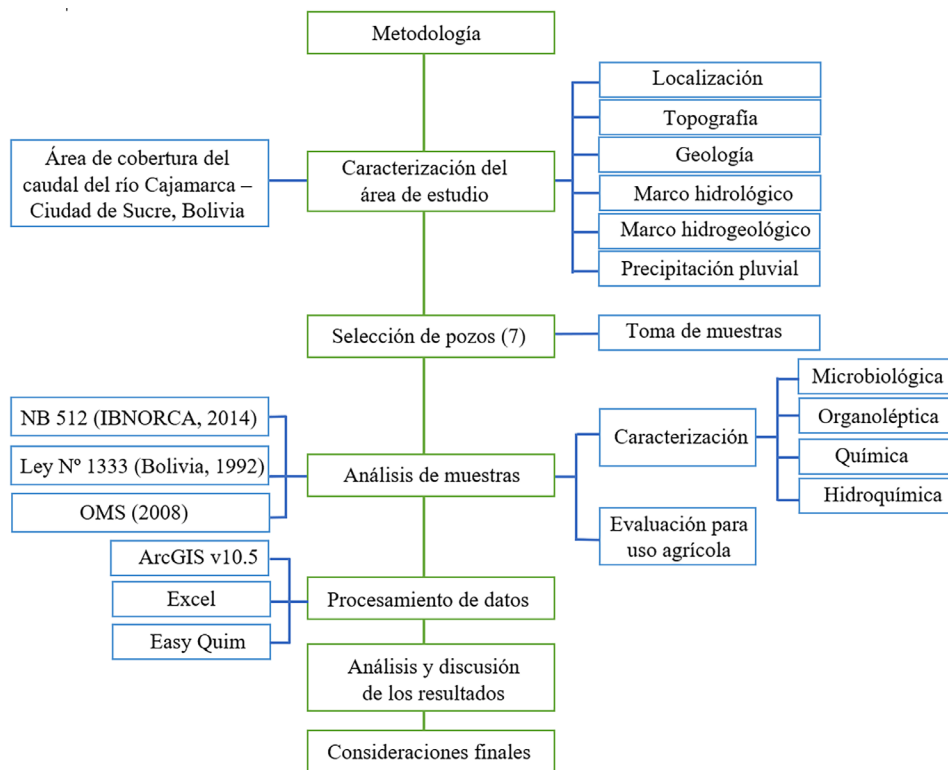


Fig. 7. Metodología del estudio.

3.1. Pozos estudiados

La selección de pozos fue de acuerdo con la localización, que exista proximidad entre los pozos, además de presentar accesibilidad para realizar los ensayos de caracterización. El detalle de los pozos estudiados es presentado en el CUADRO II y la localización se observa en la Fig. 8.

CUADRO II
POZOS ANALIZADOS

Pozo	Nombre	Tipo de excavación	Profundidad (m)	Otras informaciones
P1	Avícola Camargo	Manual	26	Pozo artesanal con revestimiento de cemento y con contaminación directa de la granja avícola.
P2	Barrio Yuraj Yaku (1)	Manual	8	Pozo artesanal sin sistema de bombeo eléctrico. No cuenta con revestimiento y se encuentra a 100 m del Río Tucsupaya (efluente y desborda en época lluviosa).
P3	Barrio Residencial	Perforado	100	Sistema de bombeo eléctrico con almacenamiento de 2.5 l/s. Se encuentra cerca de una cámara de inspección de aguas residuales y a 300 m de un río colindante que desborda en época lluviosa.
P4	Barrio Villa Tunari	Perforado	60	Sistema de bombeo eléctrico. Con un caudal de 4.5 l/s derivados a la piscicultura. Se encuentra cerca de un riachuelo con gran contaminación.
P5	Barrio Yuraj Yaku (2)	Perforado	70	Sistema de bombeo eléctrico A 100 m del río Tucsupaya (efluente y desborda en época lluviosa).
P6	Barrio Villa Marcelita	Perforado	80	Sistema de bombeo eléctrico. Para lavado de movildades.
P7	Barrio Nueva Alegría	Perforado	129	Sistema de bombeo y tanque de almacenamiento. El agua es usada para el consumo humano.

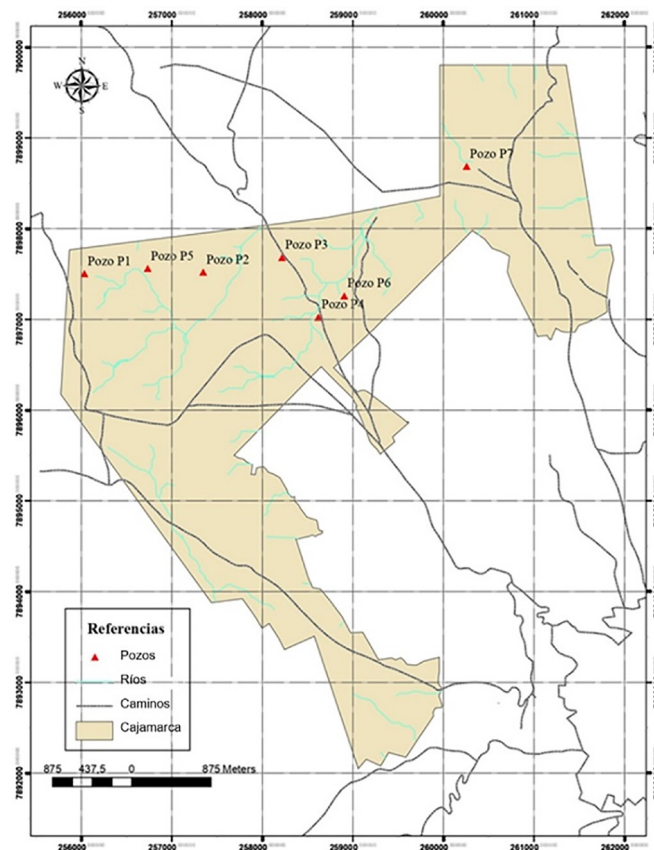


Fig. 8. Localización de pozos en el área de estudio.

3.2. Toma de muestras

Para el proceso de toma de muestras se adoptaron procedimientos y protocolos establecidos en la NB 496 [31]. Los frascos se lavaron con agua destilada días antes para evitar contaminación cruzada. Se utilizaron conservantes químicos para el análisis de los nitratos, nitritos, aceites y grasas. Se enjuagaron al menos tres veces los frascos con el agua proveniente del lugar de muestreo (a excepción de los frascos con conservantes químicos). El agua extraída durante los primeros diez minutos fue desechada para luego tomar la muestra. Finalmente, las muestras se transportaron al laboratorio en el día.

Las muestras para el análisis de calidad de agua subterránea fueron obtenidas durante dos periodos: el primero en marzo de 2021 para los pozos P1, P2, P3, P4, P5, y el segundo en abril del mismo año para los pozos P6 y P7. Es importante recalcar que, ambos períodos se encontraban en la época lluviosa de la región.

Los parámetros físico-organolépticos fueron analizados en campo: color, olor y sabor. En el parámetro de sabor se tuvieron dos excepciones: los dos pozos excavados manualmente (P1 y P2), ya que presentaban un olor predominante.

3.3. Análisis de Laboratorio

Los análisis se realizaron en el Laboratorio de Control de Calidad de ELAPAS, un total de siete muestras y otro grupo de siete parámetros fueron analizados en el laboratorio privado P.C.B. Ambiental S.R.L. El CUADRO III indica los parámetros analizados y los métodos de determinación utilizados.

Adicionalmente, se realizó la evaluación de la calidad de agua para su uso agrícola, considerando la salinidad, adsorción de sodio (RAS) y contenido de carbonato de sodio residual (CSR).

Para todos los valores obtenidos, se verificó el cumplimiento a los requisitos mínimos del control de la calidad del agua para consumo humano de la Norma Boliviana 512 [21], Ley N° 1333 del Medio Ambiente [22] y las guías para la calidad de agua potable de la Organización Mundial de la Salud [23].

3.4. Procesamiento de los datos

Los resultados fueron procesados y analizados por medio de diversos programas:

- a). ArcGIS v10.5 para la elaboración de los mapas de localización, topografía, geología, microcuencas y ubicación espacial de los pozos analizados.
- b). Microsoft Excel para la creación de la base de datos.

- c). Easy Quim para el análisis de la calidad del agua subterránea y la creación de los diagramas de Piper, Stiff y Wilcox.

CUADRO III
POZOS ANALIZADOS

Nro.	Parámetro	Método de determinación	Laboratorio	
1	Conductividad eléctrica	Potenciométrico		
2	Turbiedad	Nefelométrico		
3	pH	Potenciométrico		
4	Coliformes Totales	Membrana filtrante		
5	Color	Espectrofotométrico	Control de Calidad ELAPAS	
6	Cloruros (Cl ⁻)	Potenciométrico		
7	Calcio (Ca ²⁺)	Cálculo		
8	Dureza total (CaCO ₃)	Volumétrico EDTA		
9	Magnesio (Mg ²⁺)	Cálculo		
10	Sulfatos (SO ₄ ⁻²)	Espectrofotométrico		
11	y Sodio (Na ⁺)	Potenciométrico		
12	Alcalinidad total (CaCO ₃)	SM 2320B		
13	Bicarbonatos (CaCO ₃)	SM 2320B		
14	Carbonatos (CaCO ₃)	SM 2320B		P.C.B. Ambiental S.R.L.
15	Nitratos (NO ₃ ⁻)	DIN 38405-9		
16	Nitritos (NO ₂ ⁻)	SM 4500B-NO2		
17	Potasio (K ⁺)	SM 4500B-K		
18	Aceites y grasas	SM 5520B		

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Características microbiológicas

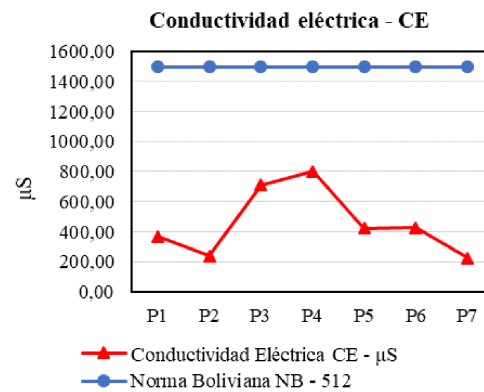
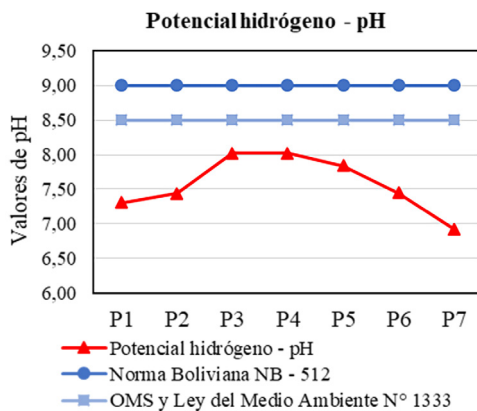
Por medio del análisis microbiológico, se observa que las aguas subterráneas estudiadas exceden los valores permisibles de coliformes totales de la NB 512 [21] (CUADRO IV). Los pozos P6 y P7 se encuadran en la clasificación de agua de clase D, con coliformes que no exceden los 20 000 UFC/100 ml. Los pozos P1, P3 y P4 dieron como resultado Demasiados Números Para Ser Contados (DNPSC), estos valores se deben al exceso de contaminantes patógenos, que puede deberse a las filtraciones de aguas superficiales contaminadas con aguas servidas. Los pozos P1 y P2 fueron excavados de manera manual por lo que la contaminación es posible en mayor porcentaje. El pozo P3 se encuentra a sólo 50 m de una cámara de inspección de aguas residuales y los demás pozos (P4, P5, P6 y P7) se encuentran cerca de los ríos colindantes.

CUADRO IV
RESULTADOS DE COLIFORMES TOTALES EN LAS MUESTRAS

Pozo	Coliformes totales (UFC/100 ml)
P1	DNPSC
P2	42 000
P3	DNPSC
P4	DNPSC
P5	138 000
P6	3 000
P7	4 000

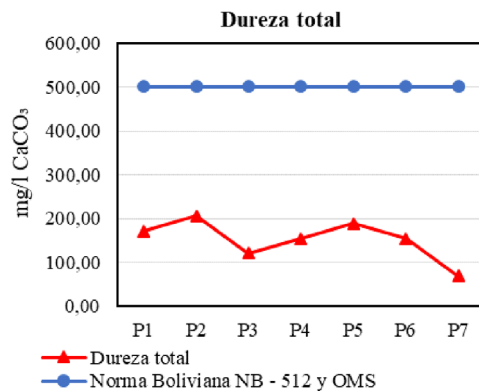
4.2. Características físico-químicas

Los resultados del análisis químico de los pozos estudiados se presentan en la Fig. 9.

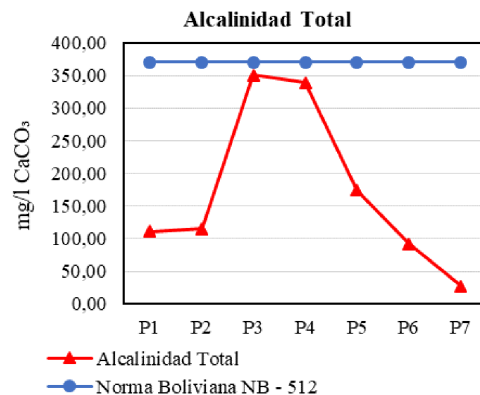


(a)

(b)



(c)



(d)

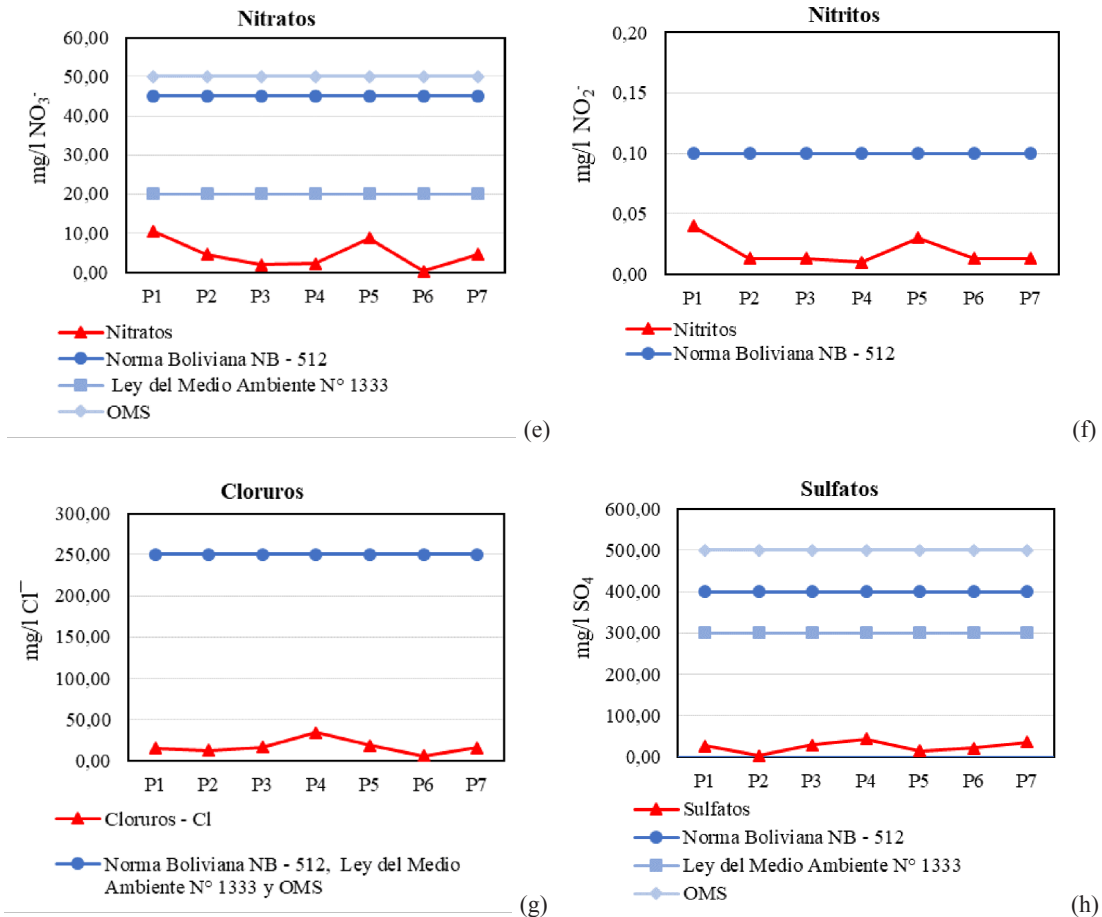


Fig. 9. Análisis químico: a) Potencial hidrógeno, b) Conductividad eléctrica, c) Dureza total, d) Alcalinidad total, e) Nitros, f) Nitritos, g) Cloruros y h) Sulfatos.

La concentración de nitros y nitritos se relacionan con el ciclo del nitrógeno del suelo. Los nitros se adicionan por medio de fertilizantes y los nitritos se forman por la biodegradación de nitros, nitrógeno amoniacal y otros compuestos orgánicos nitrogenados [34]. Los valores obtenidos en las muestras no sobrepasan los límites establecidos (Fig. 9e y 9f).

Respecto a la concentración de cloruros, sulfatos y otras sales inorgánicas, son iones que se encuentran en el agua subterránea, debido a su solubilidad pasan rápidamente a la fase acuosa para alcanzar concentraciones muy elevadas [35]. Para ambos casos, se observa que tienen concentraciones bajas respecto a las máximas admisibles (Fig. 9g y 10h).

4.2. Características física-organolépticas

En el CUADRO V se presentan los resultados de las características organolépticas de los pozos estudiados, resaltando el incumplimiento de los límites recomendados.

CUADRO V

DETALLE DEL INCUMPLIMIENTO A LAS CARACTERÍSTICAS ORGANOLÉPTICAS DE LOS POZOS POR ESPECIFICACIÓN TÉCNICA

Parámetros	NB 512 (IBNORCA, 2014)	Ley N° 1333 (Bolivia, 1992)	OMS (2008)
Color	P1, P2, P3	P1, P2, P3, P4	--
Turbiedad	P2, P3, P7	P3	P1, P2, P3, P5, P6, P7
Olor	--	--	--
Sabor	P1, P2	P1, P2	P1, P2

La Fig. 10 muestra el detalle del análisis de turbiedad, color y aceites y grasas.

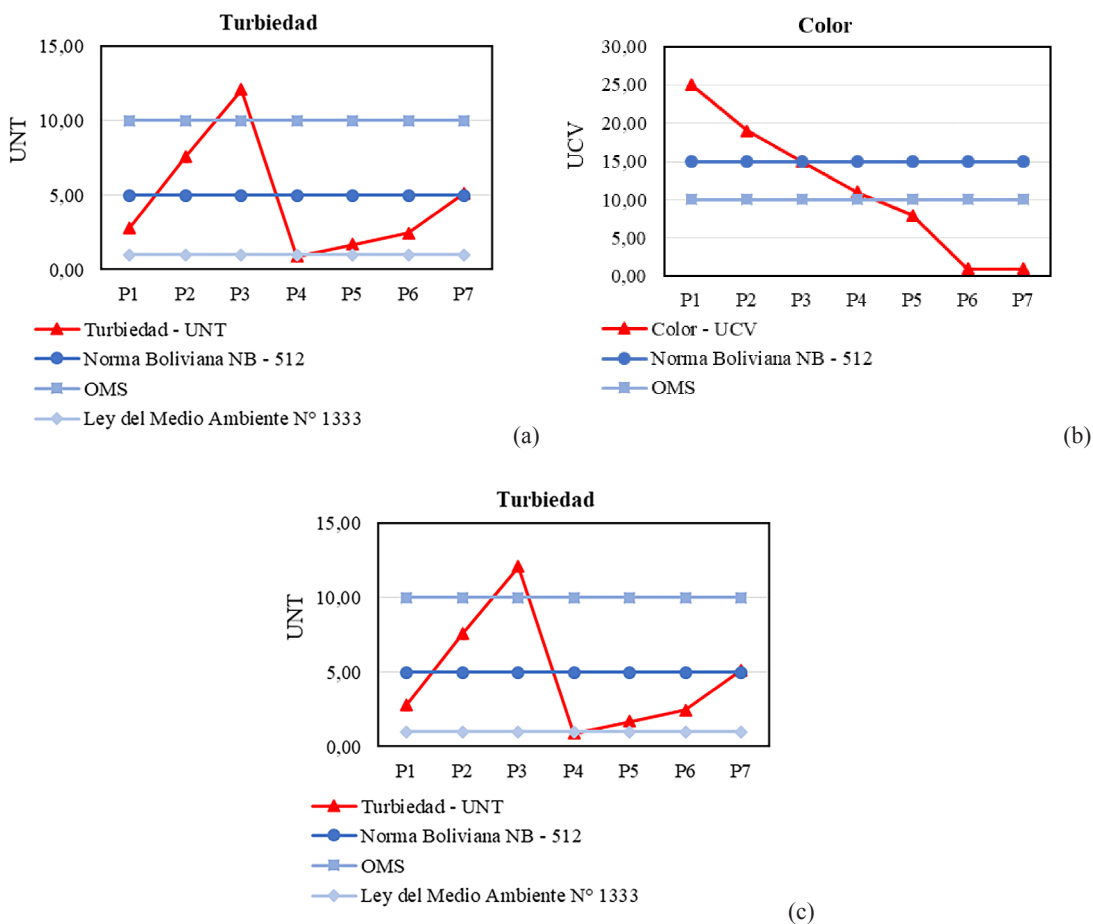


Fig. 10. Características organolépticas: a) Turbiedad, b) Color y c) Aceites y grasas.

La turbiedad se debe a la presencia de partículas suspendidas y disueltas de gases, líquidos y sólidos, que pueden ser orgánicas e inorgánicas. Es una característica importante para el agua de abastecimiento público por la estética, filtrabilidad y desinfección [23]. Sin embargo, en la Fig. 10a, se observa que solo el P4 cumple con todos los requerimientos y, por el contrario, el P3 no atiende a las normativas.

El color es la capacidad de absorber radiación del espectro visible y se debe a la descomposición de material vegetal o a la presencia de sales de hierro [36]. Es una forma de indicar si el agua está contaminada o no. De los resultados obtenidos, solo los P5, P6 y P7 atienden los límites establecidos (Fig. 10b).

Los aceites y grasas son compuestos orgánicos constituidos principalmente por ácidos grasos de origen animal o vegetal, por lo general, se caracterizan por ser insolubles en agua y presentar una baja densidad [37]. Estos contaminantes en el agua deben atender ciertos criterios al momento de ser tratados; sin embargo, los resultados señalados en la Fig. 10c demuestran que todos los pozos atienden los límites establecidos por la Ley N° 1333 del medio ambiente.

4.3. Análisis hidroquímico

Se utilizó el diagrama de Piper para clasificar el agua de las muestras (Fig. 11). Se puede notar que, en el triángulo de los aniones, existe predominio del ion HCO_3^- (tipo bicarbonatado) en seis pozos de los siete, siendo solo uno (P7) tipo $\text{SO}_4^- \text{Cl}$ (tipo clorurada - sulfatada). En el triángulo de cationes, se diferencian cinco grupos: a) P3, P4 y P7 corresponden al ion Na^+ ; b) P1 corresponde a un tipo intermedio, teniendo como iones predominantes Na^+ y Ca^{2+} ; c) P5 también es de tipo intermedio con predominancia de los iones Na^+ y Mg^{2+} , y d) P6 y P2 comparten los iones Ca^{2+} Mg^{2+} y Ca^{2+} , respectivamente.

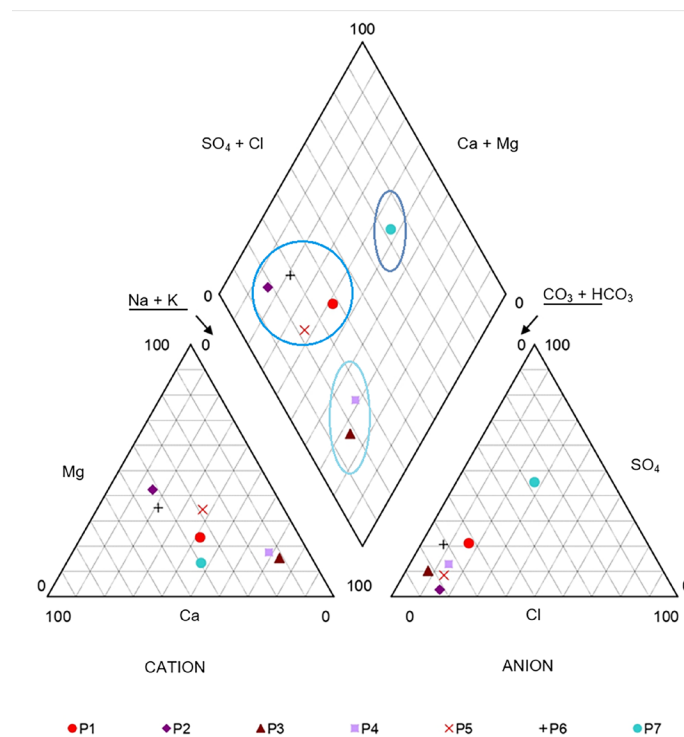


Fig. 11. Diagrama de Piper para análisis químico.

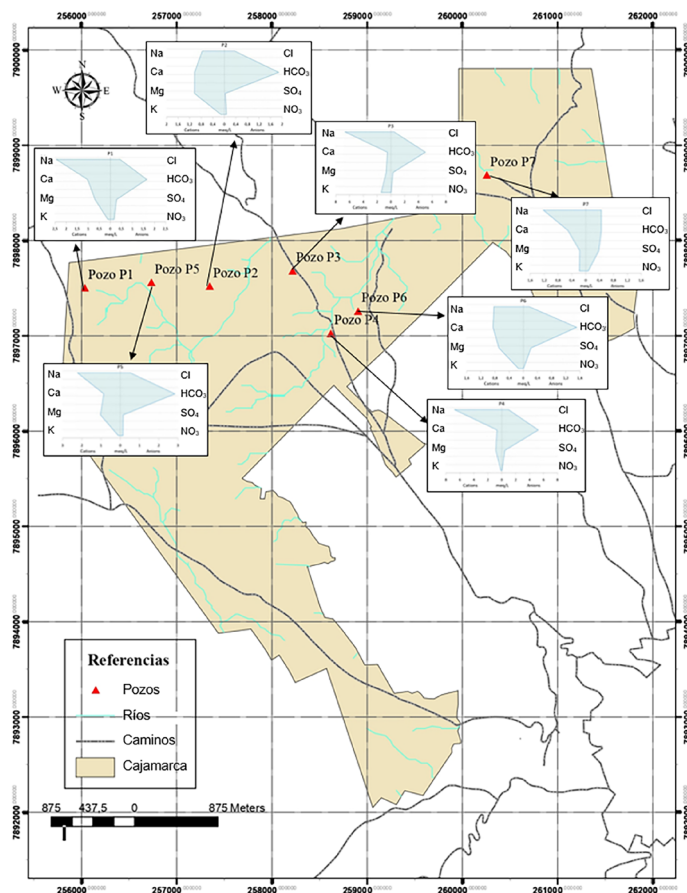


Fig. 12. Diagrama de Stiff para los pozos estudiados.

El 57 % de las muestras analizadas (P1, P2, P5 y P6) corresponden al grupo del tipo bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas, lo cual indica que es una zona de recarga joven. Los P3 y P4 corresponden al grupo de bicarbonatadas sódicas y/o sulfatadas y, por último, el P7 corresponde al grupo de cloruradas y/o sulfatadas sódicas.

Para determinar la distribución espacial de las principales características hidroquímicas de las aguas subterráneas del área de estudio, se presentan los diagramas de Stiff modificados (Fig. 12).

Se han diferenciado tres grupos hidroquímicos diferentes: a) $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$, b) $\text{Mg}^{2+}\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, y c) $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$. P1, P3, P4, P5 y P7 corresponden al primer grupo, donde la predominancia de sodio y bicarbonato es clara. P2 tiene una dominancia del segundo grupo y P6 corresponde al tercer grupo, este último es cuando el agua es de reciente infiltración, según lo establecido por [38]. Se observa que la mayoría del agua analizada es del primer grupo ($\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$) con un contenido iónico relativamente elevado.

4.4. Evaluación de la calidad del agua para uso agrícola

Debido a que la región presenta un clima árido o semiárido, es de esperar que parte de las aguas superficiales y subterráneas presenten, periódicamente, problemas de salinidad y sodicidad.

Según el criterio de salinidad del [39], el P4 se encuentra en la categoría de agua altamente salina (C3), ya los demás pozos se clasifican como de media (C2) o baja salinidad (C1) (CUADRO VI).

CUADRO VI
CRITERIO DE SALINIDAD

CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$ a 25°C)	Clasificación	Pozo/Porcentaje (%)
100-250	Agua de salinidad baja (C1)	P2, P7/29 %
250-750	Agua de salinidad media (C2)	P1, P3, P5, P6 /57 %
750-2250	Agua altamente salina (C3)	P4/14 %
>2250	Agua muy altamente salina (C4)	0/0 %

Todas las muestras cumplen el criterio de adsorción de sodio (RAS) (CUADRO VII) del [39], indicando que son clasificadas como aguas con bajo contenido de sodio, por lo tanto, no ocasionarán alteraciones en la permeabilidad del suelo y son aptas para riego.

CUADRO VII
CRITERIO DE ADSORCIÓN DE SODIO (RAS)

RAS	Apta para riego	Pozo/Porcentaje (%)
<10	Excelente (S1)	P1, P2, P3, P4, P5, P6 y P7/100 %
10-18	Buena (S2)	0/0 %
18-26	Dudosa (S3)	0/0 %
>26	Inadecuada (S4)	0/0 %

El diagrama de Wilcox clasifica de acuerdo con el riesgo de salinización y sodificación de la muestra por medio de parámetros como lo son CE y RAS. Para el sistema de aguas subterráneas en el área de estudio, se observan tres clasificaciones predominantes: a) C1-S1, correspondiente a baja salinidad y sodicidad baja, al ser aguas aptas para riego agrícola, P2 y P7; b) C2-S1, media salinidad y sodicidad baja, que constituyen aguas de buena calidad y aptas para la agricultura con bajo riesgo de sodio intercambiable, P1, P5 y P6, y c) C3-S1, alta salinidad y sodicidad baja, que constituyen aguas que pueden ser utilizadas en la agricultura bajo ciertas condiciones, P3 y P4 (Fig. 13).

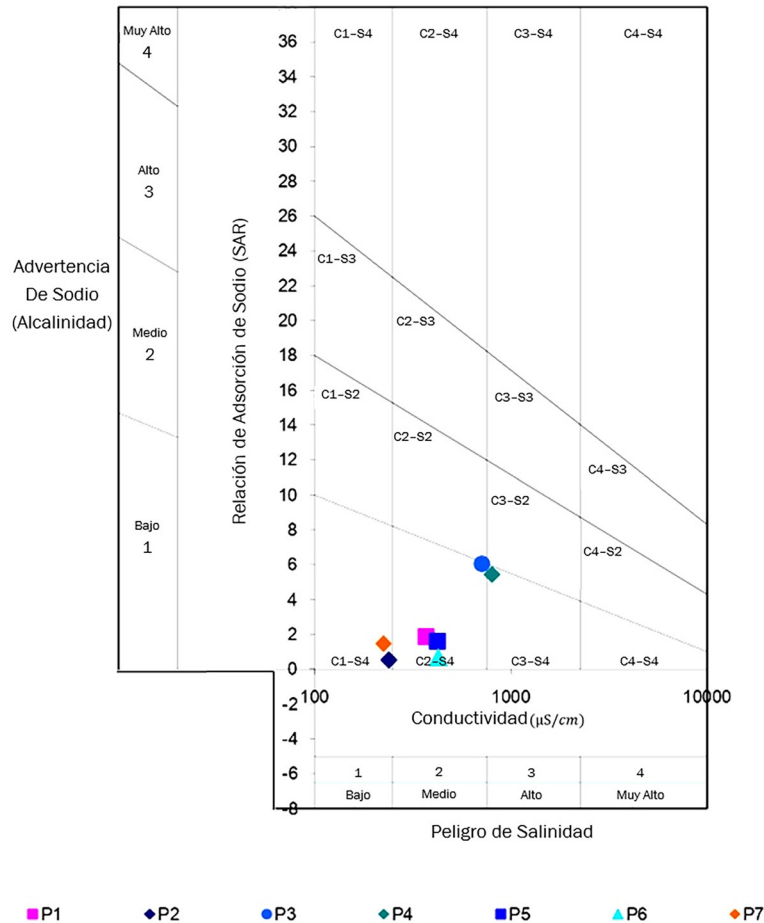


Fig. 13. Diagrama de Wilcox para los pozos estudiados.

Según el Reglamento de Ley N° 1333 de medio ambiente [22], las aguas que excedan los 2.5 mEq/l de carbonato de sodio residual (CSR) son consideradas como no aptas para riego; sin embargo, las muestras no exceden este límite (CUADRO VIII). Si el valor de CSR está entre 1.25 y 2.5 mEq/l, el agua se clasifica como dudosa, puede ser utilizada para riego agrícola con ciertos criterios, los pozos P3 y P4 se encuentran en esta clasificación. Ya si el contenido de CSR está por debajo de 1.25 mEq/l, indica un agua con buena calidad para riego, los pozos P1, P2, P5, P6 y P7 atienden a este criterio.

CUADRO VIII

CARBONATO DE SODIO RESIDUAL

CSR	Apta para riego	Pozo/Porcentaje (%)
<1.25	Apta para riego	P1-P2-P5-P6-P7/71 %
1.25-2.5	Dudosa	P3-P4/29 %
>2.5	No apta para riego	0/0 %

5. CONCLUSIONES

Los resultados muestran que el agua de los pozos analizados cumple con todos los requerimientos químicos de las normativas consideradas. Sin embargo, se encuentran contaminadas, como demostró el análisis microbiológico y organoléptico. En este sentido, para el consumo humano se requiere: a) tratamiento físico para eliminar el color y la turbiedad por el método de la coagulación-floculación-filtración; b) examinar la demanda química de oxígeno (DQO) para tratar los problemas estéticos, siendo el procedimiento de aireación el más adecuado, y c) desinfección bacteriológica, aplicando sustancias químicas tal como el hipoclorito de sodio. Si bien se utilizaron normativas nacionales y una internacional (Organización mundial de la Salud), se pueden considerar otros indicadores dependiendo del parámetro a ser analizado. Se recomiendan inspecciones y evaluaciones periódicas a los pozos del área estudiada, esto a fin de observar sus características en el tiempo y, si fuera necesario, tomar medidas correctivas.

El uso de aguas subterráneas del área de cobertura del caudal Cajamarca reduce el déficit de agua potable en la ciudad de Sucre, Bolivia, el cual beneficia a un porcentaje considerable de la población. No obstante, es necesario que los pozos actuales y los posteriores sean evaluados y tratados para el consumo humano y uso agrícola, aprovechando este recurso.

Se recomienda extender el trabajo, analizando alternativas con lo que respecta el tratamiento de aguas subterráneas, de modo que las autoridades y expertos en el área consideren un punto de partida ante la gestión de proyectos que impulsen el correcto aprovechamiento de las aguas subterráneas.

Finalmente, se recomienda analizar los parámetros físico-químicos pH, conductividad eléctrica y temperatura *in situ*, los cuales fueron una limitante por falta de instrumentación, futuras investigaciones pueden considerar estos parámetros.

6. ROLES DE LOS AUTORES

- David Santiago Rocha Echalar: Conceptualización, Investigación, Metodología, Visualización, Análisis formal, Redacción – revisión y edición.
- Joaquin Humberto Aquino Rocha: Curación de datos, Análisis formal, Metodología, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.
- Nahúm Gamalier Cayo Chileno: Administración del proyecto, Supervisión, Redacción – borrador original, Redacción – revisión y edición.

7 REFERENCIAS

- [1] L. Heller, *Saneamiento y salud*. Brasil, 1997.
- [2] M. Junkin, *Agua y salud humana*, Editorial Organización Panamericana de la Salud. 1996.
- [3] D. L. Heymann, *El control de las enfermedades transmisibles*, 2005.

- [4] D. A. Mora Alvarado, C. F. Portuguese Barquero e I. Sáenz Aguilar, “Saneamiento, educación y su relación con los indicadores básicos de salud en el contexto mundial 2002”, *Revista Costarricense de Salud Pública*, vol. 14, no. 27, pp. 35–45, 2005.
- [5] H. J. Sánchez-Pérez, M. G. Vargas-Morales y J. D. Méndez-Sánchez, “Calidad bacteriológica del agua para consumo humano en zonas de alta marginación de Chiapas”, *Salud Pública de México*, vol. 42, pp. 397–406, 2000.
- [6] C. D. Pérez, A. V. García y C. M. Gómez, “El riesgo de disponibilidad de agua en la agricultura: una aplicación a las cuencas del Guadalquivir y del Segura”, *Estudios de Economía Aplicada*, vol. 29, no. 1, pp. 333–357, 2011.
- [7] P. L. Younger, *Groundwater in the environment: an introduction*, Malden, MA, 2007.
- [8] E. Custodio, “Effects of groundwater development on the environment”, presentado en 1st Joint Congress on Groundwater, Fortaleza, Brasil, 2000.
- [9] E. Custodio, *Groundwater as a key water resource. Libro Homenaje al Profesor D. Rafael Fernández Rubio*. Madrid, España: Instituto Geológico y minero de España, 2005.
- [10] K. Song, X. Ren, A. K. Mohamed, J. Liu y F. Wang, “Research on drinking-groundwater source safety management based on numerical simulation”, *Scientific Reports*, vol. 10, no. 1, p. 15481, Dic. 2020, doi: 10.1038/s41598-020-72520-7.
- [11] D. A. Mora Alvarado y C. F. Portuguese Barquero, “Calidad del agua en sus diferentes usos en Guanacaste-Costa Rica al año 2011”, Julio, 2012. [En línea]. Disponible en: <https://dspaceaya.igniteonline.la/handle/aya/376>
- [12] G. Guzmán-Colis, F. Thalasso, E. M. Ramírez-López, S. Rodríguez-Narciso, A. L. Guerrero-Barrera y F. J. Aavelar-González, “Evaluación espacio-temporal de la calidad del agua del río San Pedro en el Estado de Aguascalientes, México”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 27, no. 2, pp. 89–102, 2011.
- [13] N. C. Kankal, M. M. Indurkar, S. K. Gudadhe y S. R. Wate, “Water quality index of surface water bodies of Gujarat, India”, *Asian J. Exp. Sci.*, vol. 26, no. 1, pp. 39–48, 2012.
- [14] E. Custodio, “Aquifer overexploitation: what does it mean?”, *Hydrogeology Journal*, vol. 10, no. 2, pp. 254–277, Abr. 2002, doi: 10.1007/s10040-002-0188-6.
- [15] X. Chen, K. Zhang, L. Chao, Z. Liu, Y. Du y Q. Xu, “Quantifying natural recharge characteristics of shallow aquifers in groundwater overexploitation zone of North China”, *Water Science and Engineering*, vol. 14, no. 3, pp. 184–192, Sep. 2021, doi: 10.1016/j.wse.2021.07.001.
- [16] C. A. Scott, N. I. Faruqui y L. Raschid-Sally, *Wastewater use in irrigated agriculture*, Confrontin, 2004.
- [17] K. Baccaro, M. Degorgue, M. Lucca, L. Picone, E. Zamuner y Y. Andreoli, “Calidad del agua para consumo humano y riego en muestras del cinturón hortícola de Mar del Plata. RIA”, *Revista de Investigaciones Agropecuarias*, vol. 35, no. 3, pp. 95–110, 2006.
- [18] H. Muñoz, M. A. Armienta, A. Vera y N. Cenicerros, “Nitrato en el agua subterránea del Valle de Huamantla, Tlaxcala, México”, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, vol. 20, no. 3, pp. 91–97, 2004.
- [19] B. L. Morris, A. R. Lawrence, P. J. C. Chilton, B. Adams, R. C. Calow y B. A. Klinck, *Groundwater and its susceptibility to degradation: a global assessment of the problem and options for management*, Nairobi, Kenya: United Nations Environment Programme, 2003.
- [20] *Plan Territorial de Desarrollo Integral PTDI 2016-2020*, Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, Bolivia, 2018.

- [21] IBNORCA, *Norma boliviana NB 512: Agua potable - requisitos*. La Paz: IBNORCA, 2014.
- [22] Ley del medio ambiente, Ley No. 1333, *Reglamento a la ley del medio ambiente*, D.S No. 24176 de 8 de diciembre 1995, 1992.
- [23] OMS. *Guías para la calidad del agua potable*, 3ra ed, Ginebra: OMS, 2008.
- [24] Correo Del Sur (CDS), “Mayor crecimiento urbano”. correodelsur.com. https://correodelsur.com/capitales/20171107_mayor-crecimiento-urbano.html (accesado en Ago. 22, 2022)
- [25] *Google earth*. (2022). Google.
- [26] *Proyecto de desarrollo de aguas subterráneas PRODASUR - JICA N°100*. Prefectura del Departamento de Chuquisaca PDC, 2006.
- [27] *Plan Territorial de Desarrollo Integral del Municipio de Las Carreras PTDI 2016-2020*. Gobierno Autónomo Municipal de Sucre, Bolivia, 2017.
- [28] *Proyecto de desarrollo de aguas subterráneas PRODASUR - JICA N°273*. Gobierno Autónomo de Chuquisaca, 2011.
- [29] *Secretaría municipal de planificación para el desarrollo*. Gobierno Autónomo de Sucre GAS, 2021.
- [30] SENAMHI, 2021, “Base de datos oficial de SENAMHI”, distribuido por SENAMHI, Sismet.
- [31] IBNORCA, *Norma Boliviana NB-ISO 14004: Sistemas de gestión ambiental – directrices generales sobre principios y técnicas de apoyo*. La Paz: IBNORCA, 2005.
- [32] F. C. Rodríguez, P. Vera Zelada, D. F. Perez Tucto, Y. L. Ventura Zuloeta y M. M. Palco Valencia. Tratamiento de aguas ácidas naturales de la JASS Santo Domingo del Caserío de Yun Yun del Centro Poblado Porcón Bajo, con roca caliza y filtración por gravedad–Cajamarca 2018. (2018). Repositorio de la UPAGU. Accedido: Ago. 22, 2022. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.upagu.edu.pe/handle/UPAGU/1150>
- [33] E. Pérez-López, “Control de calidad en aguas para consumo humano en la región occidental de Costa Rica,” *Rev. Tecnología en Marcha*, vol. 29, no. 3, p. 3, Nov. 2016, doi: 10.18845/tm.v29i3.2884.
- [34] E. Cabrera Molina, L. Hernández Garcíadiego, H. Gómez Ruíz y M. Cañizares Macías, “Determinación de nitratos y nitritos en agua. Comparación de costos entre un método de flujo continuo y un método estándar”, *Revista de la Sociedad Química de México*, vol. 47, no. 1, pp. 88–92, 2003.
- [35] A. Cruz Falcón, E. Troyo Diéguez, J. M. Murillo Jiménez, J. L. García Hernández y B. Murillo Amador, “Familias de agua subterránea y distribución de sólidos totales disueltos en el acuífero de La Paz Baja California Sur, México”, *Rev. Terra Latinoamericana*, vol. 36, no. 1, p. 39, Jan. 2018, doi: 10.28940/terra.v36i1.316.
- [36] M. R. Lapeña, *Tratamiento de aguas industriales: aguas de proceso y residuales*, Marcombo. 1989.
- [37] A. E. Bailey, *Aceites y grasas industriales*, Reverte, 2020.
- [38] I. Chebotarev, “Metamorphism of natural waters in the crust of weathering—1”, *Geochimica Cosmochimica Acta*, vol. 8, no. 1–2, pp. 22–48, Aug. 1955, doi: 10.1016/0016-7037(55)90015-6.
- [39] U. S. L. Staff, *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, vol. 60, USA: US Department of Agriculture, 1954, pp. 83–100.