

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



**“EVALUACIÓN DE PARÁMETROS FÍSICOQUÍMICOS
EN AGUAS SUBTERRÁNEAS Y TRATADAS
EN LA EMPRESA ELVIMAR S.R.L.”**

MONOGRAFÍA
PARA OBTENER EL
TÍTULO DE LICENCIATURA EN CIENCIAS QUÍMICAS:

Postulante: *Heide Geovana Quispe Quelca*

Tutores: *Lic. Jorge Quintanilla*
Dra. Ma. Eugenia García

Tribunal: *M.Sc. Juan Carlos Santelices*

La Paz – Bolivia
2012

Dedicatoria

A mi familia y amigos

A mi papá y mamá.

A mí querida hermana Lucésita.

A mis amiguitos de la U.

Agradecimientos

Expresar mi agradecimiento a la empresa ELVIMAR S.R.L. por abrirme las puertas de su institución para la realización del presente trabajo. En especial, al Lic. Gustavo García por su apoyo incondicional en la empresa, muchas gracias.

Agradecer a mi tutor, Lic. Jorge Quintanilla por la oportunidad de realizar este trabajo bajo su apoyo en el laboratorio de Hidroquímica y por sus correcciones oportunas para la culminación de la monografía.

Expresar mi agradecimiento a la Dra. María Eugenia García por su guía constante en todos estos meses, por las sugerencias vertidas para la realización de la monografía.

Mi agradecimiento al M. Sc. Juan Carlos Santelices por el tiempo dedicado a la revisión del presente trabajo, muchísimas gracias.

Agradecer a las personas que me colaboraron en los laboratorios de Hidroquímica y Química Ambiental de la carrera de Ciencias Químicas. A la Lic. Maritza Mercado por todo su apoyo y paciencia, y al Lic. Oswaldo Ramos por su colaboración en Absorción Atómica.

Siempre tendré muy buenos recuerdos de todos mis amigos de la universidad, en particular de Rychard, Jorge, Vero, Neyda, María Dina, Tania, Jannet, Mauricio, Raúl, Erick, Manuel, Franz, Alan, Huascar, Edu, Peter y Marcelo, con los que he pasado grandes momentos tanto dentro como fuera de la U. Tampoco quiero olvidar a los amigos que recién voy conociendo Marco, Jose, Silvia, Fannia y a todos del wally. A todos ellos les agradezco porque podemos sonreír. A cada uno GRACIAS y no sólo por brindarme su amistad sino también por ese GRAN recuerdo que me llevo de ustedes.

Agradezco de todo corazón a mis padres por su apoyo incondicional, tanto en los buenos como en los no tan buenos momentos y la confianza que siempre han tenido para conmigo.

Gracias a mi hermana Luz por todos los momentos compartidos, pensamientos, sueños y anhelos, secretos, risas y lágrimas, y sobre todo AMISTAD. Cada preciado segundo quedará atesorado eternamente en mi corazón.

Muchisimas gracias Lucesito, Peter y Marcelo.

INDICE

Dedicatoria.....	i
Agradecimientos.....	ii
Resumen.....	vii

I. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS..... 1

1.1 Introducción.....	2
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo General.....	4
1.2.2 Objetivos Específicos.....	4

II. ANTECEDENTES..... 5

2.1. Agua en nuestro planeta.....	6
2.1.1 Ciclo hidrológico.....	7
2.2. Aguas subterráneas.....	9
2.2.1 Distribución del agua en el subsuelo.....	10
2.2.2 Procedencia.....	13
2.2.3 Uso.....	14
2.2.4 Importancia.....	16
2.2.5 Legislación de recursos hídricos en Bolivia.....	17
2.2.6 Aguas subterráneas en Bolivia.....	20
2.3. Naturaleza química del agua subterránea.....	22
2.3.1. Propiedades físicas del agua.....	24
2.3.1. a. Turbidez.....	24
2.3.1. b. Color.....	25
2.3.1. c. Olor y Sabor.....	26
2.3.1. d. Temperatura.....	26
2.3.1. e. Conductividad Eléctrica Específica.....	27

2.3.1. f. Sólidos totales.....	27
2.3.2. Propiedades Químicas del agua.....	27
2.3.2. a. Dureza.....	27
2.3.2. b. Sólidos totales disueltos (STD).....	28
2.3.2. c. Alcalinidad.....	29
2.3.2. d. Acidez.....	29
2.3.2. e. Potencial de Hidrógeno, pH.....	30
2.3.3. Constituyentes químicos.....	30
2.3.3. a. Cationes Macro constituyentes.....	31
2.3.3. b. Aniones Macro constituyentes.....	31
2.3.3. c. Iones Microconstituyentes más comunes.....	32
III. METODOLOGÍA.....	34
3.1. Área de trabajo.....	35
3.1.1. Proceso de la elaboración y embotellado de agua.....	35
3.2. Muestreo de aguas.....	38
3.3. Determinación de parámetros fisicoquímicos.....	39
3.3.1. pH.....	39
3.3.2. Temperatura.....	40
3.3.3. Sólidos en suspensión.....	40
3.3.4. Potencial Ox-Red (ORP).....	41
3.3.5. Alcalinidad.....	41
3.3.6. Dureza total.....	42
3.4. Determinación de cationes mayoritarios por Absorción Atómica....	43
3.4.1. Preparación de estándares para la curva de calibración....	44
a) Sodio.....	44
b) Potasio.....	44
c) Calcio.....	45
d) Magnesio.....	45

3.4.2. Preparación de muestras.....	47
a) Preparación de muestras para sodio y potasio.....	47
b) Preparación de muestras para calcio y magnesio... ..	47
3.4.3. Lectura de los estándares y muestras por Absorción Atómica	
3.5. Determinación de aniones mayoritarios.....	47
3.5.1. Sulfato.....	47
3.5.2. Nitrato.....	48
3.5.3. Cloruro.....	49
IV. RESULTADOS Y DISCUSIONES.....	50
4.1. Evaluación de parámetros fisicoquímicos.....	51
4.1.1. pH.....	51
4.1.2. Temperatura.....	52
4.1.3. Sólidos en suspensión.....	53
4.1.4. Potencial Ox-Red (ORP).....	54
4.1.5. Alcalinidad.....	56
4.1.6. Dureza total.....	57
4.2. Evaluación de cationes mayoritarios.....	59
4.2.1. Sodio.....	59
4.2.2. Potasio.....	61
4.2.3. Calcio.....	63
4.2.4. Magnesio.....	65
4.3. Evaluación de aniones mayoritarios.....	67
4.3.1. Sulfato.....	67
4.3.2. Nitrato.....	69
4.3.3. Cloruro.....	71
V. CONCLUSIONES.....	73

REFERENCIAS	77
--------------------------	----

ANEXOS

ANEXO A. Espectroscopia de absorción atómica en llama.....	81
ANEXO B. Espectrofotometría de absorción molecular UV-Vis.....	91
ANEXO C. Potenciometría y electrodo de ión selectivo ISE.....	99
ANEXO D. Preservación de muestras de agua.....	104

RESUMEN

El presente trabajo se ha desarrollado en la empresa Elvimar S.R.L. en la purificación de las aguas subterráneas. Se han recolectado muestras de aguas subterráneas y tratadas para medidas in-situ, se han preservado muestras de los dos tipos de aguas para cationes y aniones.

Los parámetros fisicoquímicos que se han determinado son: pH, temperatura, potencial de oxidación reducción, alcalinidad, dureza total, sólidos en suspensión. Los macrocationes como sodio, potasio, calcio y magnesio han sido cuantificados mediante el equipo de absorción atómica. Los macroaniones como nitrato y cloruros han sido cuantificados mediante el método potenciométrico con electrodos de ion selectivo respectivos y el anión sulfato cuantificado mediante el equipo espectrofotómetro multiparámetro Hach.

Los parámetros de pH, temperatura, sólidos en suspensión, alcalinidad y dureza total evaluados en aguas tratadas cumplen con las normativas de IBNORCA 512 y OMS: pH entre 7.71-7.85 se encuentra dentro del límite máximo aceptable de 6.5-9.0; alcalinidad en bicarbonato entre 5.7-6.2 mg/L se encuentra por debajo del límite máximo aceptable de 20 mg/L; dureza total entre 2.7-3.0 mg/L se encuentra por debajo del límite máximo aceptable de 500 mg/L CaCO₃.

Los cationes en aguas tratadas varían en el siguiente orden: Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺. La disminución de los iones Ca²⁺ y Mg²⁺ es debido a que ocurre el proceso de intercambio iónico por iones Na⁺ y K⁺. La concentración de Na⁺ en agua subterránea fue de 12.92-14.57 mg/L, la misma incrementó en el agua tratada a 76.50-93.92 mg/L debido a que se liberan iones Na⁺ en el proceso del intercambio iónico por iones Ca²⁺ y Mg²⁺. La concentración de K⁺ en agua subterránea fue de 2.332-2.51 mg/L con un ligero incremento en aguas tratadas a 3.04-3.66 mg/L. La concentración de Ca²⁺ en agua subterránea fue de 26.23-32.22 mg/L, con disminución considerable en agua tratada a 0.23-0.35 mg/L. La concentración de Mg²⁺ en agua subterránea fue de 12.83-15.50 mg/L con una disminución en aguas tratadas a 0.364-0.393 mg/L. Los cationes evaluados se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, 200 mg/L para Na⁺, 10 mg/L para K⁺, 250 mg/L para Ca²⁺ y 40 mg/L para Mg²⁺.

La concentración de SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- en agua subterránea fueron de 54.26-54.56 mg/L, 10.7-11.9 mg/L y 52.5-53.1 mg/L respectivamente; y en aguas tratadas se han mantenido casi homogéneos en 43.64-54.47 mg/L, 11.2-12.0 mg/L y 64.9-65.9 mg/L respectivamente para SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- . Los aniones evaluados se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, para SO_4^{2-} 400 mg/L, NO_3^- 45 mg/L y Cl^- 250 mg/L cumpliendo con las normativas de IBNORCA 512 y OMS.

Realizado la evaluación respectiva de los parámetros fisicoquímicos, en ambos tipos de agua, se concluye que cumplen con las normas nacional e internacional exigidas para la calidad del agua en consumo humano, por lo tanto el agua purificada de la Empresa Elvimar S.R.L. es apta para consumo humano.



CAPITULO I

INTRODUCCIÓN Y

OBJETIVOS



1.1. Introducción

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

1.2.2 Objetivos Específicos

1.1. Introducción

El agua, esencial para la existencia de cualquier tipo de vida, juega un papel destacado en muchas actividades propias de los seres humanos, de la agricultura a la industria, del abastecimiento de agua potable a los usos recreativos. Dentro del ciclo hidrológico, las aguas subterráneas son fundamentales tanto como fuente de agua potable para la sociedad, como para el mantenimiento de muchos ecosistemas acuáticos.

Las aguas subterráneas son las que se encuentran bajo la superficie del terreno o dentro de los poros o fracturas de las rocas, o dentro de las masas de regolito; en zonas húmedas a metros de profundidad, en desiertos a cientos de metros.

El agua subterránea es una parte integral del ciclo del agua [Dettinger M. D., 2007]. El ciclo empieza con la precipitación sobre la superficie. La lluvia se escurre y va directamente a los ríos y quebradas. Parte del agua que se filtra en la tierra es usada por las plantas para la transpiración. El agua restante, llamada agua de recarga, es llevada a través del suelo a la zona saturada, donde el agua llena todos los espacios entre las partículas del suelo y las rocas.

Lo más alto de la zona saturada es la capa o manto freático, que es el nivel al que el agua se mantiene en un pozo. El agua se mueve dentro de la zona saturada desde áreas donde la capa de agua es alta hacia áreas donde ésta es baja, por lo que el agua subterránea brota a la superficie y se transforma en manantiales, ríos, quebradas u océanos. Ésta sale del subsuelo y forma el agua superficial; cuando esta agua se evapora a la atmósfera y se condensa, viene la precipitación, completando el ciclo del agua.

El agua puede ser encontrada debajo de la tierra casi en cualquier sitio. La calidad y cantidad del agua subterránea disponible varía de sitio a sitio. Las reservas mayores de agua subterránea son llamadas acuíferos. Cuando no hay surgencias naturales, al agua subterránea se puede acceder a través de pozos, perforaciones que llegan hasta el acuífero y

se llenan parcialmente con el agua subterránea, siempre por debajo del nivel freático, en el que provoca además una depresión local.

En la actualidad, las cuatro quintas partes del agua consumida provienen de los ríos y lagos. Aún así, la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme debido a que el agua subterránea no necesita ser tratada previamente como el agua superficial con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras [J. G. Montes]. El agua subterránea no posee organismos patógenos, su temperatura es constante, no posee ni turbidez ni color, su composición química es generalmente constante. Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.

La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es difícil, por actuar de filtro las mismas rocas del subsuelo. El agua subterránea, acumulada durante largas series de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales [Alley, W. M., 2006 y 2007].

El presente trabajo se ha desarrollado dentro de la empresa ELVIMAR S.R.L., consistió en la medición de los parámetros físicos y químicos del agua subterránea y del agua tratada para su posterior evaluación en la calidad de aguas. Los parámetros que se han medido son: pH, temperatura, potencial de oxidación reducción, sólidos en suspensión, alcalinidad, dureza total, componentes químicos en cationes como sodio, potasio, magnesio, calcio y en aniones como sulfatos, cloruros y nitratos.

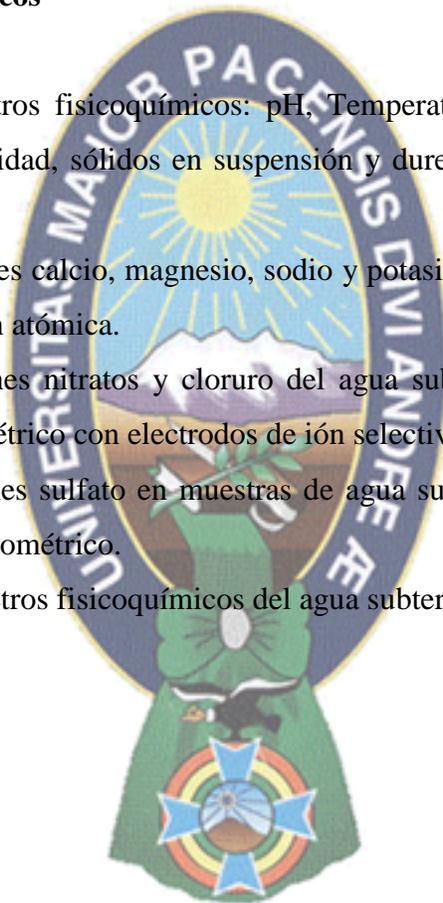
1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Determinar y evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y tratada de la Empresa ELVIMAR S.R.L.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Medir los parámetros fisicoquímicos: pH, Temperatura, Potencial de Oxidación y Reducción, alcalinidad, sólidos en suspensión y dureza total del agua subterránea y tratada.
- Determinar los iones calcio, magnesio, sodio y potasio del agua subterránea y tratada mediante absorción atómica.
- Determinar los iones nitratos y cloruro del agua subterránea y tratada mediante el método potenciométrico con electrodos de ión selectivo respectivos.
- Determinar los iones sulfato en muestras de agua subterránea y tratada mediante el método espectrofotométrico.
- Evaluar los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea y tratada.



CAPITULO II

ANTECEDENTES

2.1. Agua en nuestro planeta

2.1.1 Ciclo hidrológico

2.2. Aguas subterráneas

2.2.1 Distribución del agua en el subsuelo

2.2.2 Procedencia

2.2.3 Uso

2.2.4 Importancia

2.2.5 Aguas subterráneas en Bolivia

2.2.6 Legislación Boliviana

2.3. Naturaleza química del agua subterránea

2.3.1. Propiedades físicas del agua

2.3.1. a. Turbidez

2.3.1. b. Color

2.3.1. c. Olor y Sabor

2.3.1. d. Temperatura

2.3.1. e. Conductividad Eléctrica Específica

2.3.1. f. Sólidos totales

2.3.2. Propiedades Químicas del agua

2.3.2. a. Dureza

2.3.2. b. Sólidos totales disueltos (STD)

2.3.2. c. Alcalinidad

2.3.2. d. Acidez

2.3.2. e. Potencial de Hidrógeno, pH

2.3.3. Constituyentes químicos

2.3.3. a. Cationes Macro constituyentes

2.3.3. b. Aniones Macro constituyentes

2.3.3. c. Iones Microconstituyentes más comunes

2.1. Agua en nuestro planeta

El agua es un elemento esencial para el desarrollo de cualquier ser vivo de nuestro planeta, lo es también para la agricultura, la industria y la ganadería. Los dos tercios de nuestro cuerpo se componen de agua.

El océano es el origen de la mayor parte de las precipitaciones del planeta (lluvia y nieve). La mayor parte del agua terrestre está contenida en los mares, y presenta un elevado contenido en sales (Figura N°1).

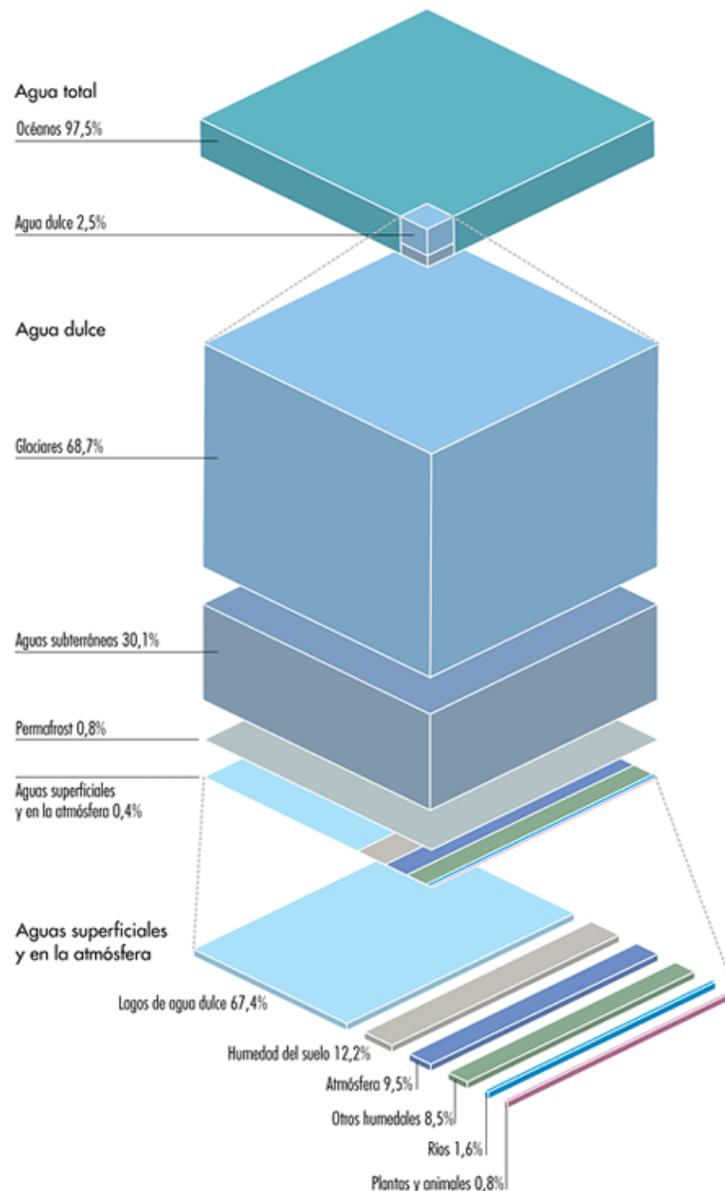


Figura N°1. Distribución del agua en el planeta [PNUMA, 2007].

El agua cubre el 71% de la superficie de la corteza terrestre, se localiza principalmente en los océanos donde se concentra el 96,5% del agua total, los glaciares y casquetes polares poseen el 1,74%, los depósitos subterráneos (acuíferos), los permafrost y los glaciares continentales suponen el 1,72% y el restante 0,04% se reparte en orden decreciente entre lagos, humedad del suelo, atmósfera, embalses, ríos y seres vivos [PNUMA, 2007; Gleick, P. H.].

Estas cifras permiten cuantificar la importancia de las aguas subterráneas, que representa el mayor recurso hídrico de agua dulce sobre el planeta. Las aguas subterráneas se encuentran en yacimientos subterráneos llamados acuíferos y son potencialmente útiles al hombre como recursos.

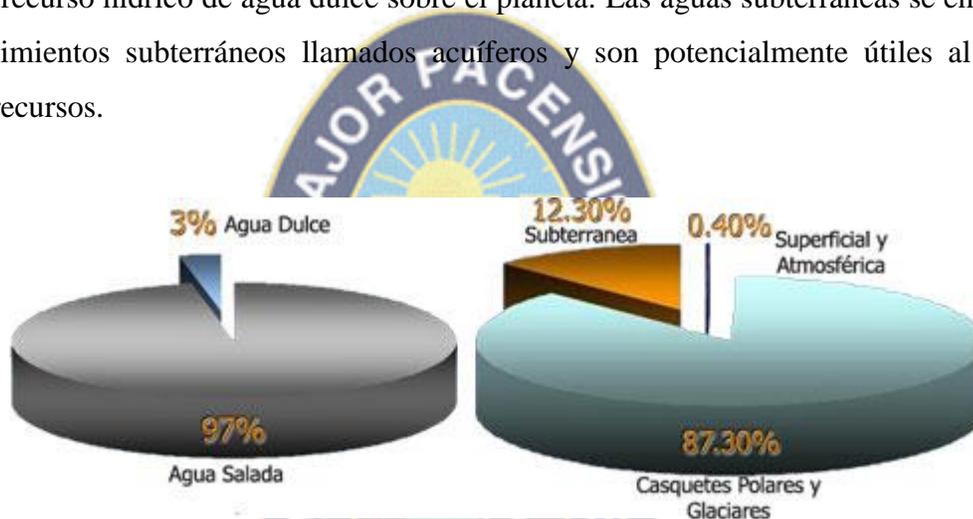


Figura N°2. Distribución del agua total entre dulce y salada [Z. Jamshidzadeh].

2.1.1. Ciclo hidrológico

A pesar de que su comprensión resulta sencilla, no fue sino hasta principios del siglo XVIII que fue aceptado por la generalidad de científicos y sin embargo hasta principios del siglo pasado no se había desarrollado las relaciones entre las aguas subterráneas y las aguas superficiales.

El concepto de ciclo hidrológico [Bjørn Kløve, 2011], como se muestra Figura N°3, lleva consigo el movimiento o transferencia de las masas de agua, de un sitio a otro y de un estado a otro. El movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas: la primera El Sol, que proporciona la energía para elevar el agua del suelo al evaporarla y la

segunda, la gravedad que hace que el agua condensada precipite y que una vez sobre la superficie se desplace hacia las zonas más bajas.

Si suponemos que el ciclo se inicia cuando una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y da origen a precipitaciones en forma de lluvia o nieve. No toda la precipitación alcanza la superficie de la tierra, una parte se vuelve a evaporar en su caída y otra parte es retenida por intercepción por la vegetación y luego es evaporada.

Del agua que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en charcos (almacenamiento superficial) y en su mayoría vuelve a la atmósfera en forma de vapor. Otra parte circula por la superficie, la cual más tarde desemboca en ríos (escurrimiento superficial), esta agua irá a parar a lagos o al mar, luego será evaporada.

Por último, hay una parte significativa de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno (infiltración), ésta viaja a través de los poros o fisuras del terreno hacia mayores profundidades. La misma representa aproximadamente una tercera parte de la precipitación. Una buena parte de la infiltración no desciende hasta la *zona saturada* de agua sino que se queda en la *zona no saturada* (zona de humedad del suelo), en donde vuelve a la atmósfera por transpiración de las plantas o simplemente por evaporación (evapotranspiración).

El movimiento del agua a través del subsuelo es algunas veces denominado infiltración o percolación, se caracteriza por su extraordinaria lentitud y se debe fundamentalmente a la acción gravitatoria.



Figura N°3. El ciclo del agua [Bruce R. W.].

2.2. Aguas subterráneas

El agua subterránea es la que se encuentra dentro de la litosfera. La hidrogeología estudia al agua subterránea, desde su origen, su movimiento, su distribución debajo de la superficie de la Tierra y su conservación.

Se le denomina agua subterránea [Brown J., 2009] a toda aquella agua que se encuentra por debajo del nivel freático o zona saturada. Como se mencionó en el ciclo del agua, del volumen de agua que precipita a tierra desde la atmósfera, una porción de ésta se infiltra en el suelo, pasando primero por una capa superficial del suelo que se llama zona no saturada en la cual las raíces de las plantas logran interceptar para utilizarla en su ciclo vital. El resto del agua seguirá su camino a través de la tierra, por acción de las fuerzas gravitatorias, en diversas formaciones geológicas, que podrán almacenarla o transportarla. El agua en estas condiciones se encuentra en la zona saturada en donde se une con más agua [Kløve B., 2011].

El agua subterránea es una parte importante del ciclo hidrológico, ésta sustenta el caudal de las corrientes superficiales durante los períodos sin lluvia y constituye además, la única fuente de agua dulce en muchas localidades áridas [Schmidt S., 2012].

Por lo que se refiere a la presencia del agua en el subsuelo, se ha comprobado que la mayor parte del agua subterránea se debe a la infiltración de agua de lluvia, aunque también hay agua subterránea debida a otros fenómenos como el magmatismo y el volcanismo (aguas juveniles) y las que resultan al quedar atrapadas en los intersticios de rocas sedimentarias en el momento en que se depositan éstas (aguas fósiles), pero su cantidad no es considerable en relación con las que provienen de la infiltración.

La cuantificación del volumen y de los caudales del agua subterránea a veces es una tarea difícil porque vienen determinados en alto grado por la geología de la región. El tipo de arreglo de las rocas y los suelos son factores importantes y los mismos son altamente variables en un reservorio de agua subterránea.

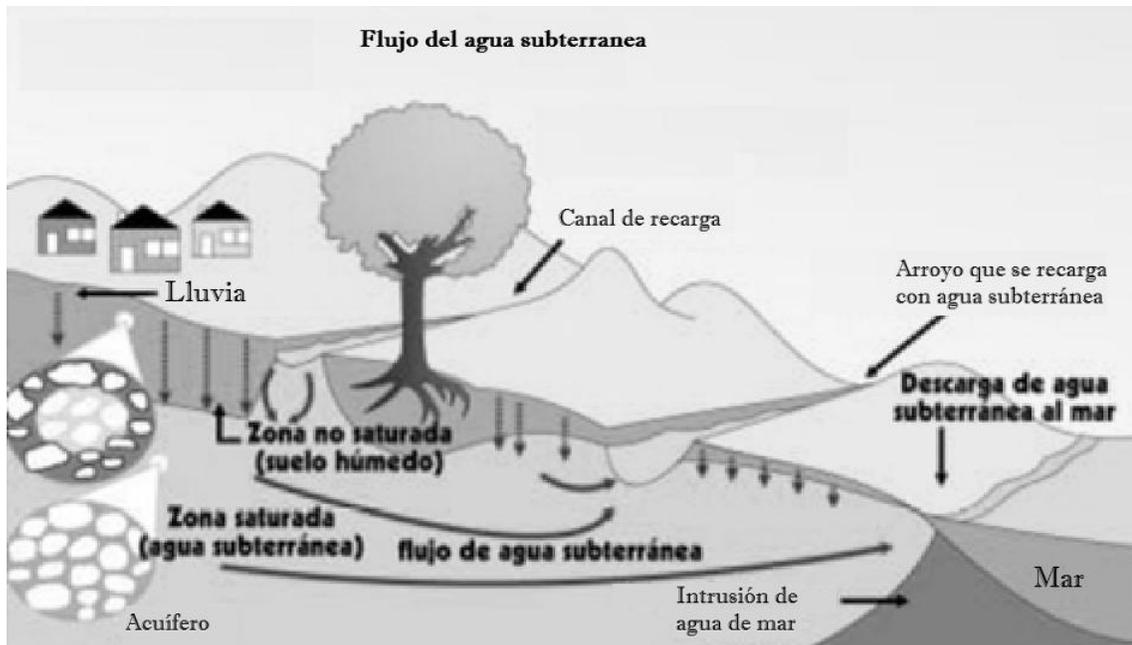


Figura N°4. Flujo del agua subterránea [ATSDR].

2.2.1 Distribución del agua en el subsuelo

El agua subterránea representa una fracción importante de la masa de agua presente en cada momento en los continentes. Ésta se aloja en los acuíferos bajo la superficie de la tierra. El volumen del agua subterránea es mucho más importante que la masa de agua retenida en lagos o circulante, y aunque menor al de los mayores glaciares, las masas más extensas pueden alcanzar millones de km² (como el acuífero guaraní). El agua del subsuelo es un recurso importante y de éste se abastece a una tercera parte de la población mundial [PNUMA, 2007] pero de difícil gestión, por su sensibilidad a la contaminación y a la sobreexplotación.

En condiciones normales, la distribución de agua en el subsuelo ha sido dividida en dos zonas: la de aeración, también conocida como zona vadosa o no saturada y la de saturación (Figura N°5).

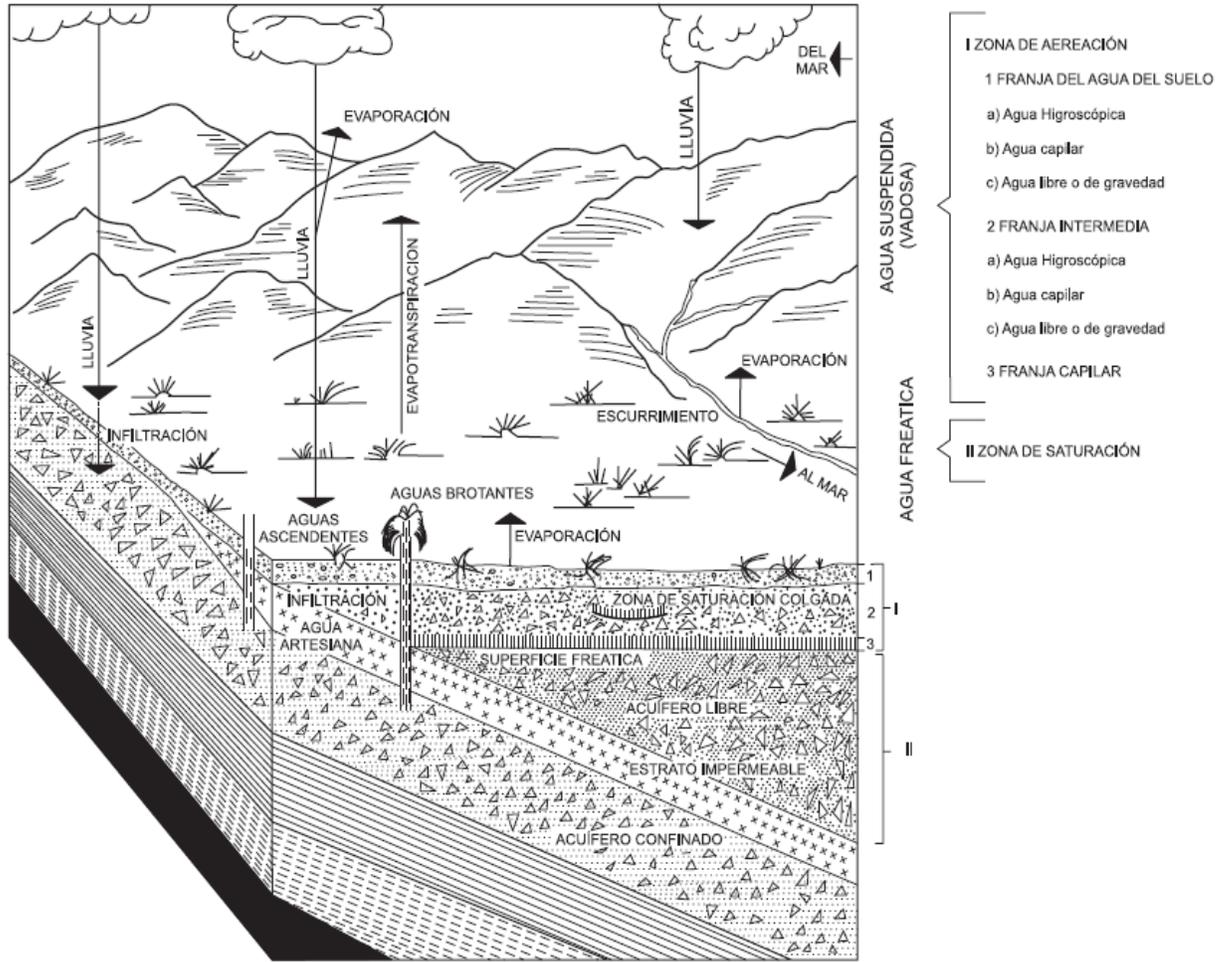


Figura N°5. Distribución de agua en el subsuelo [Maderey R.].

a) Zona de aeración

La zona de aeración comprende tres franjas:

- La *franja del agua del suelo* se encuentran tres tipos de agua:

- Agua higroscópica. Es la que el suelo absorbe y pasa a formar películas muy delgadas alrededor de las partículas que lo forman.
- Agua capilar. Es la que existe en los intersticios del suelo debido a fenómenos de capilaridad y es aprovechado por las plantas para satisfacer sus necesidades.
- Agua libre o de gravedad. Es la que se mueve bajo la influencia de la gravedad, una vez satisfecha la humedad del suelo.

Hay ocasiones en que esta primera franja no existe.

- La *franja intermedia* presenta espesor variable desde cero hasta varios metros; es la que comunica a la franja del agua del suelo con la capilar. El agua aquí existente se debe a fuerzas higroscópicas, capilares y de gravedad.

- La *franja capilar* es una capa humedecida por el agua que asciende de la zona de saturación debido a fenómenos capilares.

Al agua contenida en la zona de aeración se le conoce con el nombre de agua suspendida, ésta es el agua vadosa, es decir, agua infiltrada que se dirige hacia el manto freático.

b) Zona de saturación

En la zona de saturación se encuentra el agua subterránea propiamente dicha. En esta región el movimiento del agua es más lento debido a que todos los poros e intersticios se encuentran ocupados por ella, y es de aquí de donde se extrae el agua para los diversos usos que le da el hombre.

La capa saturada es el manto freático, y la parte superior de ésta, es decir, el límite de la zona libre del agua que ocupa esta región, es la superficie freática que, por lo general, sigue débilmente las ondulaciones del terreno. Al agua que llega a esta zona se le llama agua freática.

La parte inferior de la zona de saturación está compuesta por una capa impermeable, la cual impide que el agua siga descendiendo. Puede suceder que haya otras zonas de saturación de menor extensión sobre la principal, en cuyo caso se les llama zonas de saturación colgadas. El agua se mueve hacia el manto freático por filtración, una vez en él, el movimiento lento que adquiere al llegar a la zona de saturación se llama percolación.

El movimiento del agua subterránea está controlado por tres fuerzas principales, la de gravedad, la de atracción molecular y la de diferencias de densidad, producto de variaciones importantes de temperatura que existen al interior del subsuelo, interviniendo de manera especial la estructura de las formaciones geológicas.

Las formaciones geológicas según su aptitud para contener y dejar pasar el agua a través de su masa reciben distintos nombres:

- Acuíferos. Son formaciones, partes de una formación o conjunto de formaciones geológicas, que permiten al agua moverse a través de ellas bajo condiciones ordinarias y son capaces de suministrarla por gravedad, o por bombeo en la calidad requerida.
- Acuiclerres o acuitardos. Son formaciones capaces de contener agua, pero incapaces de transmitirla en cantidades suficientes como para su captación o formación de manantiales importantes.
- Acuífugos. Son formaciones impermeables que no absorben ni transmiten agua.

2.2.2 Fuentes de aguas subterráneas

En los recorridos terrestres del ciclo de agua, que incluyen básicamente a las aguas dulces, las reservas continentales (lagos, hielos, capas subterráneas, etc.) desempeñan un papel primordial como reguladores. Sin ellas, las aguas fluyentes naturales serían tan irregulares como los aportes meteóricos las precipitaciones que las engendran y no existiría ninguna reserva de agua permanente. Los primeros estudios sobre las reservas y la cuantificación de sus volúmenes se centraron en comprender su función reguladora y en evaluar las posibilidades de sacarle partido para movilizar los recursos de agua renovables irregulares. Entre las distintas reservas, sí bien los grandes lagos y los glaciares son reguladores eficaces en las cuencas donde se encuentran, las capas de agua subterráneas o acuíferos son mucho más frecuentes; la mayor parte de las aguas fluyentes regulares en todos los continentes, estimadas en 12 billones de m³/año de media (o sea, el 30% del caudal total de los ríos del mundo, estimado en 40 billones de m³/año) se deben a estos cursos subterráneos de agua [Kresic N.]. De hecho, las aguas superficiales permanentes son aguas que primeramente han circulado por el suelo y el subsuelo.

La distribución de los yacimientos de agua en el mundo está regulada por las estructuras geológicas y por las zonas climáticas. El mapa de la Figura N°6, muestra dónde se sitúan las más importantes, explotadas aún de forma muy desigual, y las principales «minas de agua», es decir, los campos de explotación en régimen de agotamiento voluntario. Este

mapa podría completar una geografía de los recursos minerales entre los cuales generalmente no se incluye el agua.

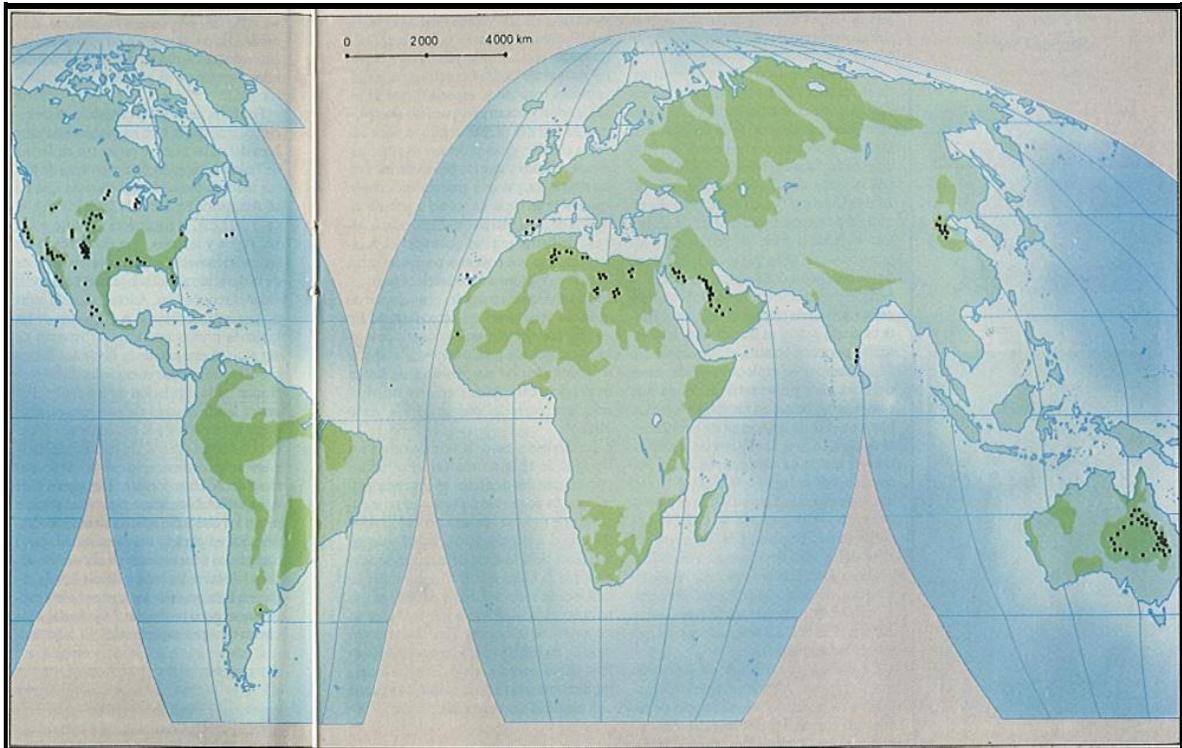


Figura N°6. La distribución de las grandes reservas de agua acuífera que ofrecen recursos no renovables, indicados en verde en este mapa, esta basada tanto en las estructuras geológicas (las grandes cuencas sedimentarias), como por las zonas climáticas (zonas áridas). Las reservas mas importantes presentadas tienen un grado de explotación muy desigual. Las principales "minas de agua" se han indicado en negro. Todos estos campos de explotación intensiva de agua subterránea se encuentran en camino de agotarse, más o menos rápidamente, según los lugares [WHYMAP].

2.2.3 Uso

La utilización del agua subterránea para abastecimiento es tan antigua como la historia, realizándose incluso en la época paleolítica. Existen restos arqueológicos de captaciones subterráneas realizadas por los Persas y los Medos (8000 a. C.) [Pimienta, J.]

Durante los últimos años se ha comenzado a explotar de forma intensa las aguas subterráneas mediante la perforación de pozos profundos y semiprofundos, cuyas reglas de

gestión responden a los requerimientos técnicos y las necesidades específicas de esta forma de aprovechamiento.

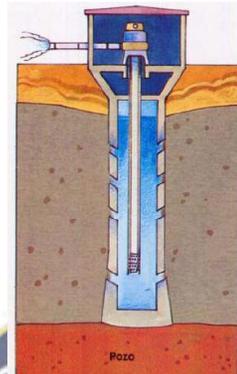


Figura N°7. Perforación de pozos [Pimienta, J.]

De acuerdo con el reporte de la UNESCO (2006) [Mernia José M.], la mitad de las grandes ciudades del planeta (Mexico D.F., Teherán, Shanghai, Buenos Aires, Yakarta, Karachi, Dhaka, Manila, El Cairo, Bangkok, Londres, Beijing), y cientos de otras ciudades de gran tamaño en todos los continentes, dependen de las aguas subterráneas o consumen un gran volumen de las mismas. Además, las pequeñas ciudades y las comunidades rurales utilizan con frecuencia este recurso para su abastecimiento doméstico. La utilización de aguas subterráneas en el mundo según la UNESCO (2003) sería la siguiente:

Tabla N°1. Disposiciones sobre Aguas Subterráneas [Mernia José M.].

USO	% AGUA SUBTERRÁNEA	% AGUA TOTAL
URBANO	25	25-40
AGRICOLA	70	20
INDUSTRIAL	5	40
TOTAL (km ³ /año)	600-700	4.000

El agua subterránea que se utiliza a escala mundial se destina en un 70% a usos agrícolas, el 25% a usos urbanos, el 5% restante a usos industriales. El volumen extraído se estima en torno a los 600-700 km³/año y constituye entre el 15% y el 17,5% de los 4.000 km³/año de agua que utiliza la humanidad.

Dentro de las diferentes categorías del uso del agua [Z. Jamshidzadeh, 2011], el agua subterránea juega un papel muy importante. Los diferentes acuíferos subterráneos con

acceso son empleados para su uso en servicios públicos de agua potable, para embotellamiento (de aguas minerales o para fabricar gaseosas), para industrias que utilizan gran cantidad de agua.

2.2.4. Importancia del agua subterránea

En la actualidad, las cuatro quintas partes del agua consumida provienen de los ríos y lagos. Aún así, la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones [J. G. Montes]:

1. El agua subterránea no posee organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras.
2. Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador.
3. No posee ni turbidez ni color.
4. Su composición química es generalmente constante.
5. Los volúmenes de agua subterránea almacenada son por lo general mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse afectado por las sequías prolongadas.
6. La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es difícil, por actuar de filtro las mismas rocas del subsuelo.
7. El agua subterránea, acumulada durante largas series de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de la explotación de las aguas superficiales.

Dos grandes inconvenientes suelen impedir la utilización más intensiva de las aguas subterráneas:

1. El hecho de que muchas regiones están emplazadas sobre un subsuelo rocoso cuya porosidad o permeabilidad son insuficientes para proporcionar grandes caudales de agua en las captaciones.
2. El coste de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el coste de explotación de las aguas superficiales de los ríos próximos a las zonas de consumo; sobre todo en regiones de pluviometría elevada o moderada.

2.2.4. Legislación de recursos hídricos en Bolivia

En cuanto al tema de las leyes vigentes sobre recursos hídricos en Bolivia se tiene una compleja variedad de normas que regulan sectores concretos y algunos principios generales en la Constitución Política del Estado [Rocío Bustamante; Roxana Castellón]. A continuación haremos una descripción de las principales normas que aun están vigentes y forman parte de la legislación general en cuanto al tema:

Tabla N°2. Normas vigentes relacionadas a recursos hídricos
[Rocío Bustamante; Roxana Castellón].

AÑO	DISPOSICIÓN
1906	<p>LEY DE AGUAS VIGENTE (Elevado al rango de ley el 28 de noviembre de 1906)</p> <p>La legislación hídrica en Bolivia tiene su base en la Ley de Aguas de 1906, cuyas consideraciones, en su mayor parte, se encuentran fuera de contexto.</p> <p>En el capítulo 4 se hacen consideraciones en cuanto al dominio de las aguas subterráneas en el REGLAMENTO DE AGUAS decretado.</p>
1992	<p>LEY DE MEDIO AMBIENTE Ley N° 1333, promulgada el 27 abril de 1992</p> <p>Dentro de la reglamentación de la Ley N° 1333 del medio ambiente en el REGLAMENTO EN MATERIA DE CONTAMINACIÓN HÍDRICA establece en sus artículos la prevención y control de la contaminación hídrica, en el marco</p>

	del desarrollo sostenible. El presente reglamento se aplicará a toda persona natural o colectiva, pública o privada, cuyas actividades industriales, comerciales, agropecuarias, domésticas, recreativas y otras, puedan causar contaminación de cualquier recurso hídrico.
1998	Normas Reglamentarias de uso y aprovechamiento de Agua para Riego. Resolución Biministerial 01/98.
2000	Ley N°2066 de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario.
2004	Ley de Riego (Septiembre de 2004)

Tabla N°3. Disposiciones sobre Aguas Subterráneas [Rocío Bustamante].

DISPOSICIÓN LEGAL	SÍNTESIS
R.M. No. 210 25/07/1967	<i>f) Aguas Subterráneas</i> Las Aguas Subterráneas son de dominio Público; por lo tanto el derecho de propiedad que tenga una persona sobre un terreno no implica la de sus aguas subterráneas.
Resolución Prefectural No. 76/87 de 02/12/1987	Apruébese el Reglamento de uso de Aguas Subterráneas en sus Siete Capítulos y 32 Artículos <i>Reglamento de Aguas Subterráneas</i> Las Aguas del Subsuelo comprenden las Aguas Subterráneas, subálveas y aguas minerales y medicinales son de dominio público.
Resolución Prefectural No 342/99	Para la perforación de un pozo se requiere una autorización de la Dirección Departamental de Recursos Naturales y Medio Ambiente, a través de la Ficha Ambiental (Ley No. 1333), caso contrario, será pasible a una multa de Bs. 5.000.- a Bs. 10.000.- obligándose a clausurar el pozo de agua.

Recientemente la legislación ambiental, ha intentado también regular el uso y aprovechamiento de aguas subterráneas, pero desde el enfoque de la conservación, la

preservación y la prevención de la contaminación de los acuíferos. Así en el Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica se establece que requiere de una Declaratoria de Impacto Ambiental o Declaratoria de Adecuación Ambiental.

Conforme lo establecido en la nueva Constitución Política del Estado y las políticas públicas de agua son responsabilidades del Estado, la asignación de derechos de uso y aprovechamiento del agua y su control, así como su protección frente a los monopolios, su uso efectivo, la prohibición de contaminarla y ponerla en riesgo, su aprovechamiento sustentable, su uso prioritario para el consumo humano y riego agropecuario en el ámbito de dominio público, su preservación dentro de los flujos ambientales y, finalmente, el respecto a las formas propias de usarlo.

- **Reglamento ambiental para el sector industrial manufacturero (RASIM)**

El Reglamento Ambiental para el Sector Industrial Manufacturero (RASIM), fue aprobado mediante Decreto Supremo No. 26736, el 30 de julio de 2002. El RASIM fue promulgado fundamentalmente para tomar en cuenta las particularidades del subsector industrial y manufacturero. Entre las partes más relevantes del RASIM se puede mencionar:

- La incorporación del concepto de la Producción Más Limpia (PML). En tal sentido, las responsabilidades y esfuerzos de las industrias deben centrarse en las prácticas de PML.
- El establecimiento de una clasificación de las industrias de acuerdo al riesgo de contaminación, en cuatro categorías: 1, 2, 3 y 4, correspondiendo la categoría 1 al más alto riesgo. Se prioriza el esfuerzo privado y público para el establecimiento y seguimiento de planes de manejo ambiental en las actividades industriales manufactureras que representan un mayor riesgo de contaminación, según la actual priorización del RASIM
- El Viceministerio de Industria Comercio y Exportaciones (VICE), se constituye en el Organismo Sectorial Competente (OSC) para el sector industrial manufacturero.
- La introducción de incentivos para la aplicación de las prácticas de PML, a través de instrumentos económicos y técnicos. Los instrumentos técnicos son las Guías

Técnicas Ambientales, que se constituyen en documentos de referencia, donde se describen las acciones que debe emprender la industria para la introducción de prácticas de producción más limpia. En este contexto, el Artículo 96 establece: “Con el objeto de promover la producción más limpia, las Guías Técnicas Ambientales aprobadas por el OSC y/o las certificaciones de Sistemas de Gestión Ambiental, obtenidos a través de la norma NB-ISO 14001, se constituirán en documentos de referencia técnica para:

- Acceder a incentivos;
- Establecer acuerdos entre la industria y la autoridad para optimizar la gestión ambiental;
- El establecimiento de plazos y límites permisibles;
- Ser incorporados dentro del Plan de Manejo Ambiental (PMA), cuando se implementen las Guías Técnicas Ambientales;
- Sustituir el Plan de Manejo Ambiental (PMA), cuando la industria cuente con la certificación NB-ISO 14001.”

2.2.5 Aguas subterráneas en Bolivia

Entre el 80 y 85% del uso del agua en Bolivia está dirigido al riego (CEPAL, 1998; Van Damme, 2002), es también relacionado a este sector productivo que se presentan los mayores conflictos intra e intersectoriales, especialmente en aquellos lugares en los cuales la escasez del agua y su ineficiente gestión, agudiza su disponibilidad y manejo y en los cuales se multiplican los esfuerzos locales e institucionales por avanzar hacia una Gestión Integral del Agua, que promueva su sostenibilidad y gobernabilidad local y un acceso más equitativo y equilibrado, en el marco de espacios de concertación de múltiples actores [ASD-COSUDE].

Ante la gran demanda de agua en el país desde 1970 se priorizó la captación de agua subterránea mediante la perforación de pozos principalmente para consumo humano doméstico y recientemente para uso agropecuario.

- Las Prefecturas de Departamento, los Municipios, ONGs, Fundaciones y Empresas privadas han perforado, construido e implementado una gran cantidad de pozos para el aprovechamiento del agua subterránea.
- Existen registros de ONGs y Cooperaciones Internacionales que donaron equipos de perforación manual a comunidades para lograr que mayor cantidad de gente tenga acceso al agua.

Al presente, existe una inclinación muy marcada al aprovechamiento del agua subterránea para satisfacer requerimientos domésticos, agropecuarios e industriales. Entidades estatales y privadas fomentan el desarrollo/aprovechamiento aislado del agua subterránea como alternativa fácil y rápida de fuente de agua. Se están perforando pozos cada vez más profundos para evitar el agua contaminada de acuíferos someros. Existen estudios de la UMSA y la IRD que pronosticaron correctamente que el 2009 la oferta de agua para las ciudades de La Paz y El Alto (potable y para energía) no cubriría la demanda de las mismas, generando presión sobre los recursos hídricos subterráneos como alternativa inmediata.

De acuerdo a la situación actual, Bolivia tiene un gran potencial de agua subterránea. La mayoría de los centros poblados utilizan, aunque en diferentes porcentajes, el agua subterránea para su abastecimiento de agua potable, uso agropecuario, industrial, de recreación y otros. Existen áreas urbanas y rurales cuya fuente de agua para su abastecimiento, agropecuaria e industria es 100 % de origen subterráneo.

Existen varios estudios y mapas hidrogeológicos hechos en el país a escalas referenciales (1:250000, 500000) y de mayor detalle (1:100000; 1:50000) que ya son útiles para la gestión de agua subterránea. Estos mapas cubren menos del 20% del país y se encuentran dispersos (Figura N°8).

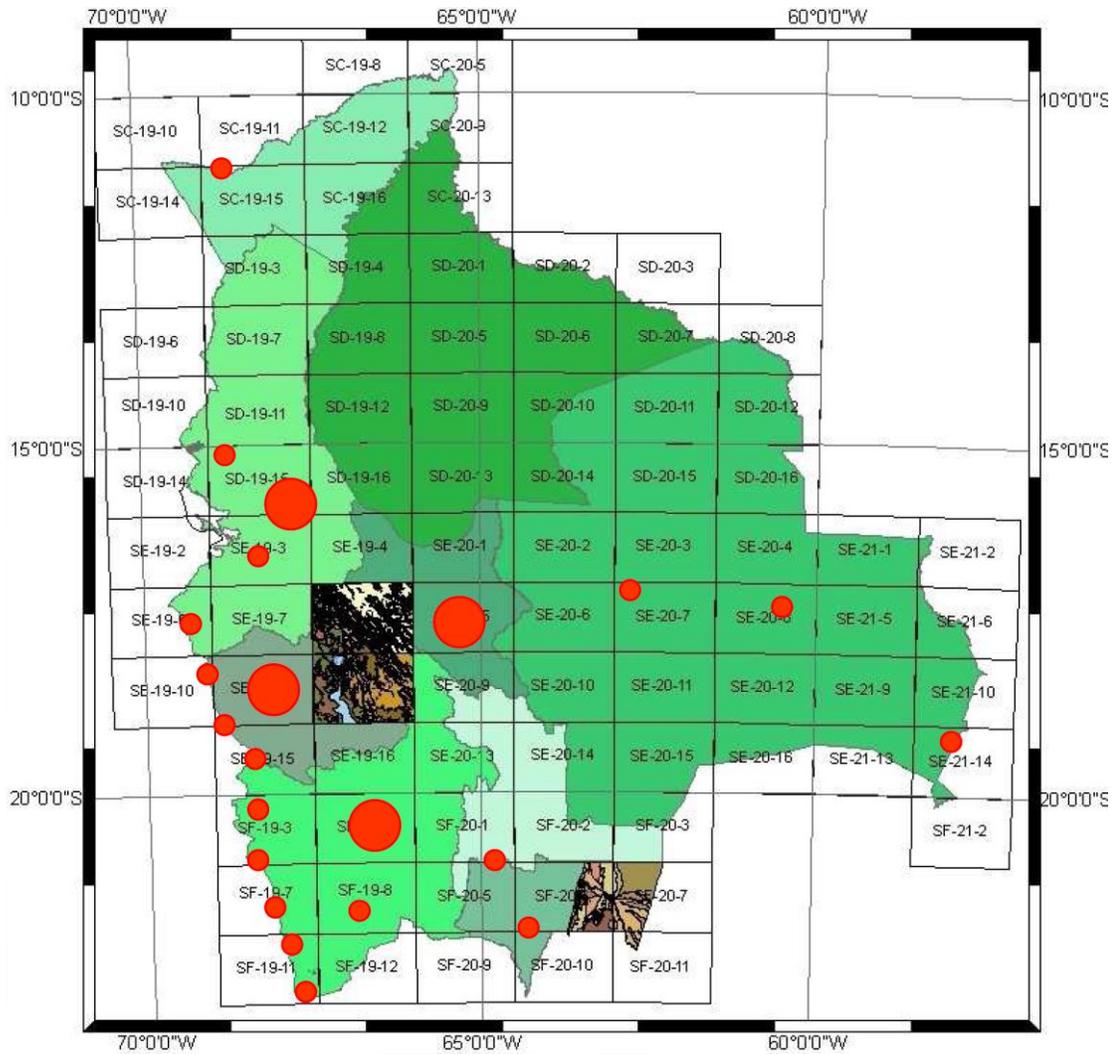


Figura N°8. Mapas hidrogeológicos de Bolivia [ASD-COSUDE].

2.3. Naturaleza química del agua subterránea

La Tabla N°4 muestra la proporción del peso de los elementos en la corteza terrestre. En ella se ve que La Tierra es en un 95 % silicatos. Este ion, no está balanceado eléctricamente, lo que hace que al unirse al oxígeno forman las tres cuartas partes de la Tierra como lo señala la Figura N°9.

Tabla N°4. Distribución de los Elementos en la Corteza de La tierra (expresado en óxidos) [Driscoll, 1986].

Constituyentes	Promedio de Composición de la Corteza (% Peso)
Sílice (SiO ₂)	63.5
Aluminio (Al ₂ O ₃)	15.9
Calcio (CaO)	4.9
Sodio (Na)	3.3
Potasio (K ₂ O)	3.3
Hierro (FeO)	3.3
Hierro (Fe ₂ O ₃)	2.9
Magnesio (MgO)	2.9
Carbono (CO ₂)	—
Hidrógeno (H ₂ O)	—

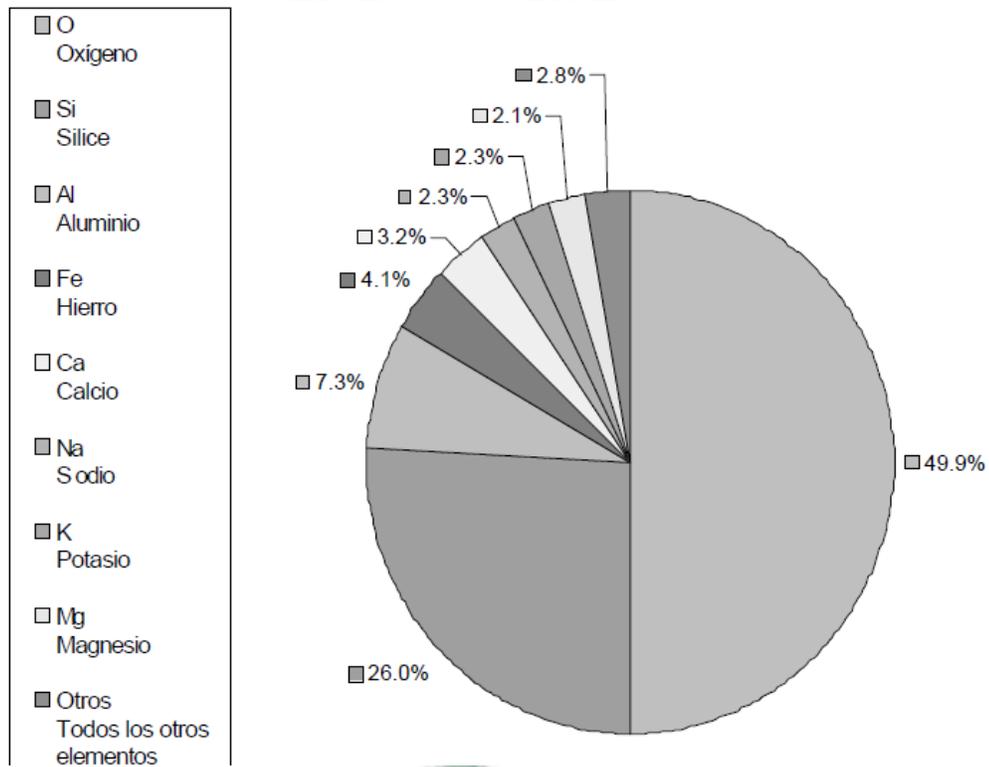


Figura N°9. Distribución de los elementos en la corteza terrestre [Driscoll, 1986].

La sílice está presente generalmente en las rocas ígneas, y éstas generalmente son oxidadas por el agua, provocando óxidos de silicio que son los que predominan en las Aguas Subterráneas. La Tabla N°5 muestra los cationes y los aniones presentes en el agua subterránea.

Tabla N°5. Mayores cationes y aniones encontrados en el Agua Subterránea [Driscoll, 1986].

Cationes	Aniones
Calcio (Ca^{+2})	Bicarbonato (HCO_3^-)
Magnesio (Mg^{+2})	Sulfatos (SO_4^{-2})
Sodio (Na^+)	Cloruros (Cl^-)
Potasio (K^+)	

2.3.1. Propiedades físicas del agua

Estos parámetros sirven para determinar características del agua [Romero, 1996; Beltrán J.; SM, 1998], los cuales son medidos en las pruebas de laboratorio. Las más importantes son las siguientes:

2.3.1. a. Turbidez

Es una expresión del efecto óptico causado por la dispersión e interferencia de los rayos luminosos que pasan a través de una muestra de agua; es decir es la propiedad óptica de una suspensión que hace que la luz sea re-emitida y no transmitida a través de la suspensión [Romero, 1996]. La turbidez de un agua puede ser causada por gran variedad de materiales en suspensión. La turbidez en un agua puede ser causada por una gran variedad de materiales en suspensión, que varían en tamaño desde dispersiones coloidales hasta partículas gruesas, entre otros, arcillas, limos, materia orgánica e inorgánica finamente dividida, organismos planctónicos, y otros microorganismos.

Actualmente el método más usado para determinar la turbidez es el método nefelométrico en el cual se mide la turbidez mediante un nefelómetro y se expresan los resultados en unidades de turbidez nefelométrica, UTN. Con este método se compara la intensidad de la luz dispersada por una suspensión estándar de referencia bajo las mismas condiciones de medida. Entre mayor sea la intensidad de la luz dispersada mayor será la turbidez.

La determinación de la turbidez es de gran importancia en aguas para consumo humano y en una gran cantidad de industrias. Los valores de turbidez sirven para determinar el grado

de tratamiento requerido por una fuente de agua cruda, su filtrabilidad y, consecuentemente, la tasa de filtración más adecuada, la efectividad de los procesos de coagulación, sedimentación y filtración, así como para determinar la potabilidad del agua.

2.3.1. b. Color

Las causas más comunes del color del agua son la presencia de hierro y manganeso coloidal en solución; el contacto del agua con desechos orgánicos, hojas, raíces y otros, en diferentes estados de descomposición; y la presencia de taninos, ácido húmico y algunos residuos industriales. El color natural en el agua existe principalmente por efecto de partículas coloidales, cargadas negativamente; debido a esto su remoción puede lograrse con ayuda de un coagulante de una sal de un ion metálico trivalente como el Al^{3+} o el Fe^{3+} . Dos tipos de color se reconocen en el agua: el color verdadero, o sea el color de la muestra una vez que su turbidez ha sido removida, y el color aparente que incluye no solamente el color de las sustancias en solución y coloidales sino también el color debido al material suspendido. El color aparente se determina sobre la muestra original sin filtración o centrifugación previa. En general, el término color se refiere al color verdadero del agua y se acostumbra medirlo conjuntamente con el pH. Normalmente el color aumenta con el incremento del pH.

La determinación del color se hace por comparación visual de la muestra con soluciones de concentración de color conocido o con discos de vidrio de colores adecuadamente calibrados. Las medidas de color se realizan por comparación con un estándar arbitrario, a base de cloruro de cobalto y cloroplatinato de potasio, expresándose en una escala de unidades de Pt – Co (PCU). La medición se hace por comparación visual con soluciones de concentración de color conocida. Antes de la medición del color es necesario remover la turbidez. Las aguas subterráneas no suelen superar los valores de 5 PCU, pero las aguas superficiales pueden alcanzar varios centenares de CPU.

La remoción del color es una función del tratamiento del agua y se practica para hacer un agua adecuada para usos generales o industriales. La determinación del color es importante para evaluar las características del agua, la fuente del color y la eficiencia del proceso usado

para su remoción; cualquier grado de color es objetable por parte del consumidor y su remoción, por lo tanto, es objetivo esencial del tratamiento.

2.3.1. c. Olor y Sabor

En la determinación del sabor y el olor, no se aplican instrumentos ni unidades de medida. Los olores y sabores en el agua frecuentemente ocurren juntos y en general son prácticamente indistinguibles.

Muchas pueden ser las causas de los olores y sabores en el agua; entre las más comunes se encuentran la materia orgánica en solución, ácidos sulfhídrico, cloruro de sodio, sulfato de sodio y magnesio, hierro y manganeso, fenoles, aceites, productos de cloro, diferentes especies de algas, hongos y otros.

La determinación del olor y el sabor en el agua es útil para evaluar la calidad de la misma y su aceptabilidad por parte del consumidor, para el control de los procesos de una planta y para determinar en muchos casos la fuente de posible contaminación. El ensayo para determinarlos se hace cualitativamente, en muestras seguras para el consumo humano. El método más usado consiste en determinar la relación de dilución a la cual el olor o el sabor es apenas detectable. El valor de dicha relación se expresa como número detectable de olor o de sabor.

2.3.1. d. Temperatura

La determinación exacta de la temperatura es importante para diferentes procesos de tratamiento y análisis de laboratorio, puesto que, por ejemplo el grado de saturación de oxígeno disuelto, la actividad biológica y el valor de saturación con carbonato de calcio se relacionan con la temperatura.

Si no hay influencia térmica de aguas superficiales, un agua de capa que circule muy lentamente por un estrato impermeable situado a 100 m de profundidad poseerá una temperatura superior en dos o tres grados a otra que se encuentre en un terreno compacto situado solamente a 30 m abajo de la superficie, según la ley del gradiente geotérmico.

2.3.1. e. Conductividad Eléctrica Específica

Es la habilidad de conducir la corriente eléctrica. Es la comparación de la conductividad de 1 cm^3 de una sustancia con 1 cm^3 de agua pura, que tiene baja conductividad y es un buen aislante.

La conductividad es el inverso de la resistencia eléctrica, por lo tanto sus unidades son los mhos, donde $1 \text{ mho} = 1/1 \text{ ohm}$. En reportes de laboratorio suele presentarse en μmhos o $\mu\text{siemens}$ (mS) (1 micromho es igual a un microsiemens) en Sistema Internacional. La conductividad varía directamente proporcional con el aumento de minerales disueltos. Esta propiedad es fácilmente verificable en campo. Aguas con alta conductividad pueden causar corrosión en el hierro y el acero de la tubería de los pozos.

2.3.1. f. Sólidos totales

Cuando el constituyente principal del agua es el cloruro de sodio y la concentración es alta, se dice que el agua es salina. La salinidad es el número de gramos de sal por kilogramo de muestra; por ello se expresa en mg/L.

Formalmente la salinidad se define como los sólidos totales en el agua cuando todos los carbonatos han sido convertidos en óxidos, todos los bromuros y yoduros han sido reemplazados por una cantidad equivalente de cloruros y toda la materia orgánica ha sido oxidada. Numéricamente es menor que los sólidos disueltos, o residuo filtrable, y es un valor importante en aguas de mar, subterráneas y ciertos residuos industriales.

2.3.2. Propiedades Químicas del agua

2.3.2. a. Dureza

Es la capacidad del agua para producir espuma, es decir es la medida del consumo de jabón (detergente) del agua. Los minerales removidos por el jabón se vuelven espuma [Romero, 1996]. Esta propiedad es causada por los iones metálicos divalentes, es decir los cationes de

Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}). Esta propiedad es muy importante en acuíferos cársticos que tienen la característica de formarse en rocas carbónicas como la dolomita y la caliza, lo cual, hace que se diluyan rocas formando carbonatos y bicarbonatos.

La dureza se puede clasificar en dos grandes grupos: la carbonatada y la no carbonatada. La dureza carbonatada es también llamada temporal, porque se remueve con evaporación y precipitado del calcio y del magnesio. Esta se mide en términos del carbonato de calcio (mg/L). La dureza no carbonatada es igual a la diferencia entre la dureza total y la carbonatada. Esta indica la cantidad de calcio y magnesio combinados con sulfatos, cloruros, nitratos y algunas veces hierro; esta clase de dureza no se puede remover por evaporación.

Un agua se puede clasificar como dura o blanda según la normativa. Para efectos prácticos aguas con dureza menor de 50 mg/L son consideradas blandas, con dureza entre los 50 y los 150 mg/L, son de uso no objetable, y para durezas mayores de 150 mg/L se consideran duras. La concentración de carbonato de calcio es cinco veces mayor que la de carbonato de Magnesio [Driscoll, 1986].

Las aguas duras pueden causar incrustaciones de partículas en las paredes del pozo, y ponerlo fuera de funcionamiento. Existen problemas con los pozos perforados en rocas carbónicas porque la reducción de presiones causa la liberación de gas CO_2 que al reaccionar con el Magnesio y el Calcio, forman capas de carbonatos; esto hace que se produzcan pérdidas en la eficiencia, o el abandono del pozo en períodos inferiores a 3 años.

2.3.2. b. Sólidos totales disueltos (STD)

Es un indicador de la salinidad del agua, midiendo las sales inorgánicas. En el Sistema Internacional se acostumbra dar el resultado en mg/L. Los sólidos totales disueltos son más o menos equivalentes a los minerales disueltos en aguas de alta calidad.

Con las concentraciones de iones y cationes se verifican y se validan los análisis químicos de muestras. Para tal fin debe verificarse el equilibrio, por lo que la suma de miliequivalentes por litro de aniones debe ser igual a la de cationes.

2.3.2. c. Alcalinidad

La alcalinidad del agua puede definirse como la capacidad del agua para neutralizar ácidos, para reaccionar con iones hidrógeno, para aceptar protones, o como la medida del contenido total de sustancias alcalinas (OH^-). La determinación de la alcalinidad total y de las distintas formas de alcalinidad es importante en los procesos de coagulación química, ablandamiento, control de corrosión y evaluación de la capacidad tampona de un agua. En el ablandamiento de un agua por métodos de precipitación, la alcalinidad es un dato necesario para el cálculo de la cantidad de cal y carbonato de sodio necesario para el proceso. En aguas naturales la alcalinidad es debida generalmente a la presencia de tres clases de compuestos: bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos.

En algunas aguas es posible encontrar otras clases de compuestos (boratos, silicatos y fosfatos) que contribuyen a su alcalinidad; sin embargo en la práctica la contribución de estos es insignificante y puede ignorarse. La alcalinidad del agua puede determinarse por titulación con ácido sulfúrico 0.02 N y se expresa como mg/L de carbonato de calcio equivalente a la alcalinidad determinada. Los iones H^+ procedentes de la solución 0.02 N de H_2SO_4 neutralizan los iones de OH^- libres y los disociados por concepto de la hidrólisis de carbonatos y bicarbonatos [Romero, 1996].

2.3.2. d. Acidez

La acidez de un agua puede definirse como su capacidad para neutralizar bases, para reaccionar con iones hidroxilo, para ceder protones, o como la medida de su contenido total de sustancias ácidas. Si el agua subterránea es ácida tendría que corroer las partes metálicas del pozo y del sistema de bombeo.

La determinación de la acidez es de importancia en ingeniería sanitaria debido a las características corrosivas de las aguas ácidas y al costo que supone la remoción y el control de sustancias que producen corrosión. El factor de corrosión en la mayoría de las aguas es el dióxido de carbono, especialmente cuando está acompañado de oxígeno, pero en residuos industriales es la acidez mineral. El contenido de dióxido de carbono es también un factor

importante, por la presencia de iones H^+ libres, por la presencia de acidez mineral proveniente de los ácidos fuertes como el sulfhídrico, nítrico, clorhídrico, etc., y por la hidrolización de sales de ácido fuerte y base débil [Romero, 1996].

La causa más común de acidez en aguas es el CO_2 , el cual puede estar disuelto en el agua como resultado de las reacciones de los coagulantes químicos usados en el tratamiento o de la oxidación de la materia orgánica, o por disolución del dióxido de carbono atmosférico. El dióxido de carbono es un gas incoloro, no combustible, 1.53 veces más pesado que el aire, ligeramente soluble en agua.

2.3.2. e. Potencial de Hidrógeno, pH

Este término es usado universalmente para referirse a la intensidad de la condición de acidez o alcalinidad de una solución [Sawyer, 1978]. Esta propiedad se calcula con una expresión logarítmica. En el agua subterránea tiende a ser balanceado, pues en ella es difícil encontrar minerales libres. Se mide en una escala de 0 a 14, donde 7 es el límite de neutralidad. Valores de pH menores de 7 se consideran ácidos y mayores de 7 alcalinos.

El pH se mide con sustancias, con aditamentos como el papel universal o el papel tornasol y con aparatos llamados pH-metros.

Al variar el pH por el bombeo para una extensión inferior, cambios de temperatura, o gases que puedan escapar, puesto que las propiedades químicas del agua subterránea son muy sensibles con el ambiente, se pueden ver afectadas las rejillas de los pozos.

2.3.3. Constituyentes químicos

El agua en su camino hacia el acuífero viene de la lluvia con ciertas características adquiere otras en su trayecto de escorrentía y sigue transformándose en la infiltración, al llegar al acuífero tiene contacto con minerales de las rocas y seguirá transformándose lentamente. Los mecanismos que intervienen en la composición y evolución del agua son: la disolución (de gases y sales) y el ataque químico (carbo-disolución, hidrólisis, oxidación reducción, cambios de bases y reacciones bioquímicas). Por esta razón el agua subterránea presenta

una mineralización elevada. Sin embargo la composición química de las aguas subterráneas puede ser muy variable [Pérez Moreno, F; Olmez I.; UNESCO/WHO/UNEP 1992] dependiendo de la geología, de la profundidad del acuífero, de las actividades agrícolas y otros.

En aguas subterráneas contaminadas pueden cambiar las características y concentración de los elementos presentes, también puede suceder en aguas no contaminadas que existan elementos presentes en mayores concentraciones a las aquí descritas.

2.3.3. a. Cationes Macro constituyentes

- Calcio (Ca^{2+}): Su presencia en el agua subterránea es debida a la disolución de los carbonatos y sulfatos de calcio (calizas, dolomías y yesos). La concentración de calcio en el agua subterránea potable puede llegar hasta unos 1000 ppm sin que tenga efectos perjudiciales en la salud humana.
- Magnesio (Mg^{2+}): su concentración en el agua subterránea es debida a la disolución de dolomias y numerosos silicatos que lo contienen, aguas del mar, intercambio catiónico, etc. Por lo general se encuentra en menor proporción que el calcio, aunque en las aguas marinas puede ser hasta 5 veces más abundante.
- Sodio (Na^+): su contenido suele deberse a la hidrólisis de feldespatos. En otros ambientes se debe a la disolución de sulfatos, nitratos y cloruros sódicos o simplemente a intrusión marina.
- Potasio (K^+): se debe a la hidrólisis de los feldespatos, a disolución de sulfatos, nitratos y cloruros. Se suele encontrar en una proporción diez veces inferior al sodio debido a que las arcillas intercambian selectivamente K^+ por Na^+ .

2.3.3. b. Aniones Macro constituyentes

- Cloruro (Cl^-): Su presencia en el agua subterránea se debe al agua marina atrapada en los sedimentos, a la disolución de evaporitas cloruradas o a la intrusión marina. Cuando predomina este anión también lo hacen el sodio o el calcio.

- Sulfato (SO_4^{2-}): Es debido a la disolución de sulfatos como el yeso y la oxidación de sulfuros.
- Bicarbonato (CO_3H^-) y carbonato (CO_3^{2-}) Procede fundamentalmente de la disolución del CO_2 atmosférico, del suelo y de los carbonatos, esencialmente calizas y dolomias. La alcalinidad de las aguas se debe en la mayoría de las ocasiones a la presencia de CO_3H^- y CO_3^{2-} .
- Nitrato (NO_3^-): su presencia en el agua subterránea se debe a la descomposición de la materia orgánica, a contaminación por aplicación de fertilizantes agrícolas, efluentes urbanos e industriales, lixiviados de vertederos de residuos sólidos, etc.

2.3.3. c. Iones Microconstituyentes más comunes

- Nitrito (NO_2^-): Su presencia se debe a la reducción de los nitratos por actividad bacteriana. No debe existir en el agua porque es nocivo para la salud, siendo su presencia síntoma indudable de contaminación.
- Amonio (NH_4^+) y amoníaco disuelto (NH_3): Su presencia es evidencia de contaminación y actividad bacteriana.
- Litio (Li^+): Aparece en cantidades de pocos microgramos por litro. Procede de algunos minerales muy escasos y característicos de rocas magmáticas. Contenidos mas elevados deben ser estudiados por posibles daños a la salud.
- Fluoruros (F^-): Pueden proceder de algunos minerales que son típicos de rocas magmáticas. Las concentraciones mayores a los 1.5 mg/d pueden provocar fluorosis (enfermedad dental).
- Boro (B): En las aguas naturales se encuentra esencialmente en la forma de ácido bórico no disociado. Concentraciones superiores a 1 ó 2 mg/l en el agua de riego resultan nocivas para las plantas.
- Hierro (Fe): Su determinación incluye sus dos estados de oxidación, precipita como oxido o hidróxido, también puede encontrarse formando parte de compuestos orgánicos.

- Manganese (Mn): Su determinación incluye sus estados de oxidación +2 y +3. Su valencia +4 sólo aparece en el óxido insoluble. Tiene un comportamiento similar al hierro aunque tiene un potencial redox mayor.
- Anhídrido Fosfórico (P_2O_5): se encuentra formando fosfatos o tripolifosfatos, y formando parte de complejos orgánicos. Puede proceder de ciertos minerales, de lavados de suelos, lixiviados de basuras, del uso de tripolifosfatos para el desarrollo de sondeos, etc. En concentraciones de 0.01 mg/l entorpecen la floculación y favorecen la eutrofización.
- Anhídrido silícico (SiO_2): Se encuentra en concentraciones muy reducidas.

Entre los gases pueden considerarse como fundamentales el anhídrido carbónico (CO_2) y el oxígeno disuelto (O_2).



CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. Área de trabajo

3.1.1. Proceso de la elaboración y embotellado de agua

3.2. Muestreo de aguas

3.3. Determinación de parámetros fisicoquímicos

3.3.1. pH

3.3.2. Temperatura

3.3.3. Sólidos en suspensión

3.3.4. Potencial Ox-Red (ORP)

3.3.5. Alcalinidad

3.3.6. Dureza total

3.4. Determinación de cationes mayoritarios por Absorción Atómica

3.4.1. Preparación de estándares para la curva de calibración

a) Sodio

b) Potasio

c) Calcio

d) Magnesio

3.4.2. Preparación de muestras

a) Preparación de muestras para sodio y potasio

b) Preparación de muestras para calcio y magnesio

3.4.3. Lectura de los estándares y muestras por Absorción Atómica

3.5. Determinación de aniones mayoritarios

3.5.1. Sulfato

3.5.2. Nitrato

3.5.3. Cloruro

3.1. Área de trabajo

La empresa ELVIMAR S.R.L. se encuentra ubicado en la zona Villa Bolívar Municipal (ciudad de El Alto – La Paz), como se ve en la Figura N°10. ELVIMAR S.R.L. es un grupo industrial dedicado a la elaboración y el embotellado de agua natural (de 600 ml y 2000 ml), de jugos de fruta sabor frutilla, durazno, mango, piña y naranja (de 130 ml, 600 ml y 2000 ml) utilizando como fuente agua subterránea.

En el presente trabajo se desarrolló actividades en el *área de la purificación y embotellado de agua*.

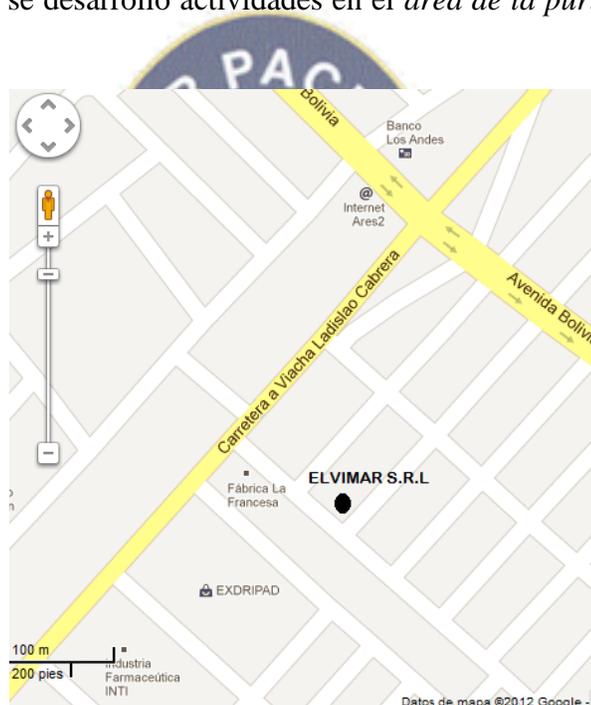


Figura N°10. Ubicación geográfica de la empresa ELVIMAR S.R.L. [Heart Google, 2012].

3.1.1. Proceso de la elaboración y embotellado de agua

El agua que llega desde un pozo subterráneo es almacenado en un tanque principal, donde se aplica un primer proceso de clorado. Generalmente el agua llega en un promedio de 1 a 1.5 ppm, sin embargo se necesita agregar al agua del tanque cloro para elevar la concentración de 3 a 5 ppm para desinfectar el agua [EPA, 1986].

Posteriormente es bombeada y ésta pasa por el filtro comercial de 5 micras, este filtro ayuda a retener sólidos suspendidos, como partículas contenidas en el agua y cualquier otro sólido que se encuentre en ella. Luego pasa al filtro de carbón activado granulado, donde se retienen las impurezas, sirve de purificador; éste a su vez tiene la función de permitir que el agua salga inodora, incolora e insípida, además retiene el cloro que inicialmente utilizamos. El agua posteriormente es conducida hacia dos filtros de resina catiónica, debido a que cumplen la función de disminuir la dureza del agua. Luego pasa por un filtro mixto, la misma consiste de una resina catiónica y aniónica.

Por último el agua se lo expone a la luz Ultravioleta y al ozonizador esto con el fin de eliminar cualquier contaminación microbológica. En la Figura N°11 se muestra todo el sistema de filtros y la luz UV-O₃ bajo el cual es tratada el agua subterránea.



Figura N°11. Sistema de tratamiento del agua subterránea en la empresa ELVIMAR S.R.L.



Figura N°12. Sistema de luz UV-O₃ en el proceso de purificación de aguas en la empresa ELVIMAR S.R.L.

Al finalizar el proceso del tratamiento de agua, el agua tratada está lista para ser utilizada dentro del proceso de elaboración y embotellado del agua como se muestra en la Figura N° 13-14.

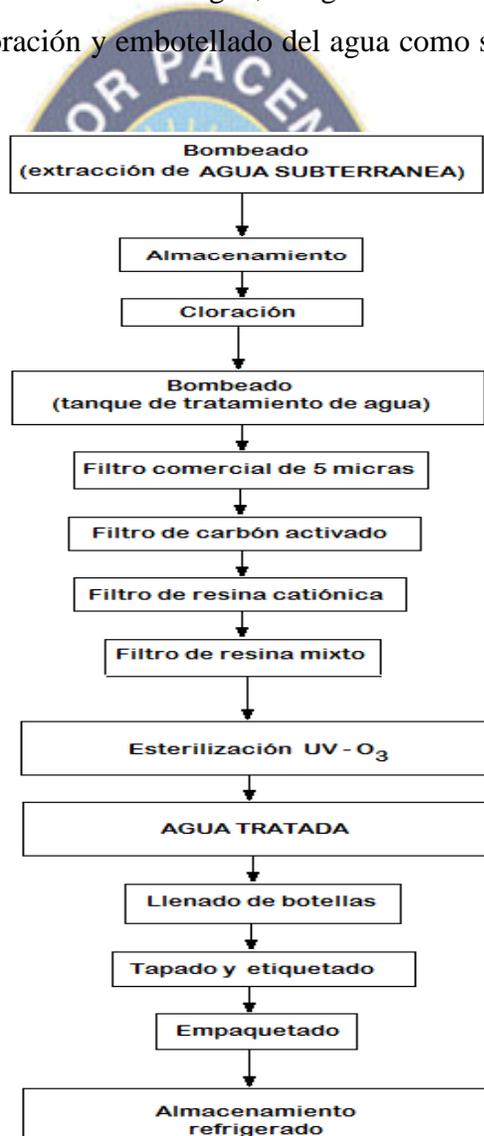


Figura N°13. Proceso de la elaboración y embotellado del agua a partir del agua subterránea en la empresa ELVIMAR S.R.L.



Figura N°14. Embotellado del agua tratada de la empresa ELVIMAR S.R.L.

3.2. Muestreo de aguas

Se ha procedido a tomar muestras de agua subterránea y muestras de agua tratada en botellas de plásticos esterilizados y nuevos, esto para evitar contaminar las muestras. La toma de muestras de agua subterránea se realizó del punto de entrada hacia el tanque de alimentación principal, dejando escurrir previamente el agua por 10-15 minutos con el fin de obtener una muestra representativa y homogénea.

Los frascos se enjuagan tres veces con la muestra de agua hasta llenar los frascos y posterior al tiempo de escurrimiento [SM 1998]. Para toda colecta de muestra de agua se llena en el frasco dejando que sobre pase el volumen. Se ha realizado varias recolectas de la misma muestra:

- Con la primera recolecta se ha procedido a medir los parámetros de campo (in situ) como: pH, temperatura, potencial Ox-Red/ORP, alcalinidad y sólidos en suspensión.
- Al segundo frasco recolectado con la muestra se ha llevado a preservación con la adición de ácido nítrico concentrado al 1% y a 4 °C para evitar que la temperatura afecte las muestras [GEMS WHO 1992]. El frasco es destinado para la determinación de cationes mayoritarios. El ácido evita la oxidación o precipitación de los cationes en la misma. El frasco se tapó herméticamente sin dejar burbujas en el interior.
- Al tercer frasco recolectado con la muestra se ha llevado a preservación a 4 °C sin la adición de ácido nítrico concentrado [GEMS WHO 1992]. El frasco es destinado para la

determinación de aniones mayoritarios. El frasco se tapó herméticamente sin dejar burbujas en el interior.

Las condiciones de preservación de las muestras en función de los parámetros de estudio se han seguido de acuerdo a las normas dadas por el Sistema de Monitoreo Medioambiental Global y la Organización Mundial de Salud (Global Environment Monitoring System and World Health Organization, GEMS/WHO) como se muestra en Anexo E.

En la Tabla N°6, se muestra la nominación a las muestras de aguas subterráneas y tratadas recolectadas en los diferentes períodos del mes de Abril a Junio:

Tabla N°6. Nominación de las muestras de agua colectadas.

Muestreo	Muestras de agua	
	Subterráneas	Tratadas
Toma 1	S21-04	T21-04
Toma 2	S05-05	T05-05
Toma 3	S19-05	T19-05
Toma 4	S02-06	T02-06

3.3. Determinación de parámetros fisicoquímicos

3.3.1 pH

La medición de pH in-situ consistió en sumergir la cabeza del electrodo en el líquido homogenizado contenido en el vaso de precipitados, previo enjuague con la misma muestra. Se registra el pH y con posterior enjuague con agua destilada para por último secar y tapar el electrodo. Las lecturas se han realizado por duplicado con el pH-metro de HANNA Instruments (HI 98172) como se muestra en la Figura N°15.

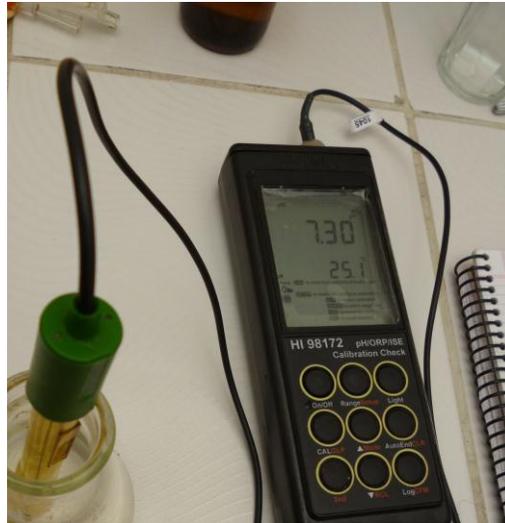


Figura N°15. Medidas de pH-metro HANNA Instruments, modelo HI 98172.

3.3.2. Temperatura

Se ha procedido a la medición de la temperatura con un termómetro de mercurio con escala de 0.1 °C, de las muestras respectivas inmediatamente después de recolectar la muestra. La medición consistió en:

- sumergir el bulbo del termómetro hasta que se haya formado un equilibrio térmico entre el termómetro y la muestra de agua.
- realizar la lectura de la temperatura con el termómetro aun sumergido.

3.3.3. Sólidos en suspensión

Se filtra un volumen de muestra de agua utilizando una membrana Millipore de 0.45 micrómetros como se ve en la Figura N°16, el filtro se lo pesa previamente. Luego el filtro húmedo con algún resto de material sólido proveniente de la muestra es llevado a la estufa para el proceso de secado a 85°C como se muestra en la Figura N°17. Finalmente se pesa el papel filtro a temperatura ambiente y se procede con el cálculo de sólidos en suspensión de la muestra.



Figura N°16. Filtración con una membrana Millipore de 0.45 μm .

3.3.4. Potencial Ox-Red (ORP)

La medición in-situ del potencial de Ox-Red consistió en sumergir la punta del electrodo de ORP en la muestra de agua y esperar unos segundos para que la lectura se estabilice. Las medidas fueron realizadas con el equipo HANNA Instruments modelo HI 98172 con una resolución de 0,1 mV.

3.3.5. Alcalinidad

La alcalinidad se ha determinado mediante la valoración de la muestra de agua con una solución estándar de un ácido fuerte mediante dos puntos sucesivos de equivalencia, observados a través de indicadores ácido-base. Para la determinación de la alcalinidad se ha seguido los siguientes pasos:

- Colocar 200 ml de muestra de agua en un matraz erlenmeyer,
- Agregar 3 gotas de indicador de fenolftaleína al 1%.
- Titular la muestra con HCl 0.02 N hasta que el color rosado desaparezca completamente, es decir transparente,
- Adicionar 2 gotas de indicador Naranja de Metilo al 3%,
- Continuar con la titulación de la muestra con HCl 0.02 N hasta que cambie el color amarillo a rojo, como se muestra en la Figura N°17.

- Calcular la alcalinidad total en unidades de mg CaCO₃/L, mediante la siguiente ecuación:

$$\text{Alcalinidad} = \frac{V_{\text{ácido}} \times N_{\text{ácido}}}{V_{\text{muestra}}} \times 50000 \text{ mg/l CaCO}_3$$

$$\text{Alcalinidad total} = (\text{CO}_3^{2-}) + (\text{HCO}_3^-) + (\text{OH}^-)$$

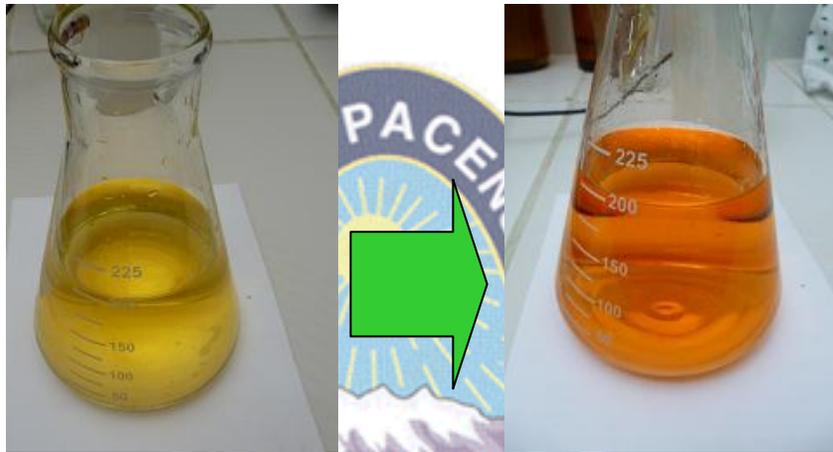


Figura N°17. Determinación de bicarbonato en agua mediante valoración con HCl 0.02N empleando Naranja de metilo como indicador.

3.3.6. Dureza total

La determinación de la dureza de las aguas se ha realizado mediante el método de la titulación con solución de EDTA (Ácido etilendiaminotetraacético), dado que este agente complejante permite valorar tanto la concentración de Ca²⁺ como la de Mg²⁺. Para lo cual se ha seguido los siguientes pasos:

- Colocar 25 ml de muestra de agua en un matraz Erlenmeyer,
- Agregar 1 ml de solución buffer de pH=10,
- Agregar 3 gotas de indicador de Eriocromo Negro T (NET) al 0.5%, la misma hace que se forme un complejo de color púrpura.
- Titular la muestra con solución estándar de EDTA 0.01 M hasta la aparición de un color azul como se muestra en la Figura N°18.
- Calcular la alcalinidad total

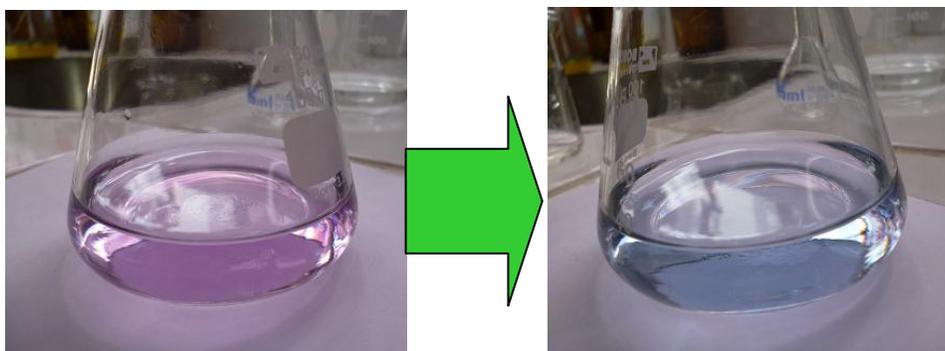


Figura N°18. Determinación de la dureza total en agua mediante valoración con EDTA 0.01 M utilizando NET como indicador.

3.4. Determinación de cationes mayoritarios por Absorción Atómica

Después de la filtración de las muestras de aguas a través de un filtro millipore de 0.45 micrómetros, se ha procedido con la determinación de los cationes mayoritarios (Sodio, Potasio, Magnesio y Calcio) mediante el Espectrómetro de Absorción Atómica AAnalyst 200 PerkinElmer Instruments como se muestra en la Figura N°19 (Anexo A). El espectrómetro está equipado con lámparas de cátodo hueco de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio.



Figura N°19. Espectrómetro de Absorción Atómica AAnalyst 200 PerkinElmer Instruments.

3.4.1. Preparación de estándares para la curva de calibración

a) Sodio

En la preparación de soluciones patrón de sodio (Tabla N°7) requeridas para la construcción de la curva de calibración se ha utilizado micropipetas volumétricas de 500 y 1000 μL para efectuar diluciones a partir de una solución patrón de 20 mg/L de Na (la misma ha sido obtenida por previa dilución: 0.5 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de Na aforado a un volumen de 25 mL con agua desionizada, ver Figura N°20).

Tabla N°7. Datos de la preparación de soluciones patrón de sodio para la curva de calibración.

S O D I O	Solución estándar preparado, ppm	Volumen, ml (20 ppm Na)	Volumen, ml (5000 ppm Li)	Volumen de aforo, ml
	0.1	0.5	10	100
	0.2	1.0	10	100
	0.3	1.5	10	100
	0.4	2.0	10	100
	0.5	2.5	10	100

b) Potasio

En la preparación de soluciones patrón de potasio (Tabla N°8) requeridas para la construcción de la curva de calibración se ha utilizado micropipetas volumétricas de 500 y 1000 μL para efectuar diluciones a partir de una solución patrón de 20 mg/L de K (la misma ha sido obtenida por previa dilución: 0.5 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de K aforado a un volumen de 25 mL con agua desionizada, ver Figura N°20).

Tabla N°8. Datos de la preparación de soluciones patrón de potasio para la curva de calibración.

P O T A S I O	Solución estándar preparado ppm	Volumen, ml (20ppm K)	Volumen, ml (5000 ppm Li)	Volumen de aforo, ml
	0.2	1.0	10	100
	0.4	2.0	10	100
	0.6	3.0	10	100
	0.8	4.0	10	100
	1.0	5.0	10	100

c) Calcio

En la preparación de soluciones patrón de calcio (Tabla N°9) requeridas para la construcción de la curva de calibración se ha utilizado micropipetas volumétricas de 500 y 1000 μ L para efectuar diluciones a partir de una solución patrón de 100 mg/L de Ca (la misma ha sido obtenida por previa dilución: 2.5 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de Ca aforado a un volumen de 25 mL con agua desionizada, ver Figura N°20).

Tabla N°9. Datos de la preparación de soluciones patrón de calcio para la curva de calibración.

C A L C I O	Solución estándar preparado ppm	Volumen, ml (20ppm Ca)	Volumen, ml (5000 ppm Sr)	Volumen de aforo, ml
	1.0	1.0	10	100
	2.0	2.0	10	100
	3.0	3.0	10	100
	4.0	4.0	10	100
	5.0	5.0	10	100

d) Magnesio

En la preparación de soluciones patrón de magnesio (Tabla N°10) requeridas para la construcción de la curva de calibración se ha utilizado micropipetas volumétricas de 500 y

1000 μL para efectuar diluciones a partir de una solución patrón de 20 mg/L de Mg (la misma ha sido obtenida por previa dilución: 0.5 mL de la solución estándar de 1000 mg/L de Mg aforado a un volumen de 50 mL con agua desionizada, ver Figura N°20).

Tabla N°10. Datos de la preparación de soluciones patrón de magnesio para la curva de calibración.

M A G N E S I O	Solución estándar preparado ppm	Volumen, ml (20ppm Mg)	Volumen, ml (5000 ppm Sr)	Volumen de aforo, ml
	0.05	0.5	10	100
	0.10	1.0	10	100
	0.15	1.5	10	100
	0.20	2.0	10	100
	0.25	2.5	10	100

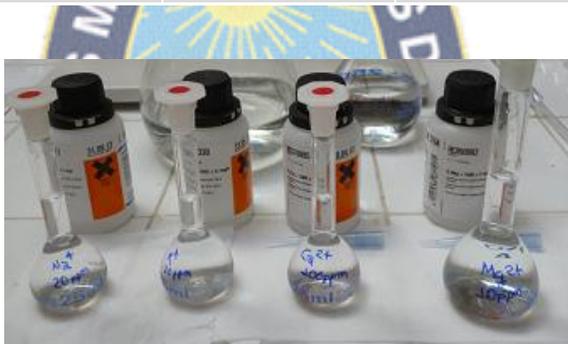


Figura N°20. Dilución previa de la solución estándar de 1000 ppm de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio.



Figura N°21. Preparación de soluciones patrón de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio para la construcción de las curvas de calibración respectivas.

3.4.2. Preparación de muestras

a) Preparación de muestras para sodio y potasio.

Para la determinación de sodio y potasio, las muestras de agua deben previamente prepararse con la adición de 1 ml de solución de litio de 5000 mg/l por cada 10 ml de muestra.

b) Preparación de muestras para calcio y magnesio.

Para la determinación de calcio y magnesio, las muestras de agua deben previamente prepararse con la adición de 1 ml de estroncio de 5000 mg/l por cada 10 ml de muestra.

3.4.3. Lectura de los estándares y muestras por Absorción Atómica

Se ha seguido los siguientes pasos para la lectura de los estándares y muestras en el equipo de Absorción Atómica:

- Instalar la lámpara de cátodo hueco de acuerdo al catión que se va analizar (Na, K, Ca y Mg).
- Enjuagar el nebulizador aspirando agua con 1,5 ml de HNO₃ concentrado/L.
- Atomizar un blanco y ajustar a cero el instrumento.
- Atomizar las soluciones estándar en una flama de aire/acetileno.
- Atomizar las muestras de agua preparadas en una flama de aire/acetileno.
- Registrar la absorbancia a la longitud de onda del elemento (K, Na, Ca y Mg) de las soluciones estándar y de las muestras de agua.

3.5. Determinación de aniones mayoritarios

3.5.1. Sulfato

La determinación de sulfatos se ha realizado mediante el empleo del espectrofotómetro Multiparámetro HACH (Anexo B) en modo para determinación de sulfatos con SulfaVer4 como se muestra en la Figura N°22. Para lo cual se ha preparado soluciones estándar en el

rango de 2.00 A 70.00 ppm a partir de la solución estándar de 500 mg/L. Posteriormente se ha procedido a la lectura de las muestras de aguas por triplicado:



Figura N°22. Determinación de Sulfatos con el equipo Multiparámetro HACH.

3.5.2. Nitrato

La determinación de nitratos se realizó mediante el método potenciométrico (Anexo C), utilizando un medidor portable de pH/mV/ISE/Temperatura, modelo HI 98185 (HANNA INSTRUMENTS) con electrodo de ión selectivo para nitratos, como se muestra en la Figura N°23. Para lo cual se ha preparado soluciones estándar de nitrato por pesada en el rango de 0.1 a 100.0 mg/L a partir de la solución estándar de 10, 100 y 1000 mg/L (Anexo F). Posteriormente se ha procedido a la lectura de las muestras de aguas por triplicado.



Figura N°23. Determinación de Nitratos con electrodo de ión selectivo para nitratos, HANNA Instruments.

3.5.3. Cloruro

La determinación de cloruros se ha realizado mediante el método potenciométrico (Anexo C), utilizando un medidor portable de pH/mV/ISE/Temperatura, modelo HI 98185 (HANNA INSTRUMENTS) con electrodo de ión selectivo para cloruros, como se muestra en la Figura N°24. Para lo cual se ha preparado soluciones estándar de cloruros por pesada en el rango de 0.1 a 100.0 mg/L a partir de la solución estándar de 10 y 1000 mg/L (Anexo F). Posteriormente se ha procedido a la lectura de las muestras de aguas por triplicado.



Figura N°24. Determinación de cloruros utilizando el electrodo de ión selectivo HANNA Instruments.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES



4.1. Evaluación de parámetros fisicoquímicos

4.1.1. pH

4.1.2. Temperatura

4.1.3. Sólidos en suspensión

4.1.4. Potencial Ox-Red (ORP)

4.1.5. Alcalinidad

4.1.6. Dureza total

4.2. Evaluación de cationes mayoritarios

4.2.1. Sodio

4.2.2. Potasio

4.2.3. Calcio

4.2.4. Magnesio

4.3. Evaluación de aniones mayoritarios

4.3.1. Sulfato

4.3.2. Nitrato

4.3.3. Cloruro

4.1. Evaluación de parámetros fisicoquímicos

A continuación se mostrará los resultados de la determinación de los diferentes parámetros fisicoquímicos de las aguas subterráneas y tratadas de la Empresa ELVIMAR S.R.L y la respectiva evaluación de los mismos.

4.1.1. pH

En la Tabla N°11 se muestra los resultados de pH del agua subterránea y tratada. Los valores de pH obtenidos para aguas subterráneas se encuentran entre 7.19 y 7.39 y para aguas tratadas entre 7.63 y 7.85.

Tabla N°11. Resultados de pH del agua subterránea y tratada.

Muestra de agua	Código	Temperatura					
		pH (1)	pH (2)	pH (3)	pH promedio	Desviación Estándar	Resultado pH
Subterránea	S21-04	7.18	7.19	7.20	7.190	0.010	7.19 ± 0.02
	S05-05	7.33	7.28	7.32	7.310	0.026	7.31 ± 0.07
	S19-05	7.42	7.37	7.37	7.387	0.029	7.39 ± 0.07
	S02-06	7.30	7.34	7.33	7.323	0.021	7.32 ± 0.05
Tratada	T21-04	7.68	7.60	7.62	7.633	0.042	7.63 ± 0.10
	T05-05	7.89	7.65	7.65	7.730	0.139	7.73 ± 0.34
	T19-05	7.89	7.81	7.86	7.853	0.040	7.85 ± 0.10
	T02-06	7.74	7.69	7.70	7.710	0.026	7.71 ± 0.07

Estos resultados de pH nos indican que se encuentran dentro del rango del límite máximo aceptable entre 6.5 y 9.0 [IBNORCA NB 512; Leal, M. T.].

Los valores de pH obtenidos en aguas subterráneas y tratadas son constantes, no cambiaron en las diferentes fechas de muestreo como se muestra en la Figura N°25. No se observa una gran diferencia significativa de pH entre las aguas subterráneas y tratadas, sin embargo estas son ligeramente básicas lo cual es recomendable para la eliminación total de los microorganismos.

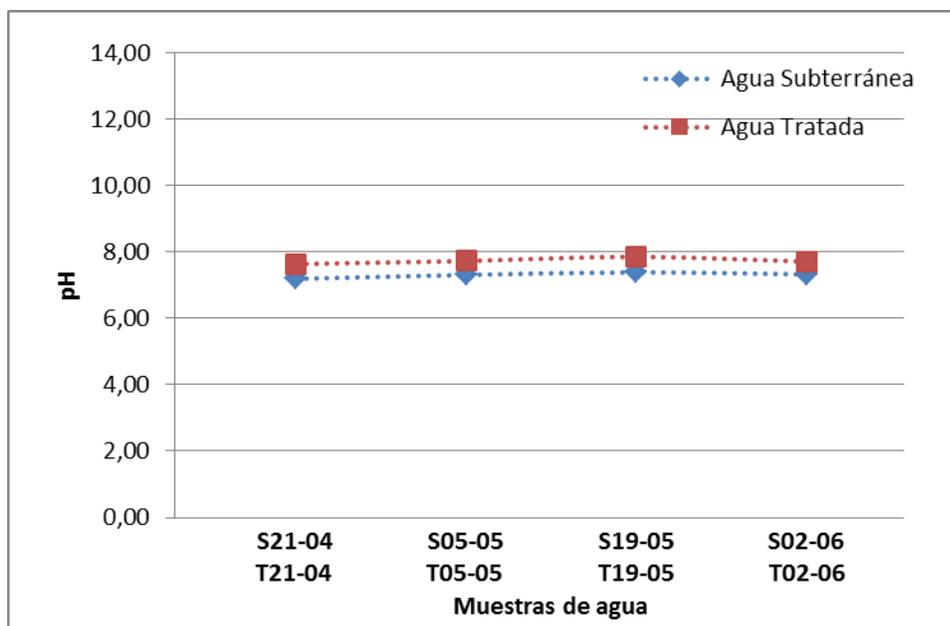


Figura N°25. Resultados de pH in situ de aguas subterráneas y tratadas.

4.1.2. Temperatura

En la Tabla N°12 se muestra los resultados de temperatura de aguas subterráneas y tratadas. Los valores de temperatura medidos para aguas subterráneas se encuentran entre 11.0 y 11.9 y para agua tratada entre 9.1 y 10.1.

Tabla N°12. Resultados de temperatura del agua subterránea y tratada.

Muestra de agua	Código	Temperatura					
		T, °C (1)	T, °C (2)	T, °C (3)	Promedio, °C	Desviación Estándar	Resultado, °C
Subterránea	S21-04	11.8	12.0	12.0	11.93	0.115	11.9 ± 0.3
	S05-05	11.0	11.1	11.2	11.10	0.100	11.1 ± 0.2
	S19-05	11.0	11.0	11.0	11.00	0.000	11.0 ± 0.0
	S02-06	11.2	11.2	11.1	11.17	0.058	11.2 ± 0.1
Tratada	T21-04	10.0	10.0	10.0	10.00	0.000	10.0 ± 0.0
	T05-05	10.0	10.1	10.1	10.07	0.058	10.1 ± 0.1
	T19-05	9.4	9.4	9.3	9.37	0.058	9.4 ± 0.1
	T02-06	9.2	9.1	9.1	9.133	0.058	9.1 ± 0.1

La temperatura de las muestras de aguas subterráneas y tratadas no varía significativamente como se muestra en la Figura N°26.

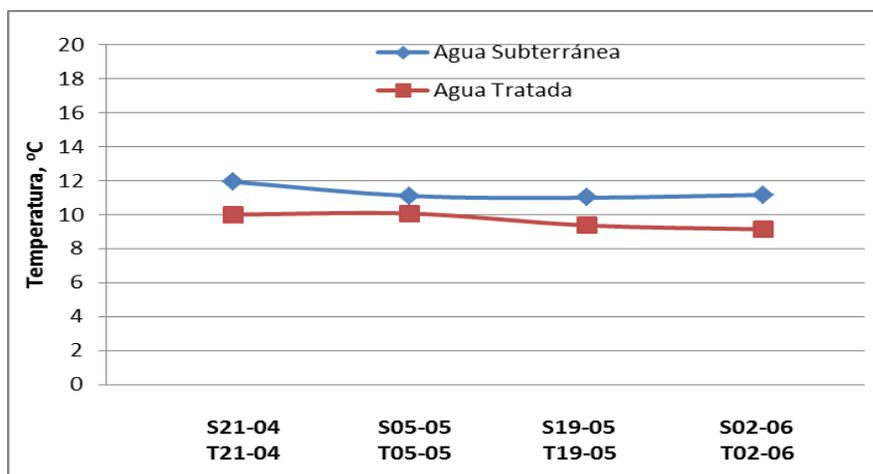


Figura N°26. Temperatura de aguas subterráneas y tratadas.

4.1.3. Sólidos en suspensión

En la Tabla N°13 se muestra los resultados de sólidos suspendidos del agua subterránea y tratada. Los valores de sólidos en suspensión para agua subterránea se encuentran entre 0.90 y 1.00 y para agua tratada entre 0.17 y 0.18.

Tabla N°13. Resultados de sólidos en suspensión del agua subterránea y tratada.

Muestra de agua	Código	Sólidos en suspensión					
		SS, mg/L (1)	SS, mg/L (2)	SS, mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación Estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	0.88	0.91	0.9	0.897	0.015	0.90 ± 0.04
	S05-05	0.98	0.95	0.96	0.963	0.015	0.96 ± 0.04
	S19-05	0.99	0.99	0.98	0.987	0.006	0.99 ± 0.01
	S02-06	1.02	0.97	1.01	1.000	0.026	1.00 ± 0.07
Tratada	T21-04	0.16	0.18	0.17	0.170	0.010	0.17 ± 0.02
	T05-05	0.18	0.17	0.18	0.177	0.006	0.18 ± 0.01
	T19-05	0.17	0.16	0.17	0.167	0.006	0.17 ± 0.01
	T02-06	0.19	0.18	0.18	0.183	0.006	0.18 ± 0.01

En las muestras de agua subterránea se tiene una presencia bastante baja de sólidos suspendidos por lo que se puede considerar como agua cristalina, dado que se considera que en aguas con sólidos totales suspendidos en concentraciones menores a 20 mg/L se los clasifica como aguas cristalinas. Aguas con niveles entre 40 y 80 mg/L se consideran como aguas poco claras, mientras que agua con una concentración mayor a 150 mg/L son usualmente considerados como turbias [EPA 1979].

De la misma forma los resultados obtenidos para aguas tratadas han demostrado que se encuentran en concentraciones menores a 20 mg/L. Además las aguas tratadas presentan una menor concentración sólidos totales suspendidos, lo cual mejora la calidad del agua purificada. Los sólidos en suspensión en las diferentes fechas de muestreo de aguas se han mantenido constantes como se muestra en la Figura N°27.

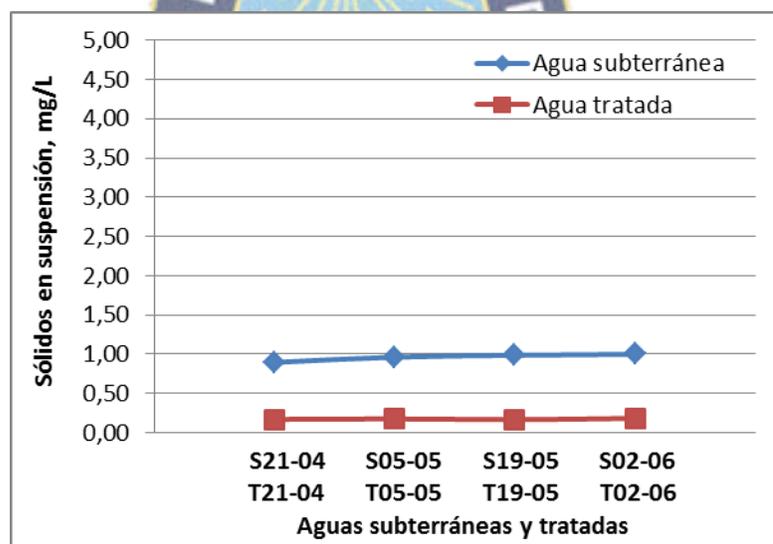


Figura N°27. Comportamiento de sólidos en suspensión de aguas subterráneas y tratadas.

4.1.4. Potencial Ox-Red (ORP)

En la Tabla N°14 se muestra los resultados de ORP del agua subterránea y tratada. Los valores de potencial de oxidación-reducción para agua subterránea se encuentran entre -19.6 y -30.9 mV y para agua tratada entre -47.9 y -56.8 mV.

Tabla N°14. Resultados de ORP del agua subterránea y tratada.

Muestra de agua	Código	Potencial eléctrico / ORP					
		ORP, -mV (1)	ORP, -mV (2)	ORP, -mV (3)	Promedio, -mV	Desviación estándar	Resultado, -mV
Subterránea	S21-04	21.7	22.6	24.3	22.87	1.32	22.9 ± 3.3
	S05-05	26.0	25.0	27.2	26.07	1.10	26.1 ± 2.7
	S19-05	30.3	32.6	29.9	30.93	1.46	30.9 ± 3.6
	S02-06	19.5	19.7	19.5	19.57	0.12	19.6 ± 0.3
Tratada	T21-04	58.2	55.3	52.7	55.40	2.75	55.4 ± 6.8
	T05-05	58.1	45.4	40.2	47.90	9.21	47.9 ± 22.9
	T19-05	59.4	54.4	56.6	56.80	2.51	56.8 ± 6.2
	T02-06	50.1	52.3	50.8	51.07	1.12	51.1 ± 2.8

Los resultados del potencial eléctrico se encuentran dentro de los valores reportados para aguas subterráneas. Para el caso de las aguas tratadas, los valores de ORP se encuentran dentro del límite permisible para consumo humano [SSA1-1994]. En ambos casos, no existe una variación significativa del potencial eléctrico como se muestra en la Figura N°28.

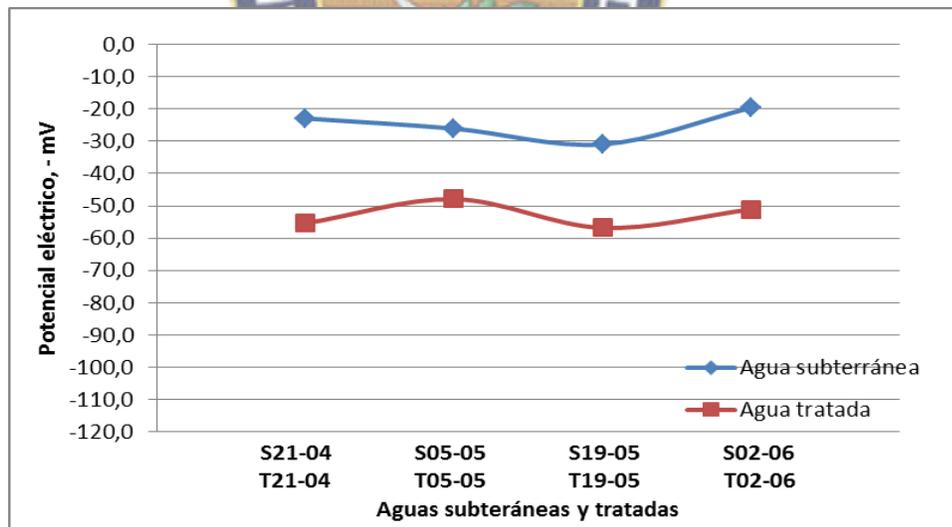


Figura N°28. Comportamiento del potencial eléctrico de aguas subterráneas y tratadas.

4.1.5. Alcalinidad

En la Tabla N°16, se muestran los resultados de alcalinidad como bicarbonatos dado que no se encontró carbonatos e hidroxilos mediante la valoración con HCl 0.0203 N utilizando como indicador fenolftaleína (Tabla N°15).

Los resultados de la alcalinidad como bicarbonatos para aguas subterráneas se encuentran entre 7.8 y 8.2 mg/L y para agua tratada entre 5.7 y 6.2 mg/L.

Tabla N°15. Volumen gastado de HCl 0.0203 N utilizando naranja de metilo en muestras de agua para alcalinidad.

Código	Volumen de muestra	Volumen gastado de HCl 0.0203 N		
		V, ml (1)	V, ml (2)	V, ml (3)
S21-04	100	0.50	0.45	0.45
S05-05	100	0.50	0.50	0.45
S19-05	200	0.90	0.90	0.95
S02-06	100	0.45	0.50	0.45
T21-04	100	0.30	0.35	0.35
T05-05	100	0.35	0.40	0.35
T19-05	200	0.70	0.70	0.65
T02-06	200	0.65	0.70	0.65

Tabla N°16. Resultados de alcalinidad como bicarbonatos mediante la titulación con HCl utilizando naranja de metilo en muestras de agua.

Muestra de agua	Código	Alcalinidad como bicarbonatos					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	8.53	7.67	7.67	7.957	0.497	8.0 ± 1.2
	S05-05	8.53	8.53	7.67	8.243	0.497	8.2 ± 1.2
	S19-05	7.67	7.67	8.10	7.813	0.248	7.8 ± 0.6
	S02-06	7.67	8.53	7.67	7.957	0.497	8.0 ± 1.2
Tratada	T21-04	5.12	5.97	5.97	5.687	0.491	5.7 ± 1.2
	T05-05	5.97	6.82	5.97	6.253	0.491	6.2 ± 1.2
	T19-05	5.97	5.97	5.54	5.827	0.248	5.8 ± 0.6
	T02-06	5.54	5.97	5.54	5.683	0.248	5.7 ± 0.6

La alcalinidad como bicarbonatos tanto en las aguas subterráneas y tratadas permanece constante en las diferentes fechas de muestreo como se muestra en la Figura N°29.

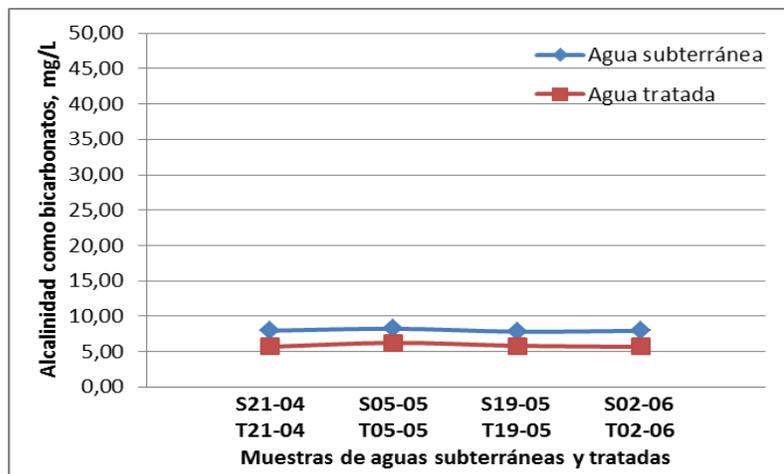


Figura N°29. Comportamiento de la alcalinidad como bicarbonatos de aguas subterráneas y tratadas.

Los resultados de la alcalinidad obtenidos están dentro del límite máximo aceptable en muestras de agua subterránea como en las tratadas, por tanto apta para consumo humano [SSA1-1994].

4.1.6. Dureza total

En la Tabla N°18 se muestra los resultados de la dureza total de las muestras de agua mediante la valoración con EDTA 0.0100 M utilizando negro de eriocromo-T como indicador (Tabla N°17). Los resultados de la dureza total para agua subterránea se encuentran entre 54.0 y 60.0 mg/L y para agua tratada entre 2.7 y 3.0 mg/L.

Tabla N°17. Volumen gastado de EDTA 0.0100 M utilizando NET como indicador en muestras de agua para dureza total.

Código	Volumen de muestra	Volumen gastado de EDTA 0.01 M		
		V, ml (1)	V, ml (2)	V, ml (3)
S21-04	100	6.0	5.9	5.95
S05-05	100	5.7	5.8	5.7
S19-05	100	5.6	5.6	5.5
S02-06	100	5.5	5.4	5.5
T21-04	100	0.3	0.3	0.25
T05-05	100	0.25	0.25	0.3
T19-05	100	0.3	0.3	0.3
T02-06	100	0.25	0.25	0.3

Tabla N°18. Resultados de la dureza total del agua subterránea y tratada.

Muestra de agua	Código	Dureza Total					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	60.05	59.05	59.55	59.550	0.500	60.0 ± 1.2
	S05-05	57.05	58.05	57.05	57.383	0.578	57.4 ± 1.4
	S19-05	56.05	56.05	55.05	55.717	0.578	55.7 ± 1.4
	S02-06	55.05	54.05	53.05	54.050	0.578	54.0 ± 1.4
Tratada	T21-04	3.00	3.00	2.50	2.833	0.289	2.8 ± 0.7
	T05-05	2.50	2.50	3.00	2.667	0.289	2.7 ± 0.7
	T19-05	3.00	3.00	3.00	3.000	0.000	3.0 ± 0.0
	T02-06	2.50	2.50	3.00	2.667	0.289	2.7 ± 0.7

Los valores de la dureza total en agua subterránea se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, 500 mg/L CaCO₃ [IBNORCA NB 512; SSA1-1994].

Se observa una disminución significativa de la dureza total del agua tratada con respecto al agua subterránea como se muestra en la Figura N°30, lo cual mejora la calidad del agua purificada por tanto es más óptimo para consumo humano. Esta disminución se atribuye a la exposición del agua subterránea a resinas catiónicas durante el proceso de purificación.

La dureza total en las muestras de aguas subterráneas y tratadas permanece constante durante el período de muestreo, mes de Abril a Junio.

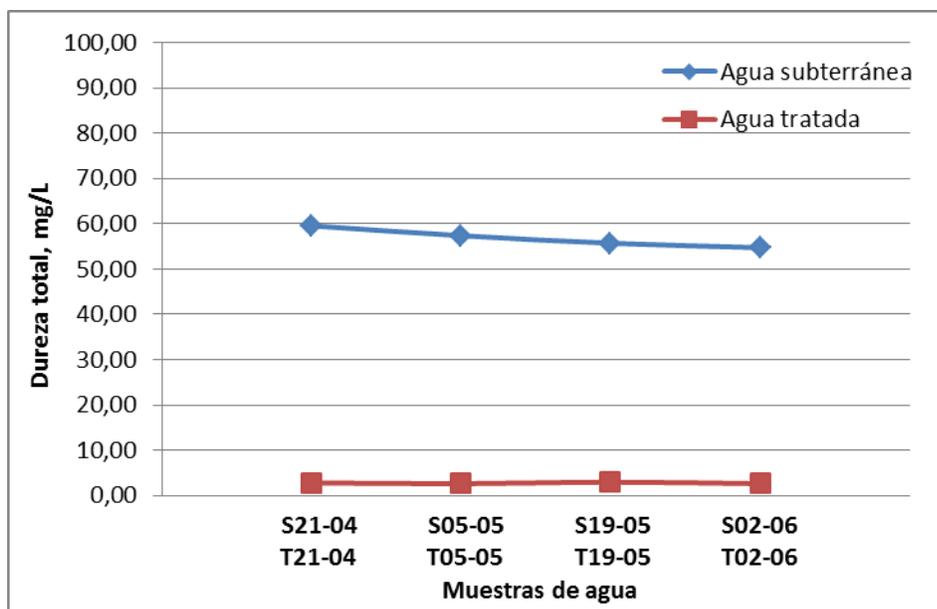


Figura N°30. Comportamiento de la alcalinidad como bicarbonatos de aguas subterráneas y tratadas.

4.2. Evaluación de cationes mayoritarios

4.2.1. Sodio

En la Figura N°31 se muestra la curva de calibración para sodio, obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de las respectivas soluciones estándar de iones Na^+ (ver Tabla N°19). La misma presentó un alto coeficiente de correlación igual a 0.996.

Tabla N°19. Resultados de absorbancia de las soluciones estándar de Na^+ .

Solución estándar, mg/L	SODIO			
	Abs., (1)	Abs., (2)	Abs., (3)	Absorbancia promedio
0.1	0.057	0.056	0.057	0.057
0.2	0.125	0.126	0.123	0.125
0.3	0.194	0.194	0.195	0.194
0.4	0.287	0.288	0.287	0.287
0.5	0.372	0.371	0.373	0.372

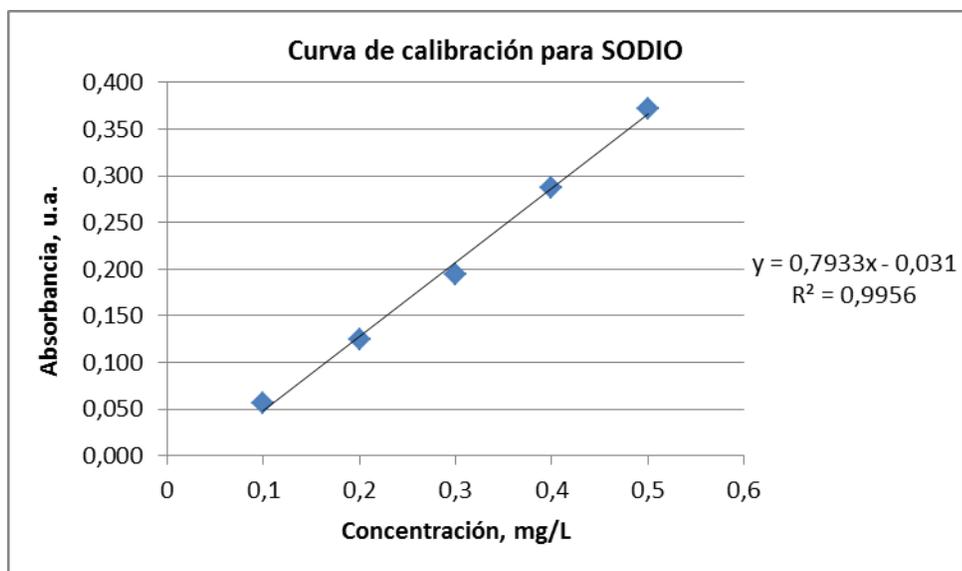


Figura N°31. Curva de calibración para sodio.

Las concentraciones de sodio en muestras de agua subterránea se encuentran entre 12.92 y 14.57 mg/L y en aguas tratadas entre 76.50 y 93.92 mg/L como se muestra en la Tabla N°20.

Tabla N°20. Resultados de la concentración de ión Na⁺ en muestras de agua por Absorción Atómica.

Muestra de agua	Código	SODIO					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	13.950	13.850	13.950	13.917	0.058	13.92 ± 0.14
	S05-05	14.700	14.550	14.450	14.567	0.126	14.57 ± 0.31
	S19-05	13.150	13.150	13.200	13.167	0.029	13.17 ± 0.07
	S02-06	12.950	12.950	12.850	12.917	0.058	12.92 ± 0.14
Tratada	T21-04	94.250	93.750	93.750	93.917	0.289	93.92 ± 0.72
	T05-05	85.750	85.000	85.500	85.417	0.382	85.42 ± 0.95
	T19-05	86.000	86.000	85.000	85.667	0.577	85.67 ± 1.43
	T02-06	77.000	78.000	74.500	76.500	1.803	76.50 ± 4.48

Los valores de las concentraciones de sodio que se han encontrado en aguas subterráneas se encuentran muy por debajo del límite permisible, 200 mg/L [UNESCO/WHO/UNEP 1992; SSA1-1994]. Sin embargo, se tiene un incremento del ión sodio en aguas tratadas con

respecto a aguas subterráneas como se muestra en la Figura N°32, y esto es debido a que en el proceso de purificación del agua se liberan iones Na^+ desde los intercambiadores iónicos para disminuir la dureza del agua.

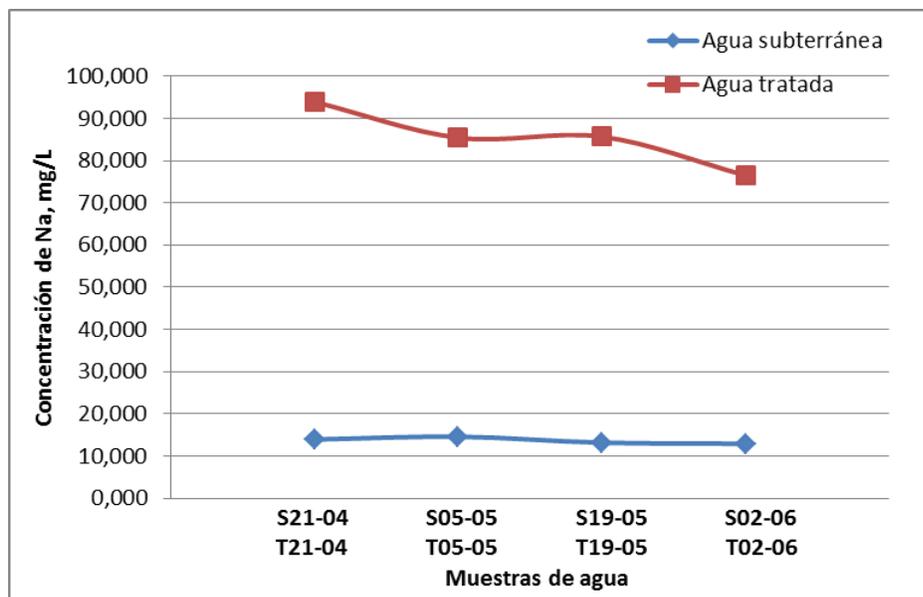


Figura N°32. Comportamiento de la concentración de ión Na^+ en muestras de agua.

4.2.2. Potasio

En la Figura N°33 se muestra la curva de calibración para potasio obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de las respectivas soluciones estándar de iones K^+ (ver Tabla N°21). La misma presentó un alto coeficiente de correlación igual a 0.995.

Tabla N°21. Resultados de absorbancia de las soluciones estándar de K^+ .

Solución estándar, mg/L	POTASIO			
	Abs., (1)	Abs., (2)	Abs., (3)	Absorbancia promedio
0.2	0.113	0.112	0.112	0.112
0.4	0.188	0.187	0.187	0.187
0.6	0.297	0.299	0.297	0.298
0.8	0.366	0.361	0.365	0.364
1.0	0.473	0.475	0.471	0.473

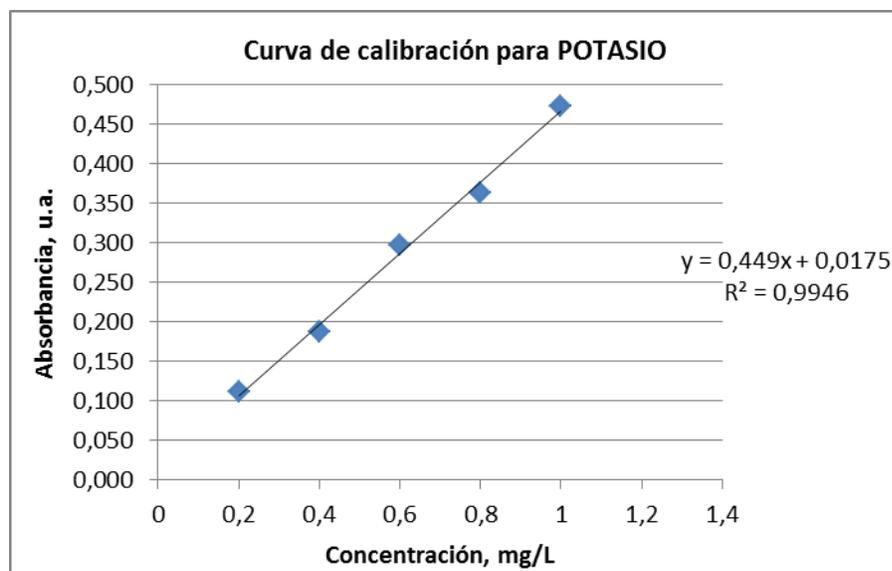


Figura N°33. Curva de calibración para potasio.

Las concentraciones de potasio en muestras de agua subterránea se encuentran entre 2.32 y 2.51 mg/L y en aguas tratadas entre 3.04 y 3.66 mg/L como se muestra en la Tabla N°22.

Tabla N°22. Resultados de la concentración de ión K⁺ en muestras de agua por Absorción Atómica.

Muestra de agua	Código	POTASIO					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	2.362	2.381	2.381	2.375	0.011	2.38 ± 0.03
	S05-05	2.325	2.337	2.313	2.325	0.012	2.32 ± 0.03
	S19-05	2.542	2.499	2.492	2.511	0.027	2.51 ± 0.07
	S02-06	2.482	2.497	2.495	2.491	0.008	2.42 ± 0.02
Tratada	T21-04	3.120	3.115	3.095	3.110	0.013	3.11 ± 0.03
	T05-05	3.065	3.045	3.010	3.040	0.028	3.04 ± 0.07
	T19-05	3.660	3.630	3.680	3.657	0.025	3.66 ± 0.06
	T02-06	3.520	3.520	3.500	3.513	0.012	3.51 ± 0.03

Los valores de las concentraciones de potasio encontrados para aguas subterráneas se encuentran por debajo de los niveles reportados para este tipo de aguas, menor a 10 mg/L [UNESCO/WHO/UNEP 1992].

En ambos tipos de muestras de agua no existe una diferencia significativa en contenido del ión potasio como se muestra en la Figura N°34. Sin embargo, el pequeño incremento de este ión en agua tratada es debido a que existe una liberación de K^+ hacia el agua subterránea durante el proceso de purificación del agua.

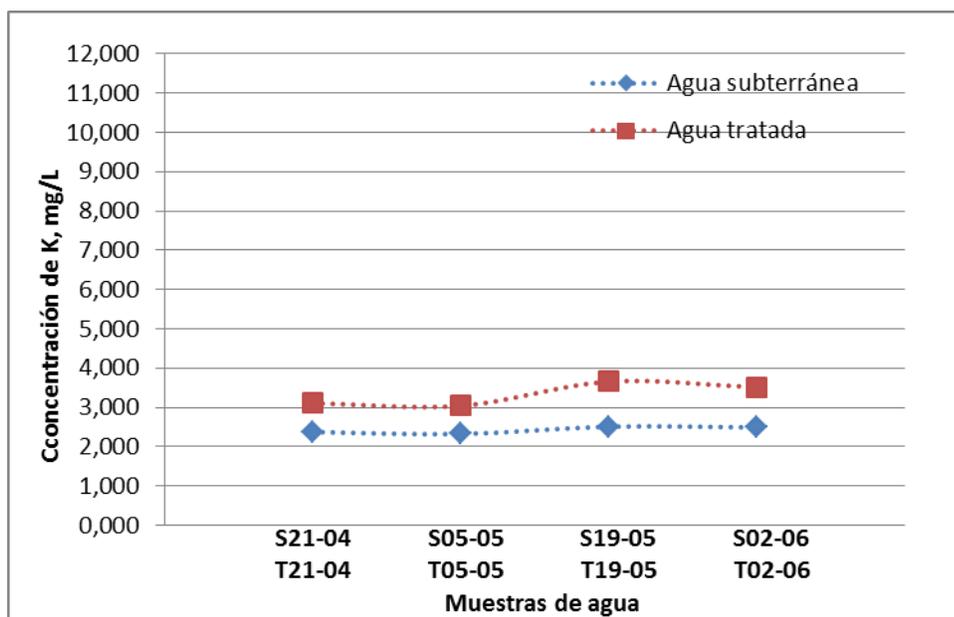


Figura N°34. Comportamiento de la concentración de ión K^+ en muestras de agua.

4.2.3. Calcio

En la Figura N°35 se muestra la curva de calibración para calcio obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de las respectivas soluciones estándar de iones Ca^{2+} (ver Tabla N°23). La misma presentó un alto coeficiente de correlación igual a 0.995.

Tabla N°23. Resultados de absorbancia de las soluciones estándar de Ca^{2+} .

Solución estándar, mg/L	CALCIO			
	Abs., (1)	Abs., (2)	Abs., (3)	Absorbancia promedio
1.0	0.142	0.142	0.141	0.142
2.0	0.317	0.316	0.316	0.316
3.0	0.460	0.462	0.462	0.461
4.0	0.622	0.624	0.621	0.622
5.0	0.736	0.732	0.734	0.734

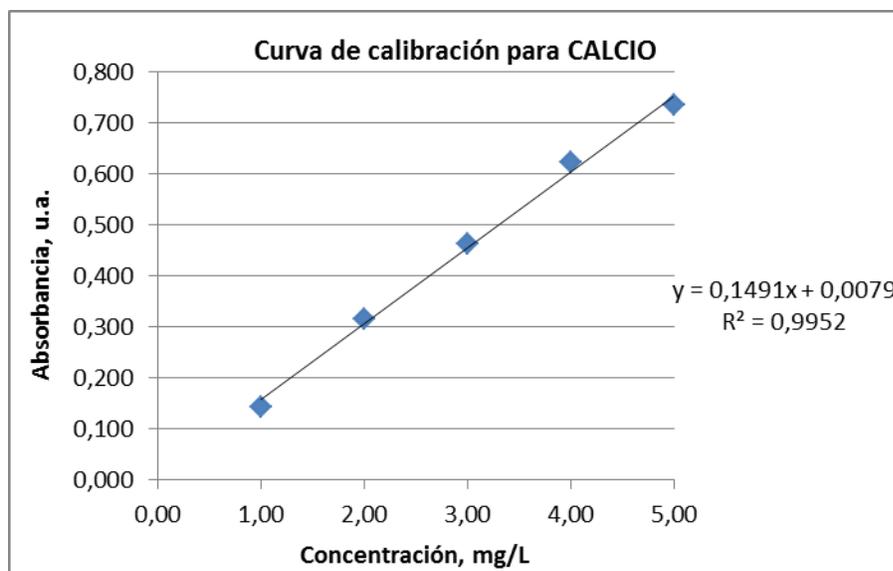


Figura N°35. Curva de calibración para calcio.

Las concentraciones de calcio en muestras de agua subterránea se encuentran entre 26.23 y 32.22 mg/L y en aguas tratadas entre 0.23 y 0.35 mg/L como se muestra en la Tabla N°24.

Tabla N°24. Resultados de la concentración de ión Ca^{2+} en muestras de agua por Absorción Atómica.

Muestra de agua	Código	CALCIO					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	29.600	32.350	30.500	30.817	1.402	30.82 ± 3.48
	S05-05	32.750	31.500	32.400	32.217	0.645	32.22 ± 1.61
	S19-05	29.800	33.450	25.650	29.633	3.903	29.63 ± 9.69
	S02-06	25.850	26.800	26.050	26.233	0.501	26.23 ± 1.24
Tratada	T21-04	0.352	0.347	0.349	0.349	0.003	0.35 ± 0.01
	T05-05	0.350	0.357	0.356	0.354	0.004	0.35 ± 0.01
	T19-05	0.324	0.323	0.318	0.322	0.003	0.32 ± 0.01
	T02-06	0.233	0.230	0.228	0.230	0.003	0.23 ± 0.01

Los valores de las concentraciones de calcio encontrados para aguas subterráneas se encuentran dentro de los niveles reportados para aguas subterráneas, entre 10 y 250 mg/L [Pérez M., F; UNESCO/WHO/UNEP 1992]. Entre ambos tipos de aguas se observa una diferencia significativa en iones Ca^{2+} dado se tiene una disminución del ión calcio en aguas tratadas con respecto a aguas subterráneas como se muestra en la Figura N°36, y esto es

debido a que el Ca^{2+} es retenido en la superficie de los intercambiadores iónicos durante el proceso de la purificación del agua. El intercambio iónico ocurre entre el ión Ca^{2+} y otros iones, fundamentalmente con Na^+ .

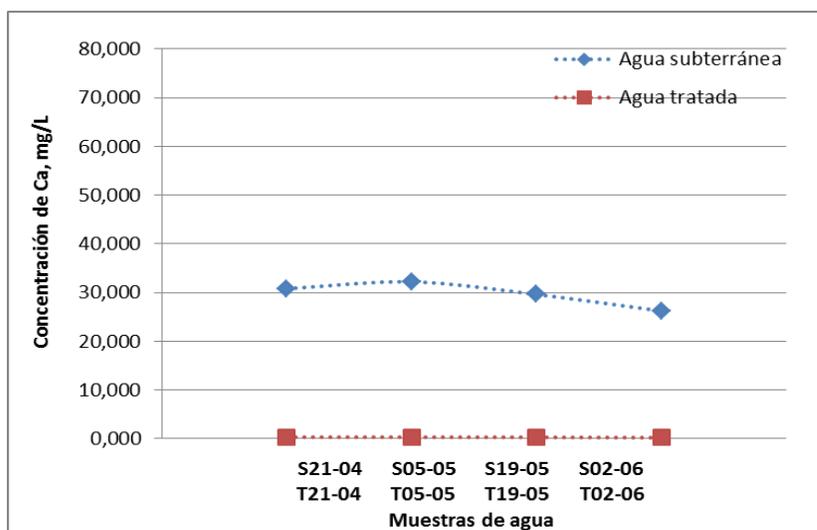


Figura N°36. Comportamiento de la concentración de ión Ca^{2+} en muestras de agua.

4.2.4. Magnesio

En la Figura N°37 se muestra la curva de calibración para magnesio obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de las respectivas soluciones estándar de iones Mg^{2+} (ver Tabla N°25). La misma presentó un alto coeficiente de correlación igual a 0.997.

Tabla N°25. Resultados de absorbancia de las soluciones estándar de Mg^{2+} .

Solución estándar, mg/L	MAGNESIO			
	Abs., (1)	Abs., (2)	Abs., (3)	Absorbancia promedio
0.05	0.094	0.094	0.093	0.094
0.10	0.164	0.163	0.163	0.163
0.15	0.233	0.233	0.231	0.232
0.20	0.320	0.321	0.320	0.320
0.25	0.404	0.404	0.403	0.404

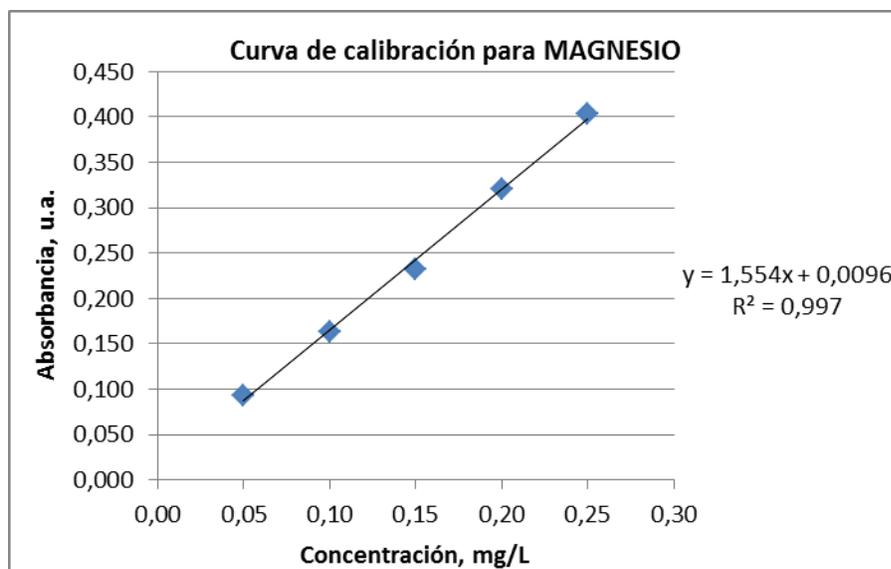


Figura N°37. Curva de calibración para magnesio.

Las concentraciones de magnesio en muestras de agua subterránea se encuentran entre 12.83 y 15.50 mg/L y en aguas tratadas entre 0.364 y 0.393 mg/L como se muestra en la Tabla N°26.

Tabla N°26. Resultados de la concentración de ión Mg^{2+} en muestras de agua por Absorción Atómica.

Muestra de agua	Código	MAGNESIO					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	15.250	15.250	15.125	15.2083	0.0722	15.21 ± 0.18
	S05-05	15.620	15.380	15.500	15.5000	0.1200	15.50 ± 0.30
	S19-05	13.125	13.000	13.000	13.0417	0.0722	13.04 ± 0.18
	S02-06	12.875	12.875	12.750	12.8333	0.0722	12.83 ± 0.18
Tratada	T21-04	0.384	0.384	0.381	0.3830	0.0017	0.383 ± 0.004
	T05-05	0.392	0.395	0.392	0.3930	0.0017	0.393 ± 0.004
	T19-05	0.388	0.388	0.385	0.3870	0.0017	0.387 ± 0.004
	T02-06	0.364	0.364	0.364	0.3640	0.0000	0.364 ± 0.00

Los valores de las concentraciones de magnesio encontrados para aguas subterráneas se encuentran por debajo de los niveles reportados, alrededor de 40 mg/L [Pérez M.; UNESCO/WHO/UNEP 1992].

En ambos tipos de aguas se observa una diferencia en contenido de ion Mg^{2+} , dado que se tiene una disminución del ión magnesio en aguas tratadas con respecto a aguas subterráneas como se muestra en la Figura N°38. La disminución en ión Mg^{2+} se debe a que es retenido en la superficie de los intercambiadores iónicos durante el proceso de la purificación del agua.

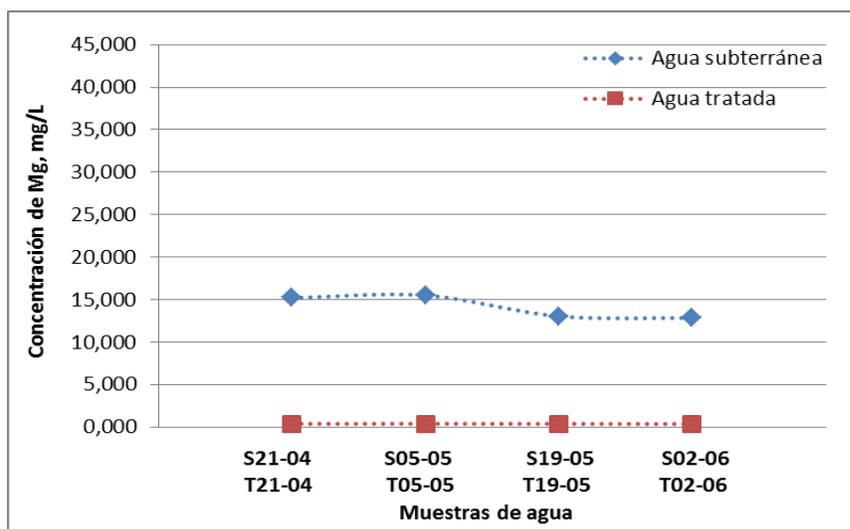


Figura N°38. Comportamiento de la concentración de ión Mg^{2+} en muestras de agua.

4.3. Evaluación de aniones mayoritarios

4.3.1. Sulfato

En la Figura N°39 se muestra la curva de calibración para el ión sulfato obtenida a partir de las lecturas de absorbancia de las respectivas soluciones estándar (ver Tabla N°27). La misma presentó un alto coeficiente de correlación igual a 0.9968.

Tabla N°27. Resultados de absorbancia de las soluciones estándar de SO_4^{2-} .

Absorbancia				Concentración SO_4^{2-} , mg/L
Abs. (1)	Abs. (2)	Abs. (3)	Abs. Promedio	
0.038	0.040	0.039	0.039	2
0.267	0.268	0.269	0.268	14
0.962	0.963	0.963	0.963	41
1.554	1.553	1.553	1.553	62

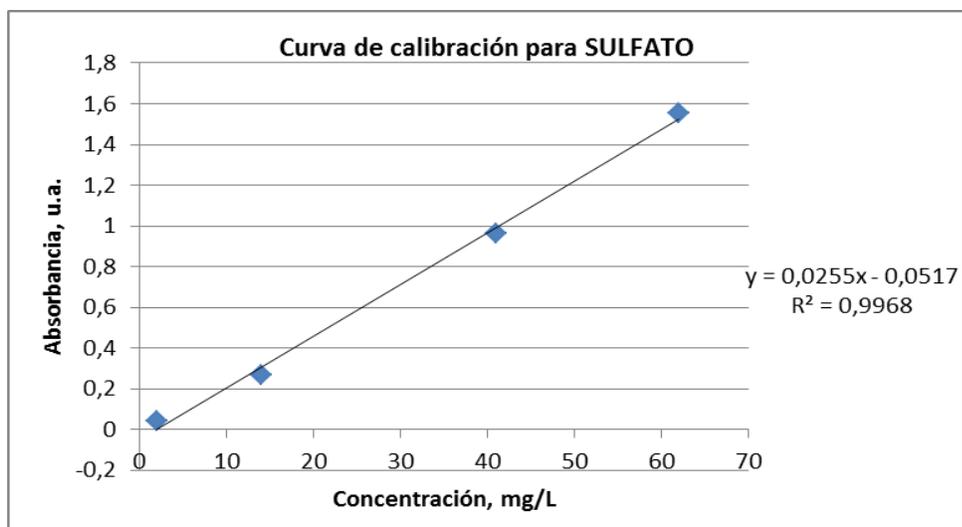


Figura N°39. Curva de calibración para sulfato.

La concentración de sulfato en muestras de agua subterránea se encuentra entre 54.26 y 54.56 mg/L y en aguas tratadas entre 43.64 y 54.47 mg/L como se muestra en la Tabla N°28.

Tabla N°28. Resultados de la concentración de ión SO_4^{2-} en muestras de agua con el equipo Multiparámetros Hach.

Muestra de agua	Código	Absorbancia			SULFATO					
		Abs. (1)	Abs. (2)	Abs. (3)	mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	1.336	1.337	1.336	54.420	54.459	54.420	54.4327	0.0226	54.43 ± 0.06
	S05-05	1.340	1.340	1.339	54.576	54.576	54.537	54.5634	0.0226	54.56 ± 0.06
	S19-05	1.330	1.333	1.333	54.184	54.302	54.302	54.2627	0.0679	54.26 ± 0.17
	T21-04	1.061	1.061	1.061	43.635	43.635	43.635	43.6353	0.0000	43.64 ± 0.00
Tratada	T05-05	1.337	1.337	1.338	54.459	54.459	54.498	54.4719	0.0226	54.47 ± 0.06
	T19-05	1.244	1.255	1.255	50.812	51.243	51.243	51.0993	0.2491	51.10 ± 0.62

Los valores de las concentraciones de sulfato encontrados para aguas subterráneas se han encontrado menores a 300 mg/L de acuerdo al reporte de la UNESCO/WHO/UNEP en aguas naturales. Las muestras de agua recolectadas se mantienen constantes en las diferentes fechas de muestreo.

El contenido de SO_4^{2-} en ambos tipos de aguas se encuentra por debajo de 400 mg/L, límite máximo aceptable para consumo humano de acuerdo a la norma boliviana

[IBNORCA NB 512; USEPA 1986]. No se ha observado una diferencia significativa en contenido de SO_4^{2-} entre aguas subterráneas y tratadas como se muestra en la Figura N°40.

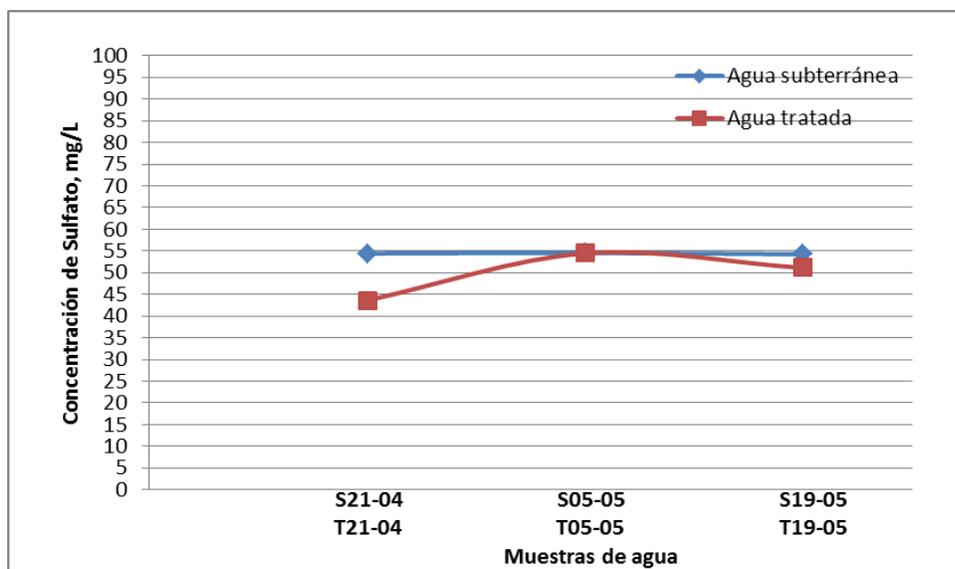


Figura N°40. Comportamiento de la concentración del ión SO_4^{2-} en muestras de agua.

4.3.2. Nitrato

En la Tabla N°29 se muestra los resultados de las concentraciones de ión nitrato para los dos tipos de agua muestreados. En agua subterránea el contenido de NO_3^- se encuentra entre 10.7 y 11.9 mg/L y en aguas tratadas entre 11.2 y 12.0 mg/L.

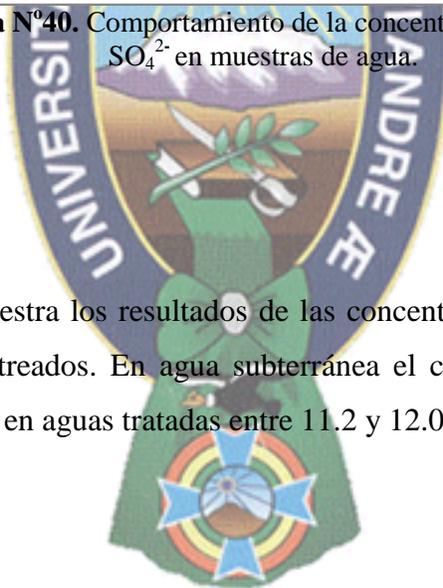


Tabla N°29. Resultados de la determinación de la concentración de nitrato con el Electrodo de Ión Selectivo para Nitrato (HI 4113& HI 98185) en muestras de agua.

Muestra de agua	Código	NITRATOS					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	10.8	10.5	10.9	10.73	0.21	10.7 ± 0.5
	S05-05	11.2	11.5	11.7	11.47	0.25	11.5 ± 0.6
	S19-05	11.5	11.5	12.1	11.70	0.35	11.7 ± 0.9
	S02-06	12.0	11.7	12.0	11.90	0.17	11.9 ± 0.4
Tratada	T21-04	11.5	11.8	11.6	11.63	0.15	11.6 ± 0.4
	T05-05	11.0	11.0	12.7	11.57	0.98	11.6 ± 2.4
	T19-05	11.2	11.9	12.8	11.97	0.80	12.0 ± 2.0
	T02-06	11.4	11.0	11.1	11.17	0.21	11.2 ± 0.5

Las concentraciones de nitrato para aguas subterráneas que se han encontrado son similares a los reportados en aguas naturales [UNESCO/WHO/UNEP]. De acuerdo a la norma boliviana, tanto el agua subterránea como la tratada se encuentran por debajo del valor máximo aceptable de 45 mg/L en contenido de NO_3^- [IBNORCA NB512].

La concentración de nitrato para ambos tipos de agua se mantiene constante en las diferentes fechas de muestreo. En la Figura N°41 no se observa una diferencia significativa

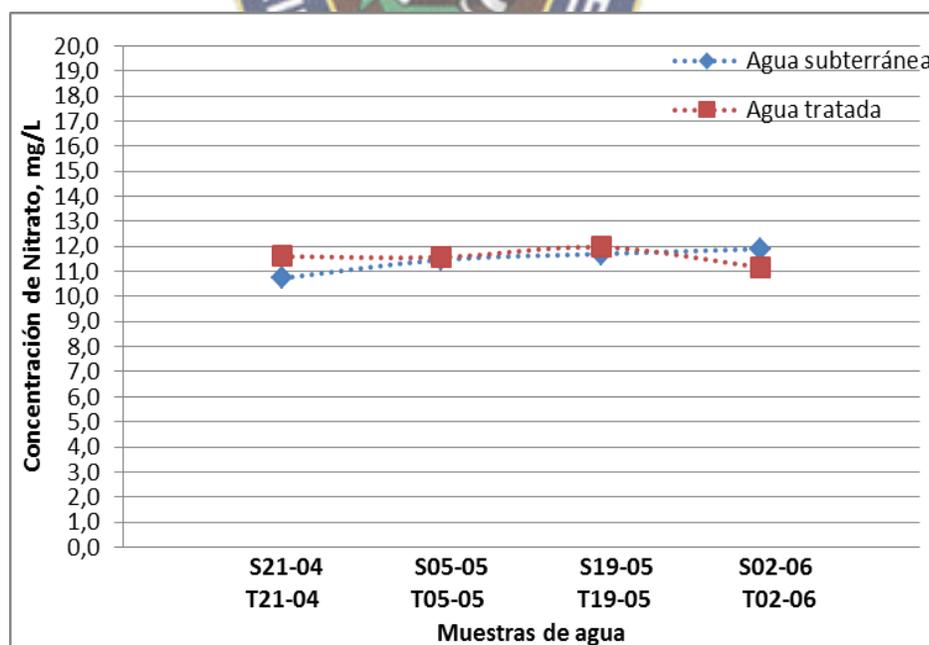


Figura N°41. Comportamiento de la concentración del ión NO_3^- en muestras de agua.

en contenido de NO_3^- , sin embargo el ligero incremento del anión es posible debido a la presencia de nitritos en aguas subterráneas. Los nitritos son oxidados a nitratos durante la etapa de ozonización en la purificación del agua disminuyendo la toxicidad de los nitritos.

4.3.3. Cloruro

En la Tabla N°30 se muestra los resultados de las concentraciones de ión cloruro para los dos tipos de agua muestreados. En agua subterránea el contenido de Cl^- se encuentran entre 52.5 y 53.1 mg/L y en aguas tratadas entre 64.9 y 65.9 mg/L.

Tabla N°30. Resultados de la determinación de la concentración de cloruros con el Electrodo de Ión Selectivo respectivo (HI 4107& HI 98185) en muestras de agua.

Muestra de agua	Código	Concentración de Cloruros					
		mg/L (1)	mg/L (2)	mg/L (3)	Promedio, mg/L	Desviación estándar	Resultado, mg/L
Subterránea	S21-04	53.3	53.0	53.0	53.10	0.17	53.1 ± 0.4
	S05-05	51.7	53.2	53.3	52.73	0.90	52.7 ± 2.2
	S19-05	52.6	52.4	52.5	52.50	0.10	52.5 ± 0.2
	S02-06	52.7	52.5	52.4	52.53	0.15	52.5 ± 0.4
Tratada	T21-04	65.8	65.4	65.5	65.57	0.21	65.6 ± 0.5
	T05-05	66.4	65.9	65.5	65.93	0.45	65.9 ± 1.1
	T19-05	64.9	64.7	65.2	64.93	0.25	64.9 ± 0.6
	T02-06	64.7	66.2	65.0	65.30	0.79	65.3 ± 2.0

El contenido de Cl^- en aguas subterráneas se encuentra por debajo de 250 mg/L, valor máximo aceptable de acuerdo a la norma establecida [IBNORCA 512; UNESCO/WHO/UNEP], al igual que en las aguas tratadas. En la Figura N°42 se muestra en el comportamiento de la concentración de cloruro en las diferentes fechas de muestreo para ambos tipos de agua, la misma se mantiene constante.

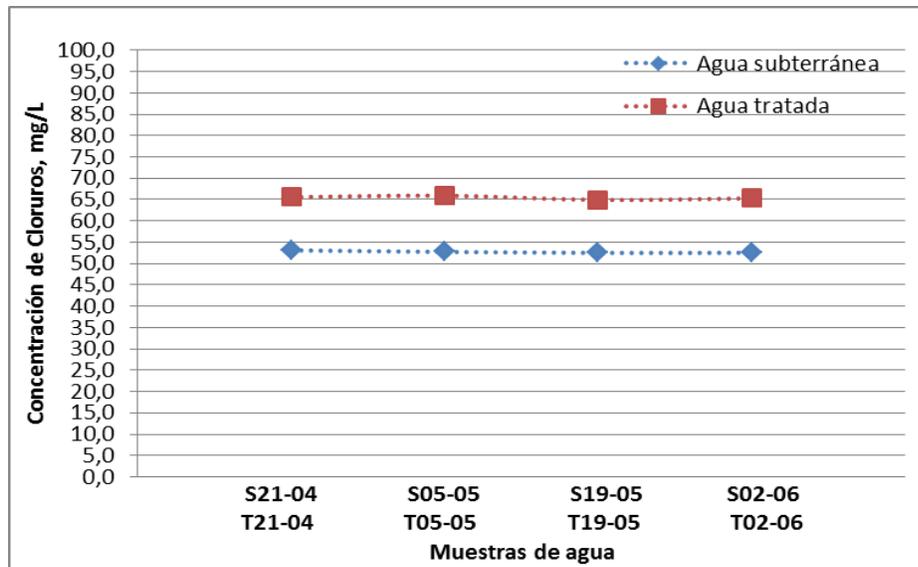
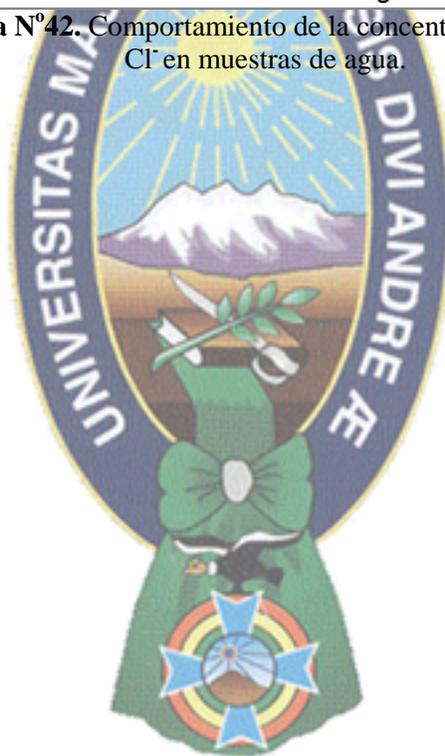
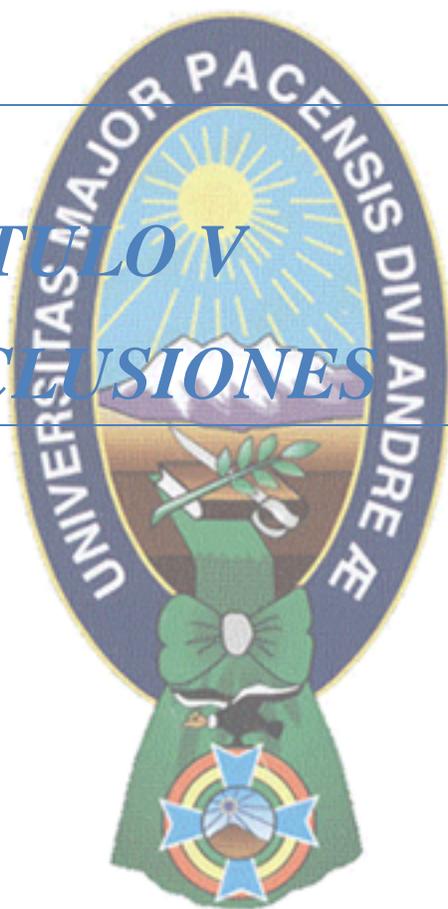


Figura N°42. Comportamiento de la concentración del ión Cl⁻ en muestras de agua.



CAPITULO V
CONCLUSIONES



Del trabajo realizado en la empresa Elvimar S.R.L, se llega a las siguientes conclusiones en cuanto a la evaluación de los parámetros fisicoquímicos:

- Los valores de los parámetros fisicoquímicos determinados en las diferentes fechas de la colecta de muestras de agua subterránea no varían entre ellas, al igual que de las aguas tratadas como se muestra en la Tablas siguientes:

Tabla N°31. Resultados de parámetros fisicoquímicos en aguas.

Código	pH	T, °C	SS, mg/L	ORP, -mV	Alcalinidad mg/L	Dureza total, mg/L
S21-04	7.19 ± 0.02	11.9 ± 0.3	0.90 ± 0.04	22.9 ± 3.3	8.0 ± 1.2	60.0 ± 1.2
S05-05	7.31 ± 0.07	11.1 ± 0.2	0.96 ± 0.04	26.1 ± 2.7	8.2 ± 1.2	57.4 ± 1.4
S19-05	7.39 ± 0.07	11.0 ± 0.0	0.99 ± 0.01	30.9 ± 3.6	7.8 ± 0.6	55.7 ± 1.4
S02-06	7.32 ± 0.05	11.2 ± 0.1	1.00 ± 0.07	19.6 ± 0.3	8.0 ± 1.2	54.0 ± 1.4
T21-04	7.63 ± 0.10	10.0 ± 0.0	0.17 ± 0.02	55.4 ± 6.8	5.7 ± 1.2	2.8 ± 0.7
T05-05	7.73 ± 0.34	10.1 ± 0.1	0.18 ± 0.01	47.9 ± 22.9	6.2 ± 1.2	2.7 ± 0.7
T19-05	7.85 ± 0.10	9.4 ± 0.1	0.17 ± 0.01	56.8 ± 6.2	5.8 ± 0.6	3.0 ± 0.0
T02-06	7.71 ± 0.07	9.1 ± 0.1	0.18 ± 0.01	51.1 ± 2.8	5.7 ± 0.6	2.7 ± 0.7

Tabla N°32. Resultados de la determinación de macrocationes y macroaniones en aguas.

Código	Na+, mg/L	K+, mg/L	Ca2+, mg/L	Mg2+, mg/L	Alcal mg/L	SO42-, mg/L	NO3-, mg/L	Cl-, mg/L
S21-04	13,92 ± 0,14	2,38 ± 0,03	30,82 ± 3,48	15,21 ± 0,18	8,0 ± 1,2	54,43 ± 0,06	10,7 ± 0,5	53,1 ± 0,4
S05-05	14,57 ± 0,31	2,32 ± 0,03	32,22 ± 1,61	15,50 ± 0,30	8,2 ± 1,2	54,56 ± 0,06	11,5 ± 0,6	52,7 ± 2,2
S19-05	13,17 ± 0,07	2,51 ± 0,07	29,63 ± 9,69	13,04 ± 0,18	7,8 ± 0,6	54,26 ± 0,17	11,7 ± 0,9	52,5 ± 0,2
S02-06	12,92 ± 0,14	2,42 ± 0,02	26,23 ± 1,24	12,83 ± 0,18	8,0 ± 1,2		11,9 ± 0,4	52,5 ± 0,4
T21-04	93,92 ± 0,72	3,11 ± 0,03	0,35 ± 0,01	0,383 ± 0,004	5,7 ± 1,2	43,64 ± 0,00	11,6 ± 0,4	65,6 ± 0,5
T05-05	85,42 ± 0,95	3,04 ± 0,07	0,35 ± 0,01	0,393 ± 0,004	6,2 ± 1,2	54,47 ± 0,06	11,6 ± 2,4	65,9 ± 1,1
T19-05	85,67 ± 1,43	3,66 ± 0,06	0,32 ± 0,01	0,387 ± 0,004	5,8 ± 0,6	51,10 ± 0,62	12,0 ± 2,0	64,9 ± 0,6
T02-06	76,50 ± 4,48	3,51 ± 0,03	0,23 ± 0,01	0,364 ± 0,00	5,7 ± 0,6		11,2 ± 0,5	65,3 ± 2,0

- Los parámetros de pH, temperatura, sólidos en suspensión, alcalinidad y dureza total evaluados en aguas tratadas cumplen con las normativas de IBNORCA 512 y OMS:

- pH entre 7.71-7.85 se encuentra dentro del límite máximo aceptable de 6.5-9.0.
- alcalinidad en bicarbonato entre 5.7-6.2 mg/L se encuentra por debajo del límite máximo aceptable de 20 mg/L.
- dureza total entre 2.7-3.0 mg/L se encuentra por debajo del límite máximo aceptable de 500 mg/L CaCO₃.
- Las aguas subterráneas presentan una dureza total entre 54.0 a 60.0 mg/L, mayor a las aguas tratadas de 2.7 a 3.0 mg/L debido a que los intercambiadores catiónicos retienen a los iones Ca²⁺ y Mg²⁺ eficazmente aplicados durante el proceso de purificación, lo cual es conveniente para la salud humana.

Con respecto a la evaluación de cationes en muestras de agua, se llega a las siguientes conclusiones:

- Se tiene presencia de cationes en aguas subterráneas en el siguiente orden: Ca²⁺ > Mg²⁺ > Na⁺ > K⁺. Este comportamiento es coherente con la composición de cationes en aguas subterráneas, dado que el ión calcio suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas.
- Se tiene presencia de cationes en aguas tratadas en el siguiente orden: Na⁺ > K⁺ > Mg²⁺ > Ca²⁺. La disminución de los iones Ca²⁺ y Mg²⁺ es debido a que ocurre el proceso de intercambio iónico por iones Na⁺ y K⁺. La misma es coherente dado que estos iones son retenidos en la superficie de los intercambiadores iónicos durante el proceso de la purificación del agua.
- La concentración de Na⁺ en agua subterránea es 12.92-14.57 mg/L, la misma se incrementa en el agua tratada a 76.50-93.92 mg/L debido a que se liberan iones Na⁺ en el proceso del intercambio iónico por iones Ca²⁺ y Mg²⁺. La concentración de K⁺ en agua subterránea es 2.332-2.51 mg/L con un ligero incremento en aguas tratadas a 3.04-3.66 mg/L, se observa un comportamiento similar a Na⁺ para K⁺.

Ambos se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, 200 mg/L para Na^+ y 10 mg/L para K^+ .

- La concentración de Ca^{2+} en agua subterránea es 26.23-32.22 mg/L, la misma disminuye considerablemente en agua tratada a 0.23-0.35 mg/L debido a que se retienen iones Ca^{2+} en el proceso del intercambio iónico. La concentración de Mg^{2+} en agua subterránea es 12.83-15.50 mg/L con una disminución en aguas tratadas a 0.364-0.393 mg/L. Ambos se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, 250 mg/L para Ca^{2+} y 40 mg/L para Mg^{2+} .

Con respecto a la evaluación de aniones en muestras de agua, se llega a las siguientes conclusiones:

- La concentración de SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- en agua subterránea es 54.26-54.56 mg/L, 10.7-11.9 mg/L y 52.5-53.1 mg/L respectivamente; los mismos no varían significativamente en agua tratada debido a que sus concentraciones en SO_4^{2-} , NO_3^- y Cl^- se han mantenido casi homogéneos en 43.64-54.47 mg/L, 11.2-12.0 mg/L y 64.9-65.9 mg/L respectivamente. Los aniones evaluados se encuentran por debajo del límite máximo aceptable, para SO_4^{2-} 400 mg/L, NO_3^- 45 mg/L y Cl^- 250 mg/L cumpliendo con las normativas de IBNORCA 512 y OMS.

Realizado la evaluación respectiva de los parámetros fisicoquímicos, en ambos tipos de agua, se concluye que cumplen con las normas nacional e internacional exigidas para la calidad del agua en consumo humano, por lo tanto el agua purificada de la Empresa Elvimar S.R.L. es apta para consumo humano.

REFERENCIAS

1. PNUMA 2007. *Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente “Perspectivas del Medio Ambiente Mundial GEO4”* PNUMA, Primera edición (2007) 263-269
2. Rocío Bustamante, “*LEGISLACIÓN DEL AGUA EN BOLIVIA*” CENTRO ANDINO PARA LA GESTION Y USO DEL AGUA, Centro A.G.U.A. – UMSS, Cochabamba (2002).
3. ASD/COSUDE “*Contexto de Agua en Bolivia*”, *Capitalización de experiencias Agua, Tierra y Gente – Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE, Bolivia* (2007).
4. Gloria Alcozer, “*Agua subterránea en Bolivia: situación actual y tendencias*” Oruro (2010).
5. Bjørn Kløve, “*Groundwater dependent ecosystems. Part I: Hydroecological status and trends*” *Environmental Science & Policy* 14 (2011) 770 – 781.
6. Kresic, N. “*Groundwater resources: sustainability, management and restoration*”. McGraw Hill Professional, 2008. 852 p. ISBN: 978-0-07-149273-7
7. Pimienta, J. “*La captación de aguas subterráneas*”. Barcelona: Editorial Reverte, 1980. 202 p. ISBN: 84-7146-186-2.
8. Driscoll, Fletcher G. “*Groundwater and wells*”. Johnson Division. Second Edition. USA. 1986.
9. Romero Rojas, Jairo Alberto. “*ACUIQUÍMICA*”. Escuela Colombiana de Ingeniería. Santafé de Bogotá, 1996.
10. Juan Gil Montes “*Capítulo 4: Hidrogeoquímica*”. *Recursos hidrogeológicos* (2002) pag.35-47.
11. Sawyer, Clair y McCARTHY, Perry. *CHEMISTRY FOR ENVIRONMENTAL ENGINEERING*. Mc Graw Hill International. USA. 3th Edition. 1978.
12. Brown, J., Wyers, A., Bach, L., Aldous, A., “*Groundwater dependent biodiversity and associated threats: a statewide screening methodology and spatial assessment of Oregon*”. *Nat. Conserv.* 81(2009).

13. Susanne I. Schmidt, Hans Jürgen Hahn. "Review: What is groundwater and what does this mean to fauna? – An opinion" *Limnologica* 42 (2012) 1– 6.
14. Z. Jamshidzadeh, S.A. Mirbagheri "Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran" *Desalination* 270 (2011) 23–30.
15. Beltrán, Jorge. "Calidad del agua subterránea". *Diseño de un sistema de información de análisis de agua*. Universidad Nacional de Colombia, Facultad de Ingeniería, Departamento de Ingeniería Civil, Unidad Académica de Ambiental. Santafé de Bogotá, 1994.
16. Dettinger, M.D., Earman, S., "Western ground water and climate change—pivotal to supply sustainability or vulnerable in its own right"? *Ground Water* 4 (1) (2007), 4–5.
17. Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Doll, P., Kabat, P., Jimenez, B., Miller, K.A., Oki, T., Sen, Z., Shiklomanov, I.A., "Freshwater resources and their management". In: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., van der Linden, P.J., Hanson, C.E. (Eds.), *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Cambridge University Press, Cambridge, pp. 173–210.
18. Alley, W.M., "Tracking US groundwater: reserves for the future?" *Environment* 48 (3) (2006), 10–25.
19. Alley, W.M., "Flow and storage in groundwater systems". *Science* 296 (2007), 1985–1990.
20. EPA-1986. U.S. Environmental Protection Agency (EPA). 1986. *Design Manual: Municipal Wastewater Disinfection*. EPA Office of Research and Development. Cincinnati, Ohio. EPA/625/1-86/021.
21. Leal, M.T., et al. *Evaluación de la calidad del agua subterránea de fuentes de abastecimiento en acuíferos prioritarios de la región Cuencas Centrales del Norte*. IMTA Anuario 2002, pag.77.
22. SSA1-1994. *Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM 127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización*. Diario Oficial de la Federación, 22 de noviembre de 2000.
23. SSA1-1994. **NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-127-SSA1-1994, "SALUD AMBIENTAL, AGUA PARA USO Y CONSUMO HUMANO-LIMITES PERMISIBLES DE CALIDAD Y TRATAMIENTOS A QUE DEBE SOMETERSE EL AGUA PARA SU POTABILIZACION"**.

24. Pérez Moreno, F., et al. "Chemical characterization of groundwaters in wells and a water distributor of Zimapan State of Hidalgo, Mexico". *Hidrobiológica* 2003, 13 (2): 95-102.
25. IBNORCA NB512. Norma Boliviana. Normas oficiales de calidad del agua potable para consumo humano.
26. UNESCO/WHO/UNEP 1992, 1996. *Water Quality Assessments - A Guide to Use of Biota, Sediments and Water in Environmental Monitoring, Second Edition*, ISBN 0 419 21590 5 (HB) 0 419 21600 6 (PB).
27. SM 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th Edition. ISBN 0-87553-235-7.
28. Olmez Ilhan, Beal Jack W and Villaume J.F. "A NEW APPROACH TO UNDERSTANDING MULTIPLE-SOURCE GROUNDWATER CONTAMINATION: FACTOR ANALYSIS AND CHEMICAL MASS BALANCES" *Wat. Res.* Vol. 28, No. 5, pp. 1095-1101, 1994
29. GEMS/WHO 1992. *GEMS/WATER Operational Guide*, 3rd edition. *Global Environment Monitoring System (United Nations Environment Programme, World Health Organization)*
30. EPA 1979. *Methods for the Chemical Analysis of Water and Waster*, U.S. Environmental Protection Agency, EPA 600/4-79-020, pp. 160.2, (1979).
31. Gleick, P. H. "Water resources" *Encyclopedia of Climate and Weather*, ed. by S. H. Schneider, Oxford University Press, New York, vol. 2, (1996) pp.817-823.
32. ATSDR en Español. *Agency for Toxic Substances and Disease Registry: El Agua Subterránea Departamento de Salud y Servicios Humanos de EE. UU.* 01-0046Vieques_groundwate; http://www.atsdr.cdc.gov/es/general/agua/es_groundwater.pdf
33. Maderey R. Laura E "Principios de Hidrogeografía – Estudio del Ciclo hidrológico". *Serie de Textos Universitarios, primera edición - UNAM, Numero 1 (2005) pag 87-89.*
34. WHYMAP *World-wide Hydrogeological Mapping and Assessment Programme (Programa Mundial de Evaluación y Cartografía Hidrogeológica) a cargo de la UNESCO 1999. Recursos Hydria pag. 21-23.*
35. Mernia Llera José María, Fornés Juan Maria "Cambio climático y agua subterránea". *Instituto geológico y minero de España, Edipack gráfico (2008) pag. 31-32*
36. Roxana Castellón, "Análisis Jurídico–Competencial sobre la Institucionalidad de la Gestión de Recursos Hídricos en la Normativa Actual y su Concordancia con los

Anteproyectos de Leyes Presentados hasta Agosto 2011". Agua sustentable & christian aid, La Paz –Bolivia, Noviembre (2011), pag 6-10

37. Bruce R. Wardlaw, Nancy R. Stamm, y David R. Soller "La Base de Datos Nacional Paleontológica del Servicio Geológico de los Estados Unidos" United States Geological Survey USGS Archivo abierto Técnicas de cartografía digital. Consultado el 18 de agosto de 2010

ANEXO A

ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA EN LLAMA

A.1. Fundamentos

Los principios teóricos de la absorción atómica fueron establecidos en 1840 por Kirchhoff y Bunsen en sus estudios del fenómeno de autoabsorción en el espectro de los metales alcalinos y alcalinos térreos.

La base de la espectroscopia de absorción atómica (EAA) la entregó Kirchhoff al formular su ley general: «cualquier materia que pueda emitir luz a una cierta longitud de onda también absorberá luz a esa longitud de onda». El significado práctico de esto fue recién desarrollado en 1955 por el australiano Walsh, apareciendo los primeros instrumentos comerciales a principios de 1960.

El átomo consiste de un núcleo y de un número determinado de electrones que llenan ciertos niveles cuánticos. La configuración electrónica más estable de un átomo corresponde a la de menor contenido energético conocido como “estado fundamental”.

Si un átomo que se encuentra en un estado fundamental absorbe una determinada energía, éste experimenta una transición hacia un estado particular de mayor energía. Como este estado es inestable, el átomo regresa a su configuración inicial, emitiendo una radiación de una determinada frecuencia.

La frecuencia de la energía radiante emitida corresponde a la diferencia de energía entre el estado excitado (E_1) y el estado fundamental (E_0) como se encuentra descrito en la ecuación de Planck:

$$E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Donde:

h = constante de Planck

ν = frecuencia

c = velocidad de luz

λ = longitud de onda

Según la teoría atómica, el átomo puede alcanzar diferentes estados (E_1, E_2, E_3, \dots) y de cada uno de ellos emitir una radiación ($\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3, \dots$) característica, obteniéndose así un espectro atómico, caracterizado por presentar un gran número de líneas discretas. En absorción atómica es relevante solamente aquella longitud de onda correspondiente a una transición entre el estado fundamental de un átomo y el primer estado excitado y se conoce como longitud de onda de resonancia.

De la ecuación de Planck, se tiene que un átomo podrá absorber solamente radiación de una longitud de onda (frecuencia) específica. En absorción atómica interesa medir la absorción de esta radiación de resonancia al hacerla pasar a través de una población de átomos libres en estado fundamental. Estos absorberán parte de la radiación en forma proporcional a su concentración atómica.

La relación entre absorción y concentración se encuentra definida en la Ley de Lambert-Beer.

Como la trayectoria de la radiación permanece constante y el coeficiente de absorción es característico para cada elemento, la absorbancia es directamente proporcional a la concentración de las especies absorbentes.

Por tanto, la espectroscopia de absorción atómica (EAA), tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos, está determinada por la ley de Beer, que relaciona ésta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente y con el espesor de la celda o recipiente que contiene los átomos absorbedores.

A.2. Instrumentación

Los componentes instrumentales de un equipo de espectrofotometría de absorción atómica son los similares a los de un fotómetro o espectrofotómetro de flama, excepto que en EAA se requiere de una fuente de radiación necesaria para excitar los átomos del analito. Estos componentes se representan en la Figura A.1.

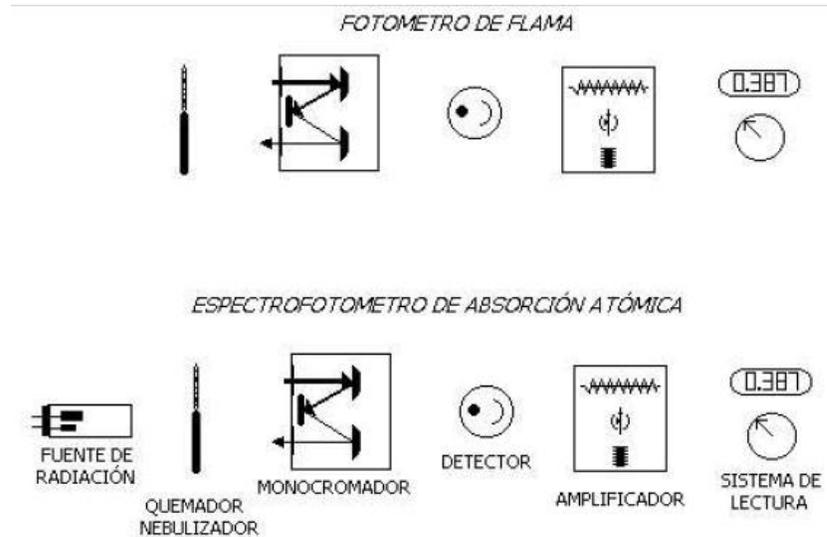


Figura A.1: Componentes de un Fotómetro de Emisión de Flama y de un Espectrofotómetro de Absorción Atómica.

Los componentes básicos de un equipo de absorción atómica son:

- 1) Una fuente de radiación que emita una línea específica correspondiente a la necesaria para efectuar una transición en los átomos del elemento analizado. La fuente radiante más común para las mediciones de absorción atómica es la lámpara de cátodo hueco, que consiste en un cilindro relleno con un gas inerte dentro del cual se encuentra un cátodo (construido del metal a analizar) y un ánodo. Al aplicar un cierto potencial a través de los electrodos esta fuente emite el espectro atómico del metal del cual está construido el cátodo.
- 2) Un nebulizador, que por aspiración de la muestra líquida, forme pequeñas gotas para una atomización más eficiente.

- 3) Un Quemador, en el cual por efecto de la temperatura alcanzada en la combustión y por la reacción de combustión misma, se favorezca la formación de átomos a partir de los componentes en solución.
- 4) Un sistema óptico que separe la radiación de longitud de onda de interés, de todas las demás radiaciones que entran a dicho sistema. Los espectrofotómetros de absorción atómica poseen generalmente monocromadores de red con montaje de Littrow o de Czerny-Turner. Estos monocromadores permiten aislar una línea de resonancia del espectro emitido por la lámpara de cátodo hueco.
- 5) Un detector o transductor, que sea capaz de transformar, en relación proporcional, las señales de intensidad de radiación electromagnética, en señales eléctricas o de intensidad de corriente.
- 6) Un amplificador o sistema electrónico, que como su nombre lo indica amplifica la señal eléctrica producida, para que en el siguiente paso pueda ser procesada con circuitos y sistemas electrónicos comunes.
- 7) Por último, se requiere de un sistema de lectura en el cual la señal de intensidad de corriente, sea convertida a una señal que el operario pueda interpretar (ejemplo: transmitancia o absorbancia). Este sistema de lectura, puede ser una escala de aguja, una escala de dígitos, un graficador, una serie de datos que pueden ser procesados a su vez por una computadora, etc.

A.3. Aplicaciones

La EAA constituye una de las técnicas más empleadas para la determinación de más de 60 elementos, principalmente en el rango de $\mu\text{g/ml}$ - ng/ml en una gran variedad de muestras. Entre algunas de sus múltiples aplicaciones tenemos el análisis de: aguas, muestras geológicas, muestras orgánicas, metales y aleaciones, petróleo y sus subproductos; y de amplia gama de muestras de industrias químicas y farmacéuticas.

La espectroscopia de absorción atómica con llama es el método más empleado para la determinación de metales en una amplia variedad de matrices. Su popularidad se debe a su especificidad, sensibilidad y facilidad de operación. En este método la solución muestra es

directamente aspirada a una llama de flujo laminar. La llama tiene como función generar átomos en su estado fundamental, de los elementos presentes en la solución muestra. Temperaturas cercanas a los 1,500–3,000°C son suficientes para producir la atomización de un gran número de elementos, los que absorberán parte de la radiación proveniente de la fuente luminosa.

Otros sistemas han sido descritos con el fin de mejorar la eficiencia de la atomización, en los cuales se deposita la muestra sólida o como suspensión en un accesorio especial para introducirlo a la llama (navecilla de tantalio, cubeta de Delves).

Desde el inicio, en 1955, de la espectroscopia de absorción atómica como método de análisis, hubo un nuevo ímpetu de desarrollar sistemas de atomización con llama, además de existir un interés continuo en conocer el mecanismo mediante el cual la solución muestra es convertida a vapor atómico en la llama. El resultado fue el desarrollo de un quemador con un cabezal de ranura, obteniéndose de este modo un camino óptico alargado a través de la llama, lo que proporciona una mayor sensibilidad al método. Estos quemadores emplean generalmente una cámara de premezclado de combustible/oxidante en combinación con un sistema para aspirar la solución muestra a la llama. En la Figura A.2. se observan los procesos que experimenta una solución muestra con estos sistemas de atomización en la llama.



Figura A.2. Diagrama del proceso de atomización en una llama.

El número de átomos generados en su estado fundamental en la etapa de atomización determinará la cantidad de radiación absorbida.

El quemador del premezclado, que consiste en la combinación de un nebulizador con un quemador. En este sistema continuo la solución muestra es aspirada por arrastre con el gas comburente a través de un nebulizador para generar un aerosol fino dentro de una cámara donde se mezcla con los gases combustible y comburente auxiliar. Un deflector de flujo, ubicado en la cámara de premezclado, permite que las gotitas más grandes impacten contra él, caigan al fondo de la cámara y se escurran por el tubo de drenaje. El aerosol compuesto por las gotitas más finas es transportado hacia el cabezal del quemador, donde ocurre la combustión y la atomización de la muestra. Una entrada de gas oxidante auxiliar directa a la cámara de premezclado permite que los ajustes del flujo del oxidante sean efectuados por medio de la línea auxiliar, mientras que el flujo a través del nebulizador permanece constante. De esta forma la velocidad de aspiración de la muestra es independiente de las condiciones de la llama.

Los nebulizadores pueden ser regulados para variar la velocidad de aspiración de la solución muestra (1–4 ml/min). Estos están hechos de un material resistente a la corrosión. Diferentes tipos de cabezales son utilizados dependiendo del tipo de llama a emplear. Estos se construyen de titanio para darle una resistencia al calor y a la corrosión, siendo los más empleados de 10 cm de ranura simple (llama acetileno/aire), 10 cm de ranura triple para soluciones con alto contenido de sólidos y cabezal de 5 cm (llama acetileno/óxido nitroso). El tiempo necesario para la atomización de una muestra dependerá de la velocidad de entrada de los gases en la llama y se expresa con altura de la llama, de modo que la medición de la absorbancia se debe realizar en una zona en que la atomización sea completa.

La llama debe ser en lo posible transparente, es decir, no debe absorber parte de la radiación proveniente de la lámpara. En general, la llama debe poseer una alta eficiencia en la producción de átomos libres y ésta debe evitar que ocurran reacciones del elemento a determinar con productos de la combustión de los gases empleados o con otros componentes de la muestra. Al respecto, la temperatura de la llama tiene un cierto grado de importancia, siendo a veces más valiosas las propiedades reductoras u oxidantes (según

relación entre gases combustible/comburente) de ella. La razón óptima combustible/comburente dependerá:

- del tipo de quemador;
- de los gases (combustible/comburente);
- del elemento a determinar.

Tabla A.1. Temperatura máxima (°C) de distintas llamas

Combustible	Aire	Oxígeno
Gas alumbrado	1,700	2,700
Propano	1,930	2,800
Butano	1,900	2,900
Hidrógeno	2,100	2,780
Acetileno	2,300	3,100
Cianógeno	2,300	4,300

La llama aire/acetileno es la más empleada, debido a que ofrece para muchos elementos un medio ambiente y temperatura suficientes para la atomización. La llama es completamente transparente y solamente muestra autoabsorción bajo los 230 nm.

La introducción de la llama óxido nitroso/acetileno (2,900 – 3,000°C) permite la determinación de aquellos elementos que nos dejan determinar con llama aire/acetileno como Al, Si, Ti, etc... Como producto de su baja velocidad de combustión, esta llama energética ofrece un medio ambiente químico, térmico y óptimo favorable, pero posee dos desventajas: numerosos elementos son ionizados y muestran una emisión relativamente fuerte.

La llama hidrógeno/argón es utilizada en la determinación de As, Se, Cd y Zn. Su gran ventaja es su alta transparencia en el ultravioleta ideal para la determinación de As y Se. Sin embargo, se debe contar con grandes interferencias, debido a la menor temperatura de llama.

En espectroscopia de absorción atómica la concentración de un elemento en una muestra se determina por comparación de la absorbancia de la solución muestra con la absorbancia de

soluciones estándar de concentración conocida. Si cualquier constituyente de la muestra altera uno o más pasos en el proceso de formación de átomos en su estado fundamental en la llama, llevará a un error en la medición de la concentración. Las interferencias que se pueden producir en espectroscopia de absorción atómica se clasifican en: físicas químicas, de ionización y espectrales.

A.4. Espectrómetro de absorción Atómica AAnalyst 200

En el presente trabajo se llevó a cabo el análisis cuantitativo de sodio, potasio, magnesio y calcio en el Laboratorio de Hidroquímica (IIQ-UMSA), para ello fue empleada la técnica de Absorción Atómica, a fin de obtener las absorbancias de las soluciones patrón de Na, K, Mg, Ca u y de las muestras desconocidas. Luego mediante la curva de calibración de la experiencia, se determinó la concentración requerida de los analitos. Es adecuado destacar, que las curvas de calibración, permitieron visualizar la influencia de la concentración sobre la absorbancia, y además ver la correspondencia de la experiencia respecto a la Ley de Beer.

El equipo empleado el Espectrómetro de absorción Atómica AAnalyst 200 PerkinElmer Instruments, equipado con lámparas de cátodo hueco de Sodio, Potasio, Calcio y Magnesio, y conjunto nebulizador quemador de aire acetileno como se muestra en la Figura A.3.



Figura A.3. Espectrómetro de absorción Atómica AAnalyst 200
PerkinElmer Instruments

A.4.1. Especificaciones

a. Límites de detección

Sodio	0,05 mg/L
Potasio	0,1 mg/L
Calcio	0,02 mg/L
Magnesio	0,003 mg/L

b. Límites de Cuantificación

Sodio	0,1 mg/L
Potasio	0,3 mg/L
Calcio	0,06 mg/L
Magnesio	0,01 mg/L

c. Rango Lineal

Sodio	0,02 mg/L - 0,5 mg/L
Potasio	0,2 mg/L - 1,0 mg/L
Calcio	1,0 mg/L - 5,0 mg/L
Magnesio	0,05 mg/L - 0,25 mg/L

d. Interferencias:

Puede que existan en la muestra otros analitos que sean interferentes. Existe una interferencia cuando el resultado de la medición sobre una solución de muestra difiere del obtenido con la misma concentración de analito en la misma combinación química y solvente, pero en ausencia de interferente.

Las interferencias se pueden clasificar en cuatro grupos:

1. Espectrales, incluyendo efectos de emisión o absorción de fondo.
2. Físicas, asociadas con el transporte y dispersión de la muestra en la llama.
3. Químicas, relacionadas con la vaporización del soluto.

4. De ionización, relacionadas con la variación de la concentración de átomos neutros emisores o absorbentes en la llama provocada por el fenómeno de ionización térmica.

- **Para Sodio:**

El litio y el cesio pueden aumentar la absorción principalmente en presencia de una llama de gran temperatura, por lo tanto se debe controlar el quemador y el tipo de llama.

- **Para Potasio:**

Un contenido de sodio superior al de potasio puede interferir: en este caso se añade a las soluciones patrón sodio en la misma cantidad que exista en las muestras. El litio y el cesio pueden aumentar la absorción principalmente en presencia de una llama de gran temperatura, por lo que conviene controlar el quemador y el tipo de llama.

- **Para Calcio y Magnesio:**

La solución de cloruro de estroncio permite eliminar las interacciones debidas a la sílice, fósforo, aluminio y hierro. Se puede reemplazar por una solución de lantano de 5 g/l preparada por disolución de óxido de lantano en ácido clorhídrico diluido.

A.5. Referencias

1. *Perkin Elmer, Métodos Analíticos para Espectrometría de Absorción Atómica.*
2. *Schrenk, W.G. Applied Spectroscopy. 40 (1), XIX, 1986.*
3. *Slavin, M. Atomic Absorption Spectroscopy. John Wiley & Sons, New York. 1978.*
4. *Van Loon, J.C. Analytical Atomic Absorption Spectroscopy. Academic Press, New York. 1980.*
5. *Welz, B. Atom-Absorptions Spektroskopie. Verlag Chemie, Weinheim. 1983.*

ANEXO B

ESPECTROFOTOMETRIA DE ABSORCION MOLECULAR ULTRAVIOLETA VISIBLE

B.1. Fundamentos

La espectrofotometría de absorción molecular ultravioleta visible, comúnmente llamada espectrofotometría UV-VIS, tiene una larga y continua historia en el campo de la química analítica. Esta técnica está basada en la medición de absorción de radiación U.V. o visible por determinadas moléculas. La radiación correspondiente a estas regiones del espectro electromagnético provoca transiciones electrónicas a longitudes de ondas características de la estructura molecular de un compuesto.

Cuando la radiación pasa desde el vacío a la superficie de una porción de materia, el vector eléctrico de la radiación interacciona con los átomos y moléculas del medio. La naturaleza de esta interacción depende de las propiedades de la materia y puede dar lugar a la transmisión, la absorción o la dispersión de la radiación.

Al pasar radiación electromagnética por una capa transparente de un sólido, líquido o gas, pueden eliminarse selectivamente ciertas frecuencias como consecuencia del proceso llamado absorción. En este caso la radiación electromagnética se transfiere a los átomos o moléculas que constituyen la muestra, como resultado de ello estas partículas pasan del estado de menor energía a estados de mayor energía o estados excitados.

La absorción por moléculas poliatómicas, es un proceso considerablemente más complejo que la absorción atómica, ya que el número de estados de energía está muy aumentado. Aquí la energía total de una molécula está dada por:

$$E = E_{\text{electrónica}} + E_{\text{vibracional}} + E_{\text{rotacional}}$$

Para cada estado de energía electrónica de la molécula hay normalmente varios estados vibratorios posibles y a su vez, para cada uno de éstos existen numerosos estados rotatorios.

Como consecuencia el número de posibles niveles de energía de una molécula es mucho mayor que el de una partícula atómica. Es por ello que los espectros de absorción aparecen como anchas bandas.

Tanto las moléculas como los átomos tienen un número limitado de niveles o estados energéticos cuantizados. Para que se produzca absorción de radiación, la energía del fotón excitante (incidente) debe igualar a la diferencia de energía entre el estado fundamental y uno de los estados excitados de la especie absorbente. Estas diferencias de energía (ΔE) son únicas, por lo tanto permiten caracterizar los constituyentes de una muestra. Para este objeto se obtiene experimentalmente una representación gráfica de la variación de la absorbancia en función de la longitud de onda.

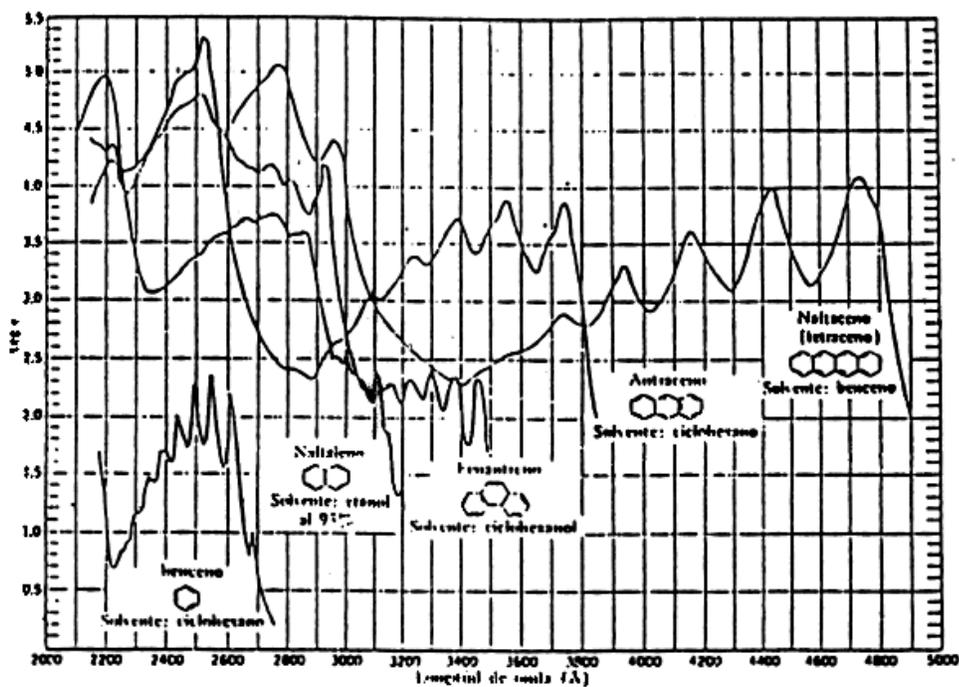


Figura B.1. Espectros de absorción molecular característicos.

- **Medidas cuantitativas de la radiación - Ley de Beer:**

La Figura B.2. esquematiza el fenómeno de absorción, aquí un haz de radiación monocromático, pasa a través de una capa de solución de b cm de espesor y que contiene una especie molecular absorbente cuya concentración es c .

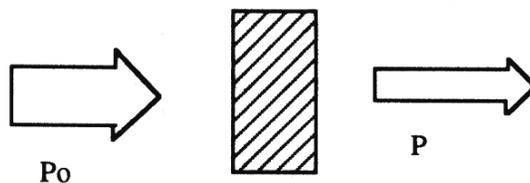


Figura B.2. Fenómeno de absorción.

Como consecuencia de las interacciones entre los fotones y las partículas absorbentes, la potencia del haz disminuye de P_0 a P . Por lo tanto la transmitancia T de la solución es la fracción de radiación incidente transmitido (o no absorbida) por la solución según:

$$T = \frac{P}{P_0} \quad \%T = 100 \frac{P}{P_0}$$

Según la Ley de Beer, entonces, la absorción A estará determinada por:

$$A = \log \frac{P_0}{P} = \log_{10} T = \xi \cdot b \cdot c$$

donde: ξ absortividad molar
 b longitud de paso óptico
 c concentración en moles/l

B.2. Instrumentación

Los instrumentos que miden la absorción selectiva de la radiación en las soluciones se conocen con los nombres de: colorímetros, fotómetros y espectrofotómetros. Hoy en día es pertinente diferenciar los instrumentos según su sistema de detección: detectores simples (convencional) o detectores multicanal (arreglo de diodo).

Algunos de los diseños básicos de los instrumentos usados en la medición de la absorción de Energía Radiante se muestran en la Figura B.3.

A continuación se realiza una breve descripción de los principales componentes de instrumentos convencionales.

a) Fuente de energía radiante

Debe producir un haz de radiación cuya potencia sea suficiente para facilitar la detección y medida; debe ser estable. Ej.:

- Lámpara de hidrógeno
- Lámpara de deuterio.

Ambas lámparas producen un espectro continuo entre 160–375 nm y deben emplearse ventanas de cuarzo en los tubos: ya que el vidrio absorbe fuertemente en esta región del espectro electromagnético.

- Lámpara de filamento de tungsteno

Es la fuente más común para la zona del visible e infrarrojo. Esta lámpara es útil para la región entre 320 – 2,500 nm.

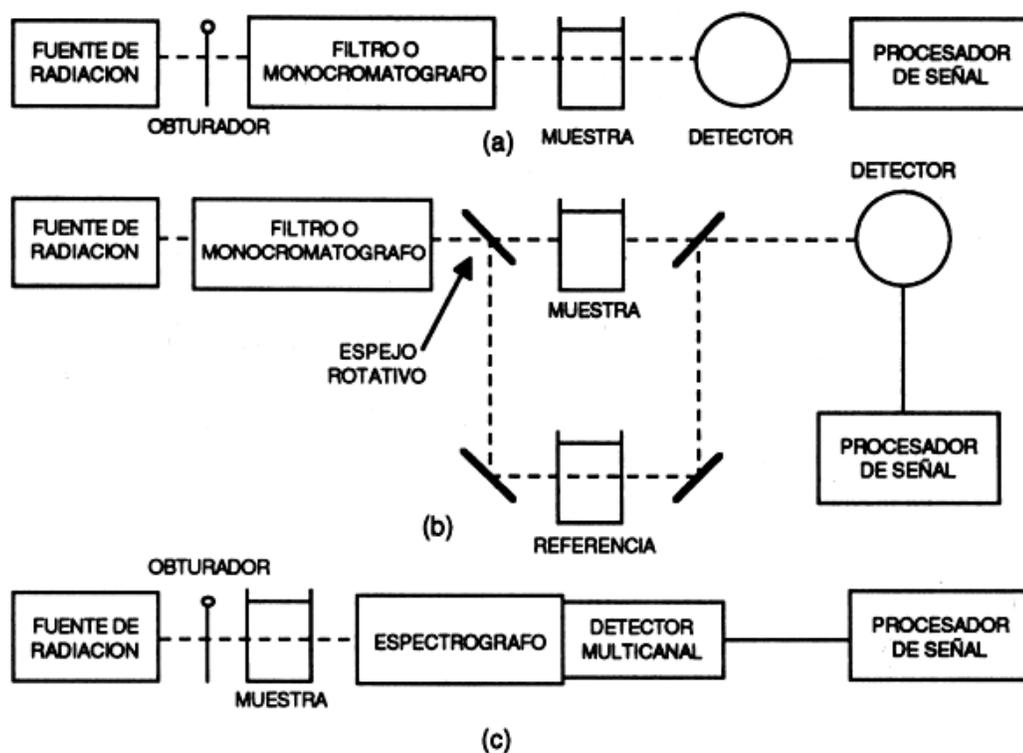


Figura B.3. Diagrama de bloques de diferentes tipos de instrumentos de medición de la absorción molecular

b) Sistema selector de la longitud de onda de trabajo

Fotómetro (colorímetro): este tipo de instrumentos utiliza filtros que permiten obtener bandas de radiación que abarcan un intervalo limitado de longitudes de onda (con un fotómetro no es posible obtener una banda de absorción variable en forma continua).

Tabla B.1. Colores de filtro de acuerdo al intervalo de la longitud de onda.

Región λ (nm)	Color filtro	Color solución
380–435	Azul	Amarillo
480–490	Verde azulado	Rojo
500–560	Verde amarillento	Violeta
580–595	Anaranjado	Azul verdoso
595–650	Rojo	Verde azulado

Espectrofotómetro: utilizan un complejo sistema óptico de selección de longitud de onda (sistema monocromador), el cual consta de variados componentes tales como:

- ✓ prisma o rejilla;
- ✓ lentes;
- ✓ espejos;
- ✓ ranuras de entrada y salida.

Estos instrumentos pueden seleccionar longitud de onda en forma continua y en algunos casos con precisión de décimas de nm. Por lo tanto, es posible obtener en forma continua el espectro de absorción de una molécula.

c) Recipientes para la muestra

La mayor parte de las aplicaciones espectrofotométricas utiliza las muestras en solución líquida, por esta razón se requieren recipientes para colocar la muestra (celdas). La celda debe transmitir el 100% de la energía radiante en la zona espectral de trabajo.

Región U.V. = Celdas de cuarzo (200–2,000 nm)

Región VIS = Celdas de vidrio (350–2,000 nm)

Algún tipo de plástico.

La longitud más común para el trabajo en las regiones UV-VIS es 1 cm (otras son: 2, 5 y 10 cm).

d) Detección de la radiación

Dispositivo electrónico llamado transductor que convierte la energía radiante en una señal eléctrica.

e) Procesadores de señales e instrumento de lectura

Dispositivo electrónico que amplifica la señal eléctrica generada en un detector. En este sentido existe una amplia gama de alternativas, desde galvanómetros hasta avanzadas computadoras.

B.3. Aplicaciones

En principio, cualquier especie química que absorba radiación electromagnética en las regiones ultravioleta o visible es susceptible de poder ser determinada por técnicas espectrofotométricas. El mayor campo de aplicación se encuentra en el análisis cuantitativo con respecto al cualitativo, siendo la espectrofotometría una de las herramientas más usadas.

B.4. Espectrofotómetro HACH multiparámetros

En el presente trabajo para determinación de sulfatos se ha empleado el Espectrofotómetro HACH multiparámetros (Figura B.4) con el método 8051 Sulfaver4.



Figura B.4. Espectrofotómetro HACH multiparámetros, modelo DR/2400.

El espectrofotómetro Hach es un espectrofotómetro del espectro visible, con un rango de longitud de onda de 400 a 880 nm, para análisis de laboratorio y de campo, con un juego completo de programas de aplicación.

El espectrofotómetro Hach DR 2400 contiene los modos de aplicación siguientes: Programas almacenados (tests preinstalados), Programas de códigos de barras, Programas del usuario,

Programas favoritos, Modo Longitud de onda única, Modo Longitud de onda múltiple y Modo Lapso de tiempo.

El espectrofotómetro Hach DR 2400 suministra lecturas digitales en unidades directas de concentración, absorbancia o porcentaje de transmitancia. Cuando se selecciona un método creado o programado por el usuario, los menús y mensajes que aparecen en pantalla guían al usuario por el análisis en cuestión. Este sistema de menús también puede generar informes, para evaluaciones estadísticas de las curvas de calibración creadas y para realizar pruebas de diagnóstico del instrumento.

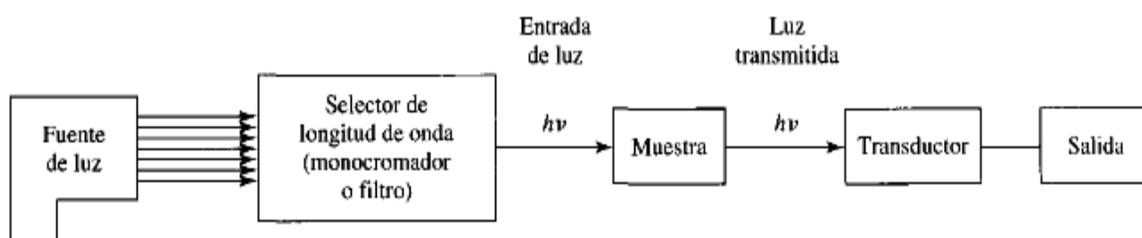


Figura B.4. Diseño básico de funcionamiento del espectrofotómetro HACH para medir absorción o transmitancia a una única longitud de onda.

B.4.1. Especificaciones técnicas

Modelo:	DR/2400
Gama de longitudes de onda:	400 – 880 nm
Precisión de longitud de onda:	± 1 nm
Resolución de longitud de onda:	1 nm
Selección de longitud de onda:	Manual o, dependiendo del método automática
Calibración:	Automática

Linealidad: 0,005 Absorbancia de 0 – 0,5 Abs.

B.4.2. Calibración directa y medición

Para la determinación de Sulfatos por el método 8051 en Multiparámetro del Espectrofotómetro HACH SulfaVer4 Method se requiere las siguientes soluciones:

- Solución Estándar de Sulfato de concentración 9606,26 ppm
- Agua destilada-desionizada con resistividad iguala 18,2 Ω ohm/cm.

El rango de medición para sulfatos se encuentra entre:

2,0 ppm a 70,0 ppm

B.5. Referencias

1. *Hewlett Packard. 1988. The Diode-Array Advantage in UV-VIS Spectroscopy. Publication N° 12 - 5594–8912.*
2. *Inge, J.A. Jr. and Crouch, S.R. 1988. Spectrochemical Analysis. Prentice Hall International, Inc.*
3. *Skoog, D.A. y West, D.M. 1984. Análisis Instrumental. 2a edición. Ed. Interamericana.*
4. *Kenneth A. Rubinson, Judith F. Rubinson; ANÁLISIS INSTRUMENTAL, traducido de Contemporary Instrumental Analysis 2000 Ed. En español Prentice Hall, 2001.*
5. *Hach Model DR/2400 Portable Spectrophotometer, 59400-18, Hach Company 2004.*

ANEXO C

POTENCIOMETRIA MÉTODO DE ELECTRODO DE IÓN SELECTIVO ISE

C.1. Fundamentos

El método potenciométrico de análisis es la medida de un potencial con el fin de conocer la actividad (concentración) de una sustancia en disolución. El objetivo de una medición potenciométrica es obtener información acerca de la composición de una disolución mediante el potencial que aparece entre dos electrodos. La medición del potencial se determina bajo condiciones reversibles, en forma termodinámica, y esto implica que se debe dejar pasar el tiempo suficiente para llegar al equilibrio, extrayendo la mínima cantidad de intensidad, para no influir sobre el equilibrio que se establece entre la membrana y la disolución muestra.

La técnica conocida con el nombre de potenciometría directa, consiste en la medida de la actividad (o concentración) de una especie química, midiendo directamente el potencial con el que está directamente relacionada, mediante una conocida función logarítmica conocida como ecuación de Nernst:

$$E = E_0 + 2,3 (RT/nF) \log a_i$$

Donde:

E = Potencial medido (mV)

E₀ = Potencial de referencia (mV)

R = constante de los gases

T = temperatura absoluta (K)

n = valencia del ion, número de electrones que se transfieren

F = constante de Faraday

a_i = actividad iónica del ión de interés

La actividad iónica está relacionada con la concentración por el factor de actividad:

$$a = f_i * C_i$$

A temperatura constante, la ecuación de Nernst puede escribirse:

$$E = E_0 + S a_i$$

Donde S es la pendiente del electrodo. De la ecuación de Nernst se deduce que efectuando mediciones de potencial respecto a un electrodo de referencia, puede conocerse la actividad y, por tanto, la concentración del ión en cuestión. La aplicación más conocida de las potenciometrías directas es la utilización de lo que se conoce con el nombre de Electroodos Selectivos de Iones (ISE).

Para obtener mediciones analíticas válidas en potenciometría, uno de los electrodos deberá ser de potencial constante y que no sufra cambios entre uno y otro experimento. El electrodo que cumple esta condición se conoce como electrodo de referencia. Debido a la estabilidad del electrodo de referencia, cualquier cambio en el potencial del sistema se deberá a la contribución del otro electrodo, llamado electrodo indicador o de trabajo puede dar lugar a diferencias de potencial electrostático; estos potenciales de membrana son función de la composición de las disoluciones y pueden por tanto relacionarse con las actividades de los iones de las mismas.

Una de las principales ventajas de este tipo de electrodos es que pueden construirse, en principio, para cualquier especie iónica, aunque las dificultades de la obtención de un electrodo específico provienen de las técnicas que se necesiten para su preparación. Constituyen una herramienta importante para la determinación de iones, debido a la capacidad que tienen para obtener selectiva y de forma continua la actividad de un ion en disolución.

Los componentes que integran el sistema de medición son:

- El electrodo selectivo
- El electrodo de referencia
- El equipo medidor.

C.2. Principio de funcionamiento del electrodo ISE para la determinación de Cloruros (electrodo HI 4107)

El HI 4107 es un electrodo de ión selectivo diseñado (Figura C.1.) para la determinación de iones cloruro en:

- soluciones acuosas.
- en agua subterránea,
- agua de caldera
- y agua potable.

El electrodo funciona como un sensor o conductor iónico. La esfera de cloruro de plata es prácticamente insoluble en la solución examinada o que será medida y produce un cambio de potencial debido a los cambios en la actividad iónica de la muestra. Cuando la fuerza iónica de la muestra es fijada por la adición de ISA, el voltaje es proporcional a la concentración de iones cloruro en la solución y el electrodo siguiendo la ecuación de Nernst.



Figura C.1. Electrodo combinado de ión selectivo ISE, Hanna Instruments.

C.2.1. Especificaciones

a. Rango de medición

1,0M a 5×10^{-5} M

35.500 a 1,8 ppm

b. Resolución: 3 dígitos (0,01, 0,1, 1, 10 concentración)

c. Exactitud: $\pm 0.5\%$ de la lectura (iones monovalentes)

d. Pendiente de calibración: 80 a 110 %

- e. **Calibración de ISE:** hasta cinco puntos de calibración (soluciones estándar válidos 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000 ppm)

Iones interferentes:

Yoduro
Bromuro
Hidróxido
Tiosulfato

Los iones cianuro y mercurio deben estar ausentes para la determinación de Cl^- .

C.2.2. Soluciones requeridas

- Estándar de Cloruro de sodio concentración 1000 ppm
- Solución ISA HI 4000-00

C.3. Principio de funcionamiento del electrodo ISE para la determinación de Nitratos (electrodo HI 4113)

El electrodo de ión selectivo o HI 4113 es un electrodo combinado diseñado para la determinación de iones nitrato en soluciones acuosas. Utiliza un sensor reemplazable cuyo módulo contiene una membrana polímera orgánica que es sensitiva a iones nitratos. Es un dispositivo potenciométrico usado para la rápida determinación de iones nitratos libres en el agua, los alimentos emulsionados y muestras de plantas. El electrodo funciona como un sensor o conductor iónico. Es una combinación con un electrodo de referencia Ag/AgCl con gel estabilizante de electrolitos cloruro en su cámara interior. La cámara de referencia externa es recargable. La membrana de PVC usada en el sensor está impregnada con un intercambiador de iones orgánico. Este intercambiador de iones orgánico es considerado un ionóforo conductor en el que es capaz de proteger y llevar los iones nitrato en su compartimiento libre de región apolar de la membrana. El cambio de voltaje en respuesta a la actividad iónica de la muestra. Cuando la fuerza iónica de la muestra es fija, la tensión es proporcional a la concentración de los iones nitratos en la solución.

C.3.1. Especificaciones

a. Rango de medición

0,1 M a 1×10^{-5} M

6200 a 0,62 ppm

b. Resolución: 3 dígitos (0,01, 0,1, 1, 10 concentración)

c. Exactitud: $\pm 0.5\%$ de la lectura (iones monovalentes)

d. Pendiente de calibración: 80 a 110 %

e. Calibración de ISE: hasta cinco puntos de calibración (soluciones estándar válidos 0.1, 1, 10, 100, 1000, 10000 ppm)

Iones interferentes:

Fluoruro

Cloruro

Nitrito

Yoduro

Percloratos

Los disolventes orgánicos y detergentes catiónicos deben estar ausentes para la determinación de NO_3^- .

C.2.2. Soluciones requeridas

- Estándar de Nitrato de sodio concentración 1000 ppm
- Solución ISA HI 4013-00

C.3. Referencias

1. *Catálogo de mediciones de ion selectivo: Chloride HI 4107, Nitrato HI 4113, Fluoride HI 4110 y HI 98158. HANNA Instruments: www.hannaarg.com*
2. *Salvador Alegret, Manel del Valle, Arben Merkoçi "Sensores electroquímicos" Edición Materials 147. España, primera edición 2004.*
3. *Daniel C. Harris "Análisis químico cuantitativo" Tercera edición (sexta edición original). Editorial Reverté, S.A., 2007.*

ANEXO D

PRESERVACION DE MUESTRAS DE AGUA

Tabla D.1. Contenedores y Preservación de muestras para constituyentes en el agua [GEMS/WHO 1992].

Variable	Recommended container*	Preservative	Maximum permissible storage time
Alkalinity	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Aluminum	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Arsenic	Polyethylene	Cool, 4°C	6 months
BOD	Polyethylene	Cool, 4°C	4 h
Boron	Polyethylene	Cool, 4°C	6 months
Cadmium	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Calcium	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Carbamate pesticides	Glass	H ₂ SO ₄ to pH < 4, 10gNa ₂ SO ₄ /1	extract immediately
Carbon/inorganic/organic	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Carbon, particulate	Plastic petri-dish	Filter using GF/C filter; Cool,4°C	6 months
Chloride	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Chlorinated hydrocarbon	Glass	Cool, 4°C	extract immediately
Chlorophyll	Plastic petri-dish	Filter on GF/C filter; freeze -20°C	7 days
Chromium	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
COD	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Copper	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Dissolved oxygen(Winkler)	Glass	Fix on site	6 h
Fluoride	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Iron	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Lead	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Magnesium	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Manganese	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Mercury	Glass or teflon	1 ml Conc. H ₂ SO ₄ plus 1 ml 5% K ₂ Cr ₂ O ₇	1 month
Nickel	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months
Nitrogen			
Ammonia	Polyethylene	Cool, 4°C, 2 ml 40% H ₂ SO ₄ /1	24 h
Kjeldahl	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Nitrate + Nitrite	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Organic nitrogen	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Organic-particulate	Plastic petri-dish	Filter using GF/C filter, Cool, 4°C	6 months
Organophosphorus pesticides	Glass	Cool, 4°C, 10% HCl to pH 4.4	No holding,extraction on site
Pentachlorophenol	Glass	H ₂ SO ₄ to pH < 4, 0.5g CuSO ₄ /1 sample	Cool,4°C 24 h
pH	Polyethylene	None	6 h
Phenolics	Glass	H ₃ PO ₄ to pH < 4, 1.0g CuSO ₄ /1 sample;	Cool,4°C 24 h
Phenoxy acid herbicides	Glass	Cool, 4°C	extract immediately
Phosphorus			
Dissolved	Glass	Filter on site using 0.45 -µm filter	24 h
Inorganic	Glass	Cool, 4°C	24 h
Total	Glass	Cool, 4°C	1 month
Potassium	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Residue	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Selenium	Polyethylene	Cool, 4°C	6 months
Silica	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Sodium	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Electrical conductivity	Polyethylene	Cool, 4°C	24 h
Sulfate	Polyethylene	Cool, 4°C	7 days
Zinc	Polyethylene	2 ml Conc. HNO ₃ /1 sample	6 months

* Teflon containers can also be used to replace either the polyethylene or the glass containers shown in the table.

Note: This table has been adapted from the "Analytical Methods Manual" (Water Quality Branch, Environment Canada, 1981).