



40 años

Revista Boliviana de Química 40 años

ISSN 0250-5460 Rev. Bol. Quim. Sep./Oct. 2023 Paper edition
ISSN 2078-3949 Rev. boliv. quim. Sep./Oct. 2023 Electronic edition
Received 10 2 2022 Accepted 10 26 2023 Published 10 30 2023
Revista Boliviana de Química, 40(4), 117-128
Bolivian Journal of Chemistry 40(4), 117-128
DOI: <https://doi.org/10.34098/2078-3949.40.4.3>

CALIDAD DEL AGUA EN EL RÍO ICHALAYA, SU RELACIÓN CON LOS DRENAJES DE BOCAMINAS DE MINA MATILDE, MUNICIPIO CARABUCO

Original article

Peer-reviewed

Rolando R. Chuquimia Ninahuanca^{1,*}, Sulema Valdez Castro^{1,2}, Rigoberto Choque Aspiazu¹, Jorge Quintanilla Aguirre¹

¹Instituto de Investigaciones Químicas IIQ, Universidad Mayor de San Andrés UMSA, Av. Villazón N° 1995, La Paz, Bolivia, 0201-0220, iiq@umsa.bo; ²Especialidades Químicas I+D+I, División Medioambiente, Av. Chacaltaya 648, La Paz, Bolivia, 0201-0220

Keywords: Acid mine drainage, Acid Water, Mine Matilde. **Palabras clave:** Drenaje ácido de mina, Aguas ácidas, Mina Matilde.

ABSTRACT

Water quality in the ichalaya river, its relationship with the drainages of mine Matilde mine, carabuco municipality. The study of the water quality and classification of the Ichalaya River in La Paz, Bolivia, was carried out to have detailed information on the behavior of this body of water in the dry and rainy season during 2022 and 2023. Physicochemical parameters were measured in situ, and a preliminary diagnosis was made. Sampling was carried out at established points in the study area and the concentrations of anions, cations and metals were determined. From these results, the ionic balance of the water body was carried out. In conclusion, it was determined that the behavior of the body of water is of good quality until the confluence with the acidic waters of the Matilde Mine. However, along the way of the watercourse towards its mouth, the quality improves due to the contribution of tributaries, attenuating the effects of acidic waters. In this way we contribute to the management of basins for the comprehensive management of water resources, as well as the solution of environmental problems related to hydrochemistry in Bolivia. *Mail to: roloquimica291291@gmail.com

RESUMEN

Se realizó el estudio de la calidad hídrica y la clasificación del Río Ichalaya en La Paz, Bolivia, para tener información detallada del comportamiento de este cuerpo de agua en época de estiaje y de lluvias durante 2022 y 2023. Se midieron parámetros fisicoquímicos *in situ*, y se realizó un diagnóstico preliminar. Se realizó la toma de muestras en puntos establecidos en el área de estudio y se determinó las concentraciones de aniones, cationes y metales. A partir de estos resultados se realizó el balance iónico del cuerpo de agua. Como conclusión se determinó que el comportamiento del cuerpo de agua es de buena calidad hasta la confluencia con las aguas ácidas de la Mina Matilde. Sin embargo, en el trayecto del curso de agua hacia su desembocadura, la calidad mejora por el aporte de afluentes llegándose a atenuar los efectos de aguas ácidas. De esta forma coadyuvamos en la gestión de cuencas para el manejo integral del recurso agua, como en la solución de problemas ambientales referidos a la hidroquímica en Bolivia.

INTRODUCCIÓN

En Bolivia, la minería es uno de los sectores que impulsa a la economía generando fuentes de empleo, esta actividad se desarrolla normalmente en la región occidental del país. Los operadores mineros se encuentran en el sector estatal, cooperativista y privado. Dentro de la minería privada los minerales extraídos más importantes son



Zinc, Plomo, Estaño, Plata, Cobre y Oro. Las cooperativas mineras aportan el 16% de la cantidad total obtenida; donde los principales minerales explotados son Oro, Zinc, Estaño Plomo, Wólfram, Antimonio y Ulexita [1]. Mina Matilde es una mina en el Departamento de La Paz, Altiplano, latitud $-15,76667^{\circ}$ o $15^{\circ} 46'$ sur Longitud $-68,96667^{\circ}$ o $68^{\circ} 58'$ oeste y tiene una altitud de 4.118 m.s.n.m., fue uno de los yacimientos más importantes de zinc y plomo a nivel nacional, la explotación de este yacimiento data desde antes de la colonia. Entre los años 1925-1952 la propiedad minera fue explotada por la Compañía Hoshild y desde entonces el yacimiento ha pasado a propiedad de diferentes empresas. Actualmente la Cooperativa Minera Nuevo Potosí realiza labores de explotación del yacimiento gracias a un contrato de arrendamiento suscrito con la COMIBOL. Durante el auge de la minería, pasaban por la comunidad de Chaguaya, perteneciente a Puerto Carabuco (localidad y municipio de Bolivia, ubicado en la provincia Eliodoro Camacho del departamento de La Paz), 7000 toneladas de Zinc por mes proveniente de mina Matilde. Se tienen registros de una fuerte actividad minera siendo uno de los principales proveedores de Zinc a nivel mundial. Como consecuencia de la actividad minera de este sector [2], se generaron drenajes ácidos de mina [3] generando contaminación del lago Titicaca. En la actualidad aún se presenta el flujo de aguas ácidas que ingresan al lago desde el río Ichalaya.

El área de estudio fue delimitada en la Microcuenca del río Ichalaya, del cual forma parte la mina Matilde. En este sentido, se definió una red de monitoreo siguiendo los lineamientos de la guía operativa de monitoreo ambiental [4], estableciendo puntos de muestreo para el estudio del cuerpo de agua los cuales son: estaciones de base ubicado un punto aguas arriba de la actividad minera, estaciones de tendencia donde se estudia el trayecto y el cauce del río con sus aportes, y estaciones de flujo [4].

El muestreo se realizó en dos épocas, época húmeda y época seca. A partir de la información generada se establecerá la calidad del recurso hídrico de la microcuenca Ichalaya, mediante la categorización de las aguas según establece el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), establecido por la Ley de Medio Ambiente, Ley N°1333 [7].

EXPERIMENTAL

Materiales y métodos

Descripción del área de estudio

El área de estudio se encuentra ubicada en la parte norte del occidente boliviano a 4300 m.s.n.m., entre las coordenadas $15^{\circ}46'15,16''$ a $15^{\circ}47'33,18''$ de latitud sur y $68^{\circ}56'39,66''$ a $69^{\circ}2'55,89''$ longitud oeste (Figura 1). Comprende a los cantones de Putina y Chaguaya que pertenecen al municipio de Carabuco de la provincia Camacho del departamento de La Paz. En esta región se encuentra el río Ichalaya que recibe las descargas de aguas ácidas de la mina Mina Matilde, el curso del agua discurre hasta confluir en el lago Titicaca.

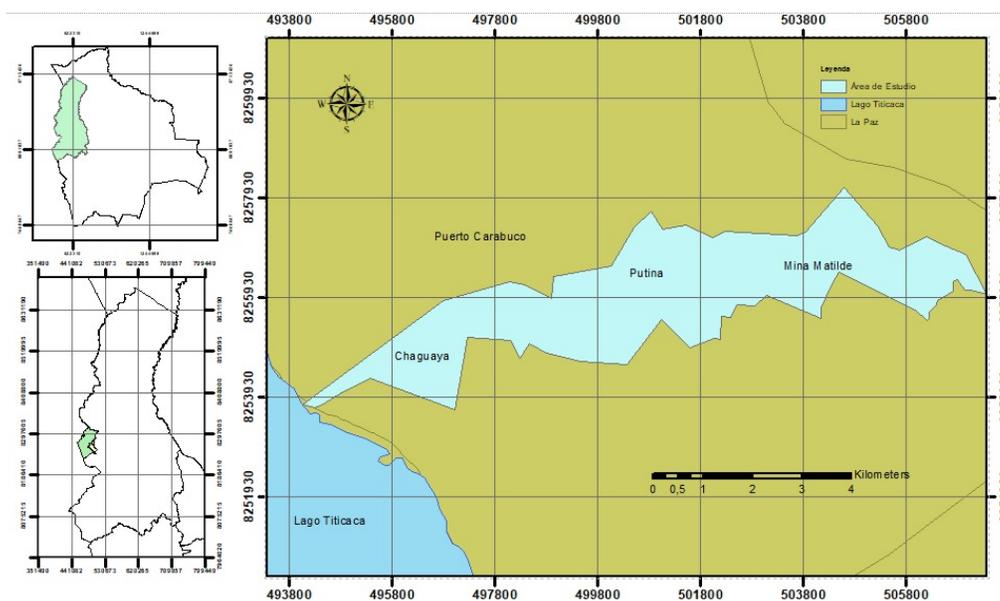


Figura 1. Área de estudio Mina Matilde – Río Ichalaya



El estudio se realizó durante la época seca (junio 2022) y húmeda (marzo 2023) que corresponden a las estaciones anuales de la región y comprenden desde las estaciones de base, estaciones de flujo y de tendencia, lineamientos establecidos por la Organización Mundial de la Salud (OMS).

Puntos de muestreo

Los puntos de muestreo establecidos comprenden a la microcuenca del río Ichalaya donde se encuentra ubicada la Cooperativa Minera Matilde con dos bocaminas en operación: Bocamina Maravilla y Bocamina Matilde (Figura 2). Los drenajes de estas bocaminas que confluyen con el río Ichalaya están ubicados en cercanías al cantón Putina del municipio de Puerto Carabuco, de la Provincia Camacho del Departamento de La Paz. Este río desemboca en el lago Titicaca pasando por cercanías del cantón Chaguaya.

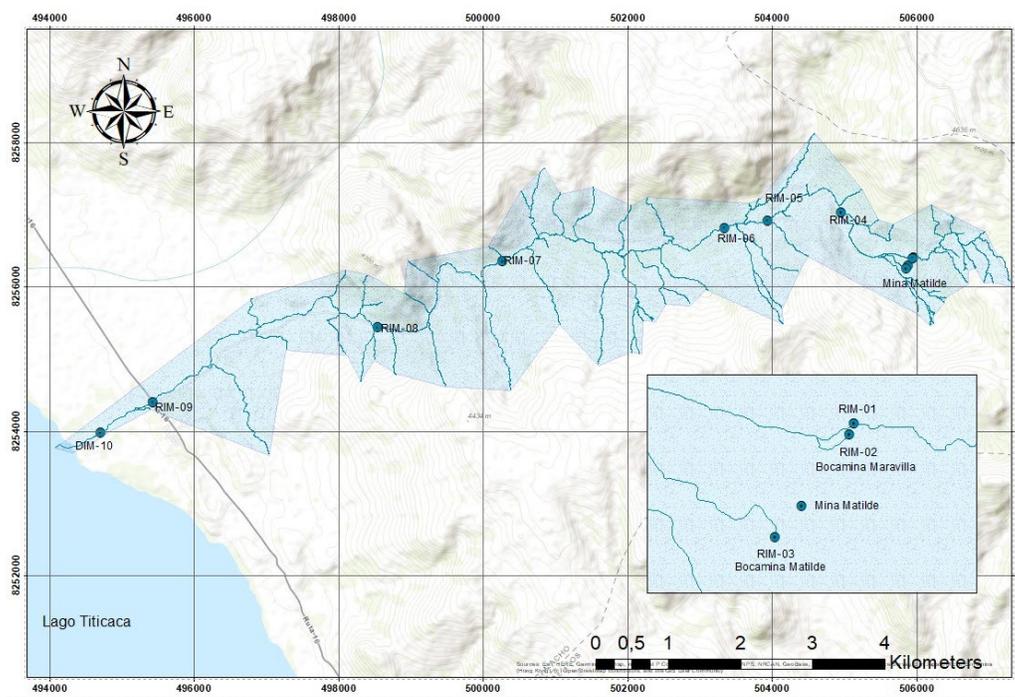


Figura 2. Puntos de muestreo sobre el Río Ichalaya y Mina Matilde

Los puntos de muestreo seleccionados en el área de estudio son 10: 8 puntos sobre el río Ichalaya y 2 puntos cercanos a las bocaminas Maravilla y Matilde, cuyas coordenadas se encuentran en la zona 19L y las mismas se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Coordenadas de ubicación de los puntos de muestreo

| Código | Nombre de punto de muestreo | Coordenadas | | Altitud [m] |
|--------|------------------------------------|-------------|------------|-------------|
| | | Este [m] | Norte [m] | |
| RIM-01 | Nacientes del río Ichalaya | 505966,71 | 8256407,68 | 4314,1 |
| RIM-02 | Bocamina Maravilla | 505960,84 | 8256392,08 | 4321,9 |
| RIM-03 | Bocamina Matilde | 505621,87 | 8256284,39 | 4298,6 |
| RIM-04 | Confluencia Ichalaya Matilde | 504921,77 | 8257115,83 | 4221,7 |
| RIM-05 | Antes de la comunidad Putina | 503885,24 | 8256905,94 | 4091,4 |
| RIM-06 | Después de la comunidad Putina | 503352,82 | 8256809,12 | 4160,4 |
| RIM-07 | Confluencia Ichalaya con afluentes | 503885,24 | 8256905,94 | 4091,4 |
| RIM-08 | Villa Molino | 504921,77 | 8257115,83 | 4221,7 |
| RIM-09 | Puente Chaguaya | 505621,87 | 8256284,39 | 4298,6 |
| RIM-10 | Salida Lago Titicaca | 505960,84 | 8256392,08 | 4321,9 |



Instrumentos

Para la medición de parámetros fisicoquímicos *in situ*, se emplearon un equipo Hanna HI 98130, un equipo multiparamétrico ProQuatro 606963 previamente calibrado, un caudalímetro FLOWATH, y un GPS UTM GEOMAP 3.8.0.

Las muestras fueron tomadas en envases de polietileno, previamente lavados con la misma muestra de agua, etiquetados y preservados en un contenedor a 4 °C, en cada punto se tomó una muestra en un frasco de 100 mL para análisis de cationes y metales preservando las mismas con ácido nítrico, y en 3 frascos de 500 mL para análisis de aniones, sólidos, alcalinidad y acidez. Las muestras fueron transportadas inmediatamente desde la zona de estudio al laboratorio para realizar los análisis correspondientes.

Determinación fisicoquímica de parámetros *in situ*

Los parámetros fisicoquímicos determinados en campo son: pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto, potencial oxido-reducción y caudales como un parámetro físico (Tabla 2). Todas las mediciones se realizaron siguiendo los protocolos establecidos por Standard Methods para el análisis de agua y aguas residuales [6].

Tabla 2. Parámetros fisicoquímicos determinados en campo

| Parámetro | Unidad | Método | Referencia |
|------------------|----------------------|---------------------------|--------------------------|
| Conductividad | µS/cm | Potenciométrico 2510 B | Manual del usuario Hanna |
| Oxígeno Disuelto | mg O ₂ /L | Membrana 2810 B | Manual ProQuatro 606963 |
| pH | - | Potenciométrico | Manual del usuario Hanna |
| ORP | mV | Potenciométrico | Manual del usuario Hanna |
| Temperatura | °C | Electrodo 2550 B | Manual del usuario Hanna |
| Caudales | L/s | Caudalímetro – Flujómetro | Manual del usuario |

Análisis de muestras

El análisis de las muestras en laboratorio se sintetiza en 4 grupos para realizar la determinación de: sólidos, aniones, cationes y metales, alcalinidad y acidez. Los parámetros analizados en laboratorio (Tabla 3) se realizaron en el Instituto de Investigaciones Químicas (IIQ) Carrera de Ciencias Químicas (CCQ) de la Universidad Mayor de San Andrés (UMSA), registrando las muestras y conservando las mismas a 4 °C.

Tabla 3. Parámetros analizados en laboratorio

| Parámetro | Unidad | Método |
|----------------------|-----------------------------|--------|
| Sólidos | Sólidos totales disueltos | mg/L |
| | Sólidos Suspendidos totales | mg/L |
| | Sólidos Totales | mg/L |
| | Sólidos sedimentables | mL/L |
| Acidez y Alcalinidad | Acidez total | mg/L |
| | Acidez Mineral | mg/L |
| | Alcalinidad | mg/L |
| Cationes | Sodio | mg/L |
| | Potasio | mg/L |
| | Calcio | mg/L |
| | Magnesio | mg/L |
| Aniones | Sulfatos | mg/L |
| | Fosfatos | mg/L |
| | Nitritos | mg/L |
| | Nitratos | mg/L |
| | Cloruros | mg/L |
| Metales | Zinc | mg/L |
| | Hierro | mg/L |
| | Manganeso | mg/L |
| | Cadmio | µg/L |
| | Arsénico | µg/L |
| Plomo | µg/L | |



El análisis de alcalinidad y acidez se realizó inmediatamente después del muestreo, empleando el método volumétrico de Análisis de Aguas Naturales y Residuales (Roodier) [5]. El análisis de sólidos se realizó por gravimetría (Standard Methods) [6]. El análisis de aniones se realizó por fotometría, utilizando el equipo Hach DR/2400. Finalmente, la determinación de cationes y metales se realizó por Absorción Atómica empleando el equipo Analytik Jena ContrAA 800 [6].

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La campaña de muestreo del río Ichalaya en época seca se realizó el 07 de julio de 2022 tomando 10 muestras para el análisis en laboratorio; y en época húmeda el 10 de marzo de 2023 tomando solamente 9 muestras, esto debido a que el último punto de muestreo no presentaba un flujo de agua.



Figura 3. Muestreo Río Ichalaya y Mina Matilde – (a) Punto aguas arriba Río Ichalaya, (b) Salida de agua ácida Bocamina Maravilla, (c) Salida de agua ácida Bocamina Matilde, (d) Medición de parámetros Físicoquímicos de aguas ácidas de Bocamina Matilde, (e) Muestreo en confluencia río Ichalaya Mina Matilde, (f) Muestreo Puente Chaguaya



Figura 3. (cont.)(g) Punto DIM 10 antes de la descarga a Lago Titicaca época de estiaje, (h) Punto DIM 10 antes de la descarga a Lago Titicaca época húmeda

Las aguas del río Ichalaya son empleadas en actividades agrícolas, y esta es una de las razones por la que el caudal en época húmeda en el río Ichalaya disminuye. En la Figura 3 se muestra el curso de agua en las dos épocas, en el último punto antes del ingreso al lago Titicaca; en época seca se tiene un flujo de agua, sin embargo, el caudal es nulo en época húmeda. Por tal razón, este punto no se considera en época de lluvias. En las Tablas 4, 5 y 6 se presentan los resultados obtenidos de los datos de campo, de los análisis en laboratorio de las dos campañas de muestreo.

Tabla 4. Resultados de mediciones de parámetros fisicoquímicos in situ

| Código | Época de estiaje | | | | | Época de lluvia | | | | |
|--------|------------------|---------------|-----------|-------------|--------------|-----------------|---------------|-----------|-------------|--------------|
| | pH | CE [μS/cm] | T [°C] | ORP [mV] | OD [mg/L] | pH | CE [μS/cm] | T [°C] | ORP [mV] | OD [mg/L] |
| RIM-01 | 8,62 | 390,0 | 16,0 | 127 | 8,94 | 7,05 | 333,2 | 8,1 | 23 | 6,52 |
| RIM-02 | 7,50 | 960,0 | 12,5 | 116 | 6,48 | 7,12 | 1807,0 | 11,4 | 64 | 4,87 |
| RIM-03 | 3,75 | 2300,0 | 12,7 | -1 | 6,09 | 4,02 | 2104,0 | 11,6 | -24 | 4,33 |
| RIM-04 | 5,41 | 1919,0 | 10,3 | 74 | 6,99 | 6,48 | 1106,0 | 15,0 | 13 | 4,50 |
| RIM-05 | 6,50 | 1750,0 | 11,4 | 70 | 6,99 | 6,29 | 1014,0 | 15,4 | 58 | 4,63 |
| RIM-06 | 6,70 | 1590,0 | 16,0 | -47 | 5,83 | 6,06 | 846,0 | 17,3 | 62 | 3,67 |
| RIM-07 | 6,73 | 1310,0 | 13,8 | -10 | 6,47 | 6,90 | 834,0 | 15,9 | -8 | 3,99 |
| RIM-08 | 7,05 | 1170,0 | 14,0 | 7 | 6,60 | 7,49 | 815,0 | 15,5 | 102 | 4,86 |
| RIM-09 | 6,92 | 1180,0 | 18,5 | 130 | 6,12 | 7,49 | 1048,0 | 21,7 | 106 | 3,83 |
| RIM-10 | 7,05 | 1200,0 | 18,7 | 134 | 6,07 | | | | | |

Nota: CE = Conductividad Eléctrica; T = Temperatura; ORP = Potencial Oxido Reducción; OD = Oxígeno Disuelto.

Tabla 5. Resultados de mediciones de sólidos en el cuerpo de agua

| Código | Sólidos Época de estiaje | | | | Época de lluvia | | | |
|--------|-----------------------------|---------------|---------------|--------------|-----------------|---------------|---------------|--------------|
| | Ssed [mL/L] | SDT [mg/L] | SST [mg/L] | ST [mg/L] | Ssed [mL/L] | SDT [mg/L] | SST [mg/L] | ST [mg/L] |
| RIM-01 | 0,00 | 163 | 0 | 163 | 0,01 | 60 | 2 | 62 |
| RIM-02 | 0,20 | 724 | 26 | 750 | 1,75 | 2020 | 16 | 2036 |
| RIM-03 | 5,33 | 3108 | 98 | 3206 | 1,40 | 2920 | 50 | 2970 |
| RIM-04 | 3,70 | 2310 | 96 | 2406 | 1,00 | 400 | 30 | 430 |
| RIM-05 | 2,50 | 2114 | 42 | 2156 | 1,20 | 900 | 46 | 946 |
| RIM-06 | 7,50 | 1582 | 62 | 1644 | 0,80 | 300 | 40 | 340 |
| RIM-07 | 1,25 | 1198 | 34 | 1232 | 0,20 | 480 | 36 | 516 |
| RIM-08 | 0,25 | 1044 | 18 | 1062 | 0,10 | 300 | 22 | 322 |
| RIM-09 | 0,11 | 1184 | 6 | 1190 | 0,00 | 180 | 2 | 182 |
| RIM-10 | 0,11 | 1152 | 0 | 1152 | | | | |

Nota: Ssed = Sólidos Sedimentables; SDT = Sólidos Disueltos Totales; SST = Sólidos Suspendedos Totales; ST = Sólidos Totales.



Tabla 6 - Resultados de análisis de Acidez y Alcalinidad

| Código | Análisis de acidez y Alcalinidad | | | | | |
|--------|----------------------------------|-------------------|-------------------|---------------------|-------------------|-------------------|
| | Época de estiaje | | | Época de húmeda | | |
| | Ac total [meq/L] | Ac min [meq/L] | Alc tot [mg/L] | Ac total [meq/L] | Ac min [meq/L] | Alc tot [mg/L] |
| RIM-01 | 0,09 | 0,00 | 56,95 | 0,13 | 0,00 | 35,68 |
| RIM-02 | 1,83 | 0,00 | 137,49 | 20,76 | 0,00 | 168,40 |
| RIM-03 | 17,85 | 0,33 | 0,00 | 22,16 | 0,07 | 0,00 |
| RIM-04 | 12,91 | 0,00 | 9,76 | 0,76 | 0,00 | 11,42 |
| RIM-05 | 11,41 | 0,00 | 11,39 | 6,11 | 0,00 | 12,13 |
| RIM-06 | 7,25 | 0,00 | 33,36 | 4,68 | 0,00 | 74,21 |
| RIM-07 | 4,69 | 0,00 | 63,46 | 2,51 | 0,00 | 69,22 |
| RIM-08 | 2,23 | 0,00 | 59,39 | 1,97 | 0,00 | 161,26 |
| RIM-09 | 2,32 | 0,00 | 43,12 | 0,53 | 0,00 | 74,21 |
| RIM-10 | 2,52 | 0,00 | 34,17 | | | |

Nota: Ac total = Acidez Total; Ac min = Acidez Mineral; Alc tot = Alcalinidad Total

Evaluación del cuerpo hídrico

A partir de los resultados obtenidos de los parámetros fisicoquímicos (Tabla 5) determinadas *in situ* (pH, conductividad eléctrica, potencial oxido reducción, oxígeno disuelto y temperatura), se puede establecer un diagnóstico preliminar del comportamiento del cuerpo de agua.

Con base en estos resultados se obtienen los siguientes gráficos (Figura 4) del comportamiento del agua en función al pH a lo largo del río Ichalaya hasta antes de la desembocadura en el lago Titicaca.

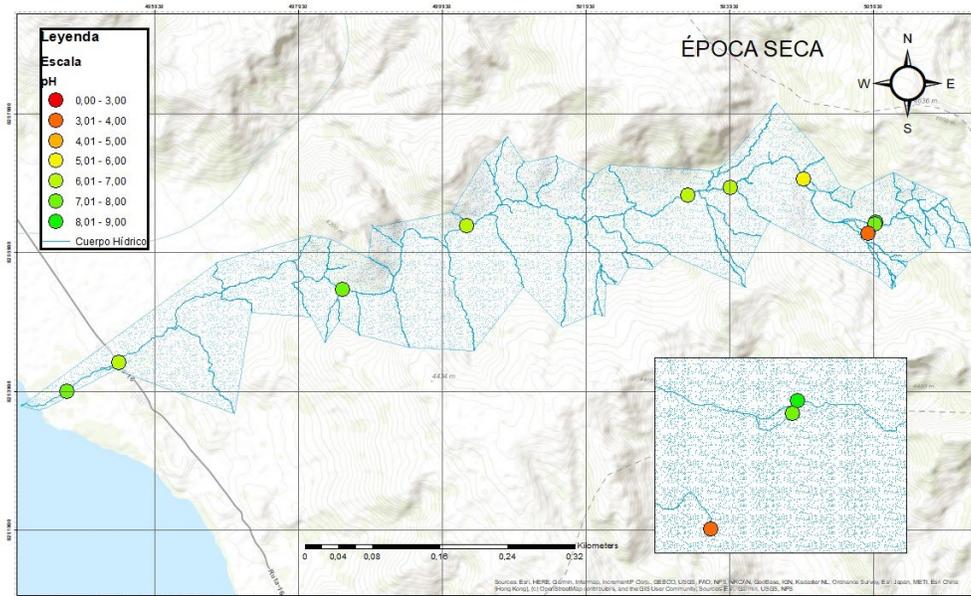


Figura 4. Variación del pH en el cuerpo del Río Ichalaya en la zona de estudio, época seca

En las aguas consideradas de línea base, se tiene condiciones óptimas alcanzando un valor neutro, tanto en época seca como en época húmeda; sin embargo, se observa una disminución drástica de pH a la salida de la bocamina Matilde, alcanzando un pH ácido igual a 3,75 en época seca, en cambio en época húmeda alcanza un valor de pH = 4,02, debido al incremento de flujo hídrico en la bocamina Matilde.

En el curso que sigue el río Ichalaya, éste se ve influenciado por las aguas acidas que se van neutralizando hasta llegar a valores de pH próximos a 7,00 antes de ingresar al lago Titicaca, esto se ve reflejado claramente con la precipitación de óxido férrico en todo el río hasta el último punto; esto ocurre en las dos épocas de estudio.



Los valores de acidez reportados en estos puntos, muestran que el aporte principal de aguas acidas son de la bocamina Matilde, ya que los valores de acidez (Tabla 6) son de 17,85 meq/L en época seca y de 22,16 meq/L en época húmeda, debido al pH ácido reportado en este punto también se tiene una acidez mineral alcanzando valores de 0,33 meq/L en época seca y de 0,07 meq/L en época húmeda.

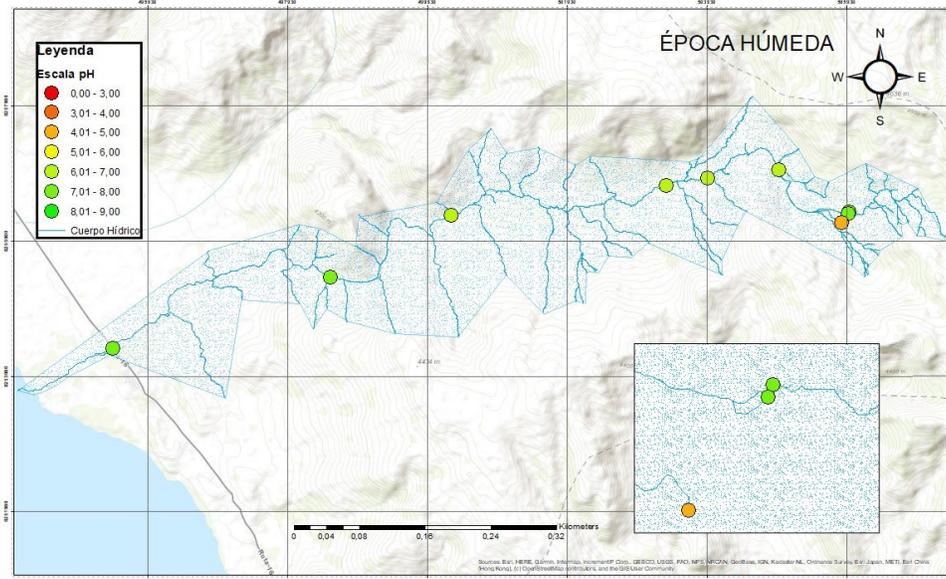


Figura 4.(cont.) Variación del pH en el cuerpo del Río Ichalaya en la zona de estudio, época húmeda

Luego de este punto, la calidad del río Ichalaya mejora en su curso, lo que se corrobora con el incremento de la alcalinidad en el cuerpo de agua, llegando a alcanzar valores de 34,17 mg/L en época seca y 74,21 mg/L en época húmeda, estos valores corroboran el incremento del pH hasta alcanzar valores próximos a la neutralidad.

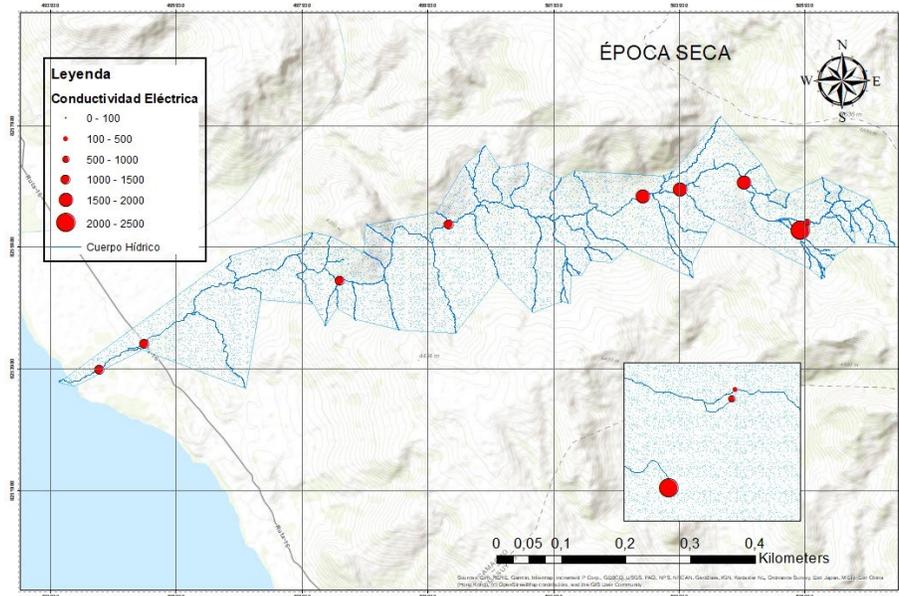


Figura 5. Variación de la conductividad eléctrica en el cuerpo del Río Ichalaya en la zona de estudio, época seca

En base a los resultados obtenidos de conductividad eléctrica (CE), Figura 5, se puede mencionar que en la parte alta de la micro cuenca, primer punto de muestreo, se tiene valores bajos de CE, el aporte principal para el incremento de este parámetro en el cuerpo de agua del río Ichalaya son los afluentes de las Bocaminas Maravilla y Matilde, generando una gran contribución de iones los mismos que influyen en la calidad hídrica del cuerpo de agua

haciendo que los valores de conductividad sean muy altos, tanto por el ingreso del drenaje ácido como por la lixiviación de muchos de los pasivos mineros.

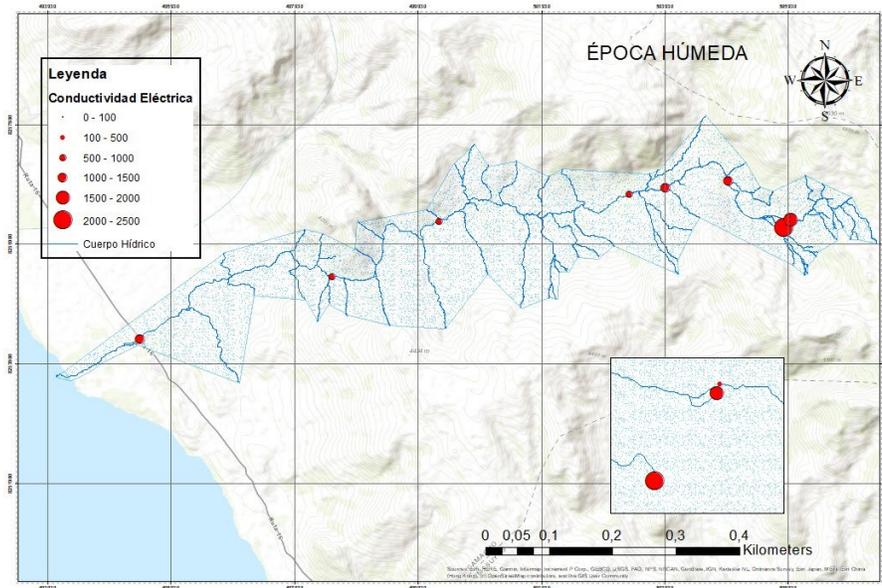


Figura 5 (cont.) Variación de la conductividad eléctrica en el cuerpo del Río Ichalaya en la zona de estudio, época húmeda

La CE en época húmeda es menor en comparación a la época seca, ya que en el punto de confluencia del río Ichalaya con los aportes de las bocaminas los valores reportados son $1919 \mu\text{S}/\text{cm}$ y $1106 \mu\text{S}/\text{cm}$ respectivamente. En el trayecto del curso de agua, por efecto de los aportes de distintos afluentes en el cuerpo de agua la CE disminuye alcanzando valores de $1200 \mu\text{S}/\text{cm}$ en época seca y $1048 \mu\text{S}/\text{cm}$ en época húmeda. Esta disminución es favorable pero los valores aún son elevados limitando de esta manera su uso.

Los valores de CE se corroboran con los resultados de Sólidos Disueltos Totales (TDS), presentados en la Tabla 5, ya que a la salida de la bocamina Matilde, se tiene un valor de $3108 \text{ mg}/\text{L}$ y $2920 \text{ mg}/\text{L}$ en época seca y en época húmeda respectivamente; debido al incremento de la precipitación fluvial se tiene una dilución generando una disminución de sólidos disueltos totales en época húmeda.

Los valores de sólidos sedimentables (SSed) y sólidos suspendidos totales (SST), son mayores en la bocamina Matilde, ya que el agua ácida arrastra tanto sólidos en suspensión como sólidos disueltos, generando precipitados color naranja; este precipitado llega a sedimentar alcanzando valores de $5,33 \text{ mL}/\text{L}$ en época húmeda y de $1,40 \text{ mL}/\text{L}$ en época seca, y los sólidos que no llegan a sedimentar quedan en suspensión en el cuerpo de agua, estos valores son de $98 \text{ mg}/\text{L}$ en época seca y $50 \text{ mg}/\text{L}$ en época húmeda. Debido a la presencia de esta cantidad de sólidos se presenta una turbidez color naranja a la salida de la Mina Matilde.

Los resultados de sólidos en los diferentes puntos de muestreo durante el trayecto del curso de agua mejoran considerablemente, hasta tener SST cercanos a cero, por lo que el agua en estos puntos es transparente y con baja cantidad de SSed.

Balance Iónico

A partir de los resultados de cationes y aniones obtenidos en los análisis de las muestras de agua del río Ichalaya, el balance iónico presenta valores menores al 10% [8] esto indica un buen control de calidad de los análisis realizados en laboratorio. En la Tabla 7, se presentan los cálculos realizados para el balance iónico tanto en época seca como en época húmeda.

Todos los resultados obtenidos de los análisis realizados son aceptables y satisfactorios ya que el porcentaje de balance iónico más bajo es de 0,16% y el más alto es 9,19%, tanto para la época seca como para la época húmeda.

A partir de los análisis realizados para aniones y cationes, se puede obtener los gráficos de Piper, donde se muestra las características de composición química de las aguas de la microcuenca Ichalaya (Figura 6).



Tabla 7. Resultados de balance iónico en muestras de río Ichalaya

| Código | Época Seca | | | Época Húmeda | | |
|--------|-----------------------|----------------------|-------------------------|-----------------------|----------------------|-------------------------|
| | Σ cationes [meq/L] | Σ aniones [meq/L] | Balace iónico [%] | Σ cationes [meq/L] | Σ aniones [meq/L] | Balace iónico [%] |
| RIM-01 | 3,33 | 3,69 | 5,20 | 4,40 | 5,14 | 7,74 |
| RIM-02 | 13,04 | 12,75 | 1,12 | 30,37 | 36,51 | 9,19 |
| RIM-03 | 34,90 | 41,46 | 8,60 | 38,85 | 34,88 | 5,39 |
| RIM-04 | 30,49 | 34,73 | 6,49 | 11,63 | 11,88 | 1,09 |
| RIM-05 | 27,6 | 30,66 | 5,87 | 16,26 | 15,44 | 2,58 |
| RIM-06 | 23,63 | 28,20 | 8,82 | 13,70 | 14,77 | 3,75 |
| RIM-07 | 19,72 | 23,41 | 8,54 | 12,51 | 12,47 | 0,16 |
| RIM-08 | 17,49 | 17,35 | 0,39 | 14,33 | 15,62 | 4,31 |
| RIM-09 | 17,85 | 18,22 | 1,02 | 14,41 | 16,78 | 7,60 |
| RIM-10 | 17,95 | 18,89 | 2,57 | - | - | - |

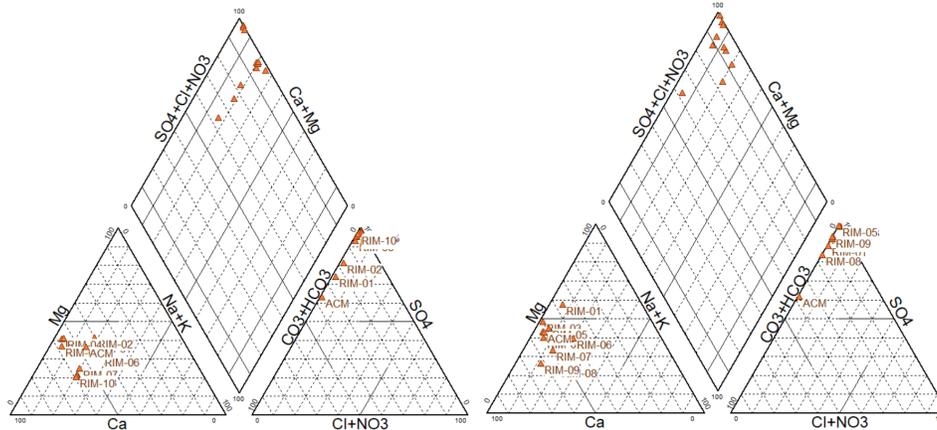


Figura 6. Gráfico de Piper de los análisis realizados en Rio Ichalaya

El comportamiento del cuerpo de agua estudiado sigue la misma tendencia, aunque con variaciones en concentración, tanto en época seca como en época húmeda, presentando contenidos mayoritarios de calcio y magnesio como cationes, y con elevados contenidos de sulfatos como aniones.

Los diagramas de cajas y bigotes, que se presentan en la Figura 7, corroboran el predominio de la concentración de sulfatos, así mismo los cationes calcio y magnesio son significativos. Por lo tanto, se puede establecer que las aguas del río Ichalaya son Sulfato Cálcicas Magnésicas.

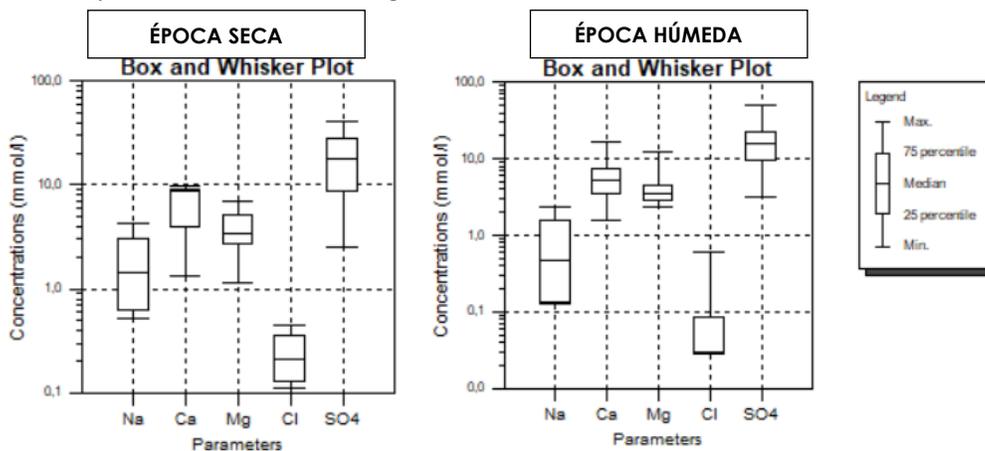


Figura 7. Diagrama de cajas y bigotes de análisis de muestras de agua Rio Ichalaya

Los resultados obtenidos muestran una gran cantidad de sulfatos alcanzando un valor máximo de 50 mmol/L y 15 mmol/L como mínimo en época húmeda y seca; esto puede ser debido a las características que presentan las aguas de mina, con elevados contenidos de sulfatos que se incorporan al cuerpo de agua.

El predominio de Ca y Mg es similar y significativo; en época seca alcanza un valor de 10 mmol/L, pero en época húmeda supera los 10 mmol/L como valores máximos; sin embargo, los valores mínimos son aproximadamente de 1 mmol/L. Estos aportes de Ca y Mg al cuerpo de agua corroboran las características de las aguas de mina.

De manera similar, se analizaron en las muestras del cuerpo de agua los elementos Fe, Zn, Mn, As, Pb y Cd con el objetivo de conocer la magnitud de la contaminación de las aguas ácidas, ya que a valores de pH bajos existe mayor presencia de iones en solución entre ellos los elementos ya mencionados. En la Figura 8 se presentan las concentraciones de cationes y metales en mg/L, descritos por cada punto de muestreo. En época seca, la concentración de calcio es mayor en comparación con la época húmeda; sin embargo, a pesar de que el magnesio predomina en ambas épocas, es mayor en época húmeda. Otro aporte significativo es el zinc, hierro y manganeso, en ambas épocas presentan el mismo comportamiento. En el trayecto que sigue el cuerpo de agua estudiado, la concentración de estos metales disminuye, principalmente por el aporte de distintos afluentes al cuerpo de agua del río Ichalaya. Las concentraciones de cadmio, plomo y arsénico son bajas como se observa en el gráfico de la Figura 8.

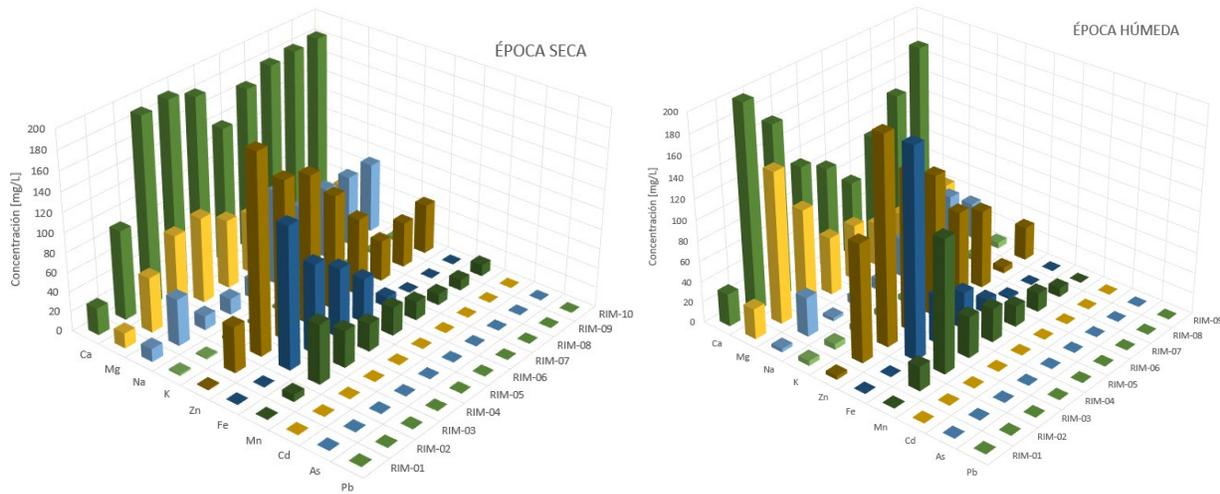


Figura 8. Variación de los niveles de cationes y metales en los puntos de muestreo

Clasificación por RMCH

Debido a las características de las aguas de procedencia minera, las descargas tienen un carácter ácido, mismo que se manifiesta claramente en la medición del pH; por lo tanto, el cuerpo de agua estudiado, según los resultados de las mediciones realizadas será clasificado utilizando el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH), establecido en la Ley de Medio Ambiente, Ley N° 1333 del Estado Plurinacional de Bolivia.

Tabla 8. Resultados comparados con el RMCH

| No | Parámetros | Unidad | Época Seca | | | | | | | | | | Época Húmeda | | | | | | | | | |
|-----------------------------------------|------------|--------|------------|---------|---------|---------|------------------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------|--------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|---------|--|
| | | | RIM-1 | RIM-2 | RIM-3 | RIM-4 | RIM-5 | RIM-6 | RIM-7 | RIM-8 | RIM-9 | DIM-10 | RIM-1 | RIM-2 | RIM-3 | RIM-4 | RIM-5 | RIM-6 | RIM-7 | RIM-8 | RIM-9 | |
| Parámetros básicos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 1 | CE | µS/cm | 390 | 960 | 2300 | 1910 | 1750 | 1590 | 1310 | 1170 | 1180 | 1200 | 333 | 1807 | 2104 | 1106 | 1014 | 846 | 834 | 815 | 1048 | |
| 2 | OD | % | 106,5 | 102,1 | 95,1 | 108,8 | 105,5 | 97,1 | 101,9 | 103,7 | 102,3 | 104,1 | 91,8 | 74,2 | 66,6 | 73,6 | 75,7 | 62,3 | 65,2 | 77,9 | 69,4 | |
| 3 | pH | | 8,62 | 7,50 | 3,75 | 5,41 | 6,50 | 6,73 | 7,05 | 6,92 | 7,05 | 7,05 | 7,05 | 7,12 | 6,61 | 6,48 | 6,29 | 5,27 | 6,90 | 7,49 | 7,49 | |
| 4 | SDT | mg/L | 163 | 724 | 3108 | 2310 | 2114 | 1582 | 1198 | 1044 | 1184 | 1152 | 60 | 2020 | 2930 | 400 | 900 | 300 | 480 | 300 | 180 | |
| 5 | Ssed | ml/L | 0,0 | 0,2 | 5,3 | 3,7 | 2,5 | 7,5 | 1,3 | 0,3 | 0,1 | 0,1 | 0,0 | 1,2 | 1,5 | 1,2 | 1,8 | 1,1 | 1,0 | 0,8 | 0,0 | |
| 6 | SST | mg/L | 0 | 26 | 98 | 96 | 42 | 62 | 34 | 18 | 6 | 0 | 2 | 16 | 50 | 30 | 46 | 40 | 36 | 22 | 2 | |
| Constituyentes inorgánicos metálicos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 7 | Arsénico | µg/L | 0,985 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | 1,566 | 0,851 | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | < LD | 0,951 | |
| 8 | Calcio | mg/L | 46,2 | 146,7 | 272,8 | 292,2 | 284,8 | 227,8 | 248,6 | 276,3 | 300,4 | 316,9 | 31,4 | 330,3 | 168,1 | 115,2 | 100,6 | 73,7 | 106,9 | 136,6 | 173,0 | |
| 9 | Cadmio | mg/L | < LD | 0,017 | 0,068 | 0,063 | 0,037 | 0,011 | < LD | < LD | < LD | < LD | 0,007 | 0,108 | 0,223 | 0,168 | 0,165 | 0,160 | 0,084 | 0,073 | 0,074 | |
| 10 | Hierro | mg/L | < LD | < LD | 142,32 | 90,02 | 70,62 | 44,84 | 10,36 | 0,32 | < LD | < LD | 0,23 | < LD | 256,00 | 47,25 | 35,85 | 14,08 | 1,94 | < LD | < LD | |
| 11 | Magnesio | mg/L | 15,19 | 55,88 | 83,44 | 86,88 | 70,00 | 61,88 | 45,00 | 37,50 | 39,69 | 37,50 | 29,53 | 146,80 | 97,40 | 56,40 | 54,90 | 42,85 | 39,68 | 36,42 | 43,45 | |
| 12 | Manganeso | mg/L | 0,18 | 6,88 | 60,00 | 37,30 | 28,04 | 28,62 | 18,86 | 11,37 | 10,95 | 11,52 | 0,61 | 23,39 | 128,00 | 39,80 | 32,60 | 20,03 | 18,15 | 8,77 | < LD | |
| 13 | Plomo | µg/L | < LD | 8,809 | < LD | 23,490 | 17,300 | 6,183 | < LD | 6,150 | < LD | 4,521 | < LD | |
| 14 | Sodio | mg/L | 13,240 | 47,063 | 14,040 | 16,220 | 19,640 | 97,250 | 67,000 | 72,750 | 71,563 | 71,375 | 3,399 | 38,120 | 3,269 | 7,889 | 11,010 | 38,260 | 28,880 | 55,290 | 34,950 | |
| 15 | Zinc | mg/L | 0,93 | 46,50 | 200,00 | 159,50 | 150,50 | 116,50 | 78,70 | 41,50 | 45,20 | 50,90 | 3,44 | 114,01 | 291,75 | 153,23 | 136,93 | 88,50 | 76,14 | 5,70 | 32,83 | |
| Constituyentes inorgánicos no metálicos | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 16 | Cloruros | mg/L | 0,728 | 6,660 | 16,750 | 14,111 | 15,181 | 9,370 | 7,266 | 8,550 | 4,423 | 4,040 | 0,372 | 1,848 | 22,837 | 6,206 | 1,607 | 2,783 | 0,377 | 1,072 | 1,259 | |
| 17 | Fosfato | mg/L | 0,09 | 0,06 | 0,10 | 0,12 | 0,37 | 0,07 | 0,06 | 0,05 | 0,16 | 0,11 | 0,07 | 0,22 | 0,35 | 0,10 | 0,21 | 0,27 | 0,09 | 27,40 | 1,70 | |
| 18 | Nitrato | mg/L | 4,1 | 2,2 | 11,1 | 9,9 | 12,1 | 2,9 | 2,4 | 2,4 | 2,3 | 2,2 | 1,10 | 0,90 | 5,00 | 3,20 | 2,70 | 1,40 | 2,00 | 2,60 | 2,10 | |
| 19 | Nitrato | mg/L | 0,034 | 0,031 | 0,023 | 0,025 | 0,018 | 0,023 | 0,018 | 0,018 | 0,021 | 0,022 | 0,006 | 0,018 | 0,003 | 0,017 | 0,010 | 0,021 | 0,014 | 0,022 | 0,004 | |
| 20 | Sulfatos | mg/L | 135 | 500 | 1960 | 1840 | 1440 | 1320 | 1160 | 780 | 840 | 880 | 220 | 1750 | 2400 | 1150 | 1000 | 700 | 750 | 650 | 800 | |
| Clasificación | | | C | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | Critica | C | Critica | |
| Nota: | | | Clase A | Clase B | Clase C | Clase D | Por encima de la norma | | | | | | | | | | | | | | | |



40 años



En base a los resultados de comparación presentados en la Tabla 6, el cuerpo de agua estudiado sería clasificado como clase C, que corresponde al primer punto de muestreo del cuerpo de agua ubicado en la parte alta de la microcuenca; esta clasificación es debida a la concentración de zinc que presenta un valor de 0,93 mg/L superando los valores establecidos en el RMCH. Sin embargo, el resto de los puntos de muestreo presentan valores que superan la clase D de los límites permisibles del RMCH, debido a las descargas de las aguas acidas en el Río Ichalaya.

Se debe promover la conservación y el mejor uso del agua por parte de los actores de las actividades antropogénicas como minería y agricultura; mantener o mejorar la calidad del agua a lo largo de la microcuenca Ichalaya, todo esto con el fin de promover y proteger los usos deseables del agua.

CONCLUSIONES

Se realizó la caracterización y la clasificación según el RMCH del cuerpo de agua de la Microcuenca del Río Ichalaya

El área de estudio fue monitoreada desde los orígenes previos a la perturbación por descargas de aguas acidas, hasta la parte baja antes de la descarga del cuerpo de agua al lago Titicaca, generando una información significativa para la caracterización del cuerpo de agua estudiado.

La microcuenca del río Ichalaya suministra agua con fines agrícolas a las comunidades de Putina y Villa Molino; en época húmeda, los pobladores desvían las aguas hacia sus sembradíos, el mismo que contribuye a la disminución del caudal de agua; razón por la cual, en el punto de muestreo DIM 10 no se tiene agua en época húmeda. El comportamiento del pH en el cuerpo de agua estudiado presentó una buena calidad en el punto aguas arriba de la actividad minera; al confluir con los afluentes de la mina Matilde, el pH disminuye. En época seca el pH disminuye dramáticamente; sin embargo, en época húmeda la disminución es ligera. En el resto del trayecto del cuerpo de agua, el pH mejora debido al aporte de diferentes afluentes al cuerpo de agua hasta llegar a puntos cercanos al lago Titicaca; por otro lado, se observó precipitación de óxido férrico en el curso del agua.

Los cambios en los valores de CE fueron observados después de la confluencia con las descargas de las bocaminas Maravilla y Matilde. Como resultado del aporte de los afluentes ubicados aguas abajo del cuerpo de agua del Río Ichalaya la CE disminuye, pero no alcanza condiciones aceptables ya que la CE en el agua en los puntos de muestreo cercanos al Lago Titicaca aun es elevada.

En base a los resultados de los análisis de laboratorio y los análisis estadísticos realizados, se concluye que las aguas del río Ichalaya presentan elevados contenidos de calcio, magnesio y sulfatos tanto en época seca como en época húmeda. Así mismo, se determinó elevadas concentraciones de hierro y zinc, que en el trayecto del cuerpo de agua del río Ichalaya van disminuyendo, esto como resultado de los aportes de afluentes presentes en la zona, como la precipitación del hierro durante el curso de agua.

La calidad del cuerpo de agua en función al Reglamento de Materia de Contaminación Hídrica muestra que las aguas consideradas nacientes presentan una categoría tipo C, sin embargo, para el resto del cuerpo de agua la categoría del cuerpo supera los valores de la clase D de los límites permisibles establecidos en el RMCH.

REFERENCIAS

1. INE Bolivia 2023: Producción de Minerales del Sector de la Minería Chica y Cooperativas. Por tipo de mineral según año y mes, 1990 – 2021. La Paz, Bolivia, 03 de Marzo de 2023.
<https://www.ine.gob.bo/index.php/estadisticas-economicas/hidrocarburos-mineria/mineria-cuadros-estadisticos/> (03 de Abril de 2023)
2. Cáceres, L., Ramos, O., Valdez, S., Choque, R., Fernandez, S., Sracek, O., Bhattacharya, P. 2013, Fraction of heavy metals and assesment of contamination of the sediments of Like Titicaca, *Environ Monit Asses* (185), 9979-9994, DOI: 10.1007/s10661-013-3306-0.
3. Sangita, G. 2010. Studies on Enviromental Impact of acid mine drainage generation and its treatment, *An Appraisal*. 30(11), 953-967.
4. Allard, M. Guía Operativa GEMS (Sistema Global de monitoreo ambiental) / AGUA. 3ª Edición 1993. Mendoza Argentina pp. 1-14.
5. Rodier, J., Legube, B. Análisis de las aguas. Editorial Omega. 1ª Edición-1989 Barcelona España pp. 101-105.
6. Franson, M.A.H. Métodos normalizados para el análisis de aguas potables y residuales, Editorial Diaz de Santos S.A.. Edición 17 1989 Madrid, España. pp 3, 82-146.
7. Ley N° 1333 – Ley de Medio Ambiente [RMCH] Cámara Nacional de industrias Bolivia junio del 1992.
<http://www.bolivia-industry.com/>
8. ALS “Ionic Calculations” Environmental Limited. www.alsenvironmental.co.uk