

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE CIENCIAS QUÍMICAS



TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADA EN CIENCIAS QUÍMICAS

ESTUDIO DE METALES PESADOS Y ANALISIS
FISICOQUIMICO DEL RÍO KATARI DEL
DEPARTAMENTO DE LA PAZ – BOLIVIA

POR: LISETH XIMENA CALIZAYA MARCA

TUTOR: PhD. RIGOBERTO ROGELIO CHOQUE ASPIAZU

COTUTOR: PhD. ISRAEL QUINO LIMA

Lic. RAUL QUISPE CHOQUE

LA PAZ – BOLIVIA

Junio, 2022

UNIVERSIDAD MAYOR DE SAN ANDRÉS
FACULTAD DE CIENCIAS PURAS Y NATURALES
CARRERA DE CIENCIAS QUÍMICAS



TRABAJO PARA OPTAR AL GRADO DE LICENCIADO EN CIENCIAS QUÍMICAS

**ESTUDIO DE METALES PESADOS Y ANALISIS
FISICOQUIMICO DEL RÍO KATARI DEL
DEPARTAMENTO DE LA PAZ - BOLIVIA**

POR: LISETH XIMENA CALIZAYA MARCA

TUTOR: PhD. RIGOBERTO ROGELIO CHOQUE ASPIAZU

TRIBUNAL: PhD. OSWALDO EDUARDO RAMOS RAMOS

LA PAZ – BOLIVIA

Junio, 2022

DEDICATORIA

A Dios, por guiar mis pasos día a día y darme fuerzas para seguir siempre adelante.

A mi mamá Naty Marca Choque y papá Pedro Calizaya, por su esfuerzo y cariño desmesurado para que pueda concluir uno de mis sueños y decirles misión cumplida.

A mis hermanos (Ruddy y William) por su apoyo incondicional y paciencia.

AGRADECIMIENTOS

A Dios por brindar salud y bendición a mi familia, y brindarme la oportunidad de haber concluido esta etapa de mi vida.

Al Proyecto de Caudales Ecológicos del Instituto de Ecología (Carrera de Biología) FCPN-UMSA

Al laboratorio de Calidad Ambiental (L.C.A.) por haberme proporcionado su ayuda y conocimientos para realizar este trabajo y sobre todo al Ing. Jaime Chincheros por permitirme realizar mis prácticas profesionales.

A mi tutor: PhD. Rigoberto Choque Aspiazu y Co-tutores: PhD. Israel Quino Lima y Lic. Raúl Quispe Choque por haberme transmitido su conocimiento y apoyo incondicional.

Al PhD. Oswaldo Ramos por tomarse el tiempo para la revisión y otorgar recomendaciones para la mejora del presente trabajo.

Al PhD. Carlos Molina por permitirme ser parte del proyecto, Miriam Aliaga, Rebeca Paco, por su apoyo incondicional.

A las licenciadas: Lic. Noelia Rendón responsable del módulo de Microbiología y Lic. Vania García responsable del módulo de Metales Pesados, por su apoyo, enseñanza, consejos y asesoramientos en los análisis químicos implementados en el trabajo dirigido.

A mi hermano Ruddy Calizaya quien a pesar de las pequeñas discusiones siempre está conmigo y me muestra su apoyo para que salga adelante.

A todos los docentes y administrativos de mi querida Carrera de Ciencias Químicas, quienes cada uno a su manera y su carisma, me transmitieron su conocimiento para poderme defender en la vida.

A todos mis amigos que estuvieron conmigo en esta etapa de mi vida. Con quienes logre construir bonitos recuerdos que siempre estuvieron conmigo en las buenas y malas, gracias...

Tabla de contenido

RESUMEN	1
CAPÍTULO 1	1
1. MARCO INTRODUCTORÍO	1
1.1. Introducción.....	1
1.2. Problemática.....	2
1.3. Hipótesis.....	2
1.4. Objetivos	2
1.4.1. Objetivo General.....	2
1.4.2. Objetivos Específicos.....	2
1.5. Justificación.....	3
1.6. Antecedentes	3
CAPÍTULO 2	6
2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Metales pesados.....	6
2.2. Contaminación de agua por metales pesados	7
2.2.1. Arsénico:	7
2.2.2. Plomo	8
2.2.3. Cadmio	8
2.2.4. Cromo.....	9
2.2.5. Mercurio.....	9
2.3. La incidencia metales pesados en el agua	9
2.4. Importancia del estudio de metales pesados en agua	10
2.5. Toxicidad de los metales pesados	10
2.6. Factores físico-químicos ambientales	11
2.7. Origen de los metales pesados en aguas superficiales.....	12
2.7.1. Origen antropogénico	12
2.7.2. Origen agropecuario	12
2.7.3. Origen industrial	13
2.7.4. Origen doméstico y urbano	13
2.8. Efectos de los metales pesados.....	14

2.9. Principales problemas en aguas superficiales.....	14
2.9.1. Salinización.....	14
2.9.2. Acidificación de lagos.....	14
2.9.3. Eutrofización.....	15
CAPÍTULO III	16
3. MATERIALES Y MÉTODOS	16
3.1. Ubicación de los puntos de muestreo	16
3.2 Toma de muestras.....	17
3.3. Tiempo de preservación de la muestra	18
3.4. Parámetros y métodos para el análisis.....	19
CAPÍTULO IV	21
4. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	21
4.1 Parámetros Físicoquímicos	21
4.2 Parámetros de metales pesados.....	40
4.3. Determinación de metales como nutrientes	50
CAPÍTULO V	54
5.1. Conclusiones	54
5.2. Recomendaciones	55
5.3. Bibliografía	56
CAPITULO VI.....	59
Anexos.....	59
6.1. Anexo 1 Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos de agua.....	59
6.2 Anexo 2. Descripción de la metodología de cada parámetro determinado.....	59
Descripción de la metodología de los parámetros para metales pesados	63

INDICE DE FIGURAS

FIGURA 1. ZONIFICACIÓN SEGÚN EL TIPO DE INFLUENCIA EN LA CUENCA DEL RÍO KATARI: M=SECTOR DE MILLUNI, U=CENTRO URBANO, K=CUENCA DEL KATARI Y BC=BAHÍA DE COHANA	4
FIGURA 2. MAPA HIDROGRÁFICO MOSTRANDO EL CURSO NATURAL DE LA CUENCA KATARI CONTAMINADO	16
FIGURA 3. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE pH EN ÉPOCA SECA Y ÉPOCA DE TRANSICIÓN.	21
FIGURA 4. COMPORTAMIENTO DE LA C.E. EN ÉPOCA SECA Y ÉPOCA DE TRANSICIÓN.	22
FIGURA 5. COMPORTAMIENTO DEL OXÍGENO DISUELTO EN ÉPOCA SECA Y ÉPOCA DE TRANSICIÓN.	24
FIGURA 6. COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS TOTALES EN MUESTRAS DE AGUA.	25
FIGURA 7. COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS EN MUESTRAS DE AGUA.....	27
FIGURA 8. COMPORTAMIENTO DE SÓLIDOS DISUELTOS EN MUESTRAS DE AGUA.....	28
FIGURA 9. COMPORTAMIENTO DE NITRÓGENO TOTAL EN MUESTRAS DE AGUA	30
FIGURA 10. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA FÓSFORO TOTAL.....	31
FIGURA 11. COMPORTAMIENTO DE FÓSFORO TOTAL EN MUESTRAS DE AGUA.....	32
FIGURA 12. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DBO-5 EN MUESTRAS DE AGUAS. 33	
FIGURA 13. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE DQO EN MUESTRAS DE AGUAS.	35
FIGURA 14. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA SULFATOS.....	36
FIGURA 15. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE SO_4^{2-} EN MUESTRAS DE AGUAS.....	37
FIGURA 16. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA NITRATOS	38
FIGURA 17. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE NO_3^- EN MUESTRAS DE AGUAS.....	38
FIGURA 18. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE ALCALINIDAD TOTAL EN MUESTRAS DE AGUAS.	40
FIGURA 19. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL ARSÉNICO.....	41
FIGURA 20 DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ARSÉNICO	42
FIGURA 21. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA CADMIO.....	43
FIGURA 23. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA PLOMO	44
FIGURA 24. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE PLOMO EN MUESTRAS DE AGUAS. .	45
FIGURA 25. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA CROMO	46

FIGURA 26. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CROMO Cr^{+3} EN MUESTRAS DE AGUA.	46
FIGURA 27. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL HIERRO	47
FIGURA 28. COMPORTAMIENTO DE HIERRO EN MUESTRAS DE AGUA.	48
FIGURA 29. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL MERCURIO	49
FIGURA 30. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MERCURIO EN MUESTRAS DE AGUA.	49
FIGURA 31. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL CALCIO.	50
FIGURA 32 DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE CALCIO EN AGUAS.	51
FIGURA 33. CURVA DE CALIBRACIÓN PARA EL MAGNESIO.	52
FIGURA 34. DESCRIPCIÓN DEL COMPORTAMIENTO DE MAGNESIO EN AGUAS.	53

INDICE DE TABLAS

TABLA 1. LISTA DE METALES PESADOS (METALES CON DENSIDAD > 4).....	6
TABLA 2. PUNTOS REFERENCIALES DE LA TOMA DE MUESTRAS (1RA CAMPAÑA).....	17
TABLA 3. PUNTOS REFERENCIALES DE LA TOMA DE MUESTRAS (2DA CAMPAÑA)	17
TABLA 4. PRESERVACIÓN DE LA MUESTRA DE AGUA	19
TABLA 5. PARÁMETROS Y MÉTODOS UTILIZADOS EN LABORATORIO	19
TABLA 6. VALORES DE PH OBTENIDOS EN ÉPOCA SECA Y ÉPOCA DE TRANSICIÓN	21
TABLA 7. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA MEDICIÓN DE LA C.E. IN SITU	22
TABLA 8. RESULTADOS OBTENIDOS DE LA MEDICIÓN DE OXÍGENO DISUELTO IN SITU.....	23
TABLA 9. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS TOTALES.....	25
TABLA 10. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS SUSPENDIDOS.	26
TABLA 11. RESULTADOS OBTENIDOS EN LA DETERMINACIÓN DE SÓLIDOS DISUELTOS. ...	28
TABLA 12. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE NITRÓGENO TOTAL EN MUESTRAS DE AGUA.	29
TABLA 13. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE FÓSFORO TOTAL EN MUESTRAS DE AGUA.	31
TABLA 14. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE DBO-5 EN MUESTRAS DE AGUAS.	33
TABLA 15. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE DQO EN MUESTRAS DE AGUAS.	34
TABLA 16. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE SO_4^- EN MUESTRAS DE AGUAS..	36
TABLA 17. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE NO_3^- EN MUESTRAS DE AGUA...	38
TABLA 18. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE ALCALINIDAD TOTAL EN MUESTRAS EN AGUAS.....	39
TABLA 19. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DEL ARSÉNICO.....	41
TABLA 20. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE CADMIO EN MUESTRAS DE AGUAS	43
TABLA 21. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE PLOMO EN MUESTRAS DE AGUAS	44
TABLA 22. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE CROMO (Cr^{+3}) EN MUESTRAS DE AGUA.	46
TABLA 23 RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE HIERRO EN MUESTRAS DE AGUA.	47

TABLA 24. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE MERCURIO EN MUESTRAS DE AGUA	49
TABLA 25. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE CALCIO EN MUESTRAS DE AGUAS.	50
TABLA 26. RESULTADOS OBTENIDOS EN EL ANÁLISIS DE MAGNESIO EN MUESTRAS DE AGUAS.	52

RESUMEN

El área que comprende la cuenca del Río Katari es de 2.899 km^2 , cuya longitud es aproximadamente 86 km; se constituye en su principal afluente el río Pallina con un curso de 36 km aproximadamente. El río Katari sufre los efectos de la contaminación por los pasivos mineros, desechos y otros.

Se seleccionaron catorce puntos de muestreo, que permitieron medir los parámetros fisicoquímicos y metales pesados del agua. Además, se realizó los análisis en época seca y época de transición donde se obtuvo una variación importante.

Este trabajo pretende determinar la contaminación que existe actualmente en el río Katari, los parámetros determinados son: pH, Conductividad Eléctrica, Sólidos Suspendidos, Sólidos Disueltos, Sólidos Totales, Sulfatos, Nitratos, Demanda Química de Oxígeno, Demanda Bioquímica de Oxígeno, Fósforo Total, Nitrógeno Total.

Según los resultados obtenidos en laboratorio, se realizó la clasificación del cuerpo de agua (río Katari), según la ley 1333 realizando una comparación con los datos obtenidos en parámetros fisicoquímicos y de metales pesados.

Los sistemas naturales que actúan como transportadores de contaminación son el Río Katari y sus afluentes, además de las actividades antrópicas que intervienen como generadores de contaminación son fundamentalmente la ciudad de El Alto y Viacha, en razón de su densidad poblacional, y su relación con la cuenca del Río Katari.

Palabras clave: Transportadores de contaminantes, Parámetros fisicoquímicos, Afluentes.

1. MARCO INTRODUCTORIO

1.1. Introducción

El río Katari (principal río en la cuenca Katari) y sus afluentes son recursos naturales altamente vulnerables debido a la contaminación hídrica, por esta razón es necesario realizar un análisis de la presencia y dimensión de metales pesados presentes en los cuerpos de agua (IIS, 2013).

Actividades antropogénicas como la minería, procesos industriales, desarrollo urbano y los residuos domésticos aportan metales trazas (elementos que se encuentran en concentraciones bajas) al ambiente, lo que podría aumentar los niveles naturales y alcanzar concentraciones de contaminantes, que están presentes y muchas veces por su rápida movilidad en el ambiente, ya que no pueden ser degradados fácilmente por los microorganismos (Dekker M., 1992).

Los elementos cobre (Cu), zinc (Zn), cobalto (Co) y hierro (Fe) no pueden considerarse un peligro para la calidad del agua a menos que alcancen altas concentraciones, ya que son necesarios para la vida animal. En cambio, otros elementos como el cadmio (Cd), el mercurio (Hg) y el plomo (Pb) siempre se comportan como elementos tóxicos en los organismos (Monroy et al, 2014).

Los sedimentos son los principales sumideros de metales en lagos y ríos, el transporte a lo largo del gradiente de río aguas arriba - aguas abajo, especialmente en períodos de alto flujo, es una de las principales vías de entrada de metales en estos ecosistemas. Sin embargo, la medición de las concentraciones de metales, ya sea en agua o sedimentos no proporciona información sobre el riesgo que representa la bioacumulación de metales. Estos procesos son inducidos en primer lugar por la disponibilidad del metal para la biota, que a su vez está relacionada con los parámetros de pH, concentración de oxígeno, dureza del agua y la temperatura (T).

1.2. Problemática

Uno de los grandes problemas de la ciudad de El Alto y sus alrededores, radica en el predominio sobre las cuencas que reciben las descargas líquidas domésticas y fundamentalmente industriales, de allí la necesidad de analizar de manera integral el problema de contaminación por metales pesados en las áreas de influencia de estas descargas.

La principal cuenca afectada es la del río Katari puesto que recibe las descargas de todos los aportantes y se constituye en el vehículo que alimenta con sus aguas al lago Titicaca en las bahías de Cohana y Aygachi (IIS, 2013).

La contaminación del agua es uno de los principales problemas ambientales; una gran variedad de materiales naturales y sintéticos entran en concentraciones crecientes al medio ambiente acuático. Si bien hay varios estudios de la calidad del agua del río Katari en los últimos años, un estudio de la calidad del agua a través de un índice comparativo de la última década ayudará a tener información más exacta del proceso de contaminación del agua de la cuenca Katari.

1.3. Hipótesis

Existe un aumento en los niveles de contaminación del río Katari por la actividad antropogénica de las ciudades de El Alto y Viacha.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

- Determinar el contenido de metales pesados y realizar el análisis fisicoquímico en la cuenca del río Katari del departamento de La Paz-Bolivia.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Establecer los puntos de muestreo en el trayecto de la cuenca Katari y recolectar muestras de agua.
- Realizar el análisis en campo de pH, conductividad eléctrica, temperatura, oxígeno disuelto.
- Determinar el contenido de metales pesados: Cd, Cr, Fe, Pb, Hg, y As por Absorción Atómica y Horno de Grafito.

- Realizar el análisis fisicoquímico de las muestras de agua recolectadas.
- Comparar resultados obtenidos en ambas épocas (seca y de transición).

1.5. Justificación

Enmarcado en el proyecto Caudales Ecológicos de la Cooperación Francesa (IRD) llevado adelante por los Doctores Marc Pouilly y Carlos Molina como encargados durante los años 2019, 2021 y 2022 enmarcado en los lineamientos que tiene este proyecto se pretende hacer un diagnóstico de la calidad de agua con base en el estudio de metales pesados y un análisis fisicoquímico en la cuenca Katari. Considerando que existe una gran contaminación en la parte baja de la cuenca Katari, en sectores de la Bahía Cohana debido a actividades antropogénicas de la ciudad de El Alto y del municipio de Viacha.

La cuenca del río Katari y afluentes son recursos naturales que son altamente vulnerados debido a la contaminación. Con el desarrollo del presente trabajo se pretende determinar la concentración de metales (pesados y cationes) en el agua y luego renovar los resultados obtenidos anteriormente de la cuenca del río Katari.

1.6. Antecedentes

La ciudad de La Paz cuenta con uno de los lagos más antiguos del mundo, el Lago Titicaca que tiene casi unos tres millones de años, es uno de los mayores lagos de agua dulce de Sudamérica, con un volumen de 900.000 millones de m^3 , con un área de influencia de 144.000 km^2 , lo que lo convierte en la principal fuente de agua, alimento y condiciones de vida de 3.6 millones de habitantes, además las zonas que rodean este lago son las zonas más productivas y fértiles del Altiplano con una gran biodiversidad.

La cuenca del río Katari se encuentra conformada principalmente por tres sistemas hídricos (Archundia et al., 2016). El área se divide en cuatro sectores de acuerdo a su influencia antrópica que existe en la región. El primero corresponde al nevado Huayna Potosí donde tienen sus nacientes los ríos Seke y Seco (sector M) y éstos a su vez atraviesan el centro urbano de la ciudad de El Alto (sector U). Estos ríos, salen de la ciudad para luego desembocar en el río Pallina a la altura de otro importante centro urbano, como es Viacha (sector K). Este último desemboca en el río que tienen el mismo nombre de la cuenca Katari (sector K) (Figura 1). Esta cuenca recorre alrededor de 24 municipios atravesando varias ciudades importantes con grandes poblaciones

generando la contaminación de agua y ese tema se ha convertido en uno de los principales problemas ambientales del departamento de La Paz.

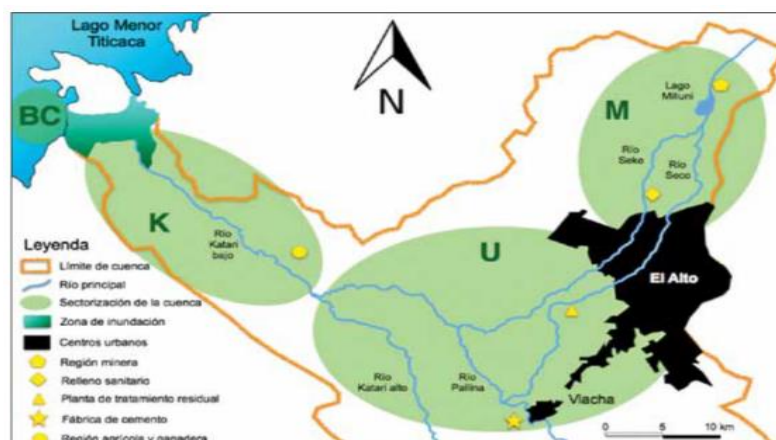


Figura 1. Zonificación según el tipo de influencia en la cuenca del Río Katari: M=Sector de Milluni, U=Centro urbano, K=Cuenca del Katari y BC=Bahía de Cohana Fuente: Archundia et al. (2016).

En los últimos años, diversas instituciones han evaluado el nivel de contaminación por las descargas de desechos en la cuenca del río Katari, así como de sus afluentes más importantes (ríos Seco y Pallina).

Por otro lado, en la región montañosa existen cuerpos de agua que están influenciados por la actividad minera actual e histórica, como es el caso del Valle de Milluni. En esta región, desde los años 40's hasta inicios de los años 90's se ha explotado estaño, zinc y plomo. Los primeros datos sobre la presencia de metales pesados en agua superficial después del cierre de las actividades mineras mostraron condiciones muy ácidas como consecuencia de la oxidación de sulfuros por los desechos de mina, lo cual favorece al enriquecimiento de elementos potencialmente nocivos de acuerdo al siguiente orden: $Cd > Zn \gg As \gg Cu \gg Ni > Pb > Sn$ (Salvarredy-Aranguren et al, 2008).

En la revisión de diferentes trabajos referentes a afluentes de la cuenca del Katari, la mayoría de éstos consideran un parámetro importante a los valores de DBO_5 . Si bien estos reportes de DBO_5 en los centros urbanos tanto en la ciudad de El Alto como en Viacha muestran valores $> 100 \text{ mg L}^{-1}$ y estos corresponden a aguas muy contaminadas comparando con diferentes normativa (MMAyA/VRHR, 2016)

Por la naturaleza geológica del lugar éstas aguas subterráneas poseen elevadas concentraciones de solutos, pero también se encontraron atípicamente en zonas

urbanas algunos nutrientes en concentraciones considerables, como: (NO_3^- y NH_4^+), DBO_5 y DQO (MMAyA/VRHR, 2016). Todos estos muestran las descargas y lixiviados provenientes de actividades urbanas e industriales, y es por ello, que la contaminación no solo es horizontal en los cursos de ríos superficiales, sino también vertical a consecuencia de la contaminación de pozos.



2. MARCO TEÓRICO

2.1. Metales pesados

Se consideran como metales pesados a aquellos elementos cuya densidad es igual o superior a 5 g/cm^3 , cuando están en forma elemental; y en la tabla periódica son aquellos que tienen densidades mayores a la del hierro y número atómico mayor a 20, excluyendo a los metales alcalinos y alcalino-térreos (Toral-Ferreiro, 1996).

Los metales pesados como se observa en la tabla 1 pueden ser tóxicos, como cualquier otro elemento o compuesto. Una sustancia tóxica es aquella que tiene un efecto adverso sobre la salud. Muchos elementos o compuestos químicos pueden ser clasificados como tóxicos, si bien unos lo serán más que otros. Se define como nivel de toxicidad de una sustancia como la cantidad que causa el correspondiente efecto adverso. La relación entre la cantidad y el efecto o respuesta de un elemento es 40 distinta si se trata de elemento esencial o no (tóxico) (Oyarzun, 2007).

Tabla 1. Lista de metales pesados (con densidad > 4)

Elemento	Densidad (g/cm^3)
Arsénico	5,72
Cromo	7,19
Níquel	8,9
Cobalto	8,9
Cobre	8,65
Cadmio	8,65
Plomo	11,35
Mercurio	13,55

Fuente: (elementos, s.f.)

Desde el punto de vista de la toxicidad, se basa en sus propiedades cuando están en solución: “metal es un elemento que bajo condiciones biológicas puede reaccionar perdiendo uno o más electrones para formar un catión” (Cornelis, R. Nordberg, 2007).

2.2. Contaminación de agua por metales pesados

La contaminación por metales pesados, puede llegar a afectar a todo tipo de ecosistemas acuáticos, debido a su permanencia en el medio natural tras el vertido. Pueden alcanzar acuíferos por infiltración, dependiendo en muchos casos de factores como el pH del medio o del propio vertido, como también pueden alcanzar zonas húmedas o lagunas por escorrentía o incluso por la alimentación desde acuíferos o ríos. La presencia de metales pesados en el agua condiciona su empleo; afectando su utilización como agua de abastecimiento, limitando recursos hídricos fundamentales en regiones semiáridas, afectando a la explotación pesquera, a los usos recreativos y como no al equilibrio del ecosistema, causando la muerte y desaparición de muchas especies (Andrade & Ponce., 2016).

Las aguas residuales generadas por actividades industriales y domésticas también aumentan la contaminación, de estas aguas sólo el 5% son tratadas para purificarlas y reciclarlas. Datos reportados, por Naciones Unidas, muestran que una de cada cinco personas en el mundo no tiene acceso al agua potable, mientras que alrededor de 2400 millones carecen de condiciones adecuadas de salubridad (ONU, 2014).

2.2.1 Arsénico:

De forma natural, el arsénico está presente en cantidades abundantes en la corteza terrestre y en cantidades más reducidas en la roca, suelo, agua y aire. Se puede encontrar en numerosos minerales. Alrededor de un tercio del arsénico presente en la atmósfera proviene de fuentes naturales, por ejemplo de los volcanes, y el resto proviene de actividades humanas (GreenFacts, 2001).

Algunos procesos industriales tales como la minería, la fundición de metales o las plantas eléctricas de carbón contribuyen a la presencia de arsénico en aire, agua y suelo. El uso de arsénico en algunos pesticidas agrícolas y en algunos productos químicos que sirven para conservar la madera, también produce una contaminación ambiental (GreenFacts, 2001). Determinados procedimientos industriales o actividades volcánicas emiten arsénico a la atmósfera, este metal se une a partículas que el viento transporta y que vuelven a caer al suelo. Los microbios presentes en suelos y sedimentos también emiten a la atmósfera sustancias que contienen arsénico. Estos se transforman más tarde en otros compuestos de arsénico que vuelven a fijarse en el suelo (Green Facts, 2001).

2.2.2. Plomo

En general, el contenido de plomo en aguas es bajo, pero el aire contiene más plomo que es arrastrado en forma pulverulenta o como vapor y cuyo origen sería los volcanes o huracanes. En cualquier caso, estas emisiones de origen natural son pequeñas comparadas con las que tienen su origen por la actividad humana (Uniplom, 2004).

Producción de plomo: La minería, la metalurgia y la transformación del plomo han sido causa, en tiempos pasados, de importantes emisiones, la mayor parte de ellas en forma de residuos sólidos, pero también se han producido emisiones apreciables a las aguas y a la atmósfera (Uniplom, 2004). Las fuentes móviles (por ejemplo, vehículos que utilizan gasolina que contiene plomo) siguen siendo la principal fuente de emisión y de contaminación de aire, agua y suelo en muchos países, mientras que, en otros en los que la gasolina con plomo ha sido prohibida, aún existen suelos contaminados por el uso anterior de aquella (Uniplom, 2004).

Aunque las pinturas al plomo tienden a desaparecer, sus residuos, procedentes de viejas construcciones o aplicaciones especiales, siguen representando una fuente de contaminación de suelos y aguas de relativa importancia. Las emisiones originadas por otras aplicaciones de plomo son pequeñas y se originan por abrasión y corrosión del metal o de sus compuestos (Uniplom, 2004). El plomo es removido del aire por la lluvia y por partículas que caen al suelo o en aguas superficiales. Entonces, el suelo se contamina por la adherencia de este material a sus partículas.

La contaminación del agua se da por los vertidos de aguas residuales que contienen desechos de plomo derivados de la industria. Así mismo por partículas contaminadas del suelo que son arrastradas hacia las fuentes de agua (Molina Montoya, 2010)

2.2.3. Cadmio

En la industria, se aprovecha del cadmio por su gran resistencia a la corrosión, su bajo punto de fusión y al ser un excelente conductor eléctrico, su uso se ha derivado en pigmentos, revestimientos, pinturas y baterías recargables de níquel cadmio. El cadmio, como fuente de contaminación para el medioambiente, proviene principalmente de efluentes industriales que tiran sus desechos al río, como las que hacen acabado de metales, electrónica, baterías, estabilizadores plásticos, entre otras. (Andrade & Ponce., 2016).

2.2.4. Cromo

Es un elemento natural, que se encuentra en rocas, plantas, suelos y en los humos y gases volcánicos. Es un elemento de transición, por lo que puede funcionar con distintas valencias; las más comunes son las derivadas del cromo trivalente, o cromo (III), y la del cromo hexavalente, o cromo (VI). El cromo (III) es un nutriente esencial para los seres humanos, promueve la acción de la insulina. Usualmente, el cromo metálico, o cromo (0), y los derivados del cromo (VI), son de origen antropogénico. Por su alta reactividad, el cromo metálico no se encuentra libre en la naturaleza. (Cousillas, A., 2017).

2.2.5. Mercurio

Las mayores fuentes naturales de mercurio son las emisiones de los volcanes y la evaporación desde los cuerpos de agua. No obstante, gran parte del mercurio encontrado en la atmósfera y en los ecosistemas hídricos, proviene de actividades ocasionadas por el hombre (Coyle, U. sf., 2014).

2.3. La incidencia metales pesados en el agua

La contaminación es uno de los problemas ambientales más importantes que afectan al mundo y surge cuando se produce un desequilibrio, como resultado de la adición de cualquier sustancia al ambiente, debido a los diferentes procesos productivos del hombre (fuentes antropogénicas) y actividades de la vida diaria, causando efectos adversos en el hombre, animales y vegetales; problemática a la que Bolivia no es ajena. En nuestro país, entre los principales agentes contaminantes identificados se tiene: el plomo, mercurio, aluminio, arsénico, magnesio, manganeso, hierro, cobre, cianuro, Agregándose a estos metales pesados el dióxido de azufre y el ácido sulfúrico. Adicionalmente a ello, tenemos la presencia cada vez mayor de las poblaciones ubicadas dentro del área de influencia de las actividades productivas, entre ellas la minería. El mayor conocimiento sobre el impacto ambiental y los riesgos a la salud ocasionados por los diferentes metales pesados y otras sustancias químicas, generó la preocupación del Ministerio de Salud por las formas de proteger la salud de las poblaciones en riesgo y enfrentar los problemas de salud existentes. (Cornelis, R. Nordberg, 2007).

2.4. Importancia del estudio de metales pesados en agua

Los estudios de calidad de las cuencas hidrográficas han adquirido gran interés en las últimas décadas, dado al incremento de la población en sus riberas, el creciente grado de industrialización y los aportes del sector primario que se presentan. La importancia que tiene el estudio de metales pesados en aguas y sedimentos es por su elevada toxicidad, alta persistencia y rápida acumulación en organismos vivos, los efectos tóxicos de los metales pesados no se detectan fácilmente a corto plazo, los metales son difíciles de eliminar del medio, puesto que los mismos organismos lo incorporan a sus tejidos y estos a sus depredadores, en los que se acaban manifestando, la toxicidad de estos metales pesados es proporcional a la facilidad de ser absorbidos por los seres vivos, un metal disuelto en forma iónica puede absorberse más fácilmente que estando en forma elemental (Rosas H., 2001).

2.5. Toxicidad de los metales pesados

La toxicidad de los metales depende en gran medida de la forma química en la cual sean introducidos en el organismo: por lo general los compuestos orgánicos de los metales son más tóxicos que los inorgánicos; por ejemplo, los compuestos orgánicos de mercurio y cadmio son 10 -100 veces más tóxicos que los inorgánicos. Sin embargo, esto no ocurre así con el arsénico, en el cual las formas orgánicas son menos tóxicas. Incluso el estado de oxidación puede determinar el carácter tóxico de un metal: un ejemplo notable es el caso del cromo; mientras que el Cr^{+3} es un elemento esencial, el Cr^{+6} es altamente cancerígeno (Oyarzun R. & Higuera P., 2007).

Así, lo que hace tóxicos a los metales pesados no son en general sus características esenciales, sino las concentraciones en las que pueden presentarse, y más importante aún, el tipo de especie que forman en un determinado medio. Cabe recordar que de hecho los seres vivos necesitan (pequeñas concentraciones) a muchos de éstos elementos para funcionar adecuadamente (elementos esenciales). Ejemplos de metales requeridos por el organismo incluyen el cobalto, cobre, hierro, manganeso, molibdeno, vanadio, estroncio y zinc. El caso del hierro es notable entre éstos, siendo vital para la formación de hemoglobina (Oyarzun R. & Higuera P., 2007).

Todos los elementos pesados se encuentran presentes en los medios acuáticos, aunque sus concentraciones (en ausencia de contaminación) son muy bajas. Los metales pesados se encuentran en estas aguas como coloides, partículas minerales (sólidos en

suspensión), o fases disueltas (cationes o iones complejos). Las formas coloidales suelen dar lugar a la formación de hidróxidos, mientras que las partículas sólidas incluyen una gran variedad de minerales. Las fases disueltas pueden a su vez ser capturadas por adsorción o absorción en arcillas o hidróxidos. Adicionalmente, los compuestos orgánicos pueden constituir fases con gran capacidad de captura de cationes metálicos, que en ocasiones dan lugar a fases extremadamente tóxicas metilmercurio: $(CH_3Hg)^+$ (Oyarzun R. & Higuera P., 2007).

A su vez la química del sistema acuoso regula las tasas de adsorción-absorción en el sistema agua-sedimento. La adsorción remueve el metal de la columna de agua; la desorción lo incorpora nuevamente a ésta.

2.6. Factores físico-químicos ambientales

Los parámetros que regulan el sistema son: la salinidad, el potencial redox (Eh), y el pH: Su efecto combinado tiene gran influencia sobre el grado de toxicidad y sobre la incorporación de los metales pesados por la biota acuática (Rosas H., 2001).

Se describe a continuación la influencia de algunos parámetros: un incremento de la salinidad conlleva una competencia, entre metales pesados y metales grupos I y II, por los sitios de ligazón (espaciado interlamilar en las arcillas), lo que se traduce en la expulsión de los metales pesados, y su devolución a la columna de agua (Oyarzun R. & Higuera P., 2007).

El potencial redox (Eh) de un ambiente dado influye sobre los fenómenos de especiación metálica (Rosas H., 2001).

A altos valores de Eh se asocian fenómenos oxidantes; mientras que a bajos valores del mismo lo hacen lo hacen los reductores. Los sedimentos están sometidos a unas condiciones redox determinadas, que pueden afectar al estado de algunos elementos tales con C, Ni, O, S, Fe, Ag, As, Cr, Hg y Pb. Así cuando los sulfatos se reducen a sulfuros la tendencia es producir la precipitación de los metales (FeS_2 , HgS , CdS , CuS , MnS y ZnS). El potencial redox puede influir en los procesos de adsorción, incluso al propio contaminante (Rosas H., 2001).

pH: afecta a la especiación química y a la movilidad de muchos metales pesados

Los cambios de pH pueden influir fuertemente en la adsorción o liberación de cationes (desorción) por las sustancias orgánicas. Los aminoácidos, que aparecen en elevadas concentraciones tanto en solución como precipitados en sedimentos de aguas eutróficas o contaminadas, pueden adsorber o liberar cationes metálicos, debido a su carácter anfótero (Reboratti, C., 2001).

2.7. Origen de los metales pesados en aguas superficiales

En aguas superficiales (ríos, lagos, embalses, etc.) la contaminación se produce, bien por la presencia de compuestos o elementos que normalmente no estarían sin la acción del hombre, o por un aumento o descenso de la concentración normal de las sustancias ya existentes debido a la acción humana (Andrade & Ponce., 2016).

2.7.1. Origen antropogénico

Se entiende por contaminación de origen antropogénico, a la intervención humana en el ciclo biogeoquímico de los metales pesados. Actualmente es difícil encontrar una actividad industrial o un producto manufacturado en los que no intervenga algún metal pesado. Los principales orígenes antropogénicos de metales pesados, pueden ser agrupados de acuerdo a las principales actividades económicas que se realizan en las poblaciones locales, que dependen e inciden directamente en la salud del río: agropecuario (agrícola, ganadero, acuícola), industriales (extracción forestal, bancos de materiales) y doméstico (Rosas H., 2001).

Actualmente las fuentes antrópicas de metales pesados en el ambiente, incluyen a los desechos de la industria metalúrgica, química, minera, industrias relacionadas con la fabricación de baterías y producción de fertilizantes entre otras (Faisal & Hasnain, 2004 citado por Lara et al., 2015 citado por Andrade & Ponce, 2016).

2.7.2. Origen agropecuario

Los orígenes agrícolas de los metales pesados en las aguas superficiales, son los causados por la lixiviación de los terrenos de cultivo en los que se ha producido una acumulación previa de dichos elementos, debido al empleo de pesticidas, fertilizantes y desechos orgánicos susceptibles de ser utilizados como abono (Rosas H., 2001).

Los metales presentes en los terrenos alcanzan los cursos de agua, no sólo directamente al ser lixiviados por la escorrentía superficial (aguas de riego y tormentas), sino también indirectamente al infiltrarse desde acuíferos previamente contaminados. Los

contaminantes de origen ganadero son los debidos a los desechos de los animales y a los que proceden del lavado de establos y granjas. La concentración de metales en dichos materiales es variable y depende del tipo de ganado del que se trate, de la edad del animal, tipo de establo e incluso del manejo de los desechos (Andrade & Ponce., 2016).

2.7.3. Origen industrial

Una de las principales fuentes de metales pesados en los sistemas acuáticos, son las aguas residuales procedentes de las industrias que utilizan los cauces fluviales como vertederos. A menudo estos vertidos no son gestionados, no se someten a procesos de depuración o su tratamiento es inadecuado (Rosas H., 2001).

Los contaminantes pueden encontrarse en forma disuelta o en suspensión, y ser orgánicos e inorgánicos por su naturaleza química (Andrade & Ponce., 2016).

2.7.4. Origen doméstico y urbano

Las aguas residuales de las ciudades son las portadoras de los metales pesados de origen doméstico. Los vertidos domésticos, transportan una amplia gama de metales contenidos en las excreciones humanas, en los restos de los alimentos, en las aguas de lavado, etc. (Rosas H., 2001)

La actividad urbana, es también una fuente de contaminación fundamentalmente por la generación de residuos sólidos urbanos, las emisiones de los vehículos a la atmósfera o a la producción de lodos en las depuradoras de aguas residuales (Andrade & Ponce., 2016).

Las emanaciones gaseosas de los automóviles, no sólo afectan a las ciudades, sino que también lo hacen a las zonas limítrofes de autopistas y carreteras. Los metales así originados incluyen al Cd, Cu, Ni, Pb y Zn siendo el Pb el más abundante proveniente de la combustión de la gasolina y el Zn debido al desgaste de los neumáticos (Andrade & Ponce., 2016).

Estos metales contenidos en las partículas de los humos de combustión y las originadas por el desgaste de neumáticos, pueden llegar a alcanzar los sistemas acuáticos de dos maneras: directamente (precipitación de partículas, por la lluvia) e indirectamente por la lixiviación de los terrenos (calles, carreteras y zonas adyacentes donde previamente

se produjo la deposición) debido a la escorrentía superficial de las aguas de tormenta y de los riesgos de las ciudades (Andrade & Ponce., 2016).

2.8. Efectos de los metales pesados

Ya en la antigua Roma se había encontrado que algunas enfermedades estaban relacionadas con metales pesados. Se atribuía a las ollas, cañerías y fundiciones de Pb (Plomo) la pérdida de inteligencia entre los niños, y las lesiones cerebrales y el comportamiento anormal entre los adultos. Los metales pesados liberados actualmente en el medio ambiente provienen de emisiones no controladas por las fundiciones de metal y otras actividades industriales, la evacuación peligrosa de desechos industriales y el Pb de las cañerías de agua, las pinturas y la gasolina (Morales, 2013).

Los metales pesados más peligrosos para la salud son: Pb, Hg, Cd, As, Cu, Zn y Cr. Estos metales se encuentran naturalmente en el suelo en cantidades mínimos, que presentan pocos problemas. Pero cuando están concentrados en ciertas áreas, constituyen un serio peligro (Morales, 2013).

2.9. Principales problemas en aguas superficiales

2.9.1. Salinización

Se produce cuando la tasa de deposición de las sales que transportan las aguas de riego supera la velocidad de arrastre de la sal por el curso del agua. Es un problema que se puede plantear debido a la reutilización de aguas residuales parcialmente tratadas, puesto que estas aguas han sufrido un pequeño incremento de sales disueltas durante su uso doméstico o industrial. Es más habitual que se produzca debido al riego con aguas de acuíferos sobreexplotados, con altas concentraciones de sales disueltas.

2.9.2. Acidificación de lagos

En lagos de baja alcalinidad, la lluvia ácida originada por la reacción del vapor de agua con óxidos de nitrógeno y azufre provoca la acidificación de los lagos. También puede tener lugar por deposición seca en las proximidades de los focos de emisión de los contaminantes atmosféricos citados. El fenómeno se da en países industrializados y su corrección requiere el control y supresión de las emisiones a la atmósfera de óxidos de nitrógeno y azufre.

2.9.3. Eutrofización.

La ruptura del equilibrio de un ecosistema de base planctónica por la variación de las condiciones naturales de temperatura, luminosidad o disponibilidad de nutrientes puede ocasionar una proliferación exagerada de algas. Dicha proliferación puede dar lugar a problemas puntuales como la disminución del oxígeno disuelto durante la noche, o más generales si la descomposición de las algas muertas agota el oxígeno. El incremento del pH, la generación de sustancias tóxicas por parte de algunos microorganismos, son consecuencias importantes de los procesos de eutrofización. (Echarri, 2007).



3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Ubicación de los puntos de muestreo

Las muestras se recolectaron de la cuenca Katari, dentro del Proyecto “Caudales Ecológicos” de la Cooperación Francesa del IRD, se seleccionaron puntos estratégicos para el presente estudio. Se empezó por la carretera de Pucarani hacia Laja, se tomaron muestras de los puntos K1, K2 y K3 (río Huancané), y luego se continuó en los puntos K4 y K5 (río Katari). Se continuó en dirección río arriba del Katari y así se abarcó los puntos K6, K7 y K8. Se tomaron muestras de los puntos K9 y K10 en el río Pallina, y luego se continuó con los afluentes que vienen de la ciudad de El Alto tomando la muestra del punto K11. Se continuo hacia la región montañosa de Milluni y así se muestreo los puntos K13, K14 y K15 como se puede observar en la **Figura 2**.

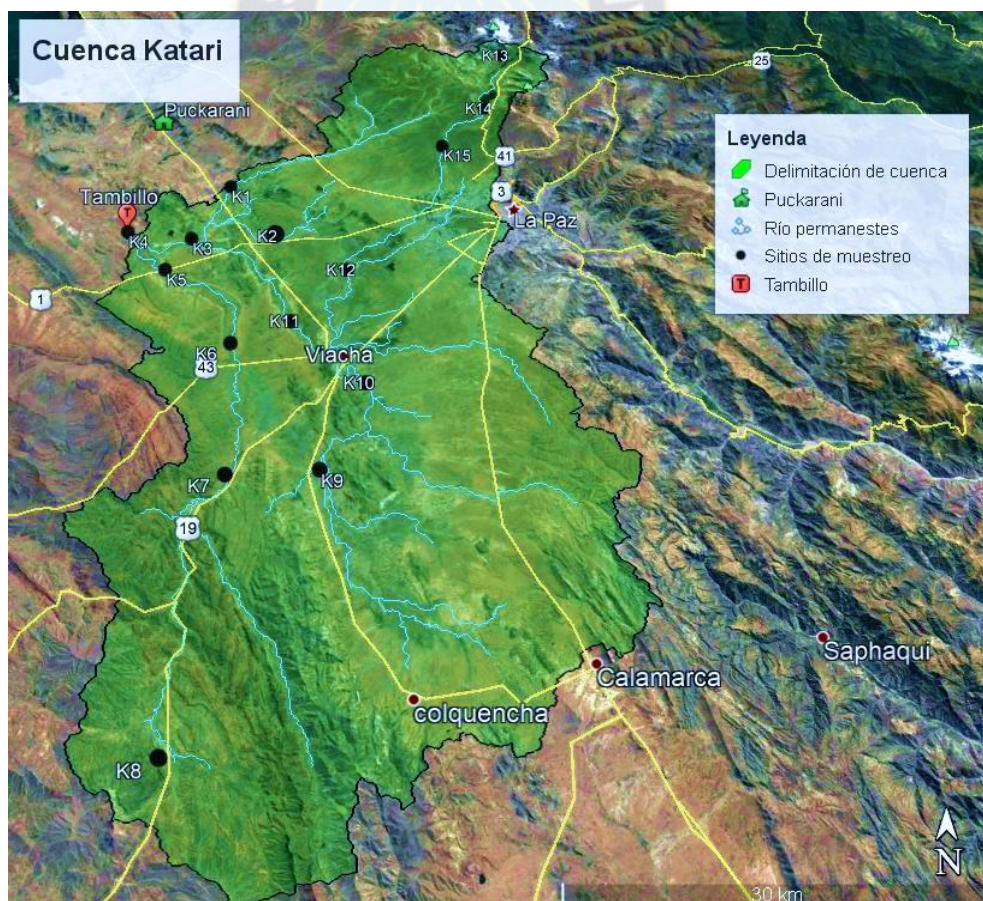


Figura 2. Mapa Hidrográfico que muestra el curso natural de la cuenca Katari contaminado.

Fuente: Ilustración proporcionada por el proyecto Caudales Ecológicos (2021)

Tabla 2. Puntos referenciales de la toma de muestras (1^{ra} campaña)

Código	Puntos de muestreo	Fecha de muestreo	X	Y	Z(msnm)
K1	Río Wilaque	24/5/2021	537632	8222715	3743
K2	Río Wilaque	24/5/2021	568633	8172542	3749
K3	Río Pallina	24/5/2021	556641	8171465	3842
K4	Río Katari	24/5/2021	553930	8172945	3845
K5	Río Katari	24/5/2021	557575	8168623	3862
K6	Río Katari	25/5/2021	564760	8158837	3869
K7	Río Katari	25/5/2021	564093	8146099	3798
K8	Río Katari	25/5/2021	561632	8123696	4060
K9	Río Seke	25/5/2021	572952	8148098	3281
K10	Río Pallina	25/5/2021	576926	8155764	3876
K11	Río Pallina	27/5/2021	569343	8163423	3867
K13	Milluni	26/5/2021	590965	8196467	4567
K14	Milluni	26/5/2021	588468	8188529	4426
K15	Río Seke naciente	26/5/2021	584069	8181861	5560

Fuente: Elaboración propia

Tabla 3. Puntos referenciales de la toma de muestras (2^{da} campaña)

Código	Fecha de muestreo	X	Y	Z (msnm)
K-1	30/09/2021	537632	8222715	3743
K-2	02/10/2021	568633	8172542	3749
K-3	30/09/2021	556641	8171465	3842
K-4	30/09/2021	553930	8172945	3845
K-5	30/09/2021	557575	8168623	3862
K-6	01/10/2021	564760	8158837	3869
K-8	01/10/2021	561632	8123696	4060
K-10	01/10/2021	576926	8155764	3876
K-11	01/10/2021	569343	8163423	3867
K-13	02/10/2021	590965	8196467	4567
K-14	02/10/2021	588468	8188529	4426

Fuente: Elaboración propia

3.2 Toma de muestras

La toma de muestras de aguas se realizó en recipientes de polietileno de alta densidad, tratados previamente en el laboratorio con detergente líquido (Mucosol) libre de fósforo y metales pesados, previo la toma de muestras se enjuagó el frasco tres veces con agua del punto de muestreo antes de la toma de la muestra, el volumen colectado fue de 1000 mL para análisis fisicoquímicos y 500 mL para análisis de metales pesados aplicando el método de muestreo correspondiente según protocolo.

Las muestras fueron transportadas al Laboratorio de Calidad Ambiental de la Universidad Mayor de San Andrés (U.M.S.A.) para su inmediato análisis químico y fisicoquímico.



a) puntos de muestreo



Figura 3. a) puntos de toma de muestras b) multiparametrico proQuatro YSI para la medición de la conductividad, temperatura, pH y oxígeno d) filtración de la muestra para metales f) muestras colectadas.

Fuente: Elaboración propia

3.3. Tiempo de preservación de la muestra

Se debe conservar las muestras a 4 °C y posteriormente se deben realizar los análisis en laboratorio como indica la Tabla 4.

Tabla 4. Preservación de la muestra de agua

Analito	Preservación	Tiempo máximo de análisis
Conductividad Eléctrica	Refrigeración 28 días	28 días
PH	Dureza	Inmediatamente
Nitratos	Inmediatamente	48 h
Sólidos Disueltos	Refrigeración	7 días
Sólidos Suspendidos	Refrigeración	7 días
Sólidos Totales	Refrigeración	7 días
Sulfatos	Refrigeración	28 días
DBO-5	Refrigeración	6 h / 48 h
DQO	Adicionar H_2SO_4 a $PH < 2$	7 días a 28 días
Fosforo Total	HCl, $pH < 2$	2 días
Alcalinidad	Refrigeración	24 h / 14 días
Nitrógeno Total	Adicionar H_2SO_4 a $PH < 2$	7 días / 28 días
Arsénico	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	6 meses
Cadmio	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	6 meses
Cromo	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	6 meses
Hierro	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	6 meses
Mercurio	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	14 días
Plomo	Adicionar HNO_3 a $pH < 2$	6 meses

Fuente: (SMW, 1998)

3.4. Parámetros y métodos para el análisis

La metodología llevada adelante está con base a métodos normalizados y estandarizados internacionalmente: Environmental Protection Agency (EPA) y Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (SMW).

Tabla 5. Parámetros y Métodos utilizados en laboratorio

Tipo de análisis	Parámetros	Método	Unidad	Límite de detección
Metales pesados	Plomo	EPA 239.2	$\mu g/L$	2,0
	Cadmio	EPA 213.2	mg/L	0,020
	Arsénico	EPA 206.2	$\mu g/L$	1,0
	Mercurio		$\mu g/L$	0,2
	Hierro	EPA 7381	mg/L	0,050

	Cromo	EPA 7190	mg/L	0,050
Fisicoquímico	pH	EPA 150.1		1-14
	Conductividad Eléctrica	EPA 120.1	$\mu\text{S}/\text{cm}$	1,0
	Alcalinidad	EPA 310.1	$\text{mg CaCO}_3/\text{L}$	5,0
	Sólidos suspendidos	EPA 160.2	mg/L	5,0
	Sólidos disueltos	EPA 160.1	mg/L	10
	Sólidos totales	EPA 160.3	mg/L	10
	Sulfatos	SM 4500 – $\text{SO}_4^- \text{E}$	mg/L	1,0
	Nitratos	SM 4500- $\text{NO}_3^- \text{B}$	$\text{mg NO}_3^-/\text{L}$	0,30
	DQO	SM 5220-C	mg/L	5,0
	DBO-5	EPA 405.1	mg/L	0,20
	Fosforo total	EPA 365.2	$\text{P} - \text{PO}_4^{-3} \text{mg}/\text{L}$	0,010
	Nitrógeno total	EPA 351.1	mg/L	0,30

Fuente: (SMW, 1998)& (EPA, 1997).



4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1 Parámetros Físicoquímicos

4.1.1. pH (potencial de hidrogeno)

La medición del pH se realizó por el método electrométrico utilizando el medidor portátil multiparamétrico ProQuatro YSI, los resultados obtenidos se presentan en la Tabla 6.

Tabla 6. Valores de pH obtenidos en época seca y época de transición

Puntos de muestreo	Época seca	Época de transición
K1	8,09	7,07
K2	7,55	7,75
K3	8,10	8,00
K4	8,20	8,17
K5	8,40	8,73
K6	8,48	8,73
K7	8,49	-
K8	8,00	7,84
K9	10,10	-
K10	10,52	9,87
K11	8,10	8,14
K13	7,50	6,42
K14	3,10	3,44
K15	3,20	-

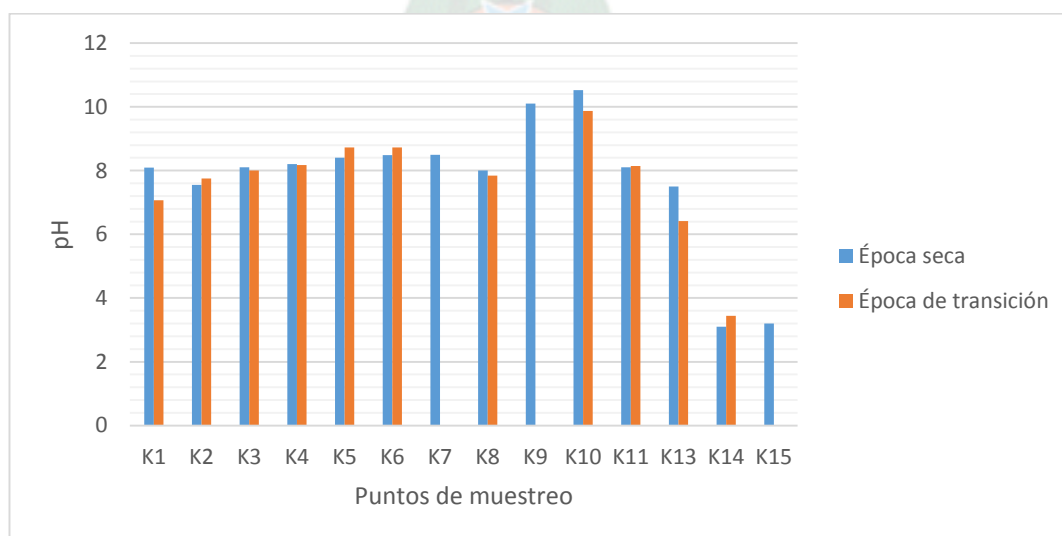


Figura 3. Comportamiento de pH en época seca y época de transición.

En la Figura 3 se puede observar una variación de pH en las muestras de aguas en todos los puntos, teniendo un rango comprendido entre 3,10 a 10,52 (época seca) y 3,44 a 9,87 (época de transición), los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K10 se encuentra una de las corrientes de agua de entrada hacia la ciudad de El Alto que tiene un pH básico.

4.1.2. Conductividad Eléctrica (CE)

La medición de la CE se realizó utilizando el multiparamétrico proQuatro YSI, los resultados de esta medición se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Resultados obtenidos en la medición de la C.E. in situ

Puntos de muestreo	C.E.($\mu\text{s}/\text{cm}$)		C.E.($\mu\text{s}/\text{cm}$)	
	Época seca	T ($^{\circ}\text{C}$)	Época de transición	T ($^{\circ}\text{C}$)
K1	139,0	8,7	294,7	9,0
K2	314,3	8,9	494,7	9,0
K3	1062,0	9,1	802,8	9,15
K4	1111,5	11,3	1863,7	12,0
K5	984,0	14,8	1816,0	15,0
K6	957,0	16,0	1215,0	17,1
K7	977,0	11,1	-	-
K8	649,0	8,3	1222,7	9,0
K9	2194,0	11,1	-	-
K10	542,0	20,0	781,0	22,0
K11	927,0	9,9	1892,0	10,0
K13	97,3	8,1	212,5	9,0
K14	630,0	12,2	876,3	13,0
K15	551,7	12,7	-	-

L.D. = 1,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$

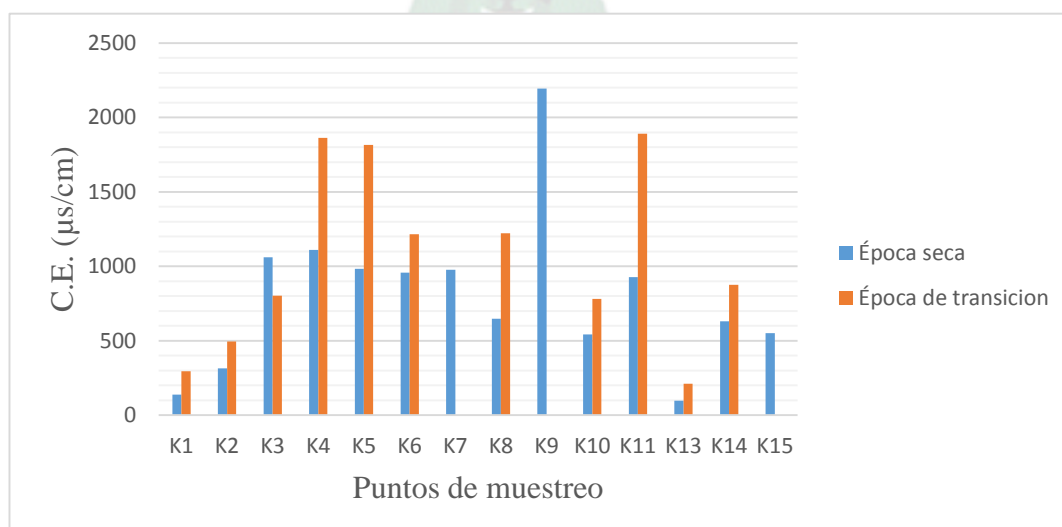


Figura 4. Comportamiento de la C.E. En época seca y época de transición.

En la Figura 4, se puede observar que los valores de conductividad eléctrica tanto en época seca y transición son poco variables y se encuentran en un rango comprendido de 97,3 y 2194,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$, Los valores más elevados se encuentran en K4 (época de transición) con un valor de 1816,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y K9 (época seca) con un valor de 2194,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Los valores altos de conductividad se deben a la presencia de sales en concentraciones elevadas que dan lugar a iones disueltos en el agua.

Todos los valores son mayores al límite de detección (1,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$) correspondiente al equipo empleado. Con base en los resultados obtenidos de conductividad, estas aguas pueden ser clasificadas como aguas duras.

4.1.3. Oxígeno disuelto (OD)

La medición de OD se realizó por el método electrométrico utilizando el equipo multiparametrico proQuatro-YSI, los resultados de esta medición se presentan en la Tabla 8.

Tabla 8. Resultados obtenidos de la medición de oxígeno disuelto in situ.

Puntos de muestreo	OD (mgO_2/L) Época seca	OD (mgO_2/L) Época de transición
K1	6,6	5,5
K2	4,9	3,8
K3	0,3	2,7
K4	4,9	3,3
K5	4,8	3,8
K6	4,1	5,9
K7	5,0	-
K8	6,1	5,1
K9	5,6	-
K10	5,1	3,9
K11	1,6	1,1
K13	5,4	4,5
K14	4,0	3,6
K15	4,0	-

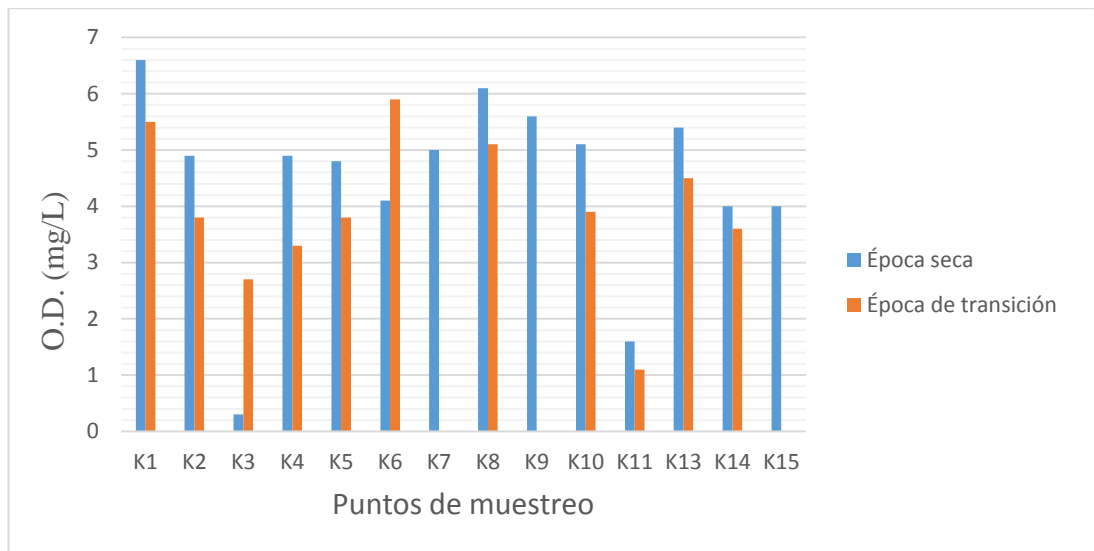


Figura 5. Comportamiento del oxígeno disuelto en época seca y época de transición.

La diferencia de OD entre épocas se debe a la temperatura, el OD varía inversamente proporcional a la temperatura, por esta razón a mayor temperatura (Tabla 7) se puede observar una menor concentración de OD (Tabla 8) en época seca y mayor concentración de OD a menor temperatura en época de transición.

Los resultados obtenidos en la Tabla 8 muestran que el porcentaje de saturación de oxígeno es mayor al 80%, (Ley N°1333, 1992).

4.1.4. Sólidos Totales (ST)

Los Sólidos Totales se determinó por el método gravimétrico, empleando la siguiente fórmula:

$$ST = \frac{(A - B) \times 1000}{V}$$

Donde:

A = peso de la cápsula más peso del residuo (mg)

B = peso de la cápsula (mg)

V = volumen de la muestra (mL)

Los resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Totales se presentan en la Tabla 9.

Tabla 9. Resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Totales.

Puntos de muestreo	ST [mg/L] Época seca	ST [mg/L] Época de transición
K1	740	919
K2	454	477
K3	787	635
K4	783	914
K5	929	1230
K6	773	906
K7	872	-
K8	802	924
K9	1919	-
K10	448	540
K11	640	852
K13	270	336
K14	488	642
K15	452	-

L.D. = 10 mg/L

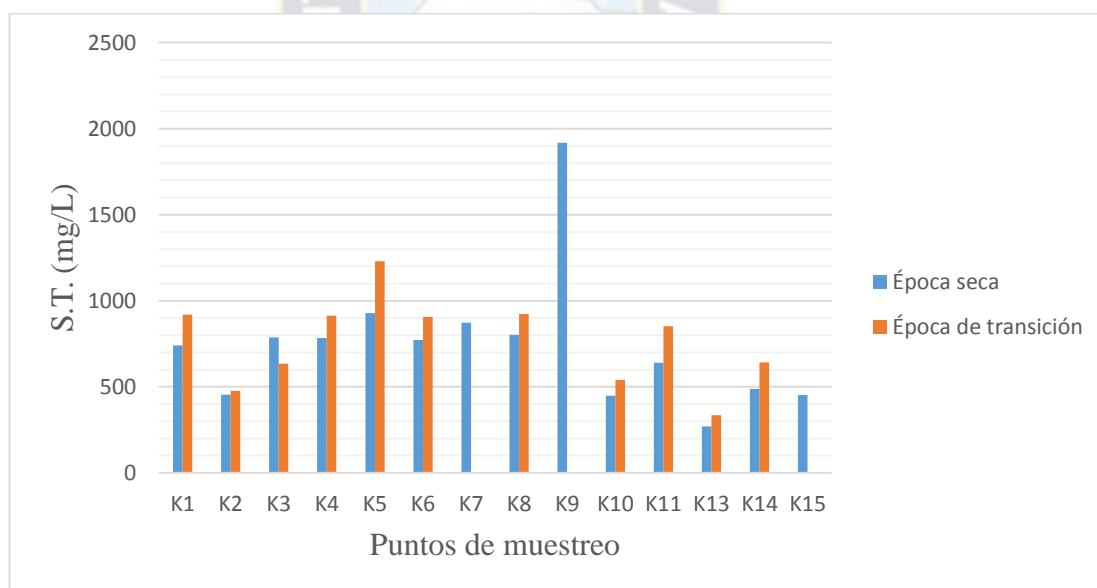


Figura 6. Comportamiento de sólidos totales en muestras de agua.

En la Figura 6 se observa una variación de los sólidos totales presentes en las muestras de aguas en un rango comprendido entre 270 mg/L a 1919 mg/L (época seca) y 336 mg/L a 1230 mg/L (época de transición), dichos sólidos corresponden a partículas de sílice y otras partículas suspendidas en el agua proveniente de la contaminación presente en K5 (época de transición) y K9 (época seca). Los resultados de la Tabla 9

muestran una variación de la concentración en las épocas seca y de transición, también cambia la concentración en los diferentes puntos de muestreo.

Todos los valores obtenidos son mayores al límite de detección (10 mg/L) correspondiente al método EPA 160.3. Los valores de Conductividad se encuentran dentro del límite permisible (1500 mg/L) correspondiente a la clase C (agua residual) establecido por la Norma Boliviana ley 1333 de Medio Ambiente.

4.1.5. Sólidos Suspendedos (SS)

Los Sólidos Suspendedos se determinaron por el método gravimétrico, empleando la siguiente fórmula:

Donde:
$$SS = \frac{(A-B) \times 1000}{V_m}$$

A = peso del filtro más peso del residuo (mg)

B = peso del filtro (mg)

V_m = volumen de la muestra (mL)

Los resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Suspendedos se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10. Resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Suspendedos.

Puntos de muestreo	SS [mg/L] Época seca	SS [mg/L] Época de transición
K1	509	417
K2	58	42
K3	57	45
K4	74	69
K5	3	2
K6	6	2
K7	1	-
K8	8	4
K9	22	-
K10	36	26
K11	194	49
K13	4	2
K14	2	1
K15	1	-

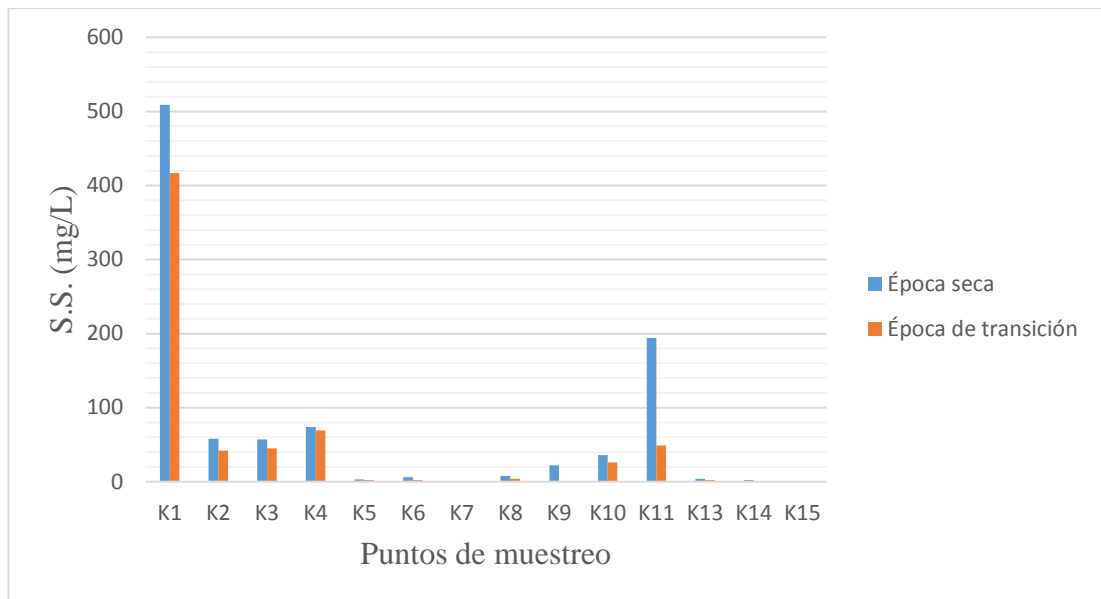


Figura 7. Comportamiento de sólidos suspendidos en muestras de agua.

En los resultados de la Tabla 10 se puede observar que los Sólidos Suspendidos en época seca son mayores que en época de transición, esto es debido a que los Sólidos Suspendidos son arrastrados al cuerpo del agua de lluvia.

4.1.6. Sólidos Disueltos (SD)

Los Sólidos Disueltos son determinados por el método gravimétrico, empleando la siguiente fórmula:

$$SD = \frac{A - B}{V} \times 1000$$

Donde:

A = peso de la capsula más peso del residuo (mg)

B = peso de la capsula (mg)

V = volumen de la muestra (mL)

Los resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Disueltos se presentan en la Tabla 11.

Tabla 11. Resultados obtenidos en la determinación de Sólidos Disueltos.

Puntos de muestreo	SD [mg/L] Época seca	SD [mg/L] Época de transición
K1	740	161
K2	454	307
K3	787	399
K4	783	497
K5	929	1220
K6	773	906
K7	872	-
K8	802	924
K9	1919	-
K10	448	488
K11	640	809
K13	270	136
K14	488	642
K15	452	-

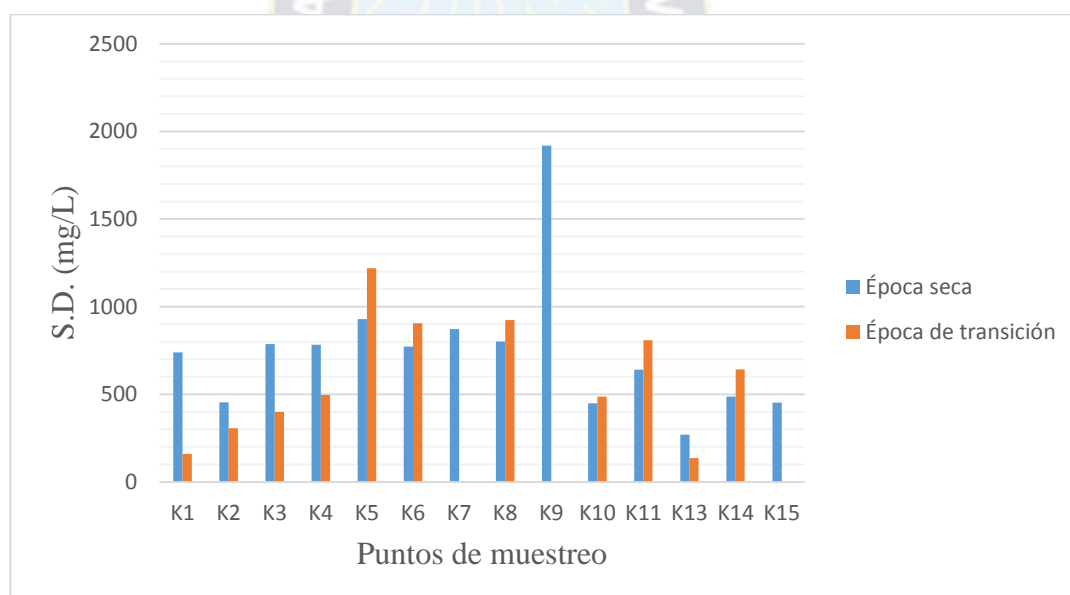


Figura 8. Comportamiento de sólidos disueltos en muestras de agua.

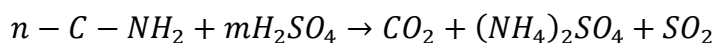
En la Figura 8, se observa una variación de los sólidos disueltos están presentes en menor cantidad en época seca. No existe mayor variación de los SD en los puntos de muestreo.

4.1.7. Nitrógeno Total

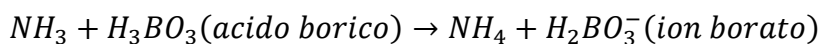
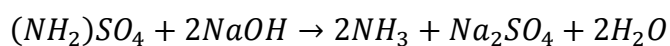
Para la determinación del nitrógeno total en muestras de aguas se utilizó el método titulométrico (EPA 351.1)).

Las reacciones que se llevan a cabo en la determinación de nitrógeno total son las siguientes:

- **Digestión**



- **Neutralización y destilación**



- **Titulación:** la titulación se lleva a cabo con H_2SO_4 estandarizado

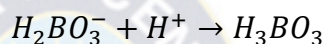


Tabla 12. Resultados obtenidos en el análisis de Nitrógeno total en muestras de agua.

Puntos de muestreo	Nitrógeno Total [mg/L] Época seca	Nitrógeno Total [mg/L] Época de transición
K1	1,12	168
K2	1,12	1,1
K3	79	140
K4	80	90,8
K5	0,24	2,8
K6	1,40	3,2
K7	0,67	-
K8	1,12	2,0
K9	2,52	-
K10	0,55	2,4
K11	4,51	103
K13	3,91	0,3
K14	0,61	0,4
K15	0,34	-

L.D. = 0,30 mg/L

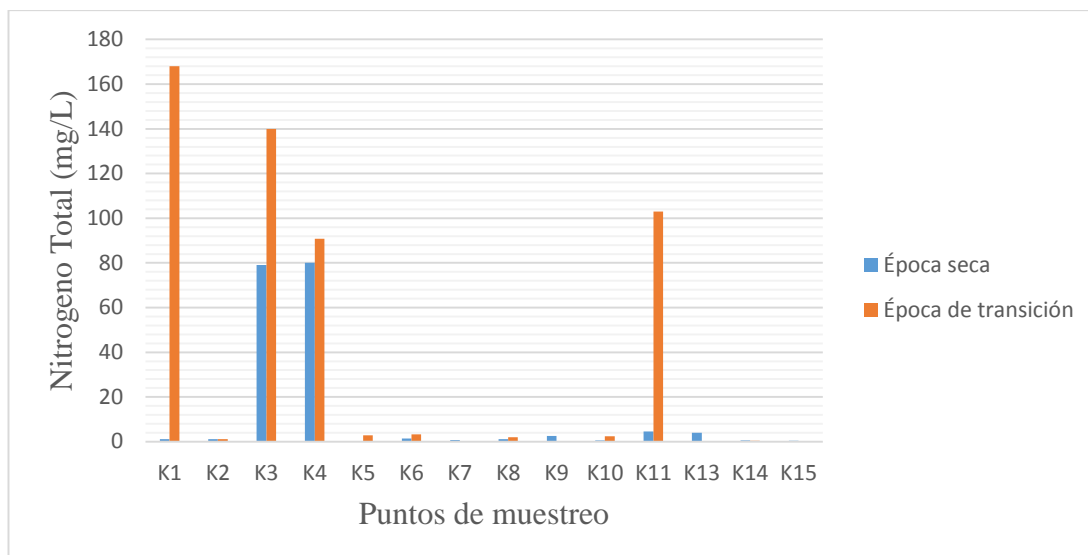


Figura 9. Comportamiento de Nitrógeno total en muestras de agua

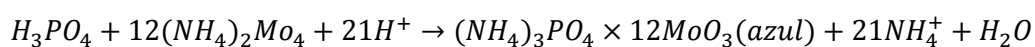
En la Figura 9 se puede observar un comportamiento irregular de la concentración de Nitrógeno total en las muestras de agua, que se encuentran en un rango entre 0,24 mg/L a 80 mg/L (época seca) y 0,3 mg/L a 168 mg/L (época de transición), los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K4, (época seca) y K1 (época de transición) presentan valores más elevados de Nitrógeno total con un valor de 0,3 mg/L y 168 mg/L, esto debido a que en ese punto se concentran las aguas provenientes de los desechos de la ciudad de El Alto, en las demás poblaciones los valores de Nitrógeno total son distribuidos irregularmente según a su cercanía a una de las corrientes de aguas contaminadas provenientes de la ciudad de El Alto.

Todos los valores obtenidos son mayores al límite de detección (0,30 mg/L) correspondiente al método EPA 351.1. Según el límite permisible (12 mg/L) correspondiente a cuerpos de agua clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley 1333 no supera este límite establecido

4.1.8. Fósforo Total

Para la determinación de fósforo total en aguas se aplicó el Método Molibdavanadato (EPA 365.2).

La reacción que se lleva a cabo en la determinación de fósforo total es la siguiente:



Curva de fósforo total

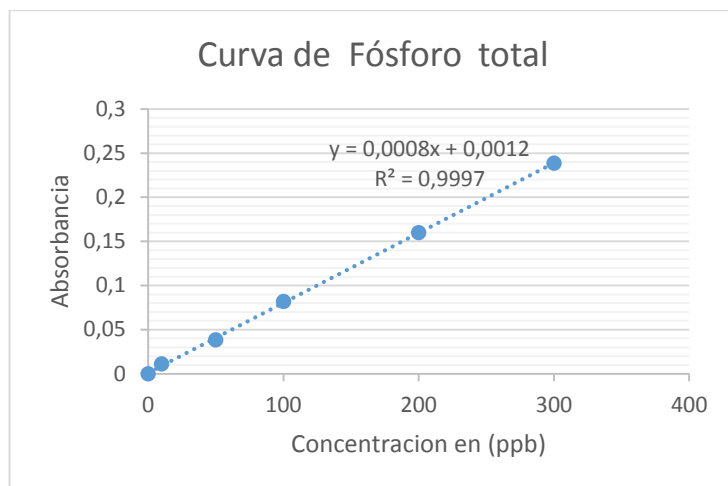


Figura 10. Curva de calibración para fósforo total

Tabla 13. Resultados obtenidos en el análisis de fósforo total en muestras de agua.

Puntos de muestreo	Fósforo Total [mg/L] Época seca	Fósforo Total [mg/L] Época de transición
K1	1,49	1,54
K2	0,29	0,32
K3	16,99	17,40
K4	14,19	14,31
K5	0,08	0,10
K6	0,06	0,09
K7	0,06	-
K8	0,05	0,07
K9	0,28	-
K10	0,52	0,59
K11	24,24	24,26
K13	0,03	0,07
K14	0,01	0,02
K15	0,01	-

L.D. = 0,010 mg/L

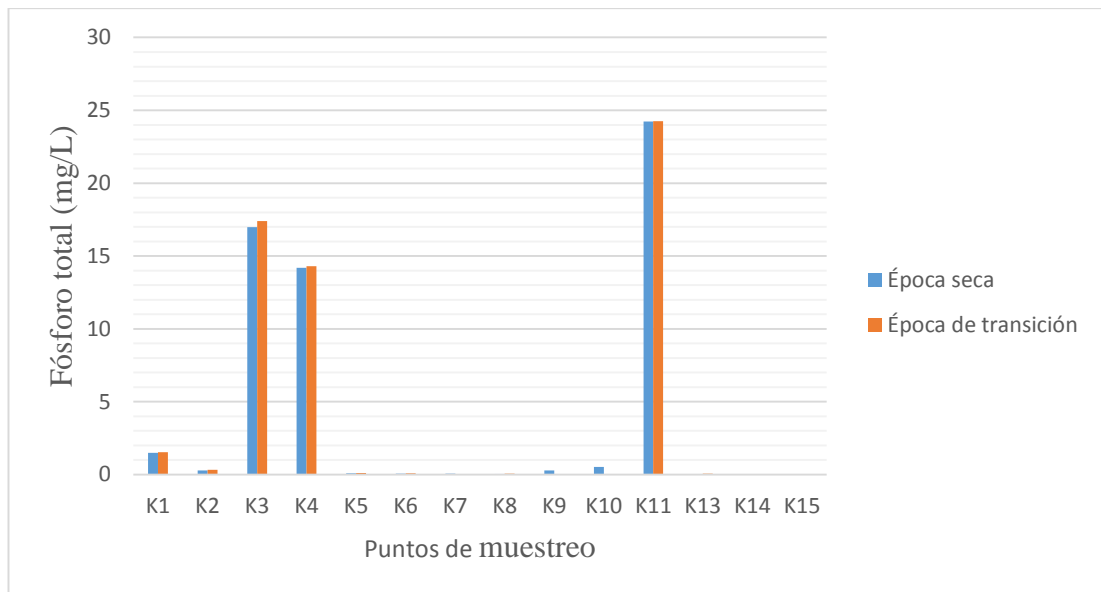


Figura 11. Comportamiento de Fósforo total en muestras de agua.

En la Figura 11 se observa un comportamiento irregular de la concentración obtenida de Fósforo total en todos los puntos, en un rango comprendido entre 0,01 mg/L a 24,24 mg/L. Todos los valores superan el límite de detección (0,010 mg/L) establecido en el método EPA 365.2.

Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K11 se encuentra uno de los valores más elevados de concentración de Fósforo total con un valor de 24,24 mg/L debido a que las aguas provenientes de los desechos de la ciudad de El Alto se concentran en este punto, en los demás puntos los valores de Fósforo total se distribuyen irregularmente según su cercanía a una de las corrientes de aguas contaminadas provenientes de la ciudad de El Alto. Las concentraciones obtenidas de Fósforo total superan el límite permisible (1,0 mg/L) correspondiente a cuerpos de agua de clase C (agua residual) establecido por la Norma Boliviana ley 1333.

4.1.9. Demanda Bioquímica de Oxígeno DBO-5

El análisis de la demanda bioquímica de oxígeno se realizó en muestras de aguas empleando el método EPA 405.1 (Método Oxígeno inicial – oxígeno final Winkler test de 5 días).

Si el material orgánico está en exceso estequiométrico de la cantidad de oxígeno requerido, como lo indica en la ecuación (1) al término de la prueba no hay oxígeno disuelto que se pueda medir y no es posible evaluar la Demanda de Oxígeno.

La ecuación (2) es la deseable, ya que de esta manera si se puede determinar la cantidad de oxígeno consumido, restando el oxígeno disuelto al final de la prueba con el oxígeno inicialmente presente. Las reacciones que ocurren se muestran a continuación,

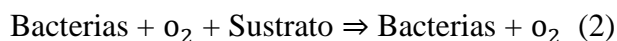
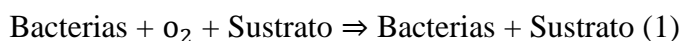


Tabla 14. Resultados obtenidos en el análisis de DBO-5 en muestras de aguas.

Puntos de muestreo	DBO-5 [mgO ₂ /L] Época seca	DBO-5 [mgO ₂ /L] Época de transición
K1	6,6	5
K2	6,3	15
K3	18,2	33
K4	24,4	32
K5	11,7	19
K6	8,0	20
K7	4,9	-
K8	4,4	20
K9	6,6	-
K10	13,4	34
K11	81,6	33
K13	4,8	3
K14	0,8	3
K15	4,5	-

L.D=0,20

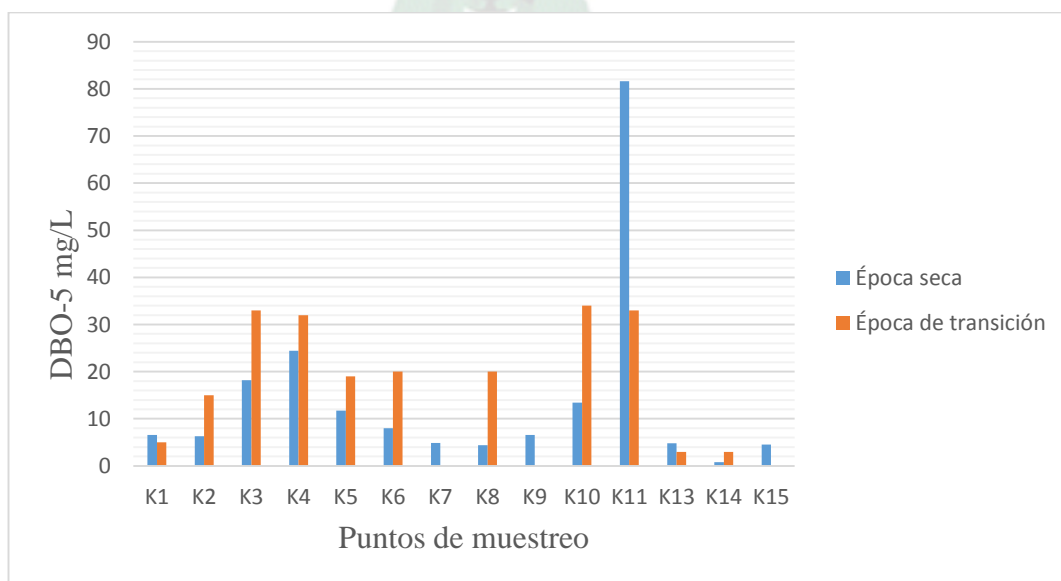


Figura 12. Descripción del comportamiento de DBO-5 en muestras de aguas.

En la Figura 12 se puede observar un comportamiento irregular en las concentraciones de oxígeno para la Demanda Bioquímica de Oxígeno en muestras de aguas teniendo un rango entre 0,8 mg/L a 81,6 mg/L (época seca) y 3 mg/L a 34 mg/L (época transición).

Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K11 presenta uno de los valores más elevados de Demanda Bioquímica de Oxígeno debido a que en este lugar existiría microorganismos presentes en el agua que consumirían el oxígeno, esto significa que el requerimiento de oxígeno es alto para la degradación de bioquímica de la materia orgánica en las aguas industriales y en general residuales.

Todos los valores obtenidos superan el límite de detección (0,20 mg/L) establecido en el método EPA 405.1. Existe dos puntos de muestreo que superan el límite permisible (20 mg/L) en cuerpos de aguas de clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley 1333.

2.1.10. Demanda Química del Oxígeno DQO

Para el análisis de la demanda química de oxígeno se empleó el Método titulométrico SM 5220-C. La reacción que se lleva a cabo en la determinación de DQO es:

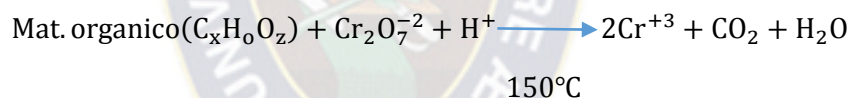


Tabla 15. Resultados obtenidos en el análisis de DQO en muestras de aguas.

Puntos de muestreo	DQO [mgO ₂ /L] Época seca	DQO [mgO ₂ /L] Época de transición
K1	58	8
K2	90	16
K3	329	59
K4	173	111
K5	19	40
K6	49	263
K7	5	-
K8	19	57
K9	33	-
K10	99	76
K11	543	90
K13	11	8
K14	6	5
K15	11	-

L.D=5,0 mg/L

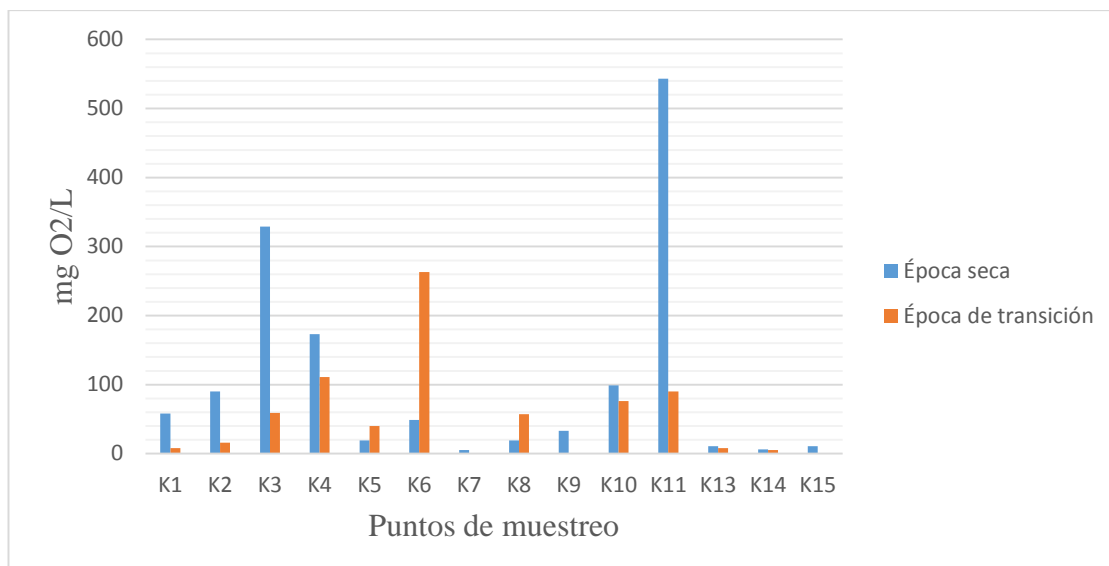


Figura 13. Descripción del comportamiento de DQO en muestras de aguas.

En la Figura 13 se puede observar un comportamiento muy irregular en las Concentraciones de Oxígeno para la DQO en muestras de aguas, todos los valores se encuentran dentro del límite de detección correspondiente al método SM 5220-C.

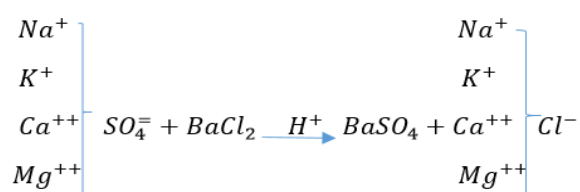
Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K11 presenta uno de los valores más elevados de concentración de oxígeno lo cual significa que existe una mayor demanda de oxígeno necesario para la degradación de la materia orgánica, en los demás puntos las concentraciones de oxígeno para la DQO son distribuidos según su ubicación geográfica y la actividad de microorganismos para la degradación de la materia orgánica.

Se observa que en algunos puntos de muestreo los valores de DQO superan el límite permisible (40 mg/L) correspondiente a cuerpos de agua de clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley 1333.

2.1.11. Sulfatos SO_4^-

El análisis de sulfatos se realizó empleando Método Turbidimétrico SM 4500- SO_4^- E a una longitud de onda de 420 nm.

La reacción del método es la siguiente:



Curva de Sulfatos

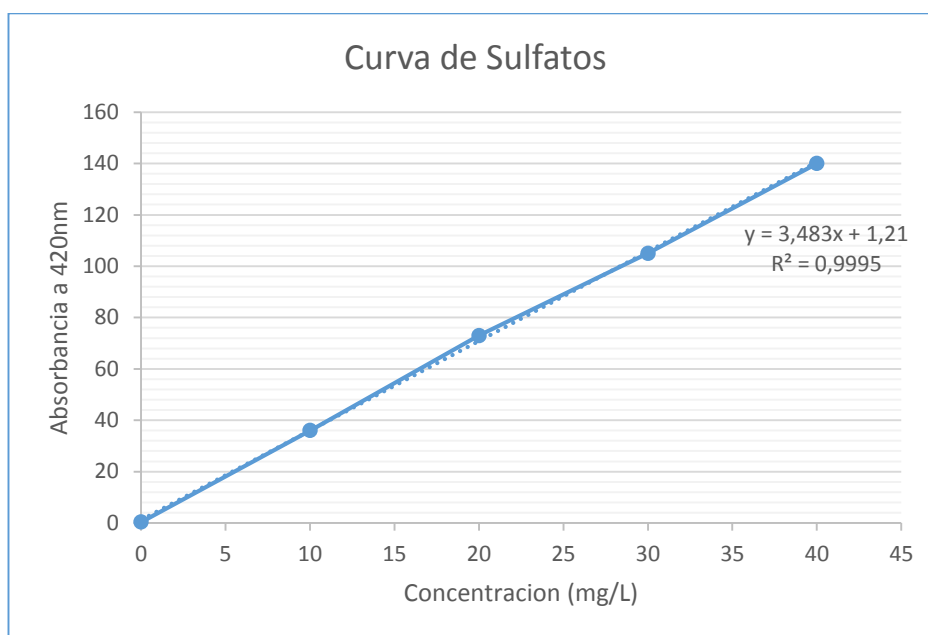


Figura 14. Curva de calibración para Sulfatos

Tabla 16. Resultados obtenidos en el análisis de SO_4^{2-} en muestras de aguas.

Puntos de muestreo	SO_4^{2-} [mg/L] Época seca	SO_4^{2-} [mg/L] Época de transición
K1	54	76
K2	104	41
K3	92	31
K4	27	33
K5	263	299
K6	263	163
K7	218	-
K8	242	340
K9	364	-
K10	273	111
K11	101	44
K13	41	53
K14	52	277
K15	273	-

L.D. = 1,0 mg/L

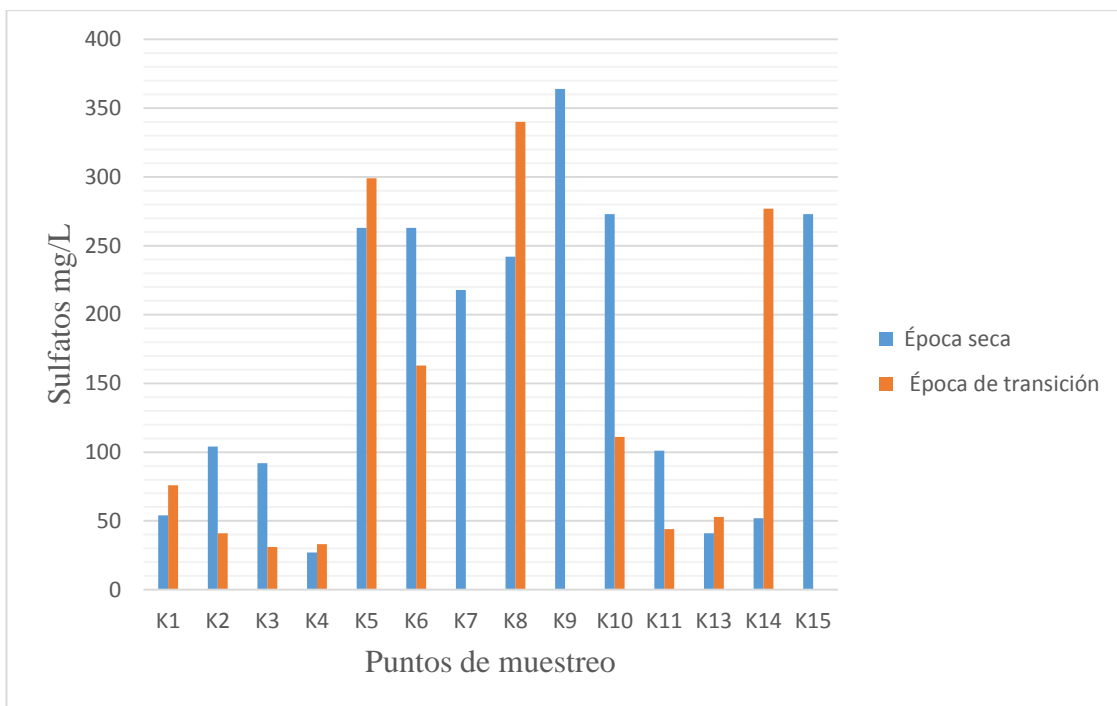


Figura 15. Descripción del comportamiento de SO_4^{2-} en muestras de aguas.

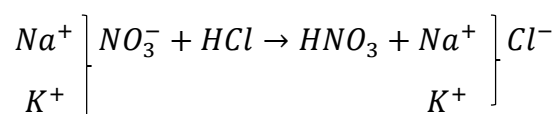
En la Figura 15 se puede observar una variación en la concentración de sulfatos en muestras de aguas, en un rango comprendido entre 27 mg/L a 364 mg/L (época seca) y 31 mg/L a 340 mg/L (época de transición), todos los valores superan el límite de detección correspondiente al método SM 4500-SO₄²⁻E. Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, en el punto K9 (época seca) y K8 (época de transición) se encuentran los valores más elevados de concentración de sulfatos lo que significa que en esos puntos existen una gran fuente de oxígeno para que las bacterias reduzcan el sulfato en presencia de oxígeno para obtener H₂S.

La Concentración de sulfatos obtenidas no superan el límite permisible (400 mg/L) correspondiente a cuerpos de agua de clase C (aguas residuales) establecidos por la Norma Boliviana ley 1333.

2.1.12. Nitratos NO₃⁻

El análisis de nitratos en muestras de aguas se empleó el método SM 4500-NO₃⁻ B (Método Espectrofotométrico a 220nm UV/VIS).

Las reacciones que se producen son las siguientes:



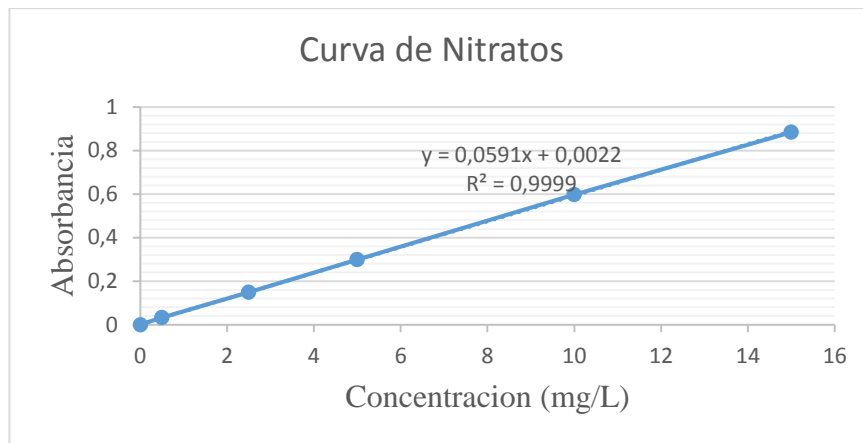


Figura 16. Curva de calibración para Nitratos

Tabla 17. Resultados obtenidos en el análisis de NO_3^- en muestras de agua

Puntos de muestreo	NO_3^- [mg/L] Época seca	NO_3^- [mg/L] Época de transición
K1	0,40	0,41
K2	1,0	0,49
K3	2,3	1,7
K4	0,94	1,8
K5	0,244	0,52
K6	0,191	0,22
K7	0,179	-
K8	0,20	0,24
K9	1,1	-
K10	0,53	1,1
K11	4,4	1,1
K13	0,17	0,26
K14	0,61	0,39
K15	0,34	-

L.D. = 0,30 mg/L

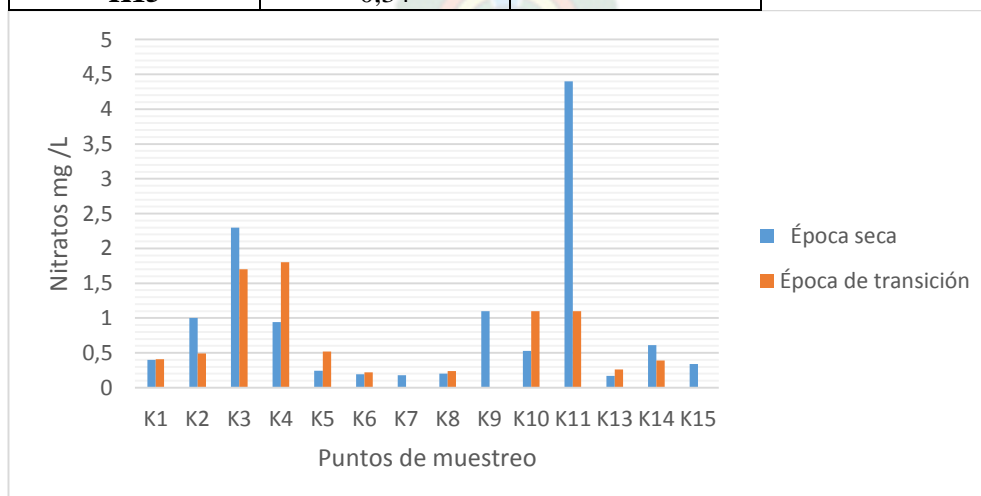


Figura 17. Descripción del comportamiento de NO_3^- en muestras de aguas.

En la Figura 17 se puede observar un comportamiento muy irregular de la Concentración de nitratos en todos los puntos, estando en un rango entre 0,17 mg/L a 4,4 mg/L (época seca) y 0,22 mg/L a 1,8 mg/L (época de transición), la mayoría de las concentraciones superan el límite de detección de valor 0,30 mg/L correspondiente al método SM 4500-NO₃⁻B. Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, los puntos K11 (época seca) y K3 (época de transición) presentan los valores más elevados de nitratos esto significa que existe una nitrificación aún incompleta lo que contribuiría a la eutrofización del lugar.

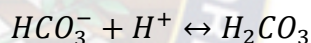
Los valores obtenidos de Nitratos en muestras de aguas no superan el límite permisible (50mg/L) correspondiente a cuerpos de aguas de clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley 1333.

4.1.13. Determinación de alcalinidad total (CO₂, CO₃⁼ y HCO₃⁻)

Para el análisis de alcalinidad total se aplicó el método EPA 310.1 (Método titulométrico).

Las reacciones que se llevan a cabo en la determinación de Alcalinidad son:

- Reacción de valoración del anión bicarbonato con ácido clorhídrico.



- Acido carbónico formado en equilibrio.

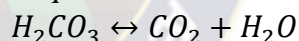


Tabla 18. Resultados obtenidos en el análisis de Alcalinidad total en muestras en aguas.

Puntos de muestreo	Alcalinidad Total CaCO ₃ [mg/L] Época seca	Alcalinidad Total CaCO ₃ [mg/L] Época de transición
K1	16	5,3
K2	40	100,5
K3	254	525,0
K4	1188	625,0
K5	613	125,0
K6	98	125,0
K7	83	-
K8	75	125,0
K9	88	-
K10	405	130,0
K11	1113	700,0
K13	25	350,0
K14	<5,0	125,0
K15	<5,0	-

L.D. = 5,0 mg/L

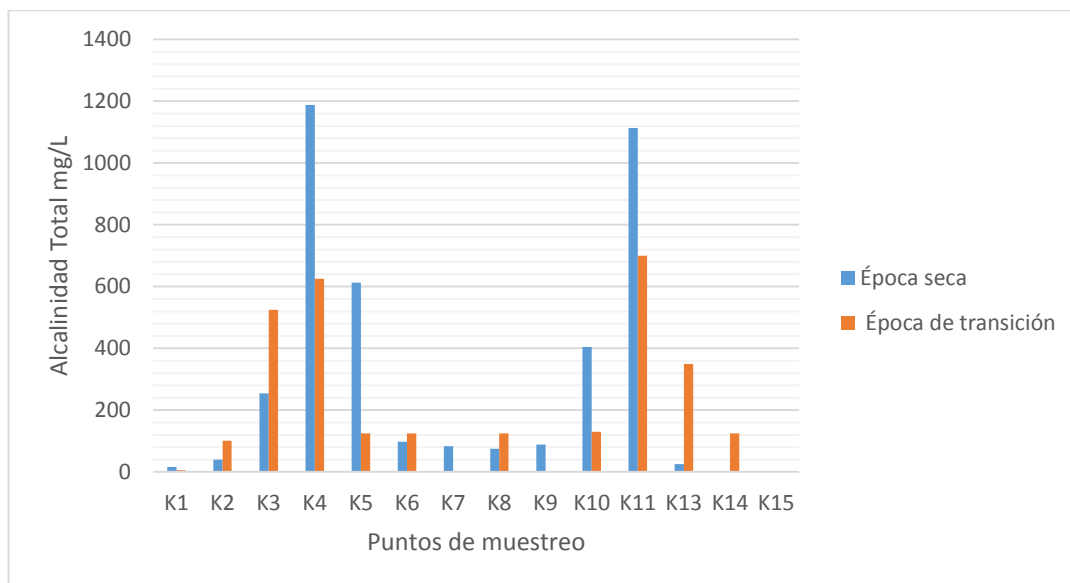


Figura 18. Descripción del comportamiento de Alcalinidad total en muestras de aguas.

En la Figura 18 se puede observar una variación en la concentración de Alcalinidad en muestras de aguas en un rango entre 16 mg/L a 1188 mg/L (época seca) y 5,3 mg/L a 700,0 mg/L (época de transición), los valores obtenidos de Alcalinidad total superan el límite de detección (5,0 mg/L) correspondiente al método EPA 310.1.

Los valores varían de acuerdo a la ubicación de los puntos, los puntos K4 (época seca) y K11 (época de transición) presentan los valores más elevados de alcalinidad total, lo que implica presencia de hidróxidos, carbonatos y bicarbonatos de elementos como el calcio, el magnesio y el sodio. Las Concentraciones de Alcalinidad total en algunos puntos superan el límite permisible (370 mg/L) correspondiente a cuerpos de aguas de clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley 1333.

4.2 Parámetros de metales pesados

4.2.1 Arsénico (As)

Para la determinación de Arsénico se empleó el método EPA 206.2 (Método Espectrofotométrico) cuya Curva de Calibración se presenta en la Figura 19

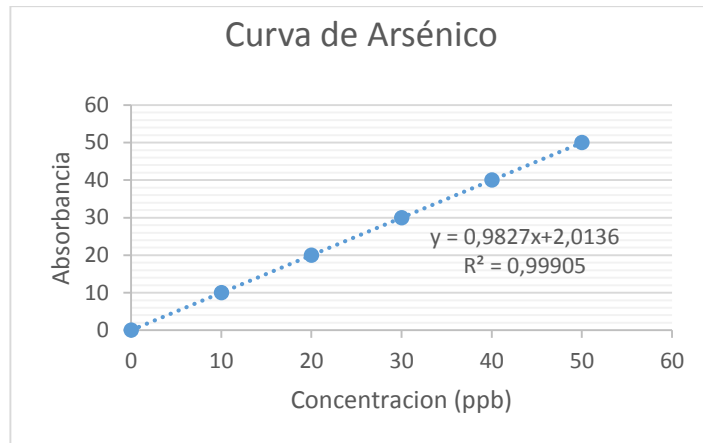


Figura 19. Curva de calibración para el Arsénico

Los resultados obtenidos en el análisis de Arsénico en aguas se muestran en la Tabla 19:

Tabla 19. Resultados obtenidos en el análisis del Arsénico

Puntos de muestreo	Arsénico $\mu\text{g/L}$ Época seca	Arsénico $\mu\text{g/L}$ Época de transición
K1	6,651	<1,0
K2	3,650	9,720
K3	2,942	31,400
K4	4,248	16,190
K5	<1,0	4,918
K6	<1,0	3,485
K7	<1,0	-
K8	<1,0	2,543
K9	<1,0	-
K10	5,359	6,234
K11	3,082	4,434
K13	3,193	17,500
K14	<1,0	<1,0
K15	<1,0	<1,0

L.D. = 1,0 $\mu\text{g/L}$

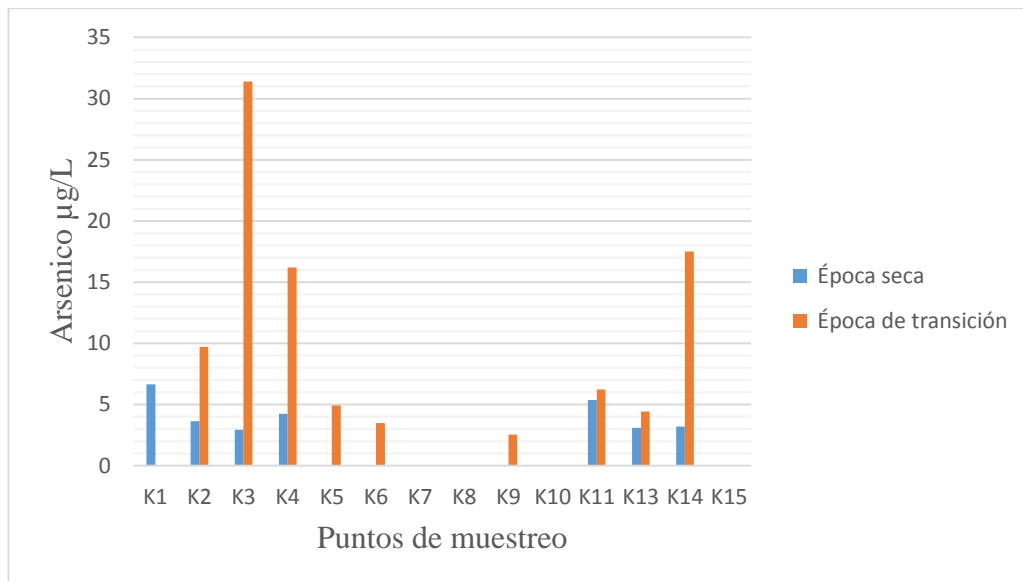


Figura 20 Descripción del comportamiento del Arsénico

En la Figura 20 se observa concentraciones de arsénico con valores entre 6,651 µg/L a 2,942 µg/L (época seca) y 31,400 µg/L a 2,543 µg/L (época de transición).

La concentración más elevada de Arsénico se encuentra en el punto K3 con un valor de 31.400 µg/L, esto se debe a efluentes provenientes de descargas residuales e industriales de la ciudad de El Alto; los valores de Arsénico se encuentran por debajo del límite permisible (0,050 mg/L = 50 µg/L) correspondiente a la clase A (aguas de consumo) en cuerpos de agua establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.2.2. Cadmio (Cd)

Para la determinación de Cadmio se empleó el método EPA 213.1 (Método Espectrofotométrico) y se preparó una recta de calibración de 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 y 0,5 mg/L mismo que se presenta en la Figura 21.

Curva de Cadmio

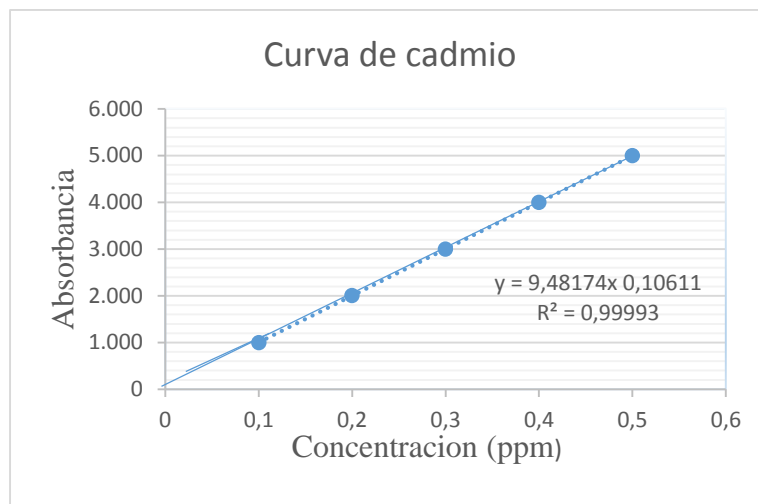


Figura 21. Curva de calibración para Cadmio

Los resultados obtenidos en el análisis de Cadmio en aguas se muestran en la Tabla 20:

Tabla 20. Resultados obtenidos en el análisis de Cadmio en muestras de aguas

Puntos de muestreo	Cadmio mg/L Época seca	Cadmio mg/L Época de transición
K1	<0,020	<0,020
K2	<0,020	<0,020
K3	<0,020	<0,020
K4	<0,020	<0,020
K5	<0,020	<0,020
K6	<0,020	<0,020
K7	<0,020	-
K8	<0,020	<0,020
K9	<0,020	-
K10	<0,020	<0,020
K11	<0,020	<0,020
K13	<0,020	<0,020
K14	<0,020	<0,020
K15	<0,020	-

L.D. = 0,020 mg/L

En la Tabla 20 se observa que los valores de concentración de Cadmio están por debajo del límite de detección 0,020 mg/L con la técnica de Espectrofotometría de Absorción atómica con horno de grafito en todos los puntos de muestreo, por tanto, las concentraciones de cadmio son muy bajas y no son significativas en las muestras analizadas.

Los valores de Cadmio se encuentran por debajo del límite permisible (0,0050 mg/L) como podemos afirmar esto ya que el límite de detección del método es de 0,02 mg/L correspondiente a la clase A (aguas de consumo) en cuerpos de agua establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.2.3 Plomo (Pb)

Para la determinación de Plomo se empleó el método EPA 239.2 (Método Espectrofotométrico) y se elaboró una recta de calibración de 0,5; 1; 1,5; 2 y 2,5 mg/L, mismo que se presenta en la Figura 23.

Curva de Plomo

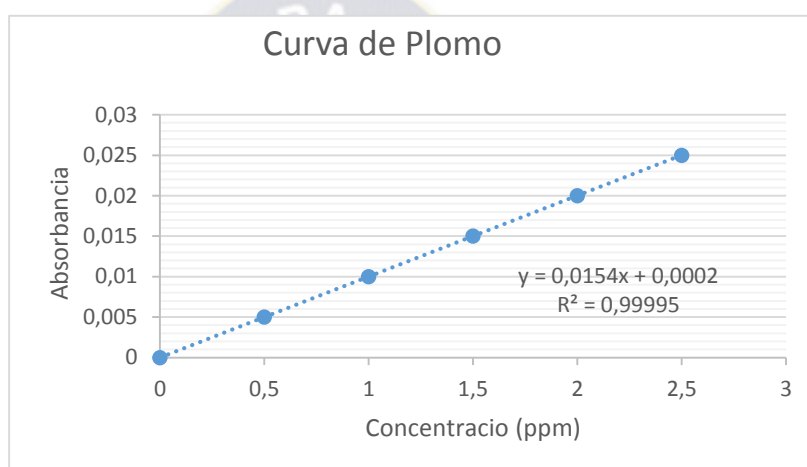


Figura 22. Curva de calibración para Plomo

Los resultados obtenidos en el análisis de Plomo en las muestras de aguas se presentan en la Tabla 21:

Puntos de muestreo	Plomo [$\mu\text{g/L}$]	Plomo [$\mu\text{g/L}$]
	Época seca	Época de transición
K1	8,150	2,245
K2	<2,0	9,620
K3	1,082	9,026
K4	71,740	6,857
K5	<2,0	3,679
K6	<2,0	3,914
K7	<2,0	-
K8	<2,0	3,777
K9	<2,0	-
K10	5,395	4,190
K11	<2,0	4,335
K13	<2,0	3,342
K14	42,410	32,950
K15	42,140	-

L.D. = 2,0 $\mu\text{g/L}$

Tabla 21. Resultados obtenidos en el análisis de Plomo en muestras de aguas

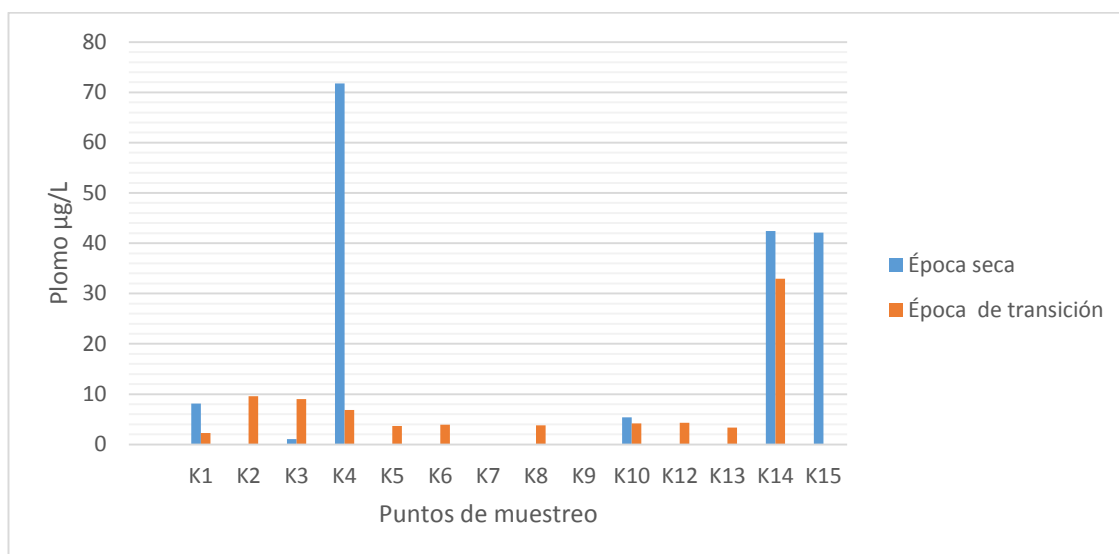


Figura 23. Descripción del comportamiento de Plomo en muestras de aguas.

En la Figura 24 se observa que en todos los puntos de muestreo se obtienen valores por debajo del límite de detección 2,0 µg/L K4; K14 y K15 tienen concentraciones de 71,740; 42,410; 42,140 µg/L.

Los valores de Plomo se encuentran por debajo del límite permisible correspondiente a la clase C (aguas residuales) en cuerpos de agua establecido por la norma boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.2.4. Cromo (Cr⁺³)

El análisis de Cromo trivalente (Cr⁺³) se empleó el método EPA 7190 (Método Espectrofotométrico).y se realizó una recta de calibración de 0,5 ; 1 ; 2 y 3 mg/L y mismo que se presenta en la Figura 25.

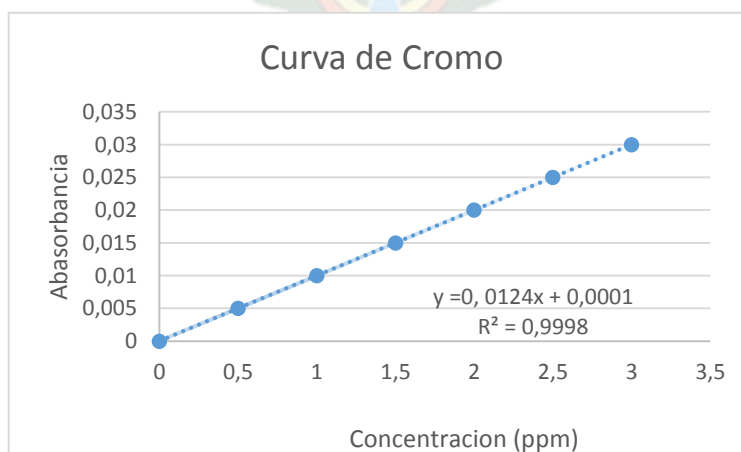


Figura 24. Curva de calibración para cromo III

Los resultados obtenidos en el análisis de Cromo (III) en aguas se muestran en la Tabla 22:

Tabla 22. Resultados obtenidos en el análisis de Cromo (Cr^{+3}) en muestras de agua.

puntos de muestreo	Cromo mg/L 1er muestreo	Cromo mg/L 2do muestreo
K1	< 0,050	< 0,050
K2	< 0,050	< 0,050
K3	< 0,050	< 0,050
K4	< 0,050	< 0,050
K5	< 0,050	< 0,050
K6	< 0,050	< 0,050
K7	< 0,050	-
K8	< 0,050	< 0,050
K9	< 0,050	-
K10	< 0,050	< 0,050
K11	< 0,050	< 0,050
K13	< 0,050	< 0,050
K14	< 0,050	< 0,050
K15	< 0,050	< 0,050

L.D. = 0,050 mg/L

Figura 25. Descripción del comportamiento de Cromo (Cr^{+3}) en muestras de agua.

En la Figura 26 se puede observar que no existe presencia de Cromo trivalente, se obtuvieron valores por debajo del límite de detección 0,050 mg/L con la técnica de Espectrofotometría de Absorción atómica con horno de grafito, concluyendo de esta manera que las concentraciones registradas de cromo trivalente no son detectadas en las muestras de aguas analizadas.

Los valores de Cromo trivalente se encuentran por debajo del límite permisible (0,60 mg/L) correspondiente a la clase C (aguas residuales) en cuerpos de agua establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.2.5. Hierro (Fe)

El Hierro se ha determinado por espectroscopia de absorción atómica con llama, empleando el método EPA 7381 (Método Espectrofotométrico), cuya curva de calibración se presenta en la Figura 27

Curva patrón del Hierro

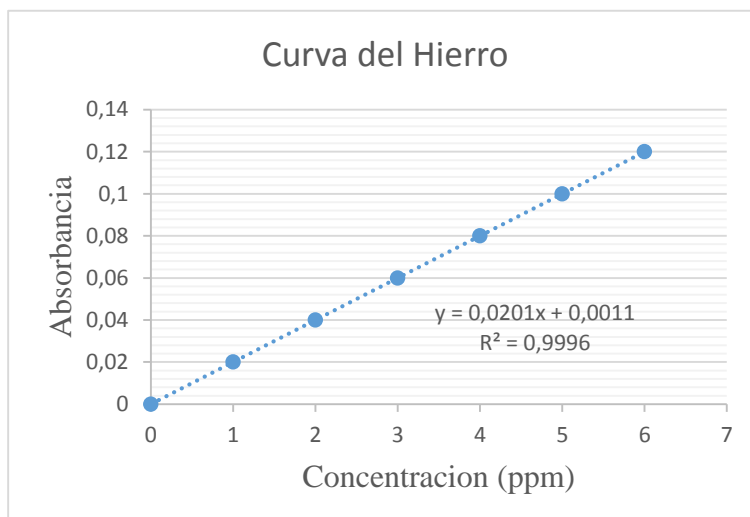


Figura 26. Curva de calibración para el Hierro

Los resultados obtenidos en el análisis de Hierro se muestran en la Tabla 23

Tabla 23 Resultados obtenidos en el análisis de hierro en muestras de agua

Puntos de muestreo	Hierro mg/L Época seca	Hierro mg/L Época de transición
K1	3,1145	< 0,050
K2	0,1438	1,259
K3	0,4147	4,242
K4	3,1145	1,988
K5	0,0816	0,069
K6	0,1010	0,218
K7	0,0856	-
K8	0,1097	0,163
K9	0,0908	-
K10	0,3439	1,288
K11	0,3949	1,137
K13	0,1215	0,563
K14	2,8325	0,548
K15	0,0816	-

L.D. = 0,050 mg/L

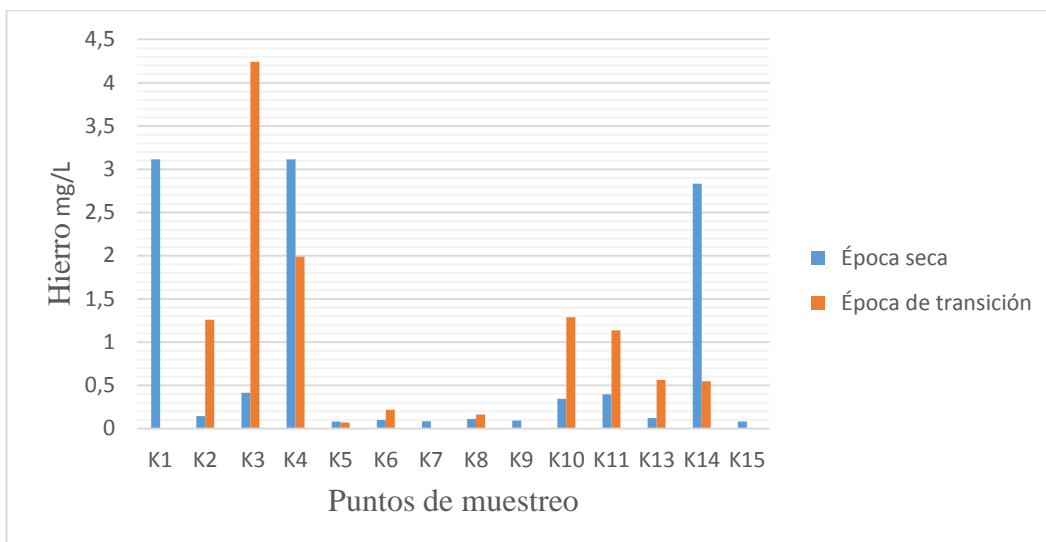


Figura 27. Comportamiento de Hierro en muestras de agua.

En la Figura 28 se observa la presencia de Hierro en todos los puntos de muestreo menos en los puntos K7, K9 y K15 (época de transición) porque no se tomó la muestra, en el punto K1 de la época de transición de muestreo se obtuvo valor por debajo del límite de detección (0,050 mg/L) determinado para el equipo de absorción atómica a llama. La concentración obtenida de Hierro no sobrepasa en once puntos de la época seca y cinco puntos de la época de transición el límite permisible (1,0 mg/L) correspondiente a la clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.2.6. Mercurio (Hg)

Los análisis de mercurio total en las muestras fueron realizados empleando un Espectrómetro de Absorción Atómica (PERKIN ELMER, 3110) usando la técnica FIAS (Flow Injection Automatic System).

Curva del mercurio

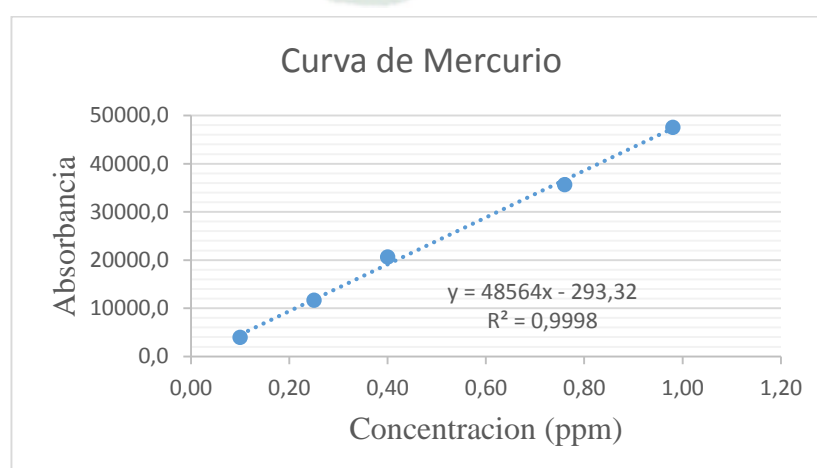


Figura 28. Curva de calibración para el Mercurio

Los resultados obtenidos en el análisis de Mercurio se presentan en la Tabla 24:

Tabla 24. Resultados obtenidos en el análisis de Mercurio en muestras de agua

Puntos de muestreo	Mercurio µg/L Época seca	Mercurio µg/L Época de transición
K1	< 0,2	<0,2
K2	< 0,2	< 0,2
K3	< 0,2	<0,2
K4	<0,2	<0,2
K5	<0,2	<0,2
K6	0,5321	0,4029
K7	<0,2	-
K8	<0,2	< 0,2
K9	<0,2	-
K10	0,4257	0,5347
K11	<0,2	< 0,2
K13	<0,2	< 0,2
K14	<0,2	< 0,2
K15	<0,2	-

L.D. = 0,2 µg/L

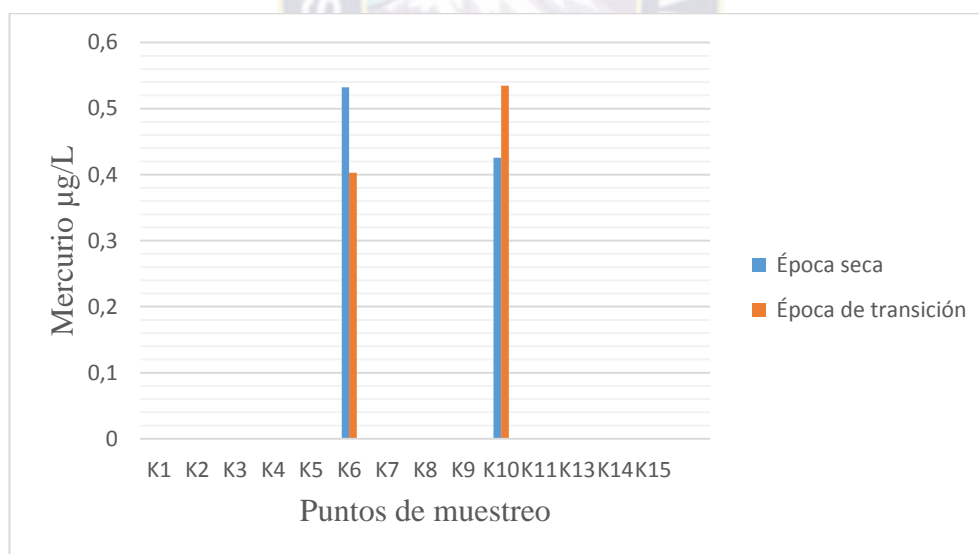


Figura 29. Descripción del comportamiento de mercurio en muestras de agua.

En la Figura 30 se observa la presencia de mercurio en dos puntos de muestreo K6 y K10, en los once puntos de muestreo se obtuvieron valores por debajo del límite de detección (0,2 µg/L) La concentración obtenida de mercurio no sobrepasa el límite permisible establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

4.3. Determinación de metales como nutrientes

4.3.1. Determinación de Calcio (Ca)

Para el análisis de este metal se realizó por espectroscopia de absorción atómica con llama empleando el método EPA 215.1 (Método Espectrofotométrico) elaborando una recta de calibración de 1, 2, 3, 4 y 5 mg/L mismo que se presenta en la Figura 31.

Curva de calcio

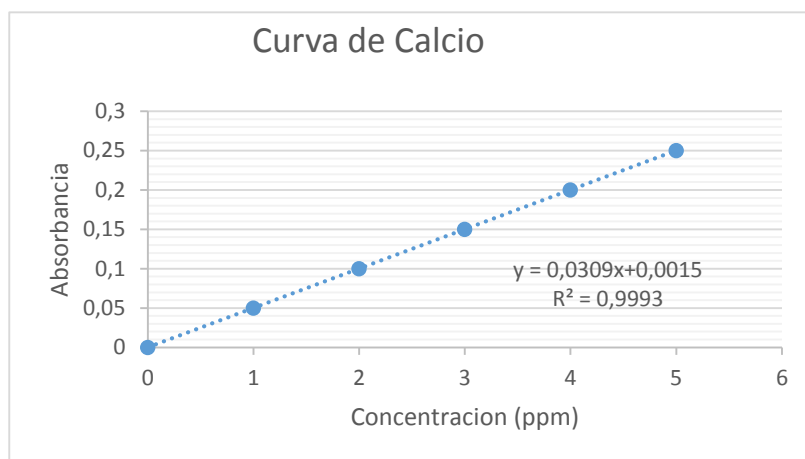


Figura 30. Curva de calibración para el Calcio.

Los resultados obtenidos en el análisis de Calcio en aguas se muestran en la Tabla 25:

Tabla 25. Resultados obtenidos en el análisis de Calcio en muestras de aguas.

Punto de muestreo	Calcio mg/L Época seca	Calcio mg/L Época de transición
K1	19,81	27,50
K2	42,32	53,43
K3	49,25	67,92
K4	59,75	73,93
K5	61,15	118,2
K6	105,1	105,4
K7	59,93	-
K8	47,23	50,2
K9	155,4	-
K10	40,89	25,33
K11	65,43	51,91
K13	19,88	40,19
K14	40,48	59,12
K15	40,16	-

L.D. = 0,32 mg/L

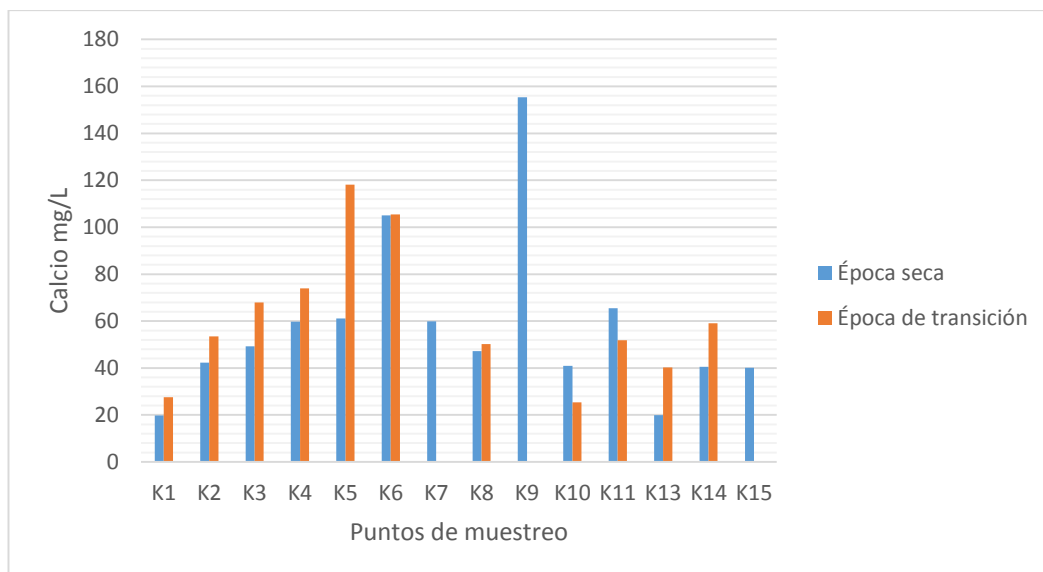


Figura 31 Descripción del comportamiento de Calcio en aguas.

En la Figura 32 se puede observar que existe presencia de calcio en aguas en todos los puntos de muestreo, que se encuentran comprendidos entre 19,81 mg/L a 155,4 mg/L (época seca) y 25,33 mg/L a 118,2 mg/L (época de transición). La concentración más elevada de Calcio se encuentra en los puntos K9 y K5 con un valor máximo de 155,4 mg/L y 118,2 mg/L. Todas las Concentraciones obtenidas se encuentran por encima del límite de detección (0,32 mg/L) determinado por la técnica de Espectroscopia de Absorción a llama. Estas Concentraciones de Calcio encontradas como nutrientes son buenas no causan daño a la salud, pero si contribuyen al crecimiento de materia orgánica favoreciendo así a la eutrofización.

Se realizó una comparación de las Concentraciones obtenidas con el límite permisible (300 mg/L) correspondiente a la clase C (aguas residuales) en cuerpos de agua establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333 por lo que se concluye que no sobrepasan el límite establecido.

4.3.2 Magnesio (Mg)

Para la determinación de este metal se empleó el método EPA 242.1 (Método Espectrofotométrico) se realizó una recta de calibración de 0,25; 0,50; 0,25; 0,75; 1,0 ; 1,25 y 1,50 mg/L mismo que se presenta en la Figura 33.

Curva de magnesio

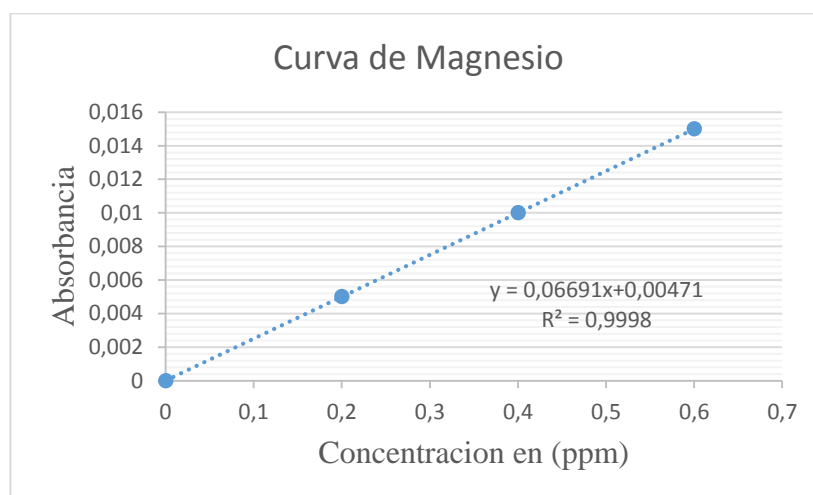


Figura 32. Curva de calibración para el Magnesio.

Los resultados obtenidos en el análisis de Mg en aguas se presentan en la tabla 26:

Tabla 26. Resultados obtenidos en el análisis de Magnesio en muestras de aguas.

Punto de muestreo	Magnesio mg/L Época seca	Magnesio mg/L Época de transición
K1	9,6	15,55
K2	14,77	22,33
K3	14,77	22,66
K4	14,1	21,18
K5	10,29	32,49
K6	17,74	22,57
K7	9,499	-
K8	4,527	11,45
K9	79,54	-
K10	13,35	10,37
K11	17,49	15,67
K13	4,922	4,414
K14	18,12	27,37
K15	20,25	-

L.D. = 0,18 mg/L

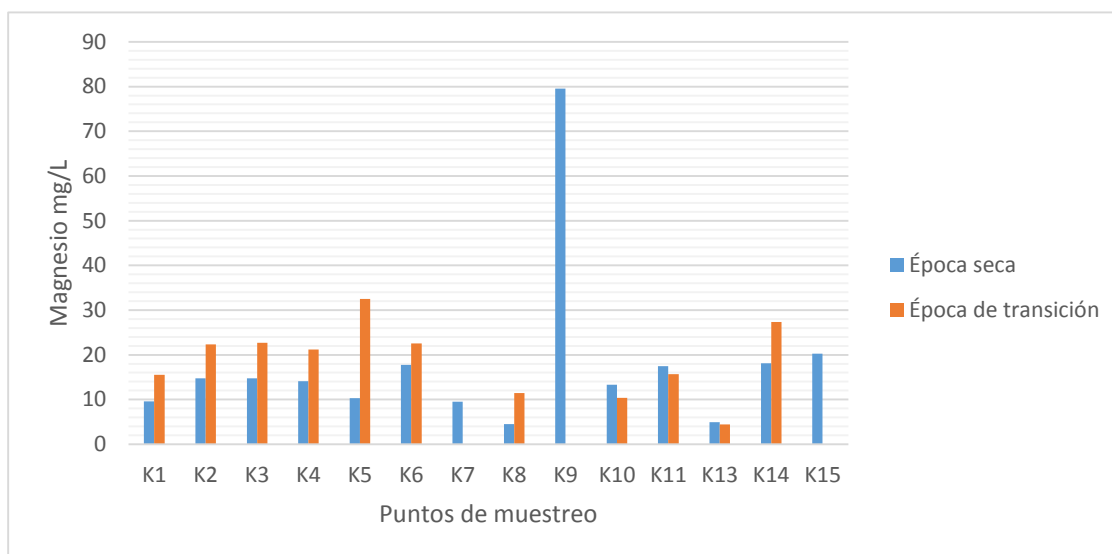


Figura 33. Descripción del comportamiento de Magnesio en aguas.

En la Figura 34 se puede observar que todos los puntos de muestreo presentan Concentraciones de Magnesio, teniendo un rango comprendido entre 9,6 mg/L a 79,54 mg/L. La concentración más elevada se encuentra en el punto K9 con un valor de 79,54 mg/L debido a que en este lugar se encuentra una de las corrientes de entrada hacia el río wilake.

Las Concentraciones de Magnesio están por encima del límite de detección (0,18 mg/L) y se encuentran por debajo del límite permisible (150 mg/L) correspondiente a la clase C (aguas residuales) establecido por la Norma Boliviana ley de Medio Ambiente 1333.

Conclusiones y recomendaciones

5.1. Conclusiones

A partir del estudio realizado en el río Katari del Departamento de La Paz, se ha identificado catorce puntos principales de muestreo susceptibles de contaminación antropogénica y natural.

Los resultados del trabajo de campo, fueron comparados con los límites permisibles del Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica (RMCH) de la ley de Medio Ambiente N° 1333, evidenciándose que el Río Katari presenta en la mayoría de los puntos, concentraciones de oxígeno disuelto (OD) menores al valor mínimo establecidos por la Norma de Estados Unidos Agencia de Protección Ambiental (EPA).

Por otro lado, la descarga del río Katari a la Bahía de Cohana varía de acuerdo a la clasificación de cuerpos de Clase C a Clase D, según la época del año, ocasionando indistintamente su eutrofización,

Los mayores contenidos de As en la época de transición se presentan en el punto K3 (Rio Pallina) y K13 (Milluni), a comparación con la época seca, presentan aproximadamente el doble de concentración esto se debe a la recargas y descargas de los acuíferos a causa de rocas geológicas, infiltraciones del agua de lluvia y ríos.

Las concentraciones del metal Pb, se presentan de forma mayoritaria en el punto K4 (época seca) y K14 (época seca y transición) esta presencia de Pb se puede relacionar con la erosión de los suelos.

Respecto a la presencia de Fe, el Rio Pallina y el Rio Wilaque se caracterizan por presentar concentraciones muy altas de Fe. Realizando una comparación de ambas épocas se observa que en el Punto K1 (época seca) y K3 (época de transición) presentan valores elevados de hierro debido a la presencia de grandes cantidades de arcillas en el sector (silico aluminatos de hierro).

La concentración de los metales Cr y Cd en los diferentes puntos de muestreo están por debajo del límite permisible, Se aprecia su disminución debido a la precipitación de los mismos. En cuanto al Hg, se encuentra por encima del límite permisible en K6

y K10 que es producido por industrias químicas que producen cloro, fábricas de fungicidas y pinturas. Ej: industria textil y papelera.

En cuanto a los análisis fisicoquímicos en muestras de aguas los valores de Conductividad, pH en algunos puntos sobrepasan el límite permisible, establecido por la Norma Boliviana de Medio Ambiente ley 1333. Los valores de sólidos totales, Nitrógeno total, Fósforo total, Alcalinidad total, Sulfatos y Nitratos en muestras de aguas también sobrepasan en algunos puntos como K3, K4 Y K11 los límites establecidos por la Norma Boliviana de Medio Ambiente ley 1333. En tanto los valores de Demanda Bioquímica de Oxígeno y Demanda Química de Oxígeno sobrepasan los límites permisibles DBO-5 elevados niveles de contaminación por materia orgánica biodegradable (DBO-5), con valores superiores al Límite Permisible correspondiente a la clasificación de cuerpos de agua de la Clase D que implica que no es apta para consumo humano.

5.2. Recomendaciones

Con el propósito de reducir la contaminación existente en la cuenca del Río Katari se pone a consideración las siguientes recomendaciones:

Realizar capacitación a todos los funcionarios de las industrias medianas y pequeñas sobre las formas de reducir el impacto contaminante de sus desechos disminuyendo de esta manera la contaminación de los ríos que desembocan al río Pallina y Katari.

Realizar campañas para concientizar a la población de la ciudad de El Alto para evitar que sigan eliminando sus desechos a los ríos que desembocan al Katari y se tomen medidas preventivas de tratamiento de aguas.

Realizar limpieza exhaustiva en los ríos Pallina y Katari.

Implementar nuevas plantas de tratamiento de aguas residuales domésticas e industriales en poblaciones cercanas al lago Menor del lago Titicaca, puesto que la planta actual de P'uchukollo no cumple a plenitud con el objetivo de realizar un tratamiento eficiente de aguas residuales.

Implementar un software de control para metales pesados en las plantas de tratamiento de aguas residuales para verificar las Concentraciones de metales que contienen.

Analizar metales pesados bioacumulables como el Arsénico, Cadmio, Mercurio, Plomo y Cromo trivalente que podrían concentrarse en la carne de ganado bovino.

Realizar un monitoreo de control para metales pesados en el trayecto de los ríos Pallina y Katari.

Se recomienda a las autoridades pertinentes de la región a comprometerse a la mejora de las aguas del lago Titicaca.

5.3. Bibliografía

Andrade & Ponce. (2016). Determinación de los metales pesados. Obtenido de Escuela Superior Politécnica Agropecuaria de Manavi Felix Lopez: <http://repositorio.espam.edu.ec/handle/42000/283>.

Archundia. D., C. Duwing, L. Spadini, G. Uzu, S. Guedros, M.C. Morel, R. Cortez, O. Ramos Ramos, J. Chincheros & J.M.F. Martins. 2016. How uncontrolled urban expansion increases the contamination of the Titicaca Lake Basin (El Alto, La Paz, Bolivia). *Water, Air & Soil Pollution* 44(228): 1-17.

Beyersman Cornelis, R. Nordberg. (2007). Agencia para Sustancias Tóxicas y el Registro de Enfermedades. ATSD.

BID. (2016). Programa de saneamiento del Lago Titicaca (Cuenca Katari, Bahía de Cohana), análisis ambiental y social (AAS). En (. I. Desarrollo). La Paz .

Cornelis, R. Nordberg. (2007). General Chemistry, Sampling, Analytical. En *Handbook on the toxicology of metals*. (págs. 29-35).

Cousillas, A. (2017). Informe toxicológico de la contaminación del agua. Obtenido de [http://cedoc.infod.edu.ar/upload/Informe_Toxicologico_agua_adriana_cousillas .pdf](http://cedoc.infod.edu.ar/upload/Informe_Toxicologico_agua_adriana_cousillas.pdf) (s.f.).

Coyla, U.(2014). Mercurio contaminante ambiental. Diapositiva (s.f.).

Dekker M. (1992). *Toxic metal chemistry in marine environments*. New York USA.

Elementos. tabla periódica ordenados por su densidad en g/cm³. Obtenido de <http://www.lenntech.es/tabla-peiodica/densidad.htm> (s.f.).

- EPA. (1997). *Methods for Water Analysis*. United States Environmental Protection Agency.
- FCEA, fs. (2007). Fondo para la Comunicación y la Educación Ambiental. Obtenido de Contaminación del agua por metales: <http://www.agua.org.mx/biblioteca-tematica/agua-y/agua-y-salud/1291-saneamiento-basico/3218-contaminacion-del-agua-por-metales> (s.f.).
- GreenFacts. (2001). Compuestos inorganicos del Arsenico. Obtenido de <https://www.greenfacts.org/es/glosario/abc/compuestos-inorganicos-arsenico.htm>
- IIS. (2013). valoración de metales en la cuenca de río katari y su impacto en la calidad de vida del area de influencia. LaPaz-Bolivia, Bolivia: UMSA.
- Ley N°1333. (1992). Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente Secretaria Nacional de Recursos Naturales y Naturales y Medio Ambiente Decreto N° 24176. Reglamento en Materia de Contaminación Hidrica.
- LIDEMA. (2012). Liga de Defensa del Medio Ambiente. En Problemas socio ambientales de la Bahía de Cochabamba. Informe no publicado (pág. 23). La Paz.
- MMAyA/VRHR. (2016). Plan de manejo preliminar de los acuíferos de Purapurani y Viacha Informe no publicado. En M. d. Agua, Viceministerio de Recursos Hídricos y Riego (pág. 184). La Paz.
- Molina Montoya, N. e. (2010). Plomo sus efectos sobre la salud humana. Obtenido de <file:///C:/Users/NetGeo/Downloads/Dialnet-PlomoCromoIIIYCromoVIYSusEfectosSobreLaSaludHumana-5599145.pdf>
- Monroy et al. (2014). En Metal concentration in water, sediment and four fish species from Lake Titicaca reveals a large-scale environmental concern, Department of Animal Biology and Biodiversity Research Institute, university of Bar.
- OMS. (2016). Obtenido de <https://www.paho.org/annual-report-2016/Espanol.html>
- ONU. (2014). Decenio Internacional para la acción "El agua fuente de vida". Obtenido de *REVISTA CENIC*. (2013): <http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/quality.shtml>

- Oyarzun R. & Higuera P. (2007). Minerales, metales, compuestos químicos, y seres vivos. Obtenido de <http://www.uclm.es/users/higuera/mam/MAM7>
- Oyarzun, R. (2007). Minerales, metales, compuestos químicos, y seres vivos. Obtenido de <http://www.uclm.es/users/higuera/mam7>
- Reboratti, C. (2001). Una cuestión de escala: sociedad, ambiente, tiempo y territorio. En Sociologías (págs. 80-93). 5, p.
- Reboratti, C. (2001). Una cuestión de escala: sociedad, ambiente, tiempo y territorio. En Sociologías. 5,p.
- Rosas H. (2001). Estudio de la contaminación por metales pesados en la cuenca del Llobregat. Obtenido de Universitat Politècnica de Catalunya: <http://www.tesisenred.net/bitstream/handle/10803/6978/02INTRODUCCION.pdf?sequence=2>
- Salvarredy-Aranguren et al. (2008). Contamination of surface waters by mining wastes in the Milluni Valley. En A. P.-P. M., Mineralogical and hydrological influences (págs. 1299-1324). Cordillera Real, Bolivia: Applied Geochemistry (23).
- SMW. (1998). Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 19th. Edition.
- Toral-Ferreó. (1996). Estudio comparativo de esquemas de especiación en muestras sólidas de interés medio ambiental. En Trabajo de Valladolid. España.
- Uniplom. (2004). El Plomo Hechos y realidades. Obtenido de Fuentes, niveles y desplazamientos del plomo en el medio ambiente: <http://www.uniplom.es/fuentes.htm>.

Anexos

6.1. Anexo 1 Valores máximos admisibles de parámetros en cuerpos de agua

N°	Parámetros	Unidad	Cancerígenos	Clase A	Clase B	Clase C	Clase D
1	pH		NO	6,0 a 8,5	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0	6,0 a 9,0
2	Temperatura	°C		±3°C de c. receptor	±3°C de c. receptor	±3°C de c. receptor	±3°C de c. receptor
3	Sólidos totales disueltos	mg/L		1000	1000	1500	1500
4	Aceites y grasas	mg/L	NO	Ausentes	Ausentes	0,3	1
5	DBO5	mg/L	NO	<2	<5	<20	<30
6	DQO	mg/L	NO	<5	<10	<40	<60
7	NMP Colifecales NMP	N/100 ml	NO	<50y<5 en 80% de muestras	<1000y<200 en 80% de muestras	<5000y<1000 en 80% de muestras	<50000y<5000 en 80% de muestras
8	Oxígeno Disuelto	mg/L	NO	>80% sat	>70% sat.	>60% sat.	>50% sat.
9	Turbidez	UNT	NO	<10	<50	<100- <2000***	<200- <1000***
10	Amoniaco	mg/L	NO	0.05 c. NH	1.0 c. NH	2 c. NH	4 c. NH
11	Arsénico total	mg/L	Si	0.05 As	0.05 As	0.05 As	0.1As
12	Calcio	mg/L	NO	200	300	300	300
13	Cadmio	mg/L	NO	0.005	0.005	0.005	0.005
14	Cianuros	mg/L	NO	0.002	0.1	0.2	0.2
15	Cloruros	mg/L	NO	250 c. Cl	300 c. Cl	300 c. Cl	400 c. Cl
16	Cobre	mg/L	NO	0.05 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu	1.0 c. Cu
17	Magnesio	mg/L	NO	100 c.Mg	100 c.Mg	150 c.Mg	150 c.Mg
18	Manganeso	mg/L	NO	0.5 c.Mn	1.0 c.Mn	1.0 c.Mn	1.0 c.Mn
19	Mercurio	mg/L	NO	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg	0.001 Hg
20	Níquel	mg/L	Si	0.05 c Ni	0.05 c Ni	0.5 c Ni	0.5 c Ni
21	Nitrato	mg/L	NO	20.0 c. NO3	50.0 c. NO3	50.0 c. NO3	50.0 c. NO3
22	Nitrito	mg/L	NO	<1.0 c. N	<1.0 c. N	<1.0 c. N	<1.0 c. N
23	Nitrógeno Total	mg/L	NO	5 c. N	12c. N	12c. N	12c. N
24	Plomo	mg/L	NO	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.05 c. Pb	0.01 c. Pb
25	Sulfatos	mg/L	NO	300 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4	400 c. SO4
26	Zinc	mg/L	NO	0.2 c. Zn	0.2 c. Zn	5.0 c. Zn	5.0 c. Zn

Fuente: Reglamento a la Ley del medio ambiente 1333

6.2 Anexo 2. Descripción de la metodología de cada parámetro determinado

Descripción de la metodología de cada parámetro de metales pesados y físico-químico para obtener los resultados.

pH método EPA 150,1 (Método Electrométrico).

Se calibro el pHmetro con soluciones Buffer de 4, 7 y 10, para luego poder registrar el valor del pH. Las muestras deben estar a temperatura ambiente, se realizó directamente en los frascos de muestreo.

Conductividad Eléctrica C.E. (EPA 120.1)

Para la lectura C.E. se utilizó el método electrométrico, el procedimiento se describe a continuación: Calibrar el equipo con soluciones de KCl de 146,9 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 1412 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 12.89 mS/cm . Trasvasar las muestras a un vaso de precipitados Las muestras deben estar a temperatura ambiente. Leer las muestras con el conductímetro.

Sólidos totales EPA 160.3 método gravimétrico

Los procedimientos para determinar los sólidos totales se detallan a continuación:

Pesar las cápsulas de cerámica.

Medir 100 mL de muestra y trasvasarlo a las cápsulas.

Dejar las cápsulas en baño María hasta que las cápsulas estén secas.

Llevar a estufa a 100 °C.

Enfriar en el desecador.

Pesar las cápsulas

Sólidos Suspendidos (EPA 160.2)

Para determinar los Sólidos Suspendidos en las muestras se detalla a continuación:

Pesar los filtros de fibra de vidrio 72

Filtrar 100 mL de las muestras. Colocar los filtros en un vidrio de reloj y llevarlas a la estufa a 105°C hasta peso constante

Enfriar en el desecador. Pesar los filtros

Sólidos Disueltos (EPA 160.1)

Para determinar los Sólidos Disueltos en las muestras se detalla a continuación:

Pesar las cápsulas de cerámica Filtrar 100 mL de las muestras y trasvasarlo a las capsulas. Colocar las capsulas a baño maría hasta la evaporación de todo el liquido

Llevar a la estufa a 105 °C hasta peso constante

Enfriar en el desecador y pesar las capsulas

Nitrógeno Total EPA 351.1 (Método titulométrico)

Agitar la muestra y tomar un volumen de 50 mL.

Agregar 5 mL de ácido sulfúrico concentrado y catalizador de Selenio.

Digerir durante 2 horas en una rampa de temperatura comprendida de 140 °C a 370 °C. 4) Destilar en el equipo Kjeldahl y recibir el destilado en matraces Erlenmeyer de 300 mL con indicador mixto.

Valorar con ácido sulfúrico 0,01206 N.

Registrar el volumen gastado de ácido sulfúrico.

Realizar los cálculos correspondientes.

Fósforo Total EPA 365.2 (Método Molibdavanadato)

Tomar una alícuota de 100 mL de muestra sin filtrar y colocar en un matraz Erlenmeyer de 300 mL, añadir 1 mL de ácido sulfúrico concentrado y 5 mL de ácido nítrico concentrado.

Calentar en baño de arena hasta que desprenda vapores blancos.

Lavar con un poco de agua bidestilada y añadir gotas de indicador fenolftaleína y neutralizar con hidróxido de sodio 10 N hasta color rosado.

Acidificar con ácido sulfúrico 5 N hasta desaparecer el color rosado.

Filtrar (papel filtro 0,45 µm) y trasvasar a matraces aforados de 50 mL.

Añadir 8 mL de solución reveladora a los aforados y completar el aforo.

Preparar la curva patrón de 1 ppm, 2 ppm, 3 ppm, 4 ppm 5 ppm y 6 ppm.

Esperar 10 min para que la solución tome un color azul y leer en el equipo espectrofotométrico UV/VIS a 720 nm.

Demanda bioquímica de oxígeno DBO-5 EPA 405.1

(Método Oxígeno inicial – oxígeno final Winkler test de 5 días). La metodología se detalla a continuación:

Añadir al frasco Winkler un volumen de 50 mL a 100 mL (según la turbidez) de muestra sin filtrar.

Preparar 2 L de agua potable de grifo y otra botella que contenga agua de río hacer burbujear durante 1 h para retener el oxígeno.

Adicionar 2 mL de Cloruro de Bario, 2 mL de Cloruro Férrico, 2 mL de Sulfato de Magnesio, 2 mL de Buffer y 10 mL de agua de río a un matraz de 2 L.

Agregar la mezcla preparada a los frascos Winkler.

Leer con el equipo multiparamétrico el oxígeno inicial, completar el volumen hasta el rebalse y tapar.

Llevar los frascos winkler a la incubadora marca Ecocell a una temperatura de 20 °C.

Volver a leer los valores de oxígeno final después de cinco días.

Demanda química de oxígeno SM 5220-C

(Método titulométrico). El procedimiento se describe a continuación:

Medir 2,5 mL de muestra filtrada y ponerlos en tubos de 10 mL.

Añadir 1,5 mL de reactivo de dicromato de potasio 0,2085 N (sulfato de mercurio, dicromato de potasio y ácido sulfúrico).

Agregar 3,5 mL de sulfato de plata al 1%.

Digerir durante 2 h a 150 °C.

Añadir ml de indicador

Valorar con sulfato ferroso 0,025 N

Determinación de nitratos (NO_3^-) SM 4500-NO3-B

(Método Espectrofotométrico UV/VIS). El procedimiento de análisis se detalla a continuación:

Preparar la curva patrón de Concentraciones: 0,5 ppm, 2,5 ppm, 5,0 ppm, 10,0 ppm y 15,0 ppm.

De las muestras filtradas sacar alícuotas de 10 mL y llevar a los matraces aforados de 10 mL.

Añadir 0,2 mL de ácido clorhídrico 1N.

Llenar en cubetas de cuarzo previamente lavadas en solución sulfocrómica.

Leer en el equipo de espectrofotométrico UV/VIS marca Cary 1E a 220 nm.

Determinación de alcalinidad total EPA 310.1

(Método titulométrico). El procedimiento desarrollado se describe a continuación:

Medir 50 mL de muestra de agua sin filtrar e introducir en matraces Erlenmeyer de 300 mL.

Adicionar 1 mL de indicador mixto (verde de bromocresol y rojo de metilo) y controlar el pH, si el pH > 7 existe alcalinidad caso contrario solo existe acidez.

Valorar con ácido clorhídrico 0,01 N.

Determinación de sulfatos SM 4500-SO₄²⁻ E

(Método Turbidimétrico). La metodología se detalla a continuación:

Tomar 20 mL de la muestra sin filtrar y llevarlos a Erlenmeyer de 125 mL.

Adicionar 20 mL de agua mili-Q.

Añadir 10 mL de buffer.

Agregar cloruro de bario aproximadamente 2 mg.

Agitar con la ayuda de un agitador magnético durante un minuto para formar el sulfato de bario.

Llevar al equipo turbidímetro marca Aqua Lytic modelo AL 1000.

Registrar los valores reportados.

Descripción de la metodología de los parámetros para metales pesados

Determinación de Arsénico EPA 206.2

(Método Espectrofotométrico) Para la determinación Arsénico se preparó una recta de calibración de 10 ppb, 20 ppb, 40 ppb, 80 ppb y 100 ppb. El procedimiento se detalla a continuación:

Encender el equipo de Absorción Atómica de horno grafito.

Abrir las válvulas de los gases de Argón y Oxígeno.

Abrir el programa del equipo Winlab 32 for AA.

Esperar a que el programa reconozca el equipo.

Elegir el Workspace del metal, en este caso Arsénico.

Encender la lámpara de alta intensidad de descarga sin electrodo de Arsénico y esperar a que el nivel de energía suba a 50 %. La lámpara es de tipo C-EDL.

Poner en los cups de 1,2 mL el blanco de reactivo, la curva patrón de Arsénico, el blanco de digestión, las muestras, la referencia y los modificadores de Plomo y molibdato de Magnesio.

Realizar la curva, si la curva obtiene tres nueves en el valor de coeficiente de correlación se acepta en caso contrario volver a repetir la curva.

Leer las muestras con su blanco de digestión y su respectiva referencia. Para la atomización de las muestras en horno grafito la temperatura llega a 2200 °C.

Determinación de Cadmio EPA 213.1

(Método Espectrofotométrico) En el análisis de Cadmio se preparó una recta de calibración de 0.1 mg/L, 0.2 mg/L, 0.3 mg/L, 0.4 mg/L y 0.5 mg/L. La metodología se describe a continuación:

Encender el equipo de Absorción Atómica de horno de grafito.

Abrir las válvulas de los gases de Acetileno y Oxígeno.

Abrir el programa del equipo AA Winlab Analyst.

Esperar a que el programa reconozca el equipo.

Elegir el Workspace del metal, en este caso Cadmio.

Encender la lámpara de cátodo hueco de Cadmio. La lámpara es de tipo HCl.

Ajustar la alineación de la lámpara con las perillas del equipo hasta que el nivel de energía suba a 50 %.

En Continuous Graphics ajustar la absorbancia a cero.

Realizar la línea base con el blanco de reactivo (ácido nítrico 0,2%).

Realizar la curva, si la curva obtiene tres nueves en el valor de coeficiente de correlación se acepta en caso contrario volver a repetir la curva.

Leer las muestras directamente en los tubos de 14 mL con el blanco de digestión y su respectiva referencia. Para la atomización de las muestras en llama la temperatura llega a 3600 °C.

Determinación de Plomo EPA 239.2

(Método Espectrofotométrico) Para la determinación de Plomo se realizó una recta de calibración de 0.5 mg/L, 1 mg/L, 1.5 mg/L y 2 mg/L. los pasos que se siguieron son los siguientes:

Encender el equipo de Absorción Atómica de horno de grafito.

Abrir las válvulas de los gases de Acetileno y Oxígeno.

Abrir el programa del equipo AA Winlab Analyst.

Esperar a que el programa reconozca el equipo.

Elegir el Workspace del metal, en este caso Plomo.

Encender la lámpara de cátodo hueco de Plomo. La lámpara es de tipo HCl.

Ajustar la alineación de la lámpara con las perillas del equipo hasta que el nivel de energía suba a 50 %.

En Continuous Graphics ajustar la absorbancia a cero.

Realizar la línea base con el blanco de reactivo (ácido nítrico 0,2%).

Realizar la curva, si la curva obtiene tres nueves en el valor de coeficiente de correlación se acepta en caso contrario volver a repetir la curva.

Leer las muestras directamente en los tubos de 14 mL con su blanco de digestión y su respectiva referencia. Para la atomización de las muestras en llama la temperatura llega a 3600 °C.

Determinación de cromo trivalente EPA 7190

(Método Espectrofotométrico) En el análisis de Cromo trivalente (Cr^{+3}) se realizó una recta de calibración de 0.5 mg/L, 1 mg/L, 2 mg/L y 3 mg/L. la técnica se explica a continuación:

Encender el equipo de Absorción Atómica con horno de grafito.

Abrir las válvulas de los gases de Acetileno y Oxígeno.

Abrir el programa del equipo AA Winlab Analyst.

Esperar a que el programa reconozca el equipo.

Elegir el Workspace del metal, en este caso Cromo.

Encender la lámpara de cátodo hueco de Cromo. La lámpara es de tipo HCl.

Ajustar la alineación de la lámpara con las perillas del equipo hasta que el nivel de energía suba a 50 %.

Ajustar la llama reductora (llama de color verde) con las perillas de Fuel y Oxidant.

En Continuous Graphics ajustar la absorbancia a cero.

Realizar la línea base con el blanco de reactivo (ácido nítrico 0,2%).

Realizar la curva, si la curva obtiene tres nueves en el valor de coeficiente de correlación se acepta en caso contrario volver a repetir la curva.

Leer las muestras directamente en los tubos de 14 mL con su blanco de digestión y su respectiva referencia. Para la atomización de las muestras en llama la temperatura llega a 3600 °C.

Mercurio

Los análisis de mercurio total en las muestras fueron realizados por medio de un Espectrómetro de Absorción Atómica (PERKIN ELMER, 3110) usando la técnica FIAS (Flow Injection Automatic System). Este equipo pertenece al Laboratorio de Calidad Ambiental del Instituto de Ecología de la carrera de Biología de la UMSA. El espectrómetro tiene una sensibilidad de 0,001 µg/L y límite detectable de 0,2 µg/L. Se preparó una recta de calibración de 0,10 µg/L, 0,25 µg/L, 0,40 µg/L, 0,77 µg/L y 0,98 µg/L.

Hierro EPA 7381

(Método Espectrofotométrico) En la determinación del metal Hierro se preparó una recta de calibración de 0.10 mg/L, 0.25 mg/L, 0.50 mg/L, 0.75 mg/L, 1.00 mg/L, 1.25 mg/L, 1.50 mg/L. A continuación, se detalla los pasos de la metodología empleada:

Encender el equipo de Absorción Atómica a llama.

Abrir las válvulas de los gases de Acetileno y Oxígeno.

Abrir el programa del equipo AA Winlab Analyst.

Esperar a que el programa reconozca el equipo.

Elegir el Workspace del metal, en este caso Hierro.

Encender la lámpara de cátodo hueco de Hierro. La lámpara es de tipo HCl.

Ajustar la alineación de la lámpara con las perillas del equipo hasta que el nivel de energía suba a 50 %.

En Continuous Graphics ajustar la absorbancia a cero.

Realizar la línea base con el blanco de reactivo (ácido nítrico 0,2%).

Realizar la curva, si la curva obtiene tres nueves en el valor de coeficiente de correlación se acepta en caso contrario volver a repetir la curva.

Leer las muestras directamente en los tubos de 14 mL con su blanco de digestión y su respectiva referencia. Para la atomización de las muestras en llama la temperatura llega a 3600 °C.