

**UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA**

**FACULTAD DE CIENCIAS**

**ESCUELA DE QUIMICA**



**“ESTUDIO DE LA CALIDAD QUIMICA Y TIPOS DE AGUA SUBTERRANEA EN EL  
SECTOR SANTA LUCÍA DE LOS VALLES DEL TUY, ESTADO MIRANDA”**

Trabajo Especial de Grado presentado  
ante la Ilustre Universidad Central de  
Venezuela, por la Br. Yessica C.  
Betancourt D, como requisito para  
optar al título de Licenciada en  
Química Opción Tecnología.

**Caracas, Octubre 2012**

## ACTA

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: **“ESTUDIO DE LA CALIDAD QUIMICA Y TIPOS DE AGUA SUBTERRANEA EN EL SECTOR SANTA LUCÍA DE LOS VALLES DEL TUY, ESTADO MIRANDA”**. Presentado por la Br. Yessica C. Betancourt D., certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Química.

---

Prof. Ramón Montero

(Tutor)

---

Prof. María de los Ángeles Álvarez

(Jurado)

---

Prof. Carlos Yanes

(Jurado)

## RESUMEN

En este trabajo se determinó la concentración de especies mayoritarias y elementos traza en 19 muestras de agua subterránea, con el objetivo de aportar información sobre la calidad química de la cuenca Santa Lucía.

El muestreo fue realizado en un lapso de cuatro (4) días, entre el 16 y 20 de noviembre del 2009, por el proyecto de grupo PG 03-7183-2008, integrado por el Prof. Ramón Montero, la Ing. Vanessa Ojeda y la Lic. Adriana Camargo de la UBV. Las muestras de agua fueron recolectadas en 15 pozos de bombeo y en 4 manantiales de la cuenca, donde simultáneamente, se midieron los parámetros temperatura, pH y conductividad. Una vez recolectadas, fueron llevadas a  $\text{pH} < 2$  con  $\text{HNO}_3$  bidestilado (muestra para cationes y elementos traza únicamente) y refrigeradas hasta su análisis.

La determinación de las especies iónicas  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se realizó mediante espectroscopia de emisión atómica con llama (FEAS), el  $\text{Mg}^{2+}$  se determinó por espectroscopia de absorción atómica con llama (FAAS), mientras que el  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{SiO}_2$  y los elementos traza Fe, Mn, Ba, Sr, Zn, Ni, Li y Cu se determinaron por espectroscopia de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES). Por su parte, el ión  $\text{HCO}_3^-$  fue determinado por titulación potenciométrica; asimismo, los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  fueron cuantificados por cromatografía iónica (IC). Las metodologías empleadas en el análisis mediante técnicas espectrométricas de absorción y emisión atómica fueron validadas empleando las muestras certificadas de agua dulce: TM-25.3 y TM-26.3 (National water research Institute, Canadá).

Los resultados obtenidos fueron validados adicionalmente por medio del cálculo de la conductividad teórica y del balance iónico, donde se obtuvo un porcentaje de error en su balance iónico menor al 10% (máximo permisible) para todas las muestras exceptuando las muestras 13 y 14, donde la relación entre las conductividades medida en campo y la teórica permitió caracterizar los datos con un amplio margen de confiabilidad. Los datos obtenidos fueron tratados empleando el programa Rockworks versión 5.0 y el programa Statistica versión 7.0 para Windows.

Por su parte, el diagrama de Piper permitió identificar cinco (5) tipos de agua: sulfatada cálcica; bicarbonatada cálcica; bicarbonatada magnésica; sulfatada magnésica y clorurada sódica, siendo mayoritarias las aguas del tipo sulfatada cálcica. En la misma línea de ideas, las relaciones interelementales y los diagramas de Gibbs permitieron establecer que los principales procesos que están gobernando la composición química de las aguas subterráneas son la interacción agua-roca, a través de la disolución y precipitación de minerales carbonatados como calcita y dolomita; así como la hidrólisis de sales evaporíticas como yeso y halita.

Los resultados obtenidos indicaron que la concentración de elementos traza en el agua no excede los valores máximos permitidos por el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) correspondiente a la clasificación Tipo 1 y 2 y por la norma EPA para aguas dulces (fresh water). Igualmente, los valores de concentración reportados para las especies mayoritarias, permitió clasificar a las aguas como Tipo 1 y 2, donde el 63% de las muestras de aguas no son aptas para el uso doméstico, señalando que el uso adecuado es para fines agropecuarios; esto atendiendo a lo establecido por la normativa para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos del Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

## **AGRADECIMIENTOS**

Doy gracias a Dios primeramente por permitirme llegar a este momento tan importante de mi vida, que es la presentación del Trabajo Especial de Grado para poder adquirir un título universitario en la gran UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, forjando para mí el camino de un profesional bien preparado.

A mi mamá (Isabel Duarte) por todo el esfuerzo realizado para ayudarme a lograr todo lo que me he propuesto, la cultura impartida y toda la enseñanza que he recibido desde la infancia, además de todo el apoyo brindado desde el momento que decidí cursar la carrera de Química. Dedico totalmente este Trabajo Especial de Grado a ella.

A mis hermanos por apoyarme siempre y todo el aprendizaje brindado.

Gracias al Instituto de Ciencias de la Tierra, al Sr. Fernando, Ángel y Franco por la ayuda que recibí en todo momento que estuve dentro del instituto y su estupenda amabilidad. Al mi tutor Dr. Ramón Montero por el tema de Trabajo Especial de Grado que me permitió desarrollar.

Gracias a la profesora María de los Ángeles por todo el apoyo brindado en el desarrollo de mi Trabajo Especial de Grado y por sus recomendaciones que siempre me guiaron a la realización de un mejor trabajo.

Finalmente pero no el menos importante, gracias a la persona (Luis Romero) que me apoyo en TODO momento dentro de mi carrera universitaria, que no durmió por darme apoyo mientras estudiaba o hacia informes, gracias te quiero muchísimo. Y a todos los compañeros que llenaron de momentos muy agradables el curso esta carrera en la UCV.



## 1. INTRODUCCION

Las aguas subterráneas constituyen una parte esencial del ciclo hidrológico y se refieren a todo tipo de agua situada por debajo del suelo. Son el resultado de la infiltración del agua, generalmente meteórica, a través de una formación geológica con características físicas favorables tales como porosidad y permeabilidad, que permiten su transporte y almacenamiento <sup>(1)</sup>.

El agua subterránea tiende a ser dulce y potable, pues la circulación del agua en el subsuelo conlleva a depurar el agua de partículas y microorganismos contaminantes. Sin embargo, en ocasiones éstos llegan al acuífero como consecuencia de la actividad humana, entre las que destacan la construcción de fosas sépticas o la agricultura, entre otras. Por otro lado, la contaminación también puede deberse a factores naturales, esto si los gramos minerales de los acuíferos son demasiado ricos en sales disueltas o por la meteorización de ciertas formaciones rocosas <sup>(2)</sup>.

La contaminación del agua puede permanecer por largos periodos. Esto se debe a la baja tasa de renovación y largo tiempo de residencia, ya que al agua subterránea no pueden aplicarse fácilmente procesos artificiales de depuración, como los que se pueden aplicar en los depósitos superficiales, por su difícil acceso <sup>(3)</sup>.

Entre los factores antrópicos que conducen a la contaminación de acuíferos, está la infiltración de  $\text{NO}_3^-$  y otros abonos químicos solubles usados en las actividades agroindustriales. Otras fuentes contaminantes son las descargas de fábricas y de origen doméstico, así como algunas sustancias químicas utilizadas por las personas en sus hogares y patios <sup>(3)</sup>.

Asimismo, el aumento de la explotación de los acuíferos a través de pozos de bombeo en las faenas agrícolas y pecuarias, con frecuencia provoca el deterioro en la calidad del agua subterránea. Por lo tanto, la diversidad en las actividades naturales y humanas se reflejan en las variaciones espaciales en los parámetros hidroquímicos de las aguas

subterráneas. En ese sentido, la variación en la concentración de los iones disueltos en las aguas subterráneas son en general consecuencia de factores como la litología, la velocidad, la dirección de flujo de las aguas subterráneas, la naturaleza de las reacciones geoquímicas, la solubilidad de las sales y las actividades humanas <sup>(4)</sup>.

En Venezuela, el acelerado crecimiento demográfico, ha conllevado a un aumento importante en el consumo de las aguas subterráneas, principalmente en muchas de sus regiones rurales, debido a que son utilizadas en las diversas actividades asociadas a las faenas propias de los seres humanos. Una de estas regiones es el sector de Santa Lucía, ubicada en los Valles del Tuy, caracterizada por estar sometida a una fuerte intervención antrópica a través del desarrollo de grandes centros urbanísticos, parques industriales y actividades agropecuarias, que permiten indicar que sus reservas de aguas tanto superficiales como subterráneas pueden estar siendo severamente impactadas, permitiendo su deterioro y con ello, una importante pérdida de su calidad química.

Debido a lo antes expuesto, surge el presente trabajo de investigación, el cual se propone colaborar con la conservación de las aguas subterráneas a través de la determinación de la calidad y con ello, a su uso, en atención a la actividad para la cual son requeridas. En ese sentido, se hace necesario el estudio químico de dichas aguas, mediante la determinación de los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , de los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ , así como la concentración de sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) y de los elementos traza Sr, Ni, Li, Cu, Fe, Mn, Zn y Ba. Conociendo las concentraciones de dichos iones y aniones se podrá determinar la calidad del agua, así como los factores y procesos que la controlan, donde es posible que puedan estar influyendo factores externos, además de la interacción agua-roca, entre otros. Todo este análisis puede proporcionar información valiosa que conlleve a identificar posibles áreas contaminadas o no.

## 2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está basado en la revisión bibliográfica de los conceptos relacionados con las aguas subterráneas, con la finalidad de ampliar los conocimientos y soportar teóricamente el trabajo de investigación realizado.

La evaluación del agua subterránea ha sido una tarea que ha adquirido importancia en las últimas décadas, particularmente en nuestro país, como consecuencia del incremento de la demanda de este vital recurso. Así, tanto las personas involucradas directamente con el sector hidráulico como aquellas relacionadas de manera indirecta, han prestado mayor interés en los conceptos hidrogeológicos que forman la base del estudio de las aguas subterráneas.

### 2.1 La hidrogeología

La hidrogeología se encarga del estudio del agua subterránea, su origen, ocurrencia, movimiento y calidad <sup>(5)</sup>.

El agua subterránea es parte de la precipitación que se infiltra a través del suelo hacia los estratos porosos y en ocasiones los satura de agua. Se mueve lentamente hacia los niveles bajos, generalmente en ángulos inclinados, esto debido a la gravedad y eventualmente, llega a los manantiales, los arroyos, lagos y océanos, a través de las conocidas zonas de descargas <sup>(5)</sup>.

Un par de factores importantes son los responsables de la existencia del agua subterránea: la gravedad, que desplaza al agua hacia el centro de una cuenca en particular y el tipo de rocas, que de acuerdo con su porosidad, almacenarán más o menos agua <sup>(5)</sup>.

## 2.2 Ciclo hidrológico

Los principales accionadores que hacen circular el agua por distintas etapas, incluyendo evaporación y precipitación, son la energía del sol y la gravedad. El agua es evaporada desde los océanos, seguidamente forma las nubes, las cuales son transportadas hacia los continentes donde luego se condensan, para posteriormente caer en forma de lluvia o nieve. Parte de esta agua migra superficialmente hacia los ríos y lagos por un proceso denominado escorrentía superficial. Una gran parte del agua que precipita, puede ser tomada por las raíces de las plantas, para luego ser evaporada a través de las hojas bajo el proceso llamado transpiración. Por otro lado, mediante el proceso de evaporación, también es extraída agua de los ríos, lagos, suelos, nieve y glaciares; así como de la precipitación misma. El proceso de transpiración al combinarse con la evaporación, se denomina evapotranspiración; este proceso provoca la pérdida de agua cuyo valor oscila entre un 65% y 70% de la precipitación anual <sup>(6)</sup>.

Asimismo, parte del agua precipitada es infiltrada a través del suelo, pasando a formar parte del flujo subterráneo, que luego regresará a los océanos a través de las aguas de descarga. En el subsuelo, el agua se mueve a través de una serie de zonas que conforman el denominado ambiente subterráneo <sup>(6)</sup>.

La Figura 1 muestra todas las etapas por las que pasa el agua en el ciclo hidrológico.



Figura 1. Ciclo hidrológico <sup>(7)</sup>

### 2.3 Acuíferos

La mayor parte de los espacios porosos de las rocas bajo el nivel freático están llenos de agua. Pero las rocas tienen una porosidad y características permeables diferentes, lo que significa que el agua no se mueve de igual manera en todo tipo de rocas <sup>(8)</sup>.

Cuando la roca almacenadora de agua permite que la misma fluya hacia los pozos y en los arroyos, recibe el nombre de acuífero. De manera general, un acuífero es una unidad geológica saturada que contiene y transmite agua, de tal manera que pueda extraerse en cantidades económicamente aprovechables <sup>(8)</sup>.

## 2.4 Calidad del agua subterránea

Debido a que el agua subterránea se mueve a través del medio poroso, constituido éste por las formaciones geológicas como rocas, sedimentos o suelos, puede fácilmente disolver sustancias durante este movimiento. Por dicha razón, el agua subterránea muy frecuentemente puede contener más sustancias que las halladas en el agua superficial<sup>(9)</sup>.

La contaminación del agua puede definirse como la modificación de las propiedades físicas, químicas o biológicas que restringen su uso. Los factores que modifican esas propiedades pueden clasificarse en dos grandes grupos: el primero, está definido por las características del terreno o medio permeable, y la segunda, por factores antrópicos<sup>(2)</sup>.

En el mismo orden de ideas, los acuíferos costeros pueden ser contaminados por intrusión salina; mientras que la pérdida de calidad por el impacto de las fosas sépticas son, quizá, las fuentes de aguas residuales que más contribuyen con el deterioro de agua subterránea<sup>(9)</sup>.

Se define el agua potable como el agua destinada al uso doméstico e industrial, las cuales forman parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él<sup>(10)</sup>. Conforme a lo establecido por esta Comisión, fue publicada en Gaceta Oficial N° 5021 de la República de Venezuela (1995), el Decreto 883<sup>(10)</sup>, el cual contiene las normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. Este Decreto considera que la calidad de un cuerpo de agua está influenciada por sus características físicas, químicas y biológicas, que determinan su composición y utilidad al hombre y demás seres vivos.

De acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, la introducción de sustancias o compuestos capaces de modificar las condiciones de un cuerpo de aguas superficial o subterráneo, alteran su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica. En este Decreto, la clasificación de los cuerpos de agua atiende a su calidad, considerando que la mejor es aquella que permite la mayor cantidad de usos ambientales y sociales. Los usos asociados con la clasificación del agua son mostrados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Tipos de aguas y usos asociados según artículo 5 Decreto N° 883. (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>

Tipo de agua	Uso asociado
<b>Excelente o Clase 1</b>	Aguas que desde el punto de vista sanitario pueden acondicionarse con el empleo de desinfectantes, tratamientos convencionales (coagulación, filtración y cloración) o procesos de potabilización no convencionales. Se hallan destinadas al uso doméstico, industrial, ganadero, agrícola para vegetación arbórea, cereales, hortalizas, legumbres y de forraje, comercio y navegación, protección de comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total y armonía paisajística.
<b>Muy buena o Clase 2</b>	Aguas que con acondicionamiento previo son empleadas para uso doméstico, agrícola, protección de comunidades hidrobiológicas, recreación con contacto total, industrial, ganadero, comercio, navegación y armonía paisajística.
<b>Buena o Clase 3</b>	Con previo acondicionamiento es una fuente de abastecimiento doméstico, industrial, ganadero, agrícola para vegetación arbórea, cereales y de forraje, recreación de segundo contacto, comercio, navegación y armonía paisajística.
<b>Aceptable o Clase 4</b>	Armonía paisajística; comercio y navegación; industrial.

## 2.5 Composición química de las aguas subterráneas naturales

La composición del agua puede contemplarse desde el punto de vista químico, bacteriológico e isotópico, entre otros. En lo sucesivo se hará referencia exclusiva a la composición química, entendiendo por tal el conjunto de sustancias generalmente inorgánicas, incorporadas al agua por procesos naturales. Por otro lado, las sustancias orgánicas disueltas en agua, aunque son frecuentes, aparecen en concentraciones por lo común, menores que los constituyentes inorgánicos <sup>(11)</sup>.

La incorporación de los constituyentes al agua, en variedad y concentraciones diferentes es posible debido a su elevado poder disolvente y a sus propiedades de combinación. Esta incorporación de sustancias al agua comienza incluso antes de que es infiltrada al sistema de flujo subterráneo propio de cada acuífero. Gases, aerosoles, polvo y sales diversas presentes en la atmósfera, reaccionan con el agua marcando el primer esbozo del carácter químico del agua de infiltración <sup>(11)</sup>.

Una vez infiltrada con unas características químicas definidas, originadas en la atmósfera o en la superficie del terreno por evapotranspiración, el agua puede sufrir modificaciones drásticas en su composición como consecuencia de un conjunto de interacciones físicas, químicas y biológicas complejas con el medio <sup>(11)</sup>.

Los factores que condicionan la composición del agua subterránea natural son múltiples, destacándose la naturaleza y disposición espacial de los materiales con los que el agua entra en contacto, superficie y duración del contacto; temperatura; presión; existencia de gases y el grado de saturación del agua en relación con las distintas sustancias incorporables, entre otros <sup>(11)</sup>.

Aunque la composición media del agua subterránea suele considerarse invariable en un acuífero o porción del mismo, no debe olvidarse que las interacciones agua-medio, que

determinan dicha composición, son procesos dinámicos que se desarrollan a ritmo diverso, tanto en el espacio como en el tiempo. En consecuencia, la composición del agua subterránea natural debe contemplarse con la perspectiva de su posible variación espacio-temporal. Una composición química concreta, por lo tanto, no queda completamente definida si no se refiere a un lugar y momento determinado <sup>(11)</sup>.

Como consecuencia de su composición y de acciones naturales externas, el agua presenta una serie de características físico-químicas que junto con sus constituyentes se analizan en los párrafos que siguen <sup>(11)</sup>.

## **2.6 Sustancias disueltas en el agua subterránea natural, principales constituyentes químicos**

A pesar de la gran variabilidad de los elementos presentes en el agua subterránea y de la de sus concentraciones, éstos han sido agrupados atendiendo a la clasificación de Freeze y Cherry (1979) <sup>(11)</sup>, por su frecuencia de aparición y valor de concentración decreciente, a saber: constituyentes mayoritarios o fundamentales, que incluyen a las especies químicas, donde los aniones son  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y cationes  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NH}_4^+$  y las especies neutras  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_2$  o  $\text{SiO}_2$ ; constituyentes minoritarios o secundarios referidos a los aniones  $\text{F}^-$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{SH}^-$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$ ,  $\text{BO}_3^-$  y cationes  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Fe}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ; y los constituyentes traza  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Co}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  y  $\text{Cr}^{3+}$ , entre otros.

La Tabla 2 presenta las especies químicas mayoritarias constituyentes de las aguas subterráneas, dicha tabla muestra la concentración ( $\text{mg L}^{-1}$ ) aproximada de cada especie química, tanto para las aguas superficiales como para las aguas subterráneas.

**Tabla 2.** Especies químicas mayoritarias constituyentes del agua natural <sup>(12)</sup>

Constituyente o parámetro	Constituyentes mayoritarios	
	Agua superficial (mg L <sup>-1</sup> )	Aguas subterráneas (mg L <sup>-1</sup> )
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	58	200
Ca <sup>2+</sup>	15	50
Cl <sup>-</sup>	7,8	20
K <sup>+</sup>	2,3	3
Mg <sup>2+</sup>	4,1	7
Na <sup>+</sup>	6,3	30
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	3,7	30
SiO <sub>2</sub> (ac)	14	16

Sin embargo debe tenerse en cuenta que en condiciones particulares un constituyente minoritario puede alcanzar intervalos de concentración que permitan incluirlo dentro de los mayoritarios <sup>(2)</sup>.

En un agua natural dulce, estos constituyentes aparecen por lo general en forma iónica como sales casi totalmente disociadas. Con menor frecuencia se presentan como especies moleculares, parcialmente disociadas o como iones complejos de sustancias orgánicas o inorgánicas <sup>(11)</sup>.

### 2.6.1 Constituyentes mayoritarios

#### Anhídrido carbónico, bicarbonatos y carbonatos

Los iones carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) y bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) controlan casi exclusivamente la alcalinidad de las aguas, la mayoría de estos iones en las aguas subterráneas deben su existencia al dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) procedente de la atmósfera, así como del subsuelo, el cual es generado por la descomposición de la materia orgánica <sup>(1)</sup>

## Cloruros

Exceptuando a las evaporitas y a las formaciones litológicas de origen marino, las rocas por lo común presentan escasa proporción de  $\text{Cl}^-$ . Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. Asimismo, el agua de lluvia puede ser una fuente importante de ion  $\text{Cl}^-$ , especialmente en zonas próximas a la costa. Es pertinente destacar que la concentración de  $\text{Cl}^-$  en el agua de lluvia disminuye rápidamente a medida que ocurre el desplazamiento tierra adentro <sup>(13)</sup>.

La concentración de  $\text{Cl}^-$  en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de  $10\text{mgL}^{-1}$  a más de 2.000 ó 3.000  $\text{mg L}^{-1}$ . En salmueras naturales, próximas a la saturación de  $\text{NaCl}$ , puede llegar a casi 200.000  $\text{mg L}^{-1}$ ; en ese sentido, el agua de mar contiene alrededor de 20.000  $\text{mg L}^{-1}$  de  $\text{Cl}^-$  <sup>(13)</sup>.

## Sulfatos

El ión  $\text{SO}_4^{-2}$  procede del lavado de terrenos formados en ambiente marino, de la oxidación de sulfuros que se encuentran ampliamente distribuidos en rocas ígneas y sedimentarias y por la descomposición de sustancias orgánicas, entre otros. Sin embargo, la disolución de yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) y anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) y otros tipos de sulfatos dispersos en el terreno, representa frecuentemente el aporte cuantitativamente más significativo de este ión a las aguas subterráneas <sup>(13)</sup>.

## Nitrato

El  $\text{NO}_3^-$  presente en las aguas subterráneas, puede tener un origen orgánico o a partir de compuestos químicos usados en las actividades agrícolas o industriales, por lo que sus altas concentraciones son atribuidas en la mayoría de los casos, a la influencia antrópica. Los  $\text{NO}_3^-$  son altamente solubles, por lo que únicamente pueden ser

removidos de las aguas naturales a través de la actividad orgánica o mediante los procesos de evaporación <sup>(13)</sup>.

La contaminación de las aguas subterráneas por  $\text{NO}_3^-$  está relacionado con las actividades urbanas, industriales y ganaderas y muy frecuentemente, en carácter no puntual, con el uso intensivo de abonos inadecuados de compuestos nitrogenados <sup>(13)</sup>.

### **Calcio**

El  $\text{Ca}^{2+}$  suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales, debido a su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En rocas sedimentarias aparece fundamentalmente en forma de carbonato como calcita y aragonito ( $\text{CaCO}_3$ ); dolomita ( $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ ) o de sulfato como yeso ( $\text{CaSO}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ) o anhidrita ( $\text{CaSO}_4$ ) <sup>(13)</sup>.

Debido a que el  $\text{Ca}^{2+}$ , además de ser sumamente móvil, es una de las especies más abundantes en la corteza, en las aguas subterráneas, es también uno de los iones mayoritarios <sup>(13)</sup>.

### **Magnesio**

El  $\text{Mg}^{2+}$ , menos abundante que el  $\text{Ca}^{2+}$  en las aguas naturales; también procede de la hidrólisis de rocas carbonatadas como dolomitas y calizas magnesianas, así como de evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, asimismo, puede ser aportado por la intrusión de agua marina. La solubilidad de la magnesita ( $\text{MgCO}_3$ ) en las aguas subterráneas naturales, es mayor que la de la calcita ( $\text{CaCO}_3$ ) <sup>(13)</sup>.

Asimismo, los procesos de intercambio iónico influyen también en las concentraciones de  $\text{Mg}^{2+}$  en aguas subterráneas. En ellas, este ión es retenido con preferencia al  $\text{Ca}^{2+}$  en suelos y rocas <sup>(13)</sup>.

## **Sodio**

Una fuente importante de  $\text{Na}^+$  hacia las aguas subterráneas, la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras. Tanto por fenómenos de intrusión en acuíferos costeros, como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar <sup>(13)</sup>.

Las sales de  $\text{Na}^+$  son altamente solubles y tienden a permanecer en solución ya que no se producen entre ellas, reacciones de precipitación como ocurre en el caso del  $\text{Ca}^{2+}$ . Asimismo, la presencia de  $\text{Na}^+$  en concentraciones elevadas es muy perjudicial para la agricultura ya que tiende a impermeabilizar los suelos, especialmente en zonas de drenaje deficiente, la presencia de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  atenúa este efecto <sup>(13)</sup>.

La concentración de  $\text{Na}^+$  en aguas naturales es muy variable, pudiendo alcanzar hasta  $120.000 \text{ mg L}^{-1}$  en zonas evaporíticas; sin embargo, raramente sobrepasa de 100 ó  $150 \text{ mg L}^{-1}$  en aguas dulces normales <sup>(13)</sup>.

## **Potasio**

La presencia del ión  $\text{K}^+$  en las aguas subterráneas, frecuentemente está asociada a meteorización de feldespatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular de sales tipo silvina ( $\text{KCl}$ ) o carnalita ( $\text{KCl Mg Cl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$ ). El  $\text{K}^+$  tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en las superficies de minerales con alta capacidad de intercambio iónico; por ello, su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del  $\text{Na}^+$ , a pesar de que su concentración en las rocas es, por lo común, ligeramente inferior a la del  $\text{Na}^+$  <sup>(13)</sup>.

## **Sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ )**

El origen fundamental de la sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) en el agua subterránea, debe buscarse en general, en los procesos de hidrólisis de feldespatos y silicatos. Aunque la sílice disuelta suele representarse como  $\text{SiO}_2$ , en la mayoría de las aguas naturales aparece

como  $\text{H}_4\text{SiO}_4$  monomérico que no comienza a disociarse hasta valores de pH superiores a 9, siendo su solubilidad prácticamente independiente del pH hasta dicho valor <sup>(13)</sup>.

Por lo general la concentración de  $\text{SiO}_2$  en aguas subterráneas sobrepasa el intervalo de  $3\text{-}8 \text{ mg L}^{-1}$ , pero en ocasiones puede aproximarse a  $100 \text{ mg L}^{-1}$ . El valor medio, sin embargo, oscila entre  $17$  y  $25 \text{ mg L}^{-1}$  <sup>(13)</sup>.

### 2.6.2 Algunos constituyentes minoritarios presentes en las aguas subterráneas

En la Tabla 3 se muestran las especies químicas minoritarias constituyentes de las aguas subterráneas, donde está tabulado la concentración ( $\mu\text{g L}^{-1}$ ) aproximada de dichas especies en las aguas superficiales y subterráneas.

**Tabla 3.** Especies químicas minoritarias constituyentes de las aguas subterráneas <sup>(12)</sup>

Constituyente minoritario o traza	
Constituyente o parámetro	Aguas superficiales y subterráneas ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
Fe	100
Mn	15
Sr	400

#### Fluoruro

El  $\text{F}^-$  parece estar relacionado con la alteración de rocas plutónicas. Su concentración raramente sobrepasa los  $2 \text{ mg L}^{-1}$ . Este ión es esencial para la estructura ósea y dental de los animales y del hombre <sup>(13)</sup>.

### **Boro**

A pesar de ser un constituyente minoritario en la mayoría de las aguas, el B es esencial en pequeñas cantidades para el crecimiento de las plantas. En concentraciones excesivas, es perjudicial tanto en los suelos como en las aguas de riego pudiendo ser tóxico para ciertas plantas en concentraciones relativamente bajas. Procede de la alteración de rocas ígneas, gases volcánicos, agua marina que contiene  $4,6 \text{ mgL}^{-1}$  de este elemento y desde la que puede vaporizarse, terrenos evaporíticos y de detergentes <sup>(13)</sup>.

### **Fosfato**

Las fuentes principales de  $\text{PO}_4^{3-}$  se asocian a la explotación de rocas ígneas o sedimentarias marinas que contienen esta especie química, a la industria de manufacturación de fertilizantes fosfatados, a los detergentes presentes en las aguas residuales de origen urbano o ganadero, entre otros <sup>(13)</sup>.

### **Hierro**

El Fe es un elemento esencial para el metabolismo de animales y plantas. La concentración de este elemento en el agua está controlada por procesos de equilibrio químico como oxidación-reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, formación de complejos especialmente con materia orgánica y también por la actividad metabólica de animales y plantas. Es relativamente complejo, ya que puede existir en los estados de oxidación Fe (II) y Fe (III); sin embargo, en aguas profundas desprovistas de oxígeno, se presentan en forma reducida (estado de oxidación + 2) y disuelta <sup>(13)</sup>.

### **Manganeso**

El Mn es esencial para el metabolismo de las plantas. Aunque suele pensarse que su comportamiento es similar al del Fe, existen notables diferencias. Se puede encontrar en forma de  $\text{Mn}^{2+}$  o en forma de complejo ( $\text{Mn HCO}_3^+$ ) <sup>(13)</sup>.

## 2.7 Clasificación de las aguas

La gran variedad de componentes y características fisicoquímicas del agua natural exige su clasificación en grupos, esto para tener una información breve y sencilla sobre la composición química de un cuerpo de agua en particular y de los aspectos de la misma <sup>(1)</sup>.

A menudo estas clasificaciones tienen aplicaciones prácticas inmediatas aunque su finalidad es simplemente, la de agrupar las aguas que presentan características comunes. Los criterios que se utilizan para la clasificación química de las aguas son múltiples y a menudo complicados. Seguidamente, serán citados los sistemas más sencillos y los más frecuentemente utilizados. En este sentido, las aguas se pueden clasificar en función de su dureza, sólidos disueltos totales (SDT), origen y composición química <sup>(1)</sup>.

### 2.7.1 Clasificación de las aguas según su dureza

En función de su dureza las aguas se pueden clasificar como blandas, moderadamente duras, duras y muy duras. En la Tabla 4 se muestra la clasificación de las aguas en atención a su dureza, definida ésta como la concentración de compuestos minerales que hay en una determinada cantidad de agua, en particular sales de Mg y Ca expresada en forma de  $\text{CaCO}_3$ .

**Tabla 4.** Clasificación de las aguas atendiendo a su dureza <sup>(1)</sup>

Tipo de Agua	Dureza ( $\text{mg L}^{-1} \text{ CaCO}_3$ )
<b>1. Agua blanda</b>	0 – 60
<b>2. Agua moderadamente dura</b>	61 – 120
<b>3. Agua dura</b>	121 – 180
<b>4. Agua muy dura</b>	>180

## 2.7.2 Clasificación de las aguas en función de su concentración de los sólidos disueltos totales (SDT)

Las aguas pueden ser clasificadas atendiendo a la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) como dulce, salobre, salada y salmuera en función de sus valores de concentración como se muestra en la Tabla 5.

**Tabla 5.** Clasificación de las aguas en función de su concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) en  $\text{mgL}^{-1}$  <sup>(1)</sup>

Tipo de agua	Residuo seco $\text{mg L}^{-1}$ (STD)
<b>1. Agua dulce</b>	< 1.000
<b>2. Agua salobre</b>	1.000 - 10.000
<b>3 Agua salada</b>	10.000 - 100.000
<b>4. Salmuera</b>	>100.000

## 2.7.3 Clasificación de las aguas subterráneas por su origen

White (1957) <sup>(14)</sup> señala que las aguas pueden ser clasificadas de acuerdo a su origen como meteóricas, connatas o fósiles, magmáticas, marinas, metamórficas y juveniles.

### 2.7.3.1 Aguas meteóricas

Las aguas meteóricas son aquellas que han estado recientemente en contacto con el ciclo hidrológico, antes de ser incorporadas a un acuífero. Estas son derivadas de lluvia, nieve e inclusive a partir de cuerpos de agua superficiales que percolan hacia el acuífero. Generalmente, son aguas con bajas concentraciones iónicas, cuya composición está controlada por las aguas superficiales y por las formaciones

geológicas por las cuales éstas percolan y circulan. Evidencias sobre la base de isótopos estables indican que las aguas meteóricas pueden percolar grandes profundidades de hasta 10 Km <sup>(14)</sup>.

### **2.7.3.2 Aguas connatas o fósiles**

Las aguas connatas son aquellas que fueron atrapadas durante el proceso de sedimentación y no han tenido contacto con la atmósfera en mucho tiempo. Frecuentemente son salobres, enriquecidas en  $I^-$ , B,  $SiO_2$ ,  $Ca^{2+}$  y  $N_2$  combinado; sin embargo, las concentraciones de  $SO_4^{2-}$  y  $Mg^{2+}$  son bajas con respecto al agua de mar. Su origen es generalmente marino <sup>(14)</sup>.

### **2.7.3.3 Aguas magmáticas**

Las aguas magmáticas están asociadas a eventos ígneos y/o hidrotermales, con concentraciones relativamente elevadas de Li,  $F^-$ ,  $SiO_2$ , B, S y  $CO_2$ , mientras que poseen baja concentración de  $I^-$ ,  $Br^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y nitrógeno combinado <sup>(14)</sup>.

### **2.7.3.4 Aguas metamórficas**

Las aguas metamórficas han sido definidas como aquellas asociadas con las rocas durante su metamorfismo. Generalmente tienen elevadas concentraciones de  $CO_2$  de combinación, de  $I^-$  y B, así como bajas concentraciones de  $Cl^-$  <sup>(14)</sup>.

### **2.7.3.5 Aguas juveniles**

Las aguas juveniles son definidas como aquellas que ascienden desde el manto terrestre o de la parte más baja de la corteza y que nunca han formado parte del ciclo hidrológico <sup>(14)</sup>.

## 2.7.4 Clasificación según la composición química

Existen dos métodos ampliamente utilizados para obtener diferentes clasificaciones, estos son: el diagrama de Piper (1944) <sup>(15)</sup> y las figuras de Stiff (1951) <sup>(17)</sup>.

### 2.7.4.1 Diagrama de Piper

Es un método que permite la representación bidimensional de resultados de análisis químicos de aguas. Está constituido por dos triángulos equiláteros en el que se representan, respectivamente, la composición aniónica y catiónica del agua de interés y un campo central romboidal, donde se proyecta la composición del agua deducida a partir de aniones y cationes <sup>(15)</sup>; dicha representación se encuentra en la Figura 2.

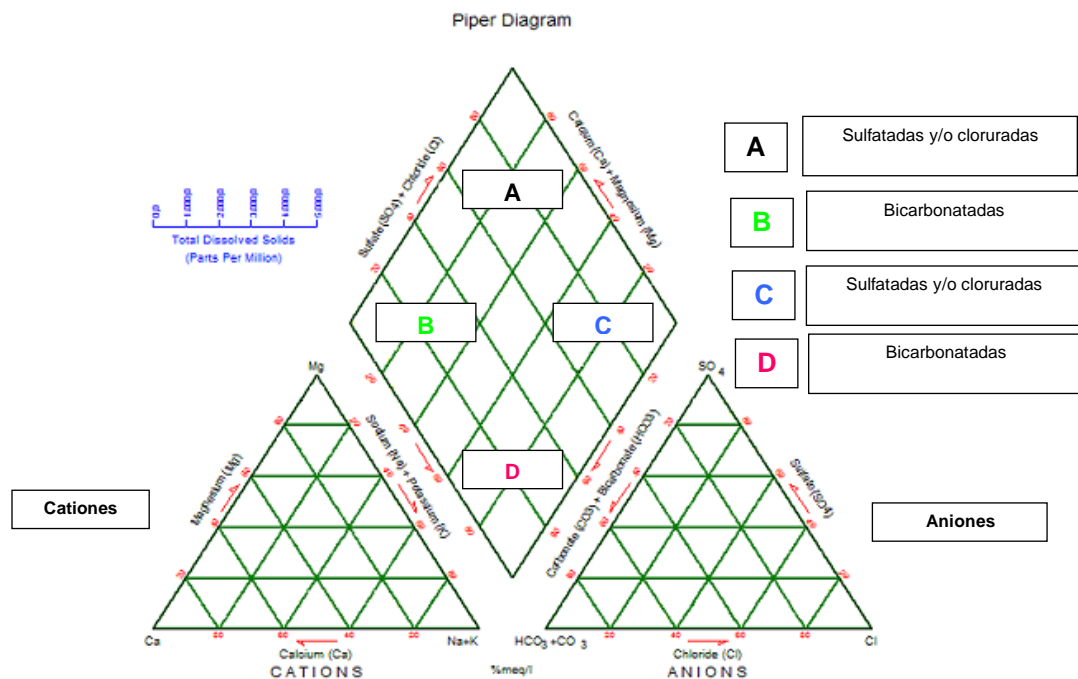


Figura 2. Diagrama de Piper <sup>(15)</sup>

Para este método gráfico es necesario reducir las concentraciones de los iones, expresadas en miliequivalentes/litro a %; asimismo, sólo se pueden reunir en cada triángulo tres aniones y tres cationes. El 100% está representado por la suma de la concentración en porcentaje de cada especie o suma de ellas que se encuentran en cada vértice del triángulo; es decir 100% de suma de cationes y 100% de suma de aniones a representar. Como aniones se suelen representar:  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Cl}^- + \text{NO}_3^-$ , y como cationes:  $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  (15).

A pesar del inconveniente y la imposibilidad de representar más de tres iones por triángulo, estos diagramas permiten reflejar mezclas de aguas, precipitaciones, disoluciones, procesos de intercambio iónico, así como representar varias muestras (16).

#### 2.7.4.2 Figuras de Stiff

Esta clasificación permite representar los resultados de los análisis fisicoquímicos de las aguas como connatas, meteóricas y mezclas. Este sistema de representación está basado en la relación que existe entre la composición química del agua y una figura en forma de estrella generada a partir de los resultados obtenidos al determinar las especies  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  que permite identificar visualmente el tipo de agua, su comportamiento y tendencia, (ver Figura 3) (17).

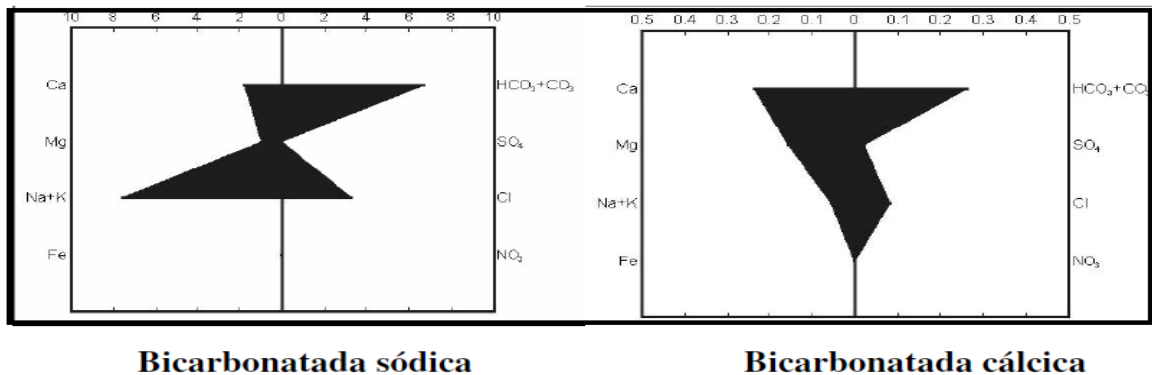


Figura 3. Figuras de Stiff (17)

## **2.8 Parámetros comúnmente determinados en estudios de calidad de aguas subterráneas**

Dentro de los parámetros fisicoquímicos de interés tanto en estudios de calidad como geoquímicos, determinados en las aguas subterráneas están la temperatura, el pH, la conductividad y el Eh.

### **2.8.1 Parámetros fisicoquímicos**

#### **a) Temperatura**

La temperatura de las aguas subterráneas es producto de la transferencia de calor asociado al gradiente geotérmico y a la actividad geotermal que se presenta en el interior de la tierra entre el agua y el medio adyacente, en conjunto con la velocidad de movimiento del agua. La temperatura de las mismas puede ser alterada por la cobertura vegetal, la infiltración de agua superficial y las variaciones de temperatura en la superficie <sup>(1)</sup>.

En general, la temperatura de las aguas subterráneas a profundidades, puede variar debido al flujo calórico del interior de la tierra producido por el gradiente geotérmico <sup>(1)</sup>.

Desde el punto de vista geoquímico, la temperatura es un factor de importancia para la estabilidad de las distintas especies de elementos químicos, presentes en las diversas muestras de agua <sup>(1)</sup>.

#### **b) pH**

Según Davis y De Wiest (1971) <sup>(1)</sup> las aguas subterráneas pueden poseer valores de pH que oscilan entre 11,0 para aguas de manantiales alcalinos y 1,8 para aguas ácidas de drenajes de mina; no obstante, los valores comúnmente encontrados en la naturaleza, están situados en el intervalo entre 5,0 y 8,0 unidades de pH.

### c) Conductividad eléctrica

La conductividad es dependiente tanto del tipo y concentración de iones presentes en el flujo, como de la temperatura. Para el agua pura la conductividad es de  $0,055 \mu\text{S}/\text{cm}$ ; mientras para el agua subterránea, está situada en un intervalo entre 30 y  $2000 \mu\text{S}/\text{cm}$  a  $25^\circ \text{C}$  <sup>(1)</sup>.

### d) Eh

El Eh es una medida del potencial de reducción-oxidación de un medio dado, generalmente expresado en milivoltios (mV). El Eh depende del pH, del oxígeno disuelto y de otras especies químicas con distintos estados de oxidación como el Fe y Mn. De acuerdo al valor medido, puede establecerse si un medio es reductor u oxidante. En el caso particular de las aguas subterráneas, frecuentemente tiende a ser reductor, es decir, los valores típicos de Eh están por debajo de cero debido al poco aporte de oxígeno atmosférico del ambiente subterráneo <sup>(1)</sup>.

## 2.9 Procesos que controlan la composición del agua subterránea

A medida que las aguas subterráneas percolan en el subsuelo, ocurren una serie de reacciones que controlan la composición química de estas <sup>(18)</sup>. En ese sentido, pueden señalarse tres (3) tipos de procesos:

Los procesos físicos están asociados con el proceso de transporte de las masas de agua, entre los que se encuentran la advección, suspensión, dispersión y difusión <sup>(18)</sup>.

Los procesos químicos involucran las reacciones ácido-base y oxido-reducción, disolución y precipitación, acomplejamiento, adsorción y absorción, reacciones de hidrólisis y reacciones isotópicas <sup>(18)</sup>.

Los procesos biológicos tienen que ver con las reacciones asociadas con algunos microorganismos, particularmente sulfatos reductores <sup>(18)</sup>.

En el mismo orden de ideas, es importante destacar que las reacciones ácido-base son importantes en el agua subterránea debido a su influencia en el pH. El pH se define como el logaritmo negativo de la actividad del ión hidrógeno ( $\text{pH} = -\log [\text{H}^+]$ ) y describe si una solución es ácida, neutra o básica <sup>(18)</sup>.

Las reacciones de óxido-reducción son las que intervienen en aquellas sustancias que cambian o pueden cambiar su estado de oxidación, oxidándose o reduciéndose, tales sistemas son llamados redox y están regidos por las condiciones de pH, presión y temperatura.

En aguas subterráneas, los posibles agentes oxidantes presentes son el  $\text{O}_2$  tomado del aire,  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  entre otros; mientras que, los posibles agentes reductores son la materia orgánica,  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{S}^{2-}$ ,  $\text{NH}_4^+$  y  $\text{Fe}(\text{OH})_2$ , entre otros. Los fenómenos de oxidación-reducción pueden ser especialmente efectivos en la solubilización de ciertas sustancias al producirse cambios de oxidación, o por el contrario puede frenar su solubilización. <sup>(2)</sup>

Por su parte, el proceso de intercambio catiónico afecta principalmente a los cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . Este fenómeno ocurre principalmente en los minerales de arcilla, los cuales poseen un grado notable de quimisorción. El aspecto interesante de este fenómeno, consiste en la interacción de las aguas subterráneas con la fracción arcillosa, ya que ésta es la principal vía para que se lleven a cabo los distintos equilibrios de este proceso <sup>(2)</sup>.

La disolución y precipitación son los dos procesos químicos más importantes, que involucran el transporte de masas o solutos en el ambiente subterráneo <sup>(18)</sup>. Con el aumento del tiempo de contacto del agua con el terreno, es posible ir disolviendo más

sales hasta alcanzarse los respectivos productos de solubilidad. El aumento de concentración permite en general disolver nuevas cantidades de sales a consecuencia del aumento de la fuerza iónica. En ocasiones pueden producirse precipitaciones por mezcla de aguas de distintas composiciones, aunque el proceso de mezcla es lento y con características especiales <sup>(2)</sup>.

## **2.10 Factores que controlan la composición del agua subterránea**

La composición química de las aguas subterráneas está influenciada por múltiples factores, entre los que se pueden mencionar el clima, la topografía, la litología y el tiempo.

**a) Clima:** es frecuente que durante ciertas épocas del año, en muchas regiones la evapotranspiración potencial sea mayor que la pluviometría; en esos períodos no ocurre recarga alguna, es decir, la entrada de agua al acuífero y las sales aportadas por la lluvia son acumuladas en el suelo. En la época húmeda, por el contrario, ocurre la recarga debido a las frecuentes precipitaciones, de manera que las primeras fracciones de infiltración hacia el acuífero son notablemente más salinas que las siguientes, ya que estas disuelven las sales solubles depositadas en la anterior época de sequía <sup>(2)</sup>.

**b) Topografía o geomorfología del terreno:** la topografía de una zona condiciona la circulación del agua subterránea y la distribución de las áreas de recarga y descarga e incluso, puede condicionar la cantidad de agua de recarga profunda <sup>(2)</sup>.

**c) Interacción agua-roca:** conforme las aguas subterráneas atraviesan la litología, interaccionan con ésta, llevándose a cabo reacciones de tipo inorgánicas tales como disolución, oxidación, precipitación de minerales y reacciones redox, entre otras; así

como de tipo orgánicas, que incluyen la descomposición de residuos orgánicos y acomplejamiento de metales <sup>(2)</sup>.

Se puede mencionar también la influencia antrópica, la sobreexplotación de pozos, el tiempo de residencia y la mezcla de aguas, entre otros factores que influyen sobre la composición final de éstas <sup>(2)</sup>.

## 2.11 Clasificación de las aguas de Venezuela

El Decreto Presidencial 883 <sup>(10)</sup>, promulgado en la Gaceta Oficial de la Republica Bolivariana de Venezuela N° 5.021 extraordinario (1995), establece la normativa para la clasificación y calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos en el territorio nacional. En el Decreto se establecen 7 diferentes tipos de aguas:

**Agua tipo 1:** estas aguas están destinadas al uso doméstico y al uso industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano. Así mismo este tipo de agua es clasificado en tres subtipos:

- a) Subtipo 1 A: pueden ser reutilizadas como agua potable, simplemente al añadir desinfectantes.
- b) Subtipo 1 B: desde el punto de vista sanitario, pueden ser utilizadas de manera potable mediante tratamientos de coagulación, filtración y cloración.
- c) Subtipo 1 C: desde el punto de vista sanitario, pueden ser utilizadas de manera potable por procesos convencionales de potabilización.

**Aguas tipo 2:** son aguas destinadas a fines agropecuarios, pudiendo dividirse, en dos subtipos:

- a) Subtipo 2 A: aguas de riego para productos del consumo humano.

- b) Subtipo 2 B: aguas de riego para productos de consumo no humano y con fines pecuarios.

**Aguas tipo 3:** son aguas marinas dirigidas a la cría y a la explotación de moluscos consumidos en crudos.

**Aguas tipo 4:** aguas determinadas a ser utilizadas en actividades asociadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Esta a su vez se divide en:

- a) Subtipo 4 A: aguas aptas para el contacto humano total.
- b) Subtipo 4 B: aguas aptas para el contacto humano parcial.

**Agua tipo 5:** aguas para el uso industrial que no requieran ser potable.

**Aguas tipo 6:** aguas utilizadas para la navegación y generación de energía.

**Aguas tipo 7:** aguas destinadas para el transporte, dispersión y desdoblamiento de contaminantes, sin que se produzcan interferencias con el medio ambiente adyacente.

Sin embargo, la introducción de sustancias, compuestos o formas de energía capaces de modificar las condiciones de un cuerpo de agua superficial o subterráneo, alteran su calidad en relación con los usos posteriores o con su función ecológica <sup>(10)</sup>.

En el mismo orden de ideas, la Tabla 6 presenta los límites o intervalos de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas, esta distinción se realiza tomando en consideración, de manera adicional, una serie de parámetros físicos, químicos y biológicos, tales como: oxígeno disuelto (OD), pH, color real, turbidez, fluoruros, organismos coliformes totales y concentración de algunos compuestos orgánicos e inorgánicos, entre los cuales se destacan los iones mayoritarios y metales pesados <sup>(10)</sup>.

**Tabla 6.** Límite o intervalo de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas, según Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>

Tipo	Sub- tipo	Elemento o compuesto	Concentración (mg L <sup>-1</sup> )
1	1A	Ba	1,0
		Mn	0,1
		Cu	1,0
		Cl <sup>-</sup>	600
		Ca <sup>2+</sup>	200
		Fe	1,0
		NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10,0
	1B	Na <sup>+</sup>	200
		Mg <sup>2+</sup>	70
		K <sup>+</sup>	20
		SDT	1500
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	400
		Zn	5,0
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	370
2	2A	Ba	1,0
		Mn	0,5
		Cu	0,2
		Li	5,0
	2B	Ni	0,5
		Fe	1,0
		SDT	3000
		SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	400
		Zn	5,0
		HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	370
		Mg <sup>2+</sup>	70
4	4A y 4B	Metales	No detectables*

De acuerdo al Decreto 475 (Gaceta Oficial N° 43.259, 1998) <sup>(19)</sup>, por el cual se expide las normas técnicas de calidad del agua potable, en el Capítulo III, artículo N° 8 se muestran los criterios de calidad de agua potable y se pueden observar a continuación en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Límite o intervalo de algunos parámetros que determinan la calidad del agua potable, según Decreto 475 (Gaceta Oficial N° 43.259, 1998) <sup>(19)</sup>

Características admisibles	Expresado como	Valor (mg L <sup>-1</sup> )
<b>Calcio</b>	Ca	60
<b>Cloruros</b>	Cl	250
<b>Hierro total</b>	Fe	0,3
<b>Magnesio</b>	Mg	36
<b>Manganeso</b>	Mn	0,1
<b>Bario</b>	Ba	0,5
<b>Níquel</b>	Ni	0,02
<b>Zinc</b>	Zn	5
<b>Plomo</b>	Pb	0,01
<b>Cadmio</b>	Cd	0,3
<b>Nitrato</b>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	10
<b>Sulfatos</b>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup>	250

De manera adicional, y para fines de comparación, en la Tabla 8 se presentan los valores máximos establecidos por la EPA (1994) para agua dulce (freshwater) <sup>(20)</sup>.

**Tabla 8.** Concentraciones límite reportadas por la EPA (1994) <sup>(20)</sup> para algunas especies, expresadas en ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )

Elemento	Concentración máxima EPA <sup>(20)</sup>
Cu*	<b>18</b>
Ni*	<b>1400</b>
Ba*	<b>2000</b>
NO <sub>3</sub>	<b>10000</b>
F	<b>4000</b>
Cd	<b>3,9</b>
Hg (inorgánico)	<b>2,5</b>
Tl	<b>0,5</b>
Pb	<b>82</b>
Cr**	<b>16</b>
Se	<b>50</b>
Sb	<b>6</b>
Be	<b>4</b>

\*Elementos de interés

\*\*Cromo total

## 2.12 Antecedentes

Tanto a nivel internacional como nacional, se han realizado muchos trabajos de investigación en el ámbito de la hidroquímica de aguas superficiales y subterráneas, particularmente enfocados en la calidad de las mismas. Es por ello, que seguidamente son citados algunos trabajos ya realizados con la finalidad de ampliar los conocimientos en esta área del conocimiento.

### 2.12.1 Internacionales

**González et al. (1986)** <sup>(21)</sup> realizaron el estudio comparativo de la calidad del agua de los ríos Asturianos Nora y Piloña. Para llevar a cabo la investigación de calidad, estos investigadores emplearon algas dulceacuícolas como bioindicadoras, asimismo realizaron determinaciones físico-químicas, así como de los coliformes totales, flora y fauna, obteniéndose siete indicadores de calidad respecto a las 46 estaciones de muestreo.

Basándose en todos los análisis biológicos y fisicoquímicos realizados, Gonzalez et al. (1986) identificaron la presencia de cuatro tipos de aguas clasificadas como A, B, C y D. En el río Nora, estos autores determinaron que la concentración de oxígeno y  $\text{NH}_4^+$  disuelto en el agua clase A, favorecieron la existencia de una fauna béntica diversa con abundantes efemerópteros, crustáceos y moluscos, entre otros. Sin embargo, señalan que las características propias de las clases C y D son las dominantes en el resto de la cuenca, indicando que tanto el río Nora como sus principales afluentes, se encuentran fuertemente contaminados con niveles de concentración de oxígeno disuelto inferiores a 5 mg/L; asimismo, la fauna asociada a estas dos clases de agua es pobre, poco diversas, con dominancia exclusiva de detritívoros y de especies con respiración aérea.

Por su parte, González et al. (1986) indican que en el río Piloña las condiciones generales de la calidad del agua de esta cuenca son marcadamente diferentes a las del

río Nora, incluso en verano, donde prácticamente la totalidad de la cuenca presenta una calidad tipo A, caracterizada fundamentalmente por una elevada concentración de oxígeno disuelto, y bajos valores en  $\text{NH}_4^+$ , lo que permite el desarrollo de una fauna compleja con abundancia de coleópteros y moluscos, entre otros; así como una flora rica y variada con abundancia de clorófitas, diatomeas, briófitos y fanerógamas, entre otras especies <sup>(21)</sup>.

**Weil et al. (1996)** <sup>(3)</sup> evaluaron los riesgos asociados a la concentración por  $\text{NO}_3^-$  en aguas subterráneas en los Estados Unidos. En ese sentido, el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) determinó que la calidad de agua que las personas toman, depende del lugar donde ellas viven.

Weil et al. (1996) determinaron que la concentración de nitrógeno presente en las aguas subterráneas provenía del drenaje de los suelos, del nitrógeno aportado durante la aplicación de fertilizantes y del estiércol. En este trabajo de investigación, estos autores también discuten que la ingesta de agua potable por los niños con valores de concentración de  $\text{NO}_3^-$  superiores a  $10 \text{ mg L}^{-1}$  pueden causar bajos niveles de oxígeno en la sangre; es decir, una potencial condición fatal.

El estudio realizado por Weil et al. (1996) se basó en diversas muestras de aguas subterráneas captadas en varias regiones de USA, concluyendo que los riesgos de contaminación de aguas subterráneas por  $\text{NO}_3^-$  no es el mismo en todas las zonas; no obstante, indican que la mayor contaminación se identificó en suelos bien drenados y en los asociados a una alta entrada de nitrógeno. Dicho comportamiento se determinó en el sureste del estado de Washington, donde se detectaron unos  $6,5 \text{ mg L}^{-1}$  de concentración de nitrato. En contraste, en Nuevo México se determinó que el agua subterránea contenía un nivel de concentración de  $\text{NO}_3^-$  aceptable, con valores de hasta  $0,3 \text{ mg L}^{-1}$ . Es importante señalar que el límite establecido por la agencia de protección ambiental de los Estados Unidos (EPA) es de  $10 \text{ mg L}^{-1}$  <sup>(3)</sup>.

Con el objetivo de evaluar la calidad del agua aportada a través de los sistemas rurales de abastecimiento por gravedad y sin tratamiento **Rojas et al. (1999)** <sup>(22)</sup> estudiaron 80 de estos sistemas rurales que brindan servicio a 92 comunidades que comprenden alrededor de 39.000 habitantes, correspondientes a un conjunto de comunidades de los departamentos de Ancash Apurímac, Cajamarca y Cusco en Lima, Perú. Asimismo, estos autores se propusieron identificar los factores que afectan la calidad del agua en las comunidades y en los respectivos sistemas de abastecimiento estudiados, se realizaron las evaluaciones correspondientes en base a la metodología de estudio.

Los resultados obtenidos por Rojas et al. (1999) les permitieron determinar que sólo el 37,5% de los sistemas visitados realizaba la cloración del agua; a pesar de ello, se encontraron coliformes termotolerantes en muestras tomadas en sus componentes, habiéndose verificado un gran deterioro en la calidad del agua, ya que la presencia de coliformes en un 12% en las redes de distribución, se eleva a un 67% en el nivel intradomiciliario. Identificaron además que el 63% de los sistemas presentó un alto riesgo sanitario en cuanto a la infraestructura y al manejo intradomiciliario del agua <sup>(22)</sup>.

**Jalali (2005)** <sup>(23)</sup> investigó hidrogeoquímicamente el agua subterránea de la zona de Bahar en el oeste de Irán, con el propósito de identificar las facies presentes en esta zona y los procesos y factores que controlan su presencia. Debido al clima árido imperante dichas aguas han sido explotadas a lo largo de muchos años principalmente para riego y abastecimiento a las poblaciones.

Jalali (2005) indica que estas aguas presentan un amplio intervalo de variabilidad en cuanto a las facies hidrogeoquímicas, identificando facies del tipo bicarbonatada cálcica ( $\text{Ca}^{+2}\text{-HCO}_3^-$ ), sulfatada magnésica ( $\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ ) y bicarbonatada sódica ( $\text{Na}^+\text{-HCO}_3^-$ ). Este investigador señala que estas facies son el reflejo de las litologías presentes en el sector, representadas por la presencia de carbonatos, dolomitas, y diversos silicatos; además de la influencia asociada al factor evaporación a consecuencia del clima.

**Valencia (2007)** <sup>(24)</sup> evaluó estadísticamente la calidad de las aguas en la cuenca hidrográfica del río Ebro de España. Para cumplir con los objetivos planteados, este autor captó 47 muestras; asimismo, midió los parámetros pH, el caudal y conductividad. Además, determinó la concentración de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y alcalinidad, así como la demanda biológica de oxígeno, coliformes totales,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{PO}_4^{3-}$  y temperatura del agua, con la finalidad de determinar a partir de estos parámetros los diferentes índices de calidad.

Los resultados obtenidos por Valencia (2007) le permitió concluir que la salinidad, controlada por la presencia de  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Na}^+$ , en el Río Ebro está muy por encima de los valores de concentración habitualmente considerados para ríos no contaminados; asimismo, este autor determinó que el aumento de la conductividad, está particularmente regida por el  $\text{SO}_4^{2-}$  presente en las aguas. También señaló que los cambios de concentraciones, alcalinidad o salinidad dependen directamente del periodo estacional en que se encuentra el ambiente para el momento de realizar los estudios <sup>(24)</sup>.

**Ahmadi (2009)** <sup>(25)</sup> realizó un estudio sobre la composición química en 16 muestras de agua subterránea captadas en el acuífero Marwani Wadi de Arabia Saudita, a través de la determinación de las especies químicas mayoritarias y minoritarias. El principal objetivo propuesto por este investigador fue la de identificar los procesos responsables de la evolución geoquímica y la mineralización a lo largo de la zona.

Wadi Marwani es uno de los arroyos más importantes en la parte central occidental de Arabia Saudita al noreste de la ciudad de Jeddah. Ahmadi (2009) señala que dicha investigación surge como consecuencia de la progresiva disminución en la reserva de aguas subterráneas y al deterioro de la calidad del agua del acuífero aluvial, de la región.

Los resultados proyectados en un diagrama de Piper, indicó que el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  son los cationes dominantes en la facies hidroquímica. Por otro lado, ocurre un cambio de las facies  $\text{HCO}_3^-$ - $\text{Cl}^-$ - $(\text{NO}_3^-)$ - $\text{SO}_4^{2-}$ , a las facies  $\text{Cl}^-$ - $\text{SO}_4^{2-}$ - $\text{HCO}_3^-$ , aguas abajo, como consecuencia del aumento en las concentraciones de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ , típico de las aguas subterráneas contaminadas por factores antrópicos. Esto indica que las aguas han sido impactadas por las actividades agrícolas sobre la composición química de las aguas subterráneas; así como, por lixiviación de sales fácilmente solubles en el suelo de la zona.

En el mismo orden de ideas, los valores de concentración de  $\text{NO}_3^-$  anormalmente altos detectados en algunas muestras de agua, se atribuye principalmente a la infiltración de las aguas residuales domésticas provenientes de la zona residencial que está muy cerca de los pozos donde fueron captadas las aguas subterráneas. Asimismo, la evaluación de calidad del agua subterránea, reveló que esta puede ser utilizada de forma segura para su consumo. Sin embargo, recomiendan realizar un examen microbiológico cuando los signos de contaminación de las aguas residuales hayan sido detectados <sup>(25)</sup>.

### 2.12.2 Nacionales

**Chirinos et al. (2000)** <sup>(26)</sup> realizaron un estudio preliminar del río San Antonio del municipio Miranda en el Estado Falcón, a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, oxígeno disuelto y temperatura; así como mediante la determinación de la dureza, alcalinidad,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Para ello, estos autores capturaron muestras de aguas del río San Antonio (RSA), desde sus nacientes, cerca de la falla de San Antonio en la Sierra Falconiana, hasta el Balneario de Meachiche; con el objetivo de evaluar la calidad fisicoquímica de esta agua de interés agrícola y recreacional, para clasificarlas y comparar esta calidad con la normativa legal vigente.

Los resultados obtenidos por Chirinos et al. (2000) indican que el agua del RSA es de buena calidad, ya que los valores determinados no exceden los criterios ecológicos establecidos en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995).

**Bolívar (2004)** <sup>(27)</sup> estudió hidrogeoquímicamente 24 muestras de agua subterránea y 3 de manantial, captadas en la región norcentral del Valle de Caracas. Este autor midió los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y Eh y determinó las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ .

En atención a los resultados obtenidos Bolívar (2004) concluyó que en la zona de estudio se destacaban 4 tipos de agua: Ca- $\text{HCO}_3$ -Mg –  $\text{HCO}_3$ - $\text{SO}_4$ , ubicadas en el sector de Chacao – La Floresta – Los Dos Caminos – Los Palos Grandes; Ca- Na- Mg- $\text{HCO}_3$ - $\text{SO}_4$ , caracterizada por una alta concentración de  $\text{NO}_3^-$  cuyo valor es  $30 \text{ mg L}^{-1}$ , hacia el sector de La Castellana- Los Palos Grandes; Ca- Na-  $\text{HCO}_3$ - $\text{SO}_4$ , presentes en el sector de Los Chaguaramos – Santa Mónica; y Ca- Na-  $\text{HCO}_3$ -Cl, en la zona del Rosal y Chapellín. Además infiere que los tipos de aguas son consecuencia de los procesos de interacción agua-roca y del tiempo de residencia del agua, aunado al

efecto de las actividades antrópicas urbanas que han caracterizado a la región de estudio.

**Ayala (2006)** <sup>(28)</sup> estudió la calidad de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana en la Península de Paraguaná, Estado Falcón, Venezuela. Para ello determinó la composición química de las aguas subterráneas existentes en la región en función de la medida de parámetros fisicoquímicos como pH y conductividad eléctrica, así como la determinación de la concentración de los aniones y cationes  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{SiO}_2$ .

Ayala (2006) concluyó que de las muestras de aguas subterráneas estudiadas, sólo dos de ellas podían ser consideradas de buena calidad y aptas para el consumo humano, debido a que cumple con la normativa existente para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua; el restante 94% de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana mostraron altas concentraciones de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , considerándose de baja calidad y no apropiadas para el uso en las actividades agrícolas. Finalmente, esta autora determinó que la composición química de estas aguas de la región de Santa Ana está principalmente controlada por procesos de interacción agua-roca, que incluye reacciones de hidrólisis e intercambio catiónico; por el factor evaporación que conlleva a precipitación y disoluciones de sales; y por la posible influencia de intrusiones de aguas marinas.

**Jiménez (2009)** <sup>(29)</sup> realizó un estudio sobre los factores y procesos que determinan la calidad química de las aguas subterráneas del sector sur-central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco.

Durante esta investigación, Jiménez (2009) determinó las concentraciones de las especies mayoritarias, a través de distintas técnicas analíticas en 18 muestras de agua.

Los resultados obtenidos fueron analizados mediante el uso de diferentes herramientas gráficas como el diagrama de Piper, de estadísticas como las cajas gráficas y mapas de distribución espacial, entre otras.

Los resultados obtenidos indicaron que el 78% de las muestras corresponden a aguas del tipo  $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ ; mientras que un 11% son  $\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-HCO}_3^-$ ; y el resto corresponde al tipo  $\text{Na}^+\text{-SO}_4^{2-}$  y  $\text{K}^+\text{-SO}_4^{2-}$ . Jiménez (2009) concluyó que la composición de las aguas posiblemente esté controlada por diversos procesos, entre los que se encuentran la interacción agua-roca, a través del intercambio iónico; así como por factores como la precipitación atmosférica y las actividades antrópicas; asimismo respecto al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 2005) el 93,5% de las muestras analizadas entran en la clasificación de buena a excelente, por lo que pueden ser usadas para cualquier actividad <sup>(29)</sup>.

**Oropeza (2009)** <sup>(30)</sup> desarrolló un estudio hidrogeoquímico de aguas subterráneas en la Cuenca de los Valles del Tuy en el sector de Charallave-Paracotos, Estado Miranda, Venezuela. La evaluación de estas aguas fue realizada mediante la medida de los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad y alcalinidad; seguido de la determinación de las especies químicas  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{SiO}_2$ , en 22 muestras mediante las técnicas de absorción, emisión atómica y cromatografía iónica. Para la caracterización de las aguas fue utilizado el diagrama de Piper, la distribución espacial, la variación de los datos expresados en cajas gráficas y algunas relaciones interelementales.

El tipo de agua identificada en la región de estudio por Oropeza (2009) fueron básicamente dos grupos: cálcica y/o magnésicas y bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas; cuyos iones predominantes son  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ . El proceso que controla la composición química de las aguas de esta localidad de acuerdo a los resultados obtenidos por Oropeza (2009) es principalmente el de interacción agua-roca,

además de la hidrólisis de sales evaporíticas como yeso y anhidrita. En la mayoría de las muestras fueron obtenidas altas concentraciones de  $\text{HCO}_3^-$  y Cd considerándose de baja calidad y no apropiadas para el consumo humano; asimismo, los factores que se consideran responsables de la calidad de las aguas de la región de Charallave son principalmente la actividad antrópica, además de la litología, la evaporación y los cambios climáticos <sup>(30)</sup>.

**Urrutia (2009)** <sup>(31)</sup> realizó un estudio hidroquímico de las aguas subterráneas del sector este de la cuenca del río Zuata del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco. Para ello, este autor determinó las concentraciones de las especies químicas mayoritarias  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{SiO}_2$ , y con ello aplicando algunas herramientas identificar los procesos y factores geoquímicos que pueden estar controlando la composición de las aguas subterráneas. Este investigador plantea que la composición de las aguas subterráneas está controlada por los procesos de precipitación, interacción agua-medio poroso y del intercambio iónico asociado a la fracción arcillosa presente; también por los factores como el clima, tiempo de residencia y migración del agua.

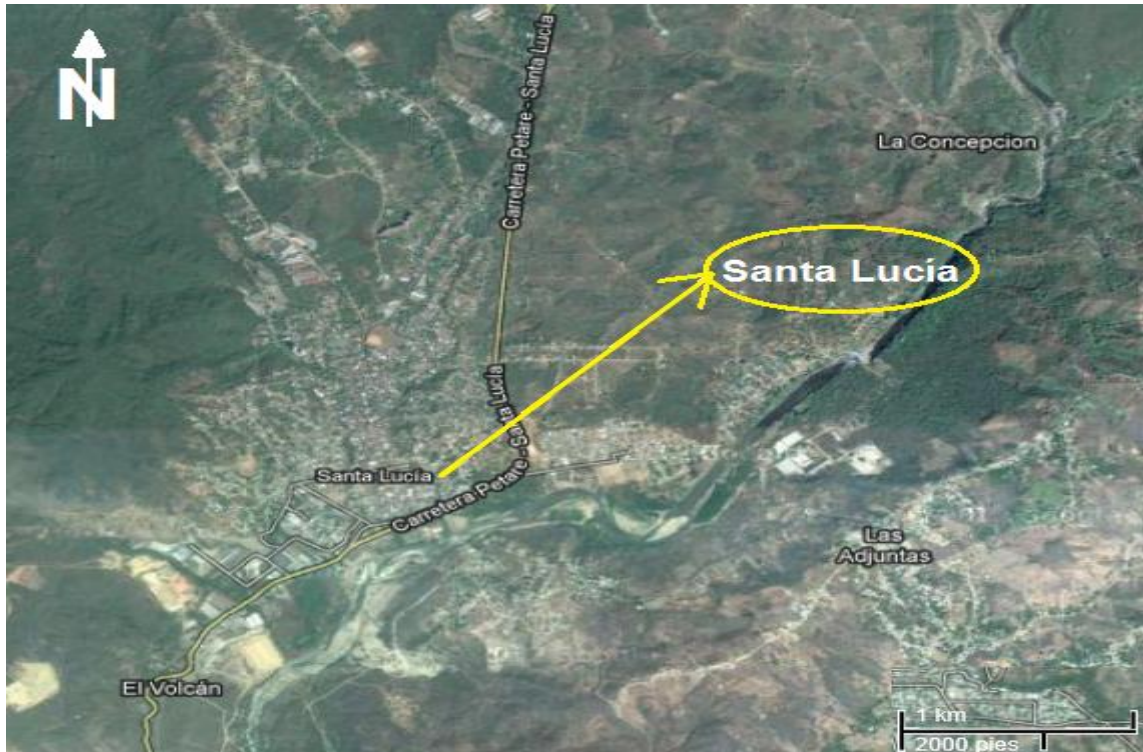
Adicionalmente, Urrutia (2009) identificó tres tipos de aguas en la zona de estudio, a saber:  $\text{Ca}^{2+} \text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+ \text{HCO}_3^-$  y agua tipo  $\text{Ca}^{2+} \text{SO}_4^{2-}$  <sup>(31)</sup>.

## 2.13 DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En la presente sección, son reseñados algunos de los rasgos más resaltantes de la zona de estudio que incluyen su ubicación geográfica, clima, vegetación, relieve, suelos, hidrología, marco geológico y las principales actividades antrópicas que allí se realizan.

### 2.13.1 Ubicación geográfica

La cuenca Santa Lucía-Ocumare, está localizada en el estado Miranda al centro norte del país, comprendida entre las coordenadas  $67^{\circ}00'$  y  $66^{\circ}30'$  de longitud oeste y  $10^{\circ}00'$  y  $10^{\circ}30'$  de latitud norte. El acceso a esta cuenca se puede realizar a través de la carretera Petare-Santa Lucía <sup>(32)</sup>. En la Figura 4 se observa la zona de estudio.



**Figura 4.** Ubicación de la zona de estudio, Santa Lucía en Valles del Tuy <sup>(32)</sup>

### **2.13.2 Clima**

La zona de la cuenca sedimentaria de Santa Lucía-Ocumare del Tuy es clasificada atendiendo a las siguientes características: clima tropical lluvioso cálido, de sabana y bosques tropófilos; temperatura media anual superior a 18 °C, generalmente entre 24 °C y 26 °C; gradiente geotérmico de 0,75 °C/100 m; precipitación anual de 700 a 1200 mm, inferior a 60 mm mensualmente durante la estación seca; y humedad relativa media anual entre 70 y 80% <sup>(32)</sup>.

### **2.13.3 Vegetación**

Según MARNR (1982) <sup>(33)</sup> se diferencian dos formaciones vegetales: arbóreas o bosques de galería, que se trata de un tipo de bosque siempre verde, monoestratificado, que crece en las orillas de los cursos de agua; y arbustivas o matorral, de menos de 5 m de altura, monoestratificado, de fisonomía variable de acuerdo a las condiciones climáticas.

### **2.13.4 Relieve**

Los Valles del Tuy constituyen una depresión dentro de la Cordillera de la Costa, entre las Serranías del Litoral y del interior, al norte y al sur respectivamente. Es de hacer notar que las poblaciones de Cúa, Santa Teresa y Ocumare del Tuy están asentadas sobre los remanentes más altos de terrazas, que corresponden a cerros o lomas de topes sumamente planos y ligeramente inclinados hacia el sur <sup>(33)</sup>.

### **2.13.5 Suelos**

Los suelos presentes en la cuenca de los Valles del Tuy, pertenecen al tipo podzólicos amarillos (ultisoles). Estos suelos presentan una evolución pedológica, generalmente contienen altas concentraciones de aluminio, siendo de esta manera, de baja capacidad

agrícola. Existen suelos pardos oscuros, ricos en materia orgánica que se desarrollan preferencialmente sobre las terrazas aluviales. Sobre éstos, se localiza la mayor parte de los cultivos agropecuarios. Sin embargo, estos cultivos han sido parcialmente abandonados y/o destruidos, puesto que la economía de la cuenca se ha encaminado hacia la explotación de los materiales de las terrazas aluviales para fines de construcción <sup>(33)</sup>.

#### **2.13.6 Hidrología**

El drenaje principal de la región es el río Tuy, cuyas cabeceras se encuentran en la vertiente sur de la Serranía del Litoral, a unos 2400 m de altura; el afluente principal del río Tuy es el río Guaire, que nace cerca de los Teques y drena al Valle de Caracas. En orden de importancia, siguen las quebradas Charallave por la vertiente norte y los ríos Lagartijo, Ocumarito y Talma que drenan las rocas metavolcánicas expuestas al sur del río Tuy <sup>(34)</sup>.

#### **2.13.7 Geología**

En la cuenca de Santa Lucía-Ocumare del Tuy, afloran dos formaciones sedimentarias principalmente, la Formación Siquire de origen lacustre y suprayacente aparece la Formación Tuy de origen fluvio-lacustre.

La Formación Siquire consiste de areniscas bien estratificadas, intercaladas con limos y lutitas laminares, con algunos conglomerados y una caliza. Las areniscas y conglomerados son líticos de cemento calcáreo; las capas individuales tienen espesores entre 20 y 60 centímetros. Son frecuentes las limolitas laminares y lutitas grises astillosas y laminares. Se sugiere una edad Mioceno inferior a medio <sup>(34)</sup>.

Por su parte, la Formación Tuy se caracteriza por una intercalación constante y monótona de capas gruesas, generalmente de 1 a 3 metros de espesor, de gravas heterogéneas y conglomerados líticos mal consolidados (55%), con matriz limo arcillosa abundante y a veces con cemento calcáreo, intercaladas con arcillas (30%), lutitas y cantidades menores de margas y areniscas. Las arcillas se presentan en capas menores de 1 m, frecuentemente calcáreas hasta margosas que contienen escasos fósiles de agua dulce <sup>(35)</sup>.

González de Juana et al. (1980) <sup>(35)</sup> y CECPV (1997) <sup>(34)</sup> indican que los sedimentos de la Formación Tuy sugieren un desarrollo contemporáneo con cambios climáticos drásticos durante el Plioceno tardío-Pleistoceno. La Formación Tuy cubre aproximadamente el 70% de la cuenca Santa Lucía-Ocumare del Tuy, en una poligonal con vértices en Santa Lucía, Santa Teresa, Ocumare del Tuy, Cúa, Charallave y Suapire, y en parte al noreste de Santa Teresa.

### **2.13.8 Actividades antrópicas**

Entre las actividades económicas de mayor desarrollo de la región se encuentra la industrial, destacándose: la industria metalúrgica; transportadoras de acero; industrias del plástico; industrias de alfarería; industria arenera, agroindustrias e industrias de procesamiento de madera; por lo que la región de estudio constituye uno de los primeros conjuntos urbanos manufactureros del país. La región de los Valles del Tuy se caracteriza por ser productora de cacao, caña de azúcar y cereales, mientras que los microclimas son aprovechados para actividades hortícolas y frutícolas cuyos productos son procesados en las agroindustrias; sin embargo, ha venido en constante crecimiento las actividades urbano-industriales <sup>(32)</sup>.

### 3. OBJETIVOS

#### 3.1 Objetivo General:

Estudiar la calidad química y tipos de agua subterránea en el sector Santa Lucía de los Valles del Tuy, Estado Miranda.

#### 3.2 Objetivos específicos:

- ✓ Caracterización de la composición química del agua subterránea en el sector Santa Lucía en función de la concentración de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) y los elementos traza Ba, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Zn y Sr.
- ✓ Caracterización fisicoquímica de las aguas subterráneas en el sector Santa Lucía a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura.
- ✓ Identificar los tipos de aguas subterráneas presente y establecer su calidad química, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N<sup>o</sup> 5021, 1995).

## 4. PARTE EXPERIMENTAL

### 4.1 EQUIPOS

La determinación de los cationes mayoritarios  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  en las aguas se realizó en un espectrofotómetro de emisión atómica con llama (FEAS) marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst 200, que consta de un monocromador echelle de doble haz, con longitud focal de 300 mm, 79 líneas/mm y un detector fotomultiplicador con respuesta espectral en el intervalo de 189 a 900 nm. La introducción de muestra se realizó mediante un nebulizador de flujo cruzado.

Por otra parte la determinación de  $\text{Mg}^{2+}$  en las aguas se realizó empleando el equipo anteriormente descrito, pero en el modo de espectrofotómetro de absorción atómica con llama (FAAS), empleando una lámpara de cátodo hueco (HLC) Ca-Mg-Zn, marca Perkin Elmer.

Por su parte, para la determinación de los aniones mayoritarios  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas se empleó un cromatógrafo iónico (IC) secuencial, marca Dionex, modelo DX-100. Este equipo cuenta con una columna analítica 10 npack 4x250 mm, modelo AS4A-SC 10 npack, un supresor marca Dionex, modelo ASRS 300 P/N 064554, emplea una fase móvil con proporciones de Bicarbonato 1,7 mM y Carbonato 1,8 mM, el flujo de esta fase es  $1,5 \mu\text{L min}^{-1}$ ; y el detector es conductimétrico. Por otra parte el filtro de la jeringa empleado para introducir la muestra es de  $0,2 \mu\text{m}$ .

La determinación del anión  $\text{HCO}_3^-$  se realizó a través de una titulación potenciométrica con  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , empleando una bureta automática marca Jencons, modelo Digitarte-Pro50,

de capacidad desde 0,01 a 50 mL. La titulación se monitoreó con un pHmetro marca Orion, modelo 4 Star.

En la determinación de elementos traza (Ba, Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Zn y Sr), el Silicio y el catión mayoritario  $\text{Ca}^{2+}$  se empleó un espectrofotómetro de emisión atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP-OES) marca Horiba Jobin Yvon, modelo Ultima 2. Este equipo de detección simultánea posee un generador de radiofrecuencia de 60 MHz, potencia variable entre 900 y 1100 watts; y un detector fotomultiplicador. Durante el trabajo se empleó un nebulizador de tipo flujo concéntrico.

#### **4.2. REACTIVOS**

En el procedimiento de acidificación de las muestras, titulación y en la preparación de los patrones se emplearon los siguientes reactivos: ácido nítrico ( $\text{HNO}_3$ ) al 65 % p/p marca Riedel-de Haën; ácido sulfúrico ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) al 98% marca Riedel-de Haën; nitrato de sodio ( $\text{NaNO}_3$ ) al 99,5% marca Analar R; carbonato de sodio ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) al 99,9% marca Analar R; cloruro de sodio ( $\text{NaCl}$ ) al 99,5% marca Merck; sulfato de sodio ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ) al 99,7% marca Baker analyzer y cloruro de sodio (KCl) al 99,5% marca Riedel-de Haën.

Para la preparación de patrones, empleados en la elaboración de las curvas de calibración, se usaron estándares unielementales de 1000  $\text{mg L}^{-1}$  de Cu, Fe y Ni, marca Fluka Chemical; Mn, Sr y Zn, marca Riedel-de Haën; Li, Ba y Ca, marca Merck; un estándar de Mg de 500  $\text{mg L}^{-1}$  marca Merck y un estándar de Si de 2000  $\text{mg L}^{-1}$  marca Merck.

## 4.3 METODOLOGIA

La metodología seguida en este estudio, involucró cuatro fases: pre-campo, campo y laboratorio.

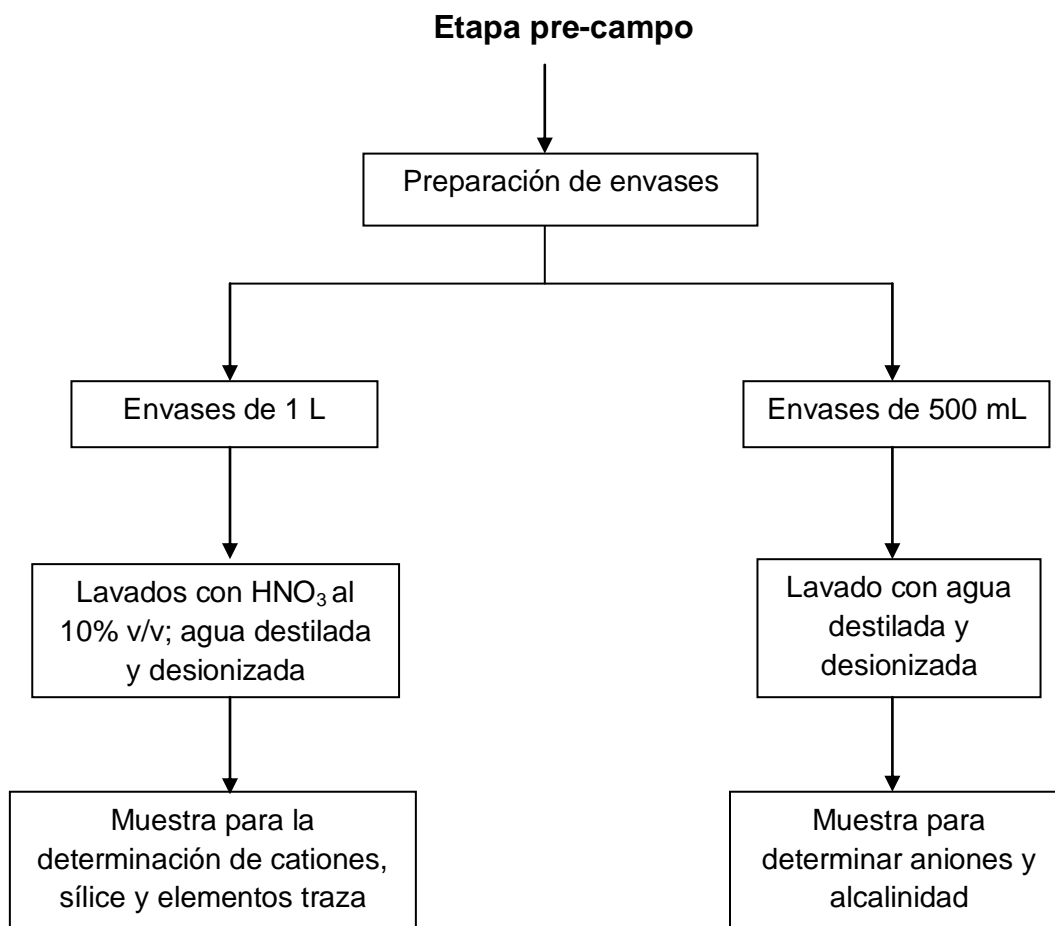
### 4.3.1 Etapa de pre-campo

El trabajo de pre-campo consistió en la recopilación de datos descriptivos de la zona de estudio; así como la preparación de los materiales, equipos y envases a emplear en la toma de muestras.

Para la recolección de las muestras de agua destinadas a la determinación de los elementos mayoritarios y traza, se utilizaron envases plásticos de polietileno con capacidad de 1 L, los cuales fueron lavados previamente en el laboratorio con  $\text{HNO}_3$  al 10%  $\text{v/v}$ , durante 24 horas. Luego de esto, se aplicó 3 lavados con abundante agua destilada y 2 veces con agua desionizada.

Para la toma de muestras destinadas a la determinación de aniones, se emplearon envases de plásticos de polietileno con capacidad de 500 mL, los cuales no fueron tratados según el procedimiento antes descrito, se lavaron 3 veces con agua destilada y 2 veces con agua desionizada (Figura 5).

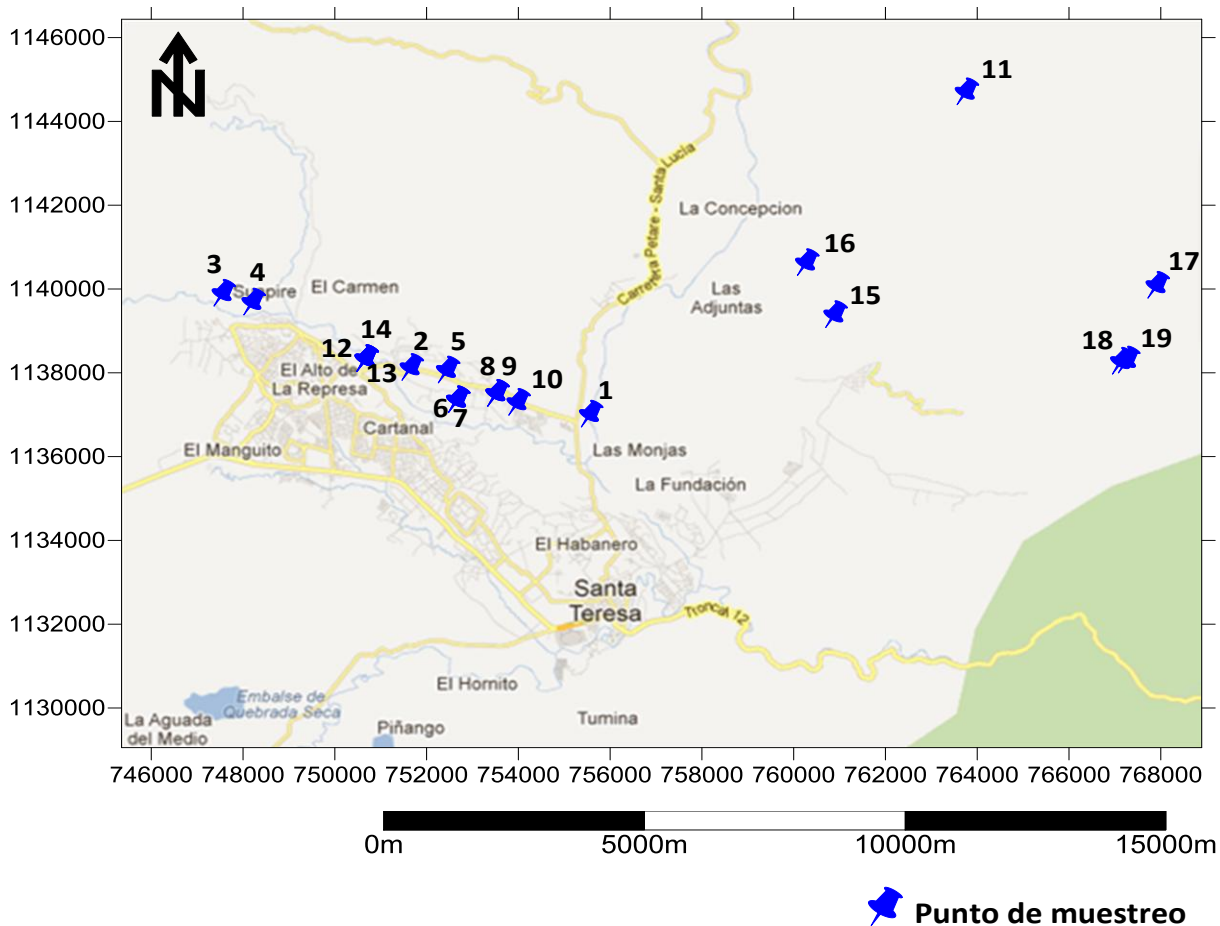
Todos los envases fueron etiquetados indicando la fecha, localidad, profundidad del pozo y número de muestra. La profundidad y descripción de cada pozo muestreado se puede encontrar en el Apéndice 1.



**Figura 5.** Esquema de la etapa pre-campo

### 4.3.2 Etapa de campo

El muestreo fue realizado para el Proyecto de Grupo PG-03-7183-2008, coordinado por el Prof. Ramón Montero, la Ing. Vanessa Ojeda y la Lic. Adriana Camargo de la UBV. Este se realizó en un lapso de cuatro (4) días, entre el 16 y 20 de noviembre del 2009. Consistió en el traslado hacia la zona de estudio para la captación de 19 muestras de agua distribuidas de la siguiente forma: 4 muestras de manantial y 15 muestras de agua subterránea; simultáneamente se midieron los parámetros fisicoquímicos: pH, conductividad y temperatura. La distribución de los puntos de muestreo en la zona de estudio se presenta en la Figura 6; mientras que en el Apéndice 1 se resumen la ubicación geográfica, profundidad del pozo, identificación del tipo de sistema y parámetros fisicoquímicos medido.



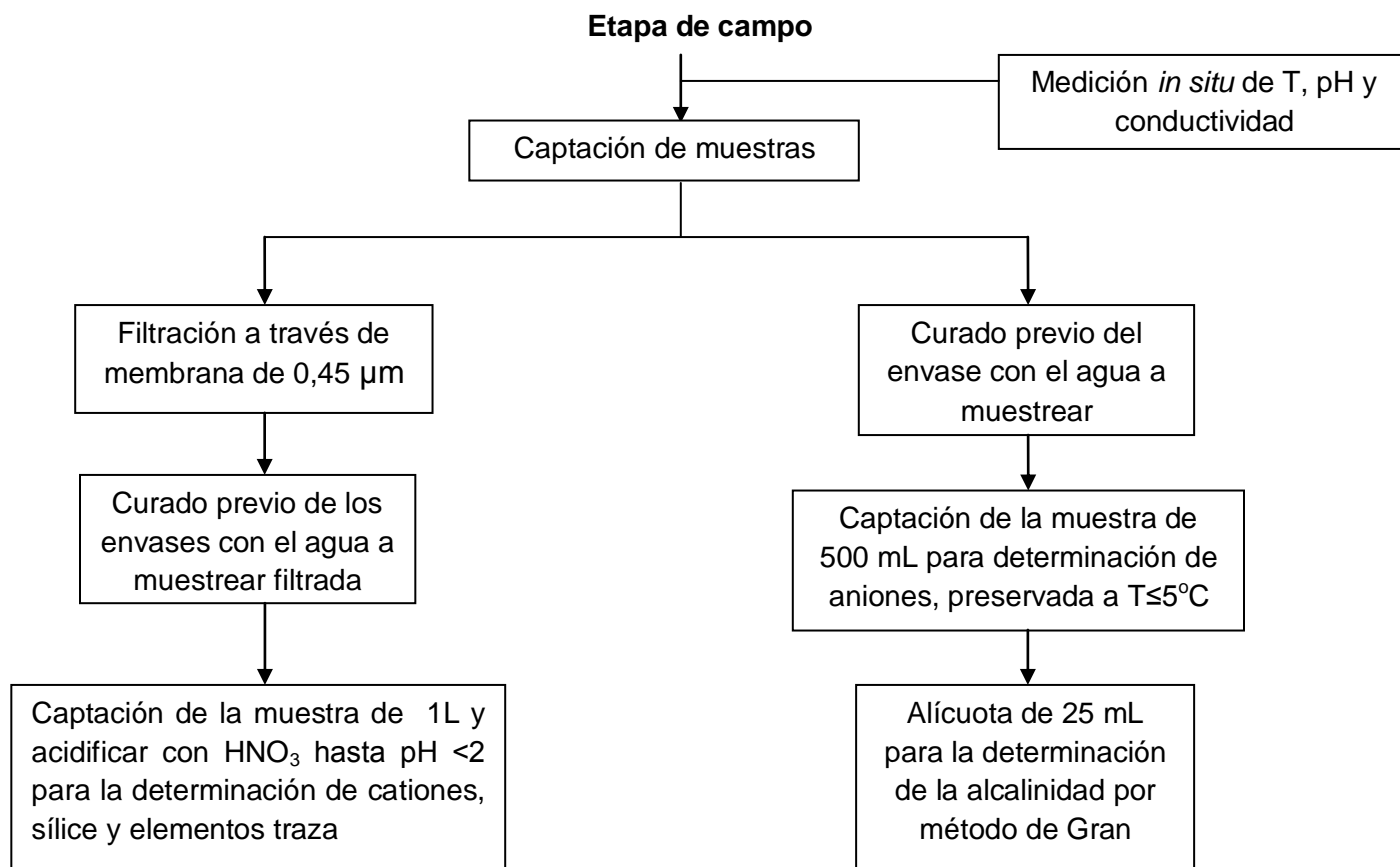
**Figura 6.** Sitios de captación de muestras en la Cuenca Santa Lucía <sup>(36)</sup>

Previo a la toma de muestras, se procedió a dejar abierta la llave de salida de agua por un tiempo aproximado de cinco minutos, con la finalidad de poder desalojar agua residual estancada presente en las tuberías de los pozos.

En algunos casos, la toma de muestras se realizó por medio de una extracción manual y en otros, por sistemas de bombeo. En cada estación, una porción de agua fue captada en un beacker plástico de 250 mL de capacidad, para la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura. Dichas medidas fueron llevadas a cabo con un pHmetro marca Orion, modelo 4 Star, provisto de un electrodo de vidrio, calibrado cada tres estaciones con soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10.

Las muestras de agua destinadas a la determinación de cationes, fueron filtradas empleando un filtro de membrana de Nylon de 0,45  $\mu\text{m}$ , de 25 mm de diámetro, marca Milipore Analítica; seguidamente se acidificaron con  $\text{HNO}_3$  concentrado bidestilado hasta llevarlas a  $\text{pH} < 2$ . Este tratamiento permitió que las muestras de aguas se preservaran para su posterior análisis.

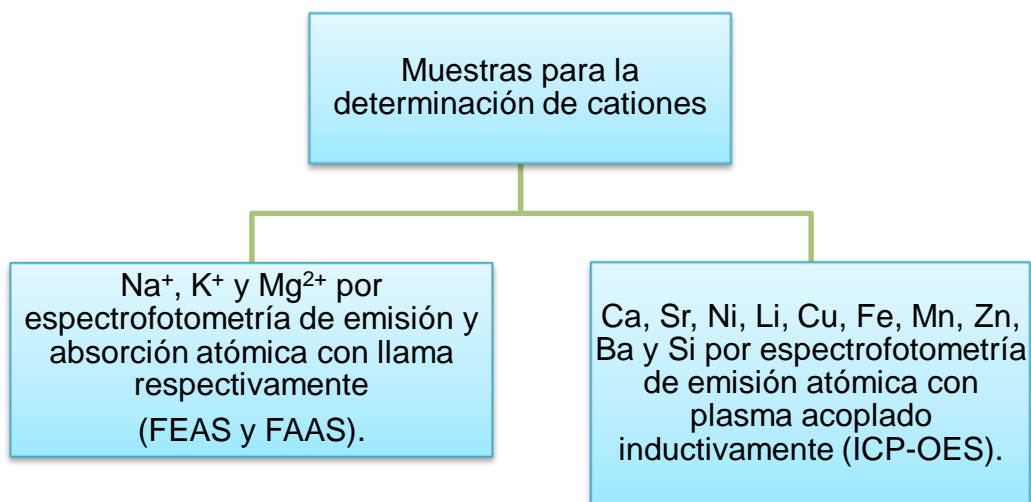
Las muestras destinadas para el análisis de los aniones, fueron captadas directamente sin realizar el proceso descrito para las muestras de cationes antes mencionado. Luego de la recolección de las aguas, las mismas se preservaron en una cava a una temperatura aproximada de 5  $^{\circ}\text{C}$ , donde las muestras fueron transportadas hasta el laboratorio para posteriormente realizar los análisis respectivos. La Figura 7 muestra esquemáticamente la etapa de campo desarrollada en este estudio.



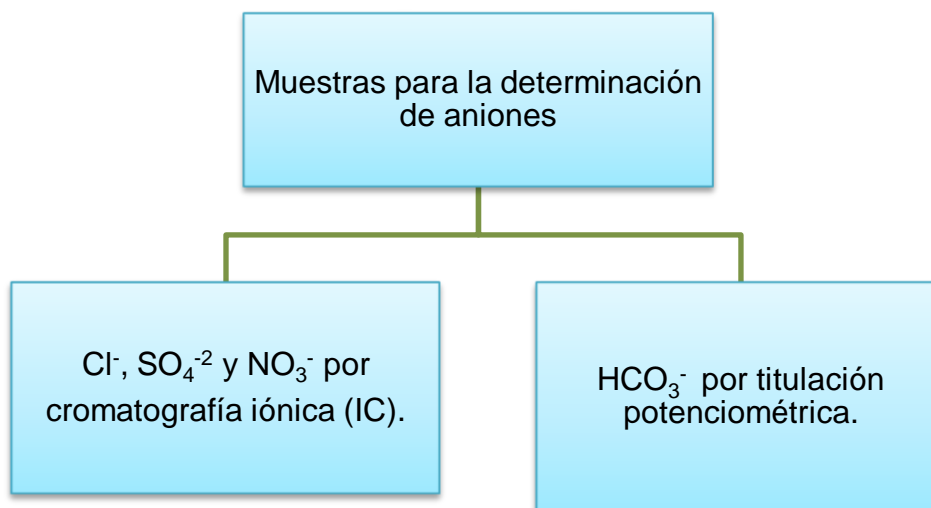
**Figura 7.** Esquema de la etapa de campo

### 4.3.3 Etapa de laboratorio

En las Figuras 8 y 9 se presenta el esquema de trabajo experimental realizado; tanto durante la determinación de los cationes y sílice disuelta ( $\text{SiO}_2$ ) como de los elementos traza propuestos.



**Figura 8.** Esquema de trabajo experimental seguido en la determinación de cationes



**Figura 9.** Esquema de trabajo experimental seguido en la determinación de aniones

#### **4.3.3.1 Determinación de las concentraciones de cationes mayoritarios, minoritarios y elementos traza**

La determinación de los cationes mayoritarios  $\text{Na}^+$  y  $\text{K}^+$  se llevó a cabo a través de la técnica analítica espectrofotometría de emisión atómica con llama (FEAS), mientras que para el análisis del  $\text{Mg}^{2+}$  fue utilizada la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con llama (FAAS), usando como combustible acetileno y aire como oxidante.

La determinación de Ca, Si y los elementos traza Ba, Ni, Zn, Li, Fe, Cu, Mn y Sr se realizó mediante la utilización de un espectrofotómetro de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP-OES). Para ello fueron preparados patrones multielementales conteniendo los elementos de interés que permitieron la construcción de las curvas de calibración externa para el cálculo de las respectivas concentraciones. Las condiciones operacionales empleadas se encuentran resumidas en la Tabla 9. Es importante señalar que todos los análisis se realizaron por duplicado.

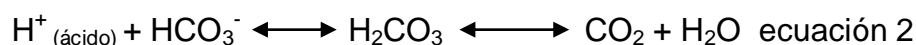
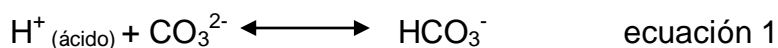
#### **4.3.3.2 Determinación de las concentraciones de aniones cloruro, nitrato, sulfato y bicarbonato**

La determinación de los aniones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  fue llevada a cabo por medio de la técnica analítica Cromatografía Iónica (IC). Las condiciones operacionales empleadas se encuentran resumidas en la Tabla 9. De igual manera, los análisis se realizaron por duplicado.

Por su parte, el análisis del ión bicarbonato se realizó por medio de la titulación potenciométrica de una alícuota de 25 mL de muestra, con una solución de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,0193 N, previamente estandarizado con  $\text{CaCO}_3$  0,0052 M; la titulación se monitoreó con un pHmetro y se empleó una bureta digital de 50 mL de capacidad. El método utilizado (método de Gran)<sup>(37)</sup> es presentado en el Apéndice 2. Es importante resaltar

que el análisis de bicarbonato fue realizado en un tiempo no mayor de 24 horas, para evitar valores erróneos en su determinación.

La reacción involucrada es la siguiente:



**Tabla 9.** Condiciones de operación del FAAS-FEAS, ICP-OES y IC

<b>FAAS Y FEAS</b>	Flujo de acetileno Flujo de aire Corriente Lámpara (Mg)*	2,5 (L min <sup>-1</sup> ) 10,0 (L min <sup>-1</sup> ) 5 mA
<b>ICP-OES</b>	Radiofrecuencia Plasmógeno Flujo del Nebulizador Presión del Nebulizador Velocidad de bombeo	1100 (W) 12 (L min <sup>-1</sup> ) 0,02 (L min <sup>-1</sup> ) 1 Bar 20 (L min <sup>-1</sup> )
<b>IC</b>	Fase Móvil Proporción de Carbonato Proporción de Bicarbonato Columna Analítica Flujo de fase móvil	Carbonato/Bicarbonato 1,8 mM 1,7 mM 10 npack 4 x 250 mm (1,5 µL min <sup>-1</sup> )

\*La lámpara de Mg aplica únicamente para la técnica de FAAS

Los intervalos de concentración de los patrones usados para la determinación de los elementos mayoritarios y traza se encuentran representados en las Tablas 10 y 11, junto con las longitudes de onda característica de cada elemento. La técnica cuantitativa empleada fue la curva de calibración externa.

**Tabla 10.** Intervalo de concentración para la determinación de elementos mayoritarios en agua por ICP-OES, IC, FAAS y FEAS

<b>Especie</b>	<b>Intervalo de concentración (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>
<b>Ca</b>	10 - 200	422,67
<b>Si</b>	1 - 20	251,61
<b>Na</b>	0,2 - 5,0	589,00
<b>K</b>	0,2 - 5,0	766,49
<b>Mg</b>	0,2 - 5,0	285,21
<b>Cl</b>	1 - 30	*tr = 1,07
<b>NO<sub>3</sub></b>	1 - 25	*tr = 2,02
<b>SO<sub>4</sub></b>	1 - 30	*tr = 4,37

\*tr = tiempo de retención (min).

**Tabla 11.** Intervalo de concentración para la determinación de elementos traza en agua por ICP-OES

<b>Especie</b>	<b>Intervalo (µg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>Longitud de onda (nm)</b>
<b>Sr</b>	20 - 2000	407,77
<b>Li</b>	5 - 100	670,78
<b>Ni</b>	5 - 100	231,60
<b>Cu</b>	20 - 100	224,70
<b>Fe</b>	150 - 1000	259,94
<b>Zn</b>	100 - 500	202,55
<b>Mn</b>	7,5 - 150	257,61
<b>Ba</b>	5 - 100	455,40

#### **4.3.4 Validación del análisis de las muestras de agua**

La validación de las metodologías de análisis aplicadas a las muestras de agua, se realizó analizando por triplicado las muestras de referencia: TM-25.3 para el análisis de los elementos Li, Sr, Ba, Mn, Ni y la TM-26.3 para el análisis de los elementos Sr, Ba, Cu, Mn, Ni, Zn, Ca, Mg, Na y K. Asimismo se determinó el balance iónico de las muestras.

#### **4.4 LUGAR DE TRABAJO**

Todo el trabajo fue realizado en el laboratorio de Hidrogeoquímica, ubicado en el Instituto de Ciencias de la Tierra de la Facultad de Ciencias de la Universidad Central de Venezuela.

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIONES

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos en este estudio. Para ello, inicialmente se realiza la validación de estos resultados; seguidamente, el cálculo de las figuras de mérito obtenidas en las diferentes metodologías de análisis; la determinación de la concentración de especies mayoritarias y elementos traza en las muestras de agua; caracterización hidrogeoquímica; calidad química de las muestras de agua y finalmente algunas relaciones interelementales.

### 5.1 Validación de resultados

El proceso de validación de resultados, es realizado mediante la aplicación de tres metodologías: análisis de las muestras certificadas TM-25.3 y TM-26.3; balance iónico; y comparación de la conductividad teórica frente a la medida en campo durante el proceso de captación de las muestras de agua.

#### 5.1.1 Validación de las metodologías de análisis empleadas

Empleando las metodologías descritas en la sección previa, pero realizando tres replicas de análisis en las muestras de referencia, se obtuvieron las concentraciones para cada uno de los elementos mostrados en las Tablas 12 y 13, donde se observa que los valores certificados se encuentran dentro del intervalo correspondiente de concentraciones obtenidas (intervalo de confianza 95%), a excepción del Zn en la muestra certificada TM-26.3, cuyo intervalo de concentración certificado para dicho elemento se encuentra por debajo de límite de detección calculado para éste, que fue de  $48,8 \mu\text{g L}^{-1}$ .

**Tabla 12.** Concentraciones obtenidas\* y certificadas de los elementos traza Li, Sr, Ba, Cu, Mn, Ni y Zn en las muestras de referencia de Agua TM-25.3 y TM-26.3

Material Certificado	Concentración	Li	Sr	Ba	Cu	Mn	Ni	Zn**
TM-25.3 Lote 0807	Obtenida <sup>(I)</sup> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	24,7 $\pm$ 1,5	72,6 $\pm$ 1,6	28,4 $\pm$ 1,8	---	26,4 $\pm$ 2,3	13,1 $\pm$ 2,4	---
	Certificada <sup>(II)</sup> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	25,7 $\pm$ 2,9	69,9 $\pm$ 5,8	26,9 $\pm$ 2,3	---	25,4 $\pm$ 2,5	15,6 $\pm$ 1,5	NR
	CV (%)	2,9	0,9	2,6	---	3,6	6,8	---
TM-26.3 Lote 605	Obtenida <sup>(I)</sup> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	---	101,3 $\pm$ 2,8	26,1 $\pm$ 0,6	13,9 $\pm$ 0,7	17,3 $\pm$ 0,2	9,1 $\pm$ 1,5	<LD
	Certificada <sup>(II)</sup> ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	---	96,0 $\pm$ 7,5	25,0 $\pm$ 2,4	13,4 $\pm$ 1,9	17,0 $\pm$ 1,4	10,2 $\pm$ 1,3	39
	CV (%)	---	1,1	0,9	2,1	0,6	6,4	---

\*Valores obtenidos como  $\bar{X} \pm \text{sdv}$ , N=3

\*\*Valor de referencia de Zn

(I) Valores expresados como  $\bar{X} \pm \text{IC}_{95\%}$ ,  $t_{\text{exp}} = 4,3$

(II) Valores expresados como  $\bar{X} \pm 2\text{sdv}$

NR: no reportado

CV: coeficiente de variación; <LD: menor al límite de detección de la técnica

**Tabla 13.** Concentraciones obtenidas\* y certificadas de los elementos mayoritarios en el material de referencia de Agua CRM TM-26.3

Material Certificado	Concentración	Ca	Mg	Na	K
TM-26.3 Lote 605	Obtenida <sup>(I)</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	13,5 $\pm$ 0,1	3,2 $\pm$ 0,2	4,54 $\pm$ 0,05	0,68 $\pm$ 0,03
	Referencia <sup>(II)</sup> ( $\text{mg L}^{-1}$ )	14	3,4	5	0,7
	CV (%)	0,4	3,1	0,5	1,8

\*Valores obtenidos como  $\bar{X} \pm \text{sdv}$ , N=3

(I) Valores expresados como  $\bar{X} \pm \text{IC}_{95\%}$ ,  $t_{\text{exp}} = 4,3$

(II) Valores de referencia expresados como  $\bar{X}$

CV: coeficiente de variación

De acuerdo a las concentraciones obtenidas tanto para los elementos mayoritarios como para los traza, puede afirmarse que la metodología empleada para los análisis de las muestras de agua estudiadas, garantiza la exactitud en las determinaciones de los elementos de interés en el presente trabajo de investigación.

### 5.1.2 Balance iónico, relación iónica y conductividad

El balance iónico es una aplicación del principio de la conservación de la masa, aplicada a una región definida por determinadas condiciones de contorno. La precisión de los análisis químicos puede ser estimada por el cálculo del balance de cargas, ya que estos sistemas se comportan de manera homogénea <sup>(2)</sup>.

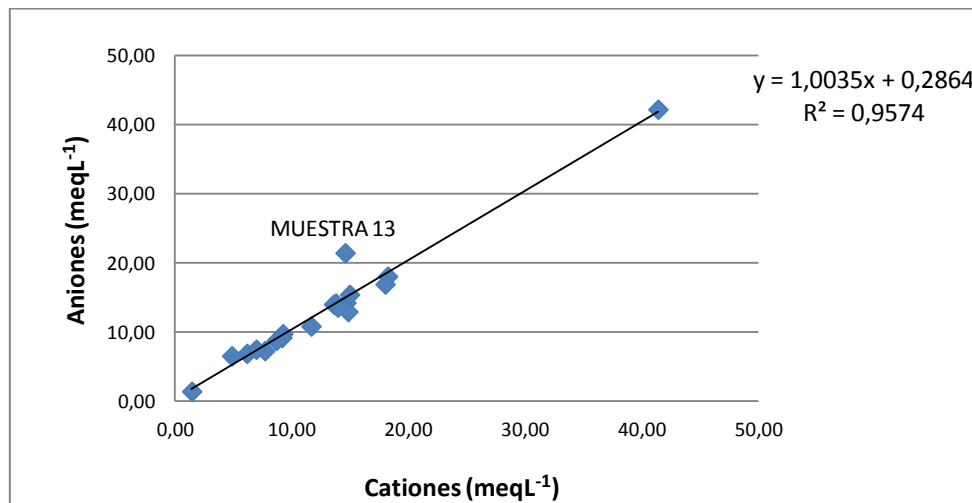
En la Figura 10 se puede observar que el error porcentual del balance iónico para todas las muestras exceptuando a la SLSRAS-13 y SLSRAS-14, fué menor del 10%, lo que indica que los resultados son confiables desde el punto de vista geoquímico. En ese sentido, en el caso particular de las muestras 13 y 14, cuyo porcentaje de balance iónico es mayor al 10%, puede deberse a errores analíticos o a la presencia excepcional de alguna sustancia no analizada (13). La ecuación empleada para la determinación del balance iónico de cada muestra y los resultados obtenidos son presentados en el Apéndice 3.



**Figura 10.** Error porcentual del balance iónico

Por otra parte, se construyó la gráfica de la concentración de los aniones contra la de los cationes, ambas en  $\text{meqL}^{-1}$ , mostrada en la Figura 11. Para dicha relación se obtuvo un valor en la pendiente de  $(1,003 \pm 0,004)$ , lo que indica que la tendencia general de la concentración de los aniones es 0,3 % mayor a la concentración presentada por las especies catiónicas determinadas, lo cual es despreciable y se puede indicar una buena correspondencia en las concentraciones.

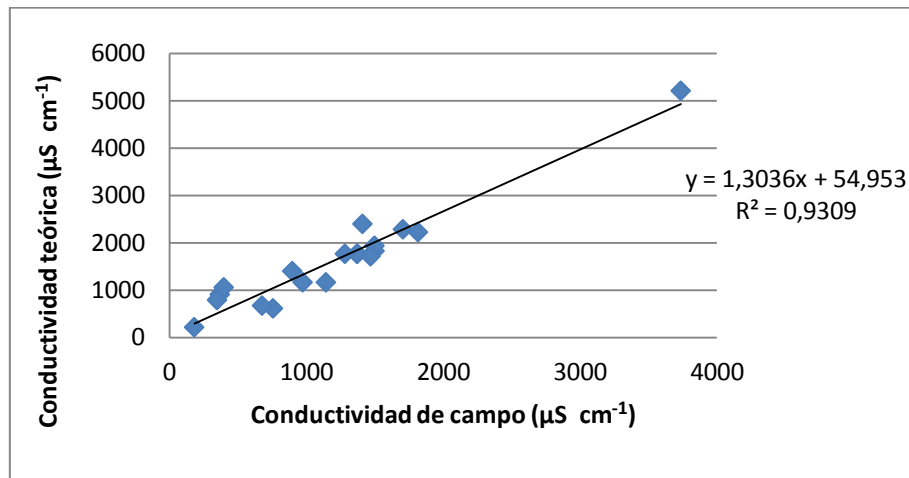
En el mismo orden de ideas, se logra observar una relación lineal dada por un  $R^2 = 0,9574$ , lo que indica un ajuste lineal confiable; sin embargo el  $R^2$  se ve afectado por la muestra 13 que es particular como se demostró en el balance iónico.



**Figura 11.** Relación de los aniones frente a los cationes en  $\text{meq L}^{-1}$

También, como herramienta de verificación de validez de los datos, es común esperar que la conductividad medida en campo sea similar a la conductividad ideal calculada a  $25^{\circ}\text{C}$  <sup>(2)</sup>. En ese sentido, la Figura 12 muestra la relación existente entre la conductividad obtenida en campo y la conductividad teórica para las diecinueve muestras captadas en la zona de estudio; asimismo, en el Apéndice 4, son presentadas

tanto las ecuaciones empleadas para calcular las conductividades teóricas como las obtenidas al aplicar dicha ecuación.



**Figura 12.** Relación entre la conductividad teórica y la conductividad obtenida en campo

Obsérvese en la Figura 12, que la curva obtenida presenta un valor de pendiente de  $1,30 \pm 0,08$ , indicando que el valor de la conductividad teórica es 30% superior a la conductividad de campo. Esta diferencia entre las conductividades, puede deberse a la capacidad de respuesta presentada por el electrodo durante la medición de este parámetro, particularmente en muestras de elevadas conductividades <sup>(31)</sup>. Adicionalmente, se puede observar una buena relación lineal dada por un valor de  $R^2 = 0,9309$ , lo que en conjunto con el análisis del balance iónico obtenido, la relación lineal obtenida para cationes contra aniones y el empleo de muestras certificadas de agua brinda a los resultados un alto nivel de confianza.

En general, los resultados obtenidos para la validación de los datos, con cada método analítico empleado en el laboratorio, resultaron bastante confiables, para realizar la interpretación de los resultados obtenidos en este proyecto.

## 5.2 Figuras de mérito obtenidas en las diferentes metodologías de análisis

### 5.2.1 Límites de detección (LOD) y límites de cuantificación (LOQ)

En la Tabla 14, se muestran los LOD y LOQ obtenidos para los elementos determinados mediante ICP-OES; mientras que en la Tabla 15 se encuentran los LOD y LOQ para los elementos determinados mediante IC, FAAS y FEAS.

**Tabla 14.** Límites de detección y cuantificación obtenidos mediante ICP-OES

Elemento	LOD obtenido ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )	LOQ obtenido ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )
Li	1,1	3,6
Sr	0,3	1,2
Ba	0,5	1,9
Cu	5,4	18,3
Mn	0,4	1,5
Ni	4,0	15,9
Zn	48,8	162,2
Fe	105,9	353,0
Si*	0,4	1,4
Ca*	0,03	0,1

LOD: límite de detección ( $3 S_b / m$ ); donde  $S_b$  = señal del blanco y  $m$ = pendiente

LOQ: límite de cuantificación ( $10 S_b / m$ ); donde  $S_b$  = señal del blanco y  $m$ = pendiente

\*La concentración de Si y Ca viene dada en ( $\text{mg L}^{-1}$ )

**Tabla 15.** Límites de detección y cuantificación obtenidos mediante IC, FAAS, FEAS

<b>Elemento</b>	<b>LOD obtenido (mg L<sup>-1</sup>)</b>	<b>LOQ obtenido (mg L<sup>-1</sup>)</b>
<b>Na</b>	0,0005	0,002
<b>Mg</b>	0,0003	0,001
<b>K</b>	0,0005	0,002
<b>Cl</b>	0,5	2,0
<b>NO<sub>3</sub></b>	0,6	2
<b>SO<sub>4</sub></b>	0,8	4

LOD: límite de detección (3 Sb /m); donde Sb = señal del blanco y m= pendiente

LOQ: límite de cuantificación (10 Sb /m); donde Sb = señal del blanco y m= pendiente

### 5.3 Análisis de las muestras de agua subterránea recolectadas en la cuenca Santa Lucía, Edo. Miranda

#### 5.3.1 Derminación de elementos traza en muestras de agua

Las concentraciones obtenidas para los elementos traza (Li, Sr, Ba, Cu, Mn, Ni, Zn y Fe) en las muestras de agua recolectadas en la cuenca Santa Lucía, se representan en la Figura 13.

Las muestras aparecen enumeradas del 1 al 19, correspondiente a cada estación de muestreo. De acuerdo a los resultados obtenidos, en base a los promedios presentados en el Apéndice 5, el Sr presentó la mayor concentración  $934 \pm 496 \mu\text{g L}^{-1}$ , seguido del  $\text{Fe} > \text{Zn} > \text{Ba} > \text{Mn} > \text{Li} > \text{Cu}$ . Por su parte, el Ni fue el elemento que presentó la menor concentración en la mayoría de las muestras de agua analizadas, pues sólo 1 de ellas presentó un valor de  $12,8 \mu\text{g L}^{-1}$ ; mientras que para el resto de las muestras, la

concentración de Ni estuvo por debajo del límite de detección. Las concentraciones obtenidas en cada muestra se presentan en el Apéndice 5 y en la Figura 13.

Los valores de concentración de elementos traza determinados en todas las muestras, se encuentran, para todos los elementos, por debajo de las concentraciones máximas permitidas por la EPA <sup>(20)</sup> en este tipo de aguas; no obstante se exceptúa la muestra 11 cuya concentración de Cu determinada se encuentra en el límite máximo permisible por la norma, tal como se muestra en la Tabla 16.

De acuerdo con la norma venezolana, expresada en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, atendiendo a los resultados obtenidos para el agua subterránea de la cuenca Santa Lucía, se puede indicar que tal como se muestra en la Tabla 16, los valores obtenidos para todos los elementos traza se encuentran por debajo de los límites establecidos para las aguas tipo 1 y 2; para las aguas tipo 4, según el Decreto, la concentración no debe ser detectable, por lo que no se determinaron aguas de este tipo. En ese sentido, esta clasificación indica que las aguas de la cuenca Santa Lucía son destinadas a usos agropecuarios, así como aguas destinadas al uso doméstico y al uso industrial, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él.

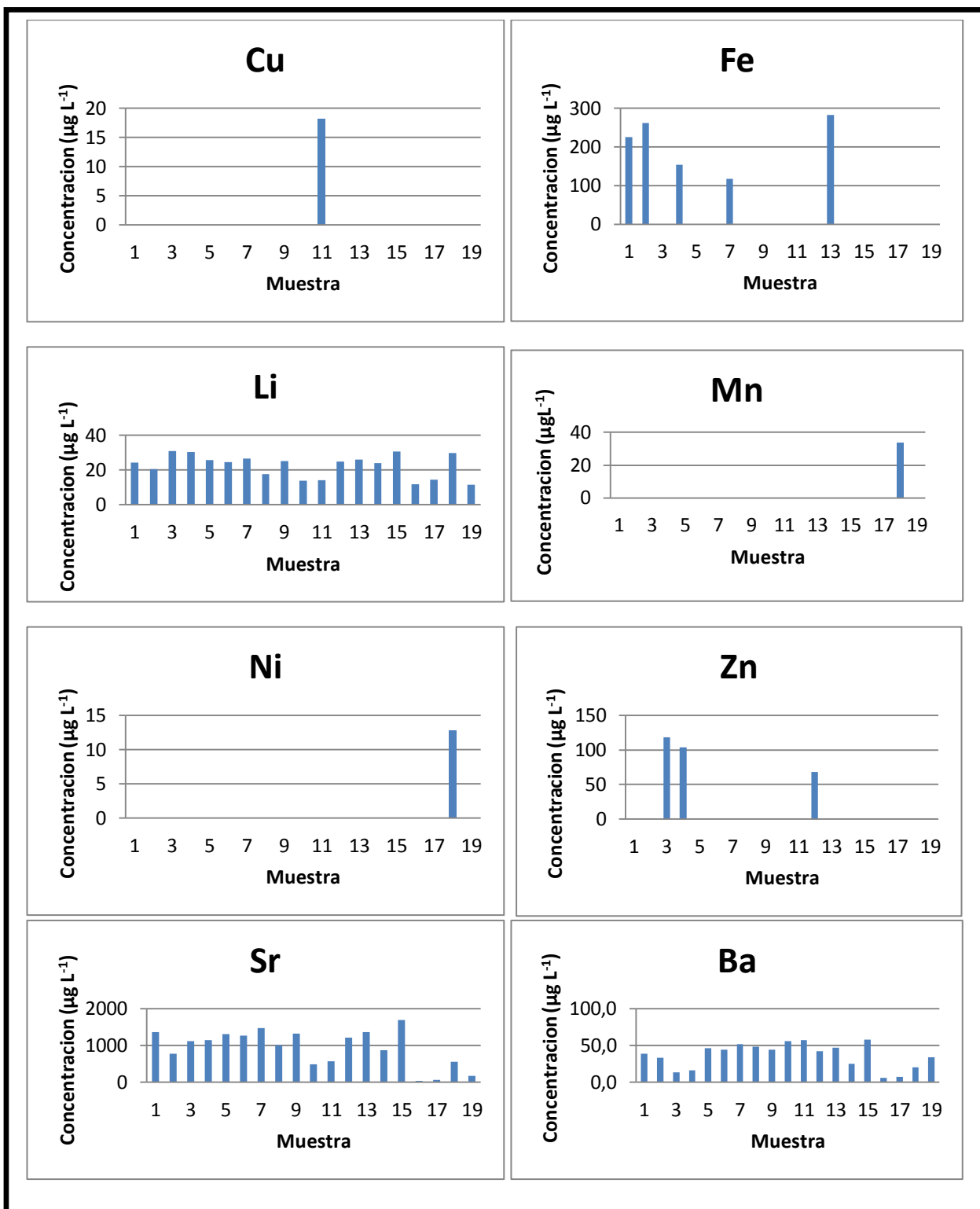


Figura 13. Concentraciones de Cu, Fe, Li, Mn, Ni, Ba Zn y Sr en las 19 muestras

**Tabla 16.** Concentraciones obtenidas para los elementos traza en las muestras de agua de la cuenca Santa Lucía y valores límite reportados, todas expresadas en ( $\mu\text{g L}^{-1}$ )

Elemento	Intervalo de concentraciones obtenidas	Decreto 883 <sup>(10)</sup>			Concentración máxima* <sup>(20)</sup>
		Tipo 1	Tipo 2	Tipo 4	EPA
<b>Cu</b>	<LD – 18,1	1000	200	ND	18
<b>Fe</b>	<LD – 282,0	1000	1000	5000	NR
<b>Li</b>	11,6 – 30,8	ND	5000	ND	NR
<b>Mn</b>	<LD – 33,7	100	500	ND	NR
<b>Ni</b>	<LD – 12,8	ND	500	ND	1400
<b>Zn</b>	<LD – 118,0	5000	5000	ND	120
<b>Ba</b>	5,9 – 58,0	1000	1000	ND	2000

ND: no detectable, <LD: menor al límite de detección de la técnica

\*Concentración máxima reportada por la EPA para agua dulce (FRESH WATER)

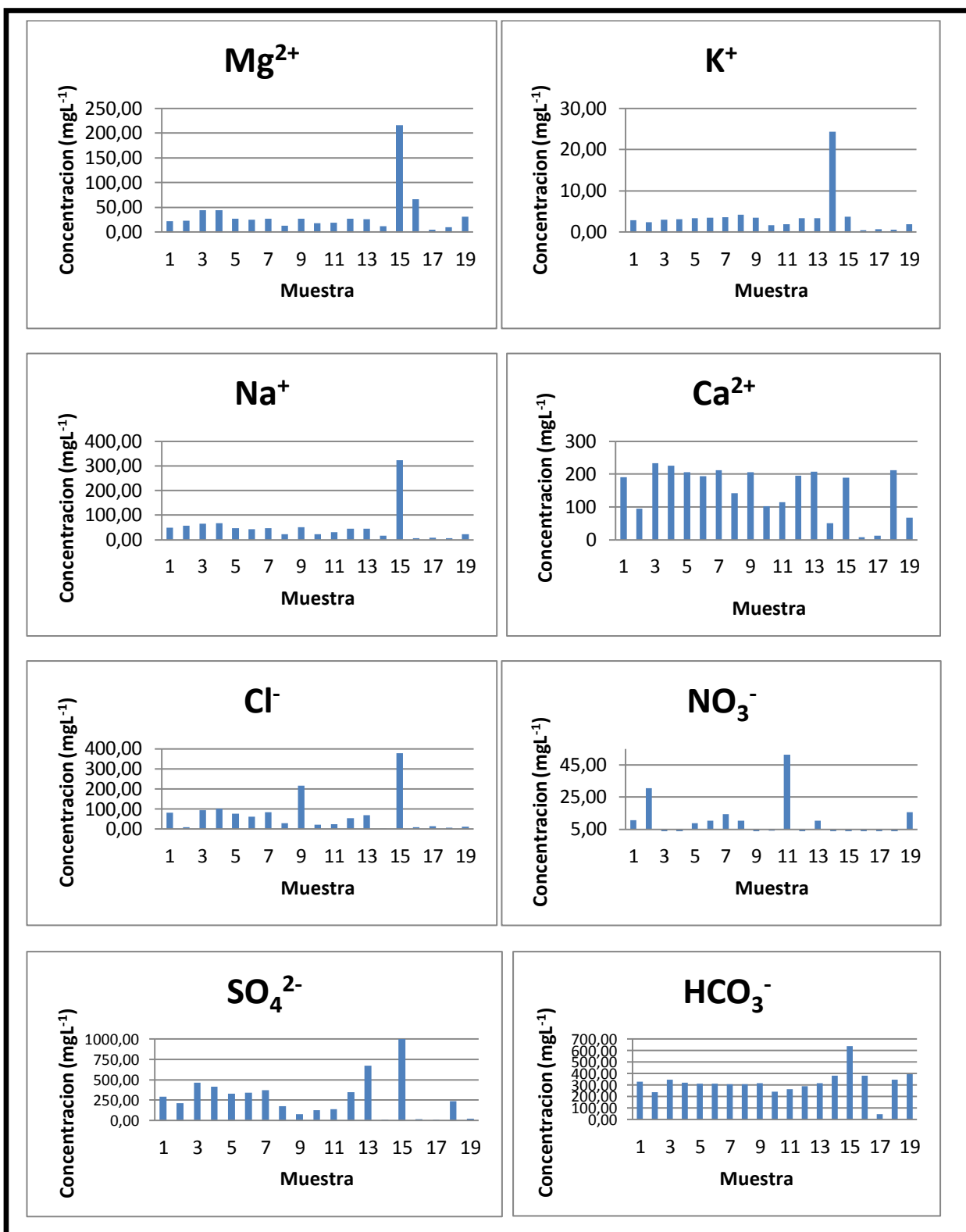
NR: no reportado

### 5.3.2 Determinación de especies mayoritarias en muestras de agua

Las concentraciones obtenidas para las especies mayoritarias  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  en las muestras de agua recolectadas en la cuenca Santa Lucía, son representadas en la Figura 14.

Las muestras aparecen enumeradas del 1 al 19, correspondiente a cada estación de muestreo. En atención a los resultados obtenidos y tomando en cuenta los valores promedios, de la Figura 14 se puede extraer que el  $\text{HCO}_3^-$  presenta el mayor valor de concentración de  $321 \pm 107 \text{ mg L}^{-1}$ , seguido del  $\text{SO}_4^{2-} > \text{Ca}^{2+} > \text{Cl}^- > \text{Na}^+ > \text{Mg}^{2+} > \text{NO}_3^-$ . El  $\text{K}^+$  fue la especie que presentó la menor concentración en la mayoría de las muestras de agua analizadas, pues sus valores oscilaron entre  $0,5 - 24,4 \text{ mg L}^{-1}$ . Los valores de concentración obtenidos para cada muestra son presentados en el Apéndice 6 y en la Figura 14.

Atendiendo a los resultados obtenidos para las especies químicas mayoritarias determinadas en el agua subterránea de la cuenca Santa Lucía, aunado a su comparación con los valores límites recomendados por la normativa nacional en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, mostrados en la Tabla 17, indican que exceptuando a las muestra 14, 15, 16 y 19 los valores de concentración están por debajo de los límites establecidos en el mencionado Decreto para las aguas Tipo 1 y 2, como se describió anteriormente para la clasificación según los elementos traza.



**Figura 14.** Concentraciones de Mg, K, Na, Ca, Cl, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> en las 19 muestras de agua

**Tabla 17.** Concentraciones obtenidas para las especies mayoritarias en las muestras de agua de la cuenca Santa Lucía y valores límite reportados en el Decreto 883 <sup>(10)</sup>, todas expresadas en (mg L<sup>-1</sup>)

Decreto 883 <sup>(10)</sup>			
Elemento	Intervalo de concentraciones obtenidas	Tipo 1	Tipo 2
<b>Mg</b>	5,1 – 215,5	70	NR
<b>K</b>	0,5 – 24,4	20	NR
<b>Na</b>	6,3 – 324,4	200	NR
<b>Ca</b>	7,6 – 232,8	200	NR
<b>Cl</b>	3,3 – 379,6	600	NR
<b>NO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	<LD – 51,3	10	10
<b>SO<sub>4</sub><sup>2-</sup></b>	2,3 – 1003,9	400	NR
<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b>	46,4 – 640,0	370	NR

<LD: menor al límite de detección de la técnica

NR: no reportado

## 5.4 Caracterización hidroquímica

En esta sección se realiza la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas estudiadas, con el propósito de identificar los tipos de aguas presentes; para ello, se utilizó como herramienta el diagrama de Piper. Igualmente, se discute la calidad química de dichas aguas y su uso potencial.

### 5.4.1 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta utilizada para la clasificación e interpretación de los análisis químicos basados en la concentración que presentan las especies químicas mayoritarias, en estudios realizados a distintos tipos de agua. Adicionalmente, este diagrama permite inferir posibles procesos involucrados o responsables de dicha composición, así como procesos de mezclas de las masas de agua, tanto como procesos de evolución de las mismas <sup>(2)</sup>.

El diagrama de Piper obtenido para las 19 muestras de agua subterránea y de manantial captadas en la zona de estudio, es presentado en la Figura 15. Este diagrama elaborado utilizando el programa para el procesamiento de datos RockWorks 2007, permite indicar que la mayoría de las muestras analizadas poseen una tendencia en aniones hacia el enriquecimiento en  $\text{SO}_4^{2-}$ ; también se observa un enriquecimiento hacia  $\text{HCO}_3^-$  en las muestras 8-10-11-14-16-17-18-19; y hacia el  $\text{Cl}^-$ , sólo para la muestra 9. Por otra parte, este diagrama indica que en cuanto a composición catiónica, existe una tendencia preferencial de la mayoría de las muestras hacia el enriquecimiento de  $\text{Ca}^{2+}$ , mientras que hacia el  $\text{Mg}^{2+}$  sólo ocurre en las muestras 15 y 16. Este comportamiento indica que, de acuerdo a esta clasificación, las aguas subterráneas y de manantial bajo estudio, están recibiendo un aporte mayoritario de las especies  $\text{SO}_4^{2-}$  y de  $\text{Ca}^{2+}$ .

Diagrama de Piper

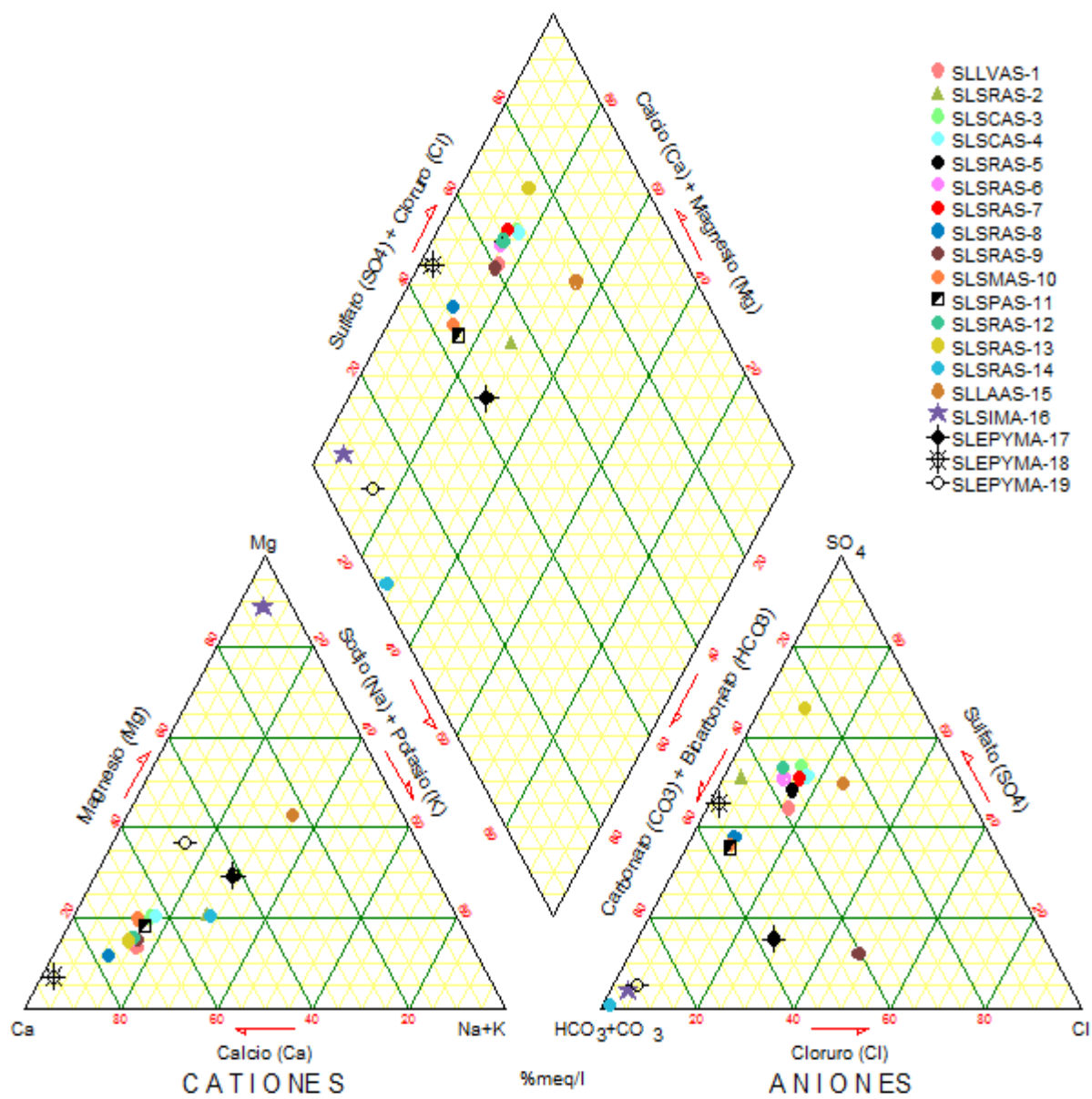


Figura 15. Diagrama de Piper para las aguas del sector Santa Lucía

A partir del diagrama de Piper mostrado en la Figura 15 se logró identificar la presencia de cinco (5) tipos de agua asociadas a la zona de estudio:

- a) Sulfatada cálcica ( $\text{Ca}^{2+}$ -  $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- b) Sulfatada magnésica ( $\text{Mg}^{2+}$ -  $\text{SO}_4^{2-}$ ).
- c) Bicarbonatada magnésica ( $\text{Mg}^{2+}$ -  $\text{HCO}_3^-$ ).
- d) Bicarbonatada cálcica ( $\text{Ca}^{2+}$ -  $\text{HCO}_3^-$ ).
- e) Clorurada cálcica ( $\text{Ca}^{2+}$ -  $\text{Cl}^-$ ).

En el mismo orden de ideas, la distribución de los tipos de agua, en atención a cada una de las muestras de agua captada, se presenta en la Tabla 18.

**Tabla 18.** Clasificación de las aguas captadas en el área de estudio según el Diagrama de Piper

Sulfatada Cálcica	Sulfatada Magnésica	Bicarbonatada Cálcica	Bicarbonatada Magnésica	Clorurada Cálcica
SLLVAS-1	SLLAAS-15	SLSRAS-8	SLSIMA-16	SLSRAS-9
SLSRAS-2		SLSMAS-10		
SLSCAS-3		SLSPAS-11		
SLSCAS-4		SLSRAS-14		
SLSRAS-5		SLEPYMA-17		
SLSRAS-6		SLEPYMA-18		
SLSRAS-7		SLEPYMA-19		
SLSRAS-12				
SLSRAS-13				

El tipo de agua predominante corresponde a sulfatada cálcica, presentándose en un 47% del total de las muestras captadas; mientras que un 37% correspondiente a bicarbonatada cálcica; y 5,2% para las aguas tipo sulfatada magnésica, bicarbonatada magnésica y clorurada cálcica, respectivamente.

Como resultado del trazado de las líneas de intersección en el romboedro central, a partir de las características mencionadas anteriormente para cationes y aniones, puede establecerse que las muestras de agua subterránea captadas en el sector Santa Lucía se pueden clasificar dentro del siguiente tipo de aguas: sulfatadas y/o bicarbonatadas – cálcicas y/o magnésicas.

CECPV (1997) <sup>(34)</sup> y González de Juana *et al.* (1980) <sup>(35)</sup> señalan que la geología de la cuenca Ocumare-Santa Lucía es representada por 2 formaciones sedimentarias, a saber: Siquire y Tuy. Estas formaciones están caracterizadas en rasgos generales, por intercalaciones de conglomerados líticos y areniscas con cemento calcáreo y lutitas. Sin embargo, la cuenca es circundada por otras formaciones en su mayoría de origen metamórfico que contribuyen con una gran variabilidad de litología a la misma.

De acuerdo a los tipos de agua arrojados por el diagrama de Piper (Figura 15) puede presumirse que las aguas subterráneas y de manantial de la zona podrían estar atravesando alguna litología conteniendo minerales como yeso y/o anhidrita; sin embargo el aporte de estos iones por parte de otras especies minerales, debe considerarse también como fuente probable de los mismos. En ese sentido, puede estar ocurriendo disolución de pirita, la cual puede contribuir con el aporte de  $\text{SO}_4^{2-}$ , mientras que el aporte de  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  puede estar asociado a los minerales calcáreos reportados en la zona de estudio. Finalmente se infiere que el aporte de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  puede ser debido al proceso interacción agua-roca, a través de la disolución de calcita <sup>(30)</sup>.

#### 5.4.2 Calidad del agua para uso potable

Los datos obtenidos fueron comparados con los valores establecidos en el Decreto 475 (Gaceta Oficial N° 43.259, 1998) <sup>(19)</sup>, donde en atención a las normas técnicas referidas a la calidad del agua potable, se indican los valores máximos permitidos para consumo.

Nótese en la Tabla 19 que la mayoría de las muestras estudiadas, exceptuando a la muestra SLEPYMA-17, poseen valores de concentración superiores a los recomendados en el Decreto 475 <sup>(19)</sup>, para las especies  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , lo que permite señalar que de acuerdo a su condición estas aguas se pueden clasificar como no aptas para uso potable.

**Tabla 19.** Características del agua captada en el área de estudio, para fines domésticos

Parámetro	Valor ideal mg L <sup>-1</sup>	Muestra excedente	Condición
<b>Calcio</b>	60	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 18 y 19	No aptas para uso potable
<b>Alcalinidad</b>	100	1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 18 y 19	No aptas para uso potable
<b>Cloruro</b>	250	15	No aptas para uso potable
<b>Hierro</b>	0,3	-	Aptas para uso potable
<b>Magnesio</b>	36	3, 4, 15 y 16	No aptas para uso potable
<b>Manganeso</b>	0,1	-	No aptas para uso potable
<b>Sulfato</b>	250	1, 3, 4, 5, 6, 7, 12, 13, 15 y 18	No aptas para uso potable
<b>Bario</b>	0,5	-	Aptas para uso potable
<b>Nitrato</b>	10	1, 2, 6, 7, 8, 11, 13 y 15	No aptas para uso potable

Debido a la existencia de 1 sola muestra de agua (SLEPYMA-17) apta para el uso potable respecto a las especies determinadas, se procedió a comparar los valores de

concentración obtenidos para los parámetros determinados con la norma establecida en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, a fin de sugerir un destino apto para las mismas.

#### 5.4.3 Uso del agua según su calidad

La calidad de las muestras de agua captadas en el área de estudio fue evaluada atendiendo a los intervalos de concentración obtenidos para cada una de las especies químicas determinadas, tomando como valores estándar los presentados por el Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales, esto atendiendo al capítulo 8 del Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, que permite establecer los criterios de calidad para el uso del agua.

Las concentraciones determinadas para las especies  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y la magnitud de los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, indican que la mayoría de las muestras en estudio pueden estar siendo afectadas por las actividades desarrolladas en la zona. A continuación se presenta un estudio detallado respecto a la concentración de las especies en cada una de las muestras; asimismo, la Tabla 20 resume cual de los parámetros determinados es el que define el tipo de agua presente, según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>.

Para el ión  $\text{HCO}_3^-$  hay 4 muestras (14, 15, 16 y 19) que presentan concentraciones por encima del límite máximo permitido ( $370 \text{ mg L}^{-1}$ ) para las aguas Tipo 1 y 2, lo que conlleva a clasificarlas como **superior al límite aceptable**.

Por su parte, para el ión  $\text{Cl}^-$  no se tiene alguna muestra cuya concentración sea superior al límite permitido por la norma ( $600 \text{ mg L}^{-1}$ ) para aguas Tipo 1, lo que permite clasificar a todas las muestras como aguas **Tipo 1 o 2**.

En el mismo orden de ideas, al comparar las concentraciones del ión  $\text{Na}^+$  con el máximo permitido por la norma ( $200 \text{ mg L}^{-1}$ ), se encuentra 1 sola muestra (15) ubicada por encima del mismo, el cual es presentado como máximo para aguas Tipo 1. Esto conlleva a clasificar a esta agua como **Tipo 2**.

Respecto al ión  $\text{Mg}^{2+}$ , se tiene 1 sola muestra (15) que presenta un valor de concentración ubicado por encima del máximo permitido por la norma ( $70 \text{ mg L}^{-1}$ ) para la clasificación de aguas Tipo 1 y 2, lo que permite clasificar a esta agua como **superior al límite aceptable**.

Por otra parte, para el ión  $\text{Ca}^{2+}$  se tienen 7 muestras (3, 4, 5, 7, 9, 13 y 18) con concentraciones ubicadas por encima del límite superior permitido por la norma ( $200 \text{ mg L}^{-1}$ ) en aguas Tipo 1, por lo que las mismas se clasifican como aguas **Tipo 2**.

Para el ión  $\text{K}^+$ , solo 1 de las muestras captadas en la zona de estudio (14), presenta valor de concentración ubicado por encima del máximo permitido por la norma ( $20 \text{ mg L}^{-1}$ ) para la clasificación de aguas Tipo 1, por lo que la misma se clasifica como agua **Tipo 2**.

Por su parte, los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, así como la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), presentan muestras por encima de los valores máximos permitidos. Para el pH todas las muestras se encuentran ubicadas dentro del intervalo exigido por la norma (6,0-8,5 unidades de pH) para la clasificación de aguas Tipo 1, por lo que las mismas son catalogadas como aguas **Tipo 1**.

En lo que respecta a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), sólo la muestra 15 presentó un SDT por encima del máximo permitido por la norma para la clasificación de agua Tipo 1 (valor máximo  $1500 \text{ mg L}^{-1}$ ), lo que conlleva a clasificarla como cuerpo de agua **Tipo 2**, cuyo valor máximo permitido es  $3000 \text{ mg L}^{-1}$ .

Por su parte, la conductividad según el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup> presenta como máximo permitido para la clasificación de agua Tipo 2 un valor de  $2000 \mu\text{S cm}^{-1}$ . Para el área de estudio, solo la muestra 15 presenta un valor de conductividad mayor al permitido por la norma, lo que conlleva a clasificar a esta agua como **superior al límite aceptable**.

La norma establece que para clasificar las aguas como Tipo 1, la concentración de  $\text{NO}_3^-$  no debe exceder de  $10 \text{ mg L}^{-1}$ , sin embargo, en 8 de las muestras captadas para la zona de estudio (1, 2, 6, 7, 8, 11, 13 y 19), los valores de concentración obtenidos están por encima del máximo permitido, lo que conlleva a clasificarlas como **Tipo 2**.

Los valores de concentración obtenidos para el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  muestran la existencia de 4 muestras (3, 4, 13 y 15) por encima del máximo valor permitido ( $400 \text{ mg L}^{-1}$ ) para la clasificación del agua Tipo 1, lo que conlleva a clasificarlas como aguas **Tipo 2**.

Finalmente, puede señalarse que únicamente las muestras de los pozos 10, 12 y la de manantial 17, presentan valores de concentración para las especies determinadas que están por debajo de los máximos permitidos por la norma, lo que conlleva a clasificar a estas aguas como **Tipo 1**. Para este tipo de agua, el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup> establece que las mismas resultan ser óptimas en cuanto a calidad, para uso doméstico y para uso industrial, siempre que ésta forme parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano.

**Tabla 20.** Clasificación de las aguas captadas en la zona de estudio según su calidad

Muestra	Parámetro fuera del límite permitido	Tipo de agua
SLLVAS-1	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tipo 2
SLSRAS-2	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tipo 2
SLSCAS-3	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Ca <sup>+2</sup>	Tipo 2
SLSCAS-4	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> / Ca <sup>+2</sup>	Tipo 2
SLSRAS-5	Ca <sup>+2</sup>	Tipo2
SLSRAS-6	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tipo 2
SLSRAS-7	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / Ca <sup>2+</sup>	Tipo 2
SLSRAS-8	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tipo 2
SLSRAS-9	Ca <sup>2+</sup>	Tipo2
SLSMAS-10		Tipo1
SLSPAS-11	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Tipo 2
SLSRAS-12		Tipo 1
SLSRAS-13	Ca <sup>2+</sup> / NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Tipo 2
SLSRAS-14	K <sup>+</sup> / HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Superior al límite aceptable
SLLAAS-15	Conduct/ HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /Na <sup>+</sup> /Mg <sup>2+</sup> / SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /SDT	Superior al límite aceptable
SLSIMA-16	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Superior al límite aceptable
SLEPYMA-17		Tipo 1
SLEPYMA-18	Ca <sup>2+</sup>	Tipo2
SLEPYMA-19	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Superior al límite aceptable

En resumen, el 63% de las muestras de aguas no son aptas para el uso doméstico; no obstante, según lo establecido por la normativa para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, pueden ser usadas para fines agropecuarios.

Por otra parte, respecto a las muestras 14, 15, 16 y 19, cuyos valores de concentración para varios parámetros superan a los valores reportados para los tipos de agua por el

Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1.995) <sup>(10)</sup>, se señala que estas pueden ser empleadas para armonía paisajística, industria, comercio y navegación.

Es importante resaltar que de acuerdo a la información obtenida por el equipo de investigadores que realizó el muestreo, se logró conocer el uso dado al agua de los pozos estudiados; no obstante, también fueron reportados pozos que no eran utilizados por las personas. Seguidamente, se transcribe la información plasmada por los investigadores durante la captación de las muestras de agua subterránea, en función del uso dado.

Para la muestra de agua captada en el pozo SLLVAS-1, se indica que la misma es empleada en actividades de recreación, específicamente para una piscina, lo que permite señalar que se le ha dado un uso adecuado.

Por su parte, la muestra de agua que proviene del pozo SLSRAS-2, es usada para consumo humano. En razón a los resultados obtenidos en este estudio, se señala que tiene un inadecuado uso, pues se recomienda su aplicación en actividades agropecuarias.

Para el caso de la muestra de agua tomada en el pozo SLSCAS-4, la misma es empleada en actividades de riego. Dicho uso concuerda con lo recomendado en este trabajo.

Por otro lado, las muestras de agua correspondiente a SLSMAS-10 y SLSPAS-11, se captaron en pozos que pertenecen a Hidrocapital. Esto permite inferir que el agua extraída de estos pozos son tratadas antes de su distribución a la población.

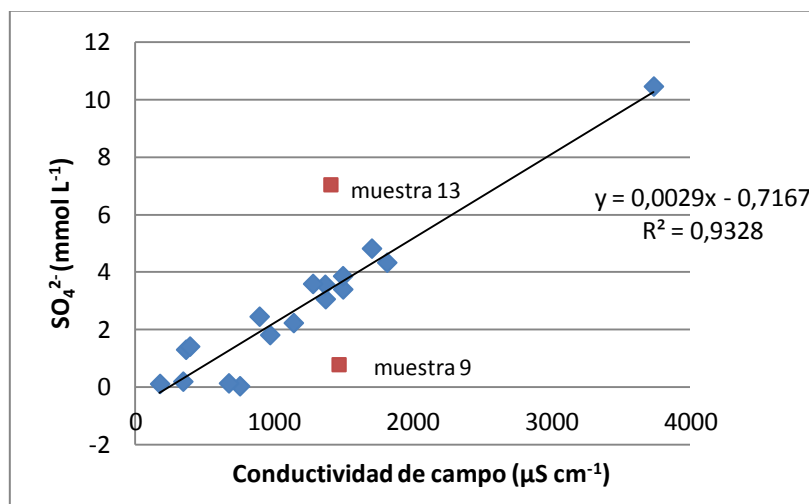
El agua correspondiente al manantial SLSIMA-16, es empleada para el consumo humano. De acuerdo a los resultados obtenidos en este trabajo, el uso dado es

inadecuado. Para esta muestra el uso adecuado según el Decreto 883 <sup>(10)</sup> es para la armonía paisajística, industrial, comercio y navegación.

Para los demás pozos y manantiales, los investigadores no reportaron uso alguno durante el muestreo.

## 6. Relaciones interelementales

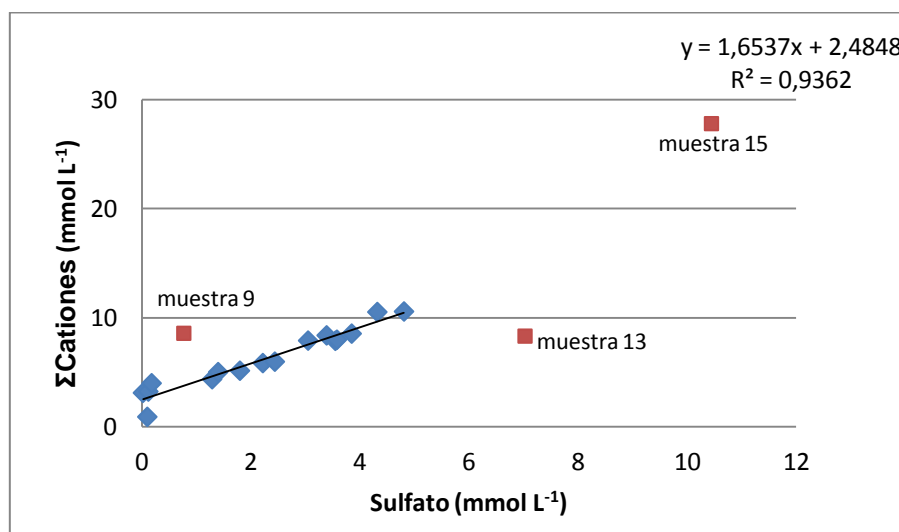
La determinación de la existencia de correlaciones entre los iones considerados en esta investigación puede ser de utilidad para inferir los probables procesos geoquímicos que pueden estar controlando la composición química de las aguas subterráneas en el sector Santa Lucía del Estado Miranda. La Figura 16 muestra la relación entre  $\text{SO}_4^{2-}$  y la conductividad medida en campo. Esta relación fue realizada atendiendo a los resultados arrojados por el diagrama de Piper generado, en el cual fue observada la predominancia de este anión.



**Figura 16.** Relación entre la concentración de sulfato y la conductividad de campo

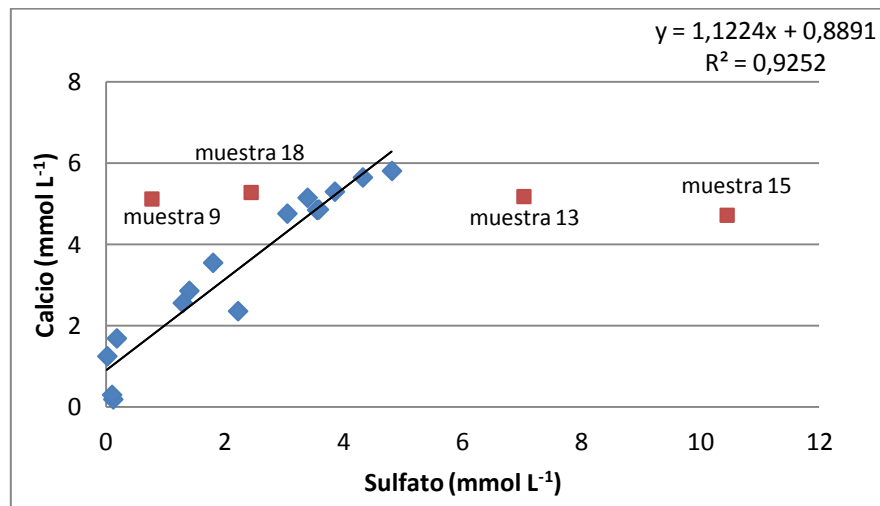
Se puede observar la existencia de poca dispersión, descrita a través del coeficiente de correlación  $R^2 = 0,9328$ , esto indica que el ión  $\text{SO}_4^{2-}$  es la especie que mayormente contribuye con la conductividad en todas las muestras, exceptuando a las muestras 9 y 13. Esto puede deberse a que en particular la muestra 13 posee una no correspondencia con el porcentaje de balance iónico y en la muestra 9 la concentración de  $\text{SO}_4^{2-}$  determinada puede provenir de una fuente distinta a la de las demás muestras, como por ejemplo la fuente antrópica.

Por otro lado, se elaboró de la relación de la sumatoria de cationes en función del  $\text{SO}_4^{2-}$ , exceptuando a las muestras 9,13 y 15 (Figura 17); nótese que se genera una curva cuyo coeficiente de correlación ( $R^2 = 0,9362$ ) indica la existencia de poca dispersión; este resultado permite suponer que en el aporte de cationes, también participan la disolución de sales de  $\text{SO}_4^{2-}$  probablemente formadas por los eventos de evaporación atmosférica <sup>(30)</sup>. La desviación de la linealidad de las muestras 9, 13 y 15 indica la existencia de al menos 3 fuentes diferentes de iones  $\text{SO}_4^{2-}$ .



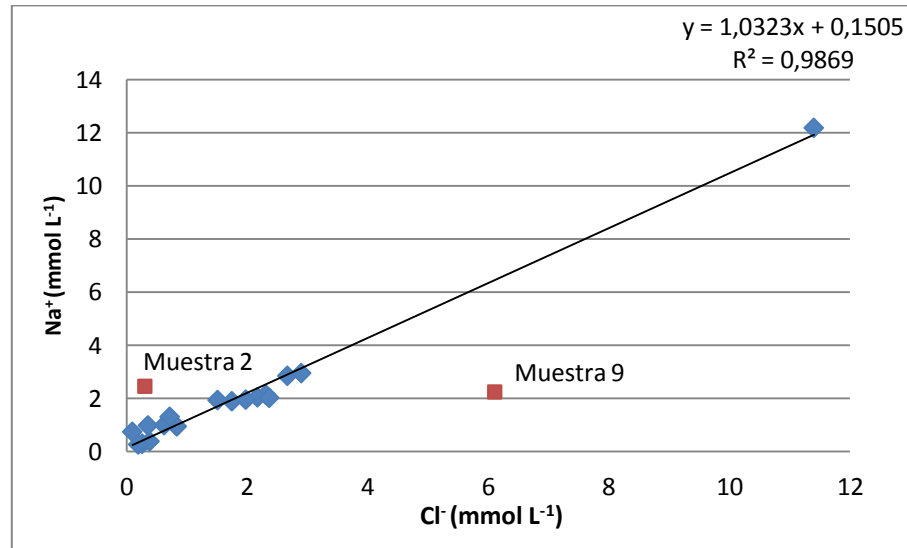
**Figura 17.** Relación molar entre la sumatoria de cationes y sulfato

En el mismo orden de ideas, fue construida la relación de  $\text{Ca}^{2+}$  frente a  $\text{SO}_4^{2-}$  exceptuando a las muestras 9, 13, 15 y 18 (Figura 18); nótese que la relación de ambas especies presentan un coeficiente de correlación ( $R^2 = 0,9252$ ), lo cual indica la existencia de una fuente común de aporte de las especies  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ . Dicho aporte podría estar vinculado a la hidrólisis de facies mineralógicas como yeso y/o anhidrita durante el proceso de interacción agua medio poroso. La desviación de la linealidad de las muestras 9, 13, 15 y 18 indica la existencia de diferentes fuentes de aporte de iones  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ .



**Figura 18.** Relación molar entre calcio y sulfato

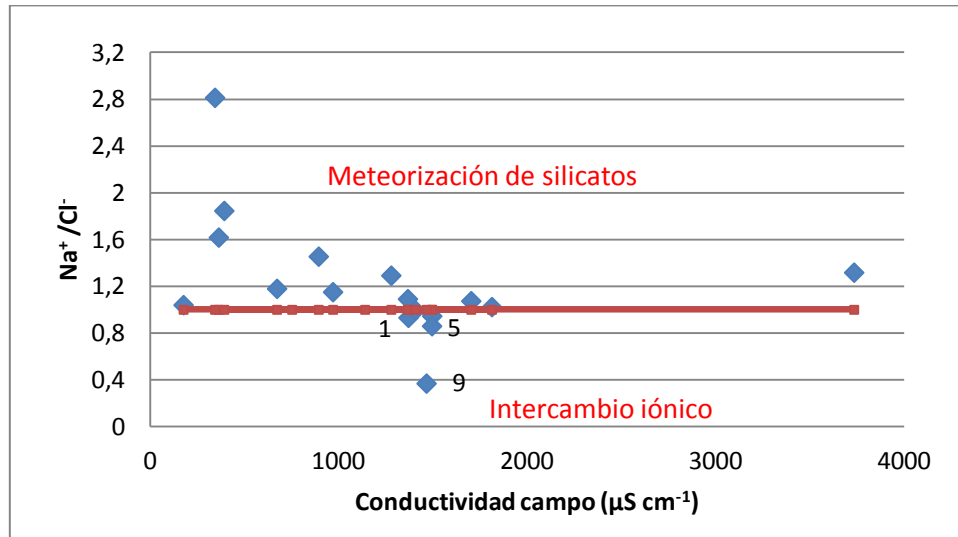
Por su parte la Figura 19 permite observar una buena correlación entre el  $\text{Na}^+$  y el  $\text{Cl}^-$ ; descrita por la ecuación:  $y = 1,0323x + 0,1505$ . No obstante, es de resaltar que existen al menos dos muestras que se desvían de la linealidad, la muestra 2 y 9. Esto evidentemente señala de que ambos iones poseen 2 fuentes de aporte, probablemente referidas a la disolución de sales evaporíticas formadas en la superficie durante los eventos climáticos de evaporación y al agua de lluvia, así como también al proceso de intercambio y a la hidrólisis de aluminosilicatos <sup>(2)</sup>.



**Figura 19.** Relación molar entre sodio y cloruro

La relación molar  $\text{Na}^+$  frente al  $\text{Cl}^-$  genera una curva cuya pendiente es igual a 1. Esto reafirma que una de las fuentes de estas especies en las aguas, podrían estar asociadas a la formación de sales evaporíticas, que luego durante los eventos de lluvia, son disueltas e infiltradas al subsuelo hasta alcanzar los acuíferos.

Por otro lado, Rajmohan y Elango (2004) <sup>(38)</sup> sugieren que la relación molar de  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  referente a la conductividad, indica procesos como meteorización de silicatos e intercambio iónico. Estos autores proponen que al ubicar las muestras de agua cuya composición es influenciada por la meteorización de silicatos, la relación molar  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  es superior a 1, de manera que minerales como feldespatos reaccionan con el ácido carbónico con la presencia del agua, liberando  $\text{HCO}_3^-$ . Por su parte, el campo donde predomina el intercambio iónico, se debe a que la relación molar  $\text{Na}^+/\text{Cl}^-$  es inferior a 1. En este orden de ideas, se construyó dicha relación para las aguas estudiadas, mostrada en la Figura 20. Dicha Figura permite indicar que la composición química de las aguas subterráneas de la cuenca de Santa Lucía, está controlada por procesos de meteorización de silicatos y del intercambio iónico.

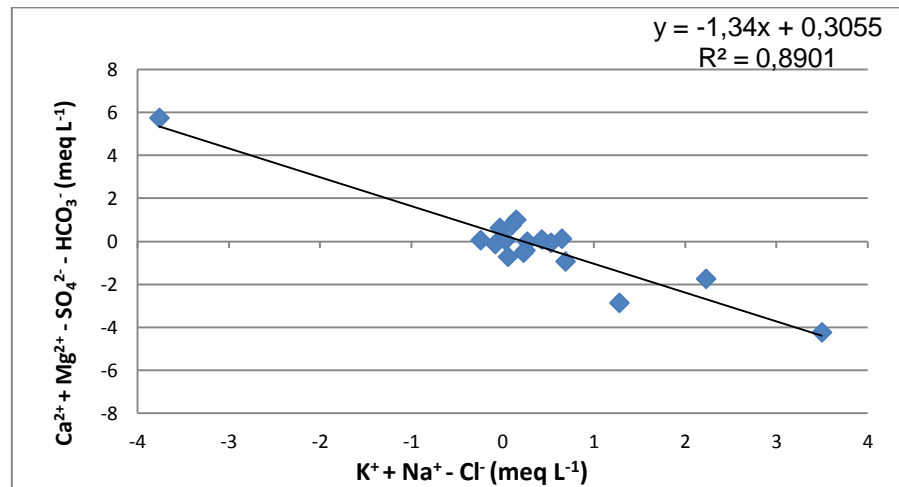


**Figura 20.** Relación entre el sodio y el cloruro con la conductividad

El proceso de intercambio iónico representa la cantidad de Ca y Mg ganado o perdido, suministrado por la disolución de fases sólidas minerales como yeso, calcita y dolomita, respecto a la cantidad de Na y K suministrado por la disolución de sales cloruradas, principalmente.

En busca de evaluar el impacto, que puede ejercer este proceso en las aguas bajo estudio, se procedió a graficar la relación  $(\text{Ca}^{+2} + \text{Mg}^{+2} - \text{SO}_4^{-2} - \text{HCO}_3^-)$  en función de  $(\text{K}^+ + \text{Na}^+ - \text{Cl}^-)$ , expresada en  $\text{meq L}^{-1}$ , propuesta por Jalali (2007) <sup>(39)</sup>. Este autor indica que una relación lineal con un valor de pendiente igual o cercana a -1, señala que el proceso de intercambio iónico es uno de los procesos controladores de las concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{HCO}_3^-$  en las aguas.

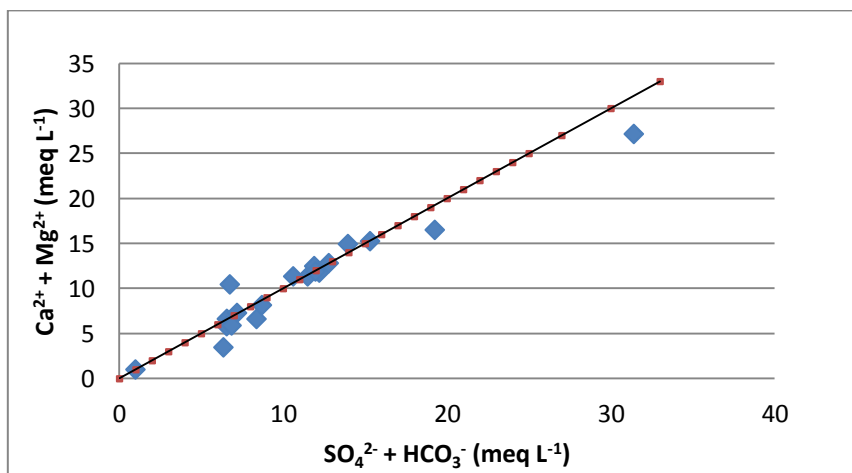
En la Figura 21, se puede observar la existencia de un grupo de valores que presenta dispersión, por lo que se obtiene una relación lineal descrita por un coeficiente de correlación igual a 0,8901 y un valor de pendiente de -1,34. Este comportamiento pudiese estar sugiriendo que el proceso de intercambio iónico es uno de los procesos que controlan la composición química de las aguas estudiadas.



**Figura 21.** Proceso de intercambio iónico

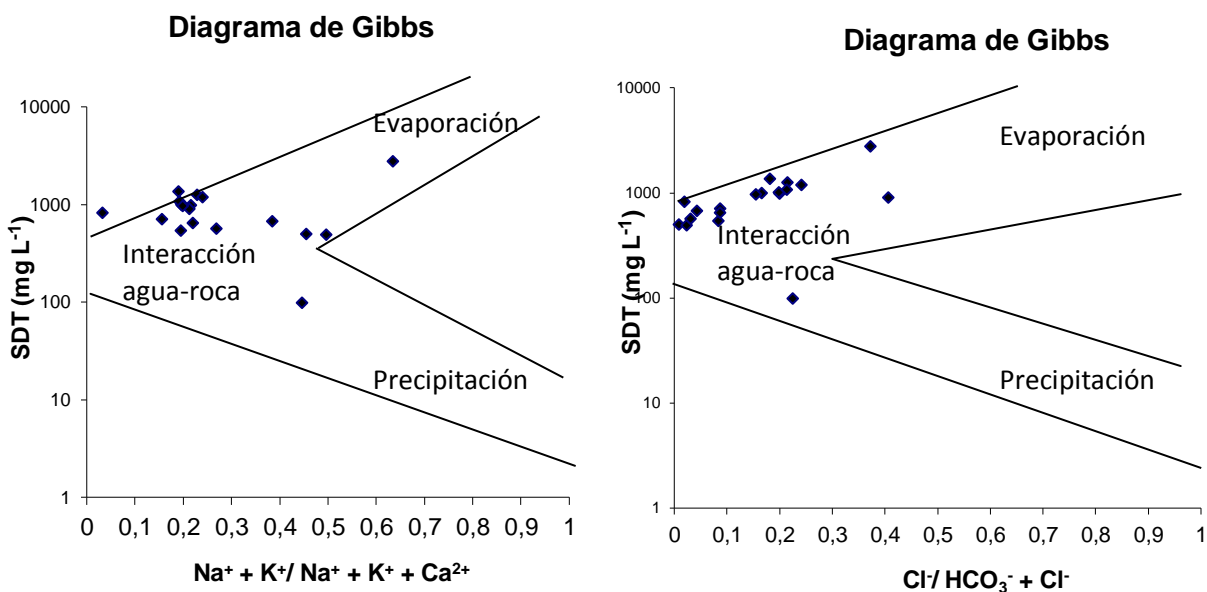
Jalali (2007) <sup>(39)</sup> indica que una disminución progresiva en los valores de concentración de las especies  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ , resulta un factor indicador de que dichas especies están participando en reacciones de intercambio catiónico. La estructura fisicoquímica de las arcillas permite plantear una posible sustitución de sodio por iones divalentes como  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ , facilitando así un enriquecimiento de las aguas subterráneas con la especie monovalente desplazada.

Por otra parte, con el propósito de poder interpretar e identificar algunos procesos que influyen sobre la composición de las aguas subterráneas de la zona de estudio, se construyó la relación propuesta por Datta y Tyagi (1996) <sup>(40)</sup>, quienes grafican la relación entre la suma de los cationes  $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$  en función de la sumatoria de los aniones  $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$  en  $\text{meq L}^{-1}$ . Dicha relación, mostrada en la Figura 22, indica que los puntos en la gráfica correspondientes a las muestras de agua estudiadas se ubican cercanos o sobre la línea 1:1, lo que sugiere que de manera general, estos iones son el resultado de la disolución de minerales carbonáticos y sulfatados, representados por minerales como calcita, dolomita y yeso. Este proceso de disolución puede llevarse a cabo por la adición del agua que es aportada mediante la irrigación, la infiltración del agua de lluvia y el movimiento del agua subterránea <sup>(40)</sup>.



**Figura 22.** Relación entre el magnesio y calcio en función del sulfato y el bicarbonato

Finalmente, con el propósito de identificar algunos factores que pudiesen estar controlando la composición de las aguas subterráneas de la cuenca Santa Lucía, se construyeron los diagramas de Gibbs, que consisten en la proyección de los SDT en función de la relación  $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$  y de SDT frente a  $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$  <sup>(38)</sup>.



**Figura 23.** Diagramas de Gibbs

Ambos diagramas muestran tres zonas correspondientes a los procesos de evaporación, interacción agua-roca, y precipitación (Figura 23), notándose que la mayoría de las muestras están ubicadas en la zona central con una ligera tendencia hacia el campo de la evaporación, lo que permite señalar que entre uno de los procesos controladores, se encuentra el proceso de la interacción agua-roca, no descartando la influencia del factor climático a través de la evaporación atmosférica.

## 7. Conclusiones

De acuerdo a los resultados obtenidos y a las discusiones realizadas en este trabajo de investigación, se concluye que:

- Los valores de SDT determinados permiten señalar que el 69% las muestras de agua estudiadas pueden ser clasificadas como dulces y el 31% restante como aguas salobres, correspondientes a los pozos (3, 4, 5, 7, 13 y 15).
- En la cuenca de Santa Lucía se identificaron cinco (5) tipos de agua: sulfatada cálcica, sulfatada magnésica, bicarbonatada cálcica, bicarbonatada magnésica y clorurada cálcica.
- Los principales procesos que están gobernando la composición química de las aguas subterráneas son la interacción agua-roca, a través de la disolución y precipitación de minerales carbonatados como calcita y dolomita; así como la disolución de sales evaporíticas como yeso y halita. Igualmente, el proceso de intercambio iónico parece estar operando en las aguas estudiadas.
- Los factores que se consideran responsables de la composición química y de la calidad de las aguas de la cuenca Santa Lucía son principalmente la actividad antrópica, la litología, el clima y el tiempo de residencia.
- El 63% de las muestras de aguas no son aptas para el uso doméstico, y su uso adecuado es para fines agropecuarios, según lo establecido por la normativa para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos del Decreto 883. Las únicas muestras disponibles para uso doméstico son las N° 10, 12 y 17.

- La muestra de manantial 17 fue la única determinada como agua potable, según lo establecido por la normativa técnica referida a la calidad de agua potable del Decreto 447.
- Se determinó que el agua de la cuenca Santa Lucía, no presenta contaminación de elementos traza (Cu, Fe, Mn, Zn, Ni, Li, Sr y Ba) y que corresponden a la clasificación Tipo 1 y 2, debido a que no superan los valores límites correspondientes, reportados en el Decreto 883 para este tipo de agua. En todos los casos las concentraciones obtenidas estuvieron por debajo de los niveles máximos permitidos por EPA para este sistema (fresh water), a excepción del Cu en la muestra 11 cuya concentración se encuentra en el límite máximo permisible por la norma.

## 8. Recomendaciones

Al tomar en cuenta los resultados del estudio se recomienda:

- Realizar un análisis microbiológico en las aguas de la zona de estudio, a fin de evaluar si la calidad de las mismas resulta apta para los usos predestinados, específicamente el doméstico y potable.
- Realizar el estudio de los metales pesados como Cd, Cr, Hg, As y Pb en el agua para determinar si la zona de estudio no presenta contaminación de metales pesados y es apta para los destinos preestablecidos.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- <sup>1</sup> Davis, S.N.; y De Wiest, R. (1971). *Hidrogeología*. Barcelona-España: Ariel. 563p.
- <sup>2</sup> Custodio, E. y Llamas, M. (1976). *Hidrología subterránea*. España: Omega. Tomo I. 203p.
- <sup>3</sup> Weil, R. and Tuner, B. (1996). *Nitrate in ground waters of the United States*. [En línea]. California United States: Department of the interior- U. S. Geological Survey, 19, 441-448. Disponible: <http://pubs.acs.org/doi/abs/10.1021/es9907663> [Fecha de consulta: Octubre de 2011].
- <sup>4</sup> Montero, R. (1996). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos*. Trabajo de Ascenso, Instituto de Ciencias de la Tierra, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- <sup>5</sup> United States of Geological Survey (USGS), 2011. *La Hidrogeology*. [En línea]. Disponible: <http://water.usgs.gov/gotita/> [Fecha de consulta: Noviembre de 2011].
- <sup>6</sup> Todd, D. (1959). *Ground water hydrology*. New York-USA: Toppan Company, John Wiley & Sons, INC. 336p.
- <sup>7</sup> United States of Geological Survey (USGS), 2011. *Ciclo Hidrológico*. [En línea]. Disponible: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercycle.html> [Fecha de consulta: Noviembre de 2011].
- <sup>8</sup> United States of Geological Survey (USGS), 2011. *Acuíferos*. [En línea]. Disponible: <http://water.usgs.gov/ogw/aquiferbasics/> [Fecha de consulta: Noviembre de 2011].

- <sup>9</sup> Nielsen, L. (2006). *Geohidrology*. Journal of Environmental Quality, 21, 6-10.
- <sup>10</sup> Decreto 883: Normas para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos. *Gaceta Oficial Extraordinaria*, 5.021, diciembre 28, 1995. [En línea].  
Disponibile: [www.ecocaracas.com/resources/infoutil/docs/Decreto833.doc](http://www.ecocaracas.com/resources/infoutil/docs/Decreto833.doc) [Fecha de consulta: Octubre de 2011].
- <sup>11</sup> Freeze, R.A.; and J.A. Cherry. (1979). *Groundwater*. Inc., Englewood Cliffs: Prentice-Hall, NJ. 604p.
- <sup>12</sup> Langmuir, D. (1997). *Aqueous environmental geochemistry*. Colorado School of Mines: Prentice Hall. 600p.
- <sup>13</sup> Hem, J.D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. (3a. ed.) Washington: U.S. Geological Survey water supply. N° 2254. 263p.
- <sup>14</sup> White, D.E (1957). *Magmatic, connate and metamorphic water*. [En línea]. Geological Society of America, 68, 1659-1682.  
Disponibile: <http://gsabulletin.gsapubs.org/content/68/12/1659.abstract> [Fecha de consulta: Noviembre 2011].
- <sup>15</sup> Piper, A.M (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analyses*. [En línea]. American geophysical Union, 25, 914-923. Disponible: <http://geoheat.oit.edu/pdf/bulletin/bi015.pdf> [Fecha de consulta: Noviembre 2011].
- <sup>16</sup> Subba, R. (2006). Seasonal variation of groundwater quality in a part of Guntur District, India. *Environmental Geology*, 49, 413-429.

- <sup>17</sup> Stiff, H.A. (1951). The interpretation of chemical water analysis by means of patterns. *Journal Petroleum Technology*, 3, 15-17.
- <sup>18</sup> Doménico, P.A. and Schwartz, F.W. (1990). *Physical and Chemical Hydrogeology*. USA: John Wiley and Sons, 824p.
- <sup>19</sup> Decreto 475: Normas técnicas de calidad del agua potable. Capítulo III: Normas organolépticas, físicas, químicas y microbiológicas de la calidad del agua potable. *Gaceta Oficial Extraordinaria*, 43.259, marzo 16, 1998. [En línea].  
Disponible: <http://labrecursoaguaambiental.blogspot.com/2011/09/decreto-475-de-1998.html> [Fecha de consulta: Octubre de 2011].
- <sup>20</sup> Environmental Protection Agency. "Water Quality Standards handbook", Second Edition. Appendixes A.
- <sup>21</sup> González, A.; Fernández, A. y Buylla, A. (1986). *Estudio comparativo de la calidad del agua en dos ríos Asturianos*. Confederación hidrológica del norte de España, 2, 17-223.
- <sup>22</sup> Rojas, R.J.; León, R. y Valencia, L. (1999). *Estudio de la calidad del agua en sistemas de abastecimiento rural en Lima-Perú*, 16.
- <sup>23</sup> Jalali, M. (2005). Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran. *Environmental Geology*, 47, 763-772.
- <sup>24</sup> Valencia, J.L. (2007). *Estudio estadístico de la calidad de las aguas en la cuenca hidrográfica del río Ebro*. Trabajo de Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid.

<sup>25</sup> Ahmadi, M.E. y Fiky, A.A. (2009). *Hydrogeochemical evaluation of shallow alluvial aquifer of Wadi Marwani, western Saudi Arabia*. [En línea]. Journal of King Saud University-Science, 3, 179-190. Disponible: [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com) [Fecha de consulta: Noviembre de 2011].

<sup>26</sup> Chirinos, A.; Guarenas, A. y Díaz, M. (2000). *Estudio preliminar de los parámetros físicos y químicos del agua cruda del Rio San Antonio del Municipio Miranda, Estado Falcón, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Departamento de Química, Instituto Universitario de Tecnología Alonso Gamero, Caracas.

<sup>27</sup> Bolívar, V (2004). *Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas de la región norcentral del Valle de Caracas, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

<sup>28</sup> Ayala, L (2006). *Estudio de la calidad de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana, Península de Paraguaná, Estado Falcón, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

<sup>29</sup> Jiménez, J.R. (2009). *Estudio los factores y procesos que determinan la calidad química de las aguas subterráneas del sector Sur-Central del área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

<sup>30</sup> Oropeza, J.J. (2009). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de los Valles del Tuy en el sector de Charallave-Paracotos, Estado Miranda, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.

- <sup>31</sup> Urrutia, E. V. (2009). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del sector Este de la sub-cuenca del río Zuata del área Junín de la faja petrolífera del Orinoco*. Trabajo Especial de Grado, Escuela de Química, Facultad de Geoquímica, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- <sup>32</sup> Wikipedia. *Santa Lucía*. La enciclopedia libre [En línea]. Disponible: [http://es.wikipedia.org/wiki/Santa\\_Luc%C3%ADa\\_\(Venezuela\)](http://es.wikipedia.org/wiki/Santa_Luc%C3%ADa_(Venezuela)) [Fecha de consulta: Octubre 2011].
- <sup>33</sup> Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales (MARN). (1982). *Sistemas Ambientales Venezolanos Proyecto Ven/79/001, Región Natural 21, Depresión del Lago de Valencia*. [En línea].  
Disponible:<http://www.ecocaracas.com/resources/infoutil/docs/ListadoLegislacionAmbiental.pdf> [Fecha de consulta: Julio 2007].
- <sup>34</sup> Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV). (2005). PDVSA. [En línea]. Disponible: [www.pdv.com/lexico](http://www.pdv.com/lexico) [Fecha de consulta: Julio 2007].
- <sup>35</sup> González de Juana, C.; Iturralde, J. M. y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Venezuela: Foninves. Tomo I y II. 1030p.
- <sup>36</sup> Google Maps. *Santa Lucía, Valles del Tuy*. Buscador [En línea]. Disponible: <https://maps.google.co.ve/maps?hl=es> [Fecha de consulta: Marzo 2012].
- <sup>37</sup> Drever, J., (1997). *The geochemistry of natural waters*. New Jersey, USA: Prentice-Hall, INC. 437p.

<sup>38</sup> Rajmonhan, N. and Elango, L. (2004). *Identification and evolution of Hydrogeochemical processes in the groundwater environment in an area of the Palar and Cheyyar River Basins, Southern India*. Environmental Geology, 46, 47-61.

<sup>39</sup> Jalali, M. (2007). *Hydrochemical identification of groundwater resources and their changes under the impacts of human activity in the Chah basin in Western Iran*. [En línea]. Environ Monit Assess, 130, 347-364. Disponible: <http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/17171285> [Fecha de consulta: Noviembre 2011].

<sup>40</sup> Datta, P. and Elango, L. (1996). *Major ion chemistry of groundwater in Delhi area: Chemical weathering processes and groundwater regime*. Journal of the Geological Society of India, 47, 179-188.

# APÉNDICES

