

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA



TRABAJO ESPECIAL DE GRADO
“ESTUDIO DE LA CALIDAD QUÍMICA Y TIPOS DE AGUAS SUBTERRÁNEAS
PRESENTES EN LA CUENCA DE LA LAGUNA DE TAIGÜAIGÜAY, ESTADO
ARAGUA, VENEZUELA”

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

Caracas, Mayo 2015

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 química y tipos de aguas subterráneas presentes en la Cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua, Venezuela”, presentado por la Br. Nairim A. Mateus C., certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar al título de Licenciada en Química.

Prof. Ramón Montero
(Tutor)

Prof. Carlos Yanes
(Jurado)

Prof. Paulino Betancourt
(Jurado)

DEDICATORIA

Al ser más puro y hermoso que existe para mí sobre la faz de la tierra, a ti, querida Malela, por consentirme y por todo el amor que me has entregado desde que nací, y que aún tengo la dicha de disfrutar.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar quiero dar gracias a Dios por permitirme culminar esta importante meta en mi vida. A mi madre, Mirian Carrillo, por todos los valores y la educación impartida, por su dedicación, por siempre apoyarme incondicionalmente y estar a mi lado cuando más lo necesito. A mis hermanos, Yaneth y Jairo, por todo el apoyo a lo largo de mi vida y especialmente en esta etapa; y al resto de mis más cercanos y queridos familiares, por su cariño y atención.

Agradezco a mi amiga María Lourdes, por sus buenos consejos, por siempre darme ánimos para seguir adelante y por ser tan especial conmigo. A mis amigos y más fieles compañeros de estudio, Keyver, Emily, Estefanía, Geraldine, Ailyn y Luis, por los buenos y duros momentos compartidos durante mi etapa como estudiante. A Iván, por apoyarme y darme ánimos durante la mayor parte de mi carrera.

Gracias a mi tutor, el profesor Ramón Montero, por brindarme su confianza, por todo el apoyo, la atención y el aprendizaje que he recibido de su parte. A la profesora Vanessa Ojeda, de la Universidad Bolivariana de Venezuela, por la colaboración prestada para llevar a cabo la salida de campo de este trabajo de investigación. Al señor Fernando Ramos, por su ayuda durante la etapa de campo y la etapa experimental de este trabajo. Al profesor Franco Palmiotto, por su colaboración en la elaboración de los mapas de distribución de las especies químicas analizadas.

Gracias a mis jurados y a cada una de las personas que de una u otra forma colaboraron con la realización de este Trabajo Especial de Grado.

Finalmente, quiero agradecer a todos los profesores que contribuyeron con mi formación académica, a la Facultad de Ciencias y a mi alma mater, la Universidad Central de Venezuela, por formarme como una excelente profesional.

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación se llevó a cabo la caracterización hidroquímica de 26 muestras de aguas captadas en 25 pozos de aguas subterráneas y 1 proveniente de agua superficial, perteneciente a la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua. Este estudio se realizó con la finalidad de evaluar la calidad química y tipos de aguas subterráneas presentes en la cuenca, a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad eléctrica; así como también mediante la determinación de las especies químicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2), empleando para ello las técnicas de absorción y emisión atómica de llama, cromatografía iónica, fotolorimetría y potenciometría. Los resultados obtenidos fueron validados con el balance iónico y la relación conductividad de campo contra conductividad ideal.

Con la finalidad de facilitar la interpretación de los resultados obtenidos, fueron empleadas distintas herramientas, entre ellas se encuentra el diagrama de Piper que permitió identificar tres (3) importantes grupos de aguas en la zona de estudio, a saber: sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas; bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas; y cloruradas y/o sulfatadas sódicas potásicas. Asimismo, fueron utilizadas las relaciones interiónicas y los diagramas de Gibbs para inferir los factores responsables de la composición química de las aguas subterráneas estudiadas, entre los que principalmente se encuentran la litología, la actividad antrópica, el clima y el tiempo de residencia. En este contexto, el principal proceso controlador de dicha composición se manifestó a través de la interacción agua-roca, mediante la disolución de minerales carbonatados como calcita y dolomita; aunado a la hidrólisis de silicatos.

Finalmente, el 85% de las muestras son óptimas en cuanto a calidad para todo uso doméstico e industrial; mientras que el 15% restante puede ser destinado a usos agropecuarios, según lo establecido en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

ÍNDICE GENERAL

1.	INTRODUCCIÓN	1
2.	REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	4
2.1	El Agua	4
2.2	La Hidrogeología	5
2.3	El Ciclo Hidrológico	6
2.4	Ambiente Subterráneo	8
2.5	Acuíferos	9
2.6	Sustancias disueltas en el agua subterránea natural	10
2.6.1	Constituyentes mayoritarios	11
	Calcio	12
	Magnesio	12
	Sodio	13
	Potasio	13
	Cloruro	14
	Sulfato	14
	Nitrato	15
	Dióxido de Carbono, bicarbonato y carbonato	15
	Sílice disuelta	16
2.6.2	Algunos constituyentes minoritarios	17
	Fluoruro	17
	Fosfato	17
	Hierro	17
2.7	Clasificación de las aguas subterráneas	18
2.7.1	Clasificación de las aguas subterráneas en función de su concentración de sólidos disueltos totales (SDT)	18
2.7.2	Clasificación de las aguas subterráneas según su origen	19

2.7.3 Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo a su composición química	20
2.8 Factores que controlan la composición de las aguas subterránea	22
Clima	22
Topografía o geomorfología del terreno	23
Litología	23
Actividad antrópica	23
2.9 Procesos que controlan la composición de aguas subterráneas	24
2.10 Parámetros fisicoquímicos comúnmente determinados en estudios de calidad de aguas subterráneas	26
Temperatura	26
pH	27
Conductividad eléctrica	27
Potencial de reducción-oxidación	28
2.11 Normativa para la clasificación de las aguas en Venezuela	28
Agua tipo 1	28
Agua tipo 2	29
Agua tipo 3	29
Agua tipo 4	29
Agua tipo 5	29
Agua tipo 6	29
Agua tipo 7	29
3. ANTECEDENTES	32
3.1 Internacionales	32
3.2 Nacionales	39
4. ÁREA DE ESTUDIO	44
Ubicación geográfica	44

Clima	45
Vegetación	46
Suelos	47
Hidrología	47
Geología local	49
Hidrogeología	51
 5. METODOLOGÍA	 53
5.1 Etapa pre-campo	53
5.2 Etapa de campo	55
5.3 Etapa de post-campo	59
 6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	 64
6.1 Precisión de los análisis y límites de detección	65
6.2 Validación de los resultados	66
6.2.1 Balance iónico	66
6.2.2 Relación de aniones y cationes	67
6.2.3 Relación de conductividad ideal y conductividad de campo	69
6.3 Caracterización química	70
6.3.1 Parámetros fisicoquímicos pH y conductividad	71
6.3.2 Sílice disuelta (SiO_2)	78
6.3.3 Cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}	80
6.3.3.1 Sodio (Na^+)	81
6.3.3.2 Potasio (K^+)	84
6.3.3.3 Calcio (Ca^{2+})	86
6.3.3.4 Magnesio (Mg^{2+})	89
6.3.4 Aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-	91
6.3.4.1 Cloruro (Cl^-)	92

6.3.4.2 Sulfato (SO_4^{2-})	95
6.3.4.3 Nitrato (NO_3^-)	96
6.3.4.4 Bicarbonato (HCO_3^-)	99
6.4 Caracterización hidrogeoquímica	101
6.4.1 Sólidos disueltos totales (SDT)	101
6.4.2 Diagrama de Piper	103
6.5 Calidad del agua	109
6.5.1 Usos del agua según su calidad	109
6.6 Relaciones interiónicas	114
6.6.1 Relación HCO_3^- / Conductividad	114
6.6.2 Relación Cl^- / HCO_3^-	115
6.6.3 Relación SO_4^{2-} / Cl^-	117
6.6.4 Relación $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ / $\text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$	118
6.7 Procesos controladores de la composición química de las aguas subterráneas	120
7. CONCLUSIONES	122
8. RECOMENDACIONES	124
9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	125
APÉNDICES	134
APÉNDICE A (Datos recopilados en el estudio)	135
APÉNDICE B (Datos generados en el estudio)	138
APÉNDICE C (Condiciones experimentales de los análisis)	143
APÉNDICE D (Descripción general del método de Gran, curvas para la determinación de alcalinidad)	147

APÉNDICE E (Descripción del método empleado para la determinación de sílice disuelta)	153
APÉNDICE F (Ecuaciones empleadas para determinar la precisión de los análisis y curvas de calibración de las especies químicas determinadas)	156
APÉNDICE G (Datos y ecuación del balance iónico, cálculo de la conductividad ideal en las muestras en estudio y ecuaciones empleadas)	165
APÉNDICE H (Figuras de Stiff generadas para las muestras estudiadas)	171

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Distribución global de agua en el planeta	5
Figura 2. Ciclo hidrológico	8
Figura 3. Diagrama de Piper	21
Figura 4. Figuras de Stiff	22
Figura 5. Ubicación de la zona de estudio	44
Figura 6. Gráfico de la precipitación media mensual, periodo 1971 – 1991	46
Figura 7. Patrón de drenaje de la zona de estudio	48
Figura 8. Esquema de la etapa de pre-campo	54
Figura 9. Puntos de muestreo de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay	56
Figura 10. Esquema de la etapa de campo	58
Figura 11. Equipo de emisión y absorción atómica	60
Figura 12. Equipo de cromatografía iónica	61
Figura 13. Espectrofotómetro de absorción molecular	63
Figura 14. Esquema de la metodología empleada en el presente estudio	63
Figura 15. Representación gráfica del error porcentual del balance iónico en las muestras de aguas analizadas	67
Figura 16. Representación gráfica de las concentraciones de aniónicas y catiónicas totales expresadas en meq/L	68
Figura 17. Relación conductividad ideal y conductividad medida en campo	69
Figura 18. Caja gráfica para el parámetro pH	74
Figura 19. Distribución espacial del pH	75
Figura 20. Caja gráfica para el parámetro conductividad	77
Figura 21. Distribución espacial de la conductividad	77
Figura 22. Caja gráfica para la sílice disuelta (SiO_2) en las muestras estudiadas ...	79
Figura 23. Distribución espacial de la sílice disuelta (SiO_2), expresada en mg/L	80
Figura 24. Cajas gráficas para las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}	81
Figura 25. Distribución espacial del sodio (Na^+), expresada en mg/L	83

Figura 26. Distribución espacial del potasio (K^+), expresada en mg/L	86
Figura 27. Distribución espacial del calcio (Ca^{2+}), expresada en mg/L	89
Figura 28. Distribución espacial del magnesio (Mg^{2+}), expresada en mg/L	91
Figura 29. Cajas gráficas para las especies químicas Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^-	92
Figura 30. Distribución espacial del cloruro (Cl^-), expresada en mg/L	94
Figura 31. Distribución espacial del sulfato (SO_4^{2-}), expresada en mg/L	96
Figura 32. Distribución espacial del nitrato (NO_3^-), expresada en mg/L	98
Figura 33. Distribución espacial del bicarbonato (HCO_3^-), expresada en mg/L	100
Figura 34. Caja gráfica de los SDT para las muestras de agua analizadas	101
Figura 35. Diagrama de Piper para las muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüagüay	104
Figura 36. Relación entre la concentración de bicarbonato y la conductividad	115
Figura 37. Relación entre la concentración de bicarbonato y cloruro	117
Figura 38. Relación entre el sulfato y el cloruro	118
Figura 39. Relación entre el calcio y magnesio en función del sulfato y el bicarbonato	119
Figura 40. Diagramas de Gibbs	120

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Especies químicas más importantes de las aguas naturales	10
Tabla 2. Intervalo de pH de los subtipos de agua tipo 1 de acuerdo a lo establecido en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995)	29
Tabla 3. Límites de concentración de distintas especies químicas que determinan la calidad de las aguas, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995)	31
Tabla 4. Parámetros estadísticos calculados para tres (3) réplicas de la muestra MASSLV-05	65
Tabla 5. Tipos de aguas presentes en la zona de estudio de acuerdo al diagrama de Piper	105
Tabla 6. Subtipos de aguas presentes en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay	108
Tabla 7. Clasificación de las aguas captadas en la zona de estudio según su calidad	112
Tabla 8. Relación entre cloruro y bicarbonato para cada una de las muestras captadas	116
Tabla A.1 Localidad, ubicación geográfica, profundidad y parámetros fisicoquímicos medidos <i>in situ</i> durante la etapa de campo	136
Tabla B.1 Concentraciones de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en las muestras de agua captadas	139
Tabla B.2 Concentraciones de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- en las muestras de agua captadas	140
Tabla B.3 Concentraciones de sílice disuelta (SiO_2) y sólidos disueltos totales (SDT) determinadas en las muestras de agua captadas	141
Tabla C.1 Condiciones experimentales empleadas en la determinación de cationes mediante la técnica de espectrometría de emisión y absorción atómica de llama ...	144
Tabla C.2 Condiciones experimentales empleadas en la técnica de cromatografía iónica	145

Tabla C.3 Condiciones experimentales del análisis mediante espectrometría de absorción molecular UV-Visible	145
Tabla C.4 Reactivos utilizados en la preparación de las soluciones patrón	146
Tabla F.1 Parámetros de la estadística descriptiva calculados para tres (3) réplicas de la muestra MASSLV-05 para determinar la precisión de los análisis	157
Tabla G.1 Datos obtenidos del balance iónico	166
Tabla G.2.1 Conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25 °C	169
Tabla G.2.2 Conductividad ideal obtenida para cada una de las muestras analizadas y conductividad medida en campo	169

1. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso de suma importancia para la vida y el desarrollo del ser humano. Esta se encuentra distribuida en nuestro planeta en aproximadamente un 97 % en aguas oceánicas y un 3 % en aguas dulces. De éstas últimas, cerca del 30 % lo conforman las aguas subterráneas, que son el resultado de la infiltración del agua, generalmente meteórica, a través de una formación geológica, que permita su transporte y almacenamiento ^[1]. Estos sistemas constituyen un importante reservorio de agua de fácil acceso para el consumo humano. Sin embargo, su uso no ha sido muy aprovechado debido a que el costo de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el de las aguas superficiales, y a que es imposible proporcionar grandes caudales de agua en captaciones ubicadas en regiones de subsuelos rocosos, debido a su reducida porosidad o permeabilidad. Pese a esto, la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, debido a que estas aguas son preferidas ante las aguas superficiales porque no poseen organismos patógenos y no necesitan ser tratadas para el consumo humano, agrícola e industrial ^[2].

En Venezuela, existe una gran demanda de las aguas subterráneas, ya que aproximadamente el 50 % del abastecimiento de agua potable, industrial y de riego, proviene de estos sistemas subterráneos. En algunas regiones del país, este recurso natural presenta alteraciones en la composición química debido a actividades antrópicas, destacándose las agrícolas, que influyen marcadamente en la composición de las mismas ^[3]. De este modo, el acelerado crecimiento demográfico en nuestro país y particularmente en el estado Aragua, ha originado un aumento en el consumo de las aguas subterráneas para usos domésticos, industriales y agrícolas, generando una insuficiencia en la utilización de las aguas superficiales para dichas actividades ^[23]. Esto a su vez, ha traído como consecuencia la contaminación de los importantes reservorios de aguas subterráneas de la región, específicamente de la cuenca de la Laguna de

Taigüaigüay, la cual pertenece a la cuenca hidrográfica del Lago de Valencia ^[4].

En los últimos años se han realizado estudios en las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay. Entre dichos estudios se pueden citar los realizados por Biondo y Esteves (2010) y Kutos (2012). Este último realizó un estudio hidrogeoquímico en el que se logró identificar dos tipos de aguas, a saber: $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$ y $\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-\text{-Cl}^-$, asimismo determinó que los factores responsables de la composición química y de la calidad de las aguas son la actividad antrópica, la litología, el tiempo de residencia y el clima ^[4].

En este sentido, el presente trabajo de investigación surge con el objetivo general de estudiar la calidad química y tipos de aguas subterráneas existentes en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, ubicada en el Municipio Sucre del estado Aragua.

Con la finalidad de alcanzar el objetivo general antes mencionado, se plantearon los siguientes objetivos específicos:

- Realizar la caracterización de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y temperatura; así como de la determinación de la concentración de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2).
- Identificar los tipos de aguas subterráneas presentes en el área de estudio y clasificarlos en función de su composición química y de su calidad química, según lo expuesto en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).
- Observar la distribución espacial de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2) en la zona de estudio.

- Identificar los factores y procesos que controlan la calidad química de las aguas subterráneas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay.

2. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

A continuación se presentan una serie de términos y conceptos relacionados con el estudio de las aguas subterráneas, con la finalidad de ampliar los conocimientos y de sustentar teóricamente la presente investigación.

2.1 Agua

La molécula de agua está formada por dos átomos de hidrógeno y uno de oxígeno, siendo por lo tanto su fórmula H_2O . Se trata de una molécula con enlaces covalentes y debido a que es algo asimétrica y a su fuerte polaridad, el agua posee propiedades particulares tanto desde un aspecto de vista químico como físico ^[5].

La gran capacidad de disolución del agua y su elevada reactividad hace que ésta en su forma natural, contenga una importante cantidad de sustancias disueltas; además, es frecuente encontrarla formando parte de la composición de muchas sustancias ya sea como parte de su estructura, adsorbida o acompañándolas, tal es el caso de los hidratos y de las aguas de formación. Por otra parte, su alta reactividad también le permite atacar directa o indirectamente a muchas otras sustancias, a través de los componentes disueltos que ella contiene, debido a reacciones de hidrólisis y oxidación, entre otras ^[5].

Desde otro punto de vista, el agua es uno de los recursos naturales que mayor importancia reviste para la sociedad y para el ambiente, ya que es un componente necesario para el funcionamiento de los ecosistemas, la supervivencia de la población y la producción agropecuaria e industrial. Es pues, parte integral del medio biofísico y un componente necesario para el consumo y producción de la sociedad ^[6].

Aunque más de las tres cuartas partes de la superficie terrestre están cubiertas de

agua, sólo es dulce una cantidad inferior al 3 %, y de ésta, más de sus tres cuartas partes se encuentran heladas en los polos y glaciares ^[7]. Mientras que cerca del 30 % se localiza bajo tierra conformando las aguas subterráneas y sólo un 0,3 % en la superficie terrestre ^[8].

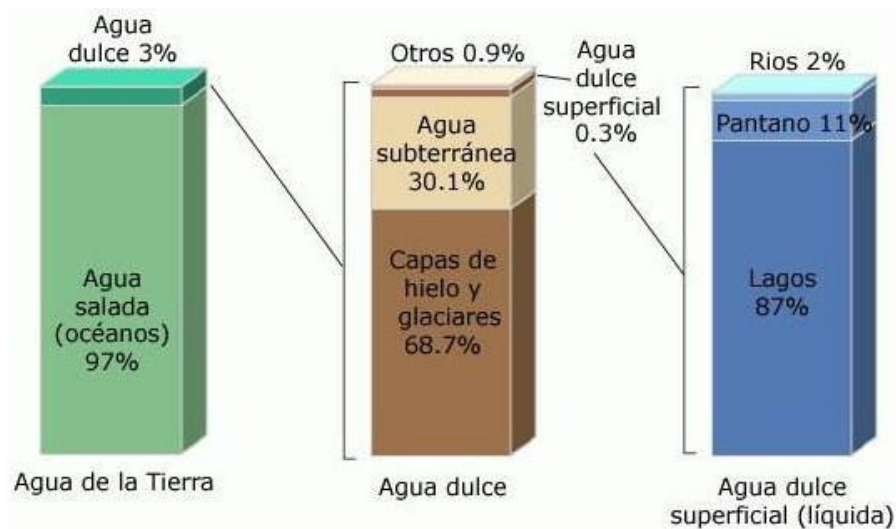


Figura 1. Distribución global del agua en el planeta ^[8]

En la figura 1 se puede apreciar la distribución esquemática del agua dulce en nuestro planeta Tierra. Por tanto, sólo una centésima parte del total del agua del planeta está disponible para la vida terrestre. El agua dulce de la escorrentía superficial asociada a torrentes, ríos y lagos, entre otras y las aguas subterráneas, son las únicas que puede utilizar el ser humano para satisfacer sus necesidades fisiológicas ^[7].

2.2 Hidrogeología

La hidrogeología o hidrología subterránea es aquella parte de la hidrología que corresponde al almacenamiento y circulación y distribución de las aguas terrestres en la zona saturada de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades

físicas y químicas, sus interacciones con el medio físico y biológico y sus reacciones a la acción del hombre. ^[5] También puede ser definida como el estudio de las aguas subterráneas cuyo énfasis especial recae sobre su aspecto químico, circulación y circunstancias geológicas condicionantes ^[1].

Desde un punto de vista más general, la hidrogeología puede ser considerada como una materia interdisciplinar en la que es preciso aplicar las leyes y métodos de muchas otras disciplinas como la estratigrafía, la tectónica, la geofísica, la geotecnia, la hidrología aplicada a la ingeniería y la hidrogeoquímica ^[3].

2.3 Ciclo hidrológico

Aunque la hidrogeología se refiere exclusivamente al estudio de las aguas subterráneas, se debe tener en sus términos más generales una cierta formación del ciclo hidrológico del agua, ya que en el fondo las aguas subterráneas no representan más que una parte de este ciclo, el cual es un sistema complejo en el que todas las aguas circundantes de la tierra se encuentran incluidas e interrelacionadas ^[1].

El movimiento permanente del ciclo se debe fundamentalmente a dos causas, a saber: la primera, el sol que proporciona la energía para elevar el agua del suelo al evaporarla; la segunda, la gravedad que hace que el agua condensada precipite y que una vez sobre la superficie, vaya hacia las zonas más bajas ^[5].

El ciclo se inicia cuando una parte del vapor de agua de la atmósfera se condensa y da origen a precipitaciones en forma de lluvia o de nieve. Del agua que alcanza la superficie terrestre, una parte se queda retenida en pequeños surcos, originando lo que se conoce como almacenamiento superficial, que en su mayoría vuelve pronto a la atmósfera en forma de vapor. Otra parte, circula sobre la superficie y se concentra en pequeñas quebradas que luego se reúnen para conformar los arroyos y más tarde

desembocan en los ríos por un proceso denominado escorrentía superficial; esta agua llegará a lagos o al mar, de donde será evaporada formando las nubes, o bien, se infiltrará en el terreno ^{[1], [5]}.

Finalmente, existe una tercera parte de la precipitación que penetra bajo la superficie del terreno a través de los agujeros del suelo y va rellenando los poros o fisuras de este medio poroso, originando el proceso de infiltración o escorrentía subterránea. Una buena parte de la infiltración no desciende hasta la zona saturada, sino que se queda en la zona no saturada o zona de humedad del suelo, de donde vuelve a la atmósfera por evaporación o por la transpiración de las plantas; a ambos fenómenos se les denomina evapotranspiración ^[5].

Por lo general, la mayor parte de la escorrentía superficial y de la subterránea terminan en el mar, por ello puede considerarse que los océanos son el punto final del ciclo hidrológico, pues de ellos vuelve a evaporarse el agua y se inicia de nuevo todo el proceso ^[5].

La siguiente figura describe gráficamente las etapas del ciclo hidrológico.



Figura 2. Ciclo hidrológico ^[20]

2.4 Ambiente subterráneo

En el subsuelo, el agua se puede encontrar bajo una amplia gama de condiciones que se extienden desde el agua que circula libremente hasta el agua que se encuentra firmemente fijada en el interior de las estructuras cristalinas ^[1]. Así, la distribución del agua en suelo se ha dividido en tres ambientes: zona de aireación o zona no saturada, franja capilar y zona saturada ^[9].

Zona de aireación

La zona de aireación también recibe el nombre de zona no saturada o zona vadosa y está sujeta a grandes fluctuaciones, en cantidad y calidad, debidas al fenómeno de la

evaporación y transpiración que sobre ella actúa. Las fluctuaciones de humedad producidas por el efecto evapotranspirante de las plantas disminuyen gradualmente en profundidad ^[1].

Franja Capilar

Es la transición entre la zona de aireación y la zona saturada. ^[1] La franja capilar es una capa humedecida por el agua que asciende de la zona de saturación debido a fenómenos capilares ^[9].

Zona de saturación

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

La capa saturada es el manto freático y la parte superior de ésta, es decir el límite de la zona libre del agua que ocupa esta región, es la superficie freática que por lo general sigue débilmente las ondulaciones del terreno ^[9].

2.5 Acuíferos

Los acuíferos son formaciones geológicas que contienen agua en cantidad apreciable, que permiten que circule a través de ella con facilidad ^[10]. Estos son capaces de suministrar el agua por gravedad o por bombeo en la calidad requerida, permitiendo que el hombre pueda extraerla y aprovecharla para sus necesidades en cantidades económicamente apreciables ^[9].

Los acuíferos pueden clasificarse en libres, confinados y semiconfinados. Se denominan acuíferos libres a aquellos en los que su límite superior; es decir, su superficie freática está a presión atmosférica ^[10]. Por otra parte, los acuíferos confinados, también conocidos como artesianos, se tienen cuando el agua subterránea está limitada en su parte superior por un estrato impermeable. El agua confinada o artesisiana tiene una presión que la hace subir a un cierto nivel cuando alguna fractura o perforación llega hasta el acuífero confinado. La presión causante de este ascenso es la presión hidrostática y el nivel al cual llega esta agua sin ser bombeada se denomina superficie piezométrica ^[9]. Mientras que, los acuíferos semiconfinados son aquellos que se encuentran a presión, pero algunas de sus capas confinantes son semipermeables permitiendo que ocurra la percolación del agua hacia el acuífero ^[10].

2.6 Sustancias disueltas en el agua subterránea natural

En el agua subterránea natural, la mayoría de las sustancias disueltas se encuentran en estado iónico. Unos cuantos de estos iones están presentes casi siempre y su suma representa casi la totalidad de los iones en las aguas ^[5].

De este modo, los iones mayoritarios son Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} y HCO_3^- . Con frecuencia los iones nitrato (NO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}) y potasio (K^+) se consideran dentro del grupo de iones mayoritarios aún cuando su proporción es pequeña, otras veces se incluye además el ion ferroso (Fe^{2+}) ^[5].

Por otra parte, el resto de iones y sustancias disueltas se encuentran por lo general en cantidades notablemente más pequeñas que los anteriores. A estos iones se les conoce como minoritarios, habitualmente formando menos del 1 % del contenido iónico total. También existen elementos traza que están presentes en cantidades difícilmente medibles por medios químicos usuales ^[5].

Cabe destacar que además de los iones antes mencionados, en el agua también existen otras sustancias disueltas poco ionizadas o en estado coloidal como los ácidos y aniones derivados de la sílice (SiO_2); así como también pueden estar presentes gases disueltos como el dióxido de carbono (CO_2) y el oxígeno disuelto (O_2), aunque no es frecuente que se analicen en aguas subterráneas ^[5].

En la Tabla 2 se presentan los constituyentes que se encuentran habitualmente en las aguas naturales, clasificados de acuerdo a sus concentraciones.

Tabla 1. Especies químicas más importantes de las aguas naturales ^[16]

Componentes mayoritarios (Mayor a 5 mg/L)			Componentes minoritarios (10 – 0,01 mg/L)		Componentes traza (Menor a 0,1 mg/L)		
Cationes	Aniones	Otros	Cationes	Aniones	Cationes	Aniones	Otros
Na^+	Cl^-	SiO_2	K^+	NO_3^-	Al^{3+}	PO_4^{3-}	Ar
Ca^{2+}	SO_4^{2-}	CO_2	Fe^{2+}	CO_3^{2-}	Ti^{4+}	Br^-	Sb
Mg^{2+}	HCO_3^-		Sr^{2+}	NO_2^-	Co^{2+}	I^-	Cr
			NH_4^+	F^-	Pb^{2+}	NO_2^-	Pb
					Ni^{2+}	S^{2-}	Zn
					$\text{As}^{2+}, \text{Mn}^{2+}$	HO^-	Hg, Ba

2.6.1 Constituyentes mayoritarios presentes en las aguas subterráneas

A continuación se describirán las principales características de los componentes mayoritarios que están presentes en el agua natural subterránea.

Calcio (Ca^{2+})

El 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 carbonatos como calcita y aragonito (CaCO_3), dolomita ($\text{Ca Mg}(\text{CO}_3)_2$) y de sulfatos como yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) o anhidrita (CaSO_4) ^[17].

Debido a que el 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 ^[12].

La concentración de Ca^{2+} varía ampliamente en las aguas subterráneas. En aguas dulces son frecuentes las concentraciones entre 10 y 250 mg/L, mientras que en aguas de terrenos yesíferos pueden llegar a 600 mg/L y en salmueras hasta 50.000 mg/L ^[17].

Magnesio (Mg^{2+})

El ión Mg^{2+} es menos abundante que el ión Ca^{2+} en aguas naturales, procede de la disolución de rocas carbonatadas tales como dolomitas y calizas magnesianas, evaporitas y de la alteración de silicatos ferromagnesianos, así como también puede proceder de la intrusión de agua marina. La solubilidad de la magnesita (MgCO_3) en las aguas subterráneas naturales es mayor que la de la calcita (CaCO_3) ^[17].

Por otra parte, los procesos de intercambio iónico también influyen en las concentraciones de Mg^{2+} en aguas subterráneas. En ellas, este ión es retenido con preferencia al Ca^{2+} en suelos y rocas ^[17].

En aguas naturales, la concentración del ión Mg^{2+} no suele sobrepasar los 40 mg/L, mientras que en terrenos calcáreos su concentración puede estar por encima de los 100

mg/L y en terrenos evaporíticos, pueden alcanzarse valores de 1.000 mg/L ^[17].

Sodio (Na^+)

El Na^+ es liberado por la meteorización de silicatos tipo albita y la disolución de rocas sedimentarias de origen marino y depósitos evaporíticos en que se presenta fundamentalmente como NaCl. Una fuente importante de este ión la constituyen los aportes de agua marina en regiones costeras, tanto por intrusión marina como por infiltración del agua de lluvia a la que se incorpora desde el mar ^[17].

Las sales de Na^+ son altamente solubles por lo que tienden a permanecer en solución, debido a que no se producen entre ellas reacciones de precipitación como ocurre en el caso del Ca^{2+} . Sin embargo, este ión puede ser adsorbido en arcillas de elevada capacidad de intercambio catiónico y puede ser intercambiado con el calcio provocando una disminución de la dureza de las aguas ^[17].

La presencia de Na^+ en aguas naturales es muy variable, en aguas dulces normales raramente sobrepasa 100 o 150 mg/L, pero puede alcanzar hasta 120.000 mg/L en zonas evaporíticas ^[17].

Potasio (K^+)

La presencia del ión K^+ en las aguas subterráneas está asociada a la meteorización de feldespatos y ocasionalmente a la solubilización de depósitos de evaporitas, en particular sales de tipo silvina (KCl) o carnalita ($\text{KCl MgCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$). Dicho ión tiende a ser fijado irreversiblemente en procesos de formación de arcillas y de adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico. Debido a esto, su concentración en aguas subterráneas naturales es generalmente mucho menor que la del ión Na^+ ^[12].

Asimismo, la concentración de K^+ en aguas subterráneas no suele sobrepasar los 10 mg/L, a excepción de algunas salmueras. En ocasiones, concentraciones más altas pueden ser indicio de contaminación por vertidos de aguas residuales ^[17].

Cloruro (Cl^-)

Por lo general, las rocas presentan escasa proporción de Cl^- , exceptuando las evaporitas y las rocas de origen marino. Sin embargo, dada la elevada solubilidad de sus sales, éstos pasan rápidamente a la fase acuosa pudiendo alcanzar concentraciones muy altas. En el mismo orden de ideas, el agua de lluvia puede ser una fuente importante de esta especie química, especialmente en zonas cercanas a la costa. Cabe destacar que la concentración de Cl^- en el agua de lluvia disminuye rápidamente a medida que ocurre el desplazamiento tierra adentro ^[17].

La concentración de Cl^- en aguas subterráneas es muy variable, desde menos de 10 mg/L hasta más de 3.000 mg/L. En salmueras naturales, próximas a la saturación de NaCl, puede llegar a casi 200.000 mg/L; así el agua de mar contiene alrededor de 20.000 mg/L ^[17].

Sulfato (SO_4^{2-})

La presencia del ión SO_4^{2-} en las aguas subterráneas está asociada al lavado de terrenos formados en ambientes marinos, a la oxidación de sulfuros que se encuentran distribuidos ampliamente en rocas ígneas, a la interacción del agua con minerales de SO_4^{2-} presente en algunas rocas sedimentarias, y a la descomposición de materia orgánica, entre otros. Sin embargo, la disolución de sales sulfatadas como yeso ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) y anhidrita ($CaSO_4$), representan el aporte cuantitativamente más importante de este ión a las aguas subterráneas ^[17].

En aguas dulces, la concentración normal del ión SO_4^{2-} puede variar entre 2 y 150 mg/L, mientras que en aguas salinas, asociado al Ca^{2+} puede llegar a 5.000 mg/L; asimismo, en salmueras, y asociado a Na^+ y a Mg^{2+} , este ión puede alcanzar una concentración de 200.000 mg/L ^[17].

Nitrato (NO_3^-)

El ión NO_3^- puede estar presente en las aguas subterráneas, bien sea como resultado de la oxidación de las rocas que lo contengan, hecho que ocurre raramente, o bien por la oxidación bacteriana de materia orgánica. Su concentración en aguas subterráneas no contaminadas por lo general no excede de 10 mg/L ^[17].

Cabe destacar que el origen del ión NO_3^- en las aguas subterráneas, no siempre es claro. Esta especie es relativamente estable, pero puede ser fijada por el terreno o ser reducida a nitrógeno o amonio en ambientes reductores. Por lo general, esta especie es un indicador de contaminación cuando su concentración es elevada, presentando con frecuencia una estratificación clara con predominio de las concentraciones más elevadas en la parte superior de los acuíferos libres. Así, su presencia en aguas subterráneas está relacionada con actividades urbanas, industriales y ganaderas, muy frecuentemente, con carácter no puntual, con las prácticas de abonados intensivos inadecuados con compuestos nitrogenados ^[17].

Dióxido de carbono (CO_2), bicarbonato (HCO_3^-) y carbonato (CO_3^{2-})

El dióxido de carbono se disuelve en el agua en función de su presión parcial. Una parte permanece en disolución en forma de gas, mientras que otra reacciona con el agua para originar ácido carbónico (H_2CO_3) que se disocia parcialmente para producir iones carbonato (CO_3^{2-}) y bicarbonato (HCO_3^-) ^[17]. Estos iones controlan casi exclusivamente la alcalinidad de las aguas, su presencia en las aguas subterráneas es el producto del

equilibrio entre el dióxido de carbono con el agua en la atmósfera, también puede ser generado por la descomposición de la materia orgánica ^[1].

Asimismo, la disolución de calizas y dolomitas, potenciada por el aporte de CO₂ y/o ácidos orgánicos o inorgánicos, es otra de las principales fuentes de carbonatos y bicarbonatos ^[17].

En aguas subterráneas con pH inferior a 8 la especie dominante es el ión HCO₃⁻. En estas aguas su concentración suele variar entre 50 y 400 mg/L, aunque puede alcanzar valores de hasta 800 mg/L. Asimismo, en aguas pobres en Ca y Mg o en las que se producen fenómenos de liberación de CO₂ en el acuífero, pueden encontrarse concentraciones de hasta 1.000 mg/L de este ión ^[17].

Sílice disuelta (SiO₂)

.

La sílice disuelta (SiO₂) en las aguas subterráneas proviene fundamentalmente del proceso de hidrólisis de los feldespatos y silicatos en general. Tanto el cuarzo como la sílice amorfa, debido a su baja solubilidad, no son fuentes de esta especie en las aguas subterráneas ^[17].

Aunque la sílice disuelta suele representarse como SiO₂, en la mayoría de las aguas naturales aparece como H₄SiO₄. Por lo general, la concentración de SiO₂ en agua subterránea sobrepasa los 3 - 8 mg/L ^[12].

2.6.2 Algunos constituyentes minoritarios presentes en las aguas subterráneas

A continuación se describen las características principales de las especies químicas que se encuentran en menor proporción en el agua natural subterránea.

Fluoruro (F^-)

El ión F^- parece estar relacionado con la alteración de rocas plutónicas. Su concentración raramente sobrepasa los 2 mg/L ^[12].

Fosfato (PO_4^{3-})

El ión PO_4^{3-} al igual que el ion NO_3^- , es un nutriente esencial para las plantas, pero se encuentra en concentraciones mucho menores que éste probablemente por su tendencia a formar iones complejos y compuestos de baja solubilidad con un extenso número de metales; además puede ser adsorbido por sedimentos hidrolizados, especialmente sobre minerales de arcilla, presentes en el suelo ^[12].

Las principales fuentes de PO_4^{3-} se asocian a la disolución de rocas ígneas o sedimentarias marinas que contienen esta especie, a fertilizantes fosfatados, a los detergentes presentes en las aguas residuales de origen urbano o ganadero, entre otros ^[12].

Hierro (Fe)

El hierro suele estar presente como Fe^{2+} , aunque también puede presentarse como Fe^{3+} . Su concentración en el agua está controlada por procesos de equilibrio químico de óxido-reducción, precipitación y disolución de hidróxidos, carbonatos y sulfuros, formación de complejos especialmente con la materia orgánica y también por la

actividad metabólica de animales y plantas ^[12].

Por otra parte, su concentración en las aguas está entre 1 y 10 mg/L, aunque lo normal es que se encuentre por debajo de 0,1 mg/L ^[17].

2.7 Clasificación de las aguas subterráneas

Las aguas subterráneas pueden ser clasificadas según su origen, su composición química y su concentración de sólidos disueltos totales (SDT). A continuación se describirán detalladamente cada una de las clasificaciones antes mencionadas.

2.7.1 Clasificación de las aguas en función de su concentración de sólidos disueltos totales (SDT)

Según Hem (1985) ^[12] las aguas pueden ser clasificadas de acuerdo a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) en diferentes tipos; a saber:

Aguas dulces, cuyas concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) son menores a 1.000 mg/L.

Aguas salobres, las cuales presentan concentraciones entre 1.000 y 10.000 mg/L, en sólidos disueltos totales (SDT).

Aguas saladas, son aquellas que contienen concentraciones de sólidos disueltos totales (SDT) entre 10.000 y 35.000 mg/L.

Salmueras, referidas a las aguas con concentración de sólidos disueltos totales (SDT) mayores que el promedio del agua de mar; es decir, mayor de 35.000 mg/L ^[12].

2.7.2 Clasificación de las aguas subterráneas según su origen

White (1957) ^[11] indica que las aguas subterráneas pueden clasificarse de acuerdo a su origen como connata, juvenil, magmática, metamórfica y meteórica.

Las aguas connatas o fósiles son aquellas que han estado fuera de contacto con la atmósfera durante al menos una parte apreciable de un período geológico. Están compuestas de agua fósil intersticial de sedimentos no metamorfizados y de rocas volcánicas extrusivas y agua que ha sido desplazada de las rocas ^[11]. Frecuentemente este tipo de aguas suelen ser fuertemente cloruradas y estar enriquecidas en I^- , B, SiO_2 , NO_3^- o NH_4^+ y Ca^{2+} , mientras que las concentraciones de SO_4^{2-} y Mg^{2+} son bajas con respecto al agua de mar ^[5].

Por su parte, las aguas juveniles son definidas como aquellas que se encuentran en el magma primario o que derivan de éste. Además, ascienden desde el manto terrestre o de la parte más baja de la corteza y nunca han formado parte del ciclo hidrológico ^[11].

Mientras que las aguas magmáticas se desprenden de las emisiones de lava y gases volcánicos, entre otros. Suelen ser de tipo clorurado sódico y tienen concentraciones anormalmente elevadas de Li^+ , F^- , SiO_2 , B, S^{2-} , CO_2 , y bajas en I^- , Br^- , Ca^{2+} , y NO_3^- o NH_4^+ ^[5].

Las aguas metamórficas son aquellas que están o han estado en las rocas durante su metamorfismo ^[11]. Por lo general, suelen tener altas concentraciones de CO_2 , HCO_3^- y B, valores elevados de I^- y pueden ser menos cloruradas que el agua de mar ^[5].

Finalmente, las aguas meteóricas se refieren a aquellas que fueron incluidas recientemente en la circulación atmosférica ^[11]. Prácticamente, toda el agua de la tierra es meteórica, pero sólo se considera como tal la que actualmente interviene en el ciclo

y no la que accidentalmente ha sido separada del mismo. Presentan una composición isotópica similar a la del agua de lluvia, y su composición está influida principalmente por la del agua de infiltración y la del material de acuífero ^[5].

2.7.3 Clasificación de las aguas subterráneas de acuerdo a su composición

La composición química de las aguas subterráneas está controlada por factores como la geología estructural, mineralogía del acuífero, la composición de la precipitación atmosférica y los procesos geoquímicos que ocurren en ellos. Debido a la interacción de dichos factores, son generados diferentes tipos de aguas en función de las especies químicas presentes ^[1].

Uno de los primeros sistemas creados para clasificar las aguas subterráneas y superficiales, basándose en su composición química es el diagrama creado por Piper (1944) ^[13]. Esta herramienta proporciona la identificación del tipo de agua, mediante una representación gráfica y puede contribuir en dilucidar procesos como las mezclas entre diferentes cuerpos de aguas, probables procesos de contaminación e interacción agua roca, entre otros.

El diagrama de Piper (1944) ^[13] consiste de dos diagramas triangulares, donde se representan en meq/L la concentración de los cationes $\text{Na}^+ + \text{K}^+$, Ca^{2+} , Mg^{2+} y de los aniones Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} ; así como también de un romboedro central, que permite expresar finalmente el carácter químico del agua en función de las concentraciones relativas de sus constituyentes, esto a través de la proyección de los dos puntos obtenidos durante la proyección de los iones en los triángulos. En la Figura 2 se puede observar una representación de dicho diagrama.

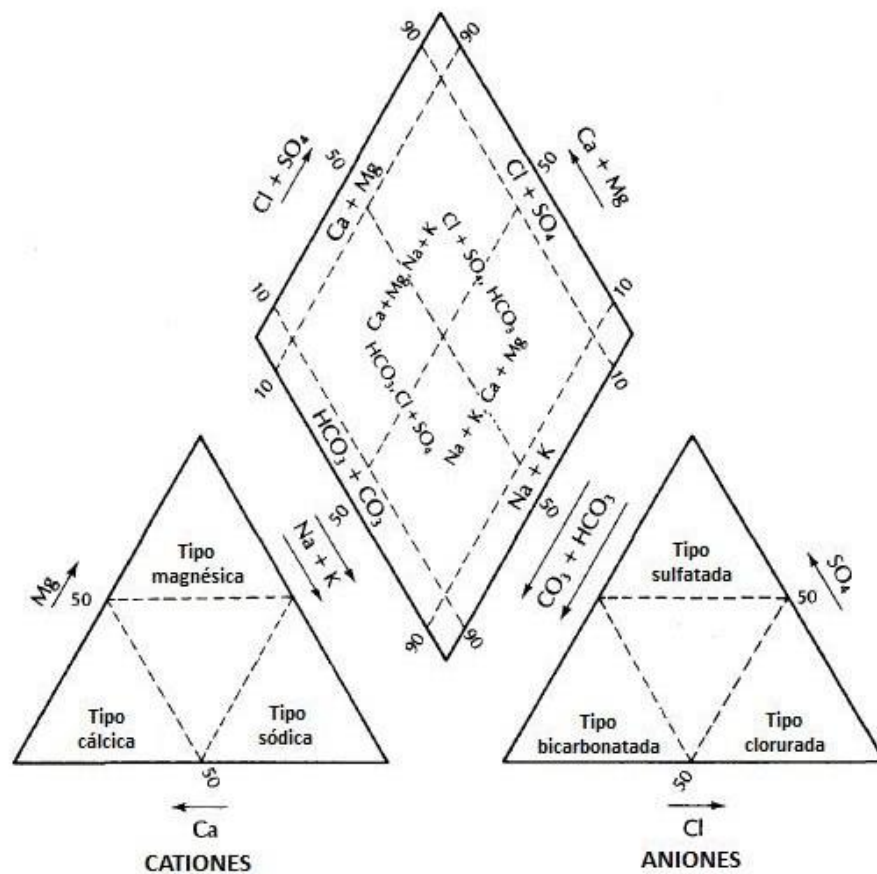


Figura 3. Diagrama de Piper ^[14]

Por otro lado, Stiff (1951) ^[15] creó una representación gráfica mediante la generación de figuras características que permiten identificar los tipos de aguas según su composición y comportamiento.

Dicha representación consiste en construir semirrectas convergentes o paralelas proporcionales a cada ión, uniendo los extremos se puede obtener un polígono que es característico para cada muestra de agua. Sobre cada semirrecta se toma un sólo ión o bien un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante da una idea del tipo de agua y su origen ^[5]. En la siguiente figura se pueden observar distintas

figuras de Stiff.

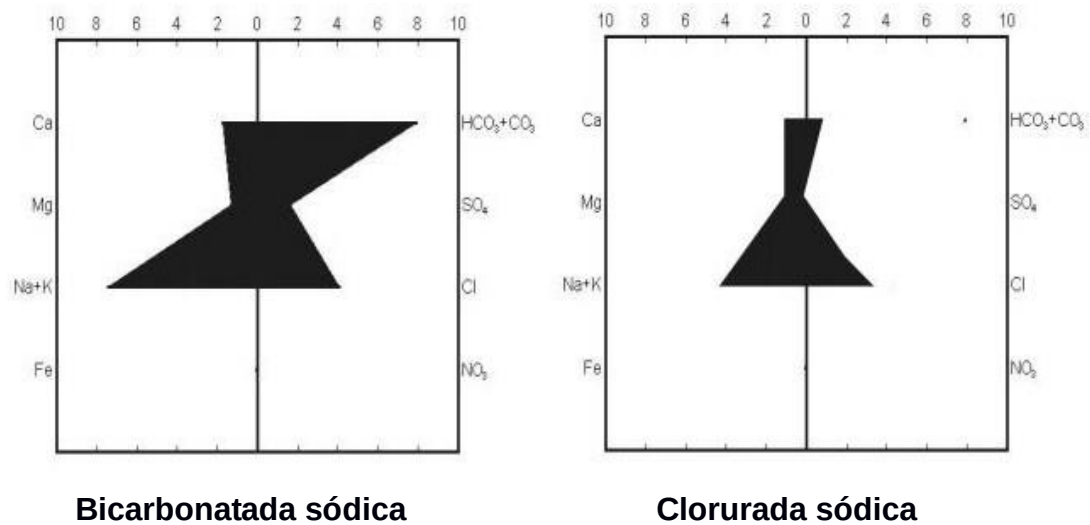


Figura 4. Figuras de Stiff ^[18]

2.8 Factores que controlan la composición química del agua subterránea

La composición química del agua subterránea está influenciada por diversos factores, entre los cuales se pueden nombrar el clima, la topografía, la litología, la actividad antrópica y el tiempo de residencia. A continuación se realiza una breve descripción de dichos factores.

Clima

Durante ciertas épocas del año, es frecuente que 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.

Por su parte, en la época húmeda ocurre la recarga de los acuíferos a causa de las frecuentes precipitaciones. De esta manera, las primeras fracciones de infiltración son notablemente más salinas que las siguientes, debido al lavado de las sales solubles depositadas en la época de sequía precedente ^[5].

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; así como el régimen de flujo, sea este del tipo regional o local ^[5].

Litología

Conforme las aguas subterráneas atraviesan una formación geológica particular, van adquiriendo los componentes solubles del suelo; además a medida que estas aguas profundizan a través de grietas y poros del lecho de rocas subyacentes, disuelven más materia mineral.

La disolución ocurre cuando las moléculas de agua entran en contacto con los minerales, debido a que su polaridad altera la fuerza de atracción existente en la red cristalina del mineral, liberando los iones que pasan a formar parte de la composición del agua subterránea durante el proceso de interacción agua-roca ^[19].

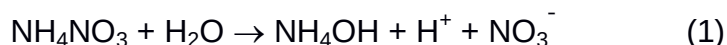
Actividad antrópica

Las contaminaciones de los acuíferos raramente se producen de forma natural y espontánea, éstas son consecuencia de las distintas actividades desarrolladas por el ser humano en la superficie, a saber: vertidos de desechos urbanos e industriales,

colectores de aguas residuales, trabajos mineros e industriales, la nula protección sanitaria de las áreas de recarga, la ganadería, la agricultura y las actividades nucleares, entre otras ^[2].

Por otro lado, el aumento de las extracciones de agua subterránea debido al bombeo producido por el incremento de la demanda, acelera el movimiento y la difusión de los contaminantes, paralelamente a la progresiva degradación de las aguas subterráneas y superficiales ^[2].

La mayoría de los contaminantes de las aguas subterráneas comprenden una serie de materiales orgánicos e inorgánicos, que pueden ser clasificados como peligrosos. Especialmente los fertilizantes y pesticidas, que contienen nitratos, sulfatos y amonio, cuyas sales son muy solubles en agua por lo que su disociación puede contribuir al incremento de NO_3^- y SO_4^{2-} en las mismas. Esto se puede ejemplificar en las reacciones 1 y 2.



Los productos de estas reacciones participan a su vez en una serie de reacciones de intercambio iónico que alteran la composición de las aguas subterráneas ^[5].

2.9 Procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas

Los procesos involucrados en las reacciones de transporte y transferencia de masa controlan la composición química de las aguas subterráneas ^[21]. De esta manera, pueden encontrarse procesos físicos tales como la advección, suspensión y dispersión; procesos biológicos que involucran reacciones asociadas con algunos

microorganismos; y procesos químicos que incluyen una serie de reacciones y fenómenos tales como disolución y precipitación, volatilización, sorción, reacciones ácido-base y de óxido-reducción, reacciones de formación de complejos, de hidrólisis e isotópicas.

De esta manera, la disolución y precipitación de sólidos son los procesos más importantes que involucran el transporte de solutos y controlan la composición química de las aguas subterráneas. Así, grandes cantidades de masas de agua pueden ser transferidas bajo algunas condiciones entre el agua y las fases sólidas minerales ^[21]. Con el aumento del tiempo de contacto del agua con el terreno, es posible disolver más sales hasta alcanzar los respectivos productos de solubilidad. Asimismo, el aumento de concentración permite disolver nuevas cantidades de sales a consecuencia del aumento de la fuerza iónica; en ocasiones pueden producirse precipitaciones a causa de la mezcla de aguas de distintas composiciones ^[5].

Por su parte, la volatilización es un proceso de evaporación que ocurre cuando los contaminantes están presentes en una fase líquida no acuosa o se encuentran disueltos en agua en contacto con una fase gaseosa. Esta situación, comúnmente surge con contaminantes orgánicos en las zonas saturadas y no saturadas ^[21].

En el mismo orden de ideas, las reacciones ácido-base, son importantes en el agua subterránea debido a su influencia en el pH y en el comportamiento químico de los iones. El pH es la principal variable que controla los sistemas químicos y es definida como el logaritmo negativo de la actividad de iones hidrógeno, $-\log [H^+]$. Asimismo, describe si una solución es ácida ($pH < 7$), neutra ($pH = 7$), o básica ($pH > 7$). En estas reacciones se transfieren protones de un ácido a una base ^[21].

Las reacciones de oxidación-reducción involucran la transferencia de electrones entre compuestos con más de un estado de oxidación. Cabe destacar que los

microorganismos encontrados en las aguas subterráneas usan este tipo de reacciones como fuente de energía ^[21]. Entre los posibles agentes oxidantes presentes en las aguas subterráneas están el O_2 tomado del aire, Fe^{3+} , SO_4^{2-} , NO_3^- y $Fe(OH)_3$; mientras que los agentes reductores pueden ser la materia orgánica, Fe^{2+} , S^{2-} , NH_4^+ y $Fe(OH)_2$, entre otros. Los fenómenos de oxidación-reducción pueden ser especialmente efectivos en la solubilización de sustancias al producirse cambios de oxidación ^[5].

Por otra parte, las reacciones de hidrólisis involucran la reacción de una molécula orgánica con el agua o con uno de sus componentes iónicos, tal como el ión HO^- ; mientras que, las reacciones isotópicas se utilizan con mucha frecuencia en el estudio de procesos químicos ocurridos en aguas subterráneas, usando como isótopos al ^{12}H o D , ^{18}O , ^{13}C y ^{34}S ^[21].

2.10 Parámetros fisicoquímicos comúnmente determinados en estudios de calidad de aguas subterráneas

Entre los parámetros fisicoquímicos de interés para estudios de calidad de aguas subterráneas se encuentran la temperatura, el pH, la conductividad eléctrica y el potencial de reducción.

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 estas aguas puede ser alterada por la cobertura vegetal, la infiltración de agua superficial y las variaciones de la temperatura en la superficie ^[1].

En ese sentido, las aguas subterráneas tienen una temperatura muy poco variable, esta responde a la media anual de las temperaturas atmosféricas del lugar, incrementando en el producto de la profundidad por el gradiente geotérmico ^[5].

Es importante que este parámetro sea medido en el campo lo antes posible para evitar calentamientos o enfriamientos. Además, es preciso asegurarse de que la muestra representa la temperatura del agua del acuífero y no la del interior de una captación, tubería o depósito ^[5].

pH

Como se mencionó en el apartado 2.9, este parámetro mide la acidez y basicidad de medios acuosos y se define como el logaritmo negativo de la actividad de los iones hidrógeno en una disolución ^[10]. Por lo general, el pH de las aguas subterráneas varía entre 6,5 y 8 unidades y más raramente entre 5,5 y 8,5. Las aguas con pH menor que 7 suelen ser agresivas, mientras que aquellas que tienen pH mayor que 9 crean dificultades en las plantas ^[5].

Conductividad eléctrica

La conductividad eléctrica es la capacidad que tiene un agua para conducir electricidad. Dicho parámetro crece con la temperatura, por lo que es preciso tomar una temperatura de referencia, que suele ser 25 °C.

La conductividad de las aguas crece 2% por cada grado centígrado que aumenta su temperatura; asimismo, crece con la concentración de iones disueltos. Cabe destacar que a una misma temperatura, en la conductividad de un agua no sólo influye la concentración iónica, sino el tipo de iones, carga iónica, estado de disociación y movilidad, entre otras ^[5].

Potencial de reducción

Este parámetro mide el potencial de reducción-oxidación de un medio dado, generalmente es expresado en mili voltios (mV); éste depende del pH, del oxígeno disuelto y de otras especies químicas con distintos estados de oxidación como el Fe y Mn ^[1].

El potencial de reducción es un parámetro útil para establecer 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 este parámetro están por debajo de cero debido al poco aporte de oxígeno atmosférico del ambiente subterráneo ^[1].

2.11 Normativa para la clasificación de las aguas en Venezuela

El Decreto Presidencial 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), establece la normativa para la clasificación y el control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos en nuestro país. Esta normativa tiene como objetivo controlar la calidad de los cuerpos de aguas, considerando sus usos actuales ^[22]. Asimismo, en dicho decreto se clasifican las aguas de la siguiente manera:

Agua tipo 1: son aguas destinadas al uso doméstico e industrial que requiera de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano o que entre en contacto con él. Este tipo de aguas se dividen en los siguientes subtipos:

- a) Subtipo 1A: desde el punto de vista sanitario, estas aguas pueden ser acondicionadas únicamente con el uso de desinfectantes.
- b) Subtipo 1B: corresponde a aquellas aguas que pueden ser acondicionadas por medio de tratamientos convencionales de coagulación, floculación,

sedimentación y cloración.

- c) Subtipo 1C: son aguas que pueden ser acondicionadas mediante procesos de potabilización no convencionales.

Agua tipo 2: son aguas destinadas a usos agropecuarios y se dividen en dos subtipos:

- a) Subtipo 2A: aguas para el riego de vegetales destinados al consumo humano.
- b) Subtipo 2B: aguas para el riego de cualquier otro tipo de cultivo y para uso pecuario.

Agua tipo 3: corresponden a aguas marinas o de medios costeros utilizadas para la cría y explotación de moluscos consumidos en crudo.

Agua tipo 4: son aguas destinadas a balnearios, deportes acuáticos, pesca deportiva, comercial y de subsistencia. Estas aguas se pueden dividir en dos subtipos:

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

Agua tipo 5: corresponden a usos industriales que no requieren de agua potable.

Agua tipo 6: son aguas utilizadas para la navegación y generación de energía.

Agua tipo 7: son aquellas aguas destinadas al transporte, dispersión y desdoblamiento de contaminantes sin que se produzca interferencia con el medio ambiente adyacente.

En el mismo orden de ideas, en dicha normativa se establecen los criterios para la clasificación de las aguas, así como los niveles de calidad exigibles de acuerdo con los usos a que se destinen ^[22]. De esta manera, en la siguiente tabla se muestran los intervalos de pH que deben tener las aguas de tipo 1A, 1B y 1C.

Tabla 2. Intervalo de pH de los subtipos de agua tipo 1 de acuerdo a lo establecido en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995)

Subtipo de agua	Intervalo de pH
1A	6,0 – 8,5
1B	6,0 – 8,5
1C	3,8 – 10,5

Además, en la siguiente tabla se presentan los límites de concentración de los elementos o compuestos en función del tipo de agua.

Tabla 3. Límites de concentración de distintas especies químicas que determinan la calidad de las aguas, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995)

Tipo o subtipo de agua	Especie química	Límite o intervalo máximo (mg/L)
1A	Cu	1,0
	Fe	1,0
	NO ₃	10,0
	Cl	600
	Ca ²⁺	200
1B	HCO ₃	370
	SO ₄ ²⁻	400
	Na ⁺	200
	K ⁺	20
	Mg ²⁺	70
	SDT	1500
2A	Ba	1,0
	Mn	0,5
	Cu	0,2
	Li	5,0
2B	Ni	0,5
	Fe	1,0
	Zn	5,0
	HCO ₃	370
	SO ₄ ²⁻	400
	Mg ²⁺	70
	SDT	3000

3. ANTECEDENTES

En esta sección se presenta una breve descripción de algunos trabajos de investigación relacionados con el área de la hidrogeoquímica de las aguas subterráneas, tanto a nivel nacional como internacional. Esto con la finalidad de alcanzar una mayor comprensión acerca de esta área del conocimiento y de visualizar la evolución y el estado actual de las investigaciones en hidrogeoquímica en cuencas similares a la escogida en este estudio.

3.1 Internacionales

Srivastava y Ramanathan (2007) ^[24] desarrollaron un proyecto de investigación que les permitió realizar una evaluación geoquímica de la calidad del agua subterránea y la posible contaminación en los alrededores del vertedero de Bhalswa, una de las zonas más urbanizadas de Delhi, India. Para ello, determinaron la composición química de las aguas subterráneas presentes en la región, en función de la medida de parámetros fisicoquímicos como conductividad eléctrica, temperatura, pH, sólidos disueltos totales (SDT), entre otros; así como de la concentración de las siguientes especies químicas: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , F^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , Fe, Mn, Cu, Pb, Ni, Zn y Cd. Esto con el objetivo de identificar la ocurrencia de los procesos geoquímicos que controlan la calidad del agua subterránea y de entender el impacto de los lixiviados de los vertederos sobre las mismas.

Mediante los resultados obtenidos, Srivastava y Ramanathan (2007) justificaron con interpretación estadística, que la alta contaminación del agua subterránea del área de estudio es debida al lixiviado de contaminantes provenientes del vertedero, así como que éstos presentan variaciones temporales y espaciales en la calidad del agua subterránea en los alrededores de Bhalswa. Finalmente, la mayoría de las muestras captadas presentaron alta conductividad, alta concentración de metales pesados y de

Cl^- , NO_3^- y otros cationes y aniones, indicando contribución antrópica.

Jiang et al. (2009) ^[25] estudiaron la calidad química del agua subterránea del sistema kárstico de los ríos subterráneos Nandong en Yunan, China, con el principal objetivo de determinar los factores naturales y antrópicos que afectan la calidad de estas aguas. Para ello colectaron 42 muestras en la zona de estudio, midieron los parámetros fisicoquímicos de conductividad eléctrica y pH, así como también determinaron la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- .

Los resultados obtenidos por estos autores mediante los diagramas de Piper reflejaron que el agua subterránea cambió extensamente del tipo bicarbonatadas cálcicas (Ca^{2+} - HCO_3^-) o bicarbonatadas cálcico-magnésicas (Ca^{2+} (Mg^{2+}) - HCO_3^-) al tipo cloruradas nitrosas cálcicas (Ca^{2+} - Cl^- (+ NO_3^-)) o cloruradas nitrosas cálcico-magnésicas (Ca^{2+} (Mg^{2+}) - Cl^- (+ NO_3^-)) y cloruradas nitrosas sulfatadas cálcicas (Ca^{2+} - Cl^- (+ NO_3^- + SO_4^{2-})) o cloruradas nitrosas sulfatadas cálcicas magnésicas (Ca (Mg)- Cl (+ NO_3^- + SO_4^{2-})), debido al incremento en las concentraciones de Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- , causadas por factores antrópicos tales como el uso de fertilizantes, descarga de aguas residuales y eliminación de residuos en el área. Asimismo, Jiang et al. (2009) a través del análisis de factores, indicaron que los iones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , Na^+ y K^+ resultaron provenir de fuentes relacionadas con actividades humanas; mientras que los iones Ca^{2+} y HCO_3^- , el pH y la conductividad eléctrica, son el producto fundamentalmente de las interacciones agua-roca en las zonas rocosas dominadas por carbonato de calcio, con poca contribución de factores antrópicos; por su parte, los iones Mg^{2+} y HCO_3^- también estuvieron presentes debido a la interacción agua- roca en zonas ricas en dolomitas.

Finalmente, los autores concluyeron que los procesos naturales y antrópicos controlan la calidad del agua subterránea del sistema kárstico de los ríos subterráneos Nandong.

Baghvand et al. (2010) ^[26] realizaron un estudio sobre la calidad del agua subterránea de un acuífero ubicado en el centro de Irán, adyacente al desierto de Kavir, a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT); así como mediante la determinación de la concentración de los cationes y aniones mayoritarios, a saber: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- . Para ello, estos autores captaron 20 muestras de aguas subterráneas, con el objetivo de analizar la calidad hidroquímica de las mismas y evaluar la aptitud de las aguas para diferentes usos.

En atención a los resultados obtenidos, Baghvand et al. (2010) precisaron mediante el diagrama de Piper que el tipo dominante de agua subterránea en el área de estudio es clorurada sulfatada sódica potásica ($\text{Na}^+ + \text{K}^+ - \text{Cl}^- + \text{SO}_4^{2-}$), el cual es totalmente diferente del tipo común de aguas dulces en Irán ($\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$). Asimismo, estos investigadores señalaron que de acuerdo al diagrama de Schoeller, la mayoría de las muestras de agua están ubicadas en las categorías de no apta, mala, bebida temporal y no aceptable para usos potables.

Por otra parte, Baghvand et al. (2010) concluyeron que la alta conductividad eléctrica y las elevadas concentraciones de Na^+ , K^+ y SO_4^{2-} en la periferia de la parte oeste del área de estudio, pueden ser justificadas por el bombeo ilegal de agua subterránea, lo que ha causado la degradación de la calidad de estos sistemas debido a la intrusión salina y al acercamiento de aguas connatas provenientes de acuíferos más profundos.

Jamshidzadeh y Mirbagheri (2010) ^[27] llevaron a cabo una investigación que les permitió evaluar cuantitativa y cualitativamente el agua subterránea de la cuenca de Kashan en Irán. Para el estudio de la calidad de las aguas subterráneas fueron analizadas 21 muestras de acuerdo a sus características fisicoquímicas tales como pH, dureza, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT); así como de la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-} .

Esto con el principal objetivo de realizar la caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas de la zona de estudio.

Con los resultados obtenidos, Jamshidzadeh y Mirbagheri (2010) pudieron determinar que un total del 80% de las muestras están contaminadas por intrusión salina proveniente del Lago Salado, al cual atribuyen la principal fuente de salinidad presente en la cuenca, de acuerdo con la relación iónica $\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$. Asimismo, mediante el diagrama de Piper determinaron que los cationes dominantes se encuentran en este orden: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; mientras que los aniones dominantes están en el orden $\text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$, indicando así que las facies hidroquímicas en la cuenca Kashan están dominadas por Na^+ y Cl^- , aunque el agua de algunas muestras fueron del tipo $\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^-$. Finalmente, estos investigadores concluyeron que el 47% de las muestras excedió el límite permisible del % Na^+ para propósitos de riego y que sólo el 10 % de las muestras están aptas para el consumo humano.

Devic et al. (2013) ^[28] realizaron un estudio de la calidad del agua subterránea en diez (10) áreas representativas de Serbia, con el objetivo de distinguir la influencia del impacto de procesos naturales y de la contribución antrópica en la composición del agua subterránea de esta región. Para ello, captaron 66 muestras a las que les determinaron la concentración de los cationes y aniones: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- ; así como de los elementos traza: As, Mn, Cu, Pb, Ni, Zn, Fe, Cd y Cr.

Los resultados obtenidos en esta investigación fueron analizados estadísticamente mediante cajas gráficas y gráficas de Whisker. De acuerdo a estos análisis, Devic et al. (2013) demostraron que el orden de la abundancia relativa de los cationes en las aguas subterráneas muestreadas fue $\text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{Na}^+ > \text{K}^+$; mientras que el de los aniones fue $\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{Cl}^- > \text{NO}_3^-$, lo que sugiere que estos iones en altas concentraciones hacen al agua no apta para organismos vivos y seres humanos. Igualmente determinaron que un 35 % de los pozos estudiados están siendo contaminados con Mn,

As y NO_3^- , indicando que la actividad antrópica es el principal factor que influye sobre la calidad del agua subterránea en Serbia. En el mismo orden de ideas, Devic et al. (2013) concluyen que las muestras analizadas contienen grandes cantidades de Mn, As, NO_3^- , Fe, Pb y Ni, perteneciendo a aguas de clase III/IV de acuerdo con el Reglamento de la Ley de Aguas de Serbia. Cabe destacar que las aguas de clase III/IV son de calidad inaceptable y requieren de un saneamiento urgente.

Zghibi et al. (2013) ^[29] desarrollaron un estudio que les permitió analizar hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas del acuífero Korba de la península de Cap-Bon al noreste de Túnez, a través de la determinación de la concentración de iones mayoritarios Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- , y de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT). Esto con el objetivo de explorar e identificar, mediante estudios estadísticos e hidrogeoquímicos, otras fuentes de salinidad en el acuífero más allá de la intrusión marina evidente.

Con los resultados obtenidos, Zghibi et al. (2013) lograron determinar, mediante el uso de los diagramas de Piper, la presencia de varias facies hidroquímicas tales como aguas del tipo cloruradas cálcicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$), cloruradas sódicas ($\text{Na}^+\text{-Cl}^-$) y sulfatadas mixtas. Asimismo, las aguas subterráneas mostraron rutas de evolución hidroquímica, desde el tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ al tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$ y luego al tipo $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$; así como desde el tipo $\text{Ca}^{2+} - \text{SO}_4^{2-}$ directamente hasta el tipo $\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$. Por otra parte, estos investigadores atribuyeron el incremento de los sólidos disueltos totales (SDT) a diferentes actividades humanas tales como la construcción de pozos sépticos, actividades agrícolas y el uso de agua salada para el riego.

Finalmente, Zghibi et al. (2013) en base a la investigación hidrogeoquímica, pudieron concluir que además de la intrusión marina, distintos procesos afectan la calidad del acuífero de Korba, entre los cuales están presentes el intercambio catiónico unido a la

intrusión marina, procesos de disolución asociados con intercambios catiónicos y la polución proveniente de actividades antrópicas, tales como el flujo de retorno del riego que contribuye con el incremento de la salinidad del agua subterránea.

Krishna kumar et al. (2014) ^[57] realizaron la evaluación hidrogeoquímica y de la calidad de las aguas subterráneas de un área la ciudad de Chennai, ubicada en el estado Tamil Nadu, India. Para llevar a cabo dicho estudio, captaron 24 muestras de agua, las cuales fueron caracterizadas fisicoquímicamente mediante la medición de los parámetros pH, conductividad eléctrica y sólidos disueltos totales (SDT); así como mediante la determinación de la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , CO_3^{2-} y dureza total.

Mediante los resultados obtenidos, Krishna kumar et al. (2014) pudieron determinar que las aguas estudiadas son dulces a salobres, y moderadamente altas en relación a la dureza. Cabe destacar que estos resultados fueron evaluados y comparados con los estándares de calidad de agua de la Organización Mundial de la Salud y del Cuerpo Nacional de Normativas de la India. Asimismo, mediante el diagrama de Piper estos investigadores identificaron dos tipos de aguas, a saber: cloruradas sódicas ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$) y cloruradas cálcicas magnésicas ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$); además, empleando los diagramas de Gibbs, pudieron señalar que la interacción agua-roca y la evaporación son los procesos que controlan la composición de las aguas subterráneas analizadas.

Finalmente, Krishna kumar et al. (2014) basándose en los resultados del Índice de Calidad del Agua (ICA), indicaron que la mayoría de las muestras pertenecen a la clasificación de aguas de excelente a buena calidad, y las mismas son aptas para usos potables.

Rajeshl et al. (2015) ^[58] desarrollaron un estudio que les permitió estimar las características hidroquímicas y la aptitud de las aguas subterráneas para fines domésticos y de riego en una parte del distrito de Nalgonda, ubicado en el estado de Telangana en el sur de la India. Para ello, colectaron muestras en 45 pozos cada dos meses desde marzo de 2008 hasta enero de 2010. Además midieron los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad eléctrica; asimismo, determinaron la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y CO_3^{2-} .

Los resultados obtenidos por estos autores indican que el orden de abundancia relativa de los cationes en las aguas subterráneas muestreadas fue $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$; mientras que el de los aniones fue $\text{HCO}_3^- > \text{Cl}^- > \text{SO}_4^{2-}$, identificando además la presencia de aguas tipo bicarbonatadas cálcicas ($\text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$), cloruradas sódicas ($\text{Na}^+ - \text{Cl}^-$), bicarbonatadas cálcicas sódicas ($\text{Ca}^{2+} - \text{Na}^+ - \text{HCO}_3^-$) y cloruradas cálcicas magnésicas ($\text{Ca}^{2+} - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$) mediante el uso del diagrama de Piper. Asimismo, estos autores indicaron que, de acuerdo a lo establecido en el Cuerpo Nacional de Normativas de la India, algunas muestras excedieron los límites permisibles de pH, sólidos disueltos totales (SDT), dureza total, Na^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y SO_4^{2-} . No obstante, las aguas subterráneas de la zona de estudio son dulces con salinidad media a alta, presentando baja alcalinidad.

Finalmente, Rajeshl et al. (2015) concluyeron que la calidad de las aguas subterráneas de la zona de estudio es adecuada para fines potables, así como para usos de irrigación en la mayor parte de la región a excepción de muy pocos lugares.

3.2 Nacionales

Bolívar (2004) ^[30] llevó a cabo la caracterización geoquímica de las aguas subterráneas de la región norcentral del Valle de Caracas. Para ello, captó 24 muestras de aguas subterráneas y 3 muestras de manantiales en la zona de estudio, donde además midió los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad eléctrica y potencial de reducción-oxidación (Eh); asimismo, determinó la concentración de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- .

De acuerdo a los resultados obtenidos, Bolívar (2004) indicó la presencia de cuatro (4) tipos de aguas subterráneas en la zona de estudio, a saber: bicarbonatadas y/o sulfatadas cálcicas (Ca^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}), ubicadas en las zonas de Chacao, La Floresta, Los Dos Caminos y Los Palos Grandes; bicarbonatadas y/o sulfatadas cálcicas y/o sódica y/o magnésica (Ca^{2+} - Na^+ - Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}), caracterizadas por una alta concentración de NO_3^- , hacia el sector de La Castellana y Los Palos Grandes; sulfatadas y/o bicarbonatadas cálcicas y/o sódicas (Ca^{2+} - Na^+ - HCO_3^- - SO_4^{2-}) presentes en los sectores Los Chaguaramos y Santa Mónica; y del tipo cloruradas y/o bicarbonatadas sódicas y/o cálcicas (Na^+ - Ca^{2+} - HCO_3^- - Cl^-), presentes en los sectores El Rosal y Chapellín. Asimismo, señaló que la composición química de estas aguas son consecuencia de los procesos de interacción agua-roca y el tiempo de residencia del agua, aunado al efecto de las actividades antrópicas urbanas que se han desarrollado en la región de estudio.

Faublack (2008) ^[31] caracterizó geoquímicamente 16 muestras de aguas subterráneas recolectadas en los sectores Barbacoas en el estado Aragua y Cachamas en el estado Guárico, con la finalidad de conocer los procesos que controlan la composición química de estas aguas. Para ello, midió los parámetros fisicoquímicos pH, potencial de reducción-oxidación, conductividad eléctrica y temperatura; así como también determinó la concentración de las especies mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- ,

NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2) y de los elementos traza Fe, Rb, Li, Sr, Cu, Ni, Zn, B y Ba. Con los resultados obtenidos, Faublack (2008) pudo establecer la existencia de dos tipos de agua en la zona de estudio, a saber: sulfatadas magnésicas (Mg^{2+} - SO_4^{2-}) y bicarbonatadas magnésicas (Mg^{2+} - HCO_3^-). Asimismo, indicó que el primero de estos dos grupos de aguas subterráneas corresponde a las muestras ubicadas en la Formación Mesa, cuya composición química está controlada por procesos de interacción agua-roca, que involucra la disolución de aluminosilicatos, carbonatos y el intercambio iónico; mientras que el segundo grupo está ubicado en la Formación Roblecito y su composición química está regida por el aporte atmosférico y el intercambio iónico.

Biondo y Esteves (2010) ^[32] realizaron un estudio hidrogeológico de las reservas de agua subterránea de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, con el objetivo de conocer la situación real del acuífero, puesto a que éste ha sido explotado de forma intensiva sin ninguna estrategia ni plan de manejo. Dicho estudio se basó en la elaboración de un corte geológico para establecer las zonas con mejor condición acuífera; así como en la realización del levantamiento geológico de las unidades litodémicas que limitan la cuenca, la elaboración de un mapa hidrogeológico de la zona, la determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero y de la variación de la superficie piezométrica a través de los años.

Los resultados obtenidos por Biondo y Esteves (2010) les permitieron establecer la existencia de dos tipos de acuífero en la zona de estudio; a saber: uno de régimen libre ubicado hacia el sur de la Laguna y el otro de régimen semiconfinado situado al noroeste. Asimismo, estos autores determinaron que la dirección de flujo de las aguas subterráneas es en sentido noroeste, siendo ésta la misma dirección en la que aumenta la permeabilidad. Además, calcularon que la reserva permanente del acuífero es de $237.755.925 \text{ m}^3$ de agua. Estos autores señalan de la existencia de una disminución de los niveles de agua entre los años 1986 y 2010, período en cual se verificó el aumento

de pozos productores debido al crecimiento de industrias y asentamientos campesinos en la zona que conllevaron a la sobreexplotación de los acuíferos asociados. Finalmente, concluyeron que un 57,14% de los pozos de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay son aptos para el uso doméstico, mientras que el 42,86% restante no lo son. Adicionalmente, a partir de los valores de conductividad, indicaron que todos los pozos son útiles para el riego por tener valores menores a 2.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Betancourt (2012) ^[33] realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de Santa Lucía ubicada en el estado Miranda, donde colectó 15 muestras en pozos de bombeo y 4 muestras en manantiales. Para llevar a cabo este estudio, esta autora midió los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad eléctrica; asimismo, determinó la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- , así como también la concentración de sílice disuelta (SiO_2) y de los metales traza Fe, Mn, Ba, Sr, Zn, Ni, Li y Cu. Esto con el objetivo de estudiar la calidad química y tipos de aguas subterráneas presentes en la zona de estudio.

En base a los resultados obtenidos, Betancourt (2012) señaló que mediante el diagrama de Piper pudo identificar cinco (5) tipos de aguas en la cuenca Santa Lucía, a saber: sulfatadas cálcicas (Ca^{2+} - SO_4^{2-}); bicarbonatadas cálcicas (Ca^{2+} - HCO_3^-); bicarbonatadas magnésicas (Mg^{2+} - HCO_3^-); sulfatadas magnésicas (Mg^{2+} - SO_4^{2-}) y cloruradas sódicas (Na^+ - Cl^-), siendo mayoritarias las aguas del tipo sulfatadas cálcicas (Ca^{2+} - SO_4^{2-}). Asimismo, indicó que los principales procesos que gobiernan la composición química de estas aguas 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.

Finalmente, Betancourt (2012) clasificó las aguas de la zona de estudio como tipo 1 y 2, donde el 63% de las muestras no son aptas para uso doméstico, señalando que su uso es para fines agropecuarios, de acuerdo a lo establecido en el Decreto 883 (Gaceta

Oficial N° 5.021, 1995).

Toro (2012) ^[34] caracterizó hidrogeoquímicamente 22 muestras de aguas subterráneas y 3 muestras de aguas superficiales pertenecientes a la región sur oriental de la Isla de Margarita, con el objetivo general de determinar los factores que controlan la calidad química y tipos de aguas subterráneas presentes en la referida región. Para cumplir con este objetivo, esta autora midió los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad eléctrica; así como también determinó las concentraciones de las especies mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y NO_3^- ; y de sílice disuelta (SiO_2) en las muestras captadas.

Con los resultados obtenidos mediante el diagrama de Piper, Toro (2012) pudo identificar cuatro (4) tipos de agua en la zona de estudio: bicarbonatadas magnésicas (Mg^{2+} - HCO_3^-), cloruradas magnésicas (Mg^{2+} - Cl^-), cloruradas sódicas (Na^+ - Cl^-) y bicarbonatadas sódicas (Na^+ - HCO_3^-). Asimismo, de acuerdo a la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) que presentaron las muestras y atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), esta autora encontró que el 68% de las muestras pertenecen a la clase 4 o aceptable; mientras que el porcentaje restante, pertenecen a las tres primeras clases: excelente, muy buena y buena.

Finalmente, Toro (2012) concluyó que en las aguas analizadas existe un proceso de evolución hidrogeoquímica caracterizado por el enriquecimiento de Na^+ y Cl^- , que obedece a factores como disolución de sales, influencia de intrusión marina, e intercambio iónico.

González (2013) ^[35] caracterizó químicamente algunos afluentes que drenan al humedal costero Laguna de Tacarigua en el estado Miranda, con el propósito de estudiar la calidad química y microbiológica de estas aguas; además de conocer los procesos que controlan la composición de los cuerpos de aguas superficiales

muestreados. Con la finalidad de cumplir estos objetivos, esta autora midió los parámetros fisicoquímicos conductividad eléctrica, temperatura y pH; asimismo, determinó la concentración de los iones mayoritarios Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- ; y de los elementos traza Al, B, Ba, Fe, Li, Mn, Ni y Sr.

González (2013) interpretó los resultados obtenidos empleando algunas herramientas entre las que destacan las cajas gráficas, el diagrama de Piper y las relaciones iónicas. De esta manera, pudo identificar cinco (5) tipos de agua en las once (11) muestras analizadas, a saber: bicarbonatadas sódicas cálcicas ($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{HCO}_3^-$) en un 63% de la población total de las muestras, bicarbonatadas sódicas magnésicas ($\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{HCO}_3^-$), cloruradas sódicas potásicas ($\text{Na}^+ - \text{K}^+ - \text{Cl}^-$), cloruradas sódicas cálcicas ($\text{Na}^+ - \text{Ca}^{2+} - \text{Cl}^-$) y finalmente el agua tipo cloruradas sódicas magnésicas ($\text{Na}^+ - \text{Mg}^{2+} - \text{Cl}^-$). Por otra parte, esta autora infirió que las principales fuentes de origen de estas especies se asocian a la intrusión marina, el uso de aerosoles marinos y la actividad antrópica realizada en zonas aledañas a los afluentes estudiados.

En relación al análisis microbiológico, González (2013) indicó que todas las muestras captadas en los afluentes de la Laguna de Tacarigua presentan contaminación fecal, tanto humana como animal de vieja data y de acuerdo a la normativa internacional (EPA) no pueden considerarse de calidad para ser usadas como protección de comunidades hidrobiológicas, recreación de contacto total, riego de hortalizas, entre otros usos. Además, de acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995). Esta autora clasificó el 36% de las muestras captadas como aguas tipo 1 o de excelente calidad, mientras que el 64% restantes de las muestras las clasificó como aguas de tipo 4 o aceptables.

4. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

En esta sección se presentan los rasgos más resaltantes de la zona de estudio, que incluyen su ubicación geográfica, clima, vegetación, suelos, hidrología, geología y las principales actividades antrópicas que allí se practican.

Ubicación geográfica

El área de estudio está localizada en el estado Aragua, al centro norte de Venezuela, entre las coordenadas U.T.M. norte 1.120.646 - 1.127.149 y este 666.777 - 670.813, en la zona sur-oriental del Lago de Valencia, específicamente en la ciudad de Cagua. Esta zona que pertenece al Municipio Sucre, ocupa un área aproximada de 26 km². La figura 5 muestra la ubicación geográfica relativa de la zona de estudio.

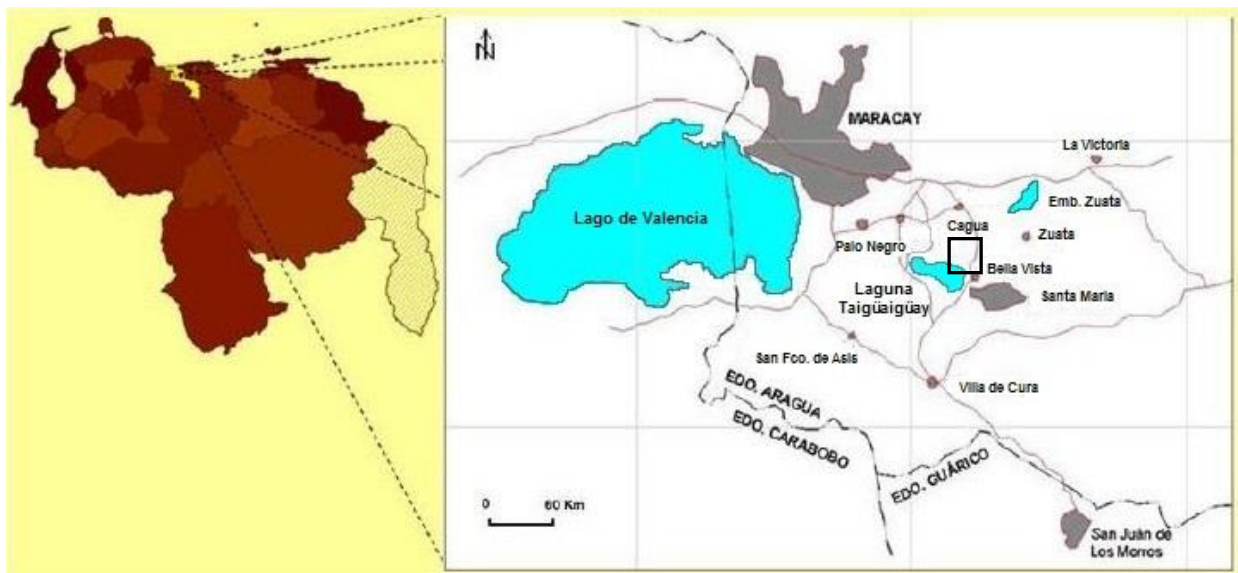


Figura 5. Ubicación relativa de la zona de estudio [36]

La principal vía de acceso al área de estudio es la carretera nacional que une las

poblaciones de Cagua – San Juan de los Morros; específicamente en La Encrucijada, se toma el desvío hacia Santa Cruz y Bella Vista, que conduce a la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay ^[32].

Clima

La descripción del clima de la Laguna de Taigüaigüay está basada en los datos climatológicos de precipitación, temperatura y evaporación, correspondientes al período comprendido entre 1971 y 1991 en la estación Santa Cruz Edafológica y en la estación El Cortijo. La estación Santa Cruz Edafológica se ubica al norte de la zona de estudio, con coordenadas geográficas de 10°10'00" N y 67°29'15" W y la estación el Cortijo se encuentra al sur y sus coordenadas son 10°04'53" N y 67°25'05" W. ^[4]

La cuenca de la Laguna de Taigüaigüay presenta una precipitación distribuida en dos períodos bien marcados, uno de lluvia que abarca desde el mes de abril hasta el mes de noviembre, con agosto como el mes de mayor precipitación con un máximo de 160 mm; y otro de sequía que comienza en diciembre y finaliza en marzo, en el que se registran los valores más bajos de sequía entre los meses de enero y febrero ^[32].

Por otra parte, la diferencia entre las altitudes de la estación Santa Cruz Edafológica y la estación El Cortijo, genera una variación de sus temperaturas, por lo que ambas estaciones presentan una diferencia de 1,0 °C a 1,5 °C entre las dos curvas mostradas en la Figura 6. De esta manera, en la primera estación se alcanza una temperatura máxima de 27,3 °C y una temperatura mínima de 24,0 °C; mientras que en la segunda estación la máxima temperatura es de 26,7 °C y la mínima es de 25,3 °C. La siguiente figura permite observar las variaciones de temperatura en ambas estaciones ^[32].

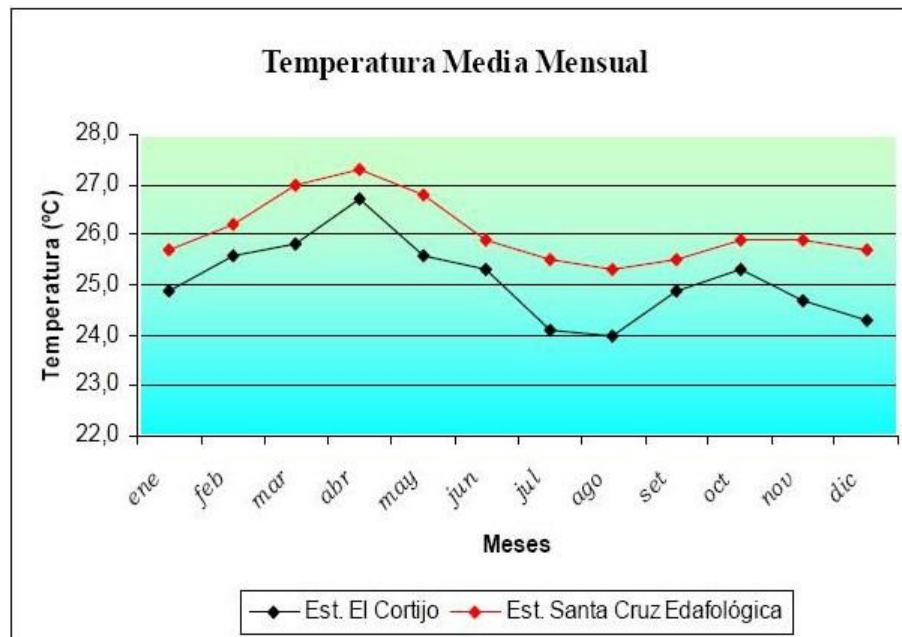


Figura 6. Precipitación media mensual, período 1971 – 1991 ^[32]

Vegetación

La vegetación de la cuenca está determinada en gran parte por los cambios de humedad, como producto de la existencia de una gran extensión de bosques a lo largo de las serranías. A menores altitudes, donde la humedad es más restringida, se desarrollan bosques semidecíduos, deciduos, matorrales y espinares de sabana ^[32].

Además, existen bosques secos premontanos, bosques secos tropicales, bosques muy secos tropicales y bosques montanos. En la zona de transición entre los bosques muy secos y el piso tropical alrededor de la laguna, se presentan dos tipos de vegetación: el primero es la llanura lacustre, en la que se encuentran árboles como Camoruco, Bucare, Ceiba y Samán; y el segundo, está compuesto por especies típicas como Cardones, Cujíes e Indio Desnudo ^[37].

Suelos

El bosque seco premontano presenta una variedad de paisajes, abarcando algunos de los suelos más productivos; asimismo en la zona de transición entre los bosques muy secos y el piso tropical, existen suelos fértiles debido al alto nivel freático. Por su parte, el área de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay comprende tierras agropecuarias, residenciales e industriales, con áreas deforestadas para cultivos, ganadería, urbanizaciones, barrios y zonas industriales, ocupando la zona de piedemonte de ambas serranías y la llanura y valles alrededor de la laguna ^[37].

Hidrología

La cuenca de la Laguna de Taigüaigüay presenta un patrón dendrítico de escurrimiento cerrado, con una dirección de corriente orientada de manera convergente hacia la Laguna, a través de los diferentes ríos y quebradas presentes en la cuenca. La densidad de drenaje es alta en la zona sur de la laguna, específicamente en el sector Villa de Cura, en los cerros Guayabal y Ojo de Agua hacia el oeste, y en la fila Tamarindo al este, debido a que estas zonas representan altos topográficos. Mientras que al norte, la densidad de drenaje es muy baja a causa de que se encuentra sobre la terraza de inundación enmarcada en los bajos topográficos. De igual manera, existen drenajes dendríticos subparalelos en algunas zonas, como el sur de la Fila Tamarindo, conformados por las vertientes que descienden de las montañas y se conectan perpendicularmente a los ríos Turmero y Aragua ^[36]. En la Figura 7 se pueden observar los patrones de drenaje pertenecientes a la zona de estudio ^[32].

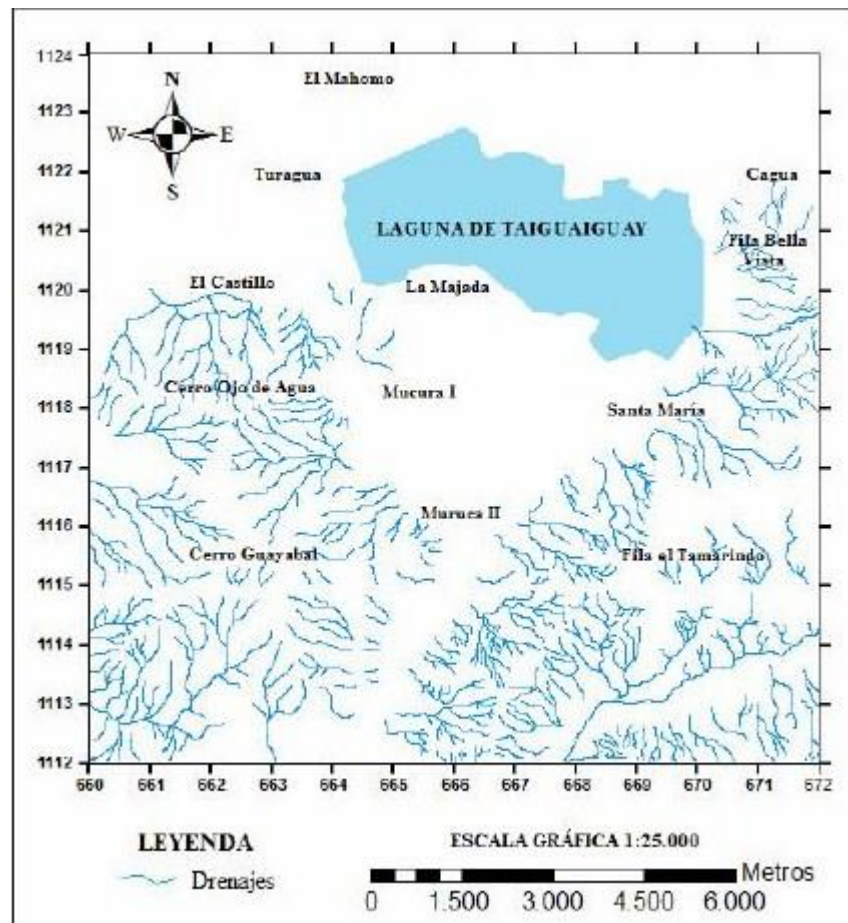


Figura 7. Patrón de drenajes de la zona de estudio ^[32]

Los principales afluentes que aportan agua a la cuenca de la Laguna de Taiguaigüay son el río Turmero, el río Aragua, el río Las Minas, Caño de Aparo y la quebrada Tomborón ^[4].

El río Turmero está ubicado al noreste de la cuenca del Lago de Valencia, tiene una longitud aproximada de 41 km, drenando un área de 360 km² y se origina al norte de la ciudad de Turmero por los aportes del río Guayabita y el río Paya, siendo su principal

afluente el río Guayabita. El sector Polvorín posee una captación para consumo doméstico, cuyas aguas son utilizadas con fines recreacionales y agrícolas ^[37].

Por su parte, el río Aragua se forma por la confluencia de la quebrada Macanillal y del río San Carlos. La dirección del recorrido es este – oeste a partir de La Victoria, con una longitud de 58 km y un área de drenaje de 360 km². Este río es el más grande y caudaloso de la cuenca, por lo que sus aguas son desviadas en el Dique La Curia, mediante un canal aductor para alimentar el embalse de Zuata y en el Dique Aragua, donde se une al río Turmero. De esta manera, la laguna de Taigüaigüay es alimentada a través del canal aductor Turmero – Aragua, siendo el riego el uso principal de estos ríos ^[37].

Durante la temporada de lluvia, el excedente continúa por el cauce natural del río Aragua hasta llegar al Lago de Valencia; mientras que en la época de sequía, únicamente las aguas servidas vertidas aguas abajo del dique, son las que llegan al Lago ^[37].

También están presentes drenajes de menor envergadura; no obstante, constituyen un importante aporte de agua a la laguna de Taigüaigüay, estos son: el río Las Minas al sur, con una orientación norte-sur; el río Largo ubicado al oeste, con una orientación este-oeste, la quebrada El Burro localizada al este con una orientación este-oeste; y la quebrada Tamborón y el caño Maraca, con orientaciones N45°E y N60°E respectivamente ^[32].

Geología local

La cuenca de la Laguna de Taigüaigüay está constituida por capas de sedimentos permeables, semipermeables e impermeables de composición mineralógica heterogénea, como consecuencia de las principales unidades litológicas presentes en la

zona. Las capas permeables están compuestas por gravas y arenas granodecrecientes de base a tope (desde muy finas a muy gruesas), características de ambientes aluviales. Sus posiciones verticales varían en espesor y extensión, con cotas comprendidas entre los 530 m y 545 m de altitud, de litología favorable en cuanto a la acumulación y la extracción del agua subterránea, lo cual ha permitido la concentración de los pozos de producción en esta zona ^[38].

Los afloramientos presentes a lo largo de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, están en contacto con el aluvión. Las unidades presentes en la zona de estudio están compuestas principalmente por rocas metamórficas, de acuerdo a Urbani (1999) ^[39] corresponden a la Filita de Tucutunemo, la Filita de Paracotos, la Metalava de Los Naranjos y el Complejo El Tinaco. A continuación se describen brevemente estas unidades.

Filita de Tucutunemo

Esta unidad consiste principalmente en filitas carbonáceas arenosas que varían a meta areniscas y limolitas cuarzo feldespáticas, encontrándose también cantidades menores de areniscas de grano grueso (asperones) y conglomerados cuarzo - calcáreos. Asimismo, existen zonas discontinuas de caliza negra, de grano fino, asociadas a un conglomerado calcáreo ^[40]. Por su parte, González de Juana et al. (1980) ^[41] describen la presencia de mármoles e indican la existencia de elementos volcánicos que se producen hacia la base de esta formación.

De acuerdo con González (1972) ^[42], la Formación Tucutunemo se extiende de este a oeste, desde la región de Los Teques - Cúa en el estado Miranda, hasta la región Tinaquillo en el estado Cojedes, atravesando parte de los estados Aragua y Guárico.

Filita de Paracotos

Esta unidad presenta una asociación de filita, mármol, metaconglomerado con metalimolita y metarenisca en menor proporción. La filita constituye el 60 % de la formación, siendo limosa y carbonosa, con ocasionales peñones de rocas metavolcánicas y metasedimentarias de hasta 20 cm de diámetro ^[40].

Metalava de Los Naranjos

La metalava de Los Naranjos se extiende por los estados Aragua, Miranda y Cojedes norcentral. La litología dominante de esta unidad es una metalava maciza que disminuye hacia el oeste, desde un espesor aproximado de 1.200 m en la localidad tipo hasta unos 200 m ^[40].

Complejo El Tinaco

Este complejo está conformado por una variedad de rocas sedimentarias metamorfizadas y muy plegadas expuestas entre Tinaquillo, San Carlos y El Pao, estado Cojedes. Además, describen la existencia de rocas de basamento, la cuales son posibles equivalentes de los gneises de Peña de Mora y Sabastopol y de rocas similares expuestas al oeste de la Laguna de Taigüaigüay. ^[40]

Hidrogeología

Biondo y Esteves (2010) ^[32] indican que la litología de la Laguna de Taigüaigüay está compuesta por capas permeables, semipermeables e impermeables, con la existencia de una mayor cantidad de material fino de tamaño de granos arcilla hacia el noreste, indicando una zona impermeable en el sector de Cagua. Mientras que al noroeste, en

los sectores de El Castillo y Turagua se presentan sedimentos gruesos de tamaño de granos de arena en forma granodecreciente de base a tope y grava que evidencian una mayor permeabilidad.

Por su parte, Alvarado (1989) ^[38] indica que en la cuenca del Lago de Valencia se ha producido una inversión del flujo subterráneo debido a la sobreexplotación de las aguas subterráneas, penetrando el agua de este hacia el acuífero, generando su contaminación. Asimismo, se presenta un flujo vertical de acuíferos profundos produciendo aguas no aptas para el riego ni para consumo humano.

5. METODOLOGÍA

La metodología experimental de la presente investigación se encuentra dividida en tres etapas, a saber: pre-campo, donde se realizó la búsqueda de información acerca de los principales aspectos teóricos relacionados con el área de la hidrogeoquímica, que incluye también la preparación del material usado en la recolección de muestras. La etapa de campo, que consistió en la captación de las muestras en el área de estudio y en la medición in situ de los parámetros fisicoquímicos; y finalmente, la etapa post-campo que se basó en la generación de los datos a partir de la determinación de distintas especies químicas de interés en este estudio, para posteriormente realizar la interpretación de los resultados.

5.1 Etapa de pre-campo

Esta etapa consistió en la revisión bibliográfica acerca de los diversos estudios realizados en el área de la hidrogeoquímica, así como en la elaboración del marco teórico, que dio soporte a la interpretación de los resultados obtenidos. De igual manera, dicha etapa se basó en la búsqueda de información descriptiva de la zona de estudio y de sus vías de acceso; así como también en la elaboración de un plan de muestreo que contempló la ubicación de los pozos existentes en la zona de estudio, donde finalmente se seleccionaron 26 de ellos. Para ello, se solicitó información mediante la comunicación directa con empresas, dueños de pozos de pequeñas fincas, encargados de pozos rurales y otras entidades de los conjuntos residenciales de la localidad estudiada.

Adicionalmente, esta etapa comprendió la preparación del material donde fueron almacenadas las muestras. Para ello, se destinaron la mitad de los envases de polietileno de 1 L de capacidad, a la recolección de muestras para la determinación de cationes y sílice disuelta. Estos recipientes fueron lavados con HNO_3 marca Sigma-

Aldrich al 10 % (v/v) a temperatura ambiente, por un lapso de 24 horas para evitar la adsorción de cationes y metales en las paredes de los mismos. Luego, estos envases se lavaron con abundante agua destilada y desionizada con el propósito de eliminar posibles impurezas presentes ^[43]. Por su parte, la otra mitad de los envases destinados a la recolección de muestras para la determinación de aniones y alcalinidad, fueron lavados únicamente con abundante agua destilada y posteriormente con agua desionizada, para evitar la presencia de impurezas en estos recipientes al momento de la recolección de las muestras.

Todos los envases fueron etiquetados indicando la localidad del pozo muestreado y el número de muestra. La Figura 8 describe de forma esquemática la metodología seguida en esta etapa.

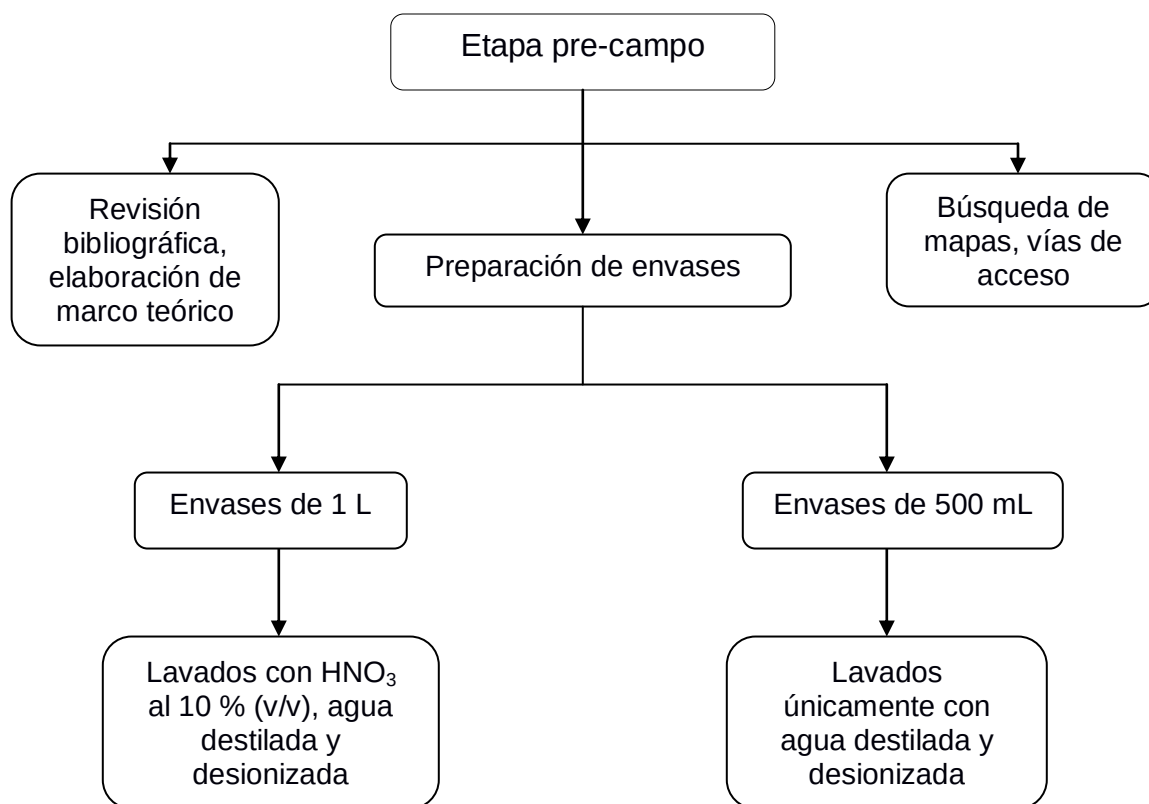


Figura 8. Esquema de la etapa de pre-campo

5.2 Etapa de campo

El muestreo fue realizado para el Proyecto número 2012000920 financiado por parte del Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación (FONACIT), coordinado por el Prof. Ramón Montero. Este se realizó en un período de tres (3) días, entre el 4 y 6 de agosto de 2014 y consistió en el traslado hacia la zona de estudio, donde se realizó la captación de 25 muestras de agua subterránea y 1 muestra de agua superficial específicamente proveniente de la Laguna de Taigüaigüay. Simultáneamente, se midieron los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura y conductividad eléctrica, empleando para ello un pHmetro portátil marca Orion, modelo 250 A, provisto de un electrodo de vidrio, el cual fue calibrado con soluciones amortiguadoras de pH 4, 7 y 10. Es importante destacar que la medición de estos parámetros se realizó en campo, para evitar que pequeños cambios en las condiciones ambientales pudieran producir importantes variaciones de sus valores ^[5]. En la Figura 9 se presenta la distribución de los pozos muestreados en la zona de estudio, mientras que en el Apéndice A se presenta un resumen de la ubicación geográfica, profundidad del pozo y parámetros fisicoquímicos medidos en cada una de las muestras de agua colectadas.

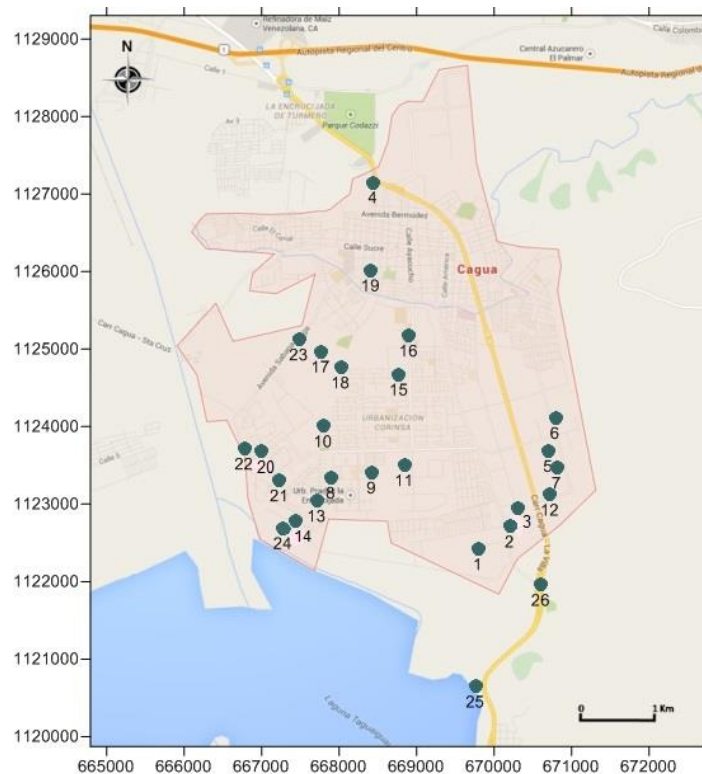


Figura 9. Puntos de muestreo de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay

Previo a la captación definitiva de las muestras, se procedió a dejar abierta la llave de salida de agua durante cinco minutos aproximadamente, con la finalidad de desalojar el agua residual estancada presente en las tuberías de los pozos.

La escogencia de los pozos estuvo basada en cubrir el área norte de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, de manera de complementar el estudio realizado por Kutos (2012), quién evaluó la zona sur de la laguna. En este sentido, se escogieron pozos cercanos a la laguna y en áreas intermedias de la zona de estudio, cuidando que su distribución espacial fuese lo más homogénea posible.

Por su parte, las muestras de agua destinadas a la determinación de cationes y sílice disuelta (SiO_2) fueron colectadas en los envases de polietileno de 1 L. Es importante

señalar que previo a la captación definitiva de la muestra de agua, los envases de polietileno fueron curados con el agua colectada. Estas muestras fueron filtradas empleando un filtro de membrana, cuyo tamaño de poro es de $0,45\ \mu\text{m}$ con la finalidad de eliminar los sólidos suspendidos; posteriormente, se preservaron usando 2 mL de HNO_3 concentrado bidestilado marca Sigma-Aldrich, con la finalidad de garantizar un pH menor a 2, para evitar la sorción de las especies de interés en las paredes de los envases.

Las muestras destinadas a la determinación de aniones y alcalinidad, fueron colectadas en los envases de polietileno de 500 mL que sólo se lavaron con agua destilada y desionizada. De igual forma, estos recipientes fueron curados con las aguas subterráneas captadas en cada punto de muestreo. Posteriormente, estas muestras se preservaron a una temperatura no mayor a $5\ ^\circ\text{C}$ con la finalidad de evitar la formación de NO_3^- biológico y la pérdida de CO_2 ^[43]. Una vez que las muestras fueron colectadas, se preservaron a una temperatura aproximada de $5\ ^\circ\text{C}$, para su traslado hasta el laboratorio en donde se realizaron los análisis respectivos. La Figura 10 resume el esquema de trabajo desarrollado en la etapa de campo de la presente investigación.

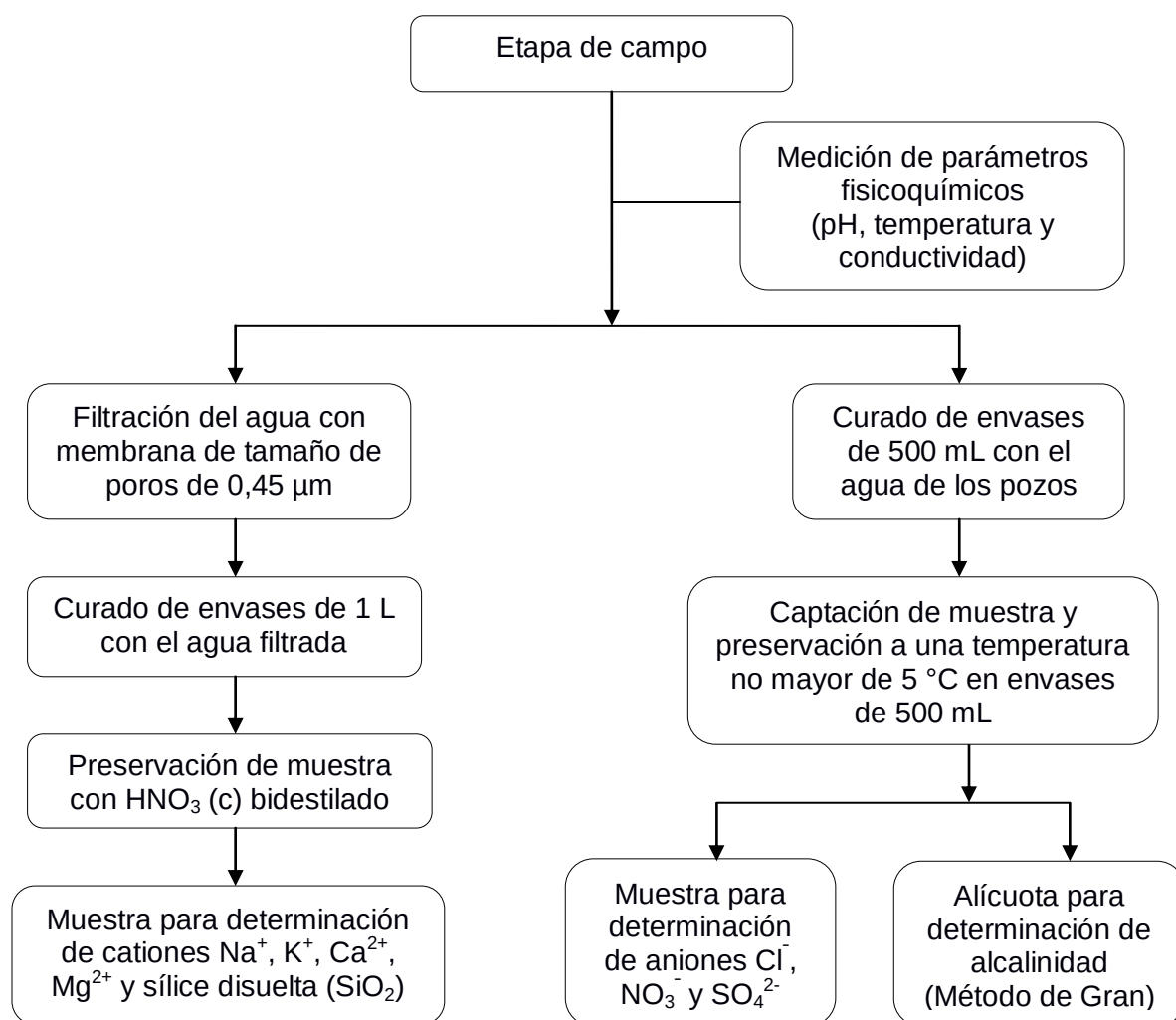


Figura 10. Esquema de la etapa de campo

5.3 Etapa de post-campo

Esta etapa consistió en la determinación de las especies químicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2), presentes en las muestras de aguas que fueron captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, atendiendo a las metodologías y técnicas analíticas que serán descritas a continuación.

Determinación de cationes

La determinación de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} se realizó empleando las técnicas de espectrometría de emisión atómica (Na^+ y K^+) y espectrometría de absorción atómica (Ca^{2+} y Mg^{2+}) con llama, mediante el uso de un espectrofotómetro marca Perkin Elmer modelo AAnalyst 200 (Figura 11). Las concentraciones de estas especies se determinaron mediante la obtención de curvas de calibración, utilizando patrones multielementales de concentraciones conocidas, que fueron preparados previamente. Las curvas de calibración para cada uno de los elementos analizados pueden ser observadas en el Apéndice F.

Asimismo, la descripción general de las condiciones experimentales para la determinación de dichos elementos y las especificaciones de los reactivos usados se presentan en el Apéndice C.



Figura 11. Equipo de emisión y absorción atómica AAAnalyst 200

Determinación de aniones

La determinación de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- se realizó mediante la técnica de cromatografía iónica, empleando un cromatógrafo iónico marca Dionex, modelo ICS-2100 (Figura 12), en el cual se utilizó como fase móvil una solución de Na_2CO_3 1,8 mmol/ NaHCO_3 1,7 mmol. De igual forma, la concentración de estas especies químicas se determinó a través de curvas de calibración, utilizando patrones multielementales de concentraciones conocidas, que fueron previamente preparados.

Las curvas de calibración utilizadas para la determinación de cada uno de los aniones se pueden observar en el Apéndice F. Mientras que, la descripción general de las condiciones experimentales para la determinación de la concentración de dichas especies y las especificaciones de los reactivos empleados en ella, pueden ser observadas en el Apéndice C.



Figura 12. Equipo de cromatografía iónica marca Dionex, ICS-2100

Determinación de la alcalinidad

La alcalinidad se determinó mediante el método de Gran (1952) ^[44], el cual consiste en realizar una titulación potenciométrica, en la que se determina el volumen equivalente al graficar el volumen del titulante V en función de la ecuación de Gran, $(V + v) 10^{-pH}$, donde v es el volumen de la alícuota de la muestra. De esta forma se obtiene una función, en la cual al realizar la extrapolación hasta el valor cero de la función de Gran (1952), se obtiene el volumen del punto final de la titulación, indicando que en ese punto comienza un aumento de los iones hidronios libres y por consiguiente, las especies alcalinas han pasado a su forma ácida ^[31].

Para llevar a cabo esta titulación, una alícuota de la muestra fue valorada con una solución de H_2SO_4 0,02 M marca Riedel-de Haen, previamente estandarizada con un estándar primario, como Na_2CO_3 marca AnalaR. Esta titulación se realizó empleando una bureta graduada, de 10 mL de capacidad, y un pHmetro portátil marca Orion,

modelo 250 A.

Una vez realizada la titulación, se procedió a conocer el valor del punto final (Apéndice D) y se calcularon los valores de alcalinidad en cada una de las muestras captadas, mediante el empleo de la siguiente ecuación:

$$C_{\text{HCO}_3^-} = \frac{\text{Volumen de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mL)} * \text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mol/L)} * 1000 * \text{PA HCO}_3^-}{\text{Volumen total (mL)}}$$

Cabe destacar que los resultados obtenidos fueron reportados en mg/L de HCO_3^- , los cuales se muestran en la Tabla B.2 del Apéndice B.

Determinación de sílice disuelta

La determinación de sílice disuelta (SiO_2) se llevó a cabo mediante la técnica fotolorimétrica aplicando el método de Azul de Molibdato ^[43]. Para ello, se utilizó un espectrofotómetro de absorción molecular, Spectronic 20, marca Bausch & Lomb (Figura 13). El método de Azul de Molibdato consistió en la formación del complejo azul silicomolibdato en cada una de las muestras captadas. Se determinó la absorbancia de las mismas, con la finalidad de cuantificar la concentración de SiO_2 , la cual se realizó a través de una curva de calibración elaborada mediante la preparación de patrones de concentraciones conocidas, a partir de una solución madre de 1000 mg/L de Si.

La curva de calibración empleada en la determinación de sílice disuelta (SiO_2) se muestra en el Apéndice F; mientras que, la descripción del método utilizado se presenta en el Apéndice E.



Figura 13. Espectrofotómetro de absorción molecular Spectronic 20 Bausch & Lomb

La figura 14 esquematiza la metodología llevada a cabo en la etapa post-campo.

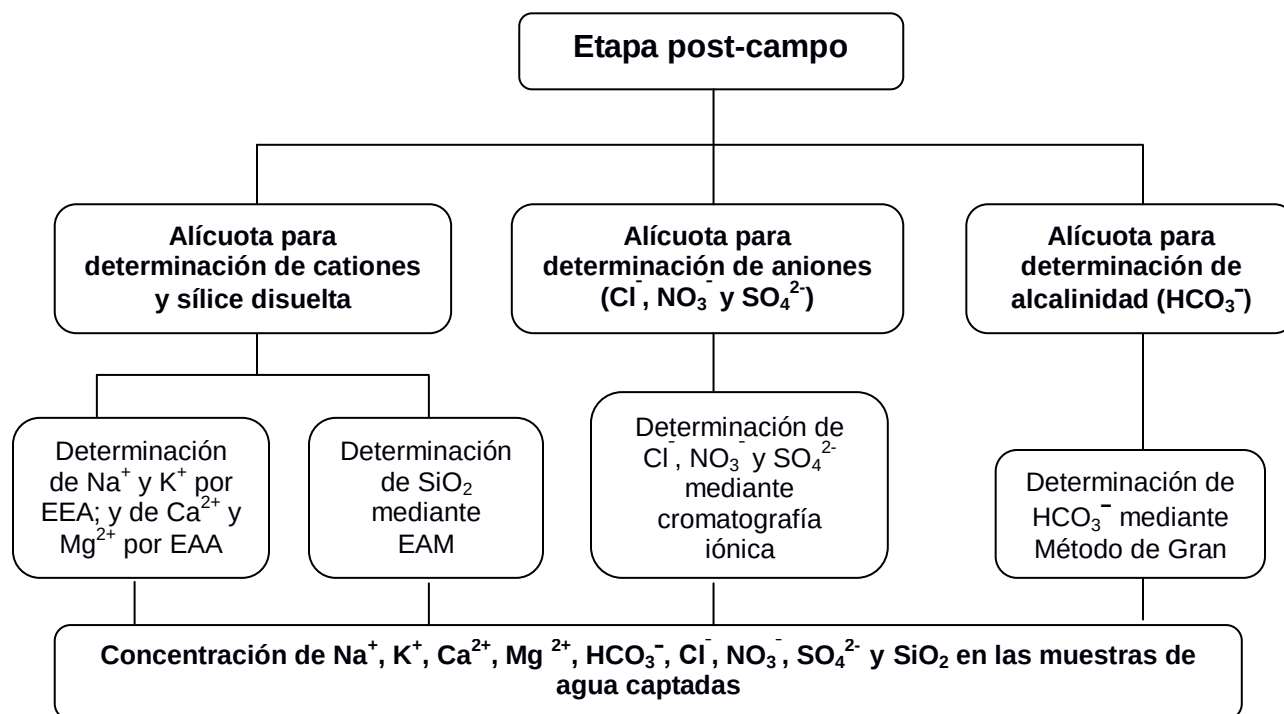


Figura 14. Esquema de la metodología empleada en el presente estudio

6. PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

A continuación son presentados y discutidos los resultados obtenidos a partir de las mediciones de los parámetros fisicoquímicos realizadas en la salida de campo; así como, de la determinación de la concentración de las especies químicas de interés llevadas a cabo durante la etapa de post-campo. Esto con la finalidad de evaluar la calidad química en las veintiséis (26) muestras de agua colectadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay (apéndice A y apéndice B).

Con la finalidad de facilitar la interpretación de los datos obtenidos, esta sección fue estructurada de la siguiente forma: un primer apartado que indica la precisión de los análisis y los límites de detección; seguido de la validación de los resultados. Posteriormente, se hace referencia a la caracterización química de las muestras de agua captadas, con el apoyo de la interpretación de las cajas gráficas generadas con el programa Statistica 10 y de los mapas de distribución elaborados con el programa Surfer 10.

Seguidamente, se presenta la clasificación de las aguas mediante el uso del diagrama de Piper, procesado por el programa Rockworks 16. Asimismo fueron realizados distintos gráficos de correlaciones inter-elementales y diagramas de Gibbs, con la finalidad de conocer los factores y procesos que influyen en la composición química de las aguas estudiadas.

Finalmente, se estudió la calidad química del agua en las muestras captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, a fin de conocer si éstas son aptas para el consumo humano y para el riego, entre otros usos asociados, atendiendo a la normativa para la clasificación y control de la calidad de cuerpos de agua contenida en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

6.1 Precisión de los análisis y límites de detección

A fin de conocer la precisión de los métodos analíticos empleados en las determinaciones y en las mediciones de los parámetros fisicoquímicos realizadas en la etapa de campo, en la tabla 4 se presentan los parámetros estadísticos obtenidos para tres (3) réplicas de la muestra MASSLV-05, captada en el sector Las Vegas de la zona de estudio. Las ecuaciones empleadas en el cálculo de los parámetros estadísticos se muestran en el apéndice F.

Tabla 4. Parámetros estadísticos obtenidos para tres (3) réplicas de la muestra MASSLV-05

Parámetro	X (mg/L)	S (mg/L)	% Sr	CV	LD	LC
pH	6,97	0,03	1	0,4	-	0,07
T (°C)	28,2	0,2	1	0,7	-	0,5
Conductividad (μS/cm)	1518	9	1	0,6	-	22
Na ⁺ (mg/L)	68	1	3	1	0,5	2
K ⁺ (mg/L)	1,12	0,05	9	4	0,2	0,12
Ca ²⁺ (mg/L)	123	2	3	2	0,5	5
Mg ²⁺ (mg/L)	39,0	0,2	1	0,5	0,2	0,5
Cl ⁻ (mg/L)	245	1	1	0,4	2	2
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	115,8	0,6	1	0,5	2	1,5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	4,5	0,2	9	4	2	0,5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	226	7	6	3	-	17
SiO ₂ (mg/L)	17,9	0,4	4	2	0,1	1,0
SDT (mg/L)	815	7	2	1	-	17

Nótese que los valores del coeficiente de variación (CV) se encuentran por debajo del

5%, indicando un bajo grado de variabilidad en cada una de las determinaciones realizadas en el presente estudio, lo que además aporta confiabilidad a los resultados obtenidos.

6.2 Validación de los resultados

El proceso de validación de los resultados se llevó a cabo con la finalidad de corroborar la confiabilidad de los datos obtenidos, mediante las mediciones realizadas en campo y las determinaciones desarrolladas en el laboratorio. Para ello se aplicaron tres metodologías, a saber: la primera de ellas fue la elaboración del balance iónico, seguido de la relación de aniones en función de cationes y por último, la representación gráfica de la conductividad ideal calculada para cada muestra en función de la conductividad medida en campo.

6.2.1 Balance iónico

El balance iónico es una de las herramientas empleadas para estimar la precisión de los análisis químicos en muestras de agua, debido a que estos sistemas se comportan de manera homogénea ^[5]; es expresado como el error porcentual del balance iónico, % BI (apéndice G).

Esta herramienta se fundamenta en la neutralidad eléctrica de las muestras, la cual se determina midiendo la diferencia total de aniones y cationes expresados en miliequivalentes por litro (meq/L). Los intervalos de error para aceptar o no el análisis de una muestra de agua, dependen del valor de conductividad eléctrica o de la sumatoria de aniones y cationes. Sin embargo, estos valores suelen ser conservadores, por lo tanto, se acepta un valor máximo en el error del balance iónico de ± 10 % BI, para señalar que los resultados obtenidos son confiables desde el punto de vista

geoquímico ^[48].

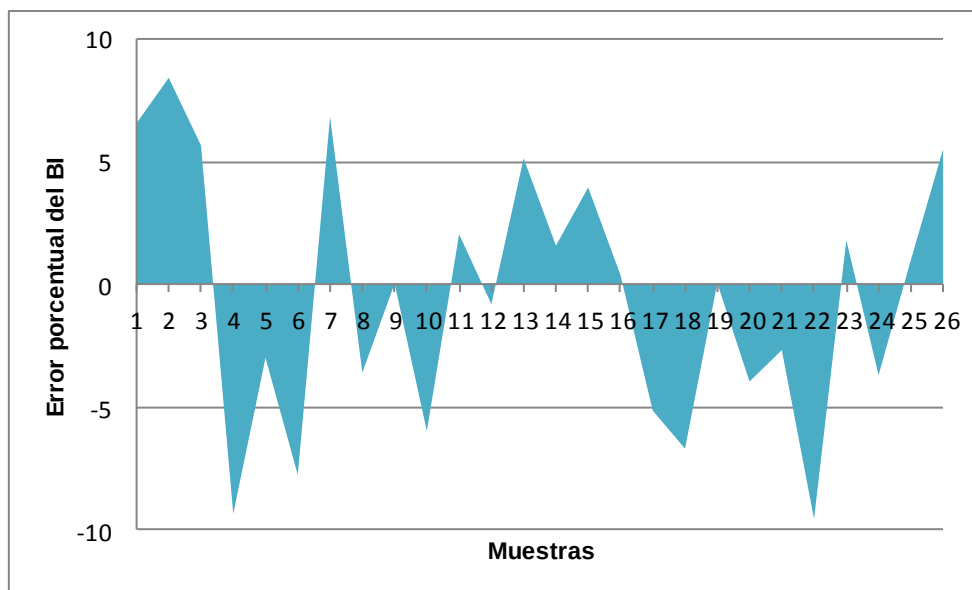


Figura 15. Representación gráfica del error porcentual del balance iónico en las 26 muestras de aguas analizadas

Por su parte, la figura 15 muestra la representación gráfica del error porcentual del balance iónico, donde se puede observar que de las 26 muestras, 14 de ellas presentaron errores relativos menores al 5%, mientras que las 12 muestras restantes presentaron errores relativos entre el 5-9%; es decir, que los resultados obtenidos para la totalidad de las muestras son considerados confiables desde el punto de vista geoquímico, esto por reflejar valores del porcentaje del balance iónico menores al 10 %, tal como se muestra en la tabla G.1 del apéndice G.

6.2.2 Relación de aniones y cationes

En el mismo orden de ideas, la representación gráfica de la concentración de aniones

en función de la concentración de cationes, expresadas en miliequivalentes por litro (meq/L), es una herramienta que de igual forma permite validar los resultados obtenidos. Ella indica que al obtener una pendiente y coeficiente de correlación lineal, r , con valores menores o iguales a uno (1), la correspondencia entre las especies químicas es aceptable; mientras que, si el coeficiente de determinación, R^2 , es menor o igual a uno (1), los errores cometidos del tipo analítico, son mínimos.

Por su parte, la relación de concentración total (en meq/L) de aniones en función de cationes representada en la Figura 16, con una ecuación de la recta de $Y = 0,95 (\pm 0,05) X + 0,6 (\pm 0,5)$, refleja una buena correlación lineal con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,9386$. En vista de lo antes mencionado, los resultados obtenidos en las veintiséis (26) muestras de aguas analizadas en el presente estudio, tienen correspondencia con la correlación positiva entre aniones y cationes, lo que indica una baja incidencia en los errores cometidos en las determinaciones realizadas.

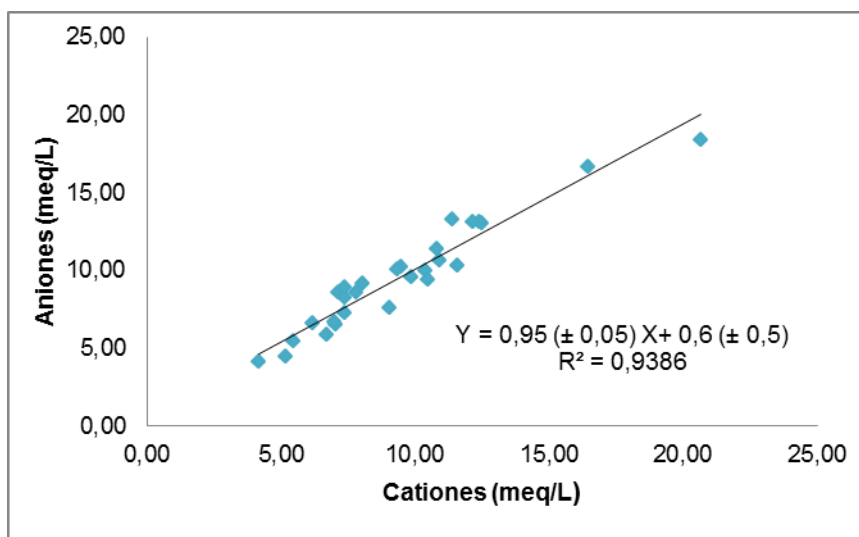


Figura 16. Representación gráfica de las concentraciones de aniónicas y catiónicas totales expresadas en meq/L

6.2.3 Relación de conductividad ideal y conductividad de campo

En este caso, la relación de conductividad ideal frente a la conductividad de campo, se utilizó como el último criterio para validar los resultados obtenidos en las veintiséis (26) muestras de agua analizadas. Como se puede observar en la figura 17, la regresión lineal arrojó una ecuación de la recta $Y = 1,24 (\pm 0,05) X + 80 (\pm 57)$ con un coeficiente determinación (R^2) igual a 0,9714, lo cual indica que se cometieron pocos errores desde el punto de vista analítico. A pesar de ello, la pendiente de la recta es ligeramente mayor a 1, lo cual puede atribuirse a que por lo general, la conductividad de campo es ligeramente menor a la conductividad teórica debido a la respuesta lenta del electrodo al momento de la medición en campo.

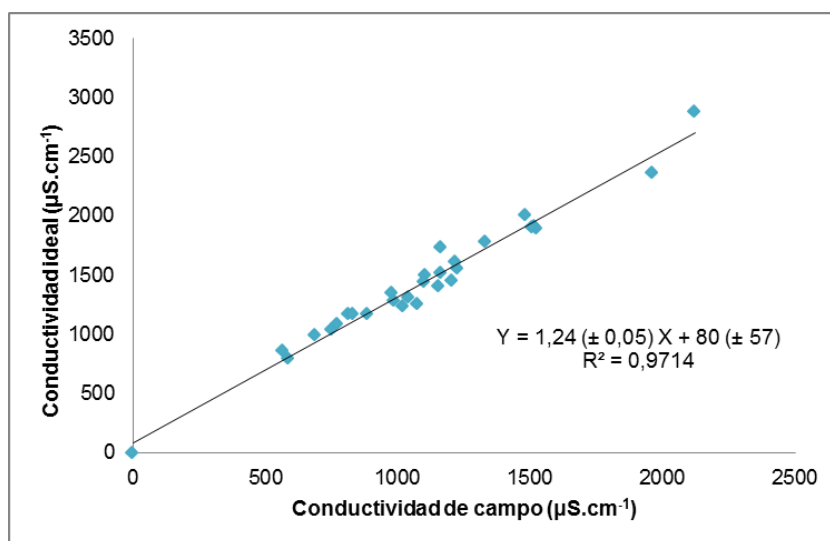


Figura 17. Relación conductividad ideal y conductividad medida en campo

Asimismo, puede observarse que la dispersión de los datos comienza a hacerse importante en las muestras que presentan conductividades mayores debido a que estos valores son muy diferentes a sus conductividades ideales calculadas. Esto puede

atribuirse a que en las muestras de conductividades altas, se hace importante la influencia de la fuerza iónica, debido a la existencia de especies cargadas que no pueden ser medidas, y por lo tanto ocurre la no correspondencia entre la conductividad ideal y la conductividad de campo. Además, influyen factores externos como cambios de temperatura o velocidad de respuesta lenta del electrodo en la sonda empleada, que pueden afectar los valores de conductividad medidos. Es por esto que las muestras que presentan conductividades de campo bajas tienen mayor semejanza a los valores de conductividad ideal calculada.

En resumen, la dispersión observada puede atribuirse a factores externos como cambio de temperatura, velocidad de respuesta del electrodo de la sonda empleada; así como también a factores internos, como la deficiencia de cationes o aniones analizados y a especies orgánicas e inorgánicas no consideradas en el presente estudio ^[31].

6.3 Caracterización química

En esta sección se presenta la caracterización química de las muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, mediante un análisis estadístico no paramétrico. Dicho análisis permite caracterizar la población de datos obtenidos, visualizando la tendencia central y realizando una descripción general del sistema en cuanto a la variabilidad de las especies químicas y de los parámetros fisicoquímicos estudiados.

Debido a lo antes expuesto, se emplearon cajas gráficas, las cuales son herramientas estadísticas que permiten describir e interpretar los datos ^[49]; además, indican los valores anómalos de un conjunto de los mismos, su tendencia central, entre otros parámetros. De igual manera, se construyeron mapas de distribución espacial para cada una de las variables estudiadas, los cuales fueron elaborados con la finalidad

de comparar gráficamente los valores entre cada uno de los pozos muestreados, así como para visualizar la tendencia espacial en las áreas bajo estudio.

Asimismo se empleó el diagrama de Piper, con la finalidad de establecer el o los tipos de aguas subterráneas en la zona de estudio de acuerdo a su composición química determinada; y a su vez clasificar las aguas en función de su calidad empleando para ello el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995). Finalmente, con el propósito de definir los posibles procesos que controlan la composición química de las aguas en estudio, fueron empleadas algunas relaciones interiónicas y los diagramas de Gibbs.

6.3.1 Parámetros fisicoquímicos pH y conductividad

Los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad medidos en las aguas subterráneas, pueden variar en el tiempo y espacio, dependiendo de su composición química; así como también, de los factores y procesos que influyen en dicha composición ^[5]. En la tabla 1.A del apéndice A son presentados los datos obtenidos en la salida de campo.

Con la finalidad de analizar el comportamiento y la variabilidad de los parámetros fisicoquímicos medidos en campo, así como de las especies químicas determinadas en la zona de estudio, fueron empleadas las cajas gráficas. En éstas se realiza una buena descripción del conjunto de datos obtenidos para cada parámetro o especie, en donde se incluye una medida de la tendencia central, junto con información sobre la forma y dispersión de los datos ^[49]. Además, se emplean los mapas de distribución espacial de cada una de las especies de interés, con el fin de visualizar su comportamiento y variabilidad en cada una de las muestras estudiadas.

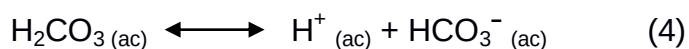
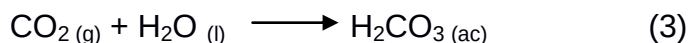
En cuanto al análisis estadístico del pH para las veintiséis (26) muestras en estudio, obtenido mediante la caja gráfica (figura 18), se tiene que las mismas presentan una mediana de 6,97 unidades de pH, con un valor mínimo de 6,52 y un valor máximo de

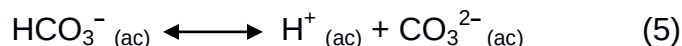
7,28 unidades de pH. Asimismo, se indica un valor anómalo de 8,01 unidades de pH correspondiente a la muestra MASPLT-25, la cual es una muestra de agua superficial que corresponde a la Laguna de Taigüaigüay. Cabe destacar que por lo general, el pH de las aguas subterráneas se encuentra entre 6,5 y 8 unidades; mientras que las aguas superficiales presentan valores de dicho parámetro que pueden llegar hasta 8 unidades de pH ^{[5], [51]}.

De acuerdo al pH de las aguas subterráneas, éstas se pueden clasificar como ligeramente ácidas, las que presentan un valor entre 6,3 y 7,1 unidades de pH; ligeramente alcalinas, cuyo valor de pH está entre 7,1 y 7,6; alcalinas, las que se encuentran dentro del intervalo de 7,6 y 8,2 unidades de pH y finalmente, las aguas cuyo pH está entre 8,2 y 10,9 unidades, son clasificadas como muy alcalinas ^[52].

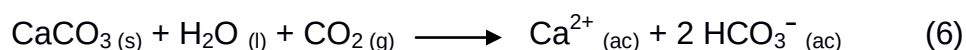
En función de la clasificación anterior, en la distribución espacial del pH, representada en la figura 19, se indica que el 81% de las muestras son ligeramente ácidas, el 15% son ligeramente alcalinas y el 4% de las muestras restantes son alcalinas. Como se puede observar en la figura 19, este parámetro no presenta una distribución uniforme en el área de estudio, sino que se distribuye en valores bajos, intermedios y altos ubicados en los sectores industriales y urbanizados de la ciudad de Cagua.

En este sentido, uno de los principales factores que controla el pH de los cuerpos hídricos, es la interacción del CO₂ atmosférico con el agua, generando en primera instancia ácido carbónico (H₂CO₃), el cual pasa a formar parte rápidamente del equilibrio ácido-base en el que participan las especies carbonatadas presentes en el agua. Lo antes descrito se puede representar mediante las siguientes ecuaciones químicas:



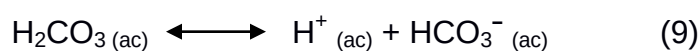
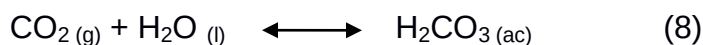
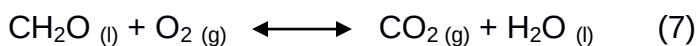


Este proceso aporta H^+ al medio acuoso, alterando minerales como la calcita (CaCO_3) y otros carbonatos, así como a minerales silicatados, llevando a solución especies como Ca^{2+} y HCO_3^- [53]. Dicho proceso puede ser ejemplificado mediante la siguiente ecuación:



En el mismo orden de ideas, el proceso descrito anteriormente pudiese ser el que controla el pH en la zona de estudio, debido a que su litología se encuentra conformada por rocas sedimentarias con cemento calcáreo y cuerpos rocosos con carbonatos existentes en las formaciones Tucutunemo y Paracotos [41]. Sin embargo, no se debe descartar otro proceso, tal como la disolución de aluminosilicatos, que de igual forma pudiese estar contribuyendo con el pH registrado en la zona de estudio.

Asimismo, es importante señalar que los valores de pH más bajos pueden estar asociados a la percolación de aguas contaminadas hacia el acuífero, debido al aporte de importantes concentraciones de H^+ y HCO_3^- producto de la oxidación de la materia orgánica [54]. Dicho proceso se describe mediante las siguientes ecuaciones químicas:



Las reacciones químicas presentadas anteriormente pueden describir los valores más bajos de pH correspondientes a las muestras de agua captadas en la zona industrial y urbanizada de la ciudad de Cagua.

Finalmente, tomando en consideración el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995)

el límite máximo permitido para el parámetro pH se encuentra en un intervalo de 6,5 – 8,5 unidades para las aguas tipo 1. De acuerdo a esto, las veintiséis (26) muestras en estudio se encuentran dentro del intervalo establecido en la normativa nacional y pueden ser empleadas en actividades domésticas e industriales que requieran del uso de agua potable.

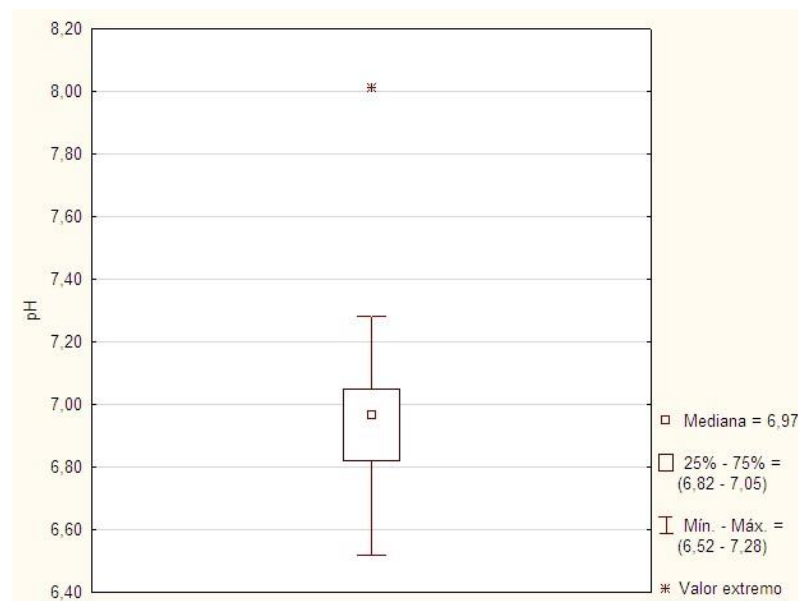


Figura 18. Caja gráfica para el parámetro pH

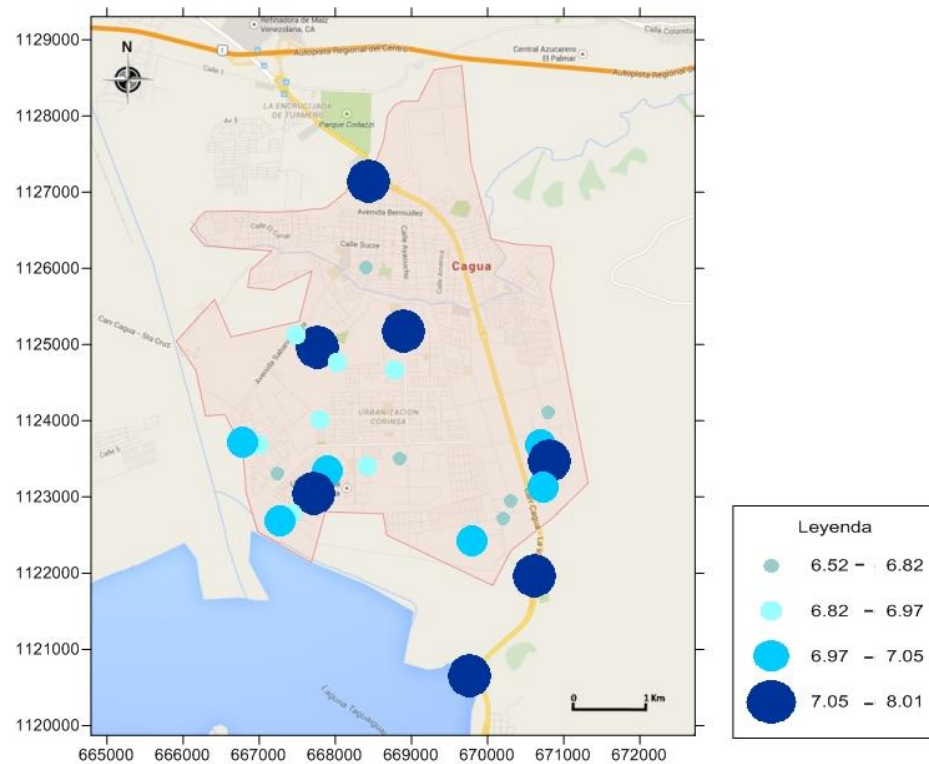


Figura 19. Distribución espacial del pH en la zona de estudio

En relación al parámetro conductividad, en la figura 20 se presenta la caja gráfica construida para las veintiséis (26) muestras de agua estudiadas, donde se puede observar una distribución con un sesgo hacia los valores de mayor conductividad, con una mediana de 1088 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y un intervalo mínimo y máximo de conductividad de 568 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1518 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente. Cabe destacar que se exhiben valores anómalos correspondientes a las muestras MASSCA-03 y MASSAP-12 con conductividades de 2121 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1961 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente.

La existencia de estos datos anómalos puede explicarse de acuerdo a la distribución espacial de la conductividad (figura 21), donde se puede observar que la mayoría de las muestras, cuyas conductividades son elevadas, se encuentran en el sector este de la

zona de estudio, en donde se ubica la zona industrial de la ciudad de Cagua. Además se encuentran algunas muestras con altos valores de conductividad en el sector oeste de la zona muestreada, la cual corresponde a urbanismos cercanos a la Laguna de Taigüaigüay. Lo antes mencionado permite inferir que uno de los principales aportes de las altas conductividades registradas en la zona, proviene de las actividades antrópicas que allí se practican.

Según la distribución espacial observada para dicho parámetro, es importante señalar que en los puntos donde se exhiben valores elevados de conductividad, existe una mayor interacción entre el agua percolante y el material rocoso, la cual origina la disolución de los minerales presentes en el sustrato. De igual manera, en los puntos donde se presentan valores bajos de conductividad, dicha interacción es menor y presenta poco tiempo de residencia ^[31].

No obstante, en general se nota un aumento en los valores de la conductividad eléctrica hacia las inmediaciones de la Laguna de Taigüaigüay, lo que podría también asociarse a una probable interconexión hidráulica entre los acuíferos del área con la laguna. Cabe destacar que Alvarado (1989), señala que en la cuenca del Lago de Valencia se ha producido una inversión del flujo subterráneo de sus aguas hacia los acuíferos de la zona, generando su contaminación. En base a lo antes expuesto, es posible extrapolar esta problemática a la zona de estudio, debido a que la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay pertenece a la cuenca hidrográfica del Lago de Valencia.

Por su parte, de acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) el límite máximo permitido para la conductividad referente a las aguas tipo 2 es de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. En función de lo antes expuesto, el 96% de la totalidad de las muestras cumple con dicho decreto, lo que permite proponer el empleo de estas aguas en actividades domésticas, agrícolas y pecuarias. Por otra parte, el 4% de las muestras restantes superan el límite establecido por la normativa nacional, lo cual les confiere la

6.3.2 Sílice disuelta (SiO_2)

La figura 22 muestra la caja gráfica obtenida para las concentraciones de sílice disuelta (SiO_2) cuyos valores se encuentran reportados en la tabla B.3 del apéndice B. En dicha figura se puede observar una distribución con un sesgo hacia las concentraciones más altas, presentando una mediana de 15,8 mg/L con valores mínimos y máximos de 8,5 mg/L y 29,3 mg/L, respectivamente.

Algunos autores señalan que la solubilidad de los compuestos silicatados en el agua, es relativamente baja, observándose comúnmente el intervalo de concentraciones desde 1 hasta 30 mg/L ^[12]. Por lo tanto, de acuerdo a las concentraciones obtenidas para dicha especie, se puede indicar que los resultados obtenidos se encuentran dentro del intervalo reportado para las aguas naturales.

Por su parte, la fuente principal de la sílice disuelta (SiO_2) en las aguas subterráneas proviene de la meteorización de silicatos y aluminosilicatos que conforman las formaciones geológicas ^[5]. Cabe destacar que la zona de estudio está litológicamente caracterizada por la presencia de la Filita de Tucutunemo, la cual está constituida por feldespatos, plagioclasas y silicatos en general ^[41], facies minerales a las que se atribuyen las concentraciones de sílice disuelta (SiO_2) reportadas en este estudio.

En el mismo orden de ideas, en la figura 23 se representa la distribución de sílice disuelta (SiO_2) presente en la zona de estudio. Se puede apreciar una mayor concentración de dicha especie en zonas cercanas a la laguna y en algunos sectores ubicados en el este de la ciudad de Cagua, lo que permite señalar que los minerales silicatados que constituyen dichos sectores son más susceptibles a la meteorización que aquellos situados en zonas que presentan una menor concentración de sílice disuelta (SiO_2). Finalmente, es importante señalar que el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) no establece un límite máximo permitido para las concentraciones de sílice

disuelta (SiO_2), por lo que las muestras de agua estudiadas no pueden ser clasificadas en función de esta especie, en cuanto a sus usos asociados para ningún tipo de agua.

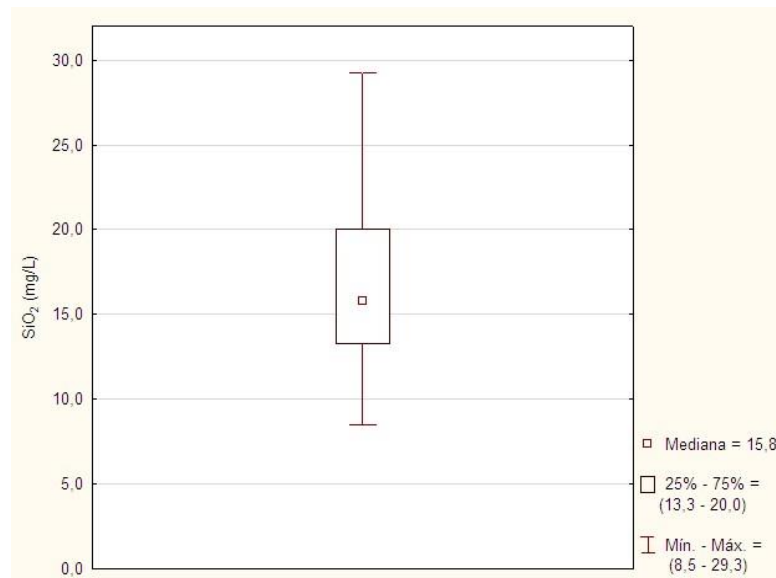


Figura 22. Caja gráfica para la sílice disuelta (SiO_2) en las muestras estudiadas

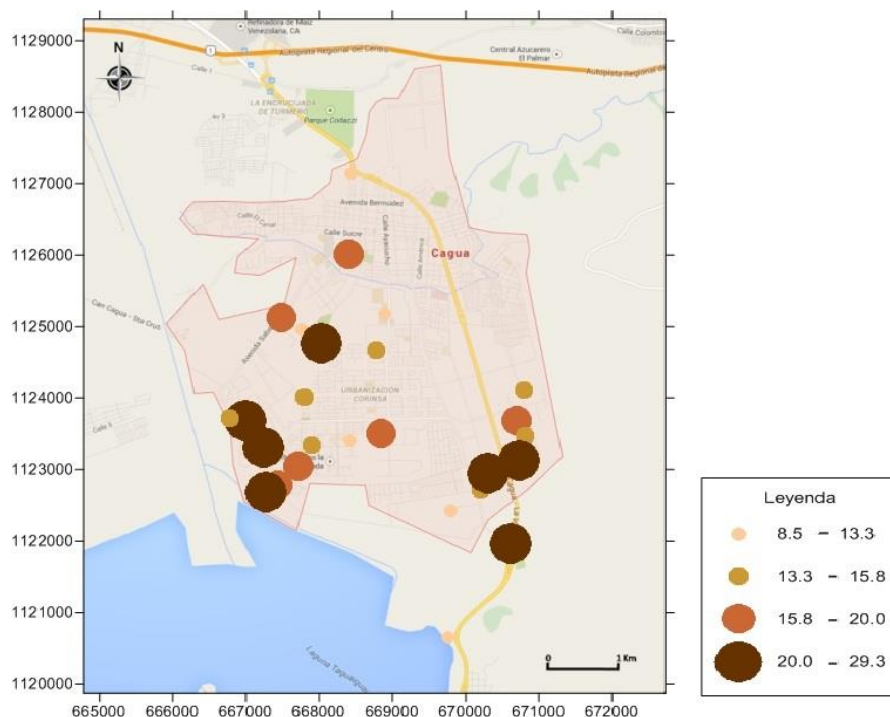


Figura 23. Distribución espacial de la sílice disuelta (SiO_2), expresada en mg/L

6.3.3 Cationes: Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+}

A continuación se discute el comportamiento estadístico de las concentraciones obtenidas para los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en las muestras de aguas captadas; así como también, su distribución espacial en la zona de estudio, según lo expresado en el apartado 2.6.1 que trata sobre los constituyentes mayoritarios presentes en las aguas subterráneas. Asimismo, también se hace referencia a los límites máximos permitidos para cada una de las especies antes mencionadas, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

Las concentraciones de dichas especies se encuentran en la tabla B.1 del apéndice B y sus respectivas cajas gráficas se presentan en la figura 24.

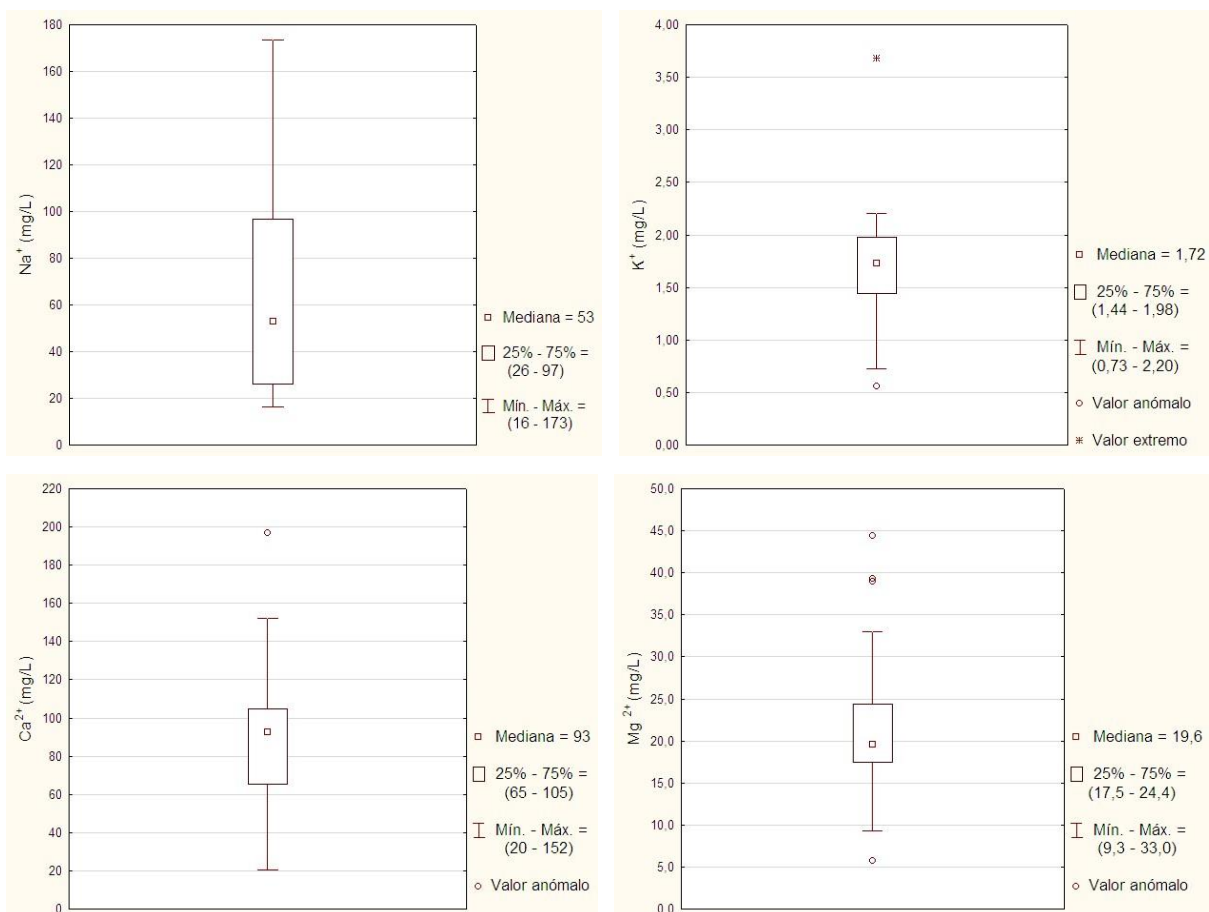


Figura 24. Cajas gráficas para las especies químicas Na⁺, K⁺, Ca²⁺ y Mg²⁺

6.3.3.1 Sodio (Na⁺)

En la figura 24 se puede observar la caja gráfica generada para el sodio (Na⁺), en la cual se obtuvo una mediana de 53 mg/L con valores mínimos y máximos de concentraciones de 16 mg/L y 173 mg/L respectivamente. Cabe destacar que no se presentan valores anómalos en la totalidad de muestras analizadas para el sodio (Na⁺). Asimismo, es importante señalar que en función de la caja gráfica, las concentraciones de dicha especie que se encuentran por encima de la mediana presentan una mayor dispersión que aquellas que se encuentran por debajo de la misma.

El Na es el elemento más abundante del grupo de los metales alcalinos de la tabla periódica y sus principales fuentes vienen dadas por procesos de meteorización de rocas ígneas, durante la evapotranspiración, el intercambio iónico, posible aporte atmosférico e incluso, a causa de las actividades antrópicas ^{[12], [55]}.

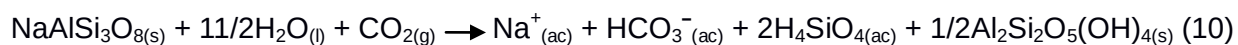
En relación al mapa de distribución de sodio (Na^+) en la zona de estudio (figura 25) puede observarse que dicha especie se encuentra distribuida espacialmente presentando sus mayores valores de concentración en áreas cercanas a la laguna, correspondientes a sectores industriales en la zona este, y a urbanismos ubicados en la zona oeste de la ciudad de Cagua. Estos valores de concentración elevados pueden ser atribuidos a las actividades antrópicas practicadas en la zona industrial; así como también a las aguas residuales provenientes de los asentamientos urbanos.

En este sentido, no se descarta la influencia de las aguas de la laguna de Taigüaigüay hacia los acuíferos de la zona, esto como consecuencia de una probable interconexión hidráulica entre ambos sistemas, lo que justificaría el aumento en la concentración de Na^+ hacia sectores cercanos a la laguna.

La presencia de esta especie química en la zona de estudio está asociada principalmente a la interacción agua-roca, mediante el proceso de intercambio iónico con las arcillas debido a que esta especie posee alta solubilidad y es afectado principalmente por el intercambio catiónico ^[5]. De acuerdo con lo señalado por Biondo y Esteves (2010), en esta zona se evidencian sedimentos predominantemente de tamaño de grano arcilla, con intercalaciones de arena y gravas que constituyen los acuíferos potenciales de la zona.

Cabe destacar que las formaciones Tucutunemo y Paracotos, que conforman la litología de la zona de estudio, presentan esquistos calcáreos y filitas que contienen minerales como la albita, la cual cuenta con Na^+ en su estructura, que durante la meteorización

puede liberar esta especie a las aguas subterráneas ^[41] mediante reacciones de hidrólisis como la que se muestra a continuación:



En otro orden de ideas, en atención al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) se tiene que el límite máximo permitido para la concentración de sodio (Na^+) es de 200 mg/L, para las aguas tipo 1. En base a lo antes mencionado, se puede señalar que el 100% de las muestras de interés en el presente estudio cumple con dicho decreto; agregándose que se encuentran destinadas a las actividades domésticas e industriales que requieran del uso de agua potable.

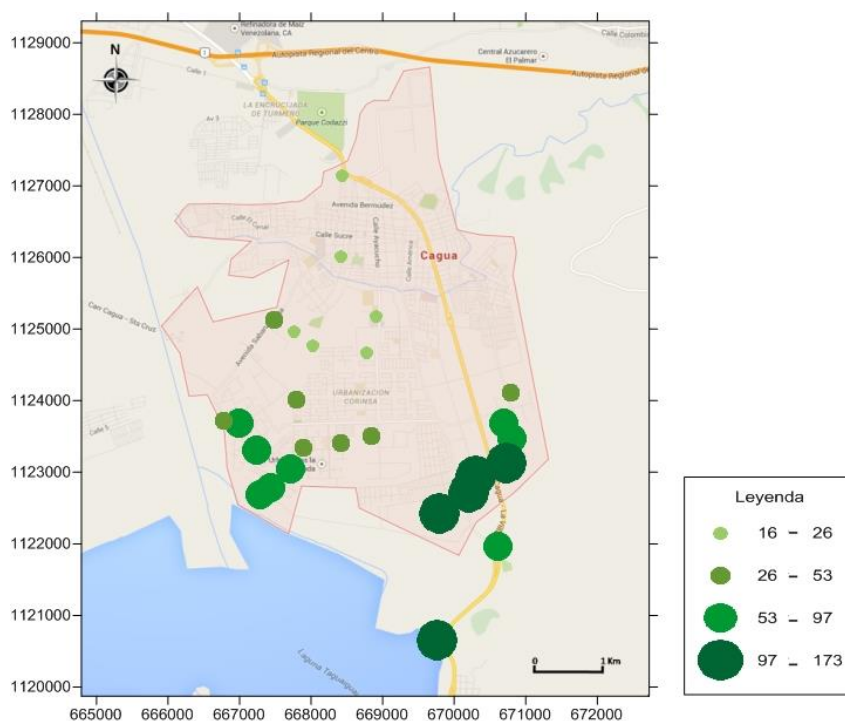


Figura 25. Distribución espacial del sodio (Na^+), expresada en mg/L

6.3.3.2 Potasio (K^+)

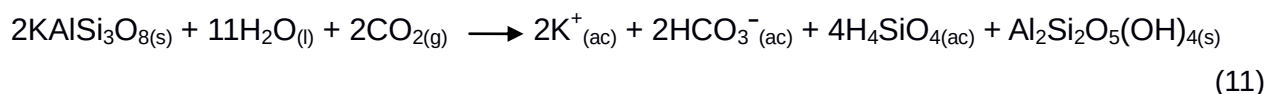
En relación al análisis estadístico para el potasio (K^+), se puede observar en la figura 24 que la población de datos presenta un sesgo hacia los valores de concentración que se encuentran por debajo de la mediana (1,72 mg/L). Es importante señalar que para esta especie química se presentaron valores mínimos y máximos de 0,73 mg/L y 2,20 mg/L, respectivamente; además, se obtuvo un valor negativamente anómalo de 0,56 mg/L correspondiente a la muestra MASSLV-07, captada en el sector Las Vegas.

Asimismo, se obtuvo un valor extremo de 3,68 mg/L correspondiente a la muestra MASPLT-25, la cual proviene de la Laguna de Taigüaigüay. Cabe destacar que por lo general, en aguas superficiales, la concentración de potasio (K^+) es de 2,3 mg/L; mientras que en aguas subterráneas es de 3 mg/L ^[51], lo que indica que la concentración de dicho elemento para la muestra antes mencionada, sobrepasa ambos límites. Este valor extremo de concentración puede atribuirse a fuentes antrópicas debido al uso de algún tipo de abono o fertilizante, como por ejemplo el KNO_3 , debido a que en los sectores aledaños a la Laguna de Taigüaigüay se llevan a cabo actividades agrícolas.

Como puede observarse en la distribución espacial del potasio (K^+) en la zona de estudio (figura 26), las concentraciones más elevadas de este ion se encuentran en áreas cercanas a la laguna, donde existe un importante desarrollo de prácticas agrícolas. En ese sentido, dicha especie muestra un patrón de distribución espacial similar a la distribución del Na^+ (figura 25), lo que sugiere que las mayores concentraciones de K^+ también se encuentran asociadas a las actividades antrópicas llevadas a cabo en el sector industrial de la zona de estudio; así como también a las aguas servidas provenientes de los asentamientos urbanos.

No obstante, es importante señalar que la concentración de K^+ existente en la población

de muestras analizadas, también puede estar asociada a la hidrólisis de los minerales que constituyen la litología de la zona de estudio, donde se ha identificado la presencia de minerales como la ortosa, el cual es un mineral silicatado rico en K^+ , que está presente en las filitas de la Formación Tucutunemo y Paracotos ^[4]. Este proceso se puede describir a través de la siguiente reacción química:



En el mismo orden de ideas, Kutos (2012) indica que la presencia de éste ion en las aguas subterráneas puede estar asociada a las muscovitas, biotitas y anfíbol, los cuales son minerales que conforman los esquistos de la Formación Tucutunemo; así como también a las aguas meteóricas, pero en una menor proporción.

Por su parte, de acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) el límite máximo permitido para la concentración de potasio (K^+) es de 20 mg/L para las aguas tipo 1; mientras que para los tipos de agua restantes, no se establece ningún límite para dicha especie. Según lo antes expuesto, el 100% de las muestras analizadas se encuentra por debajo del límite establecido en la normativa para las aguas tipo 1. Esto permite asociar estas aguas para fines domésticos e industriales que requieran de agua potable, siempre que ésta forme parte de un producto o sub-producto destinado al consumo humano.

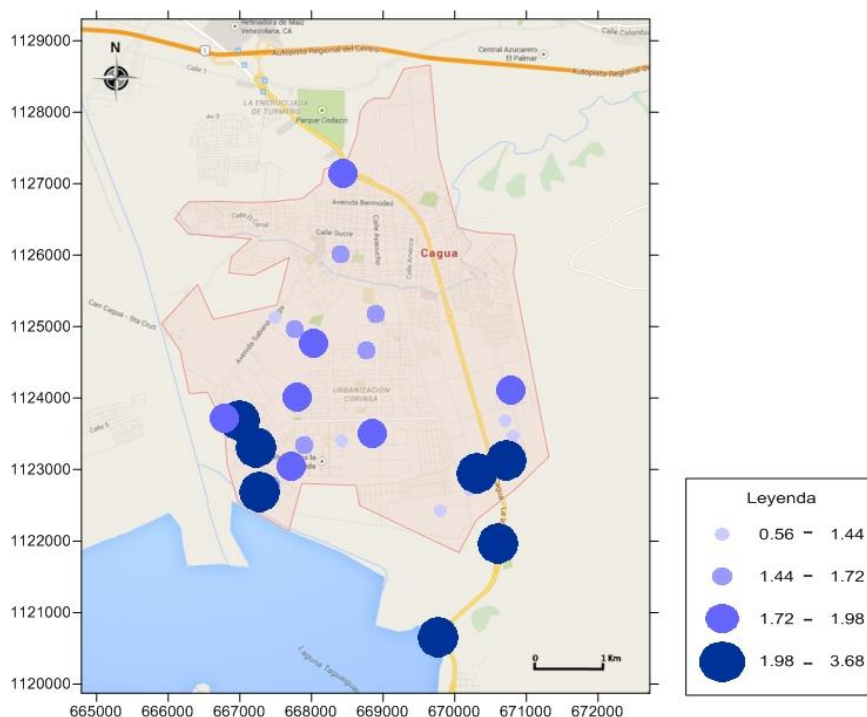


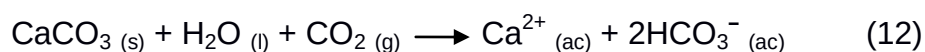
Figura 26. Distribución espacial del potasio (K^+), expresada en mg/L

6.3.3.3 Calcio (Ca^{2+})

En lo que respecta al calcio (Ca^{2+}), se puede observar en la figura 24 que las concentraciones obtenidas para cada una de las muestras en estudio presentan un sesgo hacia los valores de concentración que se ubican por debajo de la mediana, la cual fue de 93 mg/L. Cabe destacar que dicha especie presentó un valor mínimo y máximo de concentración de 20 mg/L y 152 mg/L respectivamente, arrojando un valor de concentración anómalo de 197 mg/L correspondiente a la muestra MASSCA-03 geográficamente captada en Campo Alegre, sector caracterizado por la presencia de actividades industriales. En general, los valores de concentración de las muestras en estudio no presentan una variación considerable.

El ion calcio (Ca^{2+}) es la especie catiónica dominante en el presente estudio, debido a que presenta las mayores concentraciones en las aguas subterráneas captadas; es decir, en el 81% de la totalidad de las muestras, esta especie química predomina con respecto a los demás cationes.

Espacialmente, el ion calcio (Ca^{2+}) presenta las mayores concentraciones en el sector este de la zona de estudio y en el centro de la planicie de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay (figura 27). La presencia de esta especie química en dicha cuenca, podría estar principalmente asociada a la disolución de minerales carbonatados como la calcita, así como también al yeso y anhidrita; aunado al aporte de Ca^{2+} proveniente de los minerales silicatados [5], [21]. A continuación se describe la reacción química que aporta el ion calcio (Ca^{2+}) a las aguas subterráneas a través de la disolución de la calcita, presente en rocas carbonáticas como el mármol, roca que ha sido identificada en la zona de estudio [4]:



En el mismo orden de ideas, de acuerdo con el Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV) (2011), en la zona de estudio predominan las rocas metamórficas, tales como filitas carbonáceas, esquistos calcáreos y metalavas. Por su parte, los minerales como la plagioclase cálcica, la augita y la calcita, que constituyen las rocas antes mencionadas, son ricos en Ca^{2+} y su hidrólisis permite explicar la abundancia de este ion en las muestras captadas en la zona de estudio.

Asimismo, cabe destacar que en la literatura no se señala la presencia de yeso en la litología de la zona de estudio; sin embargo, en una investigación realizada en la cuenca del Lago de Valencia por Martínez (2003) se indica que la presencia de calcio (Ca^{2+}) se asocia a la disolución de este mineral. De acuerdo a lo antes mencionado y debido a la cercanía de esta cuenca con la zona de estudio, no se puede descartar que

una de las fuentes de calcio (Ca^{2+}) en las muestras analizadas pudiese ser la disolución de dicho mineral, aunque en una menor proporción.

Lo antes expuesto permite indicar que uno de los principales procesos que controlan la composición de calcio (Ca^{2+}) en las aguas subterráneas analizadas es la interacción agua-medio poroso.

Finalmente, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) se tiene que el límite máximo permisible para la concentración de calcio (Ca^{2+}) es de 200 mg/L para las aguas tipo 1; mientras que para las aguas tipo 2 su límite se encuentra por encima de los 200 mg/L. De acuerdo a lo establecido en la normativa nacional, se puede señalar que el 100% de las muestras de agua captadas en la presente investigación cumple con lo establecido para las aguas tipo 1, por lo que estas aguas se pueden asociar a usos domésticos e industriales.

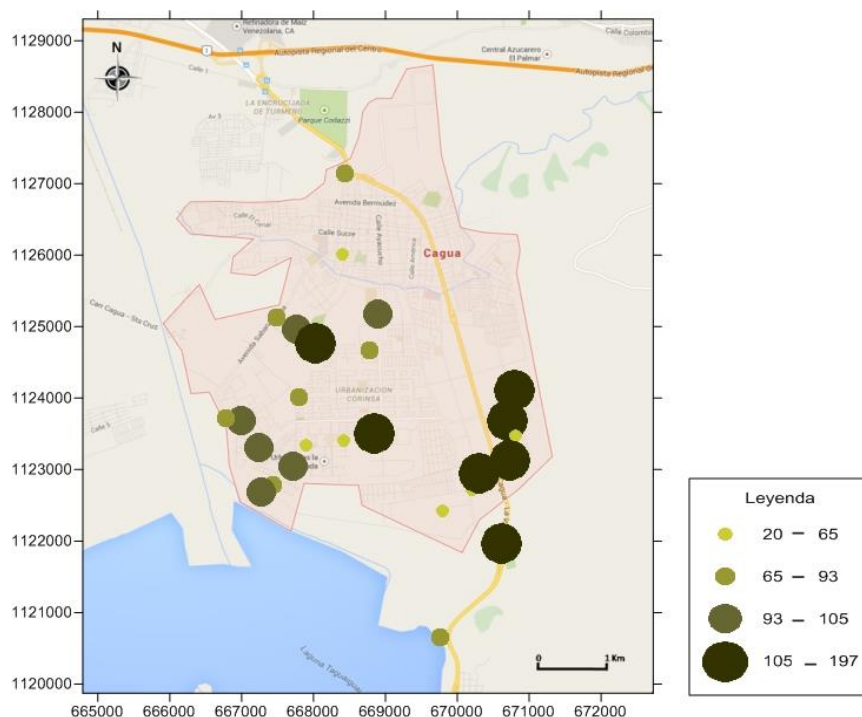


Figura 27. Distribución espacial del calcio (Ca^{2+}), expresada en mg/L

6.3.3.4 Magnesio (Mg^{2+})

Estadísticamente, de acuerdo a la caja gráfica para el Mg^{2+} ubicada en la figura 24, dicha especie presentó un intervalo mínimo y máximo de concentraciones entre 9,3 mg/L y 33,0 mg/L, respectivamente, una mediana de 19,6 mg/L. Asimismo en la población de muestras bajo estudio se presentaron cuatro (4) valores anómalos correspondientes a las muestras MASACH-01, MASSCA-03, MASSLV-05 y MASSAP-12, cuyas concentraciones son 5,7 mg/L, 39,3 mg/L, 39,0 mg/L y 44,4 mg/L, respectivamente. Lo antes mencionado permite señalar que las muestras analizadas para esta especie química presentan variabilidad, con una mayor dispersión para los valores de concentración que se encuentran por encima de la mediana que para aquellos que se posicionan por debajo de la misma.

Obsérvese en el mapa de distribución del magnesio (Mg^{2+}) (figura 28) que los valores de concentración más altos se encuentran en el sector este de la zona de estudio y algunos en el sector oeste. Cabe destacar que la distribución de este ion guarda cierta relación con la distribución del calcio (Ca^{2+}) (figura 27), a causa de la relación geoquímica que guardan entre sí ambas especies. No obstante, se presentan algunas diferencias, como por ejemplo en el punto 1, correspondiente a la muestra MASACH-01, donde la concentración de Mg^{2+} es muy pequeña, lo cual pudiese estar asociado a la presencia de minerales pobres en este ion ^[4].

Asimismo, de forma general, las fuentes de aporte del ion Mg^{2+} a las aguas subterráneas viene dado por la disolución de silicatos, aluminosilicatos o al proceso de intercambio iónico ^[31]. En el Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV) (2011) se expone que la litología de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay está conformada por metalavas con minerales ferromagnesianos, pertenecientes a la Filita de Paracotos, lo cual pudiese ser una fuente de este ion en las aguas estudiadas.

En base al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) el límite máximo permitido para el magnesio (Mg^{2+}) en relación a las aguas tipo 1 es de 70 mg/L; mientras que para las aguas tipo 2 este límite supera los 70 mg/L. En función de lo antes expuesto, de las veintiséis (26) muestras de agua captadas, el 100% cumplen con dicho decreto para la clasificación de las aguas tipo 1; las cuales pueden ser empleadas para usos domésticos e industriales que requieran de agua potable.

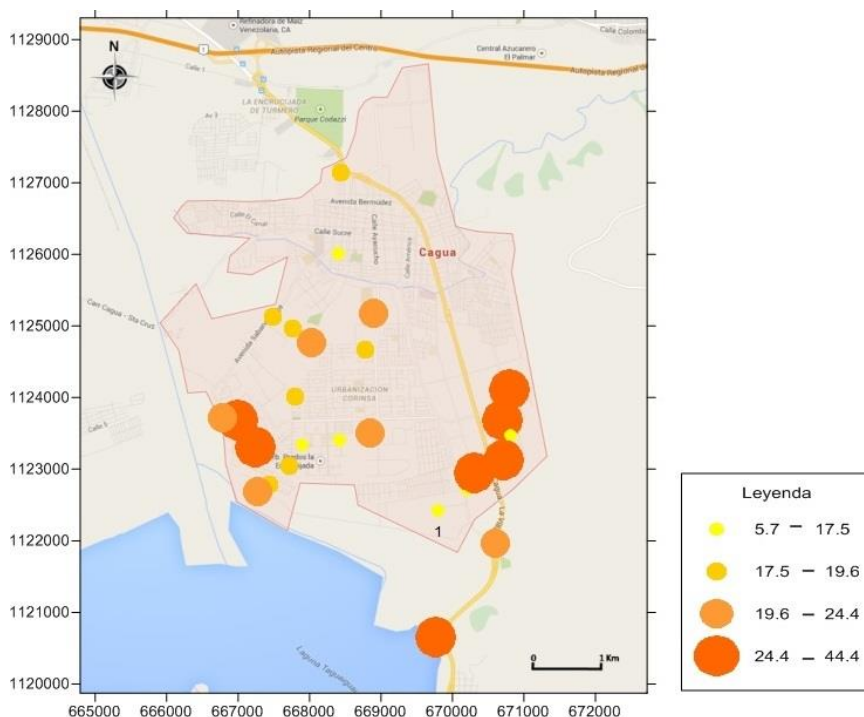


Figura 28. Distribución espacial del magnesio (Mg^{2+}), expresada en mg/L

6.3.4 Aniones: Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^-

Seguidamente se discute el comportamiento estadístico de las especies aniónicas Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- en las muestras de agua estudiadas, así como también se presentan sus respectivos mapas de distribución espacial, de acuerdo a lo expuesto en el apartado 2.6.1 que hace referencia sobre los constituyentes mayoritarios existentes en las aguas subterráneas. De igual manera, se señalan los límites máximos permitidos para cada una de las especies antes mencionadas, en función del Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

Las concentraciones de dichas especies se presentan en la tabla B.2 del apéndice B y sus respectivas cajas gráficas son mostradas en la figura 29.

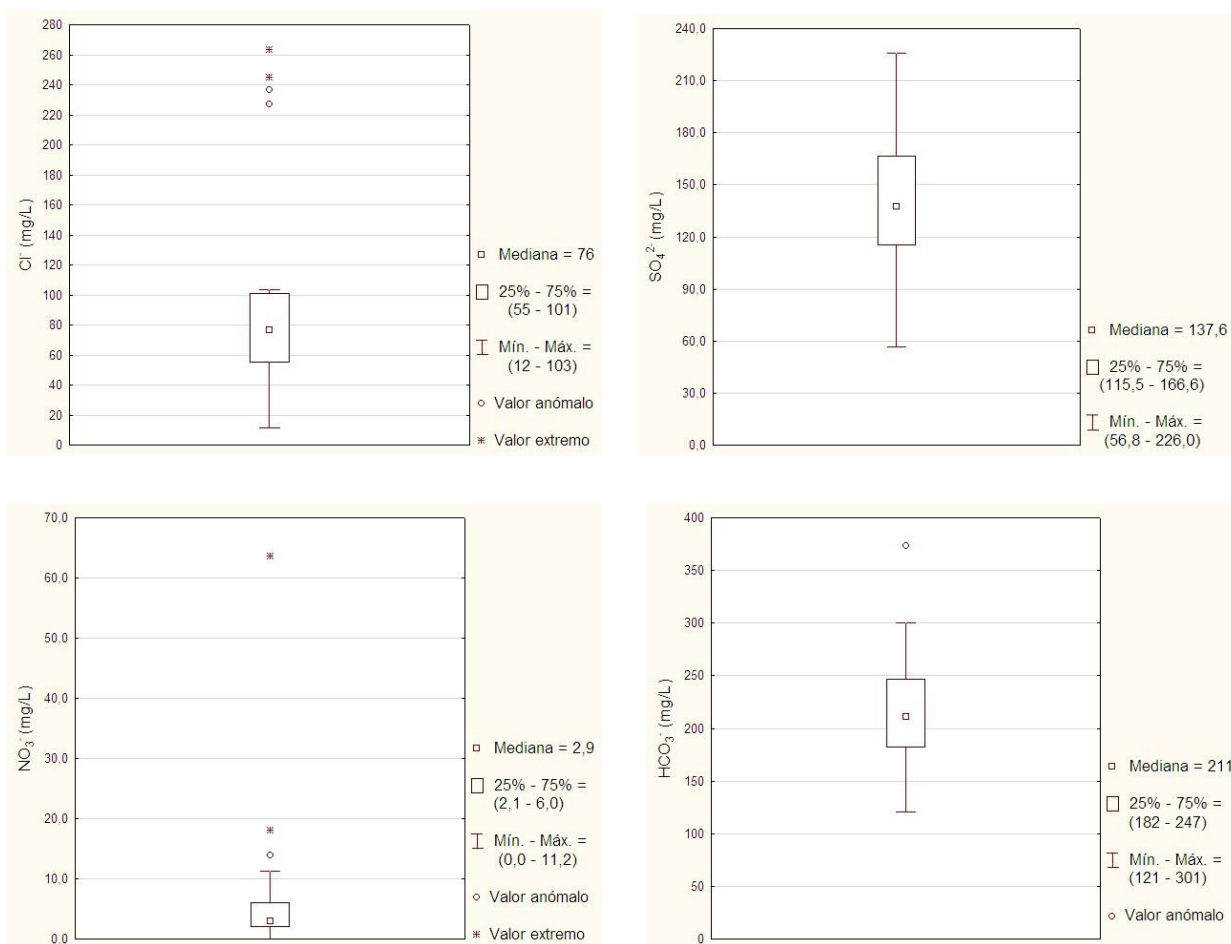


Figura 29. Cajas gráficas para las especies químicas Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^-

6.3.4.1 Cloruro (Cl^-)

La caja gráfica generada para el ion cloruro (Cl^-) (figura 29), refleja una mediana de 76 mg/L y un intervalo mínimo y máximo de concentración de 12 mg/L y 103 mg/L, respectivamente. Como se puede observar, el tercer cuartil, que representa la mediana de los valores que se encuentran por encima de la misma, está muy cercano al valor máximo, lo que evidencia la variabilidad de los resultados obtenidos. De igual manera, se obtuvieron dos (2) valores anómalos correspondientes a las muestras MASSET-06 y

MASSAP-12 con 227 mg/L y 237 mg/L respectivamente. Además, se obtuvieron dos (2) valores extremos; uno de 263 mg/L que corresponde a la muestra MASSCA-03 y otro de 245 mg/L perteneciente a la muestra rotulada como MASSLV-05.

Cabe destacar que las muestras correspondientes a los valores anómalos y extremos, fueron captadas en los sectores industriales, hacia el este de la zona de estudio. Lo antes mencionado se puede observar gráficamente en la figura 30, donde se muestra el mapa de distribución espacial del cloruro (Cl^-).

La presencia de este ion en la zona de estudio puede atribuirse al aporte atmosférico debido a que el cloruro (Cl^-) llega a los acuíferos por la infiltración desde los suelos; sin embargo, el aporte atmosférico promedio de este ion es de 0,3 a 3 mg/L ^[5], lo que permite inferir que esta especie podría provenir de otras fuentes, ya que los resultados obtenidos en el presente estudio superan dicho intervalo. En el mismo orden de ideas, Custodio y Llamas (1976) señalan que la existencia de este ion en las aguas subterráneas también puede estar asociada a la disolución de sales evaporíticas, y en menor proporción a la meteorización de rocas ígneas y metamórficas. En función de ello se puede señalar que el aporte del ion cloruro (Cl^-) en la zona de estudio, puede ocurrir a través de la redisolución de sales presentes en el suelo, las cuales luego son infiltradas hacia el acuífero en los períodos de lluvia.

Asimismo, otra fuente de este ion puede estar asociada a las actividades antrópicas, mediante la infiltración de las aguas residuales hacia el subsuelo, debido a que en esta zona de estudio existen industrias y asentamientos urbanos que pueden contribuir con este ion. Como se observa en la figura 30, las mayores concentraciones de Cl^- se ubican en el sector industrial de la ciudad de Cagua (hacia el este), y en un solo pozo ubicado en una zona urbana, el cual corresponde a la muestra MASSLS-21, del sector La Segundera. Nótese además, que en general existe un aumento en la concentración

de este ion en dirección a la laguna, lo que apunta hacia un probable aporte debido a una posible interconexión hidráulica de las aguas de la laguna con el acuífero.

En relación al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), el límite máximo permisible para la concentración de cloruro (Cl^-) es de 600 mg/L para las aguas tipo 1; mientras que, para los tipos de aguas restantes no existe un límite máximo establecido en la normativa. De acuerdo a lo antes expuesto, el 100% de las muestras de aguas en estudio se pueden clasificar como aguas tipo 1, cuyos usos están asociados a actividades domésticas e industriales.

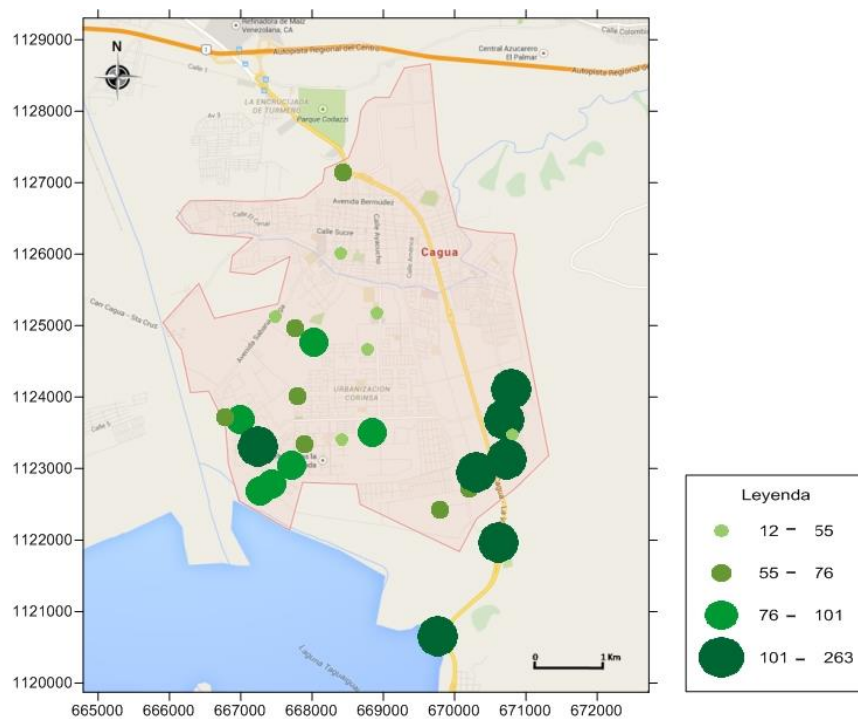


Figura 30. Distribución espacial del cloruro (Cl^-), expresada en mg/L

6.3.4.2 Sulfato (SO_4^{2-})

La caja gráfica elaborada para el ion sulfato (SO_4^{2-}) (figura 29) presenta una distribución normal y simétrica, obteniéndose una mediana de 137,6 mg/L y un intervalo mínimo y máximo de concentración de 56,8 mg/L y 226,0 mg/L respectivamente.

En la figura 31 se muestra la distribución espacial del ion sulfato (SO_4^{2-}) en la zona de estudio, se puede notar que las mayores concentraciones de esta especie química se localizan en asentamientos urbanos, algunos en el sector industrial de la ciudad de Cagua y en la propia muestra de la Laguna de Taigüaigüay.

De acuerdo con Custodio y Llamas (1976) la fuente principal del ion sulfato (SO_4^{2-}) en las aguas subterráneas se debe a la disolución de sales como yeso y anhidrita. No obstante, los minerales antes señalados no pertenecen a la litología de la zona de estudio, pero en cambio se encuentran en zonas cercanas, como en la cuenca del Lago de Valencia, según lo indicado por Martínez (2003). Debido a esto, no se descarta la disolución de yeso y anhidrita como fuente del ion sulfato (SO_4^{2-}) en las aguas estudiadas.

En el mismo orden de ideas, el aporte de sulfato (SO_4^{2-}) también puede ser producto de la oxidación de sulfuros existentes en minerales como la pirita, pero en una menor proporción ^[56]; esto debido a que en la Filita de Tucutunemo, que forma parte de la litología de la zona de estudio, ha sido reportada la presencia de dicho mineral ^[41]. De igual manera, el empleo de fertilizantes en las zonas agrícolas cercanas puede contribuir con el aumento de la composición de sulfato (SO_4^{2-}) en las aguas subterráneas.

En el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) se establece que el límite máximo permitido para el sulfato (SO_4^{2-}) es de 400 mg/L para la clasificación de aguas tipo 1. En

base a lo antes expuesto, el 100% de las muestras de agua estudiadas se encuentran en dicho intervalo, lo cual conlleva a clasificarlas dentro de este tipo. Asimismo, estas aguas son destinadas a usos domésticos e industriales que necesiten el uso de agua potable, siempre y cuando ésta sea parte de un producto destinado al consumo humano o que esté en contacto con el hombre.

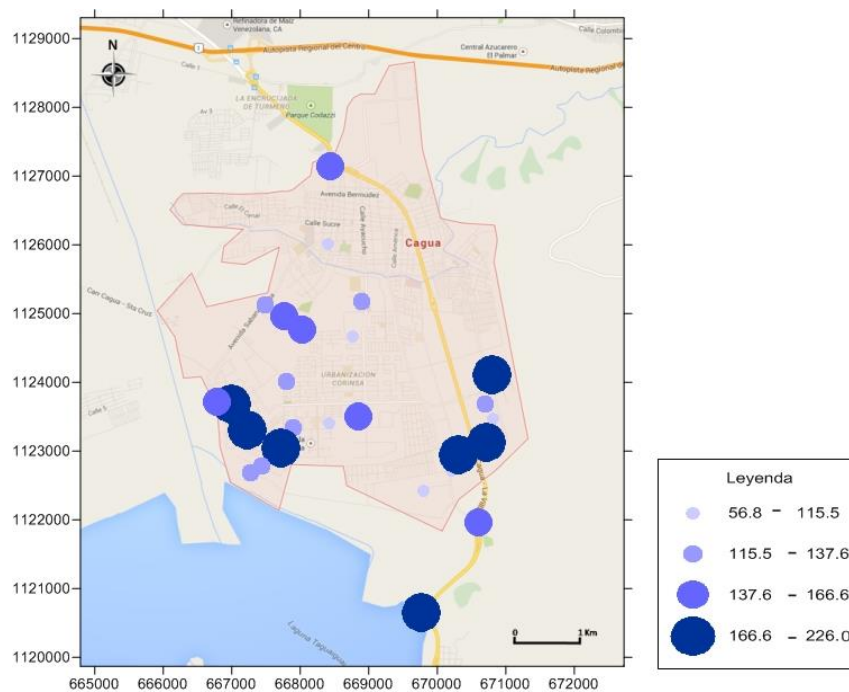


Figura 31. Distribución espacial del sulfato (SO_4^{2-}), expresada en mg/L

6.3.4.3 Nitrato (NO_3^-)

Obsérvese en la figura 29 que la caja gráfica para el ion nitrato (NO_3^-), exhibe una distribución con un sesgo hacia los valores de menor concentración, presentando una asimetría positiva, lo cual indica la dispersión de los datos. Asimismo, esta caja gráfica arrojó una mediana de 2,9 mg/L con valores mínimos y máximos de concentración de

0,0 mg/L y 11,2 mg/L respectivamente. En el mismo orden de ideas, en la totalidad de las muestras estudiadas se obtuvo un valor anómalo de 13,9 mg/L perteneciente a la muestra MASSLS-21, la cual corresponde al sector La Segundera, ubicado al oeste de la zona de estudio. Además, se presentan valores extremos, cuyas concentraciones son 18,0 mg/L y 63,5 mg/L, correspondientes a las muestras MASSAP-11 y MASSAP-12, captadas en los sectores Corinsa y Las Vegas, respectivamente. Cabe destacar que los pozos donde se captaron las muestras que reflejan valores extremos pertenecen a la industria Agropatria, donde el uso de fertilizantes es intensivo.

En relación a la distribución espacial del nitrato (NO_3^-) (figura 32), se tiene que las muestras cuyos valores de concentración son mayores se encuentran ubicados en el sector este y en la planicie de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay. Cabe destacar que los puntos identificados como 11, 12 y 21 corresponden a los valores anómalos y extremos. Además, los pozos identificados corresponden a zonas donde existen asentamientos urbanos e industrias.

En el mismo orden de ideas, es importante señalar que la presencia del ion nitrato (NO_3^-) en las aguas subterráneas se encuentra principalmente asociada a las actividades realizadas por el hombre, tales como las faenas agropecuarias que traen consigo la lixiviación de la materia fecal de los animales. Muchos fertilizantes sintéticos contienen al nitrógeno en su composición, el cual es posteriormente convertido por las bacterias del suelo en NO_2^- y NO_3^- , proceso llamado nitrificación [5], [12]. En base a lo antes mencionado, las muestras que presentan mayores concentraciones de nitrato (NO_3^-) se encuentran contaminadas con este ion a causa del empleo de fertilizantes en áreas aledañas a la zona de estudio, aunado a las actividades domésticas e industriales que allí se practican.

De acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) el límite máximo permitido

para la concentración de nitrato (NO_3^-) es de 10 mg/L en relación a las aguas tipo 1, lo que permite clasificar al 85% de las muestras como aguas tipo 1, encontrándose asociadas a usos domésticos e industriales. Por su parte, el 15% de las muestras restantes son clasificadas como aguas tipo 2, las cuales son destinadas a fines agropecuarios.

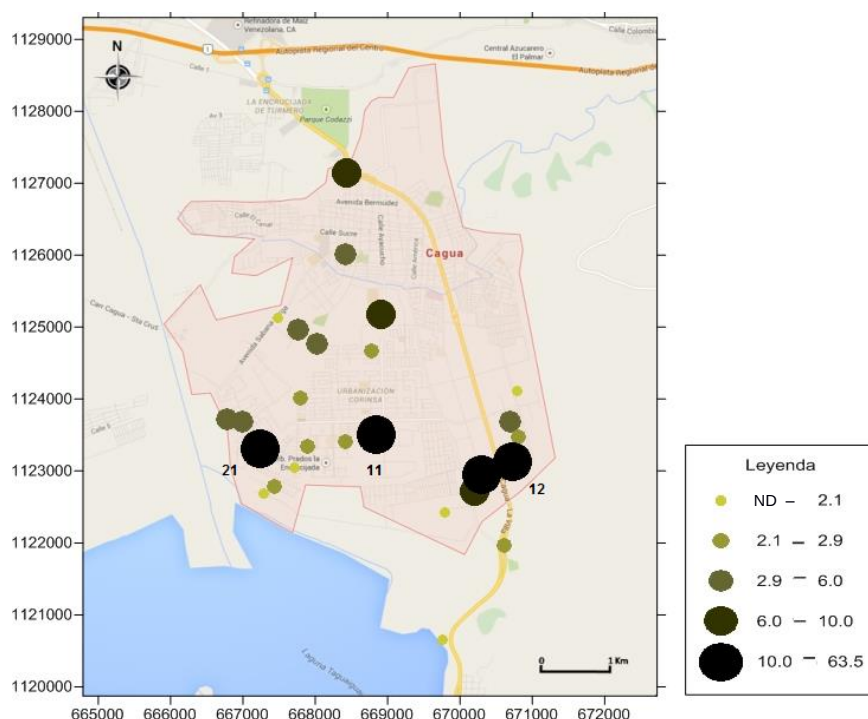


Figura 32. Distribución espacial del nitrato (NO_3^-), expresados en mg/L

6.3.4.4 Bicarbonato (HCO_3^-)

En la figura 29 se puede observar la caja gráfica generada para el bicarbonato (HCO_3^-), en la cual se obtuvo una mediana de 211 mg/L con valores mínimos y máximos de concentraciones de 121 mg/L y 301 mg/L respectivamente. Cabe destacar que se presenta un valor anómalo correspondiente a la muestra MASSCA-03 de 373 mg/L,

geográficamente captada en el sector Campo Alegre. Asimismo, es importante señalar que la caja gráfica para esta especie química refleja un conjunto de datos simétricos.

El ion bicarbonato (HCO_3^-) es la especie aniónica dominante en el presente estudio, debido a que presenta las mayores concentraciones en las aguas subterráneas captadas; lo que permite indicar que en el 92% de la totalidad de las muestras, esta especie química predomina con respecto a los aniones restantes de interés en la presente investigación.

La figura 33 muestra la distribución espacial del ion bicarbonato (HCO_3^-), donde se observan las mayores concentraciones de este ion en el sector industrial de la ciudad de Cagua, así como en los asentamientos urbanos. El aporte de esta especie química a las aguas subterráneas está vinculado fuertemente con la disolución de CO_2 atmosférico, así como también a la disolución de carbonatos y meteorización de silicatos y aluminosilicatos, tales como feldespatos, piroxenos y plagioclasas [5].

En el mismo orden de ideas, Kattan (2006) indica que la concentración de bicarbonato (HCO_3^-) también puede provenir de reacciones de oxidación de la materia orgánica. Nótese en la figura 33, que los puntos de mayor concentración de este ion, identificados como 14 y 24 corresponden al sector Brisas de Ciudad Jardín, donde fueron captadas las muestras MASSBCJ-14 y MASSBCJ-24 respectivamente; mientras que el punto 21 pertenece al sector La Segundera donde se colectó la muestra MASSLS-21. Es importante señalar que ambos sectores son urbanismos recientes que presentan problemas de contaminación; en lo que respecta al sector donde fue tomada la muestra MASSBCJ-14, no se cuenta con un sistema de distribución eficiente de las aguas servidas. Por su parte, en el sector donde fue captada la muestra MASSBCJ-24, existía un fuerte olor de materia orgánica asociada al ganado; asimismo en el sector La Segundera, donde se colectó la muestra MASSLS-21, existen áreas utilizadas como

vertederos de basura. En base a lo antes expuesto, se puede señalar que las altas concentraciones del ion bicarbonato (HCO_3^-) presentes en la zona de estudio se debe a la oxidación de la materia orgánica proveniente de los lixiviados de los vertederos de basura y a las aguas servidas.

En otro orden de ideas, el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) señala que el límite máximo permitido para aguas tipo 1 y 2, en relación al ion bicarbonato (HCO_3^-) es de 370 mg/L; mientras que para las aguas tipo 3 y 4, no se reporta un valor máximo. De acuerdo a esto, el 96% de las muestras de agua captadas corresponden a la clasificación de aguas tipo 1 y 2, las cuales se encuentran asociadas a usos domésticos, industriales y agropecuarios.

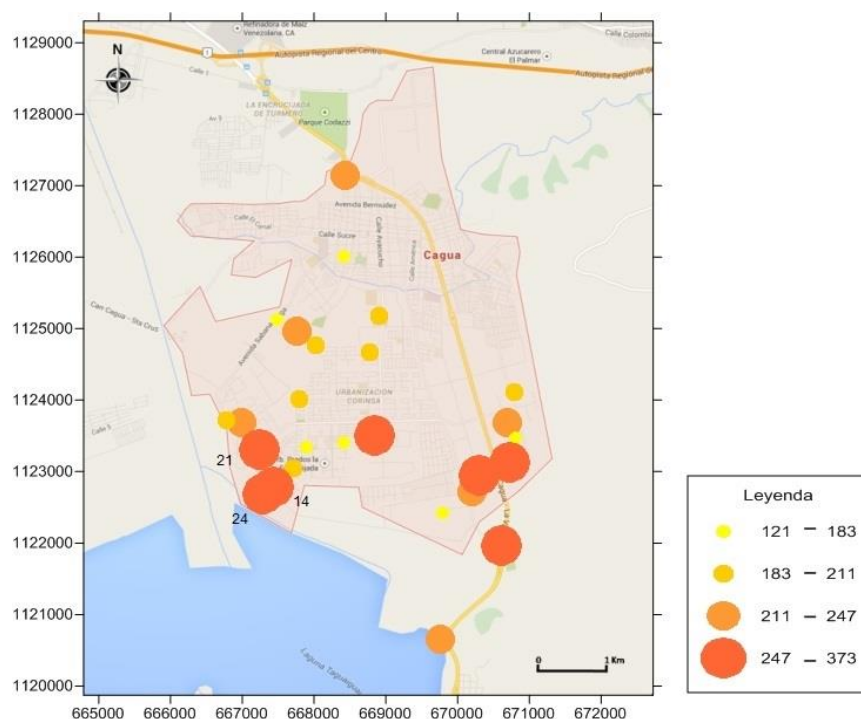


Figura 33. Distribución espacial del bicarbonato (HCO_3^-), expresados en mg/L

6.4 Caracterización hidrogeoquímica

En la presente sección se realiza la caracterización hidrogeoquímica de las muestras de aguas captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, con la finalidad de clasificar los tipos de aguas presentes de acuerdo a la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) y su composición química, empleando como herramienta el Diagrama de Piper.

6.4.1 Sólidos disueltos totales (SDT)

La concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) para cada una de las muestras de agua analizadas, se obtuvo a través de la sumatoria de las especies químicas determinadas, tales como los cationes, los aniones y la sílice disuelta (SiO_2). Los datos obtenidos para cada una de las muestras se presentan en la tabla B.3 del apéndice B.

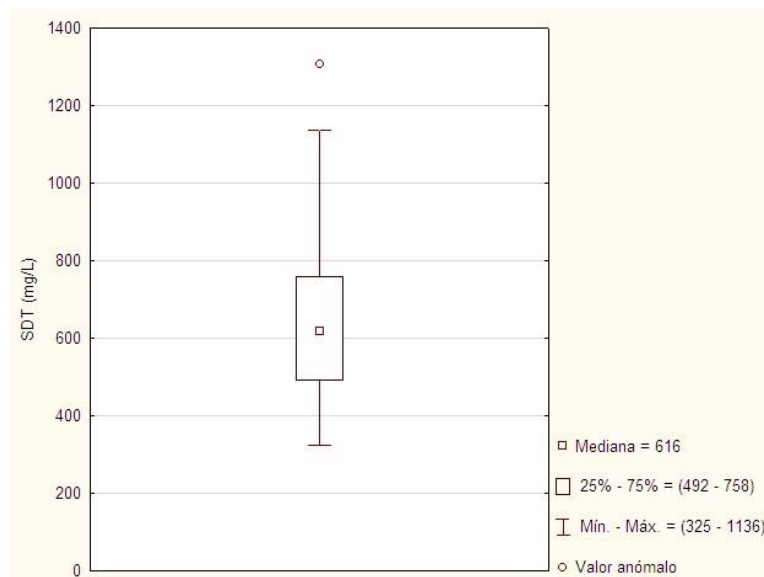


Figura 34. Caja gráfica de los SDT para las muestras de agua analizadas

Como se puede observar en la figura 34, se realizó una caja gráfica para las muestras

de aguas captadas en la zona de estudio, la cual representa la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), obteniendo como valor mínimo y máximo, 325 y 1136 mg/L respectivamente, presentando una mediana de 661 mg/L. Asimismo, existe un valor anómalo en la muestra MASSCA-03, con una concentración de 1305 mg/L.

De acuerdo a la clasificación de las aguas en función de la concentración de sólidos disueltos totales (SDT), expresada por Hem (1970) y ubicada en el apartado 2.7.1, se puede señalar que el 92% de las muestras se clasifican como aguas dulces, debido a que su concentración de SDT es menor de 1.000 mg/L; mientras que el 8% restante se clasifican como aguas salobres, ya que superan los 1.000 mg/L.

Cabe destacar que la muestra MASSCA-03 posee el valor de conductividad más elevado del total de las muestras analizadas de 2121 $\mu\text{S}/\text{cm}$, lo cual coincide con el dato anómalo presentado en la caja gráfica (figura 34). Dicho valor de conductividad, indica la existencia de una mayor concentración de iones en solución. Según Hem (1985) este parámetro depende de los iones en solución, así como del tamaño y carga de los mismos ^[12].

De acuerdo a lo antes señalado, el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) establece que el límite máximo permitido para la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) es de 1500 mg/L para las aguas tipo 1, y de 3000 mg/L para las aguas tipo 2. La muestra MASSCA-03 representa el valor anómalo de la totalidad de las muestras en función de la concentración de SDT, por lo que se puede señalar que con respecto a este parámetro, el 100% de las muestras analizadas corresponden a la clasificación de aguas tipo 1. Por consiguiente, la normativa nacional establece que el uso asociado a estas muestras debe ser con fines doméstico e industrial ^[22].

6.4.2 Diagrama de Piper

El diagrama de Piper es una herramienta geoquímica que permite clasificar las aguas subterráneas y superficiales, de acuerdo a la composición química determinada de los elementos mayoritarios en las mismas. Asimismo, dicho diagrama proporciona la identificación del tipo de agua, de probables procesos que intervienen en su composición, tales como la contaminación, la mezcla entre diferentes tipos de aguas, la interacción agua roca, entre otros ^[13].

Cabe señalar que los resultados obtenidos para las especies químicas de interés fueron procesados a través del programa computacional RockWorks 16, a fin de generar el diagrama en cuestión. En ese sentido, el diagrama de Piper obtenido para las muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, mostrado en la figura 35, permite identificar la presencia de tres (3) facies hidrogeoquímicas, a saber: sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas; bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas; y cloruradas y/o sulfatadas sódicas potásicas.

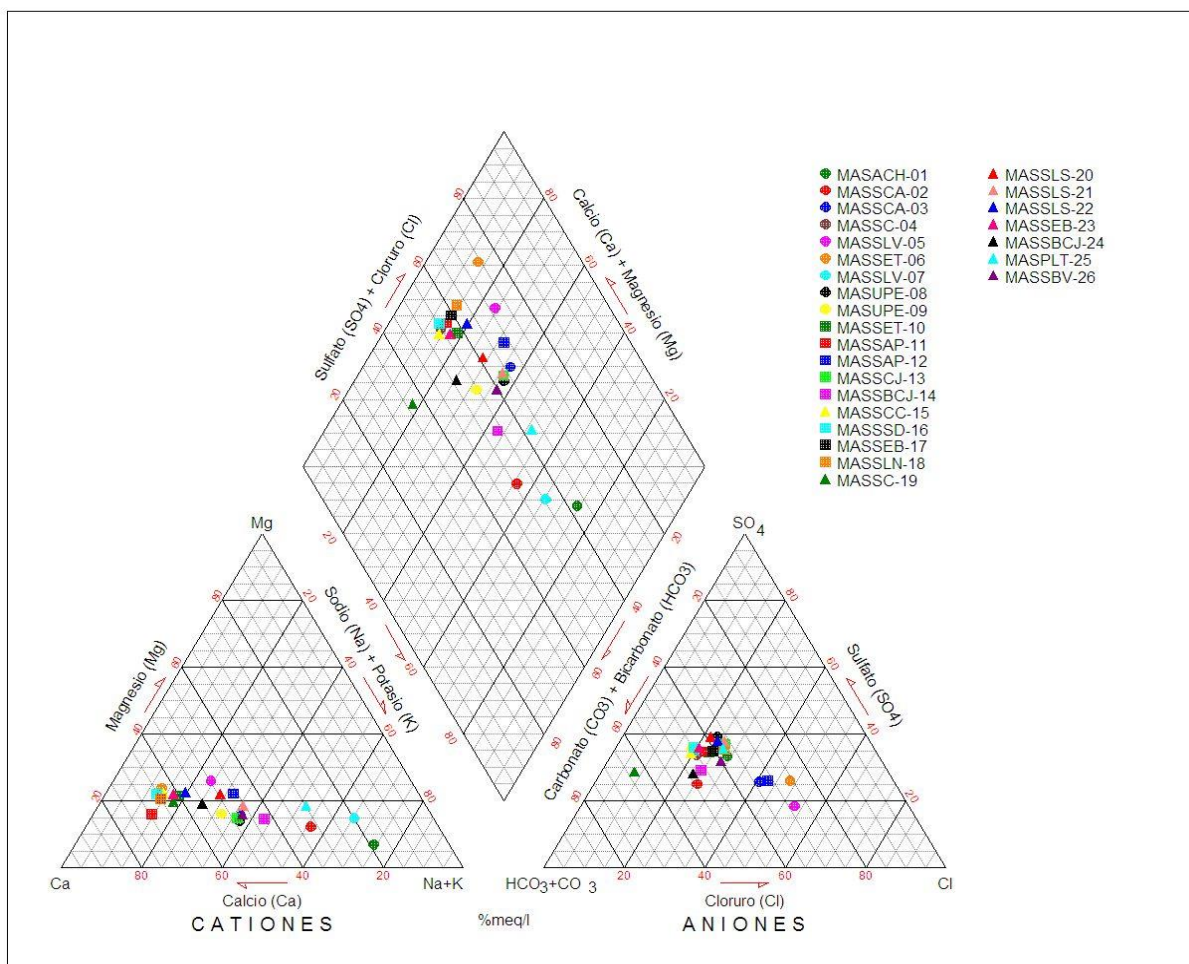


Figura 35. Diagrama de Piper para las muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüagüay

Por su parte, la tabla 5 presenta la distribución de los tipos de agua y su correspondencia con los pozos muestreados.

Tabla 5. Tipos de aguas presentes en la zona de estudio de acuerdo al diagrama de Piper

Sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas	Cloruradas y/o sulfatadas sódicas	Bicarbonatada cálcica y/o magnésica
MASSCA-03	MASACH-01	MASSC-19
MASSC-04	MASSCA-02	-
MASSLV-05	MASSLV-07	-
MASSET-06	MASPLT-25	-
MASUPE-08	-	-
MASUPE-09	-	-
MASSET-10	-	-
MASSAP-11	-	-
MASSAP-12	-	-
MASSCJ-13	-	-
MASSBCJ-14	-	-
MASSCC-15	-	-
MASSSD-16	-	-
MASSEB-17	-	-
MASSLN-18	-	-
MASSL-20	-	-
MASSL-21	-	-
MASSL-22	-	-
MASSEB-23	-	-
MASSBCJ-24	-	-
MASSBV-26	-	-

De manera general, las muestras presentan una composición muy similar entre sí, con una tendencia al enriquecimiento en HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- en el triángulo que representa la

composición aniónica; mientras que en el triángulo izquierdo, se observa el enriquecimiento en los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y Na^+ .

En este sentido, los tres (3) tipos de agua identificados mediante el empleo del diagrama de Piper (figura 35) en la zona de estudio, están distribuidos como aguas sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}\text{-Cl}^-$) en un 81% de la totalidad de las muestras, aguas cloruradas y/o sulfatadas sódicas potásicas ($\text{Na}^+\text{-K}^+\text{-Cl}^-\text{-SO}_4^{2-}$) en el 15% de las muestras; y finalmente, el tipo de agua bicarbonatada cálcica y/o magnésica ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$) en el 4% de las muestras restantes.

En la zona de estudio, de acuerdo al tipo de agua obtenido, se puede inferir que la concentración de iones Ca^{2+} y HCO_3^- pudiese provenir de la interacción agua-roca producto de la disolución de calcita existente en los esquistos calcáreos, los mármoles y las calizas de la Filita de Tucutunemo o en los mármoles presentes en la Formación Paracotos ^[4]. Asimismo, el aporte del ion Mg^{2+} se puede atribuir a la litología de la Metalava de Los Naranjos, la cual está conformada por una metalava maciza que contiene minerales que en su estructura presentan este ion, tales como silicatos magnesianos o ferromagnesianos ^[40].

Por su parte, la concentración del ion SO_4^{2-} encontrada en las muestras analizadas, pudiese estar asociada a procesos de interacción agua-roca, específicamente en esquistos calcáreos y mármoles característicos de las formaciones aledañas a la zona de estudio. Asimismo, dicha concentración puede ser originada por procesos de lixiviación de SO_4^{2-} a partir de disolución de minerales como yeso y pirita, reportados en algunos sectores de la cuenca del Lago de Valencia ^[50], lo que indica que este proceso podría ser una fuente de este ion en las aguas subterráneas de la zona de estudio.

Finalmente, el aporte del ion Cl^- se atribuye principalmente a las actividades domésticas e industriales desarrolladas en la zona de estudio, debido a que el sistema de

alcantarillado de la ciudad de Cagua no es eficiente, lo que a su vez hace que una importante cantidad de desechos percolen a través del subsuelo pasando a formar parte de la composición química de las aguas del acuífero. Asimismo, otra fuente del ion Cl^- , podría asociarse a la infiltración de agua de lluvia, aunque también podría originarse en menor proporción, a la disolución de sales acumuladas en el suelo durante la época de sequía, las cuales son disueltas e infiltradas hacia el acuífero.

A fin de obtener una clasificación más rigurosa de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, fueron empleadas las figuras de Stiff (apéndice H). Estas figuras constituyen una herramienta geoquímica que permite identificar los tipos de agua según su composición y su origen de acuerdo al polígono característico obtenido para cada muestra de agua. En la siguiente tabla se presenta la subdivisión de los tipos de aguas encontrados en el presente estudio.

Como se puede observar en la tabla 6, las Figuras de Stiff permitieron clasificar las aguas estudiadas en ocho (8) subtipos diferentes, a saber: aguas bicarbonatadas sulfatadas cálcicas magnésicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-SO}_4^{2-}$) representando el 38% de las muestras, aguas tipo bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas ($\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-SO}_4^{2-}$) y bicarbonatadas sulfatadas cálcicas sódicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-HCO}_3^- \text{-SO}_4^{2-}$), que corresponden cada una al 15% del total de las muestras analizadas; aguas sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-SO}_4^{2-}\text{-HCO}_3^-$) correspondiendo al 12% de la totalidad de las muestras; aguas tipo cloruradas bicarbonatadas cálcicas sódicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Na}^+\text{-Cl}^- \text{-HCO}_3^-$) representando el 8%; y finalmente, las aguas bicarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas ($\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^- \text{-Cl}^-$), cloruradas bicarbonatadas cálcicas magnésicas ($\text{Ca}^{2+}\text{-Mg}^{2+}\text{-Cl}^- \text{-HCO}_3^-$) y cloruradas bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas ($\text{Na}^+\text{-Ca}^{2+}\text{-Cl}^- \text{-HCO}_3^- \text{-SO}_4^{2-}$), representando cada una el 4% de la población de muestras captadas.

Tabla 6. Subtipos de aguas presentes en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay de acuerdo a las figuras de Stiff

Subtipos de aguas	Muestras
Bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas	MASACH-01, MASSLV-07, MASSBCJ-14 y MASPLT-25
Bicarbonatadas sulfatadas cálcicas magnésicas	MASSC-04, MASSET-10, MASSAP-11, MASSCC-15, MASSSD-16, MASSEB-17, MASSLN-18, MASSC-19, MASSLS-22 y MASSEB-23
Bicarbonatadas sulfatadas cálcicas sódicas	MASSCJ-13, MASSLS-20, MASSBCJ-24 y MASSBV-26
Bicarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas	MASSCA-02
Sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas	MASUPE-08, MASUPE-09 y MASSLS-21
Cloruradas bicarbonatadas cálcicas sódicas	MASSCA-03 y MASSAP-12
Cloruradas bicarbonatadas cálcicas magnésicas	MASSLV-05
Cloruradas bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas	MASSET-06

Nótese que los subtipos de aguas obtenidos mediante las figuras de Stiff se encuentran relacionados con los tipos de aguas identificados empleando el diagrama de Piper, indicando que entre las facies existentes dominan las aguas bicarbonatadas sulfatadas cálcicas magnésicas (Ca^{2+} - Mg^{2+} - HCO_3^- - SO_4^{2-}). Este tipo de agua se encuentra principalmente asociado a la disolución de minerales carbonatados y a la meteorización de silicatos y aluminosilicatos presentes en la litología de la zona de estudio.

6.5 Calidad de agua

Para determinar la calidad de las muestras de aguas subterráneas estudiadas, es necesario evaluar los parámetros físicos y químicos que pueden afectar su uso potencial atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), que controla la calidad de los cuerpos de agua en nuestro país. Para este estudio, se evalúan los siguientes parámetros: pH, conductividad y las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2). Finalmente, se realiza una comparación de las concentraciones determinadas para dichos parámetros en función de lo expresado en la ley, para determinar el tipo de agua de cada muestra y sus usos asociados.

6.5.1 Uso del agua según su calidad

La calidad de las muestras de agua colectadas en la zona de estudio fue evaluada atendiendo a los valores medidos de los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, así como también a los intervalos de concentración obtenidos para cada una de las especies químicas determinadas, tomando como valores de referencia los establecidos en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

Por su parte, las medidas de los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, y las determinaciones de las concentraciones de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , NO_3^- y sílice disuelta (SiO_2), indican que la mayoría de las muestras de aguas subterráneas estudiadas no se ven afectadas por las actividades desarrolladas en la zona. A continuación se describe la clasificación de la aguas tomando en cuenta la concentración de las especies determinadas; igualmente, se presenta la tabla 7 que resume dicha clasificación, de acuerdo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

La mayoría de los valores medidos para los parámetros fisicoquímicos pH y conductividad, así como la concentración determinada de los sólidos disueltos totales (SDT), están por debajo de los valores máximos permitidos por la normativa legal venezolana. En cuanto al pH, la totalidad de las muestras se encuentran ubicadas en el intervalo exigido por la norma para la clasificación de aguas tipo 1, el cual es de 6,0 – 8,5 unidades de pH.

De igual forma, la concentración de sólidos disueltos totales (SDT) indica que el total de las muestras en estudio se encuentran por debajo del límite permisible para aguas tipo 1 (1500 mg/L), lo cual permite clasificarlas dentro de esta categoría.

En lo que respecta a la conductividad, solo la muestra MASSCA-03 presenta un valor por encima del límite máximo permitido, el cual es de 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Esto conlleva a clasificar a dicha muestra como superior al límite aceptable.

En lo que se refiere a la concentración del ion HCO_3^- , sólo la muestra MASSCA-03, tiene una concentración determinada por encima del límite máximo permitido para aguas tipo 1, el cual es de 370 mg/L. Debido a esto, dicha muestra es clasificada como superior al límite aceptable.

Por su parte, la norma establece que para clasificar las aguas como tipo 1, la concentración de NO_3^- no debe exceder de 10 mg/L; sin embargo, la concentración de las muestras MASSCA-03, MASSAP-11, MASSAP-12 y MASSLS-21, presentan concentraciones por encima del límite máximo permisible, por lo que son clasificadas como aguas tipo 2.

Cabe destacar que la concentración de las muestras restantes está dentro del límite máximo permitido para la concentración de las especies Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} .

y sílice disuelta (SiO_2). En la tabla 3 de la sección 2.11, se presentan los límites de concentración de dichas especies químicas, atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

Finalmente, se debe señalar que la mayoría de las muestras, exceptuando las rotuladas como MASSCA-03, MASSAP-11, MASSAP-12 y MASSLS-21, presentan valores de concentración de los iones antes mencionados por debajo del límite máximo permitido, esto según lo expuesto en la normativa nacional, lo que conlleva a clasificarlas como aguas tipo 1.

En resumen, el 85% de las muestras captadas y analizadas, correspondientes en su mayoría a las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, pertenecen a la clasificación de aguas tipo 1. En el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), se señala que las aguas de éste tipo resultan ser óptimas en cuanto a calidad, para todo uso doméstico e industrial, que requiera de agua potable, siempre que éstas formen parte de un producto o subproducto destinado al consumo humano [22].

Por su parte, el 15% de las muestras restantes constituido por MASSCA-03, MASSAP-11, MASSAP-12 y MASSLS-21, corresponden a la clasificación de aguas tipo 2; y de acuerdo a lo expresado en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995), estas aguas son destinadas a usos agropecuarios [22].

Tabla 7. Clasificación de las aguas captadas en la zona de estudio según su calidad

Muestra	Parámetro fuera del límite permitido	Tipo de agua
MASACH-01	Ninguno	Tipo 1
MASSCA-02	Ninguno	Tipo 1
MASSCA-03	Conductividad, NO_3^- y HCO_3^-	Tipo 2
MASSC-04	Ninguno	Tipo 1
MASSLV-05	Ninguno	Tipo 1
MASSET-06	Ninguno	Tipo 1
MASSLV-07	Ninguno	Tipo 1
MASUPE-08	Ninguno	Tipo 1
MASUPE-09	Ninguno	Tipo 1
MASSET-10	Ninguno	Tipo 1
MASSAP-11	NO_3^-	Tipo 2
MASSAP-12	NO_3^-	Tipo 2
MASSCJ-13	Ninguno	Tipo 1
MASSBCJ-14	Ninguno	Tipo 1
MASSCC-15	Ninguno	Tipo 1
MASSSD-16	Ninguno	Tipo 1
MASSEB-17	Ninguno	Tipo 1
MASSLN-18	Ninguno	Tipo 1
MASSC-19	Ninguno	Tipo 1
MASSLS-20	Ninguno	Tipo 1
MASSLS-21	NO_3^-	Tipo 2
MASSLS-22	Ninguno	Tipo 1
MASSEB-23	Ninguno	Tipo 1
MASSBCJ-24	Ninguno	Tipo 1
MASPLT-25	Ninguno	Tipo 1
MASSBV-26	Ninguno	Tipo 1

Es importante señalar que de acuerdo con la información obtenida durante la salida de campo, se pudo conocer el uso dado al agua de los pozos muestreados. A continuación se presenta una breve descripción de los usos dados a las muestras captadas.

Para la muestra MASSCA-03, se indica que la misma fue tomada en una fábrica de envases plásticos, lo que permite señalar que su uso es inadecuado, ya que de acuerdo a su clasificación, debería ser usada para actividades agropecuarias y no para usos industriales.

Por su parte, la muestra rotulada como MASSAP-11, proviene de la empresa Agropatria y es usada para la limpieza y actividades de riego de las áreas verdes del lugar; lo cual corresponde con lo recomendado en este estudio, debido a que es clasificada como agua tipo 2, destinada a usos agropecuarios.

De igual forma, la muestra MASSAP-12 fue tomada de otra sucursal de la empresa Agropatria y también es utilizada para actividades de riego. Cabe destacar que el lugar donde funciona esta empresa, antiguamente era una zona agrícola, lo que puede explicar la elevada concentración de NO_3^- (63,5 mg/L) debido al uso de fertilizantes. De acuerdo a los resultados obtenidos en el presente trabajo, el uso dado a esta agua es adecuado, ya que es clasificada como tipo 2, siendo asociada a fines agropecuarios.

El agua correspondiente a la muestra identificada como MASSLS-21, es usada para consumo humano; de acuerdo a lo establecido en esta investigación, el uso dado es inadecuado. Tomando como referencia el Decreto 883 ^[22], se indica que dicha muestra debe emplearse para fines agropecuarios y no para uso doméstico.

Por otra parte, para la muestra de agua superficial tomada de la Laguna de Taigüaigüay, rotulada como MASPLT-25, no se obtuvo información acerca de su uso; sin embargo, en lo que respecta a este estudio, se encontró que dicha muestra se encuentra en la

clasificación de aguas tipo 1.

Finalmente, las muestras restantes fueron captadas en sistemas de distribución de agua potable y en urbanismos, exceptuando la muestra MASSET-06 que fue colectada en una empresa de construcción de baterías. De acuerdo con los resultados obtenidos, se señala que el uso de estas aguas es adecuado por pertenecer a la clasificación de aguas tipo 1, de acuerdo a lo establecido en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

6.6 Relaciones interiónicas

Las relaciones interiónicas entre especies mayoritarias, minoritarias y/o traza han sido de particular ayuda en muchos estudios de aguas subterráneas, debido a que pueden ser utilizadas para indicar los probables procesos involucrados durante la interacción agua-roca, así como para identificar procesos como disolución, precipitación y/o intercambio iónico, entre otros ^[3].

De acuerdo con lo antes mencionado, en la presente sección se presentan las relaciones molares interiónicas que son de ayuda para corroborar los posibles factores y procesos que controlan la composición química de las aguas estudiadas.

6.6.1 Relación HCO_3^- / Conductividad

En la figura 36 se presenta la relación de la concentración de bicarbonato (HCO_3^-), expresada en mmol/L, frente a la conductividad medida en campo, nótese la existencia de dos grupos de muestras, el primer grupo tiene una buena correlación lineal con un coeficiente de determinación $R^2 = 0,8152$ y con una apreciable dispersión; mientras que el segundo grupo, que corresponde a las muestras MASSCA-03, MASSLV-05, MASSET-06 y MASSAP-12, ubicadas en el sector industrial de la ciudad de Cagua,

presenta un comportamiento disperso para dicha relación.

La presencia de estos grupos apunta a señalar que existen diferentes fuentes de aporte de HCO_3^- hacia las aguas subterráneas, destacando entre ellos al aporte atmosférico, a la posible disolución de carbonatos y silicatos, sin descartar la oxidación de la materia orgánica ^[56].

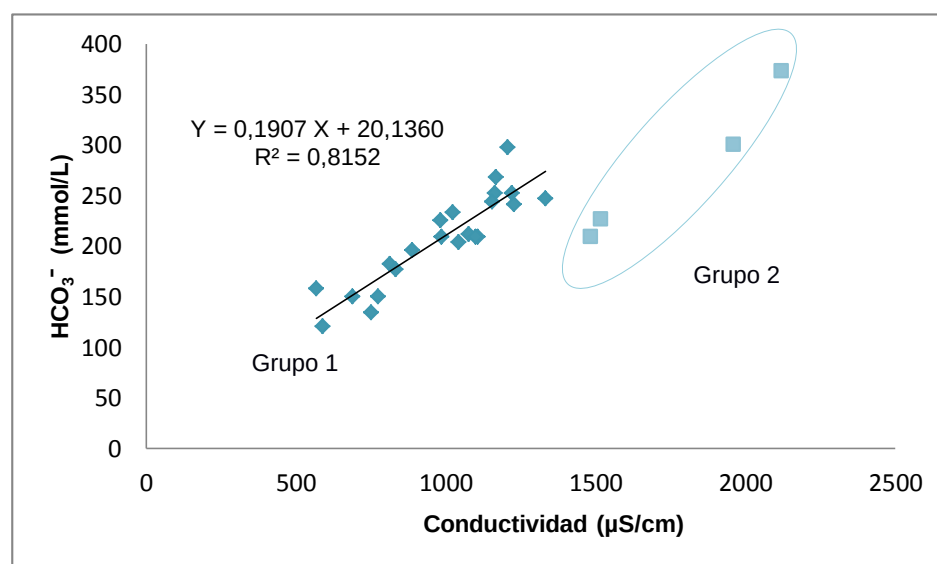


Figura 36. Relación entre la concentración de bicarbonato y la conductividad

6.6.2 Relación $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$

Custodio y Llamas (1976) señalan que la relación $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ es de interés para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido del flujo subterráneo; así como para tener una idea sobre el origen de estas aguas. Asimismo, estos autores indican que dicha relación varía entre 0,1 y 5 para aguas meteóricas, lo que sugiere que la totalidad de las muestras analizadas en la presente investigación han sido infiltradas en áreas continentales. En la tabla 8, se presenta la relación $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^-$ para las veintiséis (26)

muestras de aguas estudiadas, cuyos valores oscilan entre 0,13 y 1,87.

Tabla 8. Relación entre cloruro y bicarbonato para cada una de las muestras captadas

Muestra	$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$	Muestra	$\text{Cl}^-/\text{HCO}_3^-$
MASACH-01	0,77	MASSBCJ-14	0,53
MASSCA-02	0,52	MASSCC-15	0,42
MASSCA-03	1,21	MASSSD-16	0,43
MASSC-04	0,46	MASSEB-17	0,61
MASSLV-05	1,87	MASSLN-18	0,72
MASSET-06	1,87	MASSC-19	0,13
MASSLV-07	0,46	MASSLS-20	0,56
MASUPE-08	0,63	MASSLS-21	0,72
MASUPE-09	0,41	MASSLS-22	0,64
MASSET-10	0,57	MASSEB-23	0,48
MASSAP-11	0,53	MASSBCJ-24	0,47
MASSAP-12	1,36	MASPLT-25	0,71
MASSCJ-13	0,72	MASSBV-26	0,70

En otro orden de ideas, en la figura 37 se observa la representación gráfica de la concentración de cloruro (Cl^-) en función de la concentración de bicarbonato (HCO_3^-), en la cual se diferencian claramente dos grupos de muestras con una alta dispersión. Las muestras MASSCA-03, MASSLV-05, MASSET-06 y MASSAP-12 corresponden al grupo 2 y se encuentran ubicadas en el sector industrial de la zona de estudio. Esto sugiere que ambas especies tienen diferentes fuentes asociadas a las aguas subterráneas analizadas en la presente investigación.

En relación al cloruro (Cl^-), en vista de que no se ha reportado su existencia en minerales que conforman la litología de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, se encuentra principalmente asociado al aporte atmosférico, a la disolución de sales evaporíticas y a las actividades urbanas e industriales desarrolladas en la zona de estudio.

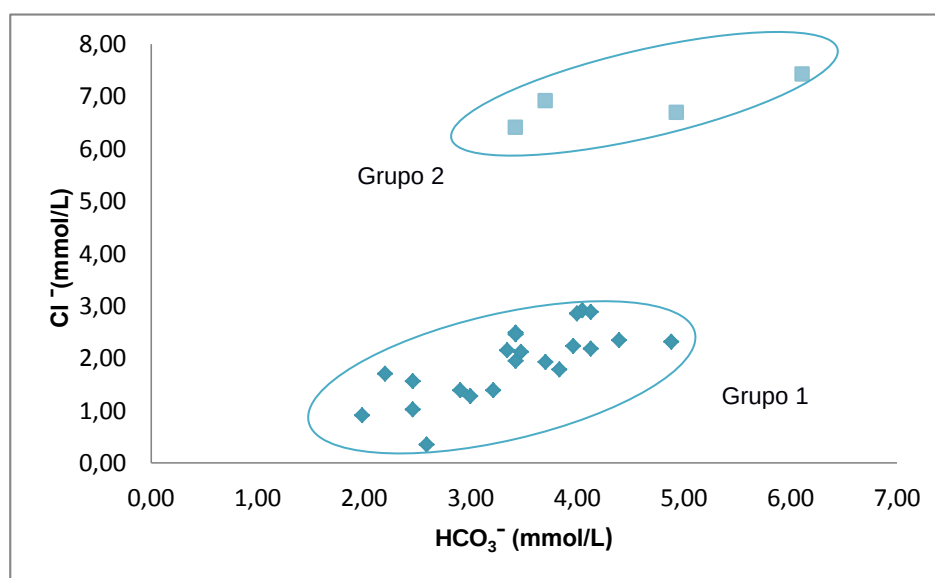


Figura 37. Relación entre la concentración de bicarbonato y cloruro

6.6.3 Relación SO_4^{2-} / Cl^-

La figura 38 muestra la relación de las especies químicas SO_4^{2-} y Cl^- para las veintiséis (26) muestras de agua captadas en la zona de estudio. Nótese la existencia de dos grupos de muestras; el primero con una evidente dispersión, mientras que el segundo corresponde a las muestras MASSCA-03, MASSLV-05, MASSET-06 y MASSAP-12, ubicadas en la zona industrial de la ciudad de Cagua.

En las unidades geológicas presentes en la zona de estudio no existen minerales que contengan cloruro (Cl^-) en su estructura; mientras que el sulfato (SO_4^{2-}) podría estar asociado a la presencia de minerales como yeso y/o anhidrita, fases minerales reportadas en la cuenca del Lago de Valencia, de acuerdo con lo señalado por Martínez (2003). En relación a lo antes expuesto y a la tendencia obtenida en la figura 38, Rajmohan y Elango (2006) ^[59] señalan que ambas especies pueden ser derivadas de las actividades antrópicas, lo que permite indicar que el aporte de Cl^- y SO_4^{2-} en las muestras pertenecientes al grupo 2, pudiese estar asociado principalmente a las actividades que allí se practican.

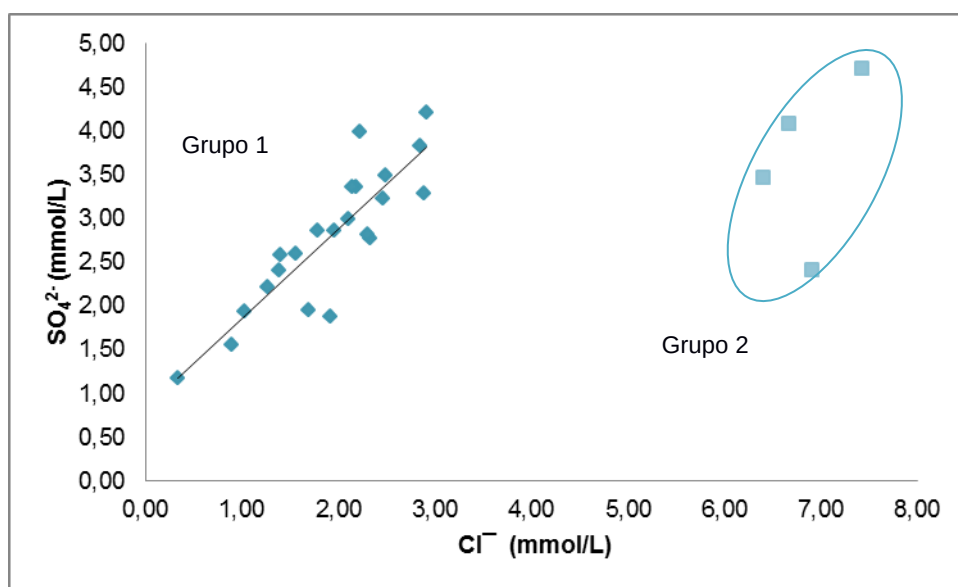


Figura 38. Relación entre el sulfato y el cloruro

6.6.4 Relación $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} / \text{SO}_4^{2-} + \text{HCO}_3^-$

En la figura 39 se presenta la relación entre el calcio y magnesio en función del sulfato y el bicarbonato, propuesta por Jalali (2005) como herramienta para verificar la posible disolución de calcita, dolomita y yeso en las aguas subterráneas ^[60]. En la citada figura

se puede observar una correlación lineal dispersa de los datos obtenidos para dicha relación. Sin embargo, se observa cierta correspondencia entre las especies antes mencionadas, lo que indica que una de las fuentes de Ca^{2+} , Mg^{2+} , SO_4^{2-} y HCO_3^- se encuentra asociada al proceso de interacción agua-roca.

Como se mencionó anteriormente, el yeso ha sido reportado en la litología de áreas aledañas a la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, por lo que el proceso de interacción agua-roca se manifiesta no sólo a través de la hidrólisis de este mineral sino también mediante la disolución de la calcita y dolomita, presentes en las rocas metamórficas identificadas en la zona de estudio, tales como filitas carbonáceas, esquistos calcáreos y metalavas.

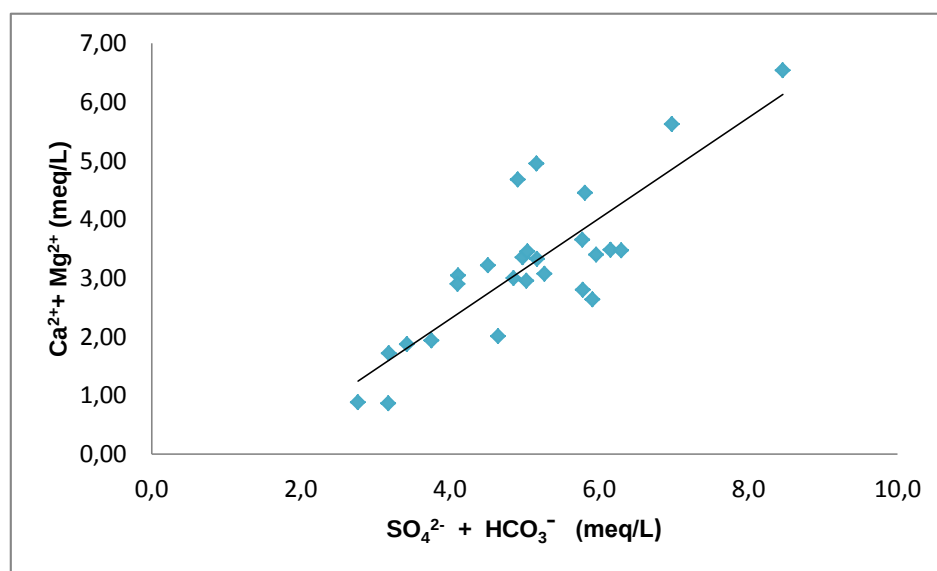


Figura 39. Relación entre el calcio y magnesio en función del sulfato y el bicarbonato

6.7 Procesos controladores de la composición química de las aguas subterráneas

Con la finalidad de identificar algunos posibles factores que controlan la composición química de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, se elaboraron los diagramas de Gibbs. Estos diagramas son ampliamente usados para establecer la relación de la composición del agua y de las características litológicas del acuífero ^[57], y consisten en la proyección de los sólidos disueltos totales (SDT) frente a la relación $\text{Na}^+ + \text{K}^+ / \text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+}$; así como de los sólidos disueltos totales (SDT) en función de la relación $\text{Cl}^- / \text{HCO}_3^- + \text{Cl}^-$. Ambos diagramas fueron realizados a escala logarítmica, siendo divididos en tres (3) zonas que representan los procesos de evaporación, interacción agua-roca y precipitación ^[61].

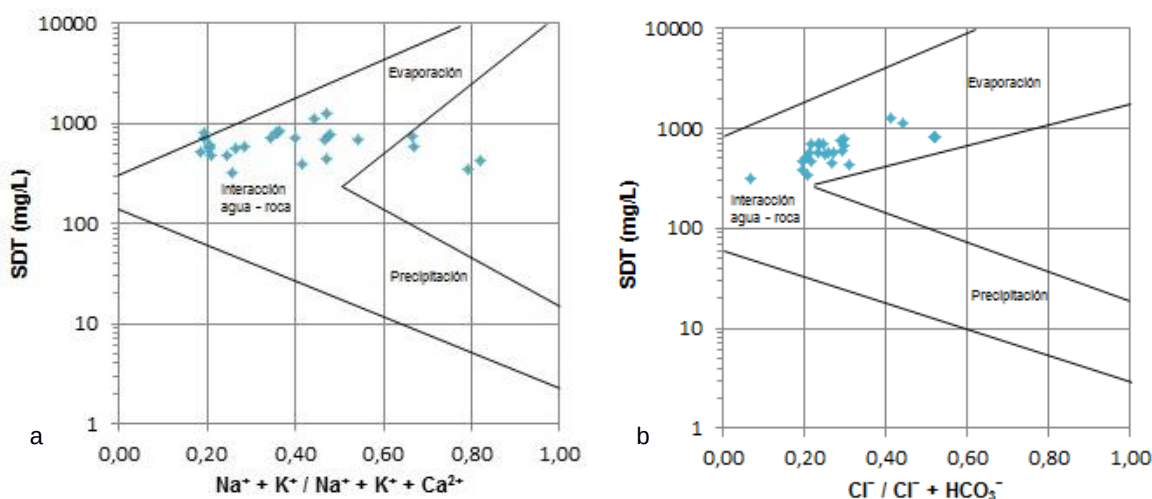


Figura 40. Diagramas de Gibbs

Como se puede observar, en la figura 40 son mostrados los diagramas de Gibbs obtenidos para este estudio, notándose que la mayoría de las muestras se encuentran ubicadas en la zona central con una ligera tendencia hacia la zona de evaporación, indicando que el proceso que está dominando en la composición de las aguas

analizadas es el proceso de interacción agua-roca, aunado a la influencia del factor climático mediante la evaporación. No obstante, en la figura 40.a, existen pocas muestras que no entran en el bumerang del diagrama de Gibbs, lo que parece indicar que existen uno o más factores adicionales que controlan la composición química de las aguas en estudio ^[31], tales como las actividades antrópicas.

7. CONCLUSIONES

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

1. En la zona norte de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay predominan tres (3) tipos de aguas, a saber: sulfatadas y/o cloruradas cálcicas y/o magnésicas, representando el 81% de las muestras; cloruradas y/o sulfatadas sódicas representando el 15% de las muestras, y finalmente las aguas bicarbonatadas cálcicas y/o magnésicas con el 4% de las muestras.
2. Se identificaron ocho (8) subtipos de aguas subterráneas presentes en la zona de estudio, a saber: bicarbonatadas sulfatadas cálcicas magnésicas, bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas, bicarbonatadas sulfatadas cálcicas sódicas, sulfatadas bicarbonatadas cálcicas sódicas, cloruradas bicarbonatadas cálcicas sódicas, bicarbonatadas cloruradas sódicas cálcicas, cloruradas bicarbonatadas cálcicas magnésicas y cloruradas bicarbonatadas sulfatadas sódicas cálcicas.
3. De acuerdo con la concentración de los sólidos disueltos totales (SDT) determinados en las muestras, se estableció que el 92% son aguas dulces y el 8% restante son aguas salobres.
4. El 85% de las muestras de agua estudiadas corresponden a la clasificación de aguas tipo 1 y son óptimas en cuanto a calidad para todo uso doméstico e industrial, que requiera de agua potable, según lo establecido por la normativa legal para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos del Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

5. El 15% de las muestras restantes pueden ser destinadas a usos agropecuarios, de acuerdo a lo expuesto en el Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995) y pertenecen a la clasificación de aguas tipo 2.
6. Los factores que controlan la calidad química de las aguas subterráneas de la zona de estudio son principalmente la litología, la actividad antrópica, el clima y el tiempo de residencia.
7. El proceso que controla la composición química de las aguas subterráneas de la localidad es principalmente la interacción agua-roca, a través de la disolución de minerales carbonatados como calcita y dolomita; así como la hidrólisis de silicatos.

8. RECOMENDACIONES

Con la finalidad de ampliar el estudio relacionado con las aguas subterráneas de la zona estudiada, son propuestas las siguientes recomendaciones:

1. Realizar la determinación de los elementos traza Li, B, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr, Ba, Cd, Cr, Hg, As y Pb en la zona de estudio, con el fin de conocer sus concentraciones y el grado en el que afectan la calidad química de las aguas subterráneas.
2. Considerar tanto el estudio de especies orgánicas, así como de parámetros bioquímicos y microbiológicos tales como demanda de oxígeno, coliformes totales, coliformes fecales, enterococos fecales, entre otros, con la finalidad de mejorar la clasificación de las aguas presentes en la zona de estudio de acuerdo a su calidad.
3. Planificar un muestreo más amplio que permita abarcar toda la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay y profundizar en la interpretación de los factores y procesos que controlan la composición química de las aguas subterráneas.
4. Realizar un estudio de los isótopos estables ^{18}O , D y ^{15}N con la finalidad de determinar el origen de las aguas subterráneas y del NO_3^- presente en la zona de estudio.

9. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Davis, S. y De Weist, R. (1971). *Hidrogeología*. Editorial Ariel, S. A. Barcelona. 563 p.
- [2] Gil, J. Recursos Hidrogeológicos. Disponible: <http://gea.ciens.ucv.ve/geoquimi/hidro/wp-content/uploads/2011/07/recursos.pdf> [Consulta: 2014, Enero]
- [3] Montero, R. (1996). *Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos*. Trabajo de ascenso. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra. 203 p.
- [4] Kutos, O. (2012). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua*. Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra. 121 p.
- [5] Custodio, E. y Llamas, M. (1976). *Hidrología Subterránea*. Ediciones Omega, S. A. Casanova. Barcelona, España. 2359 p.
- [6] Ávila García, Patricia. (1996). *Escasez de agua en una región indígena de Michoacán: el caso de la Meseta Purépecha*. Editorial El Colegio de Michoacán A.C., Pág. 1 – 29.
- [7] Gavidia, V. y Rueda, J. (2006). *Agua*. Centro de Investigación y Documentación Educativa, Ministerio de Educación y Ciencia, España. 31 - 32 p.
- [8] United States of Geological Survey (USGS). (2013). Disponible: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanish.html#gwstorag> [Consulta: 2013, Diciembre]

- [9] Maderey, L. y Jiménez, A. (2005). *Principios de Hidrogeografía. Estudio del Ciclo Hidrológico*. Serie Textos Universitarios. Número 1. Universidad Nacional Autónoma de México. 100 p.
- [10] Sánchez, F. (2013). *Conceptos Fundamentales de Hidrogeología*. Universidad de Salamanca. España. Disponible: <http://hidrologia.usal.es/hidro .htm> [Consulta: 2013, Diciembre]
- [11] White, D. (1957). *Magmatic, connate and metamorphic waters*. Bulletin of the Geological Society of America. Vol. 68, p 1659 – 1682.
- [12] Hem, J. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. U.S. Geological Survey Water – Supply, Paper 2254, 3rd edition. 263 p.
- [13] Piper, A. (1944). *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water - analyses*. American Geophysical Union, Volume 25, Issue 6, p. 914 – 928.
- [14] Fetter, C. (2001). *Applied Hydrogeology*. Prentice Hall. 4th edition. United States of America, New Jersey. 598 p.
- [15] Stiff, H. (1951). *The interpretation of chemical water analysis by means of patterns*. Journal Petroleum Technology. Vol. 3, p 15 - 17.
- [16] Lillo, J. (2010). *Técnicas Hidrogeoquímicas*. Universidad Rey Juan Carlos. España. 140 p.
- [17] *Lección 17. Hidroquímica. Generación de la composición química del agua. Relación composición química – litología, fenómenos modificadores*. Disponible: www.agua.uji.es/pdf/leccionRH17.pdf [Consulta: 2014, Febrero]

- [18] Medrano, W. (2001). *Evaluación de la calidad de aguas residuales de la planta de tratamiento de Alba Rancho (SEMAPA) con fines de riego*. Tesis de Maestría Profesional en “Levantamiento de Recursos Hídricos” (Manejo y conservación de cuencas). CLAS. 48 p.
- [19] Tarbuck, E. y Lutgens, F. (1999). *Ciencia de la Tierra: una introducción a la geología física*. Prentice Hall. Madrid. p 243 – 259.
- [20] United States of Geological Survey (USGS). (2013). Disponible: <http://ga.water.usgs.gov/edu/watercyclespanishhi.html> [Consulta: 2013, Diciembre]
- [21] Domenico, P. and Schwartz, F. (1998). *Physical and Chemical Hydrogeology*. John Wiley and Sons. 2° edition. 554 p.
- [22] 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, 18 1995.
- [23] Decarli, F. (2009). *Aguas subterráneas en Venezuela*. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología. Disponible: <http://www.inameh.gob.ve/resumen.pdf> [Consulta: 2014, Enero].
- [24] Srivastava, S. and Ramanathan, A. (2007). *Geochemical assessment of groundwater quality in vicinity of Bhalswa landfill, using graphical and multivariate statistical methods*. Environmental Geology, 20 p.
- [25] Jiang, Y., Wu, Y., Groves, C., Yuan, D. and Kambesis, P. (2009). *Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in the Nandong karst underground river system in Yunan, China*. Journal of Contaminant Hydrology 109,

p 49 – 61.

[26] Baghvand, A., Nasrabadi, T, Nabi, G., Vosoogh, A., Karbassi, A. and Mehrdadi, N. (2010). *Groundwater quality degradation of an aquifer in Iran central desert*. Desalination, p 264 – 275.

[27] Jamshidzadeh, Z. and Mirbagheri, S. (2010). *Evaluation of groundwater quantity and quality in the Kashan Basin, Central Iran*. Desalination, p 23 – 30.

[28] Devic, G., Djordjevic, D. and Sakan, S. (2013). *Natural and anthropogenic factors affecting the groundwater quality in Serbia*. Science of the Total Environment, p 933 – 942.

[29] Zghibi, A., Merzougui, A. Zouhri, L., Tarhouni, J. (2013). *Understanding groundwater chemistry using multivariate statistics techniques to the study of contamination in the Korba unconfined aquifer system of Cap-Bon (North-east of Tunisia)*. Journal of African Earth Sciences 89, p 1 – 15.

[30] 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 Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 113 p.

[31] Faublack, A. (2008). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, estado Aragua y Cachama, estado Guárico, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 109 p.

[32] Biondo, L. y Esteves, N. (2010). *Evaluación Hidrogeológica de la Laguna de Taigüaigüay, Municipio Zamora, estado Aragua*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de

Geología, Minas y Geofísica, Facultad de Ingeniería, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 139 p.

[33] Betancourt, Y. (2012). *Estudio de la calidad química y tipos de agua subterránea en el sector Santa Lucía de los Valles del Tuy, estado Miranda*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 96 p.

[34] Toro, D. (2012). *Estudio de la calidad química y tipos de aguas subterráneas en la zona sur oriental de la Isla de Margarita, estado Nueva Esparta, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 155 p.

[35] González, A. (2013). *Estudio de la calidad de agua de afluentes al humedal costero Laguna de Tacarigua, Estado Miranda. Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 220 p.

[36] Abarca, O. (2004). *Estaciones experimentales de la Universidad Central de Venezuela. Estación Experimental Santa María*. Disponible: <http://mapas.topografia.upm.es/venezuelaucvucv/SantaMaria.html> Consulta: [2014, Febrero]

[37] Molina, Y. (2006). *Evaluación de los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Maracay, estado Aragua*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Ingeniería Geológica, Facultad de Ingeniería, Universidad de Los Andes, Mérida. 270 p.

[38] Alvarado, J. (1989). *Regiones y características hidrogeológicas de Venezuela*. VII Congreso Geológico Venezolano, Barquisimeto, estado Lara. Tomo III. 960 – 979 p.

- [39] Urbani, F. (1999). *Revisión de las unidades de rocas ígneas y metamórficas de la Cordillera de la Costa, Venezuela*. Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra GEOS, Universidad Central de Venezuela, Caracas. N° 33. 1 – 170 p.
- [40] Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela. (2011). PDVSA. Disponible: <http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm> Consulta: [2014, Febrero]
- [41] González de Juana, C.; Iturralde de Arozena, J. y Picard, X. (1980). *Geología de Venezuela y de sus Cuencas Petrolíferas*. Ediciones Fonvives, Caracas. Vol. I y II. 1031 p.
- [42] González, L. (1972). *Geología de la Cordillera de la Costa, zona centro occidental*. IV Congreso Geológico Venezolano, Caracas. Memoria, Bol. Geol., Caracas, Publ. Esp. 5, 3: 1589 - 1616.
- [43] American Public Health Association, APHA (1995). *Standard Methods of Examination of Water and Wastewater*. Washington, 20th edition.
- [44] Gran, G. (1957). *Determination of the equivalence point in Potentiometric Titrations*. Part II, Analyst, Vol. 77. 661 – 671 p.
- [45] Miller, J.N. y Miller, J. C. (2002). *Estadística y Quimiometría para química analítica*. Pearson Educación, S.A. 4° edición. Madrid, España. 296 p.
- [46] Drever, J. (1997). *The geochemistry of natural waters*. Prentice-Hall, INC. New Jersey, United States of America. 437 p.
- [47] Cravotta, C. (1986). *Spatial and Temporal Variations of groundwater chemistry in the vicinity of carbonate-hosted zinc-lead occurrences, Sinking Valley, Blair Country,*

Pennsylvania State University. 810 p.

[48] Herrera, A. y Suárez, P. (2005). *Indicadores bacterianos como herramientas para medir la calidad ambiental del agua costera*. Asociación Interciencia, año 30, número 003. Caracas, Venezuela. Pp. 171 – 176.

[49] Hunt, K. (2010). *Discovering Advanced Algebra Condensed Lessons in Spanish*. Key Curriculum Press. 2° edition. Pp. 17 – 22. Disponible: <http://math.kendallhunt.com/x7653.html>. [Consulta: 2015, Abril]

[50] Martínez, M. (2003). *Caracterización geoquímica de las aguas subterráneas de la cuenca del Lago de Valencia, Edo. Carabobo, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 115 p.

[51] Prando, R. (1996). *Manual de Gestión de la Calidad Ambiental*. Editorial Piedra Santa, S. A. Guatemala, 184 p.

[52] Yanes, C. (1997). *Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana*. Tesis Doctoral. Instituto de Ciencias de la Tierra. Facultad de Ciencias y Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología, Minas y Geofísica. Universidad Central de Venezuela, 199 p.

[53] Gamboa, N. (2007). *Estudio hidrogeoquímico y geofísico en el sector La Cabrera, carretera vieja Ocumare-Charallave, Edo. Miranda, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 143 p.

- [54] Kattan, Z. (2006). *Characterization of surface water and groundwater in the Damascus Ghotta basin: hydrochemical and environmental isotopes*. Environmental Geology 51. 173 - 201 p.
- [55] Sánchez, F. (2005). *Evolución geoquímica de las aguas subterráneas*. Universidad de Salamanca. España. Disponible: <http://web.usal.es/javisan/hidro>. [Consulta: 2015, Abril]
- [56] Oropeza, J. (2009). *Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la Cuenca de los Valles del Tuy en el sector de Charallave-Paracotos, Edo. Miranda, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado. Escuela de Química, Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 114 p.
- [57] Krishna kumar, A., Logeshkumaran, A., Magesh, N. S., Prince, S., Godson, N. and Chandrasekar, N. (2014). *Hydro-geochemistry and application of water quality index (WQI) for groundwater quality assessment, Anna Nagar, part of Chennai City, Tamil Nadu, India*. Applied Water Science, 9 p.
- [58] Rajeshl, R., Brindha, K. and Elango, L. (2015). *Groundwater quality and its Hydrochemical Characteristics in a Shallow Weathered Rock Aquifer of Southern India*. Water Quality, Exposure and Health, 10 p.
- [59] Rajmohan, N. and Elango, L. (2006). *Hydrogeochemistry and its relation to groundwater level fluctuation in the Palar and Cheyyar river basins, southern India*. Hydrological Processes 20. 2451 – 2427 p.
- [60] Jalali, M. (2005). *Major ion chemistry of groundwaters in the Bahar area, Hamadan, western Iran*. Environmental Geology 47: 763 – 772 p.

- [61] Rajmohan, 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 p.

APÉNDICES

APÉNDICE A

- 1- Localización, profundidad y parámetros fisicoquímicos medidos durante la etapa de campo en los pozos muestreados en la zona de estudio.

Datos recopilados en la salida de campo

Tabla A.1 Localidad, ubicación geográfica, profundidad y parámetros fisicoquímicos medidos *in situ* durante la etapa de campo

Muestra	Localidad	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Prof. (m)	pH	T (°C)	Cond. (μS/cm)
MASACH-01	El Huate	669796	1122418	70	7,04	29,0	751
MASSCA-02	Campo Alegre	670205	1122709	82	6,79	29,1	981
MASSCA-03	Campo Alegre	670308	1122944	89	6,52	29,4	2121
MASSC-04	Cagua	668442	1127149	130	7,13	28,1	1022
MASSLV-05A	Las Vegas	670700	1123683	110	7,01	28,4	1526
MASSLV-05B	Las Vegas	670700	1123683	110	6,95	28,1	1519
MASSLV-05C	Las Vegas	670700	1123683	110	6,95	28,1	1508
MASSET-06	Empresa Titán	670792	1124110	120	6,68	29,1	1483
MASSLV-07	Las Vegas	670813	1123466	200	7,28	29,3	588
MASUPE-08	Prado de la Encrucijada	667897	1123341	132	7,04	29,2	773
MASUPE-09	Prado de la Encrucijada	668424	1123407	112	6,93	29,5	689
MASSET-10	El Tuco	667797	1124005	172	6,96	29,1	986
MASSAP-11	Corinsa	668845	1123501	42	6,56	29,4	1164
MASSAP-12	Las Vegas	670723	1123120	80	6,97	28,2	1961
MASSCJ-13	Ciudad Jardín	667714	1123042	96	7,08	28,4	1106
MASSBCJ-14	Brisas de Ciudad Jardín	667442	1122782	96	6,82	27,4	1166
MASSCC-15	Corinsa Colonial	668774	1124671	87	6,89	27,6	813
MASSSD-16	San Diego	668903	1125171	90	7,1	26,6	888

Muestra	Localidad	UTM Este (m)	UTM Norte (m)	Prof. (m)	pH	T (°C)	Cond. (μS/cm)
MASSEB-17	El Bosque	667768	1124969	117	7,26	28,0	1076
MASSLN-18	Los Naranjos	668023	1124762	113	6,82	28,4	1100
MASSC-19	Cagua	668411	1126014	NC	6,81	28,9	568
MASSLS-20	La Segundera	666990	1123687	72	6,89	28,9	1227
MASSLS-21	La Segundera	667234	1123305	NC	6,71	28,1	1333
MASSLS-22	La Segundera	666777	1123715	NC	7,03	27,8	1043
MASSEB-23	El Bosque	667485	1125124	126	6,92	27,9	832
MASSBCJ-24	Brisas de Ciudad Jardín	667280	1122687	NC	7,04	27	1206
MASPLT-25*	Bella Vista	669761	1120646	NC	8,01	28,8	1154
MASSBV-26	Bella Vista	670607	1121956	NC	7,05	27,2	1220

Prof.: Profundidad

Cond.: Conductividad

NC: No conocida

*: Muestra de agua superficial de la Laguna de Taigüaigüay

APÉNDICE B

- 1- Concentraciones determinadas de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en las muestras de agua captadas.
- 2- Concentraciones determinadas de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- en las muestras de agua captadas.
- 3- Concentraciones determinadas de sílice disuelta (SiO_2) y sólidos disueltos totales (SDT) para cada una de las muestras de agua captadas.

Concentraciones de las especies mayoritarias en las muestras de aguas captadas

Tabla B.1 Concentraciones de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} en las muestras de agua captadas

Muestra	Na^+ (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Mg^{2+} (mg/L)
MASACH-01	114	0,73	25	5,7
MASSCA-02	115	1,22	58	13,5
MASSCA-03	173	2,20	197	39,3
MASSC-04	22	1,93	92	18,8
MASSLV-05A	68	1,15	125	39,2
MASSLV-05B	69	1,08	123	38,9
MASSLV-05C	66	1,13	121	38,8
MASSET-06	33	1,72	144	33,0
MASSLV-07	77	0,56	20	9,3
MASUPE-08	52	1,44	60	10,5
MASUPE-09	39	1,31	57	10,8
MASSET-10	30	1,73	88	19,4
MASSAP-11	33	1,78	145	20,2
MASSAP-12	118	2,05	152	44,4
MASSCJ-13	86	1,82	102	18,9
MASSBCJ-14	97	1,54	83	17,5
MASSCC-15	22	1,52	90	19,2
MASSSD-16	20	1,70	96	19,8
MASSEB-17	25	1,71	102	19,4
MASSLN-18	25	1,79	105	20,2
MASSC-19	16	1,52	52	10,0
MASSL-20	61	2,03	94	25,5

Muestra	Na ⁺ (mg/L)	K ⁺ (mg/L)	Ca ²⁺ (mg/L)	Mg ²⁺ (mg/L)
MASSLS-21	88	2,15	98	24,4
MASSLS-22	32	1,77	85	20,2
MASSEB-23	26	1,37	85	18,7
MASSBCJ-24	53	1,98	103	21,9
MASPLT-25	127	3,68	65	24,5
MASSBV-26	97	2,19	109	22,4

Tabla B.2 Concentraciones de los aniones Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ y HCO₃⁻ en las muestras de agua captadas

Muestra	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
MASACH-01	60	93,8	<LD	134
MASSCA-02	68	90,4	8,7	226
MASSCA-03	263	226,0	11,2	373
MASSC-04	63	137,9	7,4	234
MASSLV-05A	244	115,3	4,3	226
MASSLV-05B	245	115,6	4,5	228
MASSLV-05C	246	116,4	4,5	226
MASSET-06	227	166,6	<LD	209
MASSLV-07	32	75,3	2,7	121
MASUPE-08	55	124,8	2,3	150
MASUPE-09	36	93,2	2,1	150
MASSET-10	69	137,3	2,6	209
MASSAP-11	77	161,8	18,0	252
MASSAP-12	237	196,1	63,5	301
MASSCJ-13	88	167,7	<LD	209
MASSBCJ-14	83	133,5	2,6	268
MASSCC-15	45	106,8	2,6	183

Muestra	Cl ⁻ (mg/L)	SO ₄ ²⁻ (mg/L)	NO ₃ ⁻ (mg/L)	HCO ₃ ⁻ (mg/L)
MASSSD-16	49	124,6	6,0	196
MASSEB-17	75	144,0	3,4	212
MASSLN-18	87	155,3	3,7	209
MASSC-19	12	56,8	3,0	158
MASSL-20	79	191,8	4,1	242
MASSL-21	103	202,5	13,9	247
MASSL-22	76	161,7	4,3	204
MASSEB-23	49	115,5	2,0	177
MASSBCJ-24	82	135,6	2,0	298
MASPLT-25	101	183,9	<LD	244
MASSBV-26	102	158,2	2,5	252

Tabla B.3 Concentraciones de sílice disuelta (SiO₂) y sólidos disueltos totales (SDT) determinadas en las muestras de agua captadas

Muestra	SiO ₂ (mg/L)	SDT (mg/L)
MASACH-01	12,5	446
MASSCA-02	14,7	595
MASSCA-03	20,0	1305
MASSC-04	11,6	588
MASSLV-05A	17,5	840
MASSLV-05B	18,3	844
MASSLV-05C	17,9	838
MASSET-06	15,3	830
MASSLV-07	15,4	353
MASUPE-08	13,3	470
MASUPE-09	12,5	403
MASSET-10	14,2	572

Muestra	SiO₂ (mg/L)	SDT (mg/L)
MASSAP-11	15,9	725
MASSAP-12	22,7	1136
MASSCJ-13	15,9	690
MASSBCJ-14	17,7	704
MASSCC-15	14,3	483
MASSSD-16	11,8	526
MASSEB-17	12,2	594
MASSLN-18	24,5	632
MASSC-19	16,0	325
MASSLS-20	20,7	718
MASSLS-21	29,3	809
MASSLS-22	15,7	601
MASSEB-23	17,3	492
MASSBCJ-24	22,9	721
MASPLT-25	8,5	758
MASSBV-26	22,2	768

APÉNDICE C

- 1- Condiciones experimentales empleadas en el análisis de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} mediante la técnica de Espectrometría de Emisión y Absorción Atómica.
- 2- Condiciones experimentales para el análisis de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- mediante la técnica de Cromatografía Iónica.
- 3- Condiciones de experimentales de la determinación de sílice disuelta (SiO_2) mediante la técnica de Espectrometría de Absorción Molecular en el UV-Visible.
- 4- Características de los reactivos empleados en la preparación de soluciones patrones con las cuales se construyeron las curvas de calibración de las especies catiónicas y aniónicas.

Condiciones experimentales empleadas en la determinación de cationes, aniones y sílice disuelta

La determinación de las especies químicas Na^+ y K^+ en las veintiséis (26) muestras de agua captadas se desarrolló empleando la técnica de espectrofotometría de emisión atómica de llama (FEAS), utilizando para ello un espectrofotómetro marca Perkin Elmer, modelo AAnalyst200. Por su parte, la determinación de las especies químicas Ca^{2+} y Mg^{2+} en las muestras captadas, se realizó empleando el equipo antes mencionado, pero en el modo de espectrofotómetro de absorción atómica de llama (FAAS), acoplando al equipo una lámpara de cátodo hueco Ca-Mg-Zn, marca Perkin Elmer.

Tabla C.1 Condiciones experimentales empleadas en la determinación de cationes mediante la técnica de espectrometría de emisión y absorción atómica de llama

Elemento	Longitud de onda (nm)	Ancho de la rendija (nm)	Combustible	Corriente de la lámpara (mA)
Na	589,00	0,2 – 0,4	Acetileno/Aire	-
K	766,49	0,2 – 0,4	Acetileno/Aire	-
Ca	422,67	0,4 – 0,7	Acetileno	5
Mg	285,17	0,4 – 0,7	Acetileno/Aire	5

La determinación de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- en las veintiséis (26) muestras de agua analizadas, se llevó a cabo mediante la técnica de cromatografía iónica, haciendo uso de un cromatógrafo iónico, marca Dionex, modelo ICS-2100.

En la tabla C.2 se indican las condiciones experimentales usadas en este equipo para los análisis realizados.

Tabla C.2 Condiciones experimentales empleadas en la técnica de cromatografía iónica

Elementos	Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^-
Fase móvil	$\text{Na}_2\text{CO}_3/\text{NaHCO}_3$
Proporción de carbonato	1,8 mM
Proporción de bicarbonato	1,7 mM
Velocidad de flujo	1,0 mL/min
Presión de la columna	1944 - 1968
Temperatura	30 °C
Flujo de la fase móvil	1,5 $\mu\text{L}/\text{min}$
Detector	Conductividad, 0,84 μS
Tiempo de retención	4,683 min (Cl^-); 8,286 min (SO_4^{2-}), 9,330 min (NO_3^-)

La determinación de sílice disuelta, SiO_2 , en las veintiséis (26) muestras de agua en estudio se realizó mediante una técnica fotolorimétrica, empleando para ello un espectrofotómetro de absorción molecular UV-Visible. En la tabla C.3 se presentan las condiciones experimentales del equipo utilizado en este análisis.

Tabla C.3 Condiciones experimentales del análisis mediante espectrometría de absorción molecular UV-Visible

Elemento	Equipo	Longitud de onda (nm)
Si	Spectronic 20, marca Bausch & Lomb	680

Tabla C.4 Reactivos utilizados en la preparación de las soluciones patrón

	Na^+	K^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	NO_3^-	SO_4^{2-}
Reactivo	NaCl	KCl	CaCO_3	Mg metálico	NaCl	NaNO_3	Na_2SO_4
Marca	Merck	Riedel- de Haen	Merk	Merk	Merck	AnalaR	Bayer Analyzed
Pureza	99,5%	99%	99%	99%	99,5%	99,5%	99,7%

APÉNDICE D

- 1- Descripción de la determinación de alcalinidad mediante el método de Gran.
- 2- Curvas para la determinación de alcalinidad, expresada como mg/L de HCO_3^- en las veintiséis (26) muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay empleando el método de Gran.

Descripción y curvas para la determinación de alcalinidad expresada como mg/L de HCO_3^-

D.1 Descripción general del método de Gran

Para la determinación de la alcalinidad, se realizó una titulación potenciométrica de 25 mL de H_2SO_4 0,022 N (previamente estandarizado con Na_2CO_3), hasta un pH inferior a 3, a fin de garantizar la neutralización de especies como HCO_3^- y CO_3^{2-} , las cuales pueden contribuir a la alcalinidad total de la muestra. Los resultados obtenidos, luego son expresados en mg/L de HCO_3^- [46].

El gráfico de Gran puede ser usado para localizar el punto final cuando la curva de la titulación es incompleta. Con frecuencia, se hace difícil identificar de forma visual el punto final para una muestra cuyo pH inicial es cercano a 5, y con dicho método este problema se puede evitar.

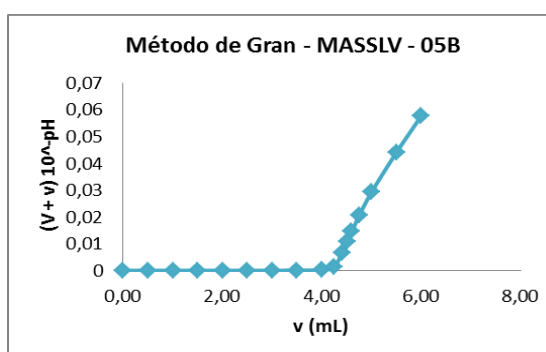
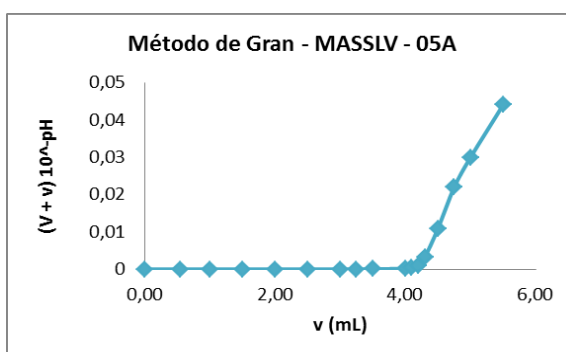
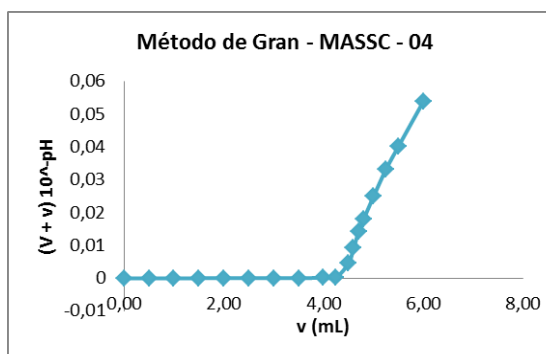
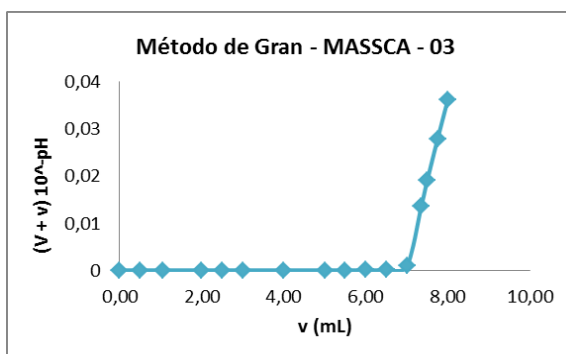
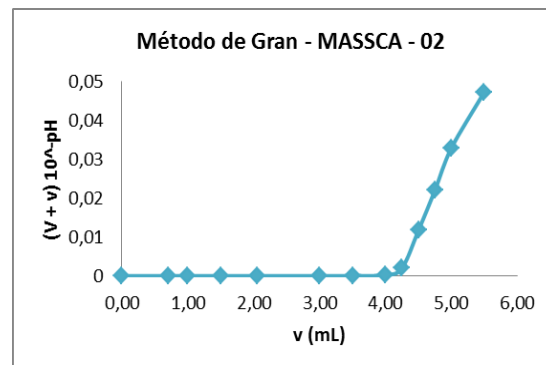
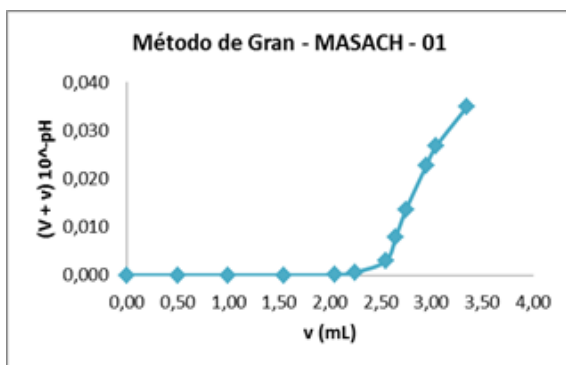
El método de Gran consiste en graficar $(V + v) 10^{-\text{pH}}$ en función de v ; donde V es el volumen inicial de la muestra y v es el volumen de ácido añadido.

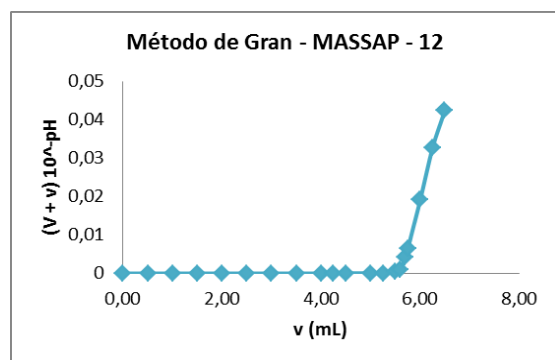
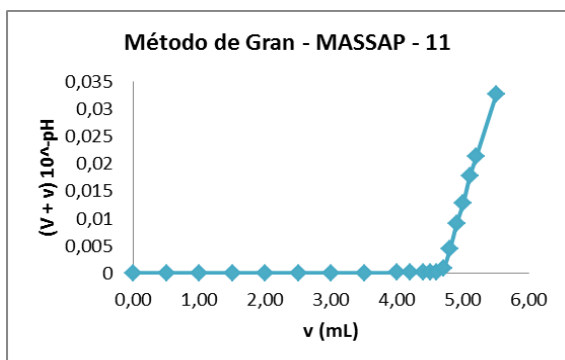
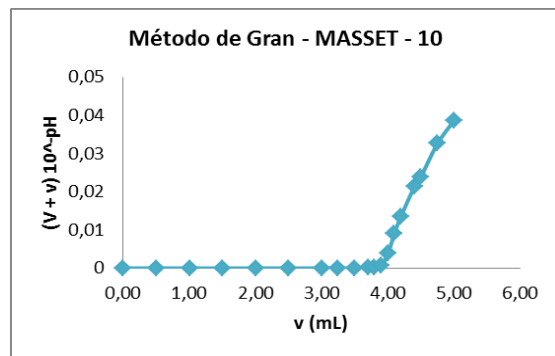
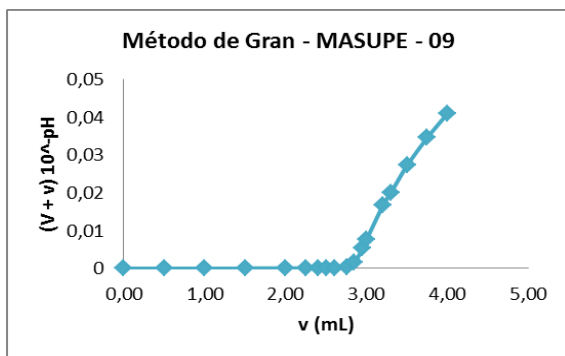
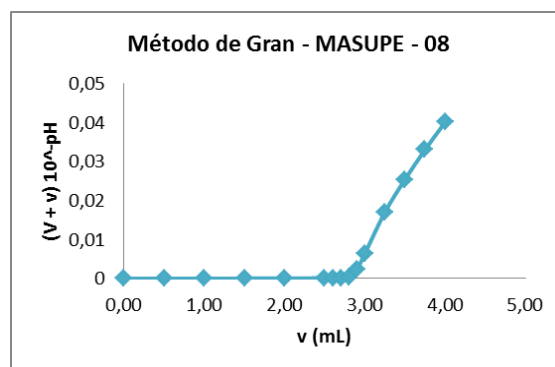
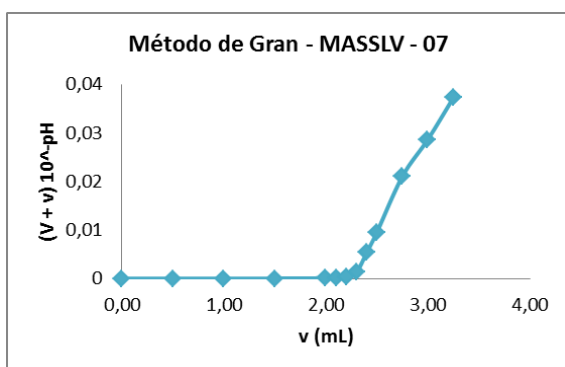
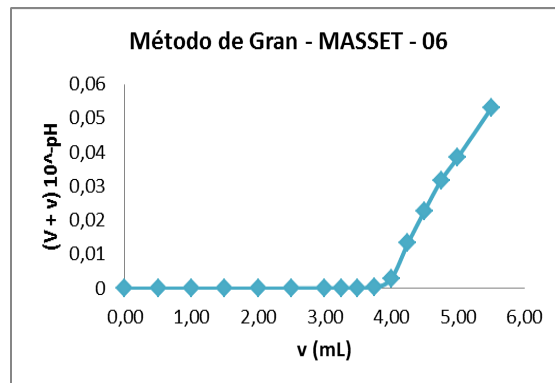
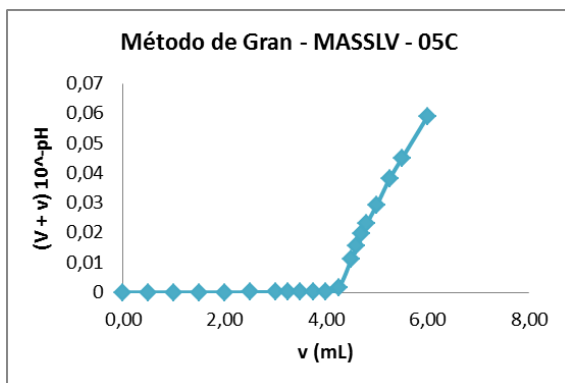
Una vez elaborada la representación gráfica, la extrapolación hasta un valor de cero (0) en el eje de las ordenadas, donde existe un punto de inflexión, permite determinar el volumen de equivalencia de la titulación [46].

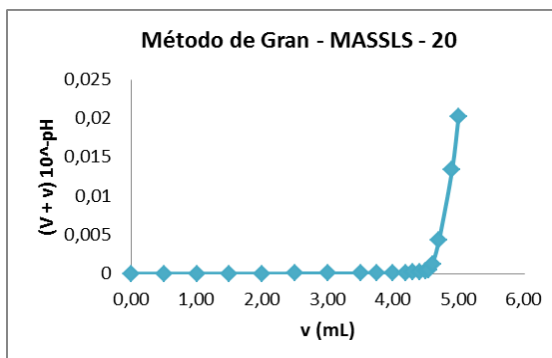
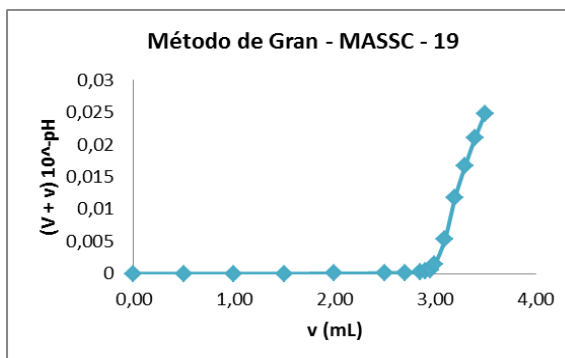
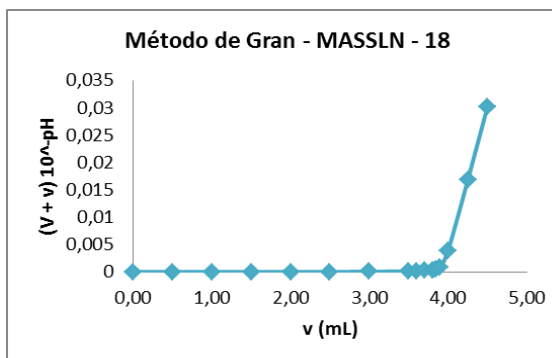
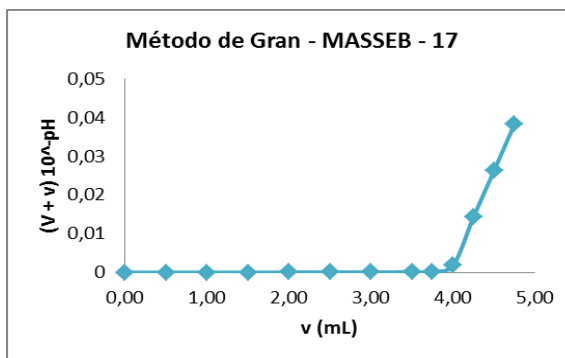
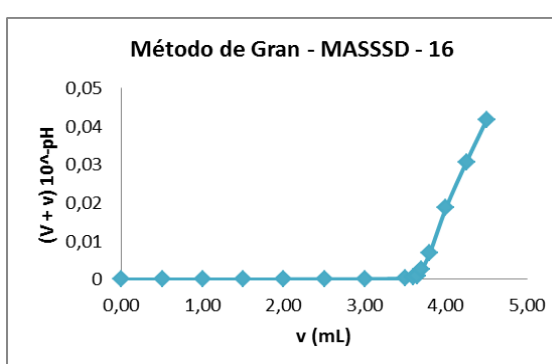
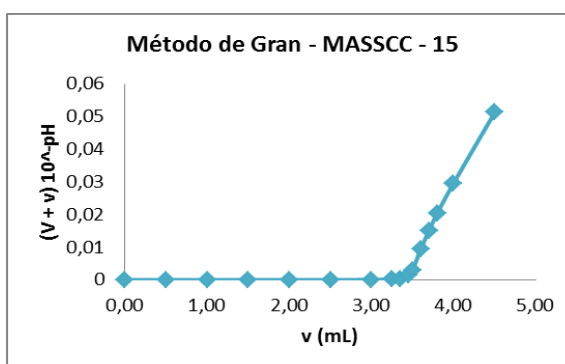
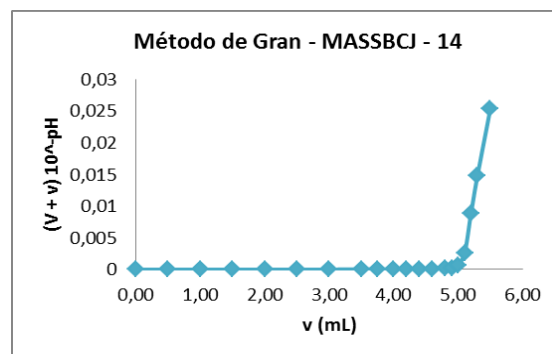
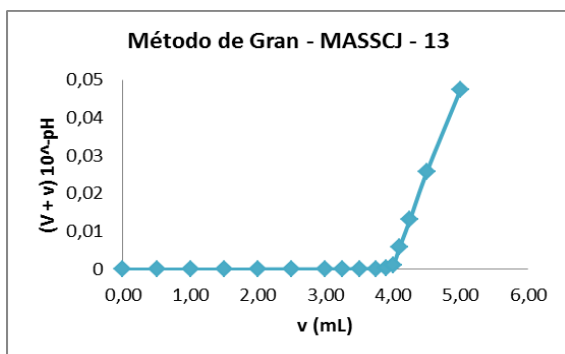
Finalmente, con el volumen del punto de equivalencia obtenido mediante la representación gráfica, se determina la alcalinidad total, expresada en mg/L de HCO_3^- , por medio de la siguiente ecuación: [46]

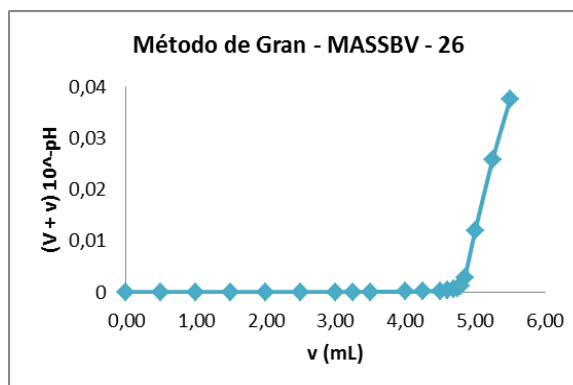
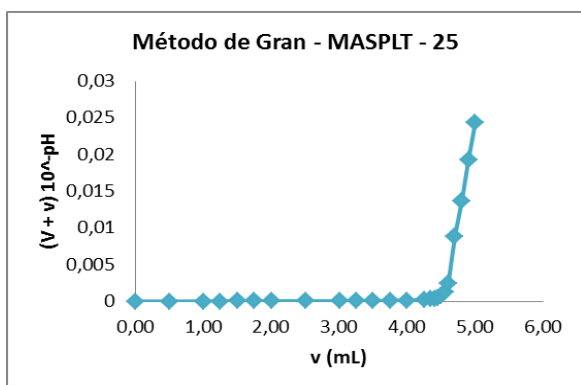
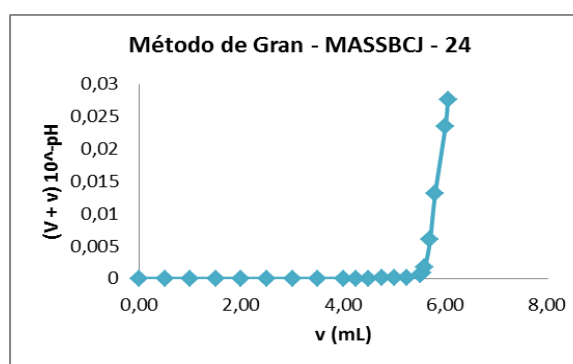
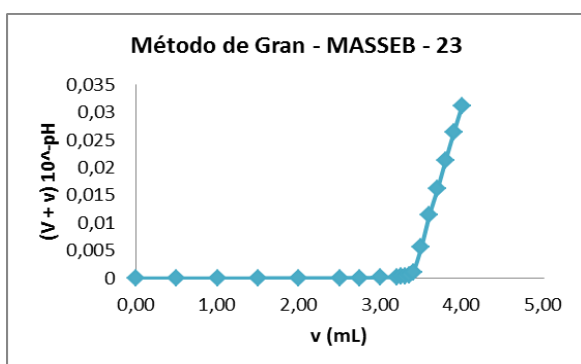
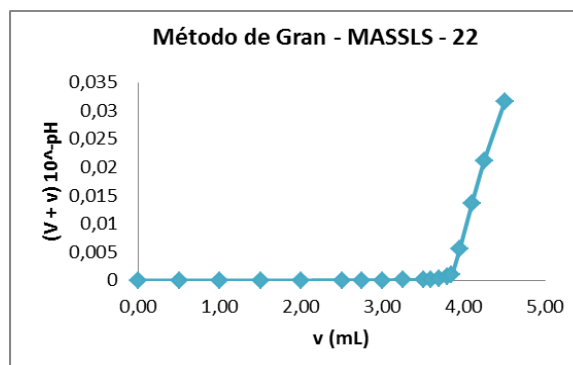
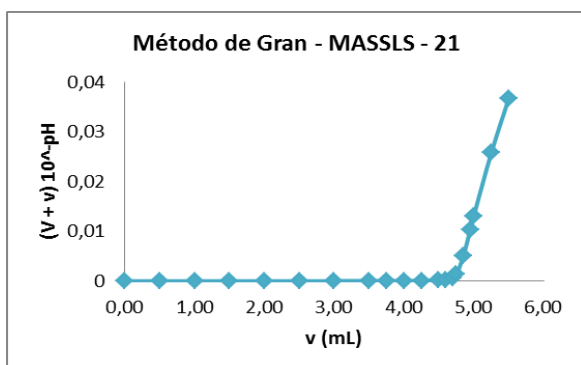
$$C_{\text{HCO}_3^-} = \frac{\text{Volumen de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mL)} * \text{Concentración de H}_2\text{SO}_4 \text{ (mol/L)} * 1000 * \text{PA HCO}_3^-}{\text{Volumen total (mL)}}$$

D.2 Curvas de titulación o funciones de Gran obtenidas en la determinación de alcalinidad









APÉNDICE E

- 1- Método para la determinación de Si en agua mediante la técnica de Espectrometría de Absorción Molecular en el UV-Visible.

Descripción del método empleado para la determinación de sílice disuelta (SiO_2) mediante la técnica fotolorimétrica de Azul de Molibdato ^[43].

E.1 Preparación de la muestra

- Se añadió una alícuota de la muestra en balones de 100 mL de manera tal que al realizar la formación del complejo y enrasar, la concentración de Si estuviese en un intervalo de 0,7 y 1,5 mg/L de Si. Luego se acidificó con 1 mL de H_2SO_4 1,25 M, marca Riedel-de Haen.

- Se agregó 5 mL de una solución de Molibdato de Amonio al 5% p/p, marca Certified A.C.S con 99,9% de pureza. Se esperó durante 10 minutos para la formación del complejo y la solución se tornó amarilla.

Se añadió 5 mL de una solución de Ácido Oxálico al 10% p/p, marca Seelze-Hannover con 99,5% de pureza.

- Se agregó 3 mL de una solución reductora de Sulfato ferroso amoniacal (Sal de Mohr) al 0,25% p/p, marca AnalaR con 99% de pureza, lo cual produjo el cambio de color de la solución amarilla a color azul.

- Se enrasó el balón con agua desionizada.

- Se dejó reposar la solución durante 20 minutos aproximadamente.

- Se preparó un blanco realizando el procedimiento descrito anteriormente, sin agregar muestra.

E.2 Preparación de soluciones patrón

La curva de calibración se elaboró en un intervalo de 0 – 2 mg/L en Si, llevando a cabo el siguiente procedimiento:

- A partir de una solución madre de 1000 mg/L en Si, se preparó una solución de 10

mg/L en Si, de la cual se tomó una alícuota determinada para preparar patrones de 0,5 a 2 mg/L en balones aforados de 100 mL.

- Para la formación del complejo azul silicomolibdato, se siguieron los pasos descritos en el apartado E.1, desde el paso de acidificar con H_2SO_4 hasta añadir la solución reductora de sulfato ferroso amoniacal $((\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot \text{FeSO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O})$.

E.3 Determinación de la longitud de onda de máxima absorción

- Para la determinación del máximo de absorción se realizaron mediciones de la absorbancia del patrón de concentración intermedia de la curva de calibración, en un intervalo de 550 a 800 nm, realizando las medidas de absorbancia cada 20 nm.
- Se realizó una representación gráfica de la absorbancia en función de la longitud de onda y se determinó la longitud de onda de máxima absorción, la cual fue de 680 nm y se ajustó en el equipo.
- Se determinó la absorbancia de las soluciones patrones y de las muestras a la longitud de onda determinada.

APÉNDICE F

- 1- Parámetros de la estadística descriptiva calculados en las réplicas de la muestra MASSLV-05
- 2- Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis de las especies químicas estudiadas
- 3- Ecuaciones utilizadas para el cálculo del límite de confianza, límite de detección y error de la pendiente y del punto de corte de las curvas de calibración de las especies químicas determinadas
- 4- Curvas de calibración de las especies químicas determinadas en el presente estudio

Precisión de los análisis

Tabla F.1 Parámetros de la estadística descriptiva calculados para tres (3) réplicas de la muestra MASSLV-05 para determinar la precisión de los análisis

Parámetro	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	X (mg/L)	S (mg/L)	% Sr	CV	LD	LC
pH	7,01	6,95	6,95	6,97	0,03	1	0,4	-	0,07
T (°C)	28,4	28,1	28,1	28,2	0,2	1	0,7	-	0,5
Cond. (μS/cm)	1526	1519	1508	1518	9	1	0,6	-	22
Na ⁺ (mg/L)	68,2	69	66,4	68	1	3	1	0,5	2
K ⁺ (mg/L)	1,15	1,08	1,13	1,12	0,05	9	4	0,2	0,12
Ca ²⁺ (mg/L)	125	123,2	120,8	123	2	3	2	0,5	5
Mg ²⁺ (mg/L)	39,19	38,91	38,79	39,0	0,2	1	0,5	0,2	0,5
Cl ⁻ (mg/L)	243,6	244,83	246,05	245	1	1	0,4	2	2
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	115,34	115,57	116,42	115,8	0,6	1	0,5	2	1,5
NO ₃ ⁻ (mg/L)	4,34	4,52	4,51	4,5	0,2	9	4	2	0,5
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	192,61	204,65	204,65	201	7	7	3	-	17

Parámetro	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	X (mg/L)	S (mg/L)	% Sr	CV	LD	LC
SiO ₂ (mg/L)	17,53	18,3	17,94	17,9	0,4	4	2	0,1	1,0
SDT (mg/L)	807	820	817	815	7	2	1	-	17

F.2 Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis de las especies químicas estudiadas

Promedio (X)

$$X = (\sum X_i) / n$$

Donde X_i representa la concentración de un parámetro o especie química determinada y n el número de muestras totales ^[45].

Desviación estándar (S)

$$S = \sqrt{(\sum X_i - X)^2 / (n - 1)}$$

Donde X_i representa la concentración de una especie química o parámetro, X representa el valor promedio de los datos y n el número de muestras totales ^[45].

Desviación estándar relativa porcentual (% Sr)

$$\% \text{ Sr} = (2S/X) * 100$$

Donde X es el promedio de la concentración de una especie química o un parámetro determinado y S es su desviación estándar.

Coeficiente de variación (CV)

$$CV = (S/X) * 100$$

Donde X representa el promedio de un parámetro o de la concentración de una especie química en la muestra y S representa su desviación estándar.

F.3 Ecuaciones utilizadas para el cálculo del límite de confianza y límite de detección

F.3.1 Límite de confianza

Para muestras pequeñas, los límites de confianza del promedio vienen dados por:

$$X \pm t_{n-1} S / \sqrt{n}$$

El subíndice $(n-1)$ indica que t depende de esta cantidad, que se conoce como el número de grados de libertad; el valor de t depende también del grado de confianza requerido. Para este estudio se tomó en consideración el 95% de confianza, en donde t tiene un valor de 4,30 ^[45].

F.3.2 Límite de detección

A continuación se presentan las ecuaciones empleadas en el cálculo del límite de detección de cada una de las especies químicas analizadas en el presente estudio:

$$LD = Y_B + 3 S_B$$

Donde Y_B es la señal del blanco y S_B la desviación estándar del mismo. A fin de obtener en la práctica los términos mencionados anteriormente, es adecuado utilizar el estadístico $S_{y/x}$ en lugar de S_B . Por su parte, el valor de a , la ordenada en el origen calculada para cada regresión lineal, se puede utilizar como una estimación de Y_B , de manera de obtener finalmente el límite de detección ^[45]. Por lo tanto, la ecuación mostrada anteriormente queda expresada de la siguiente forma:

$$LD = a + S_{y/x}$$

Donde el estadístico $S_{y/x}$ estima los errores aleatorios en la dirección Y, y viene dado por la siguiente ecuación:

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{\sum (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n-2}}$$

Donde:

$\hat{Y}_i$: representa los puntos sobre la recta de regresión calculada correspondiente a los valores individuales de X.

Y_i : representa los valores individuales de Y en la recta.

$n - 2$: es el término referido a los grados de libertad.

F.3.3 Ecuaciones para el cálculo del error de la pendiente y del punto de corte de las curvas de calibración de las especies químicas determinadas

Una vez obtenido el valor del estadístico $S_{y/x}$, se puede calcular S_b y S_a , las desviaciones estándar de la pendiente (b) y de la ordenada en el origen (a) ^[45]. Éstas vienen dadas por:

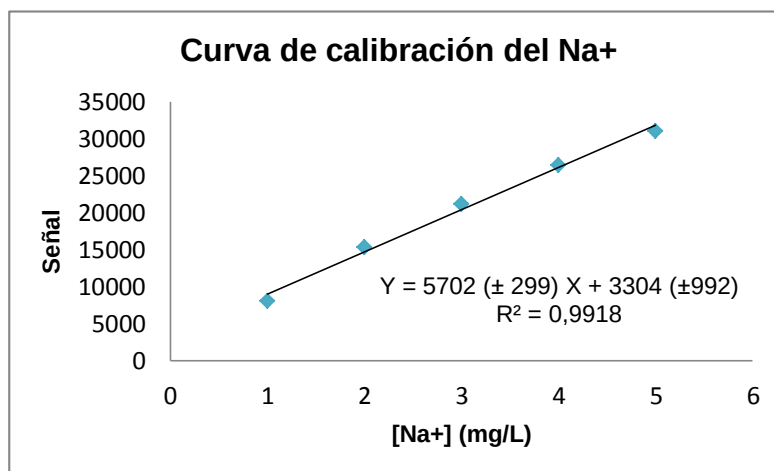
$$S_b = \frac{S_{y/x}}{\sqrt{\sum (X_i - \bar{X})^2}} \quad \text{y} \quad S_a = S_{y/x} * \sqrt{\frac{\sum X_i^2}{n * \sum (X_i - \bar{X})^2}}$$

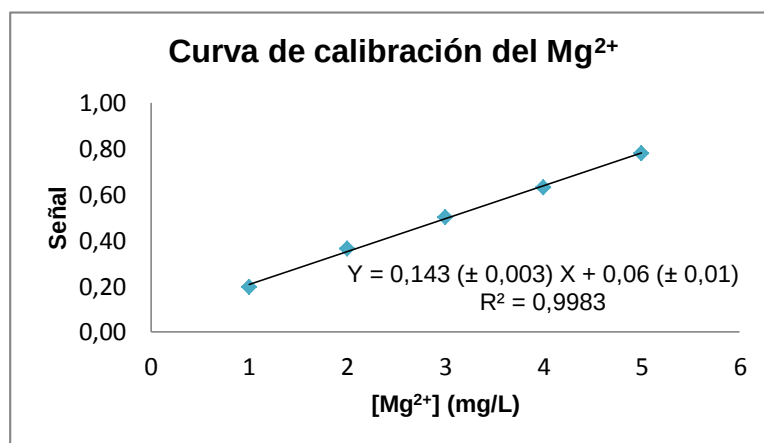
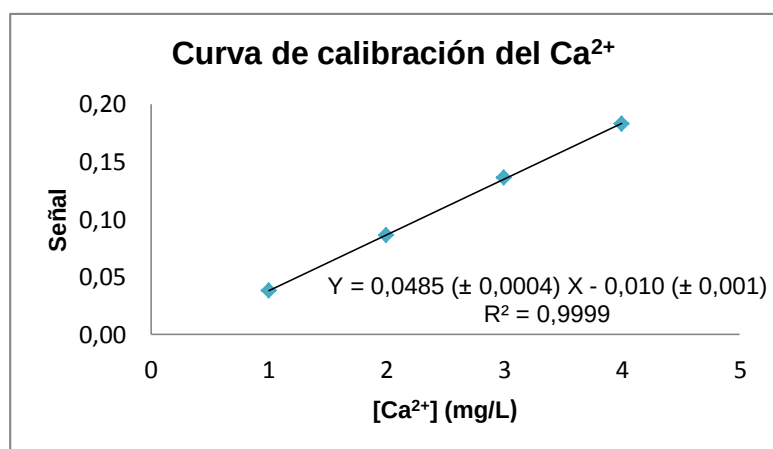
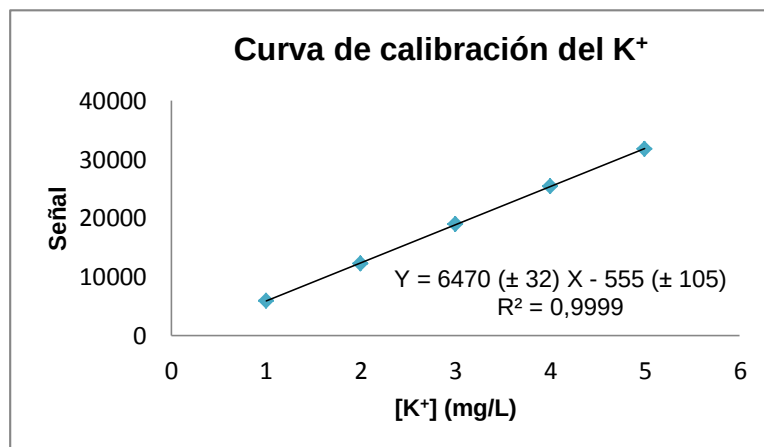
Donde:

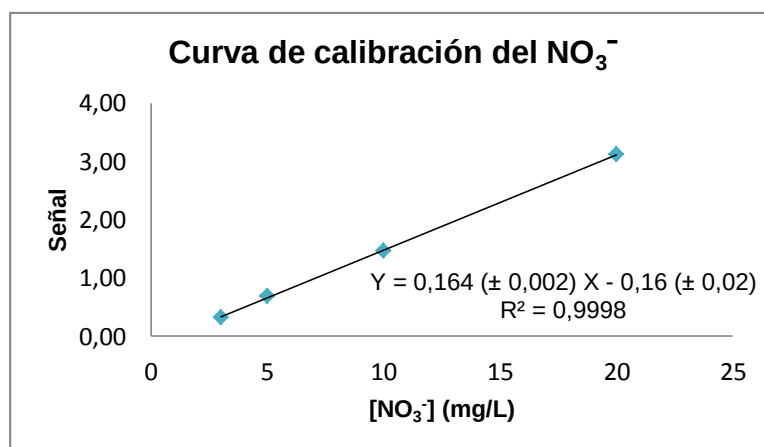
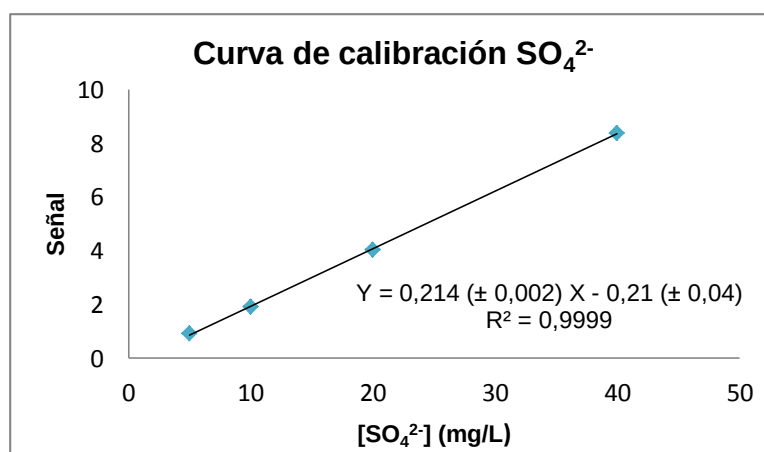
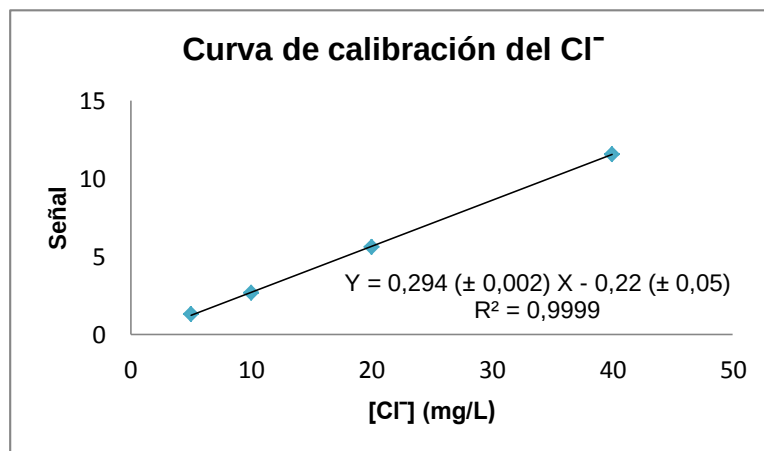
$\bar{X}$ = representa el promedio de los valores individuales de X.

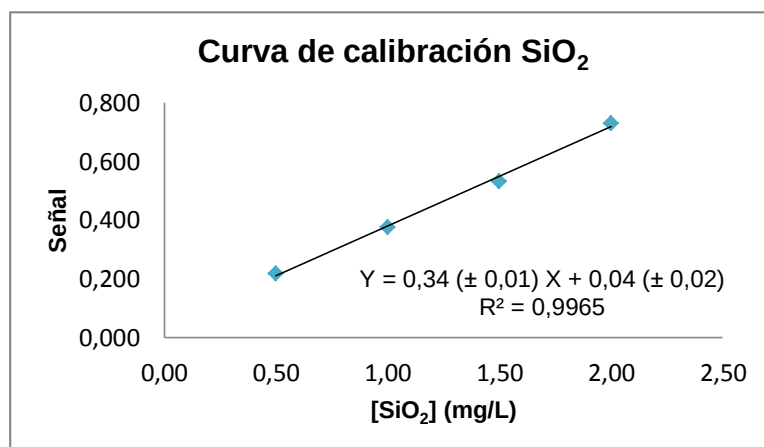
X_i = representa los valores individuales de X en la recta.

F.4 Curvas de calibración de las especies químicas determinadas en el presente estudio









APÉNDICE G

- 1- Ecuación utilizada para determinar el balance iónico en las muestras de agua captadas y datos obtenidos del balance iónico
- 2- Descripción del cálculo de la conductividad ideal en las muestras en estudio y ecuaciones empleadas; conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25 °C

Datos obtenidos y ecuación utilizada para determinar el balance iónico en las muestras de agua captadas

Tabla G.1 Datos obtenidos del balance iónico

Muestra	Σ^+ (meq/L)	Σ^- (meq/L)	$\Sigma^+ - \Sigma^-$ (meq/L)	$\Sigma^+ + \Sigma^-$ (meq/L)	% BI
MASACH-01	6,69	5,86	0,83	12,56	7
MASSCA-02	9,04	7,63	1,41	16,68	8
MASSCA-03	20,65	18,43	2,22	39,07	6
MASSC-04	7,13	8,60	-1,47	15,73	-9
MASSLV-05 ^a	12,46	13,04	-0,58	25,50	-2
MASSLV-05B	12,38	13,12	-0,75	25,50	-3
MASSLV-05C	12,14	13,13	-1,00	25,27	-4
MASSET-06	11,38	13,30	-1,92	24,69	-8
MASSLV-07	5,15	4,49	0,66	9,63	7
MASUPE-08	6,19	6,65	-0,46	12,83	-4
MASUPE-09	5,47	5,46	0,00	10,93	0
MASSET-10	7,35	8,29	-0,94	15,64	-6
MASSAP-11	10,39	9,97	0,42	20,36	2
MASSAP-12	16,44	16,71	-0,27	33,14	-1
MASSCJ-13	10,46	9,43	1,02	19,89	5
MASSBCJ-14	9,86	9,55	0,31	19,41	2
MASSCC-15	7,05	6,52	0,54	13,57	4
MASSSD-16	7,35	7,29	0,06	14,64	0
MASSEB-17	7,79	8,63	-0,85	16,42	-5
MASSLN-18	8,03	9,18	-1,15	17,21	-7
MASSC-19	4,16	4,16	0,00	8,31	0
MASSL-20	9,45	10,23	-0,78	19,69	-4
MASSL-21	10,81	11,40	-0,60	22,21	-3
MASSL-22	7,36	8,91	-1,56	16,27	-10
MASSEB-23	6,97	6,72	0,25	13,69	2

Muestra	Σ^+ (meq/L)	Σ^- (meq/L)	$\Sigma^+ - \Sigma^-$ (meq/L)	$\Sigma^+ + \Sigma^-$ (meq/L)	% BI
MASSBCJ-24	9,33	10,04	-0,72	19,37	-4
MASPLT-25	10,89	10,68	0,22	21,57	1
MASSBV-26	11,57	10,35	1,21	21,92	6

G.1 Balance iónico

El balance iónico es calculado mediante el uso de la siguiente ecuación:

$$\%BI = [(\Sigma^+ - \Sigma^-) / (\Sigma^+ + \Sigma^-)] * 100$$

Donde Σ^+ y Σ^- corresponden a la sumatoria de las especies catiónicas y aniónicas respectivamente, expresadas en meq/L.

G.2 Cálculo de conductividad ideal ^[3]

La conductividad ideal de una solución acuosa a 25 °C, se considera como la resultante de las contribuciones aditivas de los componentes iónicos y de las conductividades equivalentes iónicas, reportadas en la tabla G.2. La conductividad ideal es determinada mediante la sumatoria del producto de la concentración del ion por su conductividad.

Tomando en consideración únicamente la contribución de los cationes, la conductividad ideal obedece a la siguiente ecuación:

$$\text{Cond. Ideal cationes } (\mu\text{S/cm}) = \sum (C_{\text{cationes}} * \mu_{\text{cationes}}) + [(e^{-\text{pH}}) * 1000 * 349,8]$$

Donde C_{cationes} es la concentración determinada de cada uno de los cationes

mayoritarios expresada en miligramos por litro (mg/L) y $\mu_{cationes}$ es la conductividad equivalente iónica de cada especie catiónica en $\mu\text{S L /cm mg}$ a 25 °C.

Por su parte, considerando sólo la contribución aniónica, la conductividad ideal se calcula empleando la siguiente ecuación:

$$\text{Cond. Ideal aniones } (\mu\text{S/cm}) = \sum (C_{\text{aniones}} * \mu_{\text{aniones}})$$

Donde C_{aniones} es la concentración total determinada para los aniones mayoritarios en miligramos por litros (mg/L) y μ_{aniones} representa la conductividad equivalente iónica de cada anión en $\mu\text{S L /cm mg}$ a 25 °C.

Finalmente, la conductividad ideal total a 25 °C para una muestra de agua en particular viene dada por:

$$\text{Cond. Ideal } (\mu\text{S/cm}) = \text{Cond. Ideal cationes} + \text{Cond. Ideal aniones}$$

En la siguiente tabla se presentan los valores reportados de la conductividad equivalente de cada especie mayoritaria a 25 °C.

Tabla G.2.1 Conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25 °C ^[47]

Especie iónica	Conductividad a 25 °C ($\mu\text{S L/ cm mg}$)
Ca^{2+}	3,00
Mg^{2+}	4,34
Na^{+}	2,17
K^{+}	1,89
Cl^{-}	2,14
HCO_3^{-}	0,74
SO_4^{2-}	1,67
NO_3^{-}	1,15

Tabla G.2.2 Conductividad ideal obtenida para cada una de las muestras analizadas y conductividad medida en campo

Muestra	Cond. catiónica ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. aniónica ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. ideal ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. de campo ($\mu\text{S/cm}$)
MASACH-01	655	386	1041	751
MASSCA-02	877	473	1350	981
MASSCA-03	1656	1230	2886	2121
MASSC-04	688	547	1235	1022
MASSLV-05A	1011	886	1897	1526
MASSLV-05B	1026	891	1917	1519
MASSLV-05C	1012	893	1905	1508
MASSET-06	1089	919	2008	1483
MASSLV-07	511	286	797	588
MASUPE-08	649	440	1089	773

Muestra	Cond. catiónica ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. aniónica ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. ideal ($\mu\text{S/cm}$)	Cond. de campo ($\mu\text{S/cm}$)
MASUPE-09	647	347	994	689
MASSET-10	749	536	1285	986
MASSAP-11	1093	643	1736	1164
MASSAP-12	1238	1129	2367	1961
MASSCJ-13	874	625	1499	1106
MASSBCJ-14	921	601	1523	1166
MASSCC-15	759	412	1171	813
MASSSD-16	710	465	1175	888
MASSEB-17	692	561	1253	1076
MASSLN-18	842	605	1447	1100
MASSC-19	623	240	863	568
MASSLS-20	883	672	1555	1227
MASSLS-21	1023	758	1781	1333
MASSLS-22	726	588	1314	1043
MASSEB-23	742	431	1173	832
MASSBCJ-24	831	624	1455	1206
MASPLT-25	701	704	1405	1154
MASSBV-26	946	673	1618	1220

APÉNDICE H

- 1- Figuras de Stiff generadas para cada una de las muestras de agua captadas en la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay

H.1 Figuras de Stiff generadas para cada una de las muestras de agua analizadas en el presente estudio

