

UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE QUÍMICA



**EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y GEOFÍSICA DE LAS AGUAS
SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO LICUA, MUNICIPIO CRESPO, EDO. LARA.**

Trabajo Especial de Grado
presentado ante la Ilustre
Universidad Central de
Venezuela, presentado por
la Br. Rosimar Torrealba,
para optar por el título de
Licenciada en Química
Opción Geoquímica.

Caracas, octubre 2016

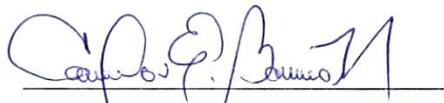
ACTA DE APROBACIÓN

Los abajo firmantes designados por la Universidad Central de Venezuela, como integrantes del jurado examinador del Trabajo Especial de Grado titulado: **"EVALUACIÓN HIDROGEOQUÍMICA Y GEOFÍSICA DE LAS AGUAS SUBTERRÁNEAS DEL ACUÍFERO LICUA, MUNICIPIO CRESPO, EDO. LARA"**. Presentado por la Br. Rosimar A. Torrealba G., certificamos que este trabajo cumple con los requisitos exigidos por nuestra Magna Casa de Estudios para optar por el título de Licenciado en Química.



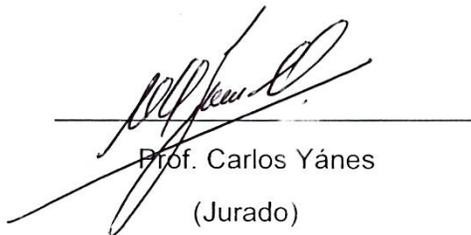
Prof. Ramón Montero

(Tutor)



Prof. Carlos Barrios

(Jurado)



Prof. Carlos Yánes

(Jurado)

DEDICATORIA

*A Dios que siempre guía mis pasos y nunca me desampara
A mis abuelos Célida, Edelmira, Francisco, Luis Ramón, a mi tío Eduardo
y a mi primo querido Leonel que juntos desde el cielo me bendicen.*

A ustedes les dedico este gran logro...

AGRADECIMIENTOS

A Dios lo más importante en mi vida, por siempre protegerme, por permitirme la vida, siempre oír mis súplicas y ser tan bondadoso conmigo y mi familia.

A mi hermosa madre Jesucita García, por tu buen corazón, tus buenos sentimientos, tu inefable sentido de protección, por darme absolutamente todo, por desde muy pequeña sacrificarte, salir adelante y así velar que nunca les falte nada a nosotros tu familia. Estoy orgullosa de ti madre y este logro no sería nada sin tu apoyo, este título es más que tuyo. ¡Eres la mejor madre del mundo!!!!

A ti mi papito lindo, mi pocholito del alma Lionzo Torrealba, por nunca soltar mi mano, siempre estar para mí, por ser el mejor padre del mundo, por adorarme y siempre estar pendiente de mí, por llamarme mil veces al día, por su amor, comprensión y apoyo.

A ti Esteban Carvallo “Jhonny” por ser otro padre para mí, por siempre corregirme cuando lo hecho mal y siempre querer el bien para todos mis hermanos.

A mis hermanos: María Andreina, María José y Javier por ser más que mis hermanos, mis amigos incondicionales, con los que cuento y contaré el resto de mi vida, a quienes amo con mi vida y de los cuales también estoy orgullosa.

A mis abuelos: Célida, Edelmira, Francisco y Luis Ramón, a mi tío Eduardo, por sembrar la semilla de la humildad, los buenos sentimientos, la paciencia, constancia y perseverancia en mi familia. Por enseñarle a mis padres el amor al llano, mismo amor que me fue enseñado y del que hoy día puedo decir que si pudiera volver a nacer, mil

veces elegiría ser descendiente de ustedes, tener la familia que tengo y conservar el amor tan grande que le tengo a mi llano.

A ti Christopher Rojas, mi novio y compañero de vida, por ser totalmente un príncipe, estar en los momentos que siempre lo he necesitado, aguantarse mis berrinches, mi humor y por el simple hecho de amarme con todo y siempre tenerme de la mano, emprendiendo nuevos proyectos y alcanzando exitosas metas. Por hacerme tan feliz mi amor, te amo con mi vida.

A Tommy mi hijo perruno por ser el más fiel compañero, por alegrarse al verme llegar a la casa y estar a mi lado sin dormirse todas las largas noches que tuve que pasar para poder alcanzar este logro.

A mi magna casa de estudios que vio soltar cada lágrima cuando creí que no podía más, pero que a su vez vio cumplir cada uno de mis sueños, gracias Universidad Central de Venezuela.

A mi excelente tutor el Prof. Ramón Montero, por la enseñanza, exigencia y motivación que siempre me dio durante este trayecto. A pesar de ser un año muy fuerte para él siempre estuvo pendiente de cada detalle dándome todo su apoyo. Mil gracias siempre.

A mi mejor amigo Jesús Guerra por ser él quien me incentivó a estudiar esta mención, ser mi ejemplo, apoyarme en todos mis pasos, querer mi bien, corregir mis errores y entregar la amistad más sincera que una persona pueda brindar, por creer en mí y regalarme la dicha de tener en mi vida una segunda familia.

A mi segunda familia: Blanca de Guerra, Luis Guerra, Graby Guerra por desde el día que los conocí hacerme sentir parte de ellos, siempre aconsejarme, por levantarse temprano los días que les tocaba llevarme a la Universidad, por amarme incondicionalmente y siempre estar para mí.

A mi cuñado Atilio Sosa por ser tan bondadoso, por tener tan bonito corazón y amar tanto a mi hermana. También por siempre estar para mí en todo momento.

A Edgar Bravo y Ericcson Bravo por guiar mi camino espiritual, aconsejarme y brindarme su incondicionalidad en cada paso que doy.

A mis pocos, pero grandes amigos Raúl López, Luis Arreaza, Anaís Benavides, Victor Alvino, Tony Ricardo, Javier González por ayudarme en todo el transcurso de mi carrera, ser amigos incondicionales y aunque poco los vea, saber que cuento con ustedes. Los amo!!

A mi amita bella Itzamar Márquez, por ser mi compañera de triunfos, por ser agradecida y brindarme su amistad sin interés alguno, por estar en mis días malos y en los no tan malos también. Por ser la única persona que se sabe tan bien mi tesis. Te quiero fea.

A personas que durante el transcurso de la creación de esta tesis me ayudaron y abrieron sus puertas, dándome el mayor de los apoyos: Mary, Reynaldo, Sr. Fernando, Vilchez, Jackeline, Juan, Prof. Decarly y su equipo en el INAMEH.

A mis amigos Jose, Luis, Javier y Guido: los peruanos jajajaja, quienes siempre me colaboraron en las copias y hacían mi día a día en la Universidad más divertido.

Agradecida eternamente con ustedes...

RESUMEN

En la presente investigación fue realizada la evaluación hidrogeoquímica y geofísica de las aguas subterráneas correspondientes al acuífero Licua, ubicado en el Municipio Crespo, en el estado Lara, Venezuela. Para ello, fueron captadas 9 muestras pozos de, a las cuales se les determinó las concentraciones de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , SiO_2 y NO_3^- a fin de conocer factores y procesos que controlan la composición química de las aguas.

Para cumplir con los objetivos planteados, en la etapa de campo se realizó la toma de muestras con la simultánea medida de los parámetros pH, conductividad y temperatura; mientras que en la etapa de laboratorio, se determinaron las especies antes señaladas.

Las técnicas usadas fueron espectroscopia de absorción y emisión atómica en llamas para la determinación de cationes, mientras que cromatografía iónica se usó para la determinación de los aniones, la sílice disuelta (SiO_2) se conoció por absorción molecular. Por último, la alcalinidad se determinó a partir de una titulación volumétrica. Los resultados obtenidos fueron validados a partir del balance iónico con un % de error de menos del 10% y relaciones entre la conductividad de campo y la teórica.

La interpretación de resultados se facilitó mediante el uso de diagramas de Piper y figuras de Stiff que conllevó a la clasificación de las aguas, permitiendo la identificación de 3 tipos, a saber: $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$, $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ y $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$. El uso de relaciones iónicas y de la prospección geofísica como método complementario ayudó a conocer los diversos procesos que afectan a dichas aguas, siendo el más importante el de interacción agua-roca, manifestando a través de la disolución de minerales carbonatados, así como la hidrólisis de silicatos y aluminosilicatos. Por su parte, la prospección geofísica permitió

conocer las unidades litológicas presentes en la zona de estudio, donde se identificaron arcillas, limos y arenas saturadas.

Dentro del marco legal y la calidad de las aguas, en atención al Decreto 883 (Gaceta oficial 5.021,1995) se determinó que solo el 55,5% de las aguas son aptas para el consumo humano, mientras que las restantes, no cumplen con los requisitos expuestos en este Decreto, por lo que se pueden catalogar como no aptas para el consumo humano, bien sea en el ámbito doméstico o agrícola.

Palabras clave: aguas subterráneas, acuífero, hidrogeoquímica, prospección geofísica.

ÍNDICE

I.INTRODUCCIÓN	5
II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA.....	8
II.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	8
II.1.1.- Ciclo hidrológico.....	8
II.1.2.- Aguas subterráneas	10
II.1.3.- Acuíferos.....	11
II.1.4.- Características hidrogeológicas de un acuífero	13
II.1.5.- Nivel Piezométrico	14
II.1.6.- Nivel freático	14
II.1.7.- Interacción de las aguas subterráneas con la litología.....	15
II.1.8.-Clasificación de las aguas.....	16
II.1.9.- Representación gráfica de análisis químicos	22
II.1.10.- Relaciones interiónicas	25
II.1.11.- Calidad de las aguas.....	26
II.1.12.-Parámetros que definen los estudios de la calidad de las aguas subterráneas.	27
II.1.13.- Factores que controlan la composición de las aguas subterráneas.....	30
II.1.14.-Fenómenos modificadores de la composición química de las aguas subterráneas	31
II.1.15.-Contaminación de las aguas subterráneas	33
II.1.16.-Las aguas subterráneas en Venezuela.....	34
II.1.17.- Prospección de aguas subterráneas.....	34

II.2.-ANTECEDENTES.....	40
II.3.-DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	49
III.METODOLOGIA EXPERIMENTAL	57
IV.PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS	65
IV.1-Validación de los resultados	66
IV.2- Hidrogeoquímica de las aguas	69
IV. 2.1.- Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Piper.....	69
IV. 2.1.- Figuras de Stiff.....	73
IV.3.- Variación de los parámetros fisicoquímicos	75
IV.3.1.- pH.....	75
IV.3.2.- Conductividad.....	78
IV.3.3.- Sólidos disueltos totales (SDT).....	80
IV.4.- Variación de la concentración de los cationes y aniones mayoritarios.	83
IV.4.1.- Potasio (K ⁺)	83
IV.4.2.- Sodio (Na ⁺)	87
IV.4.3.- Calcio (Ca ²⁺).....	88
IV.4.4.- Magnesio (Mg ²⁺)	90
IV.4.5.- Bicarbonato (HCO ₃ ⁻)	91
IV.4.6.- Sulfato (SO ₄ ²⁻)	93
IV.4.7.- Cloruro (Cl ⁻)	95
IV.4.8.- Nitrato (NO ₃ ⁻)	97
IV.5.- Variación de la concentración de sílice disuelta (SiO ₂)	98
IV.6.- Relaciones iónicas.....	100
IV.6.1.- Relación r Ca ²⁺ /SO ₄ ²⁻	101
IV.6.2.- Relación Conductividad/ HCO ₃ ⁻ y Conductividad/Ca ²⁺	102

IV.6.3.- Relación Na/Cl frente a la conductividad	103
IV.6.4.- Relación $rCa^{2+} + Mg^{2+}/HCO_3^- + SO_4^{2-}$	104
IV.7.- Índices de saturación.....	105
IV.8.- Análisis de la calidad química de las aguas	108
IV.9.- Prospección Geofísica.....	111
IV.9.1.-Sondeos Eléctricos Verticales 1-4	114
IV.9.2.-Sondeos Eléctricos Verticales 5, 6, 7, 8 y 9.....	118
IV.9.3.-Sondeos Eléctricos Verticales 10, 11 y 12.....	124
IV.9.4.-Sondeos Eléctricos Verticales 13, 14 y 15.....	128
IV.9.5.-Sondeos Eléctricos Verticales 16 y 17.....	132
V.CONCLUSIONES	137
VI.RECOMENDACIONES	139
VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	140

INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ciclo del agua	9
Figura 2. Tipos de acuíferos	12
Figura 3. Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático.	15
Figura 4. Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper.	22
Figura 5. Figuras de Stiff.	23
Figura 6. Diagrama bivalente.	24
Figura 7. Diagrama de Collins	24
Figura 8. Ecuación de resistividad.	37
Figura 9. Dispositivos de medida para SEV	39
Figura 10. Mapa de la ubicación de la zona de estudio.	51
Figura 11. Mapa geológico sector Licua, Estado Lara	53
Figura 12. Precipitación vs Evaporación del área de estudio.	55
Figura 13. Esquema de la metodología exp. utilizada en la etapa de pre-campo.	58
Figura 14. Ubicación de los pozos muestreados.	59
Figura 15. Esquema de la metodología experimental utilizada en la etapa de campo. ...	60
Figura 16. Esquema de la metodología exp. utilizada en la etapa de laboratorio.	63
Figura 17. Representación gráfica del error porcentual del balance iónico.	67
Figura 18. Relación entre cationes y aniones.	68
Figura 19. Relación entre conductividad ideal a 25 °C y de campo ($\mu\text{S}/\text{cm}$).	68
Figura 20. Diagrama de Piper para las aguas del acuífero Licua, Estado Lara.	70
Figura 21. Diagrama de Stiff para las aguas del acuífero Licua, Estado Lara.	74
Figura 22. Caja gráfica del pH.	76
Figura 23. Mapa de distribución espacial del pH en la zona de estudio.	77
Figura 24. Caja gráfica de la Conductividad.	79
Figura 25. Mapa de distribución espacial de la conductividad en la zona de estudio.	80
Figura 26. Caja gráfica de los sólidos disueltos totales.	81
Figura 27. Mapa de distribución de los sólidos disueltos totales en la zona de estudio.	82

Figura 28. Cajas gráficas de los Cationes.....	84
Figura 29. Cajas gráficas de los Aniones	85
Figura 30. Mapa de distribución del ión Potasio en la zona de estudio.....	86
Figura 31. Mapa de distribución espacial del ión sodio en la zona de estudio.	88
Figura 32. Mapa de distribución espacial del ión calcio en la zona de estudio.	89
Figura 33. Mapa de distribución espacial del ión magnesio en la zona de estudio.	91
Figura 34. Mapa de distribución espacial del ión Bicarbonato en la zona de estudio.....	93
Figura 35. Mapa de distribución espacial del ión Sulfato en la zona de estudio	95
Figura 36. Mapa de distribución espacial del ión Cloruro en la zona de estudio.....	96
Figura 37. Mapa de distribución espacial del ión Nitrato en la zona de estudio.	98
Figura 38. Caja gráfica para la Sílice disuelta SiO ₂	99
Figura 39. Mapa de distribución espacial de la Sílice disuelta en la zona de estudio. .	100
Figura 40. Relación entre la concentración de Ca ²⁺ y SO ₄ ²⁻	101
Figura 41. Relación entre la Conductividad de campo y la concentración de HCO ₃ ⁻	102
Figura 42. Relación entre la Conductividad de campo y la concentración de Ca ²⁺	103
Figura 43. Relación entre Na/Cl y la conductividad.....	104
Figura 44. Relación entre (Ca ²⁺ + Mg ²⁺) / (HCO ₃ ⁻ + SO ₄ ²⁻).....	105
Figura 45. Índice de saturación de calcita frente SDT.....	106
Figura 46. Índice de saturación de dolomita frente SDT	107
Figura 47. Índice de saturación de Anhidrita frente SDT	107
Figura 48. Ubicación de los SEV, sector Licua, municipio Crespo, Estado Lara.....	113
Figura 49. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 1	116
Figura 50. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 2.....	116
Figura 51. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 3	116
Figura 52. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 4	116
Figura 53. Pseudosección 1.....	118
Figura 54. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 5.	119
Figura 55. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 6	119

Figura 56. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 7	120
Figura 57. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 8	120
Figura 58. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV	121
Figura 59. Pseudosección 2.....	123
Figura 60. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 10.....	124
Figura 61. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 11.....	125
Figura 62. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 12.....	125
Figura 63. Pseudosección 3.....	127
Figura 64. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 13.....	129
Figura 65. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 14.....	129
Figura 66. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 15.....	130
Figura 67. Pseudosección 4.....	131
Figura 68. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 16.....	133
Figura 69. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 17.....	133
Figura 70. Pseudosección 5.....	135

INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación según la concentración de sólidos disueltos totales (SDT).....	18
Tabla 2. Clasificación de las especies químicas disueltas en las aguas subterráneas. .	20
Tabla 3. Límite de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas	26
Tabla 4. Resistividades de algunas rocas.....	40
Tabla 5. Delimitación de la zona de estudio según sus coordenadas.....	50
Tabla 6. Registros promedios mensuales de precipitación, evaporación y temperatura correspondiente a la estación Moroturo, Estado Lara.....	55
Tabla 7 Clasificación de las aguas captadas en el área de estudio según el diagrama de piper.....	71
Tabla 8. Tabla comparativa entre los parámetros analizados y los datos establecidos por el Decreto 883 (Gaceta Oficial 5.021, 1995).....	111
Tabla 9. Tabla de Resistividades.....	114
Tabla 10. Resultados obtenidos para los SEV 1, 2 , 3 y 4	115
Tabla 11. Unidades geoelectricas para la pseudosección 1	117
Tabla 12. Resultados obtenidos para los SEV 5, 6 , 7, 8 y 9	122
Tabla 13. Unidades geoelectricas para la pseudosección 2	123
Tabla 14. Resultados obtenidos para los SEV 10, 11 y 12.....	126
Tabla 15. Unidades geoelectricas para la pseudosección 3	127
Tabla 16. Resultados obtenidos para los SEV 13, 14 y 15.....	128
Tabla 17. Unidades geoelectricas para la pseudosección 4	131
Tabla 18. Resultados obtenidos para los SEV 16 y 17.....	132
Tabla 19. Unidades geoelectricas para la pseudosección 5	134

I.INTRODUCCIÓN

El agua es una sustancia líquida incolora, inodora e insípida conocida no solo por ser un recurso vital para muchos sistemas naturales y seres vivos, sino que además se le ha conferido el título de “solvente universal por excelencia”, siendo esta una cualidad importante que afecta su composición química. Asimismo, el agua es parte de un conjunto de sistemas dinámicos y complejos que constituyen al ciclo hidrológico en la hidrosfera, tales como océanos, aguas subterráneas, lagos, glaciares y ríos; así como también forma parte de la atmósfera, litosfera y biosfera. ^[1]

Respecto al ambiente natural donde se encuentre, el agua puede ser clasificada de dos maneras; a saber: como agua superficial, cuyo término se refiere a aquellas aguas que circulan o se encuentran almacenadas sobre la superficie de la Tierra; y como agua subterránea, las cuales son aguas que están presentes en el subsuelo, debajo del nivel freático, en la zona de saturación del suelo o de una determinada formación geológica.^[2] En relación a este segundo término, estas aguas constituyen una de las fuentes de abastecimiento de agua dulce más importantes para el hombre, generalmente preferida sobre las aguas superficiales por diversas razones, siendo la más importante la ausencia de organismos patógenos, lo cual reduce los gastos en cuanto a su tratamiento previo para el consumo doméstico e industrial. Sin embargo, existen tres motivos que podrían desfavorecer el uso de las aguas subterráneas en ciertas regiones, entre las que destacan la baja permeabilidad del medio poroso que impida la formación de grandes caudales de agua en las captaciones, los altos costos de explotación a través de pozos de bombeo y el alto contenido de sólidos disueltos totales presentes.^[3]

Es importante señalar que el abastecimiento de agua presenta problemas generalmente referidos a cantidad y calidad, ya que la principal demanda mundial es de agua dulce y su disponibilidad alcanza escasamente al 1 % del total, en tanto que el 97,5 % del agua del planeta es salada y el resto corresponde a los casquetes polares ^[4]. Adicionalmente, gracias a las acciones antrópicas y a su irregular distribución regional, el agua dulce presenta diversos problemas, siendo el deterioro de su calidad un aspecto que limita el desarrollo socio-económico y productivo de la población ^[5].

La calidad del agua subterránea de una región depende de procesos naturales como clima, tiempo, disolución y precipitación de minerales, interacción hidráulica con otros cuerpos de aguas, ubicación del área de recarga, así como de actividades antrópicas, entre otras ^[6].

Venezuela es un país con grandes riquezas naturales y abundantes recursos hídricos que abarcan importantes reservas de agua subterránea, las cuales no han sido cuantificadas en su totalidad. No obstante, el intenso y acelerado crecimiento demográfico, agrícola, comercial e industrial ha conllevado a un aumento importante en la explotación y consumo de las aguas subterráneas, siendo una de estas reservas el acuífero Licua, ubicado en la región nor-occidental del país, específicamente en el Municipio Crespo del Edo. Lara. La población de la zona a estudiar no posee fuentes cercanas de aguas superficiales permanentes que contribuyan con las necesidades básicas humanas, pero sí cuenta con el citado acuífero que es utilizado como una fuente de abastecimiento de agua para la región, beneficiando además, a las comunidades de los municipios que la rodean.

En atención a lo anteriormente señalado y en función de tener un mejor conocimiento de la calidad química del agua contenida en los acuíferos de muchas regiones del país, entendiéndose además que desde el punto de vista hidrogeoquímico no se cuenta con

información suficiente que permita identificar los factores que controlan la calidad de las aguas procedentes particularmente del acuífero de Licua, surge la necesidad de proponer el presente trabajo de investigación, enfocado en evaluar los datos hidrogeoquímicos y geofísicos respectivos que permitan obtener información sobre dichos factores; así como, ubicar los sitios con mejores potenciales para el aprovechamiento de las aguas y recomendar la construcción de pozos profundos con fines de abastecimiento hídrico a la comunidad. Es por ello que en el presente trabajo de investigación se han propuesto los siguientes objetivos:

Objetivo General

Estudiar hidrogeoquímicamente la calidad química de las aguas subterráneas del acuífero Licua, Municipio Crespo, Edo. Lara, e identificar mediante técnicas geofísicas, las principales unidades hidrogeológicas presentes.

Objetivos específicos

1. Caracterizar las aguas subterráneas a través de la medición de los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH, conductividad, alcalinidad y de la determinación de la concentración de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , NO_3^- , Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , sílice disuelta (SiO_2) y sólidos disueltos totales (SDT) en cada una de las muestras de agua en cada una de las muestras de agua.
2. Establecer las facies hidrogeoquímicas de las aguas subterráneas e identificar los factores y procesos que controlan su calidad en la zona de estudio.
3. Identificar mediante la evaluación de los datos geoelectrónicos adquiridos a través de los sondeos eléctricos verticales las unidades que representan el o los acuíferos de la región de Licua, Municipio Crespo, Edo. Lara.

II. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con la finalidad de dar soporte a los aspectos conceptuales que abarcan este proyecto de investigación, a continuación se presentaran tres secciones correspondientes al fundamento teórico, donde se destacan los aspectos útiles para la discusión, antecedentes y características generales de la zona de estudio.

II.1.- FUNDAMENTOS TEÓRICOS

II.1.1.- Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico amerita el constante desplazamiento y distribución del agua, tanto en la superficie de la Tierra, como por encima y debajo de la misma, siendo importante todo éste proceso para lograr una adecuada utilización y gestión del recurso hídrico. La circulación del agua dentro de éste ciclo ocurre de forma ascendente por evaporación y descendente por precipitaciones, seguida de la forma de escorrentía superficial y subterránea.^[6]

El agua expuesta a las condiciones del ambiente exógeno, tal como es el caso de los océanos, mares, lagos, ríos y embalses, se evapora con mayor intensidad cuanto mayor es la temperatura y menor humedad presente el ambiente. El agua existente en la vegetación también puede evaporarse directamente o por transpiración, siendo la combinación de ambos procesos denominado evapotranspiración, el que provoca la pérdida de agua en forma de vapor entre un 65 y 70% de la precipitación anual. Es entonces cuando el agua en forma de vapor pasa a la atmósfera, constituyendo la humedad del aire. A medida que ocurre el descenso de la temperatura por aumento de altitud, el vapor de agua se condensa en minúsculas partículas que dan lugar a las nubes

y la niebla. Posteriormente, el agua retornará a la superficie del terreno y a otros cuerpos de agua en forma de precipitación, ya sea como lluvia, nieve, granizo, rocío o escarcha. Hay que tener en cuenta que no toda la precipitación alcanza la superficie del terreno, pues parte se evapora en el descenso y parte es interceptada por la vegetación o por las superficies de edificaciones realizadas por el hombre y devuelta a la atmósfera al poco tiempo en forma de vapor de agua. [6]

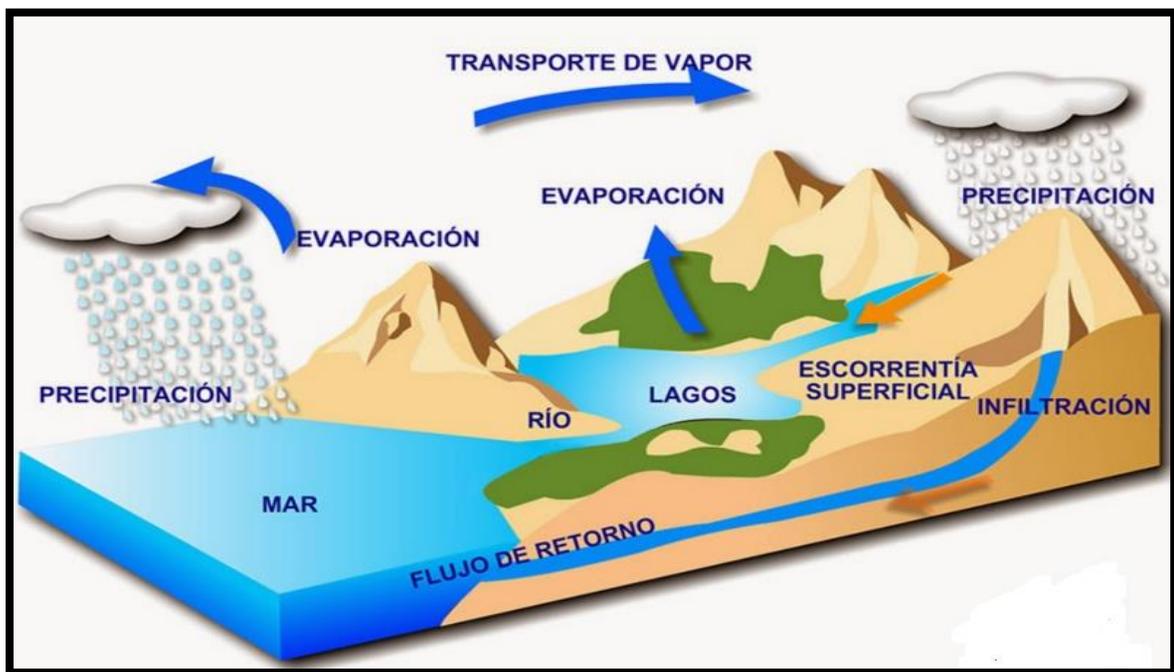


Figura 1. Ciclo del agua [7]

Del agua líquida que alcanza la superficie del terreno, una parte queda retenida en pequeños depósitos o surcos que en su mayoría retorna a la atmósfera. Otra parte, circula sobre la superficie como escorrentías que luego se reúnen en arroyos y más tarde desembocan en los ríos y lagos. Asimismo, el agua puede infiltrarse a través del subsuelo, pasando el límite de la zona no saturada a la zona saturada, conocido como nivel freático, constituyendo las denominadas aguas subterráneas. Finalmente, todas las

aguas involucradas retornan a los océanos mediante la precipitación directa y la descarga tanto superficial como subterránea ^[6]. La figura 1 muestra todas las etapas involucradas en el movimiento del agua en el ciclo hidrológico.

II.1.2.- Aguas subterráneas

Las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran por debajo de la superficie del suelo, estas una vez infiltradas sufren una serie de procesos que le otorgan características químicas que son controladas por factores de tipo litológico, climático y antrópico, entre otros. ^[3]

Montero (1996) señala que las aguas subterráneas son el resultado de la infiltración del agua, generalmente de origen meteórico que percola a través de un suelo o roca que posee condiciones de permeabilidad y porosidad que facilitan su transporte y almacenamiento ^[8]. Los comportamientos de los sistemas de agua se encuentran controlados tanto por la porosidad que representa el porcentaje de espacios vacíos presentes en el cuerpo rocoso, como de la permeabilidad que es la capacidad que tiene la roca para conducir los fluidos a través de dichos poros. ^[9]

La importancia del agua subterránea es incuestionable, ya que éste recurso hídrico constituye la fuente principal de abastecimiento de más de la mitad del agua necesaria para el consumo humano. Por tal razón, Davis y De Wiest (1971) señalan que las aguas subterráneas son de gran importancia a nivel mundial, debido a las siguientes ventajas que posee:

1. No poseen organismos patógenos generadores de grandes enfermedades.
2. Poseen una temperatura y composición química relativamente constante.

3. No poseen turbidez ni color.
4. Tienen grandes volúmenes de agua almacenada que no se ven alterados a períodos de sequías.
5. Difícilmente se ven afectadas por procesos de contaminación biológica y radioactiva.
6. El agua subterránea puede significar la única fuente de abastecimiento en regiones donde la explotación de recursos hídricos superficiales no es posible. ^[3]

II.1.3.- Acuíferos

Los acuíferos son formaciones geológicas porosas y permeables que permiten almacenar y transmitir el flujo de las aguas subterráneas a velocidades lo suficientemente rápidas para lograr el suministro en los pozos ^[10]. Estas formaciones disponen de zonas por las que penetra el agua, conocidas como áreas de recarga que permiten la entrada o aporte de agua hacia el acuífero, cuando éste aporte llega a su máxima capacidad, ocurre la pérdida de agua de manera natural a través de una zona de descarga. ^[10]

De acuerdo al material que limita al acuífero y a las condiciones de presión hidrostática del agua en el subsuelo, estos se pueden clasificar como libres, confinados, semi-confinados y colgados. Los acuíferos libres presentan una capa impermeable subyacente, tienen una superficie libre del agua subterránea que está a presión atmosférica. Esta superficie de agua a presión atmosférica es lo que se conoce como superficie freática y constituye el límite superior del acuífero. Los acuíferos confinados, también denominados artesianos, presentan además una capa impermeable suprayacente que no permite su alimentación directa, sino a partir de una zona distante donde el material acuífero queda expuesto a la infiltración de las precipitaciones ^[10]. Por su parte, los acuíferos semi-confinados tienen la particularidad de que el estrato confinante corresponde a un acuitardo en lugar de un acuífugo o acuícludo; pueden recibir una cierta recarga a través de las capas semipermeables que lo confinan. Por último, los

acuíferos colgados hacen referencia a las acumulaciones de agua subterránea de escasa continuidad lateral situadas por encima del nivel freático principal. La figura 2 representa los tipos de acuíferos y sus características.

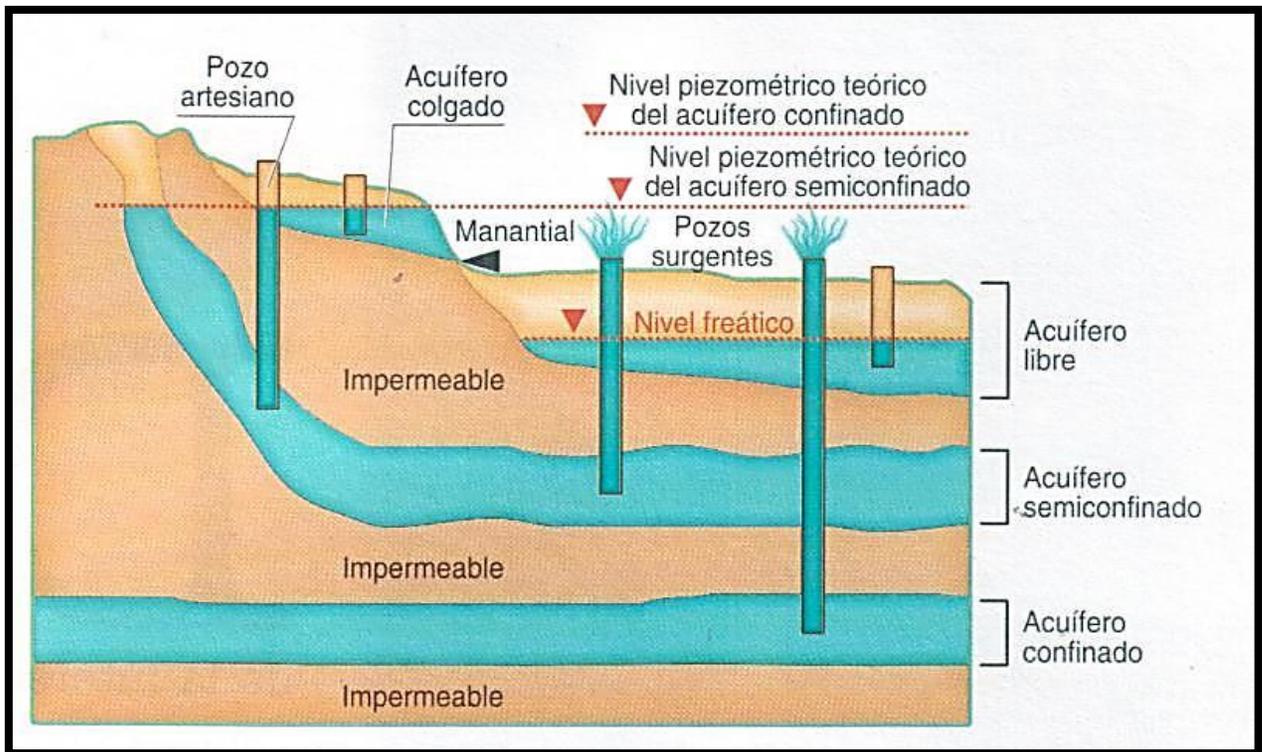


Figura 2. Tipos de acuíferos ^[11]

Las diferentes formaciones geológicas se pueden clasificar en función de su capacidad de almacenar y transmitir agua. De esta forma, se definen los acuitardos como aquellas formaciones semipermeables que, conteniendo agua incluso en grandes cantidades, la transmiten muy lentamente. Los acuicludos son aquellas formaciones porosas impermeables y que pueden almacenar agua, pero no transmiten y finalmente los acuífugos, que son rocas con porosidad nula, y por lo tanto, incapaces de almacenar y transmitir agua. ^[12]

II.1.4.- Características hidrogeológicas de un acuífero

La propiedad de los acuíferos de almacenar y distribuir el agua depende de varios factores como porosidad, permeabilidad, transmisibilidad y coeficiente de almacenamiento, los cuales permiten realizar evaluaciones de la magnitud del recurso y su aprovechamiento racional sin peligro de agotarlo. ^[13]

Porosidad

La porosidad es la proporción del volumen no ocupado por material sólido. Es un parámetro que indica cuánta agua puede ser almacenada en el material saturado. La porosidad total de los materiales geológicos se expresa en forma de porcentaje aplicando la ecuación: $n = (VP/VT) \times 100$, donde “VP” es el volumen de espacios vacíos y “VT” es el volumen total de la roca. ^[14]

Permeabilidad (K)

La permeabilidad se define como la capacidad de un medio poroso para transmitir agua; es decir, es una característica de la roca que está determinada por la capacidad que tiene un fluido de moverse a través de sus poros interconectados. Asimismo, el coeficiente de permeabilidad K, según ley de Darcy es el volumen de agua libre que percola durante la unidad de tiempo, a través de la unidad de superficie de una sección total de la capa acuífera bajo un gradiente hidráulico igual a la unidad. ^[14]

Trasmisibilidad (T)

Representa la tasa de flujo de agua en metros cúbicos por día a través de una franja vertical del acuífero de un metro de ancho y que se extiende por todo el espesor saturado bajo la pendiente hidráulica de 100% a la temperatura de 20°C (la unidad es m³/d/m). El coeficiente de trasmisividad indica cuánta agua se moverá a través de la formación. [14]

Coeficiente de almacenamiento (S)

El coeficiente de almacenamiento (S) de un acuífero, es el volumen de agua cedida o tomada del almacenamiento del mismo, por unidad de área superficial cuando se produce un cambio unitario de carga. En acuíferos libres su valor coincide con la porosidad drenable. En acuíferos cautivos está ligado a la compresibilidad del agua y del medio acuífero, y su valor suele oscilar entre 10⁻⁵ y 10⁻³. [15]

II.1.5.- Nivel Piezométrico

En un punto de un acuífero el nivel piezométrico es la altura que alcanza el agua, sobre una horizontal de referencia cuando se deja éste a la presión atmosférica. [16]

II.1.6.- Nivel freático

El nivel freático corresponde en un acuífero libre al lugar en el que se encuentra el agua subterránea. En éste nivel la presión de agua del acuífero es igual a la presión atmosférica. [14]

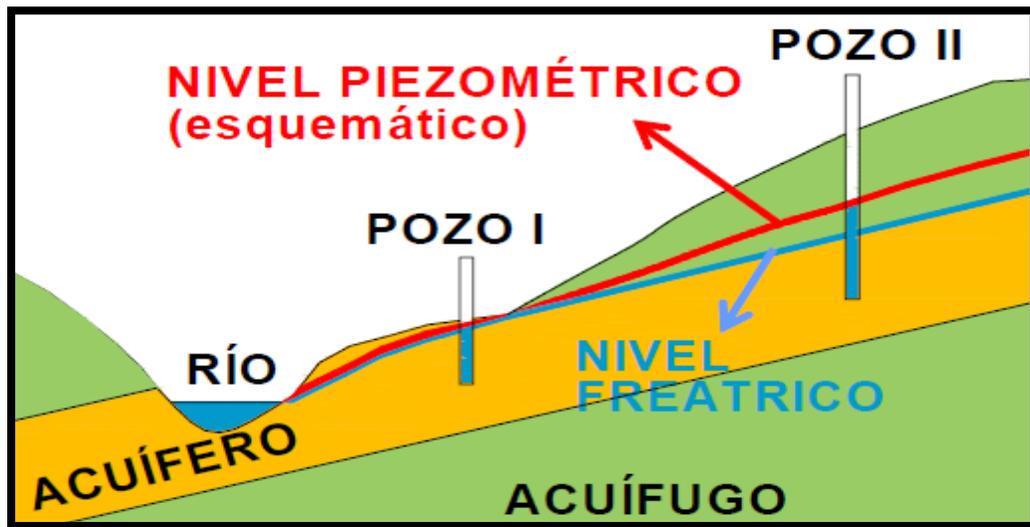


Figura 3. Diferencia entre nivel piezométrico y nivel freático.^[17]

II.1.7.- Interacción de las aguas subterráneas con la litología

El agua subterránea al circular por el interior de las rocas arrastra las sales solubles de estas. En las rocas permeables que tienen gran porosidad existe un contacto mayor entre la roca y el agua subterránea, por lo tanto, la cesión de sales es mayor ya que son rocas muy solubles que aportan una gran cantidad de iones a las aguas subterráneas. En cambio, el contacto de las aguas que circulan por las rocas permeables por fracturación es menos directo y suelen tener menos sales disueltas. ^[2]

Resulta importante saber que las aguas subterráneas pueden circular por diferentes terrenos, entonces su composición química en un punto determinado estará influenciada también por la litología de todos los terrenos atravesados anteriormente y por los fenómenos de infiltración desde la superficie. ^[2]

En general, las aguas procedentes de los terrenos kársticos son bicarbonatadas cálcicas o cálcico-magnésicas. Las de los terrenos yesosos son sulfatadas cálcicas. Las que circulan por terrenos sedimentarios de origen marino son cloruradas sódicas y las de terrenos sedimentarios de origen continental son bicarbonatadas cálcicas. [2]

II.1.8.-Clasificación de las aguas

Las aguas subterráneas pueden ser clasificadas en atención a su origen, concentración de los sólidos disueltos y composición química.

II.1.8.1.-Según su origen

De acuerdo a su origen las aguas subterráneas se clasifican como: connatas o fósiles, minerales, meteóricas, juveniles, metamórficas, marinas y magmáticas o volcánicas. [18]

Las aguas connatas o fósiles son aquellas que se encuentran atrapadas cuando ocurre el proceso de formación de los sedimentos, su origen generalmente es marino lo que explica su composición fuertemente clorurada [18]. Dichas aguas no son necesariamente aguas fósiles, pues pueden corresponder a sedimentos recientes a diferencia de las connatas que su origen parte de épocas geológicamente remotas. [12]

Por su parte, *las aguas meteóricas* han estado en contacto con el ciclo hidrológico recientemente antes de incorporarse a un acuífero. Proviene de la precipitación atmosférica y a partir de cuerpos de agua superficiales que percolan hacia el acuífero. Dichas aguas poseen bajas concentraciones iónicas que están controladas por las aguas superficiales y por las formaciones geológicas por donde circulan. [12]

Las aguas juveniles nunca han formado parte del ciclo hidrológico, proceden del interior de la tierra ascendiendo desde el manto terrestre sin haber estado antes en superficie y su interés es limitado. ^[12]

Por otro lado, *las aguas metamórficas* se definen como aquellas asociadas con las rocas durante su metamorfismo. Generalmente tienen elevadas concentraciones de CO₂ de combinación, de I⁻ y B, así como bajas concentraciones de Cl⁻ en relación con el agua de mar. ^[12]

Las aguas marinas son aguas de mar que han ocupado recientemente sedimentos costeros, similares en composición a las aguas oceánicas pero posiblemente con mayor dureza. ^[12]

Las aguas magmáticas y volcánicas están asociadas a eventos ígneos y/o hidrotermales de poca profundidad, con concentraciones relativamente elevadas de Li, F⁻, SiO₂, B, S²⁻ y CO₂. ^[12]

Finalmente, *las aguas saladas y salmueras naturales* son de origen marino, con largos periodos de permanencia en el terreno y en los que debido a procesos modificadores se altera su facies original. ^[12]

II.1.8.2.- Según sólidos disueltos totales (SDT)

De acuerdo a la concentración de sales inorgánicas disueltas, las aguas pueden clasificarse como dulces, salobres, saladas y salmueras. ^[19]

En ese sentido, las aguas dulces poseen concentraciones de los sólidos disueltos totales (SDT) menores a 1000 mg/L; mientras que las aguas salobres tienen concentraciones que se encuentran entre 1000 y 10000 mg/L; por su parte, las aguas saladas poseen concentraciones que van desde 10000 hasta 100000 y finalmente las aguas tipo salmueras tienen concentraciones desde 100000 hasta saturarse. En la Tabla 1 se presenta la clasificación según sólidos disueltos totales (SDT) propuesta por (Hem, 1985).

Tabla 1. Clasificación según la concentración de sólidos disueltos totales (SDT). ^[19]

Tipo de agua	SDT (mg/L)
Dulce	< 1000
Salobre	1000 – 10000
Salada	10000 - 100000
Salmuera	> 100000 hasta saturación

En el mismo orden de ideas, las concentraciones de los sólidos disueltos totales también pueden ser determinados de la siguiente manera:

$$\text{SDT} = \Sigma (\text{Na}^+ + \text{K}^+ + \text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+} + \text{Cl}^- + \text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{SiO}_2) \text{ (mg/L)}$$

II.1.8.3.- Según la composición química

La composición química natural de las aguas subterráneas está influenciada por procesos como la evaporación y concentración de sales atmosféricas, la interacción del

agua con los minerales del suelo y la incorporación de aguas residuales que aún no han sido lavadas. La precipitación atmosférica, mineralogía de los acuíferos, geología, procesos geoquímicos y la actividad antrópica son factores que condicionan la composición química de las aguas subterráneas. Esta interacción permite clasificar las aguas subterráneas según la abundancia relativa de las especies químicas presentes en especies mayoritarias, especies minoritarias y traza. ^[13]

Entre las especies mayoritarias presentes están los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ y los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- ; asimismo es muy común considerar el ión NO_3^- como especie mayoritaria aunque el intervalo de concentración sea muy pequeño, ya que la actividad antrópica constituye un parámetro fundamental al estudiar la calidad de las aguas. Las aguas subterráneas suelen tener cantidades considerables de ácido silícico no disociado que se expresa como sílice disuelta SiO_2 .

Las especies minoritarias no superan el 1% del contenido iónico total, ésta clasificación abarca elementos traza y cualquier especie que se encuentre en cantidades difícilmente medibles ^[13]. En tal sentido, en la tabla 2 se muestra la clasificación de las especies químicas disueltas en las aguas subterráneas atendiendo a su abundancia relativa.

En todo estudio de tipo hidrogeoquímico es importante conocer el origen de las especies químicas en solución; por ello, seguidamente se realiza una reseña sobre este aspecto para cada especie de interés. El Na^+ presente en las aguas, debe su origen principalmente a la liberación de productos solubles generados durante la meteorización de feldespatos del grupo de las plagioclasas, así como a la disolución de sales evaporíticas, procesos de intercambio iónico e influencia de actividades antrópicas ^[3]. Por su parte, el catión K^+ presenta una solubilidad elevada y su fuente de aporte se asocia al agua que percola en los depósitos evaporíticos y en la disolución de aluminosilicatos como los feldespatos de potasio. ^[3]

Tabla 2. Clasificación de las especies químicas disueltas en las aguas subterráneas atendiendo a su abundancia relativa. ^[3]

Especies mayoritarias (> 10,0 mg/L)			
Bicarbonato	Calcio	Cloruro	Silicio
Magnesio	Sulfato	Ácido carbónico	Sodio
Especies minoritarias (0,01-10,0 mg/L)			
Boro	Carbonato	Potasio	Nitrato
Fluoruro	Hierro	Estroncio	Potasio
Especies traza (< 0,01 mg/L)			
Aluminio	Cobalto	Níquel	Torio
Antimonio	Cobre	Niobio	Estaño
Arsénico	Galio	Fosfato	Titanio
Bario	Germanio	Platino	Tungsteno
Berilio	Oro	Radio	Uranio
Bismuto	Indio	Rubidio	Vanadio
Bromuro	Ioduro	Rutenio	Yterbio
Cadmio	Lantano	Escandio	Cinc
Cerio	Litio	Selenio	Circonio
Cesio	Manganeso	Plata	
Cromo	Molibdeno	Talio	

El ión Ca^{2+} constituye un catión principal de las aguas naturales, su origen se atribuye a la disolución de calizas (CaCO_3), dolomitas $(\text{Ca,Mg})(\text{CO}_3)_2$, yeso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) y anhidritas (CaSO_4), así como también a la disolución de feldespatos y otros silicatos.

Mucho más soluble que el Ca^{2+} es el Mg^{2+} , las dolomitas provenientes de las rocas sedimentarias constituyen una fuente principal de este catión. ^[12]

Por otro lado, en la mayoría de las aguas subterráneas también se encuentran aniones como el HCO_3^- , cuya concentración varía entre 50 y 400 mg/L, este proviene de la disolución parcial del ácido carbónico (CO_2) cuando reacciona con el agua. También está presente el ión Cl^- , cuyas sales son altamente solubles, lo que justifica en muchos casos, las altas concentraciones en las aguas subterráneas. Estos iones pueden ser aportados por cuatro fuentes principales: 1) agua marina atrapada en los sedimentos, 2) disolución de sal común, 3) concentración por evaporación de cloruros, y 4) disolución de partículas de materia sólida proveniente de la atmósfera. ^[3]

Con respecto al ión SO_4^{2-} , éste puede provenir tanto de la oxidación de sulfuros que se distribuyen en las rocas ígneas y sedimentarias, como a partir de la descomposición de las especies orgánicas; no obstante, el aporte fundamental proviene a partir de la disolución de yeso disperso en el terreno. Los iones NO_3^- son indicadores de contaminación por lo que en las aguas subterráneas su presencia se le atribuye en la mayoría de los casos a la influencia antrópica ^[3]. Finalmente, el origen fundamental de la sílice disuelta (SiO_2) en el agua subterránea proviene de los procesos de hidrólisis de los aluminosilicatos y silicatos. ^[3]

El resto de los iones y sustancias disueltas tales como Al^{3+} , Ba^{2+} , Br^- , Pb^{2+} , Zn^{2+} , Li^+ y Cd^{2+} , entre otros, pueden estar presentes en concentraciones mucho más pequeñas que las mencionadas anteriormente, oscilando entre 0,0001 y 0,1 mg/L. En ese sentido, estos iones reciben el nombre de iones trazas cuyas concentraciones se encuentran formando menos del 1% del contenido iónico total, por lo que su proporción es difícilmente cuantificable por medios químicos usuales; sin embargo, en la actualidad existen equipos y tecnologías disponibles para su determinación. ^[3]

II.1.9.- Representación gráfica de análisis químicos

Existen herramientas capaces de dilucidar los procesos que controlan la composición de las aguas en general, permitiendo entender las diferencias y procesos que ocurren durante el ciclo hidrológico; así como también, identificar las distintas facies hidrogeoquímicas presentes en una zona. [12]

Una de las herramientas más comunes es el diagrama triangular o diagrama de Piper (1953), ideal para representar tres componentes de manera simultánea. Este diagrama está compuesto a su vez por dos figuras triangulares que representan el porcentaje de meq/L de los cationes Ca^{2+} , Mg^{2+} y $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ y aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} y Cl^- ; asimismo, este diagrama posee un romboedro en la parte central que expresa el carácter químico del agua en función a la concentración obtenida durante la proyección de los iones en los triángulos [12]. En la figura 4 se puede observar un diagrama de Piper típico.

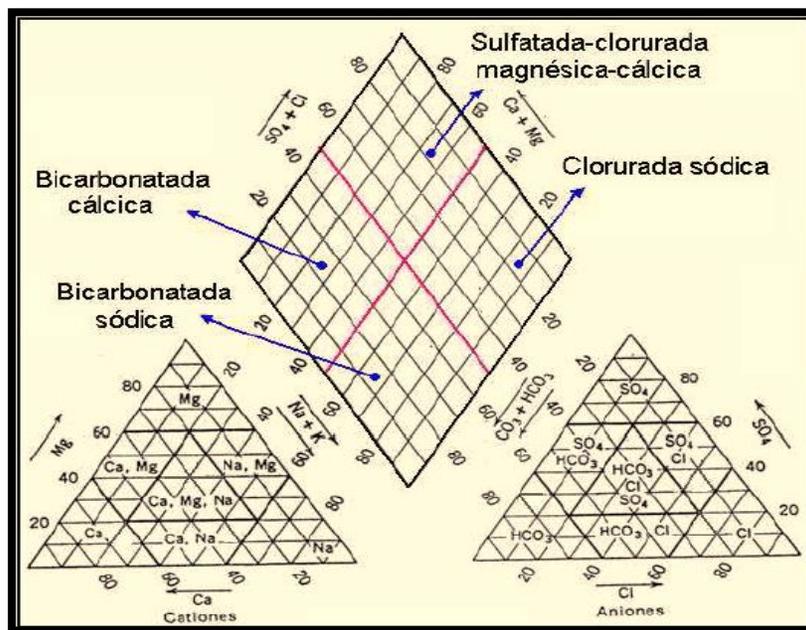


Figura 4. Tipos de aguas deducidas de un diagrama triangular de Piper. [12]

Por su parte, las figuras de Stiff (1951) permiten realizar una buena caracterización de las concentraciones iónicas, brindando información sobre los aspectos químicos de los tipos de agua ^[12]. Esta herramienta se basa en representar figuras en forma de estrellas que se relacionan con la composición química del agua y explican la tendencia y comportamiento de la misma. El diagrama consiste en la construcción de semirrectas convergentes o paralelas proporcionales a cada ión, que al unir los extremos generan un polígono. Sobre cada semirrecta, es tomado un solo ión que puede ser un catión y un anión simultáneamente. La forma de la figura resultante identifica el tipo de agua y el origen ^[12]. En la figura 5, son mostrados algunos diagramas de Stiff característicos.

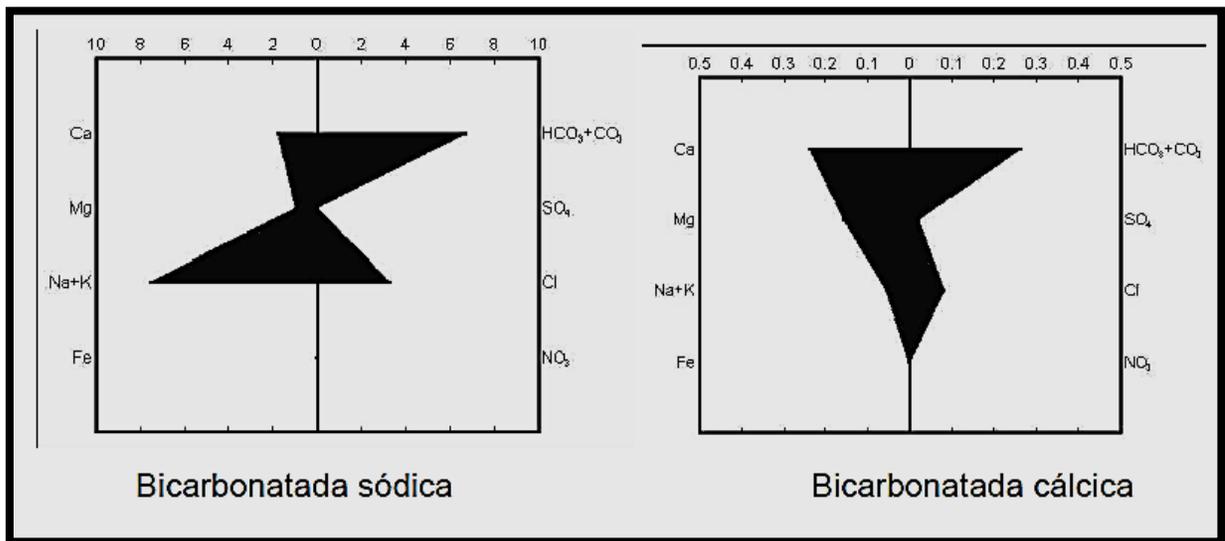


Figura 5. Figuras de Stiff. ^[20]

Los diagramas bivariantes son también herramientas que permiten representar la variación de uno o varios parámetros con respecto a otro y son útiles para visualizar la variación de índices o relaciones hidrogeoquímicas, con la finalidad de poder hacer interpretaciones en cuanto al origen de las concentraciones de las especies disueltas presentes en las aguas subterráneas ^[21]. En la figura 6 se muestra un ejemplo de este

tipo de diagramas al comparar las concentraciones de Na^+ respecto a las concentraciones de Cl^- .

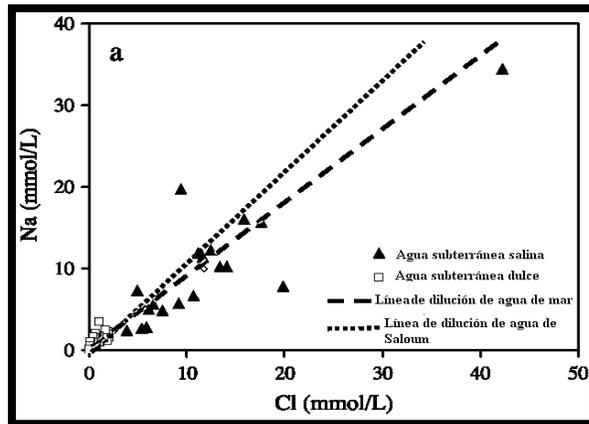


Figura 6. Diagrama bivalente. [22]

Por otra parte, existen otras herramientas como lo son los Diagramas de Collins en donde se representa el análisis de aguas mediante barras de tamaño proporcional a los mEq/L de las especies químicas que participan en el equilibrio del sistema, como puede observarse en la figura 7. La ventaja de este método está en el orden de la disposición y en el uso de ciertas combinaciones de colores. Si existe un error en el balance iónico, este se reflejará por la desigualdad en la longitud de las columnas de cationes y aniones. [23]

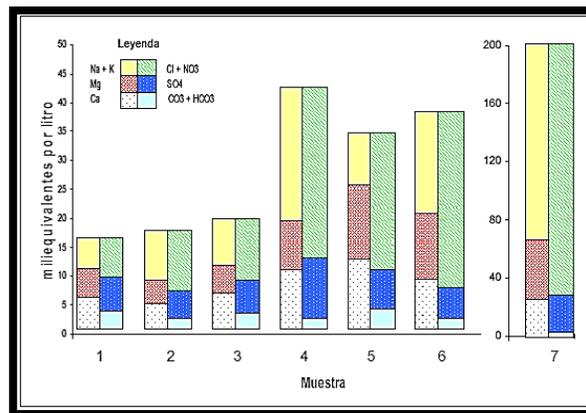


Figura 7. Diagrama de Collins [24]

II.1.10.- Relaciones interiónicas

La variedad en la calidad de las aguas subterráneas se rige por ciertos procesos naturales que ayudan a tener una visión acerca de las modificaciones en las características de las mismas. En tal sentido, las relaciones iónicas ayudan a identificar estos procesos que sufren las aguas subterráneas durante su evolución. Estas relaciones se expresan en miliequivalente por litro (meq/L), las cuales reflejan las diferentes propiedades de interacción con el medio.^[10] Entre las principales relaciones empleadas se destacan las siguientes:

Relación Mg^{2+}/Ca^{2+} : esta relación refleja la relación entre la calcita y la dolomita en las aguas naturales que se mueven por silicatos, es una expresión del grado de acidez de estas rocas y varía frecuentemente entre 0,3 y 1,5 en las aguas continentales.^[10]

Relación K^+/Na^+ : Está relacionada con el intercambio iónico que experimentan las aguas subterráneas, en la zona del suelo, con las arcillas y otros tipos de rocas. Se ha empleado para distinguir diferencias entre aguas superficiales.^[10]

Relación Cl^-/HCO_3^- : Explica la relación entre los minerales calcita y halita disueltas en el agua, así como el grado de intrusión de las aguas marinas en los karsts litorales, es de interés para seguir el proceso de concentración de sales en el sentido del flujo subterráneo.^[10]

Relaciones Ca^{2+}/Cl^- , Mg^{2+}/Cl^- , $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / Cl^-$, $(Na^+ + K^+) / Cl^-$ y Sr^{2+}/Ca^{2+} : Estas relaciones se utilizan para determinar el denominado índice de cambio de base, el cual relaciona los iones cambiados en una reacción de intercambio iónico y los iones previamente existentes en el medio.^[10]

II.1.11.- Calidad de las aguas

El Decreto Presidencial 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), define la calidad de las aguas como el conjunto de las características físicas, químicas y biológicas de las aguas naturales. En ese sentido, es importante destacar que a través de estas normas y reglamentos se procura proteger la calidad requerida de las aguas, esta va a depender del propósito al que esté destinado ^[25]. Entre los parámetros frecuentemente destacados en las normativas ambientales con propósitos de calidad, se encuentran los descritos en la tabla 3. Estos permiten clasificar un cuerpo de agua de una región en específico, de acuerdo a su calidad. ^[26]

Tabla 3. Límite o rango de algunos parámetros que determinan la calidad de las aguas. ^[25]

Parámetro	Límite o rango máximo de acuerdo al tipo de agua			
	Clase 1 Excelente	Clase 2 Muy buena	Clase 3 Buena	Clase 4 Aceptable
Calcio (mg/L)	200	200	200	----
Carbonatos (mg/L)	----	5	5	----
Bicarbonatos (mg/L)	----	370	370	----
Cloruros (mg/L)	300	250	250	----
Conductividad (µS/cm)	----	2000	----	----
Hierro (mg/L)	1	1	5	5
Magnesio (mg/L)	70	70	70	----
Nitratos + nitritos (mg/L)	10	10	----	----
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	3,8-10,5
Potasio (mg/L)	----	20	20	----
Sodio (mg/L)	140	140	----	----
Sólidos disueltos totales	1300	1300	1300	----
Sulfatos (mg/L)	340	340	340	----

II.1.12.-Parámetros que definen los estudios de la calidad de las aguas subterráneas.

Los parámetros que definen a la calidad de las aguas son divididos en físicos, químicos y microbiológicos. ^[12]

II.1.12.1.-Parámetros físicos

Entre los parámetros físicos se encuentran la temperatura, conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y sólidos suspendidos. ^[12]

La temperatura

Este parámetro constituye un dato fundamental no sólo en cuanto a su uso, sino como característica hidrogeoquímica. Generalmente, las aguas subterráneas tienen una temperatura poco variable, mientras más profundo sea el acuífero más constante permanece. La temperatura del agua subterránea es igual o un poco mayor a la temperatura media anual de la localidad. ^[12]

Conductividad eléctrica

Debido al carácter iónico del agua, ésta se hace conductora de electricidad, mientras la concentración de los iones disueltos aumenta, también aumenta la capacidad de un agua para conducir corriente eléctrica que es igual a su conductividad (C). ^[27]

La conductividad toma mucha importancia ya que sirve como criterio para definir el grado de homogeneización de un cuerpo de agua cuando es recolectado. Este parámetro en el

agua aumenta con la temperatura en una razón aproximada de 2 % por °C; también brinda información de la concentración de sales disueltas y en consecuencia, del grado de contaminación inorgánica por sólidos disueltos en el agua. ^[28]

Sólidos disueltos totales (SDT)

Están definidos por las sales minerales que el agua disuelve cuando se entra en contacto con la corteza terrestre, éste parámetro se relaciona tanto con la conductividad como con la salinidad del agua. Las aguas de uso doméstico e industrial deben contener menos de 1000 mg/L, mientras que las aguas de uso agrícola deben contener cantidades menores a 3000 mg/L. ^[3]

Sólidos suspendidos (SS)

Lo constituyen las partículas que están dispersas en el agua de manera coloidal, estos sólidos no se sedimentan ya que poseen cargas eléctricas semejantes lo que hace que queden suspendidas en la superficie del agua. Este parámetro está muy relacionado con la turbidez del agua y determina tanto el color aparente del agua como la profundidad hasta la que penetra la luz solar. ^[3]

II.1.12.2.-Parámetros químicos

Los parámetros químicos relacionados con la calidad del agua son el pH, alcalinidad y salinidad. ^[27]

pH

El potencial de hidrógeno es útil para definir la acidez y alcalinidad, su determinación constituye una de las pruebas más importantes utilizadas en el análisis químico del agua. [28]

El pH se define como el logaritmo negativo de la actividad realizada por los protones (H^+) en una disolución. En las aguas subterráneas éste valor de pH está entre 6,5 y 8,5. [28]

Alcalinidad

La alcalinidad de un agua determina su capacidad para neutralizar ácidos. En aguas naturales, ésta es debida a la presencia de bicarbonatos, carbonatos e hidróxidos; es un dato necesario para el cálculo de la cantidad de cal y carbonato de sodio necesaria para el proceso. El bicarbonato constituye la forma química de mayor contribución a la alcalinidad. Dicha especie iónica y el hidróxido son particularmente importantes cuando hay gran actividad fotosintética de algas o cuando hay descargas industriales en un cuerpo de agua. [27]

Salinidad

La salinidad es la cantidad de gramos de sal por kilogramo de muestra medida en mg/L, corresponde a los sólidos totales en el agua cuando los carbonatos se convierten en óxidos y todos los iones yoduro y bromuro pasan a ser cloruros, así como a los sólidos presentes cuando se oxida toda la materia orgánica. [28]

II.1.12.3.-Parámetros microbiológicos

Estos parámetros están conformados por los coliformes totales y fecales, entre otros.

Coliformes totales y fecales

Son bacterias que representan aproximadamente el 10% de los microorganismos intestinales de seres humanos y animales, son frecuentemente utilizadas como indicadores de contaminación. Los coliformes totales pueden ser de origen fecal o de vida libre, se multiplican cuando existe materia orgánica. Los coliformes fecales son bacterias más termorresistentes, éstas constituyen los mejores indicadores de contaminación por parte de la materia fecal. ^[28]

II.1.13.- Factores que controlan la composición de las aguas subterráneas

La composición de las aguas subterráneas está controlada por factores como el clima, la topografía, litología, la actividad antrópica y el tiempo de residencia, entre otros. ^[12]

Clima

El clima influye en las características fisicoquímicas de las aguas subterráneas. La evapotranspiración predomina sobre la precipitación atmosférica en épocas de sequía impidiendo la recarga y acumulando sales en el suelo, en cambio en las épocas húmedas se propicia la recarga debido a las fuertes precipitaciones. ^[12]

El volumen de recarga de agua subterránea depende de la distribución de la precipitación anual. Existe una mayor infiltración cuando las lluvias se distribuyen a lo largo del año; en ese sentido, las lluvias torrenciales favorecen drenajes superficiales directos debido a que la infiltración en intervalos de tiempo cortos es inferior al volumen de agua. ^[29]

Topografía

La circulación del agua subterránea y su distribución tanto de las áreas de recarga como descarga, está condicionada por la topografía del terreno ^[29]. En zonas de bajo relieve predominan procesos de sedimentación y meteorización química, favoreciendo la presencia de una mayor concentración de sólidos disueltos en las aguas. ^[30]

Litología

Es un factor importante que determina la concentración de las especies mayoritarias en fase disuelta que a través de la composición mineralógica precisa el comportamiento del agua subterránea frente a agentes que actúan en la meteorización. ^[31]

Actividad antrópica

La composición química original de las aguas subterráneas puede verse afectada como consecuencia de las diversas actividades realizadas por el hombre, generalmente asociadas a faenas como la ganadería, agricultura y actividad industrial que pueden causar el progresivo deterioro de la calidad de las aguas subterráneas, alterando los niveles a tal punto que en algunas situaciones conllevan al solapamiento de los procesos geoquímicos en los sistemas subterráneos. ^[26]

II.1.14.-Fenómenos modificadores de la composición química de las aguas subterráneas

Cuando se incorporan los constituyentes al agua subterránea, ésta adquiere una configuración composicional que no es constante durante el recorrido del agua. El grado de modificación de la composición depende del tipo e intensidad de los procesos a la que se somete, entre los fenómenos más importantes se tienen la reducción de sulfatos de hierro, intercambio iónico, fenómeno de reducción-oxidación y los procesos de concentración y precipitación de sales. [27]

Reducción de sulfatos de hierro

Este proceso es realizado a través de bacterias que viven en el terreno, las cuales actúan como catalizadores químicos de una serie de reacciones que en su ausencia no se producen naturalmente con suficiente rapidez. Este fenómeno que ocurre en ambientes anóxicos con abundante materia orgánica, consiste en el paso de ion sulfato SO_4^{2-} a un estado menor de oxidación, en general S^{2-} y a veces S ó $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$. [27]

Intercambio iónico

El proceso de intercambio iónico ocurre con mayor frecuencia entre los cationes, y los minerales de arcilla que poseen un grado de notable de capacidad de quimisorción. El intercambio catiónico afecta principalmente a los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} , así como al H^+ , Li^+ y Sr^{2+} ; mientras que el K^+ y el NH_4^+ , tienden a ser fijados irreversiblemente. [12]

Fenómeno de reducción-oxidación

Los fenómenos de óxido-reducción pueden modificar la composición del agua, ya sea llevando a solución o precipitando iones que pueden presentarse en varios estados de valencia. Cuando hay presencia de oxígeno, los sulfuros del terreno pueden oxidarse a ión SO_4^{2-} , aumentándose en gran parte la concentración del mismo ^[12].

Procesos de concentración y precipitación de sales

Al aumentar el contacto del agua con el sustrato a través del cual percola, se van disolviendo más sales hasta que es alcanzado el respectivo producto de solubilidad de las mismas. El aumento de concentración permite disolver nuevas cantidades de sales que estaban a nivel de saturación a consecuencia del aumento de la fuerza iónica ^[12].

II.1.15.-Contaminación de las aguas subterráneas

La contaminación de las aguas subterráneas no ocurre de manera natural. Las actividades industriales, construcciones subterráneas, vertidos de desechos urbanos e industriales, entre otras actividades, son los principales influyentes en los procesos de contaminación de los acuíferos. La contaminación de las aguas subterráneas puede ser clasificada como difusa y puntual ^[13]

La contaminación difusa de las aguas subterráneas, ocurre por la llegada de un contaminante distribuido sobre una superficie más o menos extensa. Puede tener su origen por intrusiones marinas, abonos agrícolas, plaguicidas+ y productos fitosanitarios, entre otros. ^[13]

La contaminación puntual se caracteriza por la llegada localizada de un contaminante al acuífero a través de un foco concentrado o de un área pequeña, cuyo origen puede partir

de actividades ganaderas, domésticas e industriales, así como de residuos sólidos o vertidos directos mediante pozos de inyección.^[13]

II.1.16.-Las aguas subterráneas en Venezuela

Las aguas subterráneas representan una importante fracción de la masa total del agua de cada continente, de hecho ocupan mayores volúmenes que el agua retenida en lagos y lagunas. De manera cuantitativa constituyen alrededor del 95% del total agua dulce líquida existente en el planeta. Por su parte, Venezuela cuenta con grandes riquezas naturales y abundantes recursos hídricos superficiales y subterráneos, tal es así que ocupa la sexta posición en América y decimotercera en el mundo. La disponibilidad de este importante recurso hídrico en Venezuela, viene dado por 1320 Hm³/año en agua dulce superficial, mientras que en aguas subterráneas, el volumen disponible alcanza los 30510 Hm³/año.^[32]

Las reservas renovables de aguas subterráneas en Venezuela se ubican tanto en sedimentos no consolidados como consolidados. Las zonas con mejores disponibilidades de aguas subterráneas y de acuíferos de importancia regional, se encuentran principalmente en las zonas de la Región Central, en el Sur y planicie del Lago de Maracaibo, en el piedemonte de la región Andina de los Llanos Centrales y Occidentales, en la Mesa de Guanipa, al centro del estado Anzoátegui y en algunos sectores de la extensa franja de los acuíferos costeros.^[32]

II.1.17.- Prospección de aguas subterráneas

La prospección de aguas subterráneas es el conjunto de trabajos de investigación que permiten la ubicación de acuíferos de los que se puede obtener agua en cantidad y calidad adecuada para un determinado fin. ^[2]

Existen diferentes métodos de prospección de las aguas subterráneas, entre los que destacan los métodos directos y los indirectos. Los métodos directos lo constituyen los geológicos, climáticos e hidrológicos; mientras que los indirectos, están relacionados con la aplicación de herramientas geofísicas. ^[33]

II.1.17.1.- Métodos directos

Los métodos directos permiten conocer las características de un sitio mediante la observación directa de las características de las aguas subterráneas; así como del comportamiento dinámico general del suelo y las rocas. ^[2]

II.1.17.1.1.-Métodos geológicos

Los métodos geológicos se basan fundamentalmente en interpretaciones previas al trabajo de campo, que permiten identificar las principales unidades hidrogeológicas, fracturas y formaciones rocosas, así como de la elaboración de perfiles geológicos que resultan de gran utilidad para visualizar la geometría, espesor y otras características de los acuíferos. ^[2]

En ese sentido, una herramienta frecuentemente utilizada es a través del estudio de las fotografías aéreas, las cuales constituyen también un excelente instrumento para la cartografía geológica porque pone de relieve aspectos difíciles de visualizar y detectar sobre el propio terreno. ^[2]

II.1.17.2.- Métodos indirectos

Es importante señalar que los métodos geofísicos pueden ser aplicados en la exploración de las aguas subterráneas como métodos indirectos; es decir, son útiles en la determinación de las zonas que son favorables y que cumplen con las condiciones necesarias para que una formación geológica sea explotable como acuífero, esto una vez que los parámetros físicos del subsuelo son conocidos. ^[34]

Las técnicas geofísicas superficiales son de mucha ayuda para entender el funcionamiento de un acuífero, proponer un modelo conceptual del mismo y como consecuencia enfrentar los problemas surgidos durante la contaminación de las aguas subterráneas, su caracterización y evolución temporal; así como, en la identificación de los focos de contaminación que deterioran las aguas subterráneas. En el mismo orden de ideas, dichos estudios pueden ser de interés durante el control de calidad de las obras de captación, tanto en su fase constructiva, como en la de operación. Las investigaciones geofísicas de este tipo generalmente alcanzan a estudiar los primeros 300 m de la superficie terrestre. ^[34]

II.1.17.2.1-Métodos geoelectricos

Estos métodos utilizan las variaciones de las propiedades eléctricas de las rocas, en especial su resistividad o su valor inverso conocido como conductividad. Cuando las rocas son muy resistivas carecen de poros o fisuras que puedan estar saturados en agua. Sin embargo, cuando existen aguas subterráneas acumuladas en los espacios de las rocas, la resistividad será mucho más baja, debido a que el agua, por la presencia de sales disueltas en ella, actúa como un conductor. ^[34]

En Venezuela, la aplicación de la prospección geofísica con fines hidrogeológicos se ha enfocado al uso de los métodos eléctricos en una dimensión principalmente Sondeos Eléctricos Verticales (SEV).^[34]

Sondeo eléctrico vertical

El sondeo eléctrico vertical, otorga información necesaria para la determinación de los cambios verticales de las propiedades geoelectricas del subsuelo. Consiste básicamente en inyectar corriente eléctrica continua en la tierra, proveniente de una fuente artificial a través de un par de electrodos de cobre o impolarizables. Usando otro par de electrodos de cobre o impolarizables, se mide la diferencia de potencial eléctrico entre ambos. La interpretación de la información obtenida de los sondeos, permite determinar la profundidad y espesores de los diferentes estratos de diferentes resistividades, al aumentar las distancias de los electrodos con el consecuente aumento en la penetración del sondeo.^[35]

La resistividad (ρ) es una característica propia de un material, que demuestra que tanto se opone el mismo al paso de la corriente eléctrica. En la exploración hidrogeológica es común encontrar materiales porosos que se comportan según la conductividad iónica.^[16] El inverso de la resistividad es la conductividad (σ), donde la resistividad se mide en ($\Omega.m$) y se expresa como se detalla en la figura 8.

$$\rho = R \cdot \frac{A}{L}$$

Figura 8. Ecuación de resistividad.^[16]

La resistividad en la mayoría de las rocas es elevada, por lo que hace que éstas actúen como semiconductores. La estructura de una roca, la cual condiciona su contenido en agua, es función de su naturaleza litológica; es decir, la resistividad del terreno depende tanto de la litología de la roca como del contenido de agua y su composición química. [15]

La finalidad del SEV es conocer la distribución vertical de las resistividades, bajo un punto sondeado. La mayor eficacia del método corresponde al caso en que los sondeos, son realizados sobre un terreno compuesto por capas lateralmente homogéneas en lo que respecta a la resistividad y limitados por planos paralelos a la superficie del terreno. [35]

En la práctica, lo que se mide es la resistividad aparente para lo cual se emplean dos tipos de dispositivos lineales: Schlumberger y Wenner, que consisten en dos electrodos de inyección de corriente (A y B) y dos de medición del potencial (M y N) que están perfectamente alineados. La configuración Schlumberger consta de un dispositivo simétrico que debe cumplir con la condición de que la distancia que separa a AB debe ser mayor o igual que cinco veces la distancia que separa a los electrodos MN. Por su parte, la configuración Wenner también posee un dispositivo simétrico pero los elementos se mantienen equiespaciados. En la figura 9 se representan los dos tipos de dispositivos de medida mayormente utilizados en los Sondeos Eléctricos Verticales. [33]

Los resultados de la interpretación de un perfil de SEV se suelen representar gráficamente en forma de cortes geoelectricos que son cortes o secciones que muestran la distribución de resistividades que posteriormente son utilizados para realizar cortes geológicos en el subsuelo. [33]

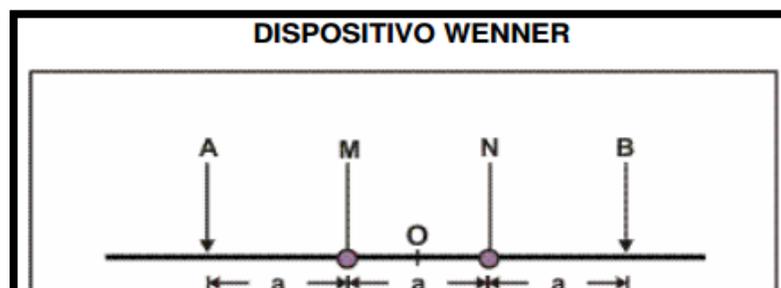


Figura 9. Dispositivos de medida para SEV^[33]

El comportamiento de la resistividad de un terreno varía significativamente cuando los poros o fisuras de una roca están saturados de agua, lo que conlleva a una disminución en la resistividad y por ende a un aumento en la capacidad conductora de corriente eléctrica. La movilidad de las aguas subterráneas se ve influenciada por el tipo de rocas en el subsuelo, como es el caso de los suelos conformados por arenas, gravas, calizas o basaltos las cuales son más permeables que las arcillas, pizarras, morrenas glaciales y limos que tienden a reducir el flujo del agua subterránea^[36].

La tabla 4 muestra los valores de resistividades de algunas rocas. Obsérvese que los mayores valores se encuentran en rocas con mayor resistividad.^[16]

Tabla 4. Resistividades de algunas rocas.^[16]

Materiales	Resistividad ρ ($\Omega.m$)
Margas	50 - 5.000

Calizas	300 - 10.000
Pizarras	100 - 1.000
Granito	300 - 10.000
Arcillas	1 – 20
Arenas	50 – 500
Conglomerados	1.000 - 10.000
Areniscas	50 - 5.000

II.2.-ANTECEDENTES

A continuación, serán citados una serie de trabajos de investigación tanto internacional como nacional, enmarcados en el área del conocimiento de la hidrogeoquímica, con el

propósito de visualizar el estado actual de esta línea de investigación; así como, para dar soporte conceptual al presente estudio.

Internacionales

Prasanna et al. (2011) evaluaron la calidad de las aguas subterráneas en la cuenca del río Gadilam en Tamil Nadu, (India). Para el estudio se analizaron 178 muestras de agua, distribuidas en: 156 recolectadas a partir de pozos de perforación, 14 del río y 8 de tanques localizados en la región, considerando además, algunos parámetros fisicoquímicos que permiten evaluar la calidad de las aguas y su aplicabilidad en usos domésticos. Estos parámetros fueron: concentración de sólidos disueltos (SDT), pH, conductividad eléctrica (CE) y la determinación de concentraciones de sodio (Na^+), calcio (Ca^{2+}), potasio (K^+), magnesio (Mg^{2+}), cloruro (Cl^-), sulfato (SO_4^{2-}), fosfato (PO_4^{2-}), sílice disuelta (H_4SiO_4), bicarbonato (HCO_3^-) y elementos traza. Adicionalmente, se realizaron estudios geofísicos mediante sondeos de resistividad utilizando el método de configuración de electrodos Schlumberger.

Los resultados obtenidos por Prasanna et al. (2011), indican que el agua subterránea posee altas concentraciones de sodio y cloruro que se le atribuye al gran impacto antrópico que aportan las industrias y a las intrusiones de aguas saladas; asimismo, contribuye con los niveles elevados niveles de metales traza que superan los límites aceptables de los estándares mundiales. Los estudios de resistividad revelaron que el agua contaminada de efluentes industriales y la intrusión de agua salina con mayor concentración iónica se observó cerca de la región costera de la zona de estudio. Por lo tanto, el agua subterránea de esta región no es apta para uso potable ni para riego.

Atwia et al. (2013) realizaron un estudio hidrogeoquímico y geofísico de las aguas subterráneas de la zona de Burg El-Arab, al noreste de la costa de Egipto. Estos autores

recolectaron 34 muestras de aguas subterráneas, a las que se les midieron los parámetros fisicoquímicos pH, temperatura, conductividad y sólidos disueltos totales (SDT). Asimismo, determinaron las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- y HCO_3^- . Adicionalmente, se realizó un estudio geofísico aplicando el método de sondeos eléctricos verticales midiendo la resistividad con la configuración Schlumberger, donde la distancia de los electrodos fue gradualmente aumentada. A partir de este estudio los investigadores determinaron que las aguas predominantes son cloruradas sódicas, en algunas zonas con baja salinidad así como en otras con alta salinidad, concluyendo además, que las aguas no son aptas para el consumo debido a su alta concentración de Na^+ , Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- .

Krishna et al. (2014) evaluaron la calidad de las aguas subterráneas y su idoneidad para efectos de consumo, procedentes de los acuíferos costeros urbanos en la región sur de Chennai, Tamil Nadu, India. Para este estudio, fueron recolectadas y analizadas 23 muestras de agua subterránea durante el mes de marzo de 2012, obteniéndose en el orden de mínimo y máximo, los siguientes valores: pH (6,3 a 8), conductividad (620-12,150 $\mu\text{S}/\text{cm}$), SDT (399,28-7824.6 mg/L), CO_3^{2-} (0-30 mg/L), HCO_3^- (0,9 a 58,9 mg/L), Cl^- (70,9-4067,89 mg/L), SO_4^{2-} (17,4 a 105 mg/L), NO_3^- (0,4 a 6,0 mg/L), Ca^{2+} (30-200 mg/L), Mg^{2+} (1,2 a 164 mg/L), Na^+ (69-1490 mg/L) y K^+ (8-340 mg/L). La aplicación del diagrama de Piper permitió identificar la presencia de aguas del tipo CaMgCl. Por su parte, la construcción del diagrama de Gibbs, señala que la mayoría de las muestras caen en los campos dominados por evaporación y la interacción agua-roca. Los resultados obtenidos sugieren que los iones dominantes de las aguas subterráneas Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Cl^- y SO_4^{2-} proceden de la intrusión de agua de mar y del proceso de disolución de yeso; mientras que, la concentración de nitratos fue asociada principalmente a fuentes antrópicas.

Bouderbala (2015) evaluó la calidad general de las aguas subterráneas destinadas a usos agrícolas del aluvial Nador Plain, al norte de Argelia. El estudio fue llevado a cabo considerando más de 24 pozos como puntos de muestreo. La técnica de recolección de datos incluyó la medición de parámetros fisicoquímicos temperatura, la conductividad eléctrica, sólidos disueltos totales y el pH medido en el campo; mientras que, la concentración de los iones Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , HCO_3^- , NO_3^- y SO_4^{2-} fueron medidas en el laboratorio. Según la información reportada por el autor de este trabajo, las aguas subterráneas en el sector sur son adecuadas químicamente para el uso agrícola, pero para el sector costero, es inadecuada para el riego. Los valores más altos de CE, Cl^- y Na^+ se registraron consistentemente en la zona costera. Estos investigadores señalan que la mineralización de las aguas subterráneas está dominada por estos dos iones Na^+ , Cl^- ; asimismo, apuntan que el área de recarga ubicada en el sector sur se caracterizó por una baja salinidad, por lo que el agua subterránea puede ser utilizada en esta zona sin ningún problema.

Hosseinifard et al. (2015) estudiaron la calidad de las aguas subterráneas para uso potable y agrícola en Rafsanjan Plain, (Iran). Para el estudio se emplearon 1040 muestras de agua subterránea al azar a las que le fueron analizados más de 15 parámetros fisicoquímicos diferentes, entre los que se destacan el pH, sólidos totales disueltos (SDT), conductividad eléctrica (CE); así como, la determinación de los iones calcio (Ca^{2+}), magnesio (Mg^{2+}), sodio (Na^+), cloruro (Cl^-), bicarbonato (HCO_3^-) y sulfato (SO_4^{2-}), también determinaron la concentración de boro (B) para cada una de las muestras. Los resultados obtenidos interpretados por medio de diagramas hidroquímicos, les permitió a los investigadores concluir que los principales iones en las aguas subterráneas son Na^+ y Cl^- , lo que exige una gestión especial para el control de la salinidad entendiendo el peligro que el sodio representa para toda la zona estudiada. A pesar de la situación crítica de la calidad del agua en el área bajo estudio, los agricultores se ven obligados a utilizar esta agua para prácticas agrícolas; por ello, recomiendan que una forma de incrementar la

producción de cultivos en estas áreas podría ser sembrando plantas altamente tolerantes a la salinidad y sodicidad. También concluyeron que la calidad de las aguas subterráneas no es apropiada para el uso potable y podría ser perjudicial para la salud.

Venkatramanan et al. (2015) evaluaron la calidad físico-química de las aguas subterráneas destinadas para el consumo y riego en Dalcheon, Ulsan, Corea del Sur. Los valores de concentración obtenidos para los cationes principales, en orden decreciente, fueron Ca^{2+} (94,3 mg/L) > Mg^{2+} (41,7 mg/L) > Na^+ (19,2 mg/L) > K^+ (3,2 mg/L); mientras que para los aniones fueron SO_4^{2-} (351 mg/L) > HCO_3^- (169 mg/L) > Cl^- (19 mg/L). Adicionalmente, construyeron mapas temáticos empleando sistemas de información geográfica, observándose que las zonas más adecuadas para el consumo y riego corresponden a los sectores SE, NE y NW; mientras que la zona SW y partes centrales, no son aptas para el consumo, así como su uso para el riego no es factible en la parte occidental del área de estudio. Este comportamiento fue asociado al tratamiento inadecuado de los efluentes procedentes de una mina de hierro abandonada, así como, a las actividades de riego y domésticas.

Mediante la agrupación de datos, Venkatramanan et al. (2015) lograron clasificar a las aguas subterráneas en $\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$, $(\text{Ca}, \text{Mg}) \text{Cl}_2$, CaCl_2 y CaHCO_3 , siendo éste último el tipo más predominante. Los procesos de equilibrio dilucidados en las muestras de agua fueron desde condición saturada a subsaturada con respecto a aragonito, calcita, dolomita y yeso debido a los procesos de precipitación y depositación. En general, este estudio mostró que los efluentes descargados a partir de residuos de minería fue la principal fuente de deterioro de la calidad del agua subterránea.

Abdellatif et al. (2016) realizaron una evaluación de las aguas subterráneas en la cuenca norte de Kharga Oasis, Egipto. Para el estudio se realizaron Sondeos Eléctricos Verticales en 28 puntos dispuestos en una línea de tendencia de Norte a Sur mediante la

aplicación de un dispositivo de tipo Schlumberger con una separación máxima de corriente de electrodo (AB) de 1000 m. Los datos de resistividad obtenidos fueron utilizados para la construcción de 17 secciones geoelectricas y 5 mapas de contorno que describe las capas dispuestas en el subsuelo en el área investigada. La correlación de los modelos obtenidos con la geología de la zona, la información hidrogeológica y los sondeos en los pozos sirvió para indicar que el acuífero superficial comprendía dos zonas, a saber: (A-superior) y (B-inferior) separados por una capa de esquisto altamente conductora. La zona superior (A) compuesta de arena fina a mediana con intercalaciones de arcilla delgadas y con una resistividad de baja a moderada. En esta zona se detectó que los valores de profundidad variaban de 10 a 70 m por debajo de la superficie del suelo y tenían un espesor de 25 a 90 m. Por su parte, la zona inferior (B) presentaba de moderados a altos valores de resistividad y los valores de profundidad oscilaban entre 60 a 125 m. En este sentido, concluyeron que era de esperar que el agua en la zona B tuviera mejor calidad que el agua de la zona A y que los lugares más adecuados para la perforación corresponde a los pozos que ocupan la parte Sur-Oeste del área de estudio para la zona (A) y la zona central en la zona (B).

Nacionales

Hernández (2007) realizó un estudio geoquímico de muestras de aguas subterráneas captadas al sur de Calabozo, Estado Guárico, Venezuela, con la finalidad de identificar los procesos que controlan la calidad química de las mismas. Durante la fase de campo, fueron captadas muestras de aguas subterráneas con la simultánea medida de los parámetros fisicoquímicos pH, Eh, conductividad, temperatura y alcalinidad; asimismo, en el laboratorio se determinó la concentración de las especies químicas mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- y sílice disuelta (SiO_2), mediante las técnicas de absorción y emisión atómica, cromatografía iónica y espectrometría de absorción molecular de UV-visible. El autor identificó tres tipos de agua: bicarbonatadas cálcicas o

magnésicas ($\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}-\text{HCO}_3^-$), bicarbonatadas sódicas ($\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$) y cloruradas sódicas (Na^+-Cl^-). Las relaciones interiónicas indicaron que los posibles procesos que gobiernan la composición química de las aguas es la interacción agua-roca a través del intercambio iónico y la disolución de sales evaporíticas, formadas durante los eventos de evaporación y luego lixiviadas hacia el subsuelo durante la precipitación atmosférica. Adicionalmente, fueron determinados otros posibles factores que controlan la composición química de estas aguas; a saber: evaporación, litología, tiempo y cambios climáticos estacionales.

Urrutia (2009) realizó un estudio hidrogeoquímico en el sector este de la sub-cuenca del Río Zuata, Área Junín de la Faja Petrolífera del Orinoco, Venezuela, con el fin de identificar él o los tipos de aguas presentes y determinar cuáles son los procesos y factores que pueden estar controlando la composición química de las aguas subterráneas en dicha cuenca. La caracterización fue realizada mediante la respectiva toma de muestras y la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad, Eh y alcalinidad; así como, mediante la determinación de las especies químicas Na^+ , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y sílice disuelta (SiO_2). Los resultados obtenidos permitieron establecer tres tipos de agua en la cuenca: bicarbonatadas sódicas ($\text{Na}^+-\text{HCO}_3^-$); bicarbonatadas cálcicas ($\text{Ca}^{2+}-\text{HCO}_3^-$) y sulfatadas cálcicas ($\text{Ca}^{2+}-\text{SO}_4^{2-}$). El autor determinó que los principales procesos que están controlando la composición química de las aguas subterráneas son la precipitación y disolución de sales evaporíticas; además que el proceso de intercambio iónico, probablemente estaría operando en el control de la composición química de las aguas estudiadas.

Biondo y Esteves (2010) realizaron un estudio hidrogeológico de las reservas de agua subterránea de la cuenca de la Laguna de Taiguaguay, estado Aragua. Entre las distintas actividades involucradas en este estudio, estuvo la de realizar un corte geológico para establecer las zonas con mejor condición acuífera, el levantamiento geológico de las

unidades litodémicas que limitan la cuenca, así como también determinaron los parámetros hidráulicos del acuífero y la variación de la superficie piezométrica a través de los años. Los resultados obtenidos permitieron establecer la existencia de dos tipos de acuíferos, uno de régimen libre ubicado hacia el sur de la zona y otro de régimen semiconfinado ubicado hacia el noroeste. Finalmente, obtuvieron que el 57,1% de los pozos son aptos para el uso doméstico y el 42,9% pozos no son aptos para el consumo humano; adicionalmente, haciendo uso de los valores de conductividad y atendiendo al Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5021, 1995), indican que los pozos son útiles para el riego por tener valores menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

Montero et al. (2011) evaluaron hidrogeoquímicamente las aguas subterráneas de los sectores Barbacoas, Estado Aragua y Cachamas, Estado Guárico, Venezuela, con el propósito de conocer los procesos que controlaban la composición química de estas aguas. Para lograr este objetivo, se recolectaron 16 muestras de agua subterránea con la simultánea medida de los parámetros fisicoquímicos pH, Eh, conductividad, temperatura y alcalinidad. Posteriormente, estos autores determinaron la concentración de las especies mayoritarias Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , sílice disuelta (SiO_2) y los elementos traza Fe, Rb, Sr, B, Ba, Cu, Ni, Zn, y Li usando las técnicas de espectrometría de emisión atómica con fuente de plasma inductivamente acoplado (ICP) y cromatografía iónica. Los resultados obtenidos permitieron establecer la existencia de dos tipos de aguas en la zona de estudio: sulfatada magnésica ($\text{Mg}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$) y bicarbonatadas magnésicas ($\text{Mg}^{2+}\text{-HCO}_3^-$). Estos investigadores señalan que la composición química del grupo I, correspondiente a las aguas del tipo bicarbonatadas magnésicas captadas en la Formación Mesa, está controlada por procesos de interacción agua-roca a partir de la disolución de silicatos, aluminosilicatos y carbonatos, así como el intercambio iónico; mientras que el grupo II, ubicado en la Formación Roblecito, indicó que la composición está controlada por el aporte atmosférico y por intercambio iónico.

Granadinos (2012) realizó una evaluación hidrogeológica-geofísica de las Formaciones Mesa y Las Piedras aflorantes en Santa Clara, estado Anzoátegui, Venezuela. La metodología se basó en correlacionar los resultados hidrogeológicos con los geofísicos, con el propósito de determinar los sitios probables para la construcción de nuevas obras de captación. Para ello, fueron realizadas mediciones de resistividad a través de la modalidad de Sondeos Eléctricos Verticales en 6 pozos, empleando una sonda multiparamétrica de tipo Schlumberger. Los resultados obtenidos permitieron la identificación de los primeros 15 m, obteniéndose rocas muy resistivas constituidas por arenas y gravas luego a partir de los 16 m, rocas de baja resistividad representadas por arenas y arcillas. Sin embargo, se requiere de nuevas investigaciones en zonas aledañas a la población de Santa Clara, así como el uso de equipos que penetren a una profundidad mayor de 100 m que permitan garantizar la ejecución de nuevas perforaciones para el aprovechamiento de acuíferos.

Kutos (2012) realizó un estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua, Venezuela. Para ello, fueron medidos los parámetros pH, temperatura, Eh, y conductividad, y se determinó la concentración de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , HCO_3^- , SiO_2 , F^- , Br^- , PO_4^{3-} , Fe, Sr, Rb, B, Ni, Li, Cu y Ba, en 18 muestras de agua subterránea. Las técnicas utilizadas fueron la cromatografía iónica (CI), la espectrofotometría atómica con plasma inductivamente acoplado (ICP) y la titulación potenciométrica. Mediante el diagrama de Piper, fue determinada la presencia de aguas cloruradas. Respecto a la calidad de las aguas, las mismas fueron clasificadas como aguas dulces, donde el 67% de las mismas no son aptas para el consumo.

Ughi (2014) a través de un estudio geofísico realizado a los acuíferos de la cuenca baja del río Güey al noreste del lago de Valencia, Venezuela, contempló la adquisición de 27 sondeos eléctricos verticales (SEV). Los resultados muestran que la zona norte del área

presenta los mayores valores de resistividad y resistencia transversal, pero paralelamente, también posee los mayores valores de conductancia, lo que verifica la alta complejidad granulométrica originada por depósitos de deyección en sitios de cambio abrupto en la pendiente topográfica. Las zonas sur y sureste son las mejores para la prospección de agua subterránea entre profundidades de 40 a 100 m. Mientras que al norte y noreste se ubican zonas de interés secundario por debajo de los 60 m de profundidad en forma de lentes con permeabilidad y porosidad condicionada a las variaciones granulométricas tanto verticales como laterales. La recarga del acuífero se ejerce desde la vertiente norte por escorrentía e infiltración superficial de los afluentes y desde la vertiente sur mediante el flujo de agua originado desde la infiltración del lago de Valencia.

II.3.-DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Ubicación y superficie

La zona de estudio corresponde al acuífero del sector Licua, Municipio Crespo, ubicado en la región centro occidental de la República Bolivariana de Venezuela, específicamente al noreste del estado Lara. Este sector se sitúa aproximadamente a 4,63 Km de Duaca, Municipio Crespo y 32,52 Km de Cabudare (Palavecino), a 634 metros sobre el nivel del

mar, su ubicación geográfica corresponde a las coordenadas se muestran en la tabla 5.

[36]

Tabla 5. Delimitación de la zona de estudio según sus coordenadas

PTO	COORDENADAS UTM WGS84 19	
	N	
	ESTE	NORTE
PTO 1	481243	1140981
PTO 2	486408	1141131
PTO 3	481115	1137545
PTO 4	486287	1137550

El municipio Crespo está ubicado 34 Km. aproximadamente al Norte de Barquisimeto, tiene una elevación media de 800 m.s.n.m. y alberga una población de 49.697 habitantes según el censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística en el año 2011. Sus actividades económicas son principalmente la agricultura, ganadería y el comercio.

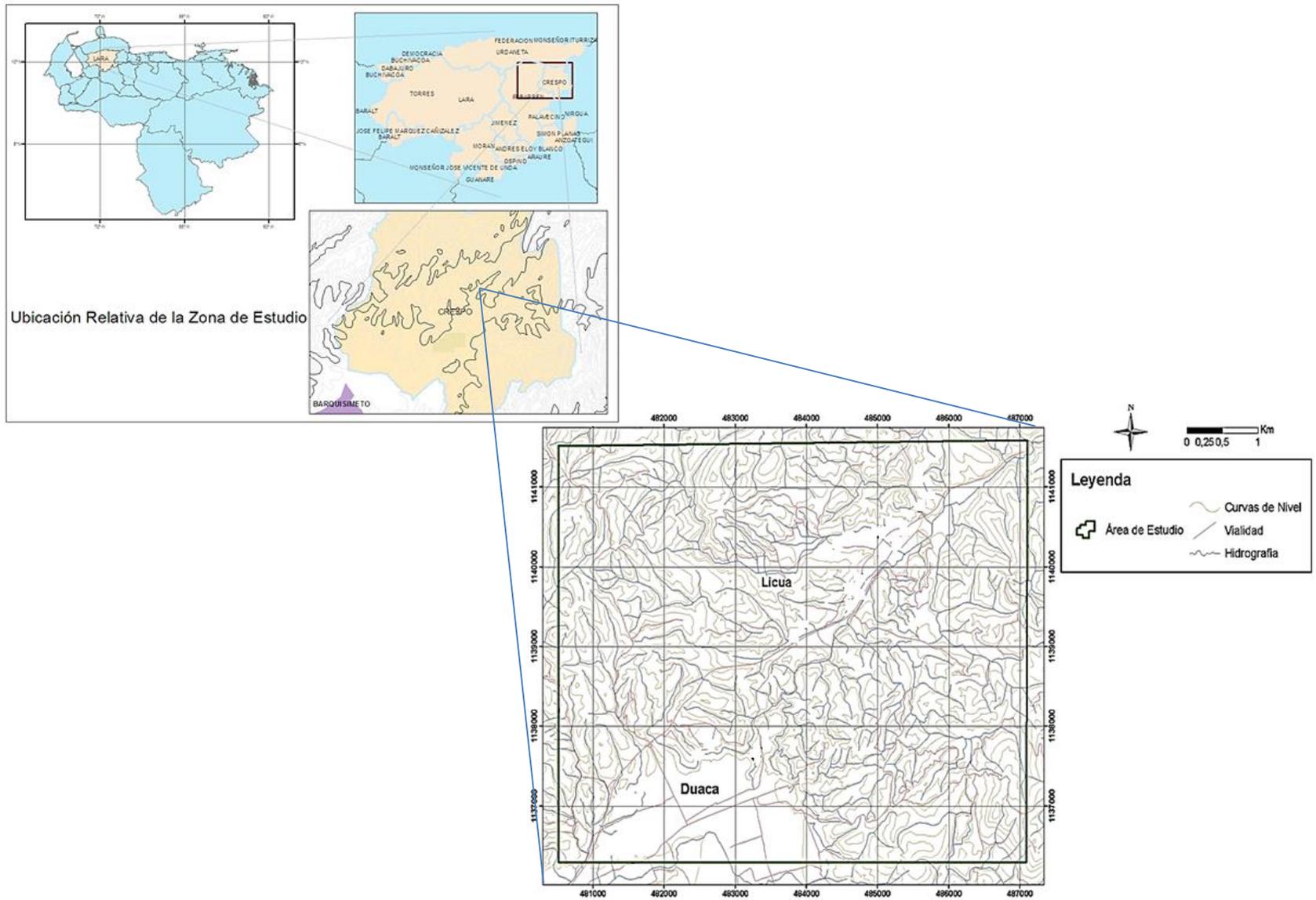


Figura 10. Mapa de la ubicación de la zona de estudio.

Características geológicas

A continuación, son descritos los aspectos geológicos más resaltantes de la zona de estudio, mostrando la ubicación, litología e implicaciones estructurales de cada una de las formaciones y grupos involucrados.

Geología Local

El estudio geológico de esta región ha sido de gran interés por ser la región de convergencia de los sistemas orogénicos de los Andes y Cordillera de la Costa y también al hecho de su complejidad tectónica y estratigráfica por encontrarse ubicado en el borde oriental del llamado "Surco de Barquisimeto". [51]

En la zona hay evidencia de levantamientos recientes como son las numerosas terrazas aluviales, las cuales constituyen un tipo de relieve dispuesto a lo largo de los ríos; en una sección transversal de valles amplios es frecuente encontrar los niveles de terrazas a altitudes diferentes, por todo esto, las terrazas reflejan las variaciones del nivel base de un río a lo largo del Tiempo Geológico. Otra geoforma presente en la zona de estudio son los abanicos aluviales, es decir, depósitos no consolidados que poseen una forma de cono, cuya sección transversal es convexa, estos abanicos representan la fase de acumulación de los materiales provenientes de la cuenca receptora y que han sido transportados a través de canales de escorrentía. [51]

El área de estudio está enmarcada dentro del aluvión del Cuaternario Holoceno (Qal), este consiste de material suelto constituido de grava, arena, limo y arcilla, como resultado de la erosión de las rocas que afloran en la región. En las cercanías de la región, aflora la Formación Mamey, constituyendo el basamento de la zona de estudio, consistente esencialmente de esquistos cuarzo-sericítico con colores gris, naranja y marrón, en capas

generalmente lenticulares, de espesores variables, meta-conglomerados de colores crema a gris claro, intercalados con los primeros, con fragmentos que alcanzan dimensiones de guijarros, peñas y peñones de mármol, filita y menos frecuentemente de arenisca; también se incluyen meta-conglomerados calcáreos arcósicos y mármoles arenáceos conglomeráticos; meta-areniscas generalmente calcáreas y feldespáticas, de grano grueso a medio y colores que varían entre gris oscuro a crema que meteorizan en pardo rojizos con manchas blancas. [51]

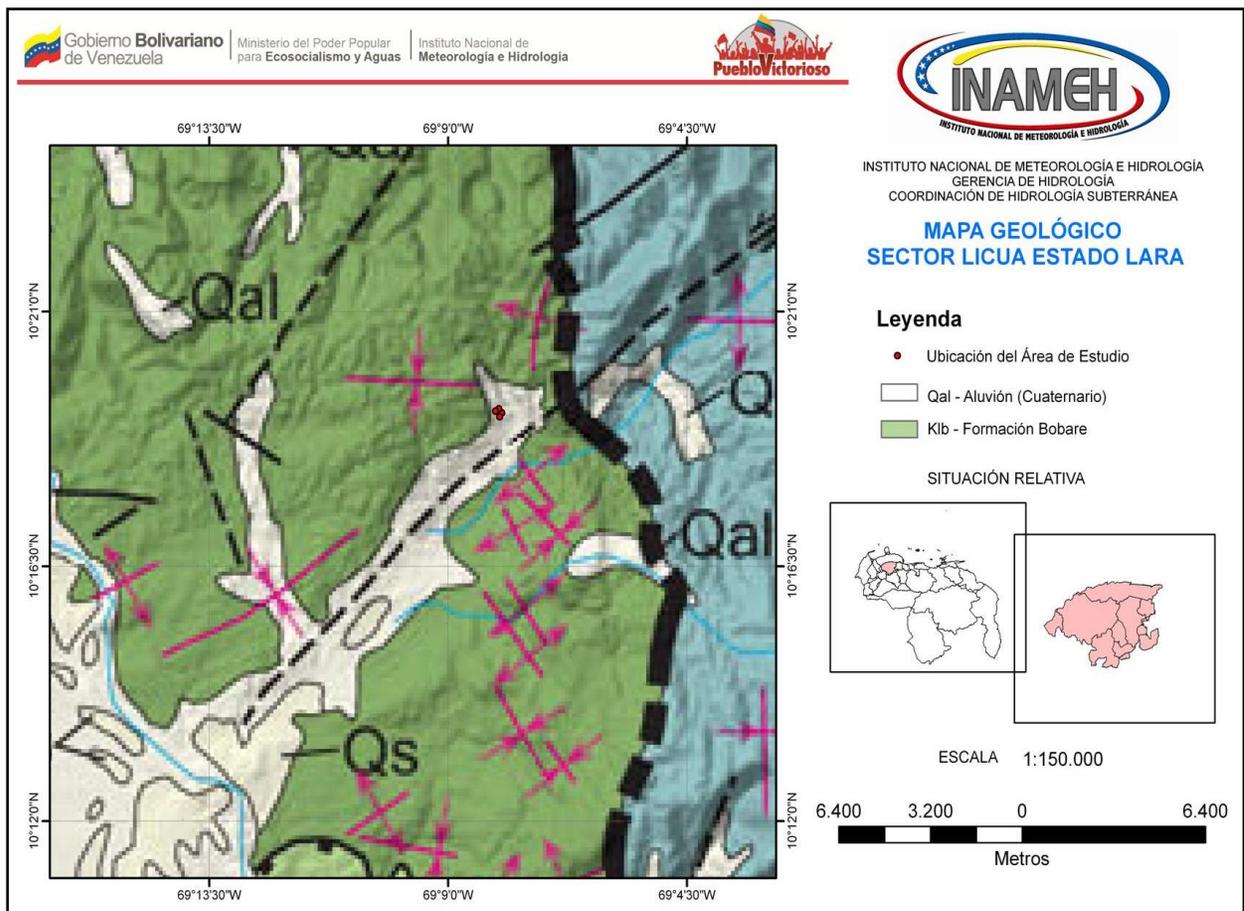


Figura 11. Mapa geológico sector Licua, Estado Lara [36]

A veces se presentan brechas con fragmentos líticos de mármol y filita en una matriz calcáreo - arcillosa. Las rocas carbonáticas se presentan en capas macizas a foliadas en diferentes intervalos dentro de la unidad, muchas de ellas muestran marcada lenticularidad y en general sus espesores y continuidad lateral son bastante irregulares; son de colores, gris, gris azulado y gris oscuro negro, de grano fino a medio; frecuentemente son arenáceas, hasta conglomeráticas. Hacia la parte superior de la unidad, en la zona de transición a la Formación Bobare, el porcentaje de metaconglomerados disminuye drásticamente, la meta-arenisca se hace muy cuarcífera, y prácticamente desaparece el mármol. [51]

Clima

La temperatura media registrada en el Sector Licua es de 25°C; además se presentan dos épocas bien definidas: una de lluvia y otra seca. La precipitación media anual es de 89,84 mm. El clima se caracteriza por presentar precipitaciones considerables a partir del mes de mayo. Las principales pluviosidades ocurren entre los meses junio- agosto, con precipitaciones promedios mensuales superiores a 120 mm. Los meses que presentan menor pluviosidad registran un promedio de 30 mm mensuales. [36]

En general, el tipo climático existente es subhúmedo seco. Al observar los registros de precipitación y evaporación se puede determinar el déficit hídrico que existe en cuanto a la disponibilidad de agua para el sector durante todo el año (ver tabla 6 y figura 12). [36].

	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
T (°C)	24,39	25,40	25,84	26,24	26,27	25,94	25,20	25,75	25,98	25,86	25,28	24,77
PP (mm)	25,16	13,64	19,75	65,04	122,64	145,43	178,80	142,00	90,59	109,05	98,82	67,18
EVP (mm)	170,62	181,92	218,89	192,86	181,21	167,35	169,75	175,13	176,88	163,01	146,86	145,49

Tabla 6. Registros promedios mensuales de precipitación, evaporación y temperatura correspondiente a la estación Moroturo, estado Lara. ^[36].

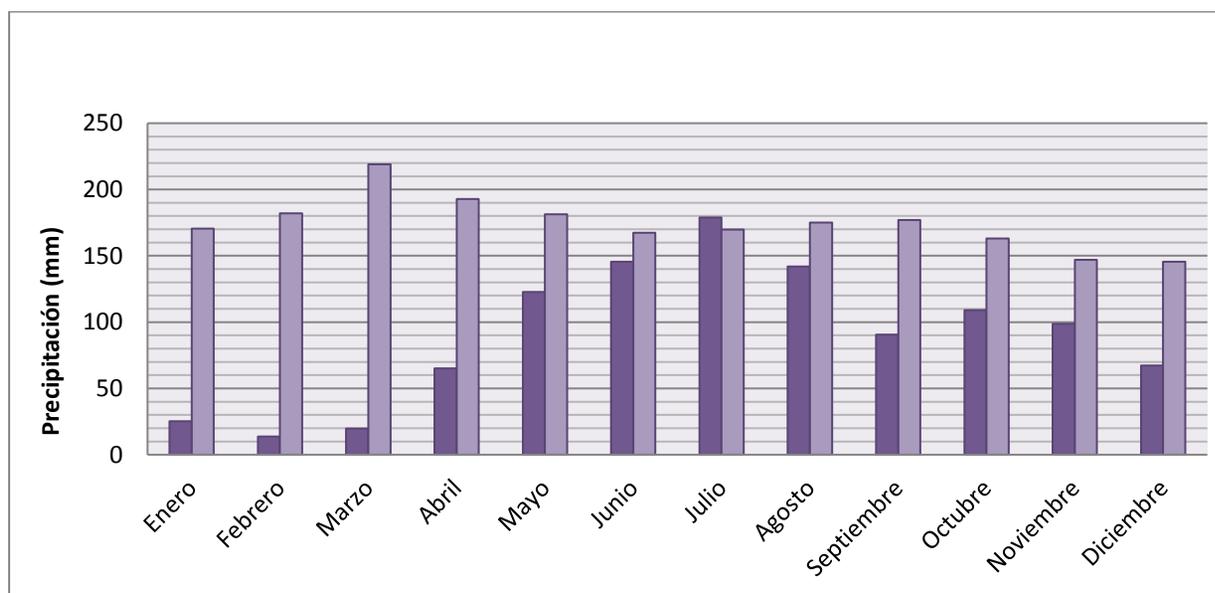


Figura 12. Precipitación vs Evaporación del área de estudio. ^[36]

Fisiografía

La zona de estudio se caracteriza por poseer dos tipos de relieve predominantes. Una parte plana, constituida por aluviones no diferenciados, representada por los valles de los ríos Diquiva, Quediche, Bucare y Sicarigua; el resto corresponde a relieve accidentado, con pendientes entre 30% y 60%, compuesto por ondulaciones y serranías de rocas sedimentarias y metamórficas. La depresión de Barquisimeto tiene 6.742 km² en los cuales predominan tierras de relieve quebrado. Hacia el noreste se encuentra el valle del Moroturo o Urama, con una superficie de 1.066 km². El paisaje dominante es de lomas redondeadas, casi desprovistas de vegetación y con huellas de una erosión más o menos severa. ^[36]

Suelos

En general los suelos presentes en el área de interés son poco profundos y permeables, con baja pedregosidad y afloramientos rocosos, pH de neutro a alcalino, baja fertilidad y buen drenaje externo. Presentan una topografía ondulada con pendientes entre 10 y 40% con una alta susceptibilidad a la erosión y problemas de salinidad. ^[36]

Hidrografía

La hidrografía de Licua está representada por los ríos Palmar, San Juan, Apón, Cogollo, Lajas, Motilones y Santa Ana. Los ríos de la zona tienen un régimen de escurrimiento bastante irregular al igual que las quebradas, que fluyen principalmente en época de lluvia. La zona norte se encuentra emplazado con el límite del municipio Jesús Enrique Losada el embalse El Diluvio. El río principal, llamado río Palmar nace a 2000 m.s.n.m. y presenta un volumen anual de 435 millones de m³ y un gasto medio de 14 m³/s ^[36].

III.METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Posterior a la realización de la recopilación de información bibliográfica que sustentó esta investigación, a saber todo lo referente a aguas subterráneas, así como la geología de la zona de estudio y diversos factores que intervienen en ésta; así como a partir del inventario otorgado por el INAMEH (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) el cual contiene información importante como la ubicación de los pozos, conductividades de los mismos, se procedió a elaborar la metodología de trabajo que fue seguida, incluyendo el plan de muestreo de la zona de estudio.

La metodología experimental del presente trabajo de investigación se desarrolló en tres etapas; a saber: una correspondiente al trabajo preliminar o pre-campo, que consistió en plantear un diseño de muestreo, localización de las estaciones y la preparación de los materiales y equipos a ser usados en campo; la segunda etapa correspondió al campo, que abarcó la recolección de muestras y las medidas in situ de los parámetros fisicoquímicos: pH, temperatura y conductividad eléctrica; y la etapa de laboratorio, la cual comprendió la determinación de los elementos y especies químicas de interés en las muestras recolectadas utilizando las metodologías y técnicas recomendadas en la literatura con la posterior interpretación de los resultados obtenidos.

Etapa pre-campo

Durante esta etapa se realizó una revisión bibliográfica que incluyó los antecedentes, las metodologías aplicadas en estudios similares, así como la elaboración del marco conceptual, con el fin de obtener la información necesaria que sirvió para realizar la planificación del muestreo. Se elaboró un plan de muestreo involucrando la ubicación de los pozos existentes en la zona de estudio, de manera que fueron totalmente

representativos para la captación de muestras, esto a través de la consulta a entidades públicas como el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH).

Para las muestras de agua destinadas a la determinación de los cationes y sílice disuelta, se utilizaron envases plásticos de polietileno con capacidad de 1000 mL, los cuales se lavaron previamente en el laboratorio con HNO₃ al 10% v/v, durante 24 horas. Luego de esto, se aplicaron 3 lavados con abundante agua destilada y 2 veces con agua desionizada, esto con el propósito de eliminar posibles impurezas presentes incluyendo los cationes y metales absorbidos en las paredes de los envases. Este procedimiento se realizó atendiendo a la normativa recomendada por APHA (1995) [52].

Todos los envases fueron etiquetados indicando la fecha, localidad, profundidad del pozo y número de muestra. Igualmente se realizó la calibración de los equipos necesarios para realizar las medidas in situ de los parámetros pH, temperatura y conductividad. En la figura 13 se presenta el esquema metodológico con el que se desarrolló la etapa de pre-campo.

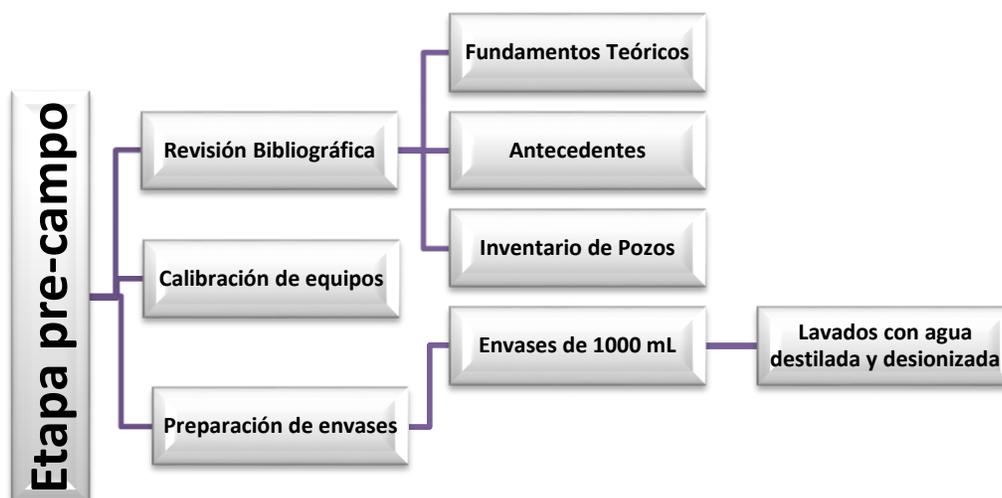


Figura 13. Esquema de la metodología experimental utilizada en la etapa de pre-campo.

Etapa de campo

La primera fase de la etapa de campo consistió en el reconocimiento de la zona de estudio, así como de la evaluación de los pozos que se utilizaron para el muestreo de las aguas subterráneas.

Durante esta etapa se realizó el proceso de captación de muestras de aguas subterráneas en los envases de polietileno previamente lavados en el laboratorio, en 9 pozos de bombeo (Figura 14). Simultáneamente se midieron los parámetros fisicoquímicos temperatura, pH y conductividad, utilizando un potenciómetro portátil Thermo Scientific Orion Star. En la literatura se recomienda realizar las medidas de dichos parámetros en campo, pues pequeños cambios en las condiciones ambientales pueden producir importantes variaciones de sus valores.

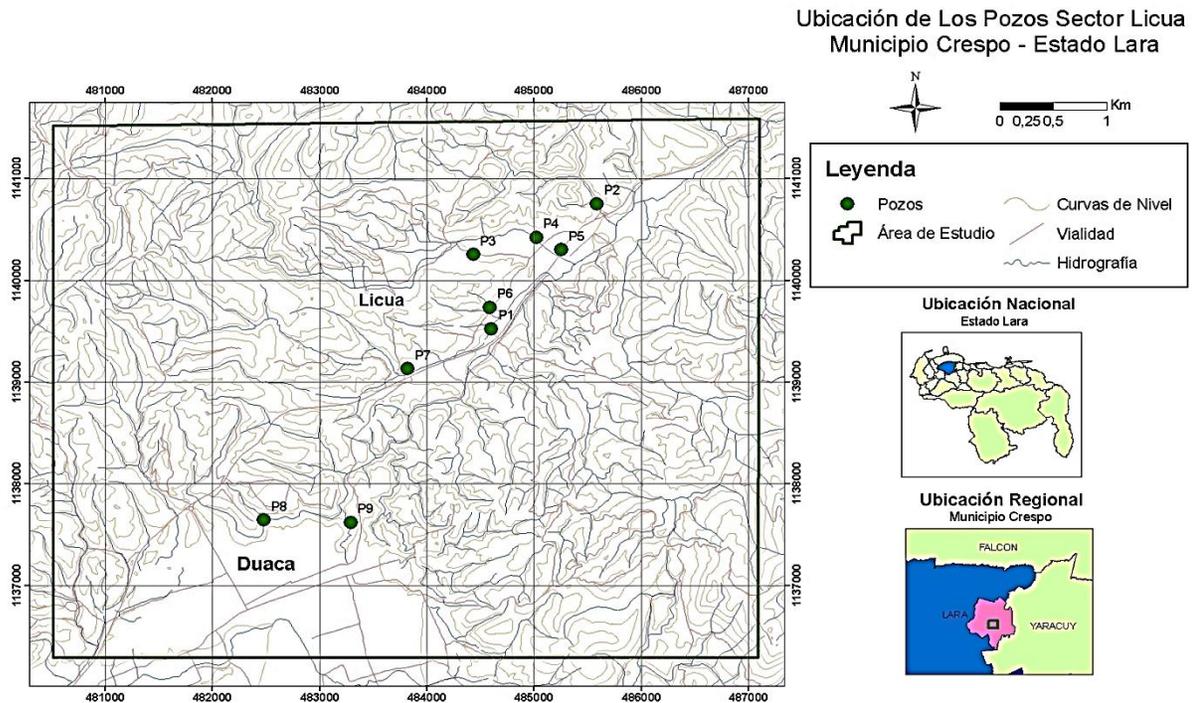


Figura 14. Ubicación de los pozos muestreados.

Por su parte, todas las muestras se preservaron a una temperatura no mayor a 5°C para evitar la descomposición del NO_3^- biológico y la pérdida o ganancia de HCO_3^- hasta ser llevados al laboratorio. [52]

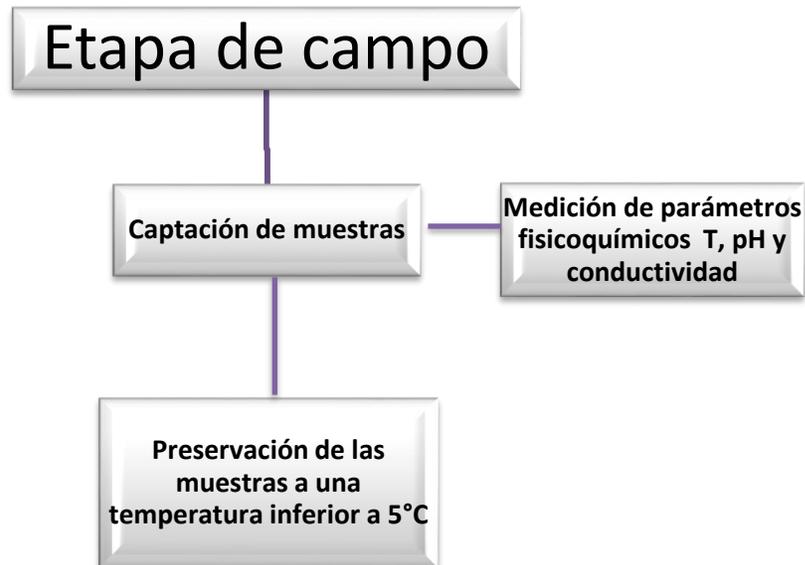


Figura 15. Esquema de la metodología experimental utilizada en la etapa de campo.

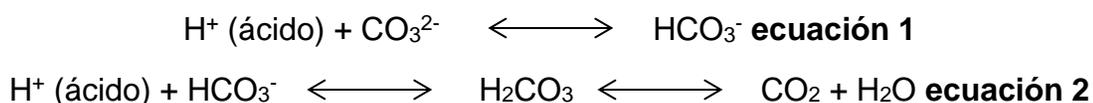
Etapa de laboratorio

En esta etapa se llevó a cabo la determinación de los cationes, sílice disuelta y de aniones. La figura 16 señala las técnicas y métodos a emplear en esta etapa, las cuales son descritas a continuación.

Para la determinación de aniones y alcalinidad se utilizaron envases de 500 mL, tratados solo con abundante agua destilada y desionizada y se tomaron a partir de las muestras colectadas en los envases de 1000 mL de capacidad tomadas en campo. Los restantes 500 mL de las muestras fueron usadas para la determinación de los cationes empleando una membrana de filtro de 0,45 μm , esto con el fin de eliminar los posibles sólidos suspendidos. Seguidamente, se preservaron con 2 mL de HNO_3 concentrado (12M) bidestilado, a fin de garantizar un pH inferior a 2, para evitar la adsorción de los cationes Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} y metales sobre las paredes de los envases mientras se desplazaban hasta el laboratorio.

Por otro lado, la determinación de la alcalinidad se realizó en el laboratorio aplicando el método de Gran, el cual consistió en identificar el punto donde estequiométricamente la alcalinidad es consumida y la concentración de iones hidronio aumenta ^[9]. Para llevar a cabo este método se realizaron titulaciones potenciométricas, cuyo procedimiento implicó tomar una alícuota de 25 mL de muestra, seguido de su titulación con una solución de H_2SO_4 0,0211 N previamente valorada; para ello, se empleó una bureta automática de 50 mL y un pH-metro. Finalmente, se graficó la función propuesta para este método $(V+v)10^{-\text{pH}}$ en función del volumen de ácido añadido v ; donde V es el volumen inicial de la muestra y v es el volumen de titulante añadido. En la figura 15 se presenta el esquema metodológico con el que se desarrolló la etapa de campo.

Es importante resaltar que el análisis de bicarbonato fue realizado en un tiempo no mayor de 11 días, para evitar valores erróneos en su determinación. La reacción involucrada es la siguiente:



Determinación de las concentraciones de cationes Sodio (Na^+), Potasio (K^+), Calcio (Ca^{2+}) y Magnesio (Mg^{2+}).

La determinación de los cationes mayoritarios Na^+ y K^+ se llevó a cabo a través de la técnica analítica espectrofotometría de emisión atómica con llama (EEA), mientras que para el análisis de Ca^{2+} y Mg^{2+} fue utilizada la técnica de espectrofotometría de absorción atómica con llama (EAA), usando como combustible acetileno y aire como oxidante para el caso de los cationes Na^+ , K^+ y Mg^{2+} ; mientras que para el Ca^{2+} , se usó óxido nitroso como combustible. En ambos casos se empleó un espectrómetro de absorción y emisión atómica en llama marca Perkin Elmer Precisely, modelo AAnalyst 200.

El método de análisis involucró la preparación de patrones multielementales conteniendo los elementos de interés que permitieron la construcción de las curvas de calibración externa para el cálculo de las respectivas concentraciones. En el Apéndice A son presentadas las curvas de calibración correspondientes a cada catión.

Determinación de las concentraciones de aniones Cloruro (Cl^-), Nitrato (NO_3^-) y Sulfato SO_4^{2-} .

La determinación de los aniones Cl^- , SO_4^{2-} y NO_3^- fue llevada a cabo por medio de la técnica analítica Cromatografía Iónica (IC) gracias a la colaboración de la Gerencia de Química Analítica de PDVSA INTEVEP, S.A.

Determinación de sílice disuelta (SiO_2)

La determinación de la sílice disuelta (SiO_2) se realizó utilizando un espectrofotómetro de absorción molecular, marca UNICO 1, aplicando la técnica de fotocolorimetría. Se usó el método del complejo azul para la determinación de sílice según el método 4500- SiO_2

(APHA, 2005). Para la realización de esta determinación se preparó una solución madre de 50 mg/L de SiO₂, a partir de la cual se obtuvieron patrones de sílice en un intervalo de concentración recomendado para la construcción de la curva de calibración.

En el Apéndice A, se muestra la curva de calibración generada aplicando éste método. El método del complejo azul consiste en tomar una alícuota de la muestra seguido de la formación del citado complejo azul silicomolibdeno, se procede a realizar la medida de la absorbancia, permitiendo con ello la cuantificación de la concentración de sílice disuelta (SiO₂).

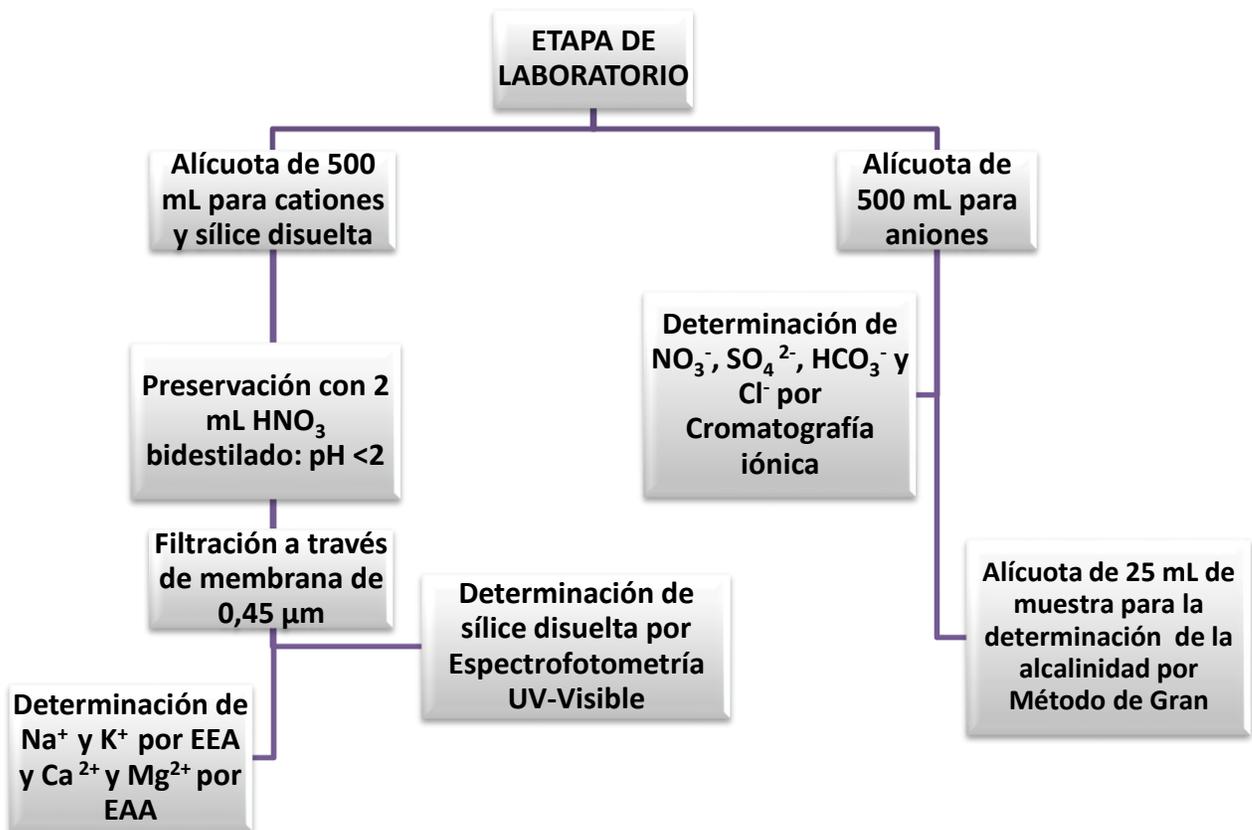


Figura 16. Esquema de la metodología experimental utilizada en la etapa de laboratorio.

Finalmente, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), en respuesta a la propuesta generada por la empresa hidrológica ENMHOCA, del Estado Lara, estuvo a cargo de la prospección geofísica, la cual se inició con un reconocimiento geológico del área de estudio para ubicar los sondeos eléctricos verticales (SEV). A través de herramientas satelitales, se observaron las zonas más idóneas para realizar la medición. Para esto fue necesario contar con zonas de una extensión mayor a 200 m, de topografía plana, entre otras características.

La prospección consistió en la investigación geofísica in situ en el sector Licua, correspondientes al Municipio Crespo y en función de sus características y propiedades geoelectricas, se evaluaron las posibilidades de almacenamiento de las aguas subterráneas en éste sector; así como de los posibles sitios que presentan mejores potenciales para el aprovechamiento de las mismas. Se utilizó el método de resistividad de sondeos eléctricos verticales (SEV) con la configuración electrónica Schlumberger MN $< AB/2$. Para ello, se indujo corriente continua en forma sucesiva en el subsuelo a través de un par de electrodos llamados A y B (electrodos de emisión), con otro par de electrodos llamados M, N (electrodos de medición) conectados a tierra y se midió la diferencia potencial (ΔV) en voltios generado por el paso de corriente en el subsuelo. El tendido se colocó en superficies planas en línea recta guardando una configuración preestablecida. A partir de este método, se obtuvieron valores correspondientes a la resistividad aparente (ρ_a), espesores y profundidad correspondientes a cada estrato del acuífero. Estos resultados permitieron contrastar con la información hidrogeoquímica obtenida, determinando la relación entre ambas disciplinas, para luego construir un modelo conceptual del acuífero Licua, Municipio Crespo, Estado Lara.

IV.PRESENTACIÓN Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En esta sección son presentados y discutidos los resultados obtenidos a partir de la determinación de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , sílice disuelta (SiO_2) y de la medición de los parámetros fisicoquímicos pH, conductividad y temperatura en 9 muestras de aguas captadas en el sector Licua, Municipio Crespo, Estado Lara.

Para ello, se valida la calidad de los resultados generados en los análisis aplicando el balance de cargas, así como la relación conductividad de campo frente a conductividad ideal a 25°C. Seguidamente, se realizó el cálculo de la precisión de los análisis y los límites de detección, para luego mediante la caracterización hidrogeoquímica, aplicar un análisis estadístico no paramétrico resumido en cajas gráficas y generar los mapas de distribución espacial de cada una de las variables en estudio.

Los resultados generales de pH, conductividad y temperatura, así como otros datos de localidad, coordenadas geográficas, profundidad de los pozos recopilados en este estudio, están expuestos en la Tablas 1 B del Apéndice B. Las concentraciones de las especies químicas Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- y sílice disuelta (SiO_2), se presentan en la Tabla 2 B del Apéndice B.

Seguidamente, es mostrada la clasificación de las aguas a través del diagrama de Piper, procesado por el programa Rockworks 2016, este diagrama permite conocer las diferentes facies hidrogeoquímicas predominantes en el área de estudio en función de las especies catiónicas y aniónicas mayoritarias. Asimismo, fueron realizados diversos gráficos de correlaciones inter-elementales y gráficos de los índices de saturación de diferentes especies minerales, calculados con el programa PHREEQC. Esto es realizado

con el propósito de conocer los factores y procesos que influyen en la composición química de las aguas subterráneas.

Posteriormente, el uso de los parámetros estipulados en el Decreto 883 (Gaceta Oficial 5.021, 1995) permitió clasificar el agua en base a su uso; es decir, señalar cuál es la calidad de las aguas para el acuífero Licua ubicado en el Municipio Crespo, Estado Lara.

Finalmente, el uso de la prospección geofísica como método complementario hacia esta investigación, permitió realizar la correlación entre los datos hidrogeoquímicos y los aportados por los sondeos realizados en la zona.

IV.1-Validación de los resultados

El proceso de validación de los resultados fue realizado con el fin de determinar la validez de las concentraciones determinadas, así como estimar la precisión y exactitud de los análisis químicos realizados a cada muestra de agua de la zona de estudio. Para cumplir con ello, se obtuvo el balance iónico y la relación entre la conductividad de campo y la conductividad teórica.

El balance iónico fue calculado a partir de las concentraciones obtenidas para los cationes y los aniones (Apéndice C. Cálculo 1), de esta manera se calculó el error porcentual asociado a ello (Apéndice C). La figura 17 muestra de manera gráfica el error porcentual del balance iónico, verificándose que el promedio de error es inferior al 10%. En estricto rigor el límite máximo de error permitido debiera ser de 10%, lo que indica que los resultados de todas las muestras analizadas son confiables desde el punto de vista geoquímico. ^[19]

Por su parte, la relación de concentración total (en meq/L) de cationes contra la concentración total de aniones representada en la Figura 18, con una ecuación de la recta de $0,92(\pm 0.03) x - 0,20(\pm 0.53)$, refleja una excelente correlación lineal con un $R^2=0,9884$. Nótese que la pendiente es prácticamente igual a la unidad, indicando así que los aniones son relativamente iguales a los cationes, por lo que se cumple con el primer criterio de calidad de los datos. Esto permite realizar las interpretaciones sobre resultados verdaderos.

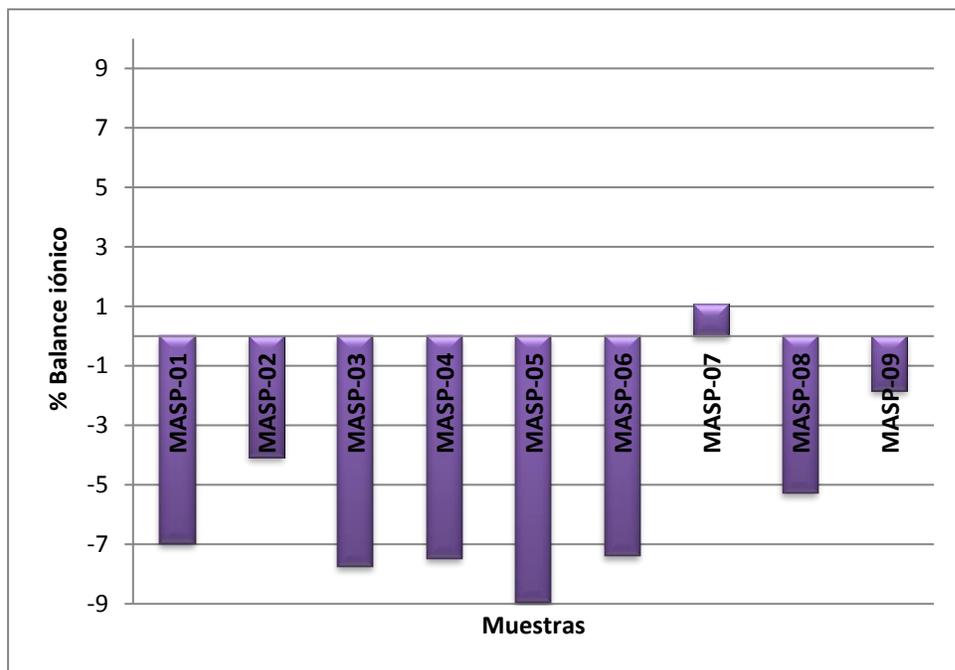


Figura 17. Representación gráfica del error porcentual del balance iónico.

Otra gráfica que resulta útil para la validación de los datos es la que expresa la conductividad medida en campo frente a la conductividad ideal, esta última calculada tomando en cuenta las especies iónicas, tanto mayoritarias como minoritarias (Apéndice D). En ese sentido, ambos datos de conductividad deberían ser similares para descartar errores del equipo utilizado en campo y errores de tipo analítico ^[8]. Esta relación se representa en la figura 19, la ecuación $0,99(\pm 0.03) x + 75 (\pm 58)0,9885$ la existencia de

una baja dispersión entre los datos obtenidos en campo y los obtenidos en los análisis químicos. Se observa que existe una correspondencia exacta entre la conductividad ideal y la medida en el campo.

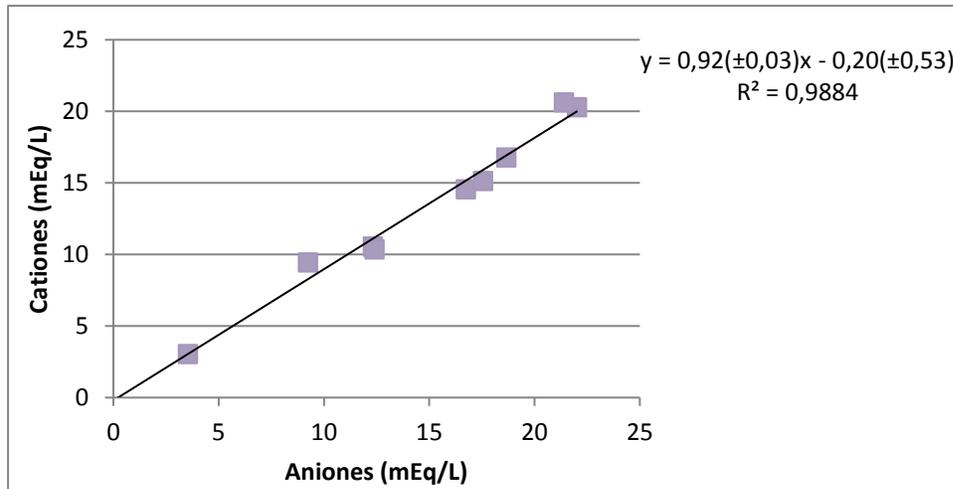


Figura 18. Relación entre cationes y aniones

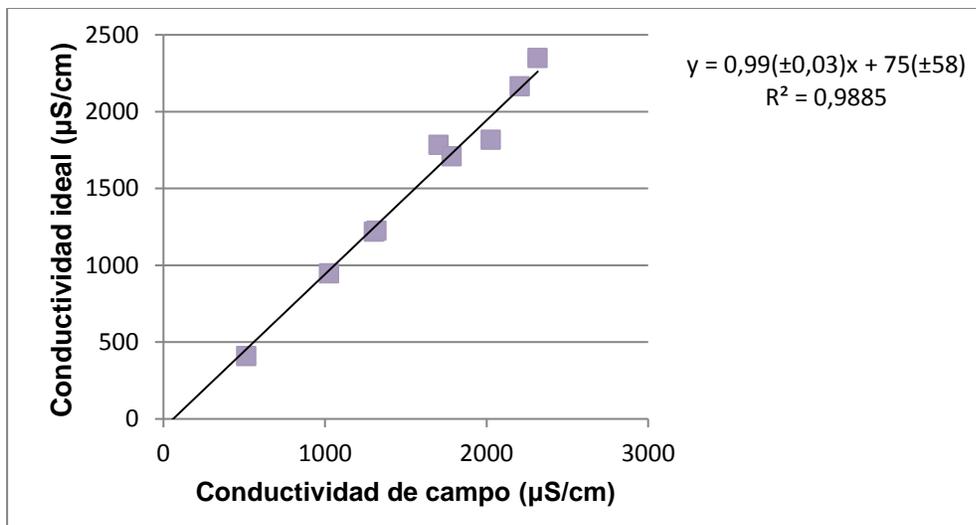


Figura 19. Relación entre conductividad ideal a 25 °C y de campo (µS/cm).

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

Por otro lado, el límite de detección fue calculado para cada una de las especies catiónicas y para la sílice disuelta (SiO_2). Este parámetro fue calculado mediante la regresión lineal de las curvas de calibración de las medidas arrojadas en los análisis (Apéndice E). Es importante señalar que para las especies aniónicas no fue posible realizar estos cálculos ya que éstos análisis se realizaron en INTEVEP y ésta información no fue suministrada.

IV.2- Hidrogeoquímica de las aguas

Luego de validar los resultados fueron utilizadas una serie de herramientas hidrogeoquímicas que apoyan la discusión en el contexto de poder inferir los procesos que influyen sobre la composición química de las aguas subterráneas captadas, las cuales se exponen a continuación.

IV. 2.1.- Clasificación de las aguas mediante el diagrama de Piper

La caracterización de las aguas subterráneas mediante el diagrama de Piper permite inferir el o los tipos de aguas presentes en la zona de estudio. La figura 20 muestra dicho diagrama para las 9 muestras de aguas subterráneas colectadas. Este fue elaborado utilizando el programa para el procesamiento de datos RockWorks 2016, el cual indicó que la mayoría de las muestras analizadas poseen una tendencia en aniones hacia el enriquecimiento en HCO_3^- , también se observa un enriquecimiento hacia el ión SO_4^{2-} en las muestras 1, 2 y 6; y hacia el Cl^- sólo para la muestra 9. Por otra parte, estos diagramas

indican que en cuanto a composición catiónica, existe una tendencia preferencial de todas las muestras hacia el enriquecimiento de Ca^{2+} . Este comportamiento indica que de acuerdo a esta clasificación, las aguas subterráneas bajo estudio, están recibiendo un aporte mayoritario de las especies HCO_3^- - SO_4^{2-} - Cl^- , y de Ca^{2+} .

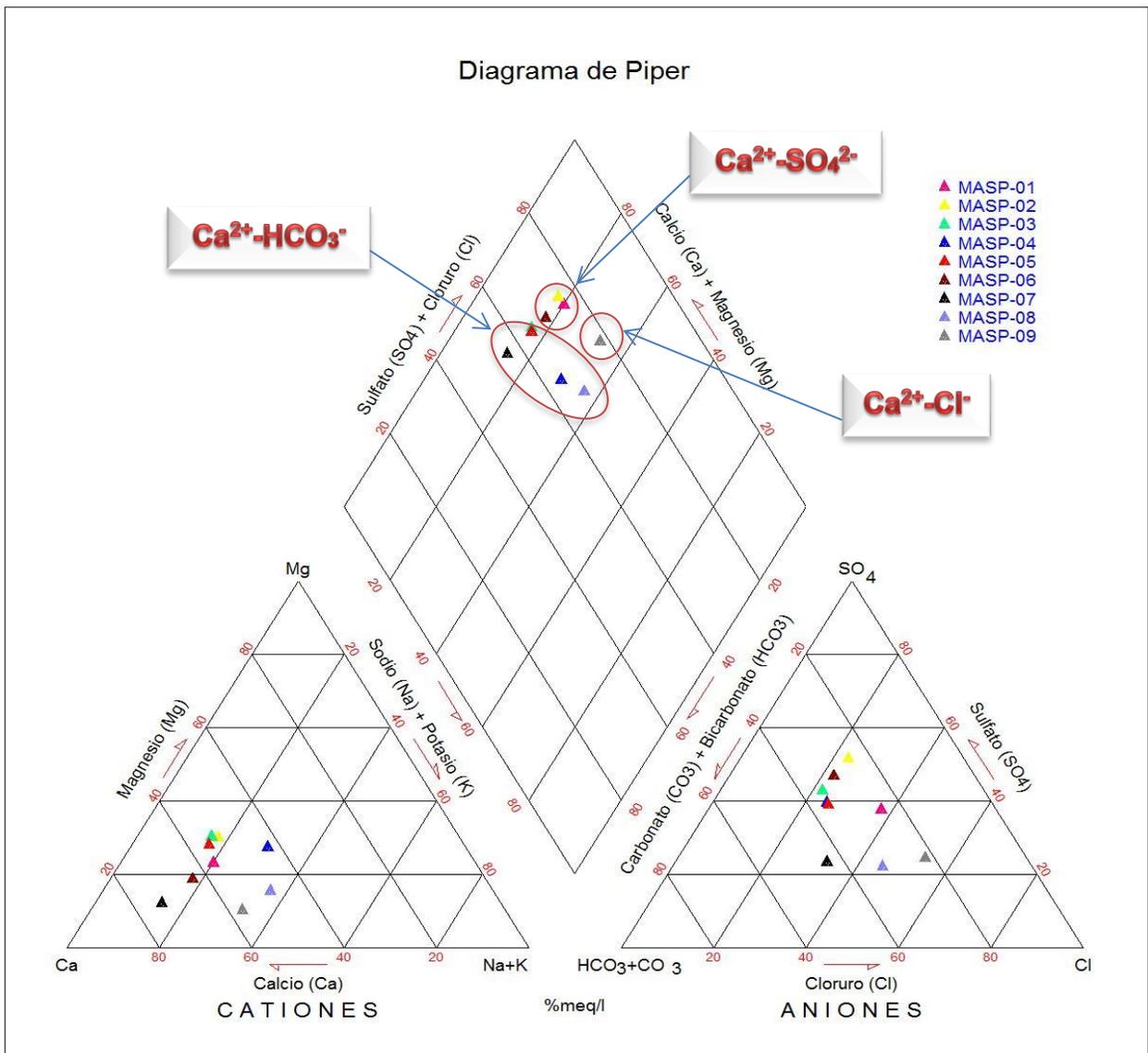


Figura 20. Diagrama de Piper para las aguas del acuífero Licua, Estado Lara.

El diagrama de Piper (Figura 20) ayudó a dar una clasificación inmediata de acuerdo a los iones mayoritarios cuantificados para cada muestra analizada. Es por ello, que se detectó la presencia de tres (3) tipos de agua asociadas a la zona de estudio:

- a) Bicarbonatada Cálcica (Ca^{2+} - HCO_3^-)
- b) Sulfatada cálcica (Ca^{2+} - SO_4^{2-})
- c) Clorurada cálcica (Ca^{2+} - Cl^-).

En el mismo orden de ideas, la distribución de los tipos de agua, en atención a cada una de las muestras de agua captada, se presenta en la Tabla 7.

Tabla 7. Clasificación de las aguas captadas en el área de estudio según el Diagrama de Piper.

Bicarbonatada Cálcica	Sulfatada Cálcica	Clorurada Cálcica
MASP-03 La Pradera 1	MASP-01 Avilito	MASP-09 El Guape
MASP-04 El Gabán	MASP-02 Vivero	
MASP-05 El Llenadero	MASP-06 La Capilla	
MASP-07 La Pradera 2		
MASP-08 El Guapito		

El tipo de agua predominante corresponde a la de tipo bicarbonatada cálcica, presentándose en un 55,55% del total de las muestras captadas; mientras que un 33,33% corresponde a las aguas tipo sulfatada cálcica y el resto corresponde al tipo clorurada cálcica.

El sector de Licua, está litológicamente gobernado principalmente por rocas sedimentarias correspondientes a la Formación Bobare, en su mayoría constituidas por material de tipo grava, arena, limo y arcilla, así como de esquistos cuarzo sericíticos y meta-conglomerados calcáreos ^[51]. La mayoría de estas rocas están parcial o totalmente cementadas con material síliceo, calcáreo o ferruginoso relativamente soluble; en general

la mayor parte de los materiales que pueden aportar se encuentran contenidos en este cemento. Por lo tanto, de acuerdo al tipo de agua que fue obtenido en el diagrama de Piper, puede ser considerada la fuente de los iones Ca^{2+} , Mg^{2+} y HCO_3^- , mediante el proceso de interacción agua-roca producto de la disolución de la calcita presente como cemento en estas rocas sedimentarias. No obstante, no debe descartarse la posibilidad que el origen de estos iones, pueda también vincularse a la hidrólisis de minerales silicatados.

De acuerdo al tipo de facies $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ arrojado por el diagrama de Piper, puede presumirse que las aguas subterráneas de la zona podrían estar atravesando alguna litología conteniendo minerales como yeso o anhidrita; sin embargo, el aporte de estos iones por parte de otras especies minerales, debe considerarse también como fuente probable de los mismos. Es importante señalar que en la región de Licua, la actividad agropecuaria tiene mucha relevancia y existen varios pozos en esta zona donde los valores de SO_4^{2-} fueron altos, lo que indica que otra fuente probable de aporte de este ión estaría asociado al uso de fertilizantes en áreas cuya actividad es la agricultura.

A su vez, la presencia de facies de tipo $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ específicamente en la muestra MASP-09 El Guape, permiten inferir que una de las fuentes importantes de estos iones puede estar asociada con la sobreexplotación de estos acuíferos. Este pozo donde se captó esta muestra se encuentra muy cercano a los sectores poblados y exige una considerada demanda de agua para uso tanto urbano como agrícola e industrial, en las poblaciones de Licua y Duaca. Además, el mismo se utiliza para suministrarle el agua al Balneario que funciona como lugar de entretenimiento en el sector. Cuando las extracciones totales de agua superan a los niveles de recarga se acumulan sales provenientes del agua de regadío y de los fertilizantes usados. Posteriormente, estas sales durante la época de lluvia o por el riego, pueden ser disueltas e infiltradas hacia el subsuelo hasta alcanzar el acuífero aportando grandes cantidades de iones Cl^- ^[19].

IV. 2.1.- Figuras de Stiff

Como complemento a las interpretaciones realizadas, se presentan en la figura 21 las figuras de Stiff para cada una de las muestras de aguas captadas; cuya característica principal es generar una figura específica para cada tipo de agua. Igualmente, se aprecia el sub-tipo correspondiente a cada tipo de agua de los pozos estudiados donde se indica como varían los órdenes de abundancia de los restantes iones. Estas figuras permiten apreciar cambios en el comportamiento del agua con la profundidad del pozo en determinado tiempo, debido a condiciones climáticas, hidrogeológicas o a efectos antrópicos que pudieran influir en las variaciones de los iones presentes en cada muestra.

Es importante señalar que las figuras de Stiff construidas, coinciden con los tipos de aguas que fueron identificados a través del diagrama de Piper, verificando la presencia en la zona de estudio de tres tipos de aguas: bicarbonatadas cálcicas, sulfatadas-cálcicas y aguas tipo cloruradas cálcicas.

La linealidad de las evoluciones dentro de las figuras de Stiff, señala de la existencia de algún efecto de contaminación o dilución en las muestras de aguas captadas ya que se observa una ligera disminución en las áreas de los polígonos, específicamente en las figuras: MASP-3 La Pradera, MASP-4 El Gabán, MASP-5 El llenadero y MASP-7 La Pradera 2. Esta disminución en la concentración podría ser el resultado de la infiltración de aguas de lluvia que se realizan en esa zona, considerados potenciales áreas de recarga del sector. Además, estas figuras son típicas de aguas de mezclas. Por lo tanto, permiten visualizar la existencia de un grupo de aguas dulces mezcladas con aguas un poco más salinas, también ubicadas en el área bajo estudio.

Las aguas superficiales y subterráneas se contaminan durante los procesos de fabricación, transporte, almacenamiento o aplicación de plaguicidas. En las zonas

agrícolas ocurre directa o indirectamente, cuando se aplican al agua para matar larvas de mosquitos, por escorrentía, por drenajes de áreas agrícolas tratadas, durante el lavado de equipos de aspersión o por derrames accidentales. [27]

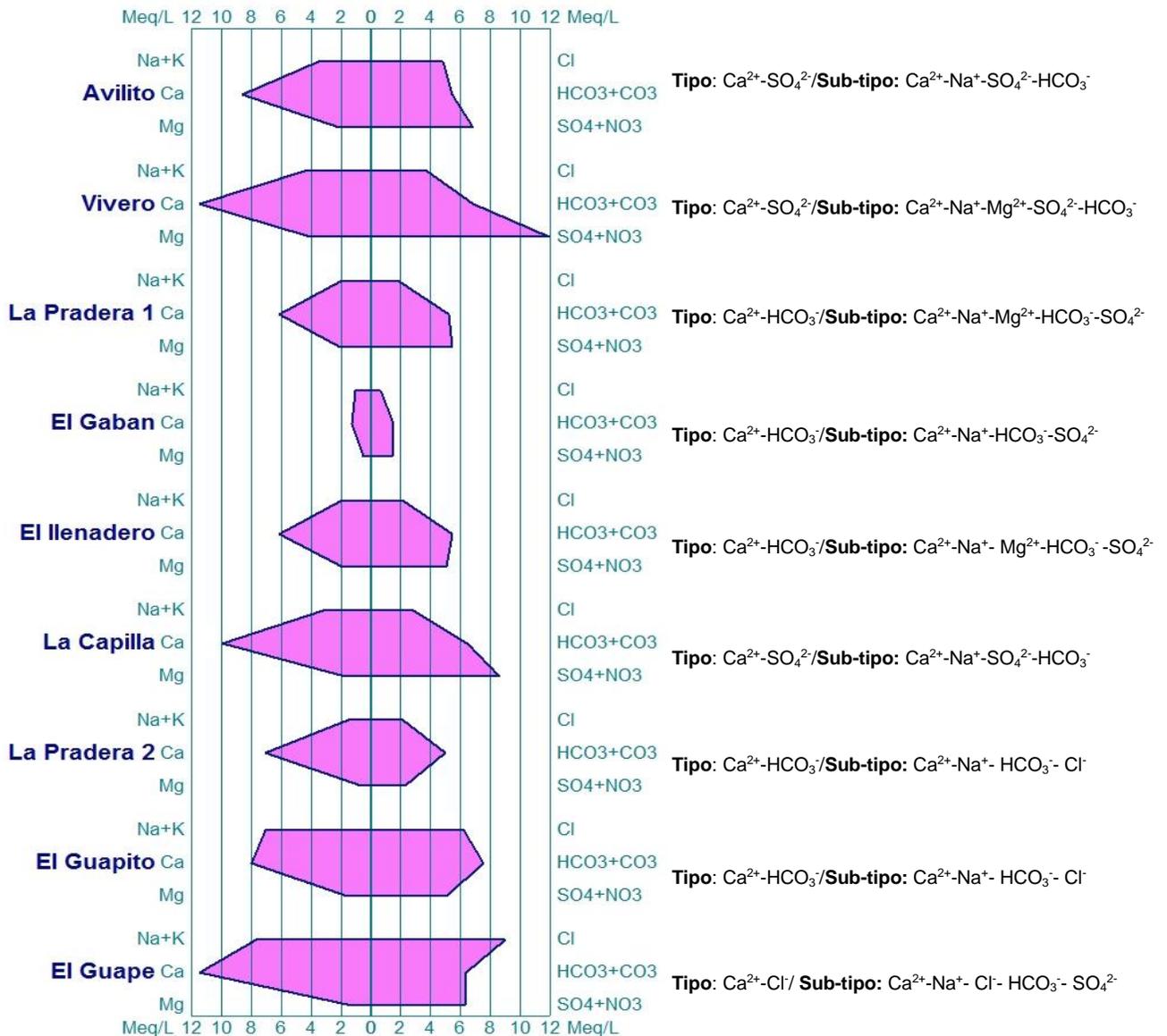


Figura 21. Diagrama de Stiff para las aguas del acuífero Licua, Estado Lara. En ese sentido, se conoce que en los alrededores de estos pozos se practican actividades agrícolas como siembra de tomate y aguacate las cuales necesitan del uso de productos

fitosanitarios, a saber: plaguicidas, insecticidas y/o herbicidas, necesarios para el control y eliminación de plagas que mediante el fenómeno de lixiviación pudieron desplazarse causando la contaminación de las aguas subterráneas de estos pozos.

IV.3.- Variación de los parámetros fisicoquímicos

En esta sección se realiza un análisis estadístico, con la finalidad de visualizar la tendencia central y realizar una descripción general del sistema en cuanto a la variabilidad de las especies químicas y de los parámetros fisicoquímicos estudiados. Por lo tanto, fueron utilizadas las cajas gráficas donde la mediana describe la simetría de los datos. Estas representan la distribución de cada elemento señalando los cuartiles inferior (25%) y superior (75%), así como el valor máximo, mínimo, la mediana y valores anómalos de los datos obtenidos. Otra herramienta utilizada fue la distribución espacial de las especies de interés, con el propósito de identificar y visualizar su comportamiento y variabilidad en cada una de las muestras.

IV.3.1.- pH

La figura 22 muestra la distribución estadística de los valores de pH medidos en la zona de estudio, nótese que en dicha figura los valores máximos y mínimos son de 6,97 y 6,72 unidades de pH respectivamente, con una mediana de 6,86. El valor de 7,4 correspondiente a la muestra MASP-04 El Gabán, está alejado de la distribución, considerándose como un valor anómalo con respecto a la distribución.

La distribución espacial de la concentración del pH en los puntos de muestreo es mostrada en la figura 23. Se puede observar que los valores más bajos de pH se encuentran ubicados hacia la parte suroeste de la zona de estudio, mientras que los valores más altos se encuentran distribuidos hacia la parte noreste.

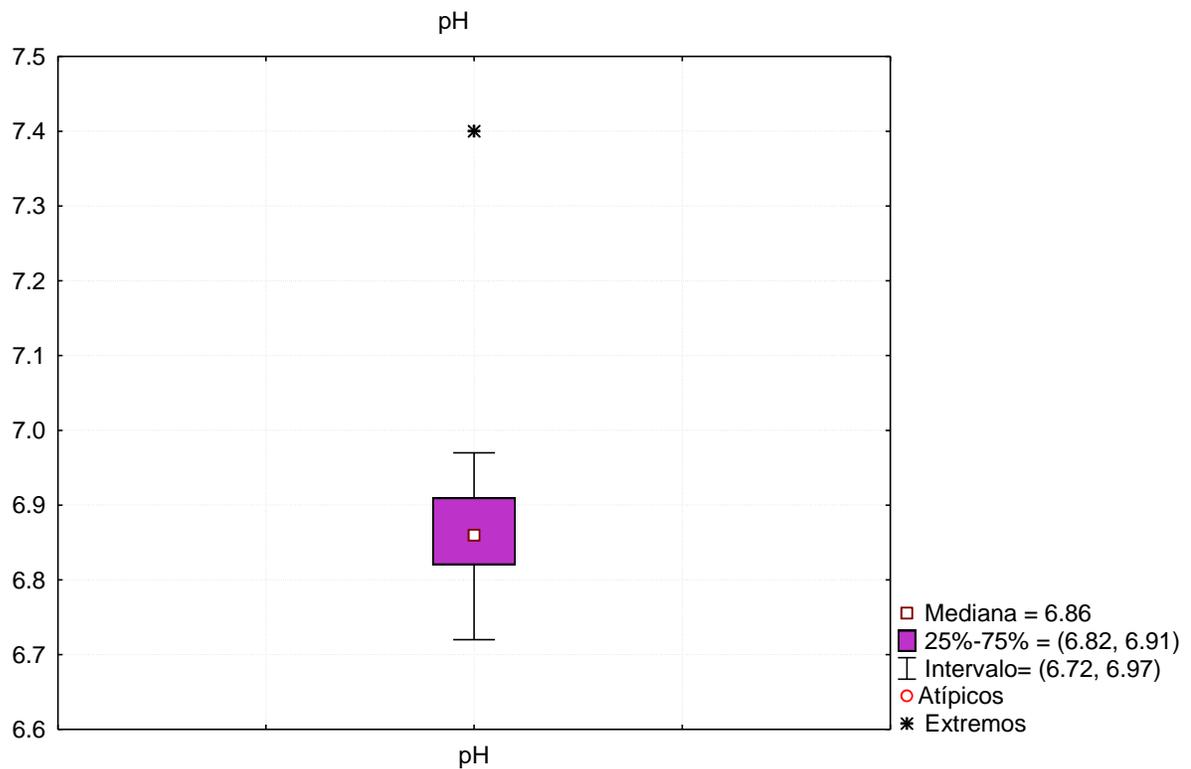
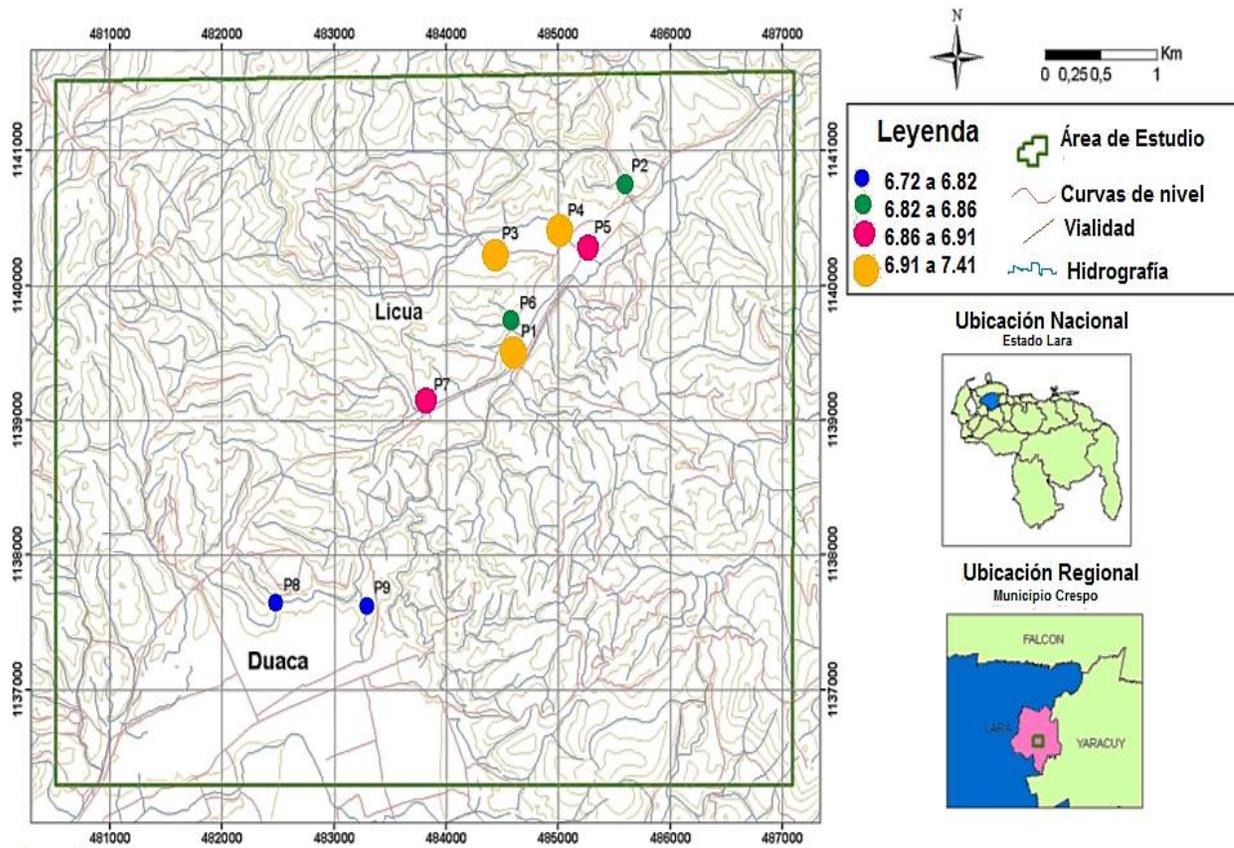
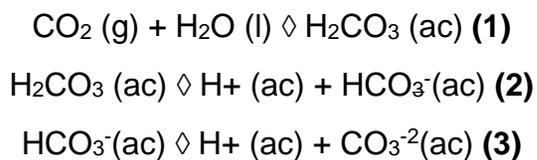


Figura 22. Caja gráfica del pH

Así mismo, Yanes (1997) estableció la presencia de varios tipos de aguas basándose en distintos niveles de pH, como: ligeramente ácidas (6,4 – 7,1), ligeramente alcalinas (7,1 – 7,6), alcalinas (7,6 – 8,2) y muy alcalinas (8,2 – 10,9). De acuerdo con ésta clasificación, el 89% de las muestras analizadas son clasificadas como ligeramente ácidas y un 11% que corresponde a la muestra MASP-04 El Gabán, catalogada como ligeramente alcalina.^[53]



Resulta importante señalar que la interacción del CO₂ atmosférico con las aguas en los sistemas naturales es el proceso que controla la acidez de las mismas, este proceso es descrito a través de las reacciones 1, 2 y 3 mostradas a continuación:



En consecuencia, el pH de las aguas subterráneas es ácido, donde el HCO_3^- (ac) es la especie dominante. Sin embargo, el valor de pH 7,4 ubicado hacia la parte noreste de la zona de estudio, sugiere que existen otros factores que están ocasionando un aumento del pH en el área, por lo que no se descarta el efecto de la meteorización de rocas con minerales silicatados. ^[12]

IV.3.2.- Conductividad

La caja gráfica para este parámetro se observa en la figura 24, donde se aprecian los distintos valores de conductividad eléctrica en $\mu\text{S}/\text{cm}$, medidos en la zona de estudio. Los valores obtenidos para este trabajo presentaron un intervalo de valores entre 409 y 2349 $\mu\text{S}/\text{cm}$, con una mediana de 1709 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Los valores más altos de conductividad fueron obtenidos para las muestras MASP-09 El Guape, MASP-02 Vivero y MASP-08 El Guapito. Por otro lado, el valor más bajo se registró en la muestra: MASP-04 El Gabán.

De igual manera, nótese en la distribución espacial para este parámetro (figura 25), la existencia de una alta dispersión, lo que permite señalar que esta gran variabilidad de conductividades, permite sugerir la presencia de un sistema de aguas con características químicas diferentes. Asimismo, se puede observar que las zonas con las más altas conductividades, representan a las muestras cuyos valores de cationes y aniones son mayores; es decir contienen mayor cantidad de sales disueltas, lo que es de esperarse dado la relación directamente proporcional entre la concentración y la carga del ión. Estos valores podrían estar asociados a la entrada de aguas servidas o la infiltración de aguas con alto contenido de iones cuyo origen podría provenir de las actividades antrópicas. Nótese los altos valores medidos en Duaca, donde las aguas provenientes de las actividades domésticas y agrícolas podrían estar impactando al acuífero.

Igualmente, los bajos valores observados podrían estar asociados al proceso de dilución producto de la infiltración de aguas de lluvias y servidas procedentes de zonas aledañas a la zona de estudio.

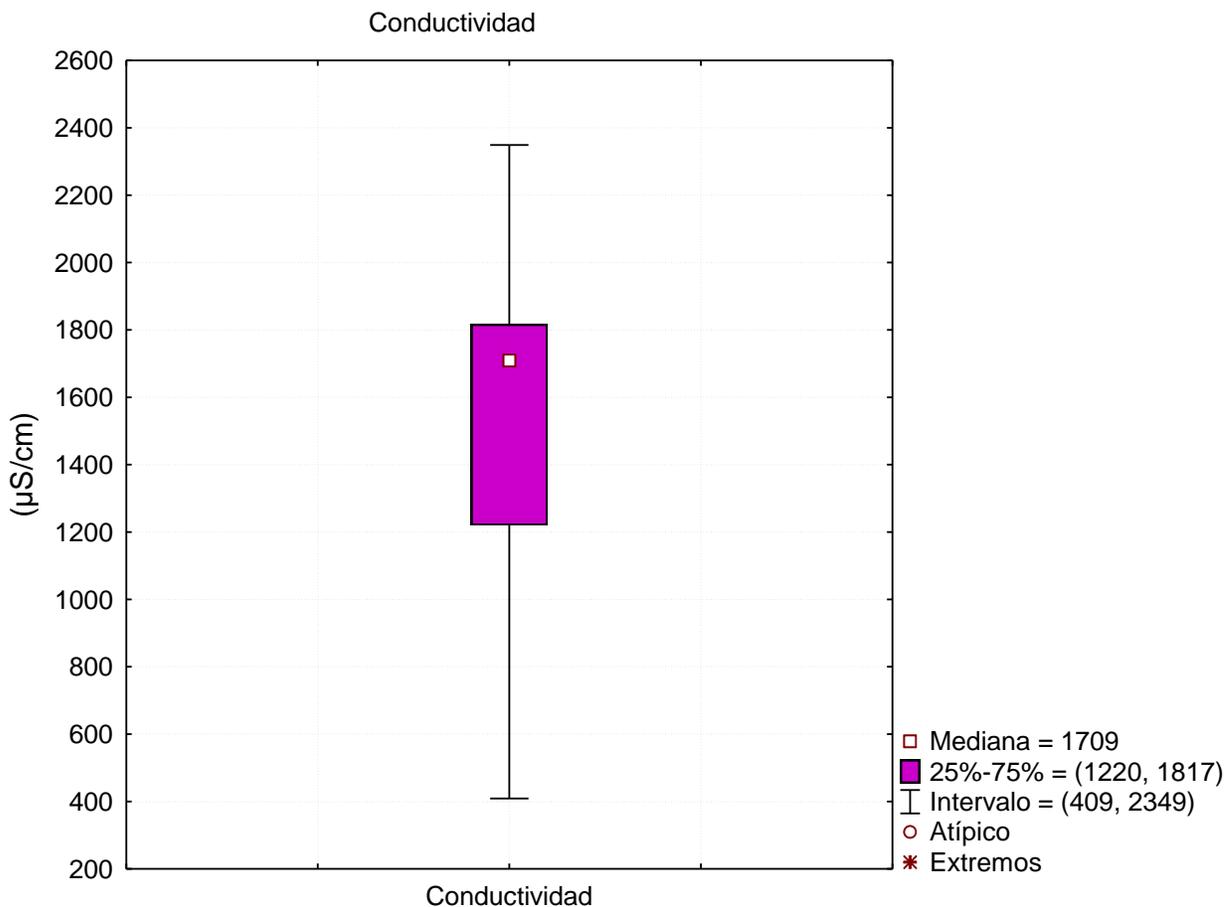
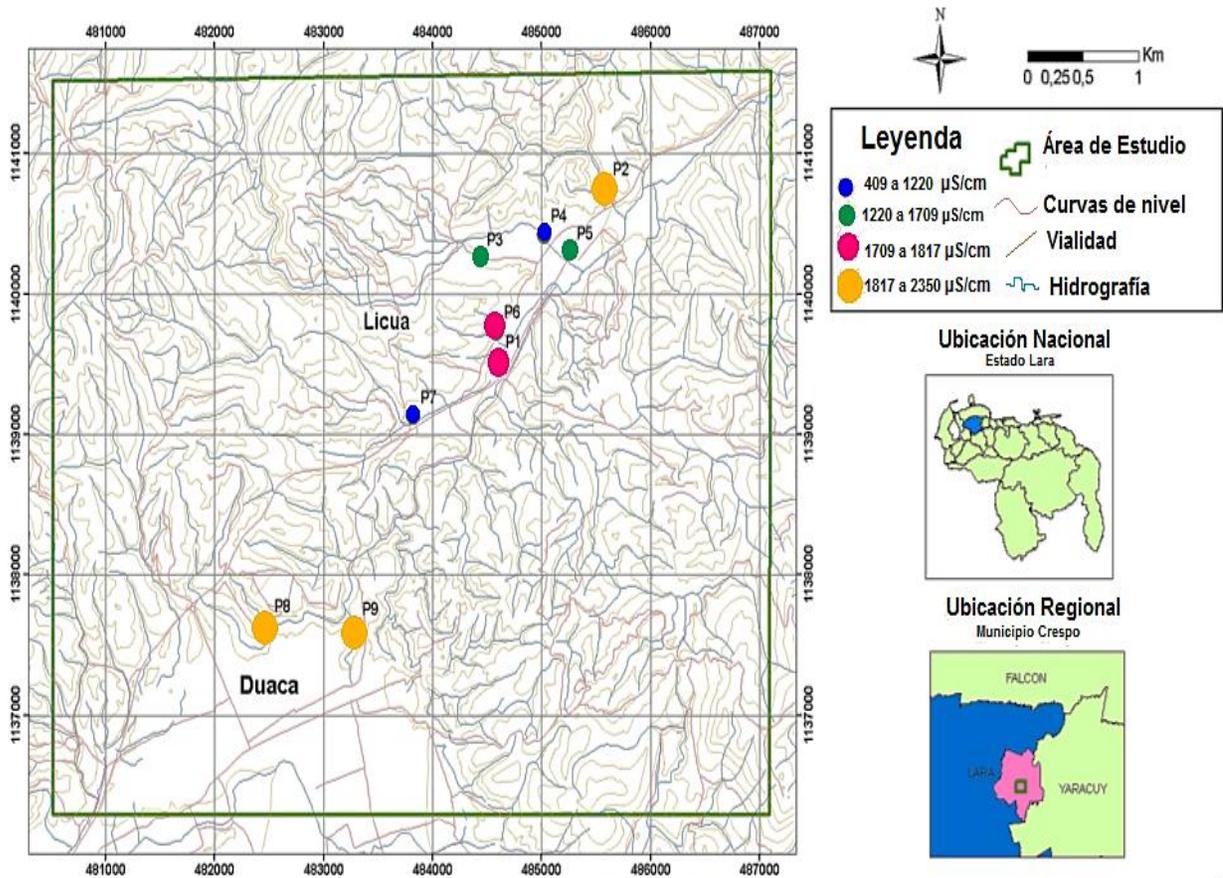


Figura 24. Caja gráfica de la Conductividad



IV.3.3.- Sólidos disueltos totales (SDT)

Los sólidos disueltos totales (SDT) representan una medida de la cantidad de materia disuelta en el agua, este es determinado por evaporación de un volumen de agua previamente filtrada. Autores como Davis y Wiest (1971) y Hem, J. (1985) clasifican las aguas de acuerdo a las concentraciones de sólidos disueltos totales en aguas dulces cuyas concentraciones están entre 0-1000 mg/L; aguas salobres con concentraciones

entre 1000-10000 mg/L, mientras que las aguas con valores entre 10000 y 100000 mg/L, se consideran como saladas; finalmente, valores de sólidos disueltos totales mayores a 100000 mg/L se clasifican como salmueras.

Es por ello que de acuerdo a la clasificación antes señalada, se puede indicar que los valores obtenidos para los sólidos disueltos totales (SDT) de las 9 muestras de aguas subterráneas captadas, permiten clasificarse como dulces.

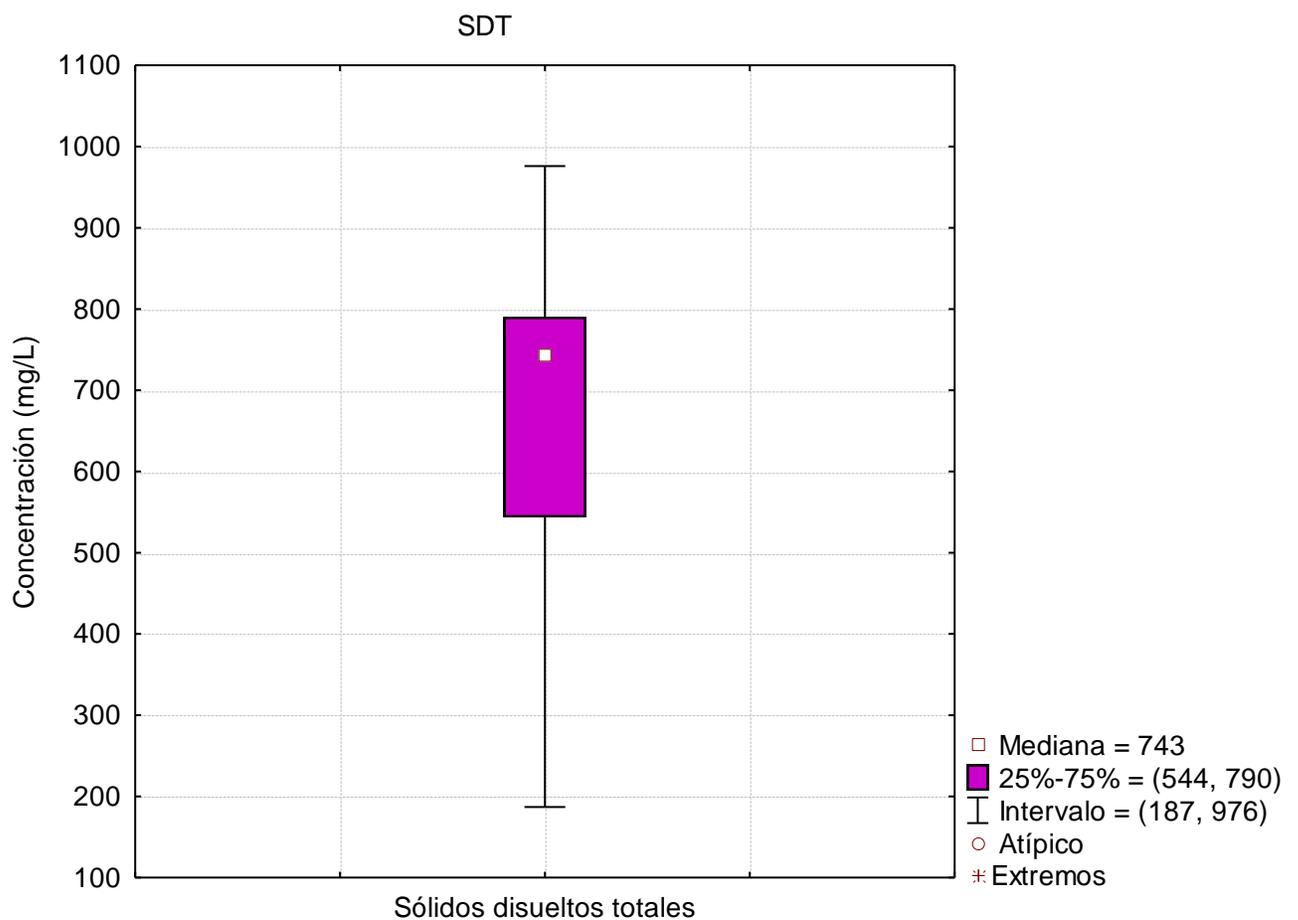


Figura 26. Caja gráfica de los sólidos disueltos totales.

Resulta así mismo interesante señalar que la tendencia observada coincide con la obtenida para los valores de conductividad, lo que indica que ambos parámetros están estrechamente relacionados; es decir, al existir una mayor cantidad de iones en solución, aumenta de forma directa la conductividad. Los valores de sólidos disueltos totales (SDT) obtenidos mediante la sumatoria de todas las especies iónicas determinadas en las muestras de agua subterránea, están entre 427 mg/L y 976 mg/L, con una mediana de 743 mg/L (figura 26). La distribución espacial de este parámetro observada en la figura 27, revela que las concentraciones más altas de SDT corresponden a las zonas sur y oeste del área estudiada; mientras que hacia la zona norte las concentraciones son menores.

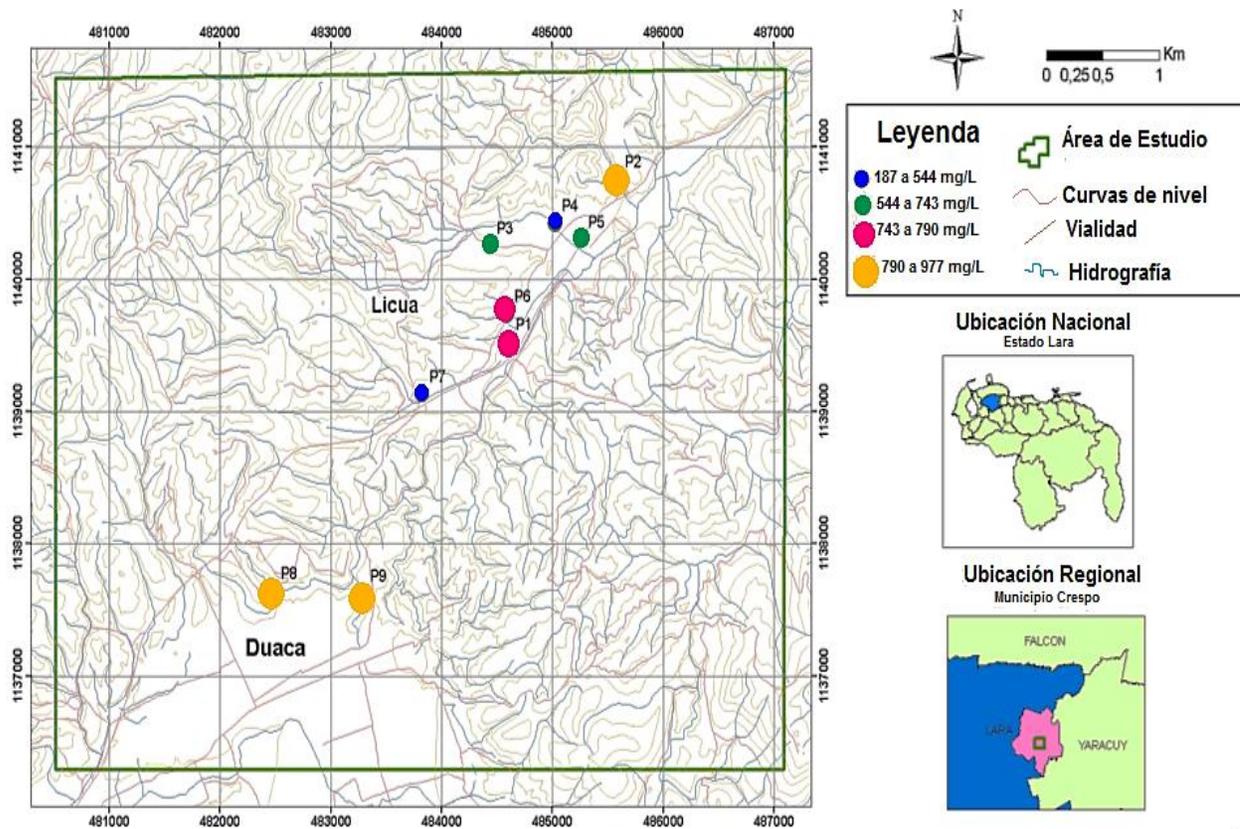


Figura 27. Mapa de distribución de los sólidos disueltos totales en la zona de estudio.

IV.4.- Variación de la concentración de los cationes y aniones mayoritarios.

Con el propósito de visualizar la variación en la concentración de las especies químicas mayoritarias K^+ , Na^+ , Mg^{2+} , Ca^{2+} , los aniones HCO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , NO_3^- y su comportamiento estadístico, se construyeron las cajas gráficas mostradas en las figuras 28 y 29; asimismo, es discutido el comportamiento espacial mediante la elaboración de mapas presentados en las figuras 30 a la 37.

En la Tabla 2B mostrada en el Apéndice B son presentadas las concentraciones obtenidas tanto para las especies catiónicas como aniónicas por cada punto de muestreo. Nótese que la tendencia obtenida es la misma que se esperaba desde la medición en campo de parámetros como conductividad y sólidos disueltos totales; es decir, en puntos donde la conductividad y los SDT fueron altos, se obtuvo una mayor concentración de iones mayoritarios en solución, mientras que en las zonas donde se midieron valores bajos de ambos parámetros se obtuvo una menor concentración de iones en solución.

IV.4.1.- Potasio (K^+)

El ión potasio generalmente procede de la meteorización de feldspatos y ocasionalmente de la solubilización de depósitos de evaporitas. Este elemento tiene un comportamiento subordinado a la ocurrencia de arcillas y a la adsorción en la superficie de minerales con alta capacidad de intercambio iónico los cuales tienden a fijar el K^+ de manera irreversible. Las concentraciones en general de este elemento se encuentran entre los 0,1 y 100 mg/L en aguas dulces, extraordinariamente se pueden tener algunos cientos de mg/L y solo muy raramente se pueden tener salmueras de hasta 100.000 mg/L, el agua de mar tiene alrededor de 400 mg/L [12]

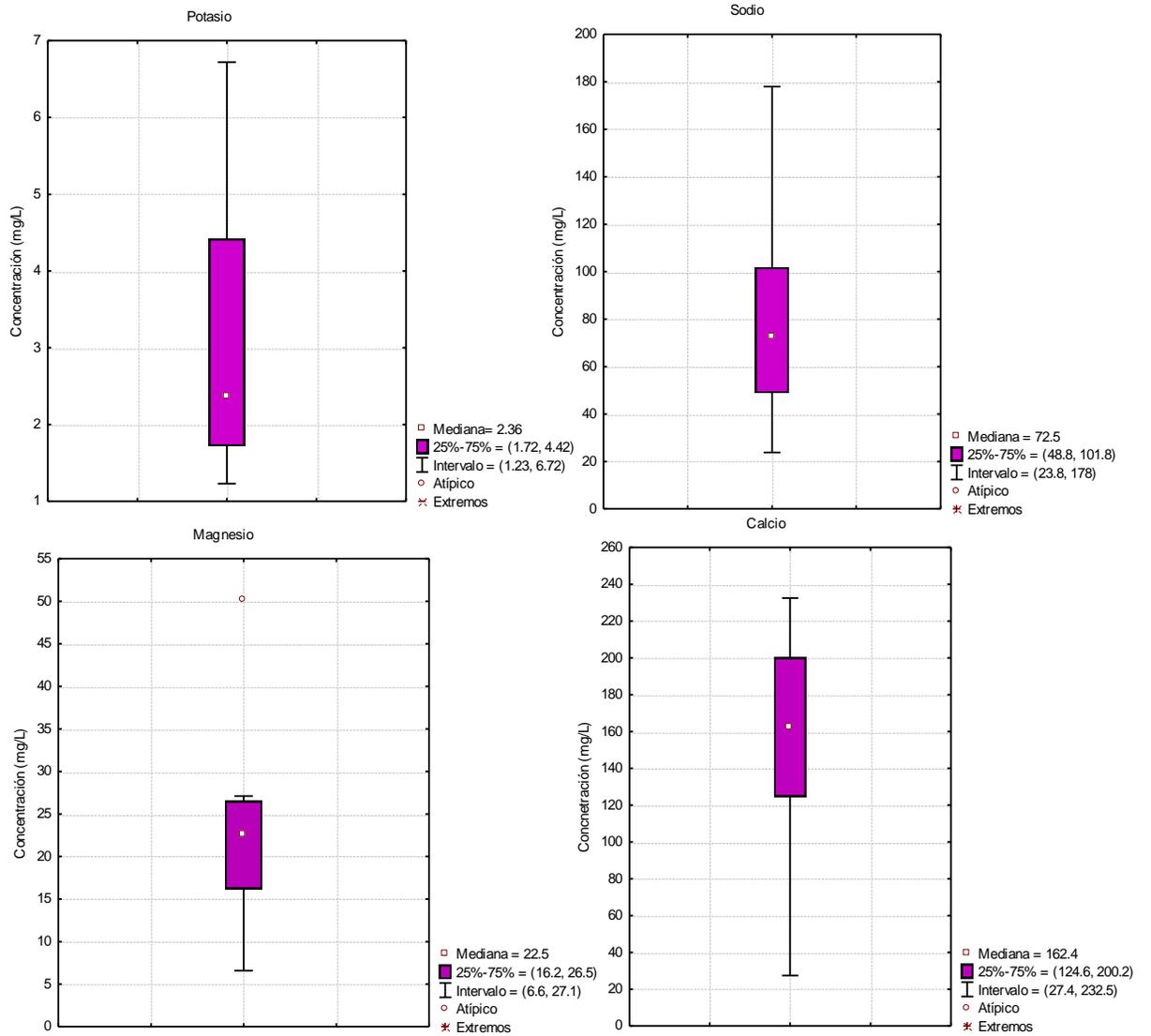


Figura 28. Cajas gráficas de los cationes

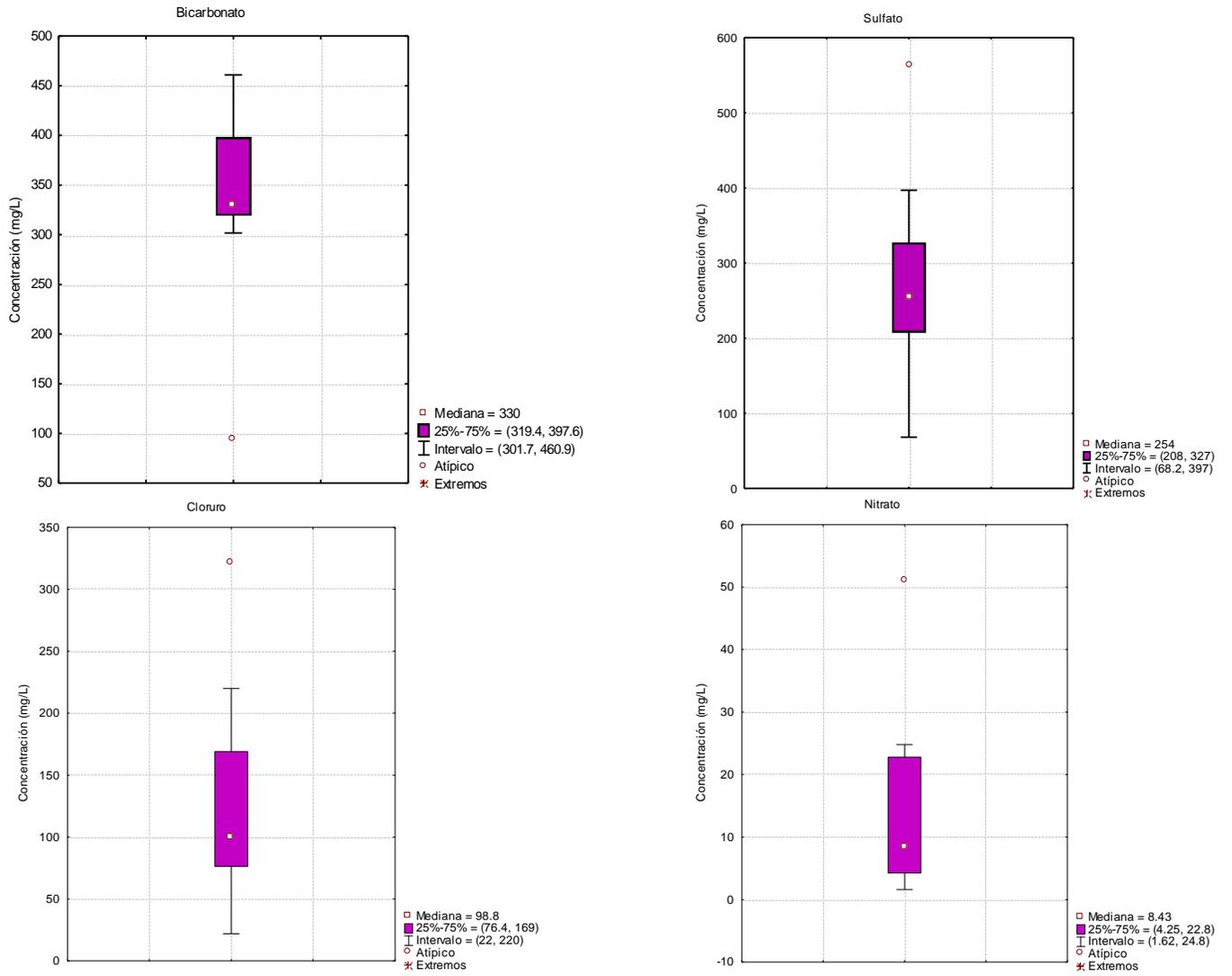


Figura 29. Cajas gráficas de los aniones

El intervalo de concentraciones obtenido para las 9 muestras de aguas subterráneas captadas estuvo entre 1,23 – 6,72 mg/L con una mediana de 2,36 mg/L, donde el valor más alto lo presentó la muestra MASP-02 Vivero seguido de la muestra MASP-06 La Capilla, y la concentración más baja la presentó la muestra MASP-07 La Pradera 2. De acuerdo a estos valores, pueden considerarse las aguas subterráneas del acuífero Licua de tipo dulce.

La distribución espacial de la concentración del K^+ es mostrada en la figura 30. Nótese que en general, los mayores valores de concentración son detectados hacia el norte de la zona de estudio, mientras que los menores valores hacia el sur. Dicha distribución espacial podría estar asociada a las actividades antrópicas desarrolladas en el sector.

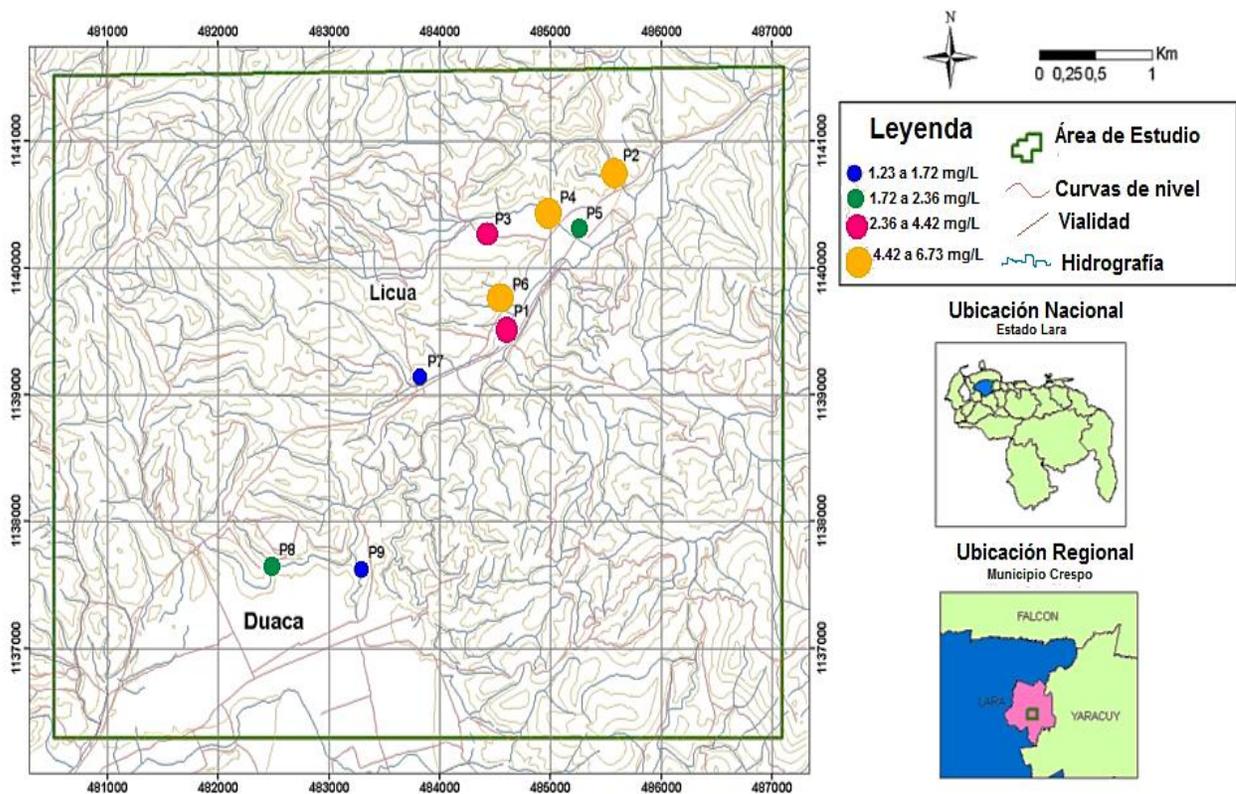


Figura 30. Mapa de distribución del ión potasio en la zona de estudio.

IV.4.2.- Sodio (Na⁺)

El ión sodio corresponde a sales de alta solubilidad y difíciles de precipitar, suele estar asociado al ión cloruro. El contenido en aguas dulces suele estar entre 1 y 200 mg/L. ^[12] Para las muestras estudiadas, según la caja gráfica representada en la figura 28, el sodio presentó un valor de fondo de 72,5 mg/L, así como un intervalo mínimo y máximo de concentraciones que está entre 23,8 mg/L y 178 mg/L, respectivamente. De acuerdo con estos valores, se puede corroborar que el agua muestreada en esta zona es de tipo dulce.

La distribución espacial de la concentración del Na⁺ en los puntos de muestreo es mostrada en la figura 31; en ella se observa que las mayores concentraciones para esta especie se encuentran ubicadas hacia la parte suroeste de la zona de estudio, específicamente las muestras MASP-08 El Guapito y MASP-09 El Guape donde la disolución de sales acumuladas en la superficie del terreno, mediante procesos de evaporación pudiera estar gobernando este comportamiento, aportando considerables concentraciones de este ión.

De la misma forma, el aporte del Na⁺ puede provenir a su vez de la hidrólisis del mineral albita contenido en los esquistos calcáreos o de las filitas correspondientes a las Formación Bobare. Los menores valores de concentración podrían ser originados mediante la infiltración de aguas meteóricas. ^[51]

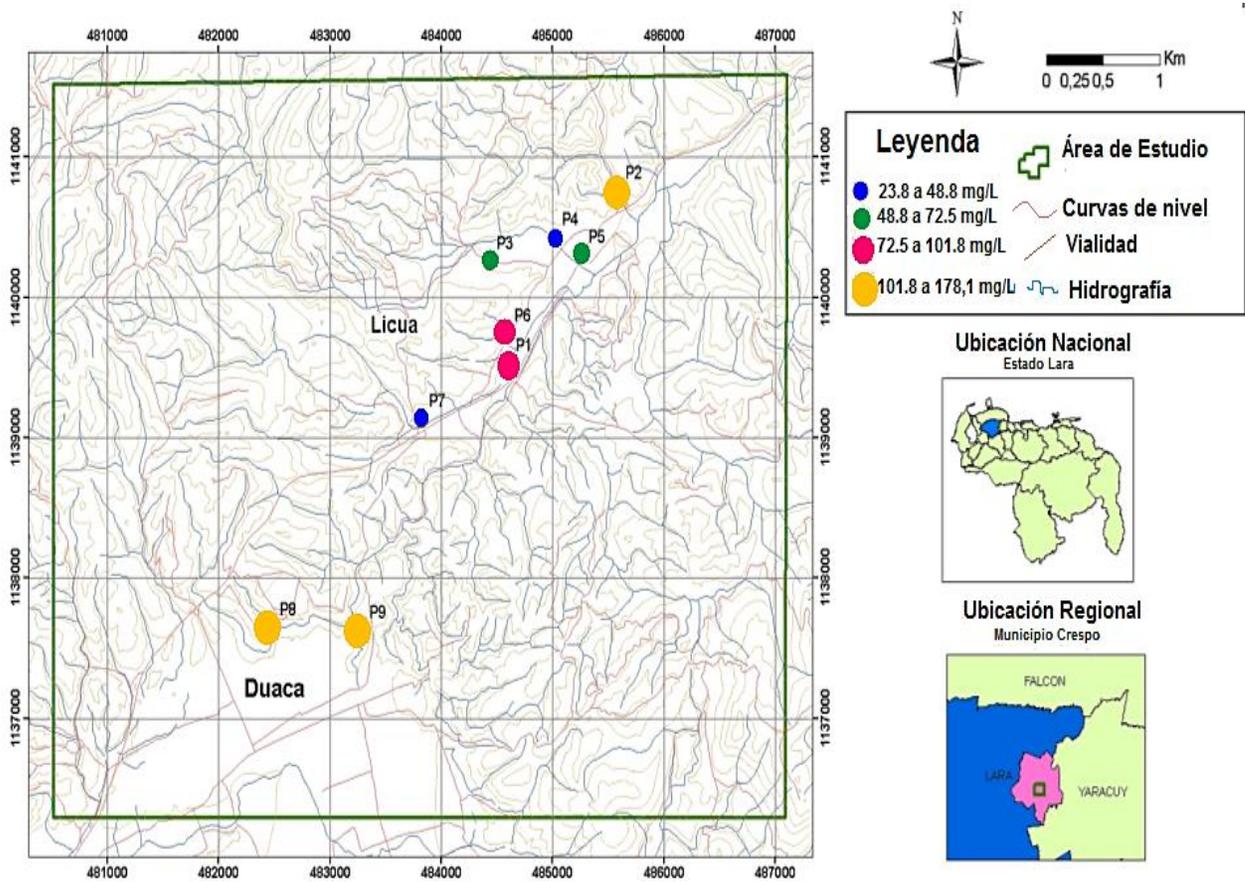


Figura 31. Mapa de distribución espacial del ión sodio en la zona de estudio.

IV.4.3.- Calcio (Ca²⁺)

El Ca²⁺ suele ser el catión principal en la mayoría de las aguas naturales por su amplia difusión en rocas ígneas, sedimentarias y metamórficas. En general el comportamiento químico del Ca²⁺ es que compone sales desde moderadamente solubles a muy solubles [12]. Este ión es la especie catiónica dominante en el 100% de las muestras analizadas en el presente estudio. A partir del análisis estadístico a través de las cajas gráficas, se

determinó que en la región de Licua, el Ca^{2+} presenta una mediana de 162,4 mg/L y concentraciones mínima y máxima de 27,4 y 232,5 mg/L, respectivamente.

En este sentido, el proceso de disolución del material calcáreo y la interacción del agua con minerales como yeso y anhidrita presente en la litología de la zona permiten explicar la presencia de las aguas del tipo cálcicas. Por otra parte, los valores de Ca^{2+} para las aguas dulces están entre 10 a 250 mg/L; en ese sentido todas las muestras captadas tienen valores de concentración de Ca^{2+} que están entre el intervalo señalado, clasificándola como dulces. [29]

La distribución espacial de la concentración del Ca^{2+} en los puntos de muestreo es mostrada en la figura 32 donde no pareciera mostrar una tendencia espacial.

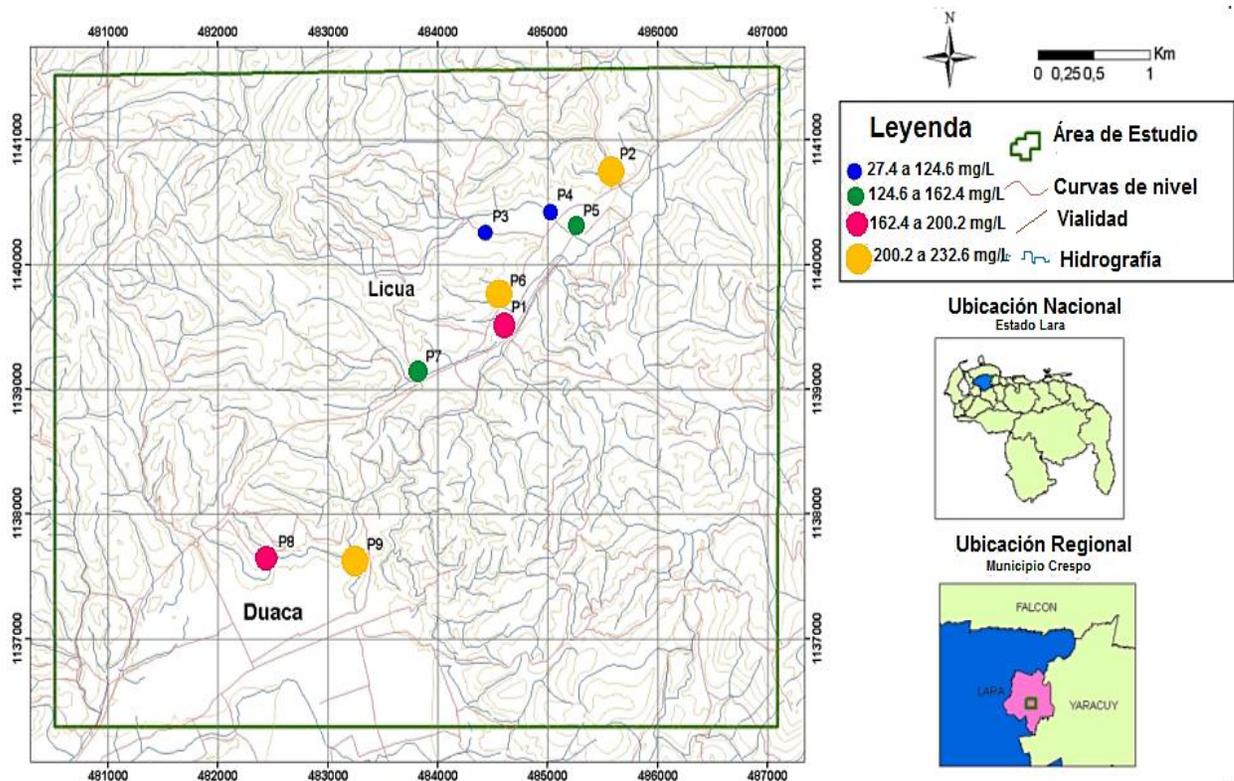


Figura 32. Mapa de distribución espacial del ión calcio en la zona de estudio.

IV.4.4.- Magnesio (Mg^{2+})

El ión Mg^{2+} tiene propiedades muy similares a las del ión Ca^{2+} , pero sus sales son, en general, más solubles y difíciles de precipitar. En la figura 33 se presenta la distribución espacial de este ión en función de su concentración. Nótese que la distribución presenta un patrón similar a la del Ca^{2+} , esto como consecuencia del comportamiento geoquímico semejante de estos cationes. La presencia de Mg^{2+} en las aguas podría vincularse con la disolución de minerales como las calizas dolomíticas y las dolomías ricas en magnesio. Asimismo, la hidrólisis de minerales como silicatos magnesianos y ferromagnesianos, aportan Mg^{2+} al medio, ya que estos son bastante susceptibles a la solubilización. [3]

En caja gráfica para el Mg^{2+} de la figura 28, se extrae que la mediana es de 156 mg/L y el intervalo de concentraciones mínima y máxima de 46 y 300 mg/L, respectivamente. De igual manera, obsérvese en esta figura existe un valor anómalo de esta especie química, el cual está asociado a la muestra MASP-02 Vivero (50 mg/L).

Así mismo, es también importante acotar que la variabilidad en las concentraciones de Mg^{2+} de un pozo a otro, puede ser consecuencia de los procesos de ablandamiento natural, debido a fenómenos de intercambio iónico lo que podría explicar los bajos valores detectados en algunas muestras.

A juzgar por los bajos valores obtenidos en general para la zona suroeste de Licua, el Mg^{2+} pudiera estar controlado por el factor topográfico, ya que en las zonas que presentan las mayores expresiones topográficas, el tiempo de interacción agua-roca es menor y por lo tanto la concentración de iones es menor. [12]

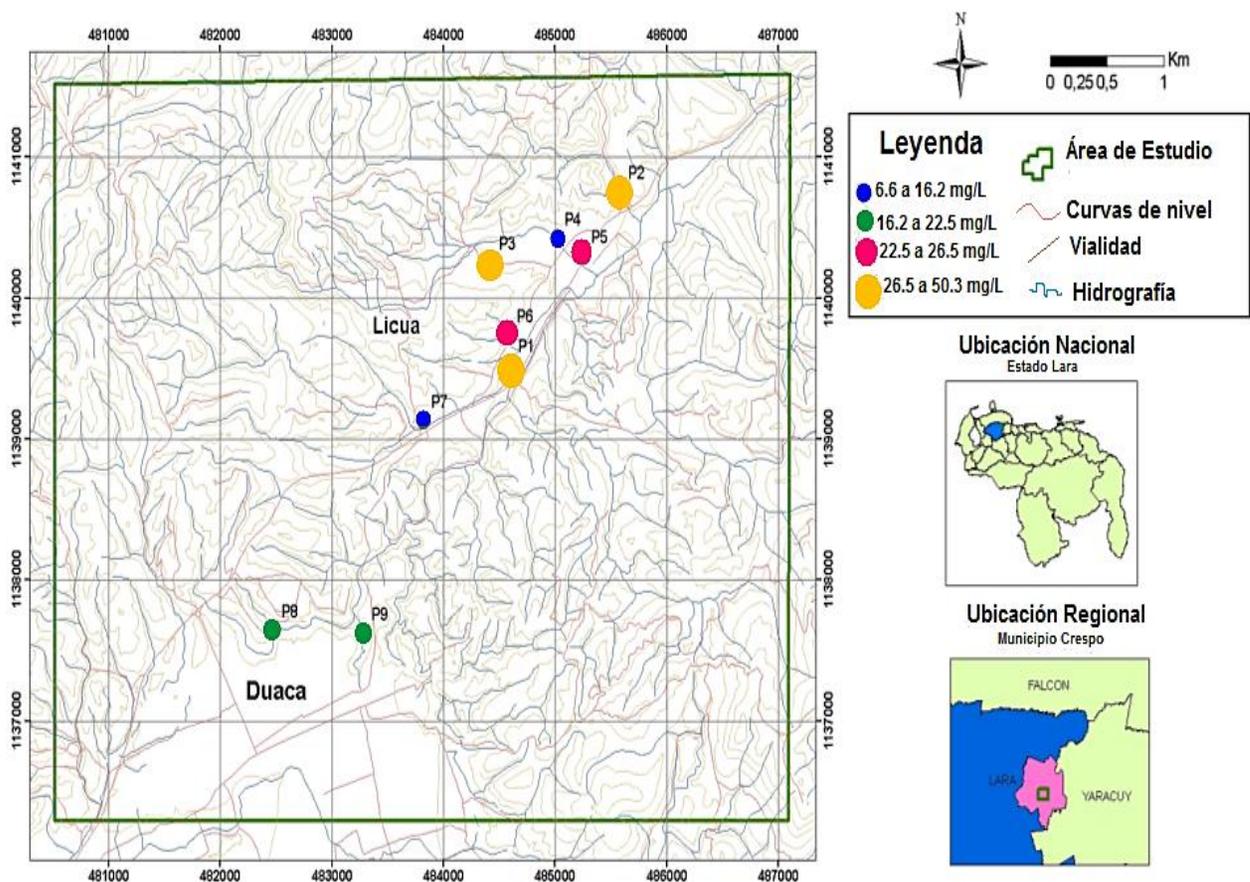


Figura 33. Mapa de distribución espacial del ión magnesio en la zona de estudio.

IV.4.5.- Bicarbonato (HCO_3^-)

Para el área de estudio, los valores de HCO_3^- obtenidos en el laboratorio en las 9 muestras de agua subterránea varían entre 94 mg/L y 460,9 mg/L, con una mediana de 330 mg/L. De igual manera, se presenta una anomalía en la concentración de esta especie en la muestra MASP-04 El Gabán cuyo valor de concentración es 94 mg/L.

Esta anomalía en la muestra en estudio puede hallarse influenciada por procesos tales como la hidrólisis de silicatos como feldespato y cuarzo, característicos de la geología de la zona en estudio en un sistema donde existe poco CO_2 .^[19]

Considerando la variación de la concentración de bicarbonato con el pH, Porras et al. (1985) señalan que en las aguas que poseen un pH inferior a 8,3 unidades, la especie carbonatada predominante es el bicarbonato y este comportamiento se observa en la totalidad de las muestras de agua subterránea captadas en el sector Licua^[27]. La existencia de grandes cantidades de HCO_3^- en las aguas subterráneas debe su presencia a la disociación de dióxido de carbono procedente de la atmósfera, del suelo y a la disolución de rocas carbonáticas, por ello suele esperarse que su comportamiento y distribución espacial sean similares a los del Ca^{2+} .^[12]

En lo que respecta la distribución espacial del ión bicarbonato, se puede observar en la figura 34 que la misma no es homogénea. Sin embargo, se conoce que las altas concentraciones de HCO_3^- corresponden también a las zonas donde además fueron determinados bajos valores de pH. Lo que permite indicar que el ión HCO_3^- podría estar gobernado por el equilibrio agua- CO_2 atmosférico.

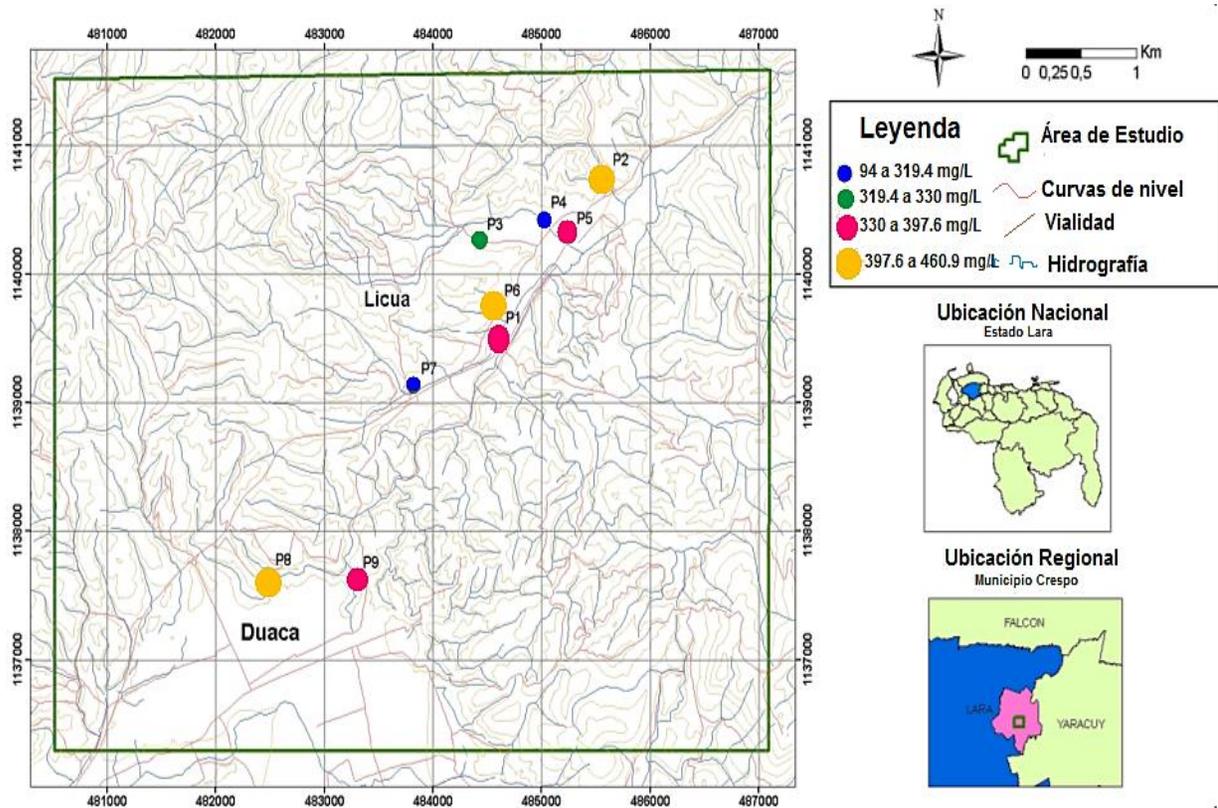


Figura 34. Mapa de distribución espacial del ión bicarbonato en la zona de estudio.

IV.4.6.- Sulfato (SO_4^{2-})

La caja gráfica construida para el ion SO_4^{2-} determinado en las aguas captadas en la zona de estudio arrojó una mediana de 254 mg/L y valores mínimo y máximo de 68,2 y 563 mg/L, respectivamente (Figura 28). Además permitió detectar un valor anómalo correspondiente a las muestra MASP-02 Vivero (563 mg/L), atribuido a la contaminación por el uso de fertilizantes ya que este pozo se encuentra ubicado específicamente en una instalación agronómica donde se cultivan todo tipo de plantas y donde el uso de plaguicidas y fertilizantes pueden aportar cantidades considerables de este ión, facilitado

a través de los sistemas de riego que solubilizan las sales de este ión lixiviándolas al subsuelo.

La distribución espacial obtenida para el SO_4^{2-} mostrada en la figura 35, es similar a la del Ca^{2+} . En general, espacialmente se puede observar que las aguas de la zona tienden a incrementar su contenido de SO_4^{2-} desde las zonas de recarga, hacia las zonas más bajas.

Por otra parte, el uso de fertilizantes empleados en esta zona agrícola de Licua para lograr óptimas cosechas y calidad de los suelos, constituyen otra fuente del ion SO_4^{2-} . Nótese además que la distribución espacial de este ión es muy similar a la del ión K^+ , este comportamiento responde a la presencia de fertilizantes con altas concentraciones de ambos iones. En este orden de ideas, es posible considerar a la actividad antrópica como un factor modificador en las aguas subterráneas en este sector.

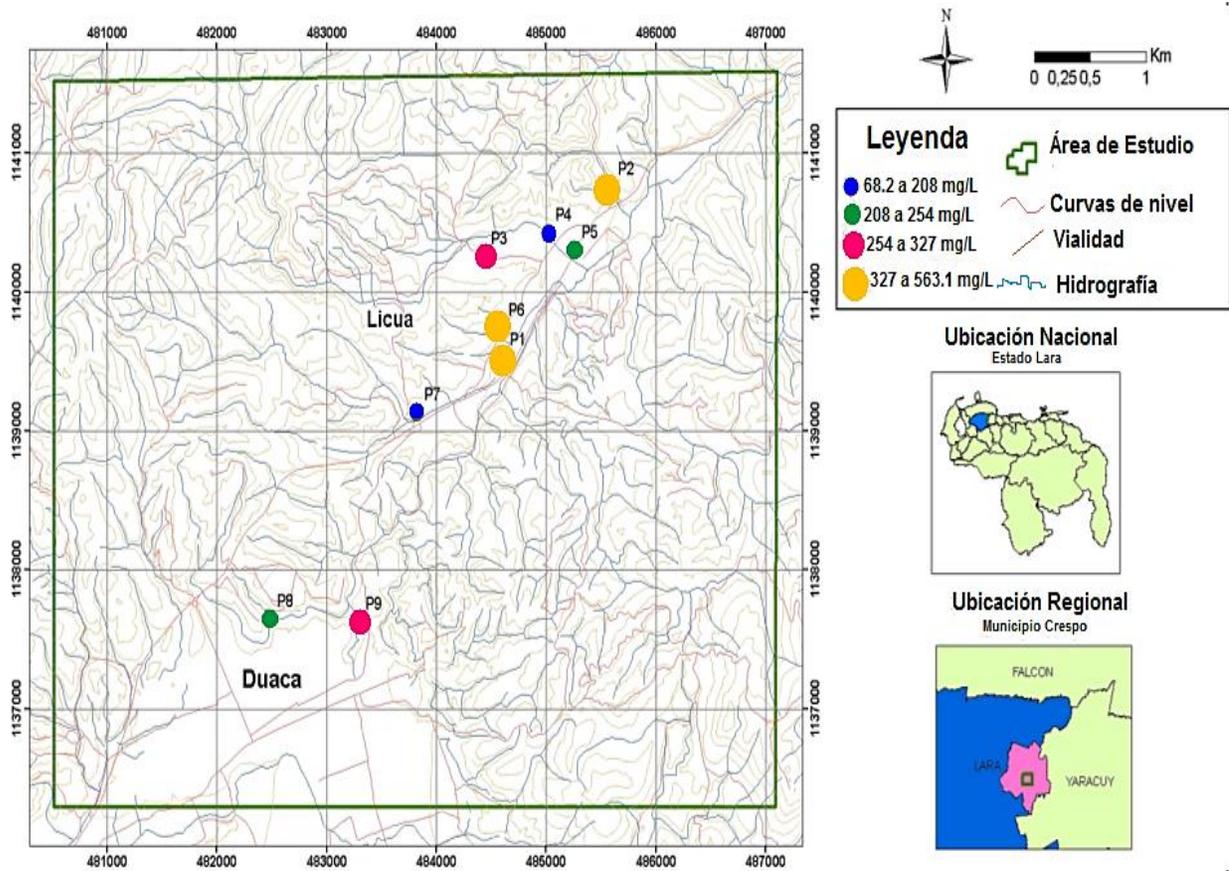


Figura 35. Mapa de distribución espacial del ión sulfato en la zona de estudio

IV.4.7.- Cloruro (Cl⁻)

De acuerdo a la Figura 28, la caja gráfica del Cl⁻ obtenida para el sector de Licua se caracteriza por tener una mediana de 98,8 mg/L, así como también por valores mínimo y máximo de 22 y 220,0 mg/L, respectivamente. Además, esta caja gráfica permitió detectar un valor anómalo que corresponde con la muestra MASP-09 El Guape (321,1 mg/L). Es de resaltar que dicha concentración anómala está muy alejada del valor de la mediana obtenido, por lo que actividades humanas como los vertidos urbanos y el agua de riego podrían estar influyendo de manera local en el aporte de Cl⁻ aportando cantidades

importantes de sales. Esto pudiera explicar las mayores concentraciones de Cl^- , en la zona suroeste de Licua, muy cercana a la región de Duaca la cual se trata de la zona más urbanizada y de mayor desarrollo industrial.

Lo anteriormente expuesto puede evidenciarse en la figura 36 donde se muestra la ubicación espacial para el ión cloruro Cl^- en la zona de estudio. El principal aporte de Cl^- es el proveniente de la disolución de evaporitas como la halita y en poca proporción de la meteorización de rocas ígneas y metamórficas [12]. No obstante, se debe resaltar que las condiciones climáticas de la zona de estudio, pueden facilitar la precipitación de sales durante los eventos de evaporación, las cuales son posteriormente disueltas por las lluvias, para ser luego aportadas a las aguas subterráneas durante la infiltración del agua hacia el subsuelo.

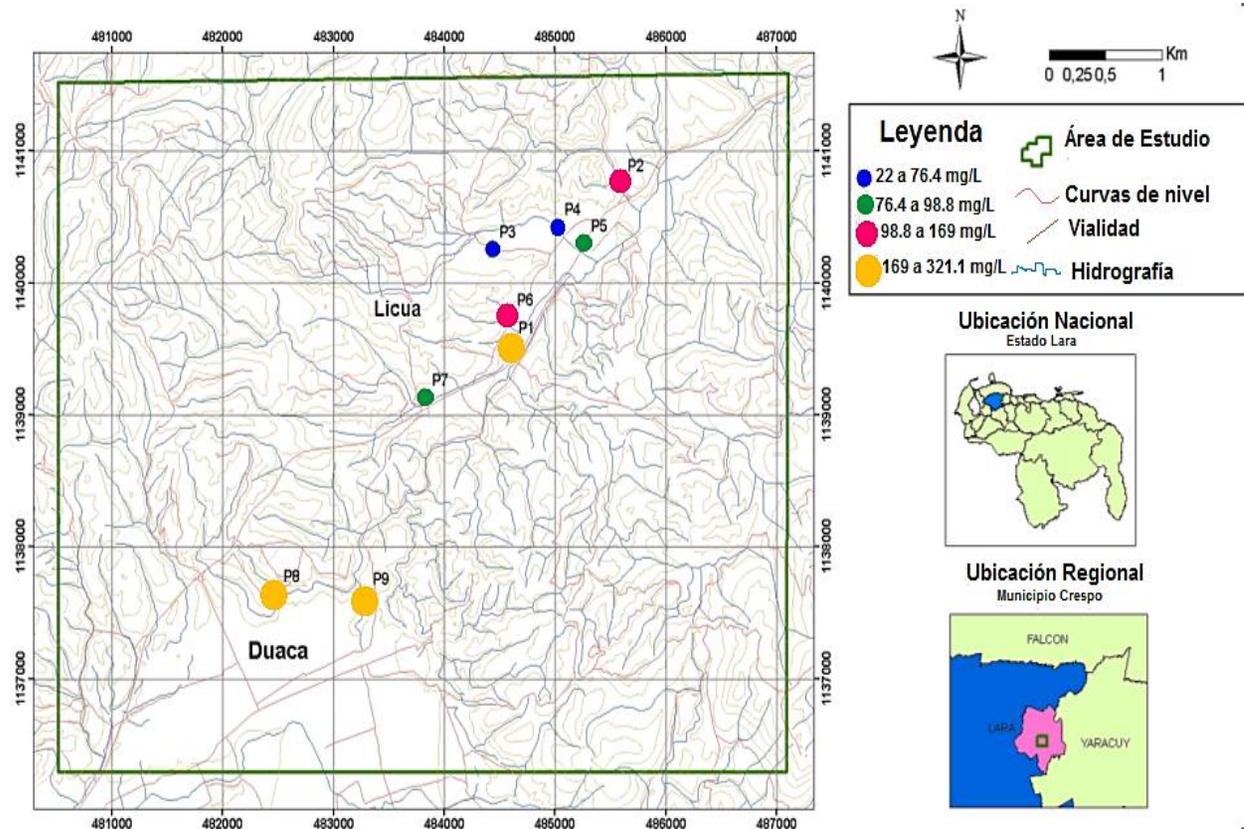


Figura 36. Mapa de distribución espacial del ión cloruro en la zona de estudio.

IV.4.8.- Nitrato (NO_3^-)

Estadísticamente se obtuvo que las muestras de agua estudiadas en la zona presentan un valor de concentración de fondo para NO_3^- de 8,43 mg/L y un intervalo de concentraciones mínimo y máximo de 1,62 y 24,08 mg/L, con un valor anómalo registrado correspondiente a la muestra MASP-08 El Guapito que tiene una concentración de 51 mg/L. Dicha anomalía pareciera estar reflejando el proceso de contaminación debido a las actividades urbanas, cuyas aguas residuales podrían estar siendo infiltradas hacia el subsuelo. En consecuencia, resulta lógico realizar esta inferencia ya que específicamente ésta muestra se encuentra localizada en las cercanías de los centros poblados donde la actividad urbana e industrial predomina.

En general, las concentraciones de NO_3^- del 45% de las muestras captadas superan el límite permitido para consumo, el cual es de 10 mg/L (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995). Por las consideraciones anteriores, es preciso destacar que en la zona de Licua en general se desarrollan constantemente actividades de siembra, cultivo y ganadería, donde se requiere el uso de fertilizantes, plaguicidas y demás productos de preservación y mejora del rendimiento de suelos, por lo que puede relacionarse que el principal aporte de éste anión, está directamente relacionado al factor antrópico. El comportamiento del ión NO_3^- es muy similar al de los iones SO_4^{2-} y K^+ lo que confirma que las actividades agrícolas son la fuente de aporte de estos iones.

En este sentido, Hem (1985) indica que la mayoría de los fertilizantes sintéticos contienen en su composición al nitrógeno, el cual es posteriormente convertido por las bacterias del suelo en NO_2^- y NO_3^- , proceso que es llamado “nitrificación”^[19]. Por ende, las muestras MASP-06 La Capilla, MASP-08 El Guapito y MASP-09 El Guape son reflejo de una actividad agrícola rigurosa en la zona de estudio como se puede observar en la distribución espacial respectiva de la figura 37.

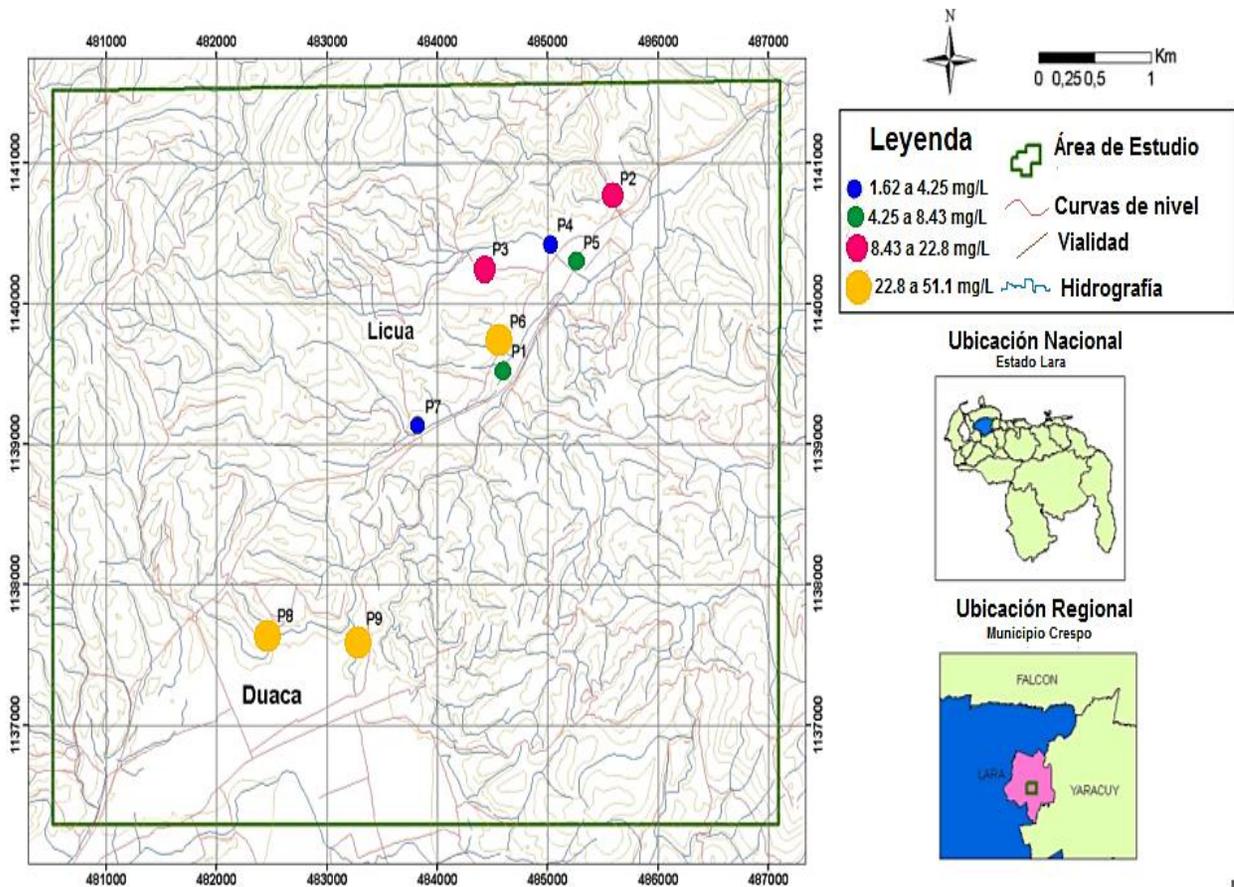


Figura 37. Mapa de distribución espacial del ión Nitrato en la zona de estudio.

IV.5.- Variación de la concentración de sílice disuelta (SiO_2)

La sílice (SiO_2) es una especie química que se encuentra en las aguas subterráneas a causa del ataque de silicatos solubles, contribuye con la alcalinidad y puede ser un indicador del tipo de terreno atravesado por el agua subterránea y aún mejor de la temperatura del acuífero. El pH es un factor determinante en la solubilización de esta especie ya que cuando este disminuye la sílice precipita. [12]

La caja gráfica construida para la sílice disuelta (SiO_2) mostrada en la figura 38, muestra que los valores oscilan entre 1,59 y 10,87 mg/L, con una mediana de 7,71 mg/L; notándose valores cuyas concentraciones son mayores a 10 mg/L correspondientes a las muestras MASP-02 Vivero, MASP-03 La Pradera 1 y MASP-09 El Guape.

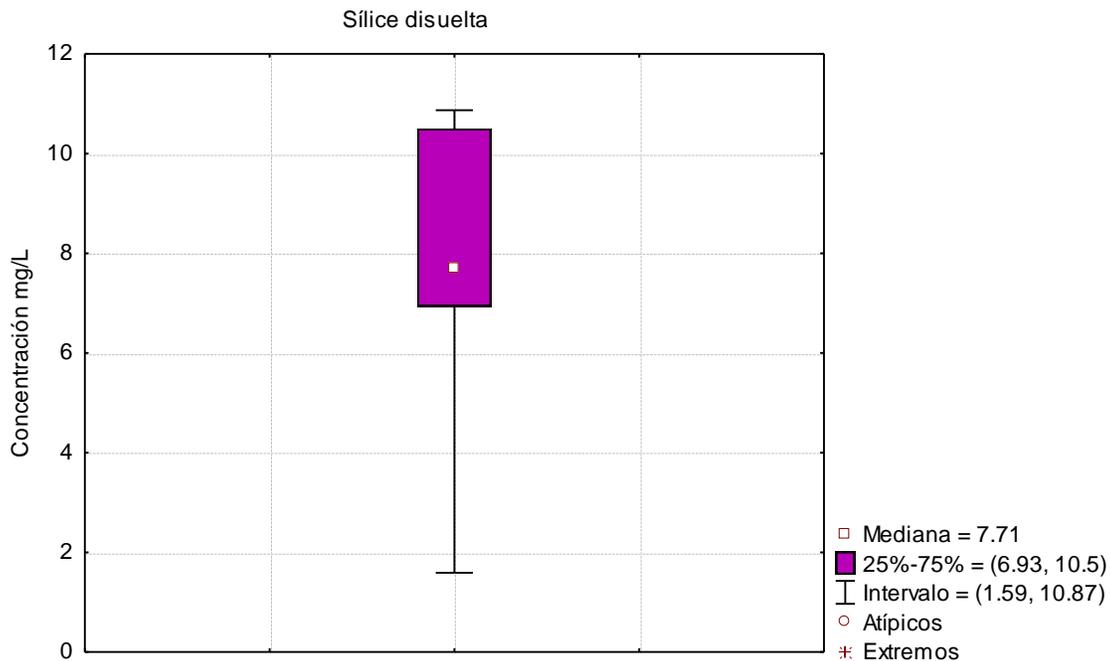


Figura 38. Caja gráfica para la Sílice disuelta SiO_2 .

Por otro lado, espacialmente en la figura 39 se observa una distribución de los valores más bajos de concentración registrados para la sílice disuelta (SiO_2) en el sector central de la zona de estudio. Se puede asumir que esta distribución posiblemente esté siendo afectada por el factor geomorfológico, dado que esta distribución se puede asociar al recorrido que ha tenido el flujo de agua subterránea en la zona, de tal manera que, a medida que se alejan de la zona de recarga, aumenta su tiempo de residencia en el acuífero y con ello la concentración de la sílice disuelta (SiO_2).

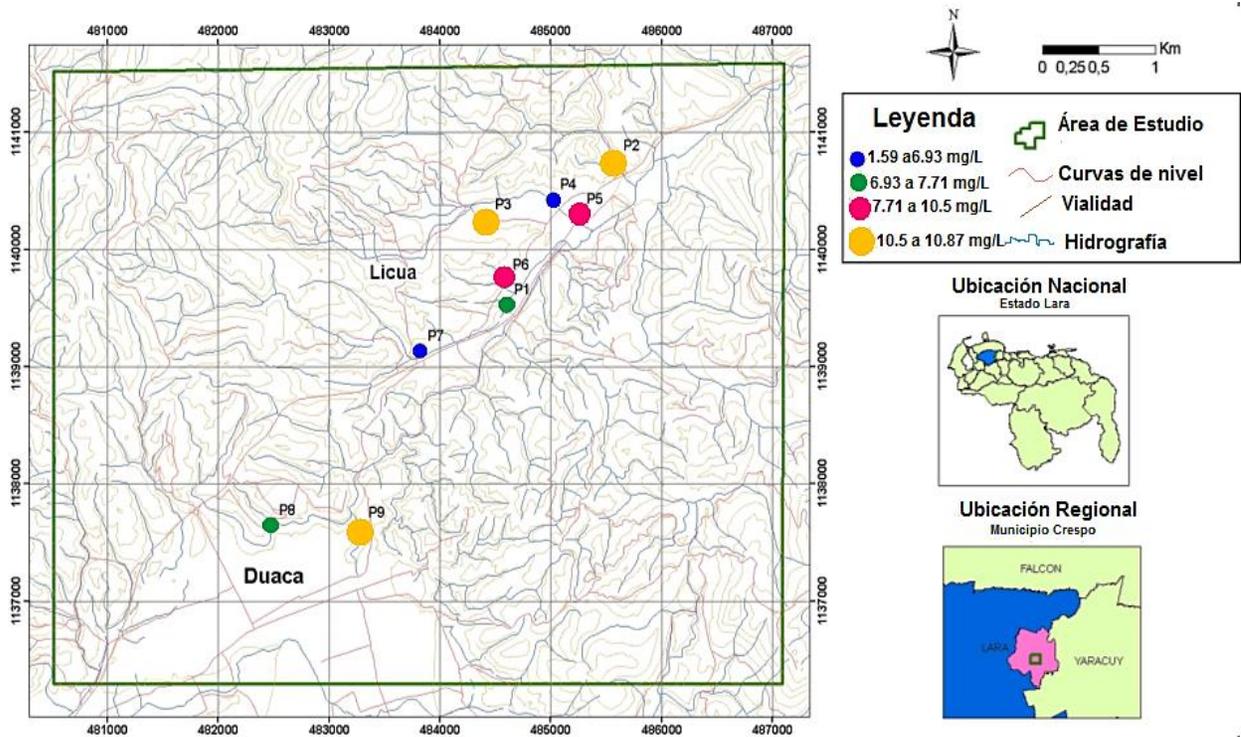


Figura 39. Mapa de distribución espacial de la sílice disuelta en la zona de estudio.

IV.6.- Relaciones iónicas

Los resultados de los análisis obtenidos para cada ión y parámetro fisicoquímico, están reflejados en el Apéndice A. Estos resultados se utilizaron para realizar algunas relaciones interiónicas, esto con el propósito de identificar los diferentes procesos hidrogeoquímicos responsables de la composición química de las aguas subterráneas, así como la litología por donde circulan las mismas. Además, las relaciones interiónicas permiten apoyar las diferentes interpretaciones realizadas en el contexto de la zona de Licua, Municipio Crespo, Estado Lara.

En consecuencia, en la siguiente sección se discutirán una serie de relaciones interiónicas de interés, propuestas por Christopher (1975).

IV.6.1.- Relación Ca^{2+} / rSO_4^{2-}

El ión Sulfato SO_4^{2-} constituye otra especie mayoritaria y de gran influencia en el tipo de agua identificada para esta zona. Con el propósito de confirmar que la fuente de este anión pudiera atribuirse con la disolución de minerales como el yeso y/o anhidrita, resultó necesario construir el gráfico de la figura 40, donde se aprecian dos grupos. Un primer grupo con un excelente coeficiente de correlación de 0,9621 que puede ser descrito mediante la ecuación de la recta $y = 1,1076 (\pm 0,1) x + 0,4739$ y un segundo grupo más disperso.

El primer grupo permite indicar que las especies químicas Ca^{2+} y SO_4^{2-} provienen de la disolución de yeso y/o anhidrita y el segundo grupo podría tener su origen por el uso extensivo de fertilizantes en la zona de estudio o mediante la acción de cualquier otro factor antrópico. Mientras que por otra parte la presencia de Ca^{2+} se puede relacionar con la disolución del material calcáreo presente en la zona de estudio.

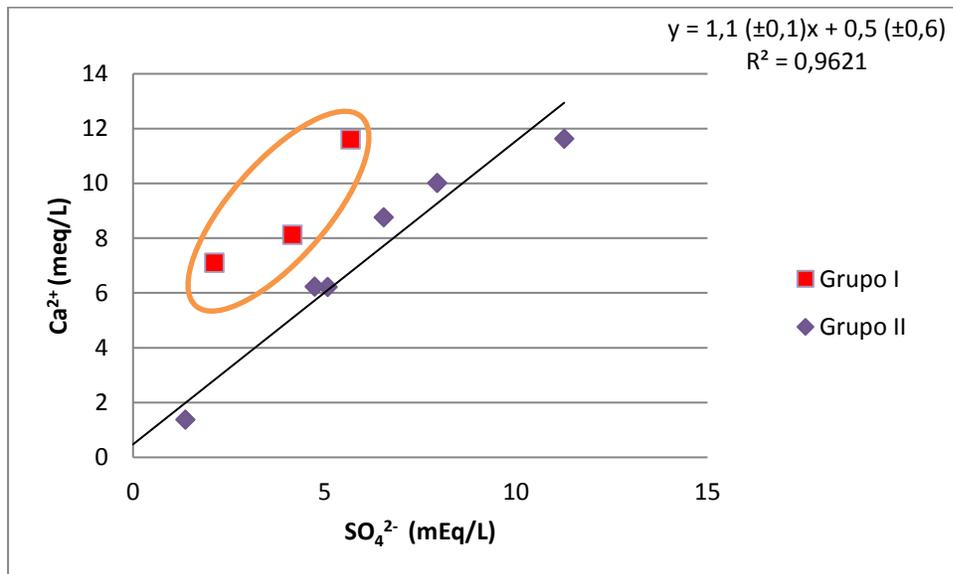


Figura 40. Relación entre la concentración de Ca^{2+} y SO_4^{2-}

IV.6.2.- Relación Conductividad/ HCO_3^- y Conductividad/ Ca^{2+}

Se ha relacionado al proceso de disolución de minerales carbonaticos como la calcita, material que predomina en los meta-conglomerados calcáreos de la Formación Bobare, como una de las principales fuentes de iones Ca^{2+} y HCO_3^- . En este orden de ideas, para corroborar la afirmación anterior, se grafican las relaciones molares tanto de calcio Ca^{2+} como de bicarbonato HCO_3^- expresadas en mEq/L, frente a la conductividad mediada en campo.

Se puede observar en la figura 41 la presencia de dos grupos. El primer grupo con una serie de datos que presenta un coeficiente de correlación de $R^2=0,9782$ y que sugiere que el HCO_3^- contribuye notablemente con los valores de conductividad. El segundo grupo mucho más disperso indica que esta especie evidentemente tiene más de una fuente hacia las aguas subterráneas, como la asociada al aporte atmosférico, hidrólisis de silicatos y la oxidación de la materia orgánica.

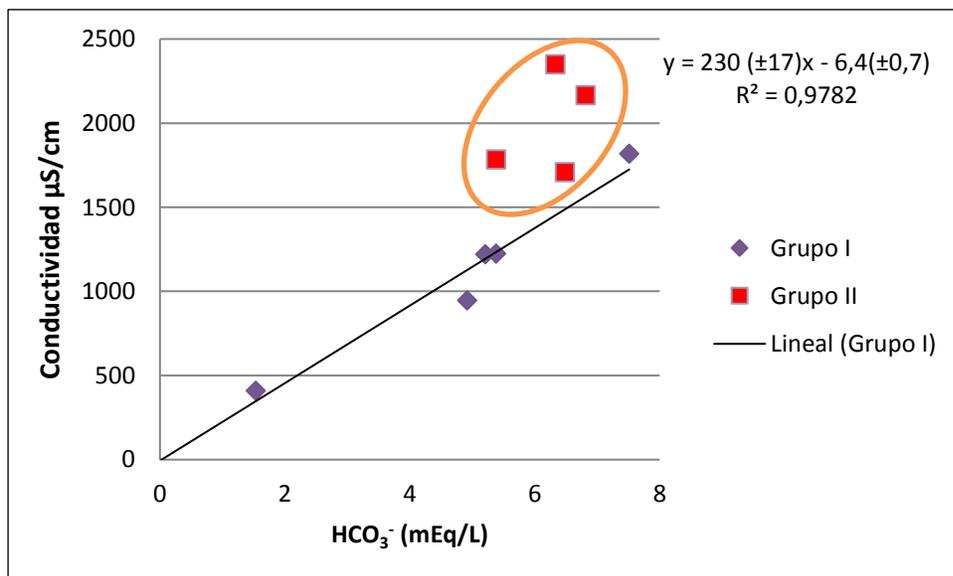


Figura 41. Relación entre la conductividad medida en campo frente a la concentración de HCO_3^-

Por su parte, en la Figura 42 se plasma la relación entre el calcio y la conductividad. Se puede observar que el coeficiente de correlación es de $R^2=0,9348$ indicando que la especie Ca^{2+} contribuye fuertemente con la conductividad en esta zona de estudio.

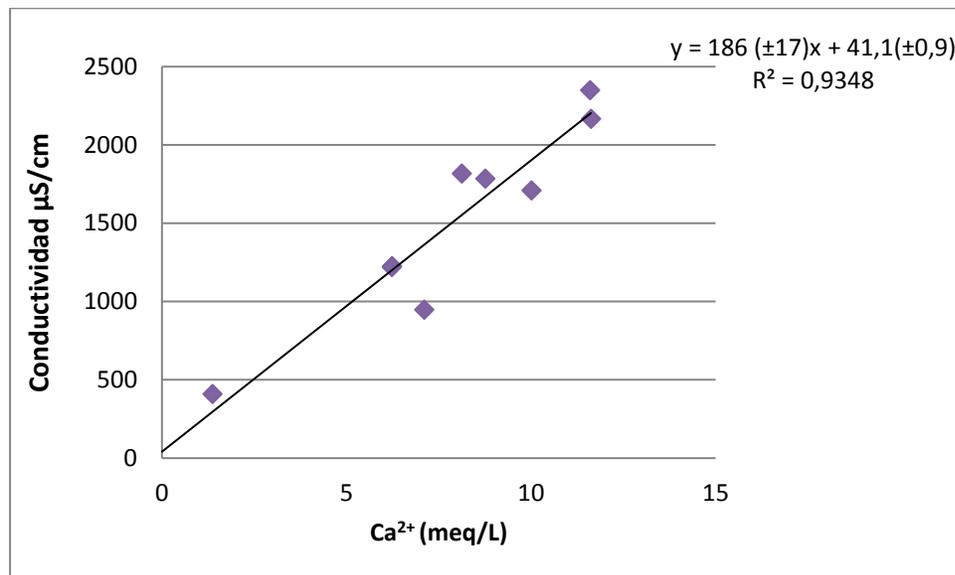


Figura 42. Relación entre la conductividad medida en campo y la concentración de Ca^{2+} .

IV.6.3.- Relación Na/Cl frente a la conductividad

Rajmohan y Elango (2004) señalan que la relación molar de Na^+ y Cl^- con respecto a la conductividad, sugiere la existencia de procesos como meteorización de silicatos e intercambio iónico [54]. Estos autores proponen que al ubicar las muestras de agua cuya composición es influenciada por la meteorización de silicatos, la relación molar Na /Cl es superior a 1, de manera que minerales como feldespatos reaccionan con el ácido carbónico con la presencia del agua, liberando HCO_3^- . En cambio, la región donde prevalece el intercambio iónico, se debe a que la relación molar Na/Cl es inferior a 1.

Para ejemplificar lo descrito anteriormente, se construyó dicha relación para las aguas estudiadas, mostrada en la Figura 43. Dicha Figura permite indicar que la composición química de la mayoría de los pozos de aguas subterráneas en el acuífero Licua, exceptuando las aguas representadas por la muestra MASP-04 El Gabán, están siendo controlados por el intercambio iónico. En este proceso se refleja la cantidad de iones Ca^{2+} y Mg^{2+} ganados o perdidos, que son aportados por diferentes minerales sulfatados y carbonáticos, tales como el yeso, anhidrita, dolomita o calcita.

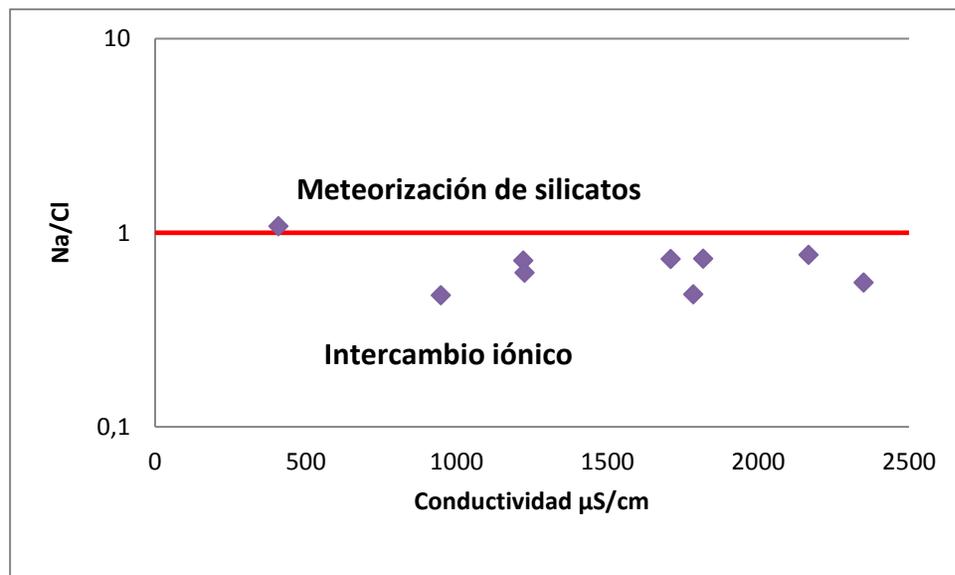


Figura 43. Relación entre Na/Cl frente a la conductividad.

IV.6.4.- Relación $r\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}/\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$

El intercambio iónico afecta principalmente a los cationes, ocurre especialmente en los minerales de arcilla con un alto nivel de quimisorción. Para confirmar que es éste proceso es el que impera en el comportamiento de las muestras analizadas, fue utilizada la relación donde se grafican la suma de los cationes $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ y de los aniones $\text{HCO}_3^- + \text{SO}_4^{2-}$.

Dicha relación mostrada en la figura 44 es descrita mediante la ecuación $y = 1,5922(\pm 0,06)x - 0,9413$ cuyo coeficiente de correlación $R^2 = 0,9868$ indica la existencia de una baja dispersión; asimismo, la pendiente obtenida señala que una de las fuentes de estos iones está asociado al proceso de interacción agua-roca, a través del intercambio catiónico.

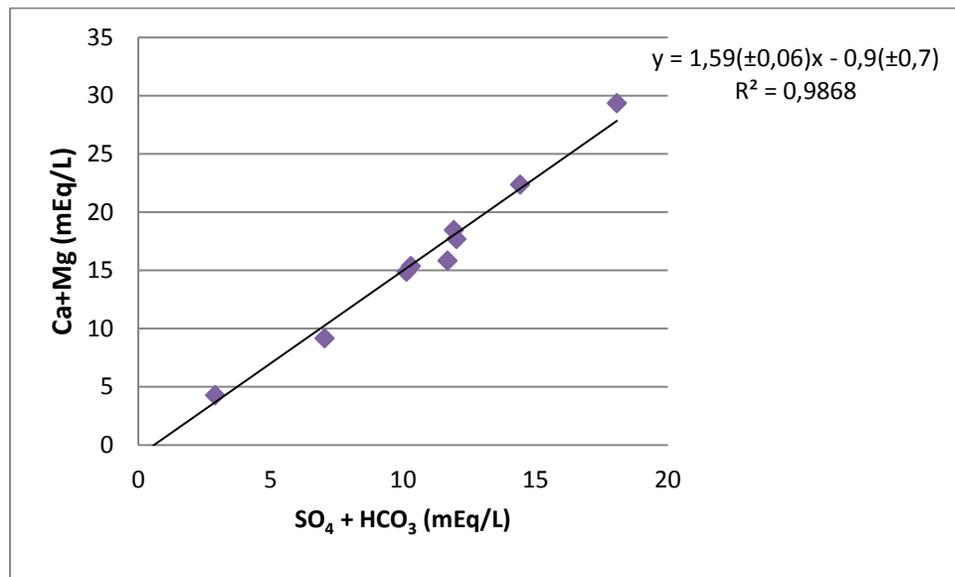


Figura 44. Relación entre $(Ca^{2+} + Mg^{2+}) / (HCO_3^- + SO_4^{2-})$.

IV.7.- Índices de saturación

El índice de saturación indicará si una solución está en equilibrio termodinámico con una fase sólida, o si se encuentra subsaturada o sobresaturada respecto a ésta. Teóricamente, un índice de saturación igual a cero indica el equilibrio con la fase sólida; asimismo, un índice menor que cero indica subsaturación con respecto al mineral y por lo tanto, el mineral se puede disolver. Por el contrario, un índice mayor que cero, indica sobresaturación con respecto al mineral por lo que este puede precipitar. ^[12]

Con el fin de determinar los posibles procesos que condicionan estas aguas se realizaron las gráficas mostradas en las figuras 45, 46 y 47, las cuales consideran al IS para la calcita, dolomita, cuarzo y anhidrita en función de los sólidos disueltos totales (SDT). Los datos fueron obtenidos mediante la utilización del programa PHREEQC, son mostrados en el Apéndice F.

La mayoría de las muestras presentan IS positivos para la calcita y dolomita indicando que las aguas están sobresaturadas de estas especies. En cambio, para la anhidrita la mayoría de los índices de saturación fueron negativos, lo que demuestra que las muestras se encuentran no saturadas respecto a este mineral.

En consecuencia, esto confirma nuevamente que el proceso que predomina en la zona es el de interacción agua-roca a través de la hidrólisis de la anhidrita y de la precipitación y/o disolución de calcita y dolomita. Dicho proceso facilita la presencia de Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^- , en las aguas circundantes.

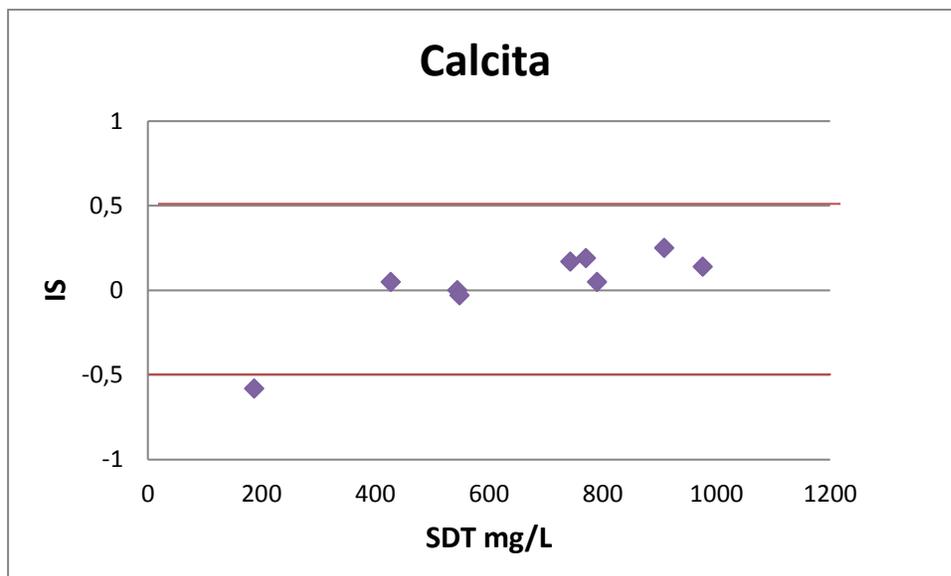


Figura 45. Índice de saturación de calcita en función de SDT

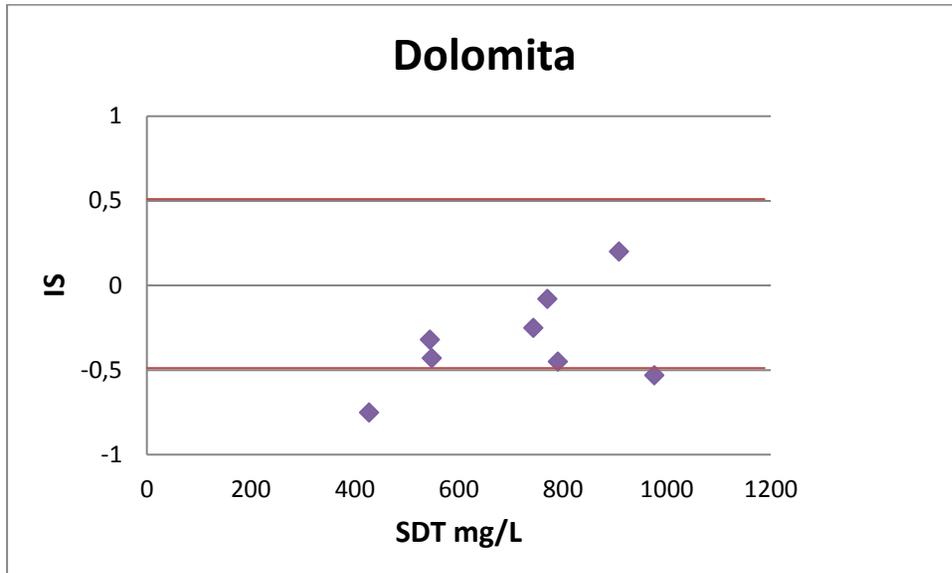


Figura 46. Índice de saturación de dolomita frente a los SDT.

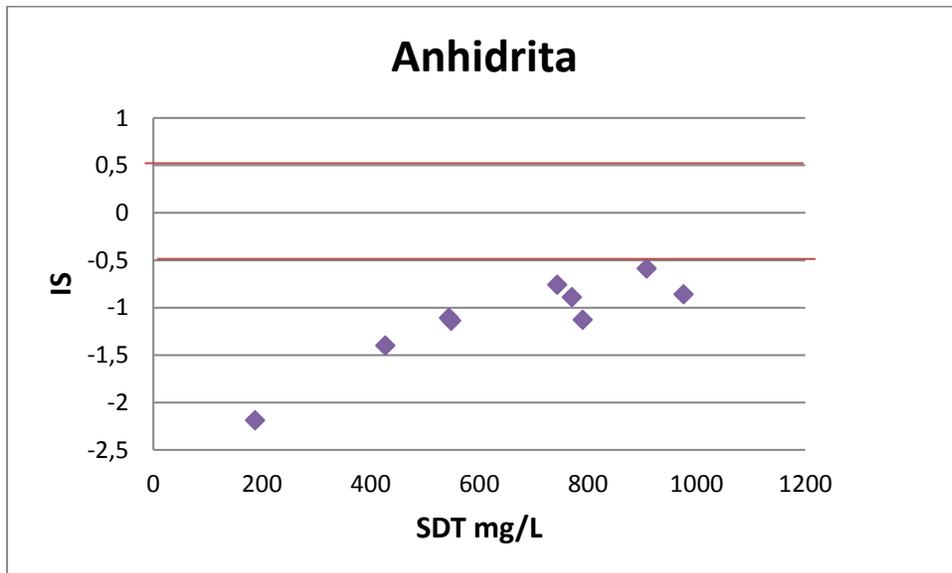


Figura 47. Índice de saturación de Anhidrita en función de los SDT.

IV.8.- Análisis de la calidad química de las aguas

Cuando la composición y características del agua se consideran bajo el punto de vista de su utilización o aplicación determinada, nace el concepto de "calidad". Mientras la composición en un instante y lugar determinados es única, la calidad puede ser múltiple y no queda perfectamente definida, hasta que el uso concreto a que se destine el agua no quede especificado. En atención a esto el agua según su calidad se dirige al consumo humano, para la agricultura o para cierto tipo de industria. [6]

Para la evaluación y clasificación de la calidad de las aguas subterráneas del acuífero Licua, se utilizó como referencia la normativa para la clasificación y control de la calidad de los cuerpos de agua y vertidos reportada en el Decreto Presidencial 883, (Gaceta Oficial 5021, 1995). Para ello, fueron comparados tanto los parámetros pH, conductividad, SDT, así como las concentraciones de las especies químicas analizadas realizando un cuadro con los valores permitidos según el Decreto 883 y los intervalos obtenidos en el presente estudio y que se puede apreciar en la tabla 8.

Las aguas subterráneas de la región poseen un intervalo de concentración de SDT entre 187 mg/L y 976 mg/L. De acuerdo a la clasificación de las aguas, establecido por Davis y De Weist (1971) para los SDT (Tabla 1), el 100% de las aguas subterráneas muestreadas se consideran aguas dulces, ya que poseen un valor de SDT por debajo de 1000 mg/L. Igualmente, en función de la normativa implantada en el Decreto 883 para los SDT, se señala que el valor máximo es de 1300 mg/L. El total de las muestras analizadas en esta región están ubicadas por debajo de esta concentración, por lo que pueden clasificarse como aguas dulces.

Considerando los valores de conductividad, se tiene que dos de las muestras analizadas, específicamente la MASP-02 Vivero y la MASP-09 El Guape, presentan valores que

exceden los límites máximos permitidos por el Decreto 883, (Gaceta Oficial 5021,1995) para las aguas tipo 1,2 y 3, lo que conlleva a que estas sean catalogadas como aguas clase 4 o aceptables.

Con respecto a los valores de pH, para todas las muestras analizadas se tienen valores que entran dentro del intervalo permitido para la clasificación de las aguas como clase 1, 2 y 3. Lo que permite señalar que estas son aptas para usos como el doméstico, industrial y agrícola.

Asimismo, fue preciso evaluar la concentración de las especies químicas determinadas para cada una de las muestras desde el contexto de su calidad química, debido a que algunas de estas especies pueden ser nocivas para la salud o causar daño a los suelos que son usados para las actividades agrícolas, esto si no están dentro de los límites considerados por la normativa.

En ese sentido, del total de las aguas captadas solo 7 muestras cumplen con el Decreto 883, (Gaceta Oficial 5021,1995) para las clases de aguas tipo 1 y 2; es decir las aguas de uso doméstico y agrícola, esto en función de los valores de concentración de Na^+ determinado, representando solo el 77.7%.

Por otro lado, El Mg^{2+} está delimitado según la normativa por una concentración de 70 mg/L para las aguas tipo 3 y el ión K^+ tiene como límite permisible para este mismo tipo de aguas una concentración de 20 mg/L. Entre las muestras analizadas el 100% cumple con el Decreto 883 para ambos iones.

El Ca^{2+} determinado en las muestras de la zona, tiene concentraciones cercanas a 200 mg/L que es límite establecido para este elemento para aguas de tipo 1, 2 y 3. No obstante, solo un 22.2% de las muestras presenta valores superiores a este límite

(MASP-02 Vivero, MASP-06 La Capilla). Los altos valores de Ca^{2+} y Mg^{2+} pueden ser perjudiciales para la salud, provocando algunos tipos de cáncer y problemas cardiovasculares; asimismo, también recomienda que estas aguas no sean empleadas en riegos de cultivos debido a la toxicidad del Mg^{2+} a estas concentraciones. [55]

Para el caso del Cl^- , 8 muestras cumplen con el límite permisible para aguas de tipo 2 y 3, representando el 88.8% de la población. En cambio, el ión SO_4^{2-} posee un límite para las aguas clase 1, 2 y 3 que lo cumplen 7 de las muestras captadas que representan el 77,7% del total.

El SO_4^{2-} tiene efectos negativos en la salud, consumir agua con altas concentraciones de este ión puede producir problemas respiratorios, se ha demostrado además que en presencia de Na^+ y Mg^{2+} puede causar problemas en el tracto digestivo. Por ello, es importante destacar que, en la mayoría de las muestras, este ion es uno de los más elevados después del ión HCO_3^- .

En cuanto al ión HCO_3^- , está presente en altas concentraciones en la mayoría de las muestras, representando un 55,55% de las muestras que sobrepasan el límite de este anión, establecido por el Decreto 883 (Gaceta Oficial 5021,1995), con una concentración de 370 mg/L. Dependiendo de los cationes en solución este ión puede ser perjudicial para el crecimiento de las plantas, particularmente en presencia de Na^+ , el HCO_3^- junto con el Na^+ influyen en la estructura de los suelos restándole permeabilidad y fertilidad. [55]

El ión NO_3^- al igual que el SO_4^{2-} es perjudicial para la salud, la ingesta de este ión en altas concentraciones puede causar enfermedades como cáncer gástrico, malformación en fetos e hipertensión, entre otras enfermedades. El límite establecido para el NO_3^- es de 10 mg/L, en el sector de Licua. Para la región bajo estudio, las muestras de aguas captadas en los pozos 1, 2, 3, 4 y 6 no sobrepasan el valor establecido por el Decreto

883 (Gaceta Oficial 5021,1995), lo que permite que sean clasificadas como aguas de tipo 1 y 2.

Podría señalarse que de todas las muestras de aguas captadas solo cinco de ellas pueden ser consideradas como de uso doméstico y agrícolas, representando el 55.5% del total, correspondiente a las muestras 1, 3, 4, 5 y 7; mientras que las restantes, no cumplen con los requisitos expuestos en este Decreto, por lo que se pueden catalogar como no aptas para el consumo humano, bien sea en el ámbito doméstico o agrícola.

Tabla 8. Tabla comparativa entre los parámetros que determinan los diferentes tipos de agua de acuerdo a su calidad y los intervalos obtenidos como resultados en el presente estudio.

Parámetro químico	Límite máximo				Aguas analizadas
	Tipo 1 Excelente	Tipo 2 muy buena	Tipo 3 buena	Tipo 4 aceptable	
Na ⁺ (mg/L)	140	140	-	-	23,8-178
K ⁺ (mg/L)	-	20	20	-	1,23-6,72
Ca ²⁺ (mg/L)	200	200	200	-	27,4-232,5
Mg ²⁺ (mg/L)	70	70	70	-	6,6-50,2
Cl ⁻ (mg/L)	300	250	250	-	22,0-321,0
SO ₄ ²⁻	340	340	340	-	68,2-563
HCO ₃ ⁻	-	370	370	-	94-460,9
NO ₃ ⁻	10	10	-	-	1,62-51
SiO ₂ (mg/L)					1,59-10,87
Conductividad (µS/cm)	2000	2000	2000	-	409-2349
pH	6,5-8,5	6,5-8,5	6,5-8,5	3,8-10,5	6,72-7,4
SDT (mg/L)	1300	1300	1300	-	187-976

IV.9.- Prospección Geofísica

La realización de 17 sondeos eléctricos verticales (SEV) permitió medir la variación de la resistividad en profundidad de las rocas, y la posterior interpretación de los datos de campo, asociar un tipo de roca a intervalos específicos de resistividad, definiendo así, el tipo de rocas que constituyen los estratos del subsuelo en la zona de estudio con sus espesores y profundidades. Se correlacionaron los SEV interpretados mediante cortes o perfiles geoelectricos para establecer la continuidad lateral y en profundidad de los diferentes estratos con intervalos semejantes de resistividad a lo largo de la zona de estudio.

La longitud y distribución areal de los mismos dependió de las respuestas obtenidas y del acceso disponible para realizar los tendidos. De los sondeos eléctricos verticales, se lograron interpretar 5 pseudosecciones que describen la correlación de cada sondeo eléctrico vertical, obteniendo un estimado, de acuerdo a las resistividades, de las capas encontradas en el terreno. Las 5 pseudosecciones se representan en la figura 48.

Luego, con el fin de definir la composición sedimentológica del subsuelo del área estudiada, se hizo necesario recopilar la información geológica del área, con ayuda de los valores de resistividades tabulados según Sowers G.B y Sowers G. F. (1975). En ese sentido, se generó la tabla 9 la cual muestra las resistividades cuyos intervalos constituyen los valores del subsuelo del área de estudio.

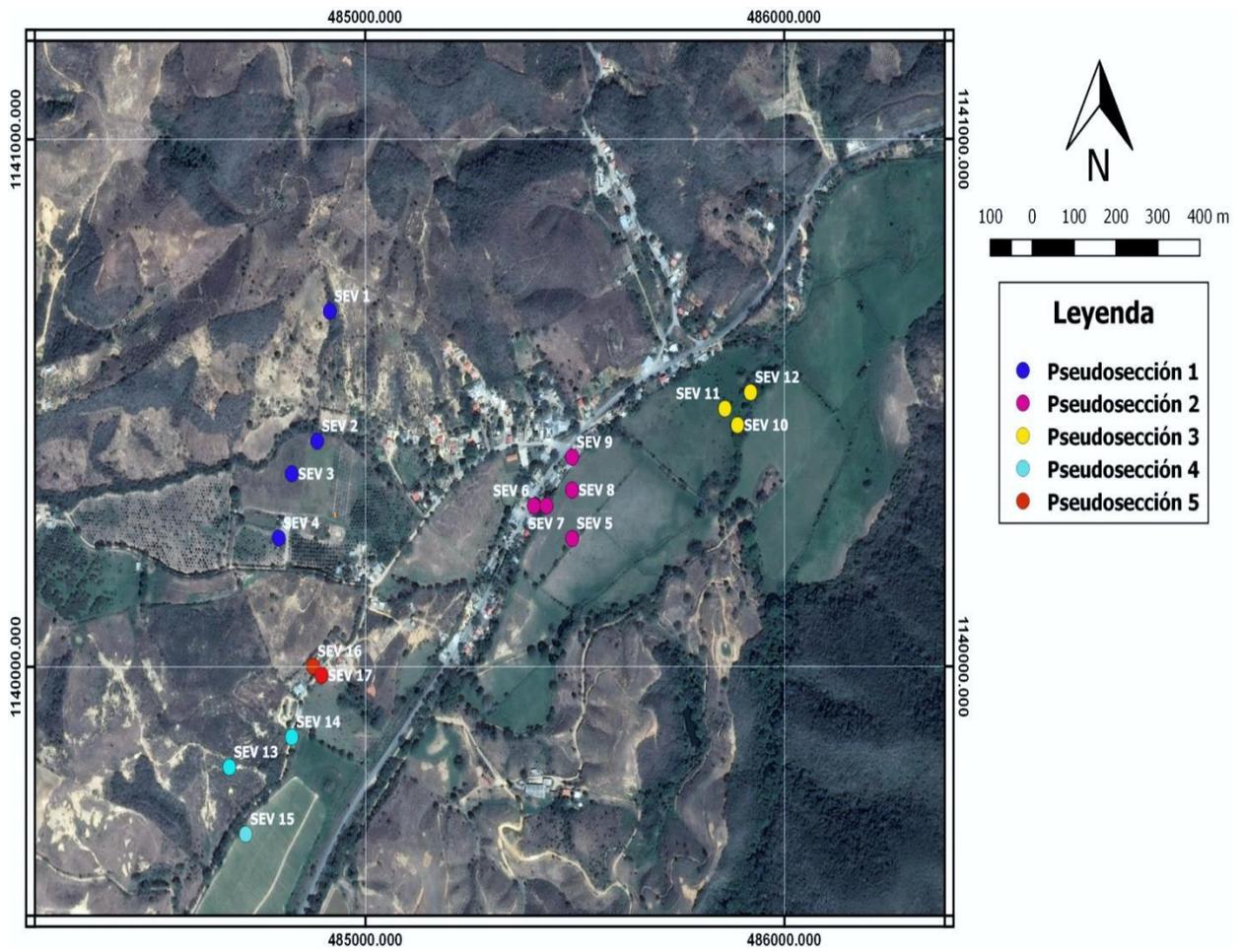
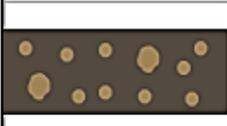
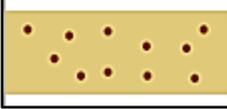


Figura 48. Ubicación de los SEV, sector Licua, municipio Crespo, Estado Lara.

Tabla 9. *Tabla de Resistividades.*

TRAMAS	LITOLÓGÍA	RANGO DE RESISTIVIDADES (Ohm/m)
	Arcillas	0 – 30
	Limos saturados	30 – 100
	Arenas con probabilidades de acumulación de agua	100 – 250

IV.9.1.-Sondeos Eléctricos Verticales 1-4

En la tabla 10 se presentan los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales 01, 02, 03 y 04 aplicados en el sector de Licua, así como la ubicación geográfica de cada uno de ellos. El SEV 01 se observa en la figura 49, la profundidad alcanzada en esta medición es de aproximadamente 74.1 m, mientras que en la figura 50 se aprecia la curva teórica frente a la curva de campo para el SEV 02, el cual alcanzó una profundidad de 18,6 m. Por su parte, los SEV 03 y 04 (figura 51 y 52) lograron penetrar hasta 38,7 m y 17,2 m respectivamente.

Tabla 10. Resultados obtenidos para los SEV 1, 2, 3 y 4.

Sondeo	Coordenadas	Capa n°	Resistividad	Espesor (m)	Profundidad (m)
			ρ (Ohm/m)		
SEV 1	484915 E	1	63	1,5	1,5
		2	265	2,14	3,64
	1140674 N	3	3,02	3,68	7,32
		4	14,9	66,8	74,1
		5	182	-	-
SEV 2	484885 E	1	13,3	1,5	1,5
		2	133	1,35	2,85
	1140428 N	3	3,78	4,51	7,36
		4	167	11,3	18,6
		5	15,2	-	-
SEV 3	484824 E	1	29,2	3,87	3,87
		2	9,18	3,2	7,07
	1140366 N	3	143	9,85	16,9
		4	5,8	21,8	38,7
		5	802	-	-
SEV 4	484793 E	1	10,4	1,5	1,5
		2	85,1	1,33	2,38
	1140244 N	3	6,23	417	7
		4	209	10,2	17,2
		5	3,09	-	-

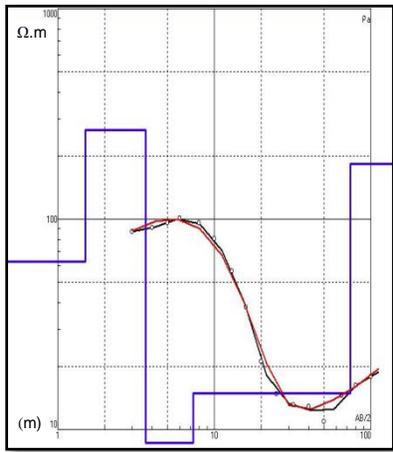


Figura 49. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 1

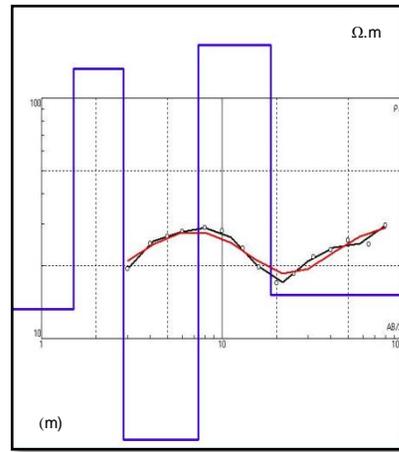


Figura 50. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 2

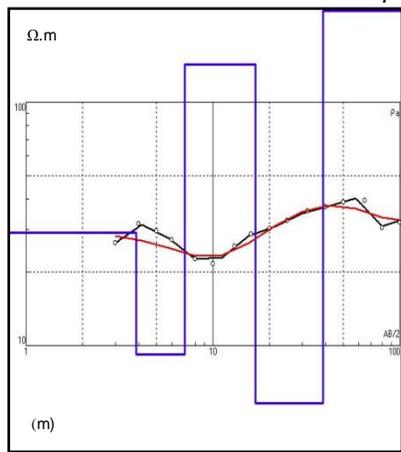


Figura 50. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 3

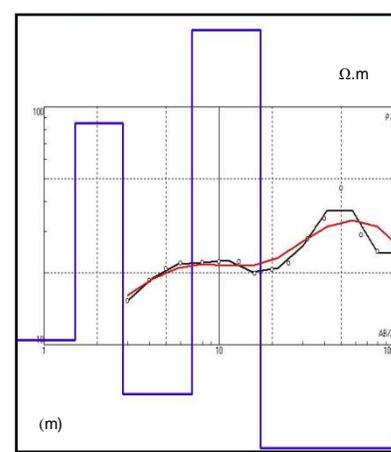


Figura 51. Curva Teórica frente Curva de Campo SEV 4

Tabla 11. Unidades geoelectricas para la Pseudosección 1.

Unidad Geoelectrica	Resistividad (Ω-m)	Espesor (m)	Litología	Condiciones Acuíferas
A	10-30	1,5-3,87	Arcillas no saturadas	De Muy pocas a nulas
B	63-85	1,3-1,5	Limos saturados	Bajas
C	133-265	1,35-10,2	Arenas con grandes posibilidades de acumulación d agua	Muy buenas
D	3-9	3,2-4,51	Arcillas saturadas	Muy bajas

Mediante el perfil geoelectrico (Figura 53 y Tabla 11), se definieron 4 unidades geoelectricas presentes en el subsuelo, las cuales se interpretaron gráficamente con un perfil geológico. Dicho perfil muestra una continuidad lateral a lo largo de la primera capa constituida por arcillas no saturadas de aproximadamente 3 m de espesor y resistividades que varían entre 10 y 30 ohm-m representando a la Unidad Geoelectrica "A", la cual se encuentra presente en los SEV 2, SEV 3 y SEV 4.

En los sondeos SEV 1 y SEV 4 se observa una capa de limos saturados, correspondiente a la Unidad Geoelectrica "B" con resistividades entre 63-85 ohm-m y espesor de 1,5 m con bajas condiciones acuíferas. La Unidad Geoelectrica "C" se observa en los cuatros SEV, presentando resistividades que van de 133 a 265 ohm-m con espesor promedio de 10 m, correspondiente a una litología de arenas con posibilidades de acumulación de aguas subterráneas, lo que hace que tenga buenas condiciones acuíferas. Ésta unidad Geoelectrica "C" se encuentra intercalada con la Unidad Geoelectrica "D", la cual está constituida por arcillas saturadas de agua, en donde ésta presenta resistividades que van de 3 a 9 ohm-m y espesor de 4 m con muy bajas condiciones acuíferas.

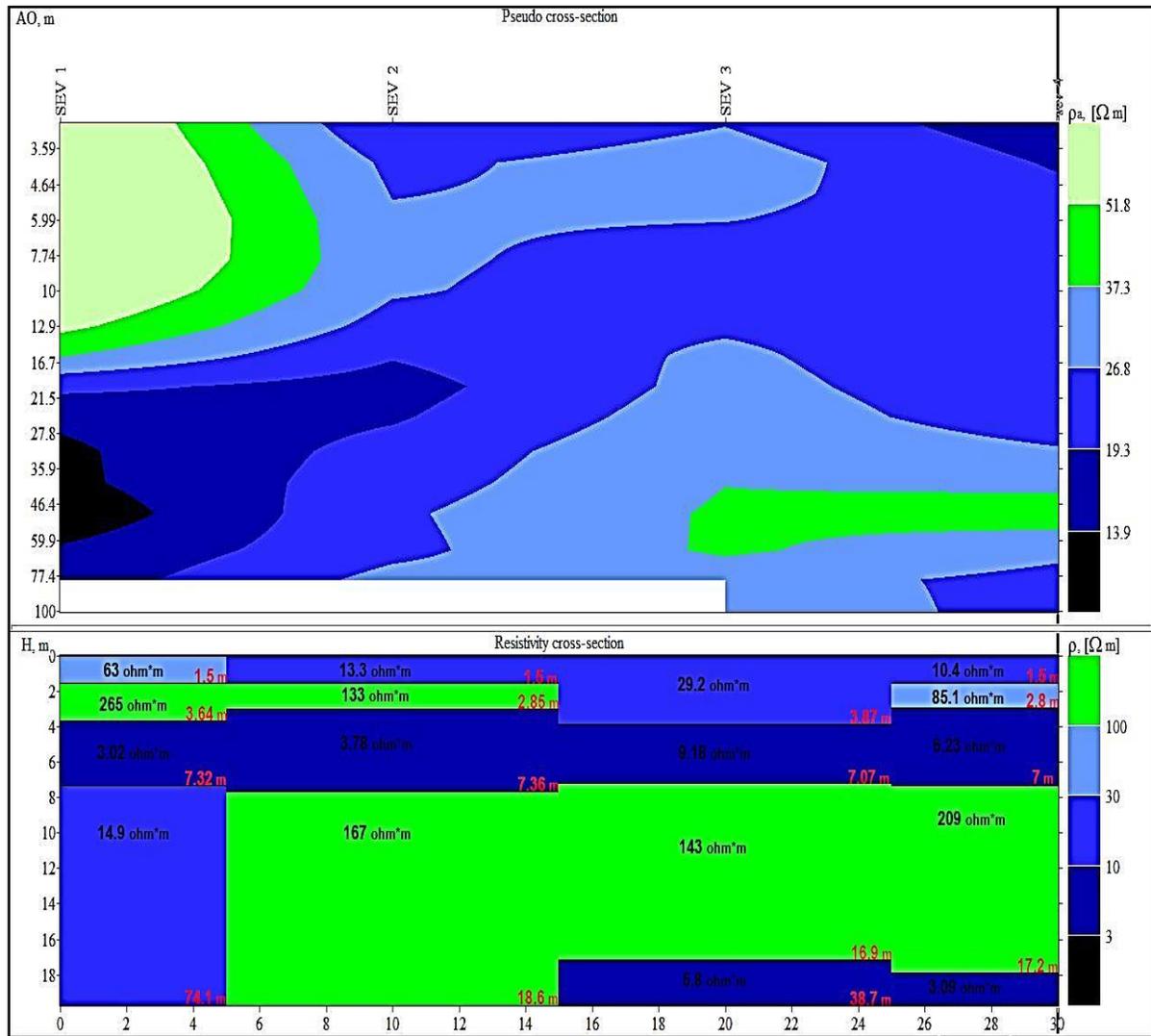


Figura 51. Pseudosección 1.

IV.9.2.-Sondeos Eléctricos Verticales 5, 6, 7, 8 y 9.

Realizados en el sector de Licua. Las curvas de campo presentan un buen ajuste al con respecto a las curvas teóricas, por lo que el error de inversión varía entre 2.91-9.1%. El corte geoelectrico está compuesto por 5 capas. En la tabla 12 se presentan los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales 5, 6, 7, 8 y 9. A su vez, las curvas teóricas

frente a las curvas de campo para cada uno de estos sondeos eléctricos verticales se pueden detallar en las figuras 54, 55, 56, 57 y 58 respectivamente.

Seguidamente, con los datos de estos sondeos eléctricos verticales ubicados en la zona norte del área de estudio, específicamente entre las coordenadas E 484909.58 y N 1140692 – E 484803.11 y N 1140235.74, se realizó la pseudosección respectiva la cual tiene una orientación N-S.

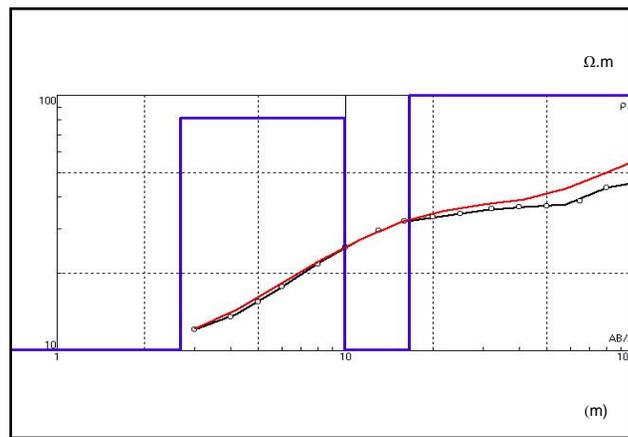


Figura 52. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 5.

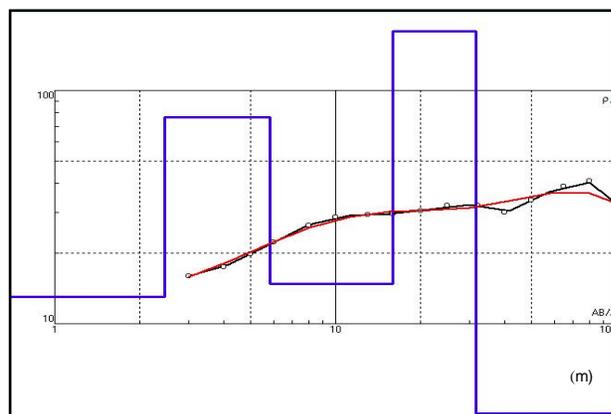


Figura 53. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 6

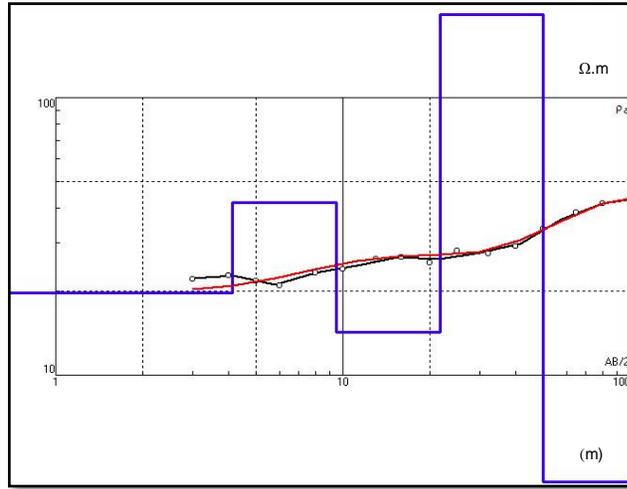


Figura 54. Curva Teórica vs. Curva de Campo SEV 7.

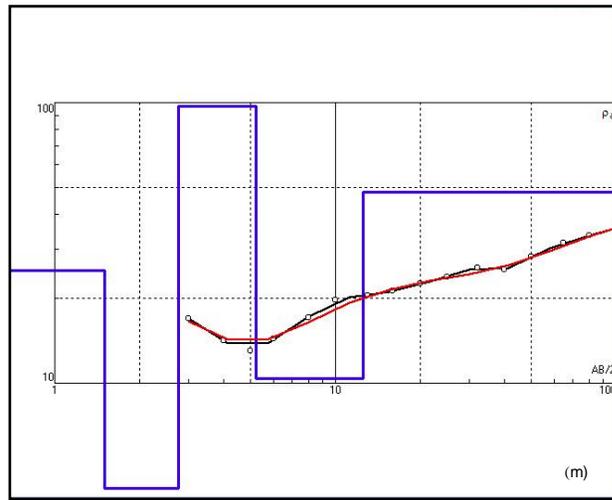


Figura 55. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 8.

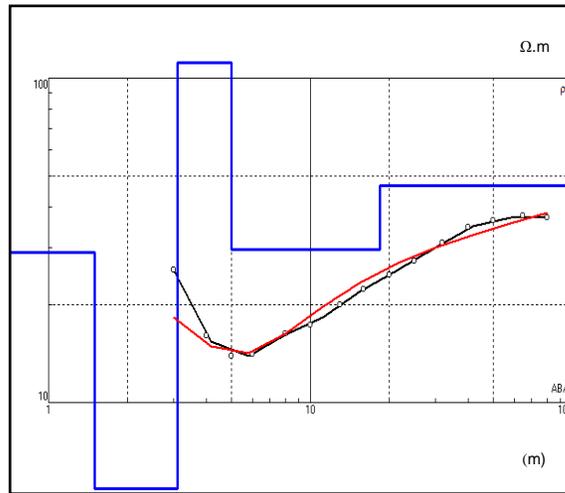


Figura 56. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 9

El perfil geoelectrico muestra cuatro unidades geoelectricas, (Figura 59 y Tabla N° 13); a saber: la Unidad Geoelectrica "A" presenta una capa de arcillas no saturadas, con resistividades entre 10 y 30 ohm-m y abarca un espesor promedio de 3 m a lo largo de todo el perfil, capa que se ve interrumpida en los SEV 8 y SEV 9 por la Unidad Geoelectrica "D", donde se observa la presencia de un pequeño espesor de aproximadamente 1,5 m, resistividades de 4 ohm-m y una litología de arcillas saturadas con muy bajas condiciones acuíferas.

Por debajo de la Unidad Geoelectrica "A" en los sondeos SEV 5, SEV 6 y SEV 7 se encuentra la Unidad Geoelectrica "B" con resistividades que van de 40 a 82 ohm-m y espesor promedio de 6 m, correspondiendo a limos saturados con bajas condiciones acuíferas; la Unidad Geoelectrica "C" se encuentra intercalada entre las unidades "A" y "D", presentando resistividades de 95 a 200 ohm-m y espesores mayores a los 2 m, correspondiendo a una litología de arenas siendo esta la unidad geoelectrica con mayor potencialidad de acumulación de aguas subterráneas.

Tabla 12. Resultados obtenidos para los SEV 5, 6, 7, 8 y 9

Sondeo	Coordenadas	Capa nº	Resistividad	Espesor (m)	Profundidad (m)
			ρ (Ohm/m)		
SEV 05	485493 E	1	10,1	2,68	2,68
		2	81,5	7,27	9,95
	1140243 N	3	10,1	6,71	16,7
		4	100	-	-
		5	-	-	-
SEV 06	485402 E	1	13,1	2,47	2,47
		2	76,8	3,38	5,85
	1140305 N	3	14,8	10,1	15,9
		4	179	15,6	31,6
		5	0,324	-	-
SEV 07	485432 E	1	19,8	4,13	4,13
		2	41,9	5,35	9,49
	1140335 N	3	14,3	12,3	21,8
		4	199	28,2	50
		5	1,53	-	-
SEV 08	485493 E	1	25,1	1,5	1,5
		2	4,23	1,25	2,75
	1140335 N	3	96,9	2,48	5,26
		4	10,4	7,32	12,6
		5	47,9	-	-
SEV 09	485493 E	1	29,1	1,5	1,5
		2	4,75	1,6	3,1
	1140397 N	3	111	1,89	4,99
		4	29,7	13,4	18,39
		5	46,6	-	-

Tabla 13. Unidades geoelectricas de la pseudosección 2.

Unidad Geoelectrica	Resistividad (Ω -m)	Espesor (m)	Litología	Condiciones Acuíferas
A	10-30	1,5-4,13	Arcillas no saturadas	De muy Bajas a nulas
B	40-82	3,38-7,27	Limos saturados	Bajas
C	95-200	2-3,48	Arenas con grandes posibilidades de acumulación de agua	Muy buenas
D	3-9	1,25-1,6	Arcillas saturadas	Muy bajas

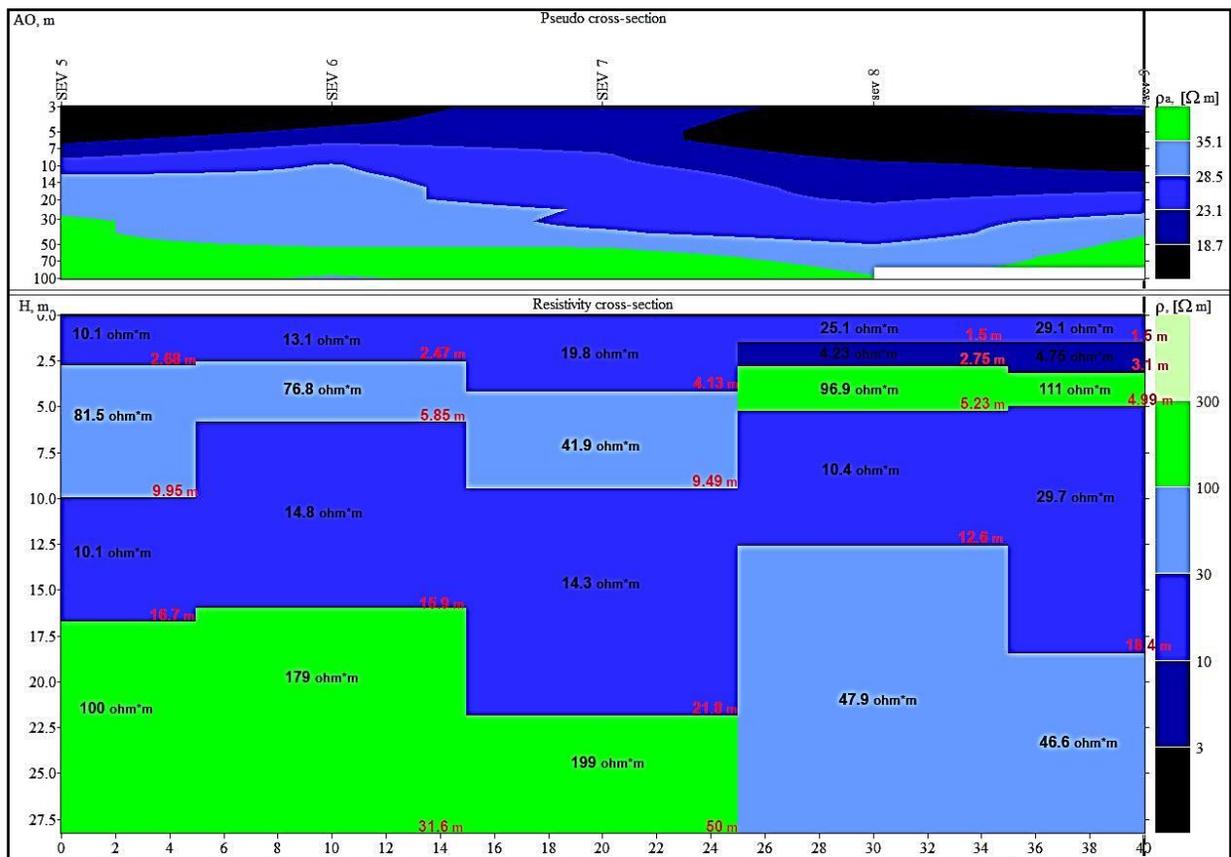


Figura 57. Pseudosección 2.

IV.9.3.-Sondeos Eléctricos Verticales 10, 11 y 12.

Estos sondeos se realizaron en el sector de Licua. Las curvas de campo presentan buen ajuste con la curva teórica, por lo que el error de inversión oscila entre 3,1-6,8%. Las curvas de estos sondeos se aprecian en las figuras 60, 61 y 62. El corte geoelectrico de todos los sondeos está compuesto por 5 capas. La profundidad alcanzada en estas mediciones varía entre 15,8- 32,9 m. En la tabla 14 se presentan los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales 10, 11 y 12 aplicados, así como la ubicación geográfica de cada uno de ellos.

De acuerdo con los datos de los sondeos eléctricos verticales 10,11 y 12, se realizó una pseudosección la cual tiene una orientación NE-SW. Este tendido se ubicó en la zona noreste del área de estudio, específicamente entre las coordenadas E 484909.58 y N 1140692 – E 484803.11 y 1140235.74.

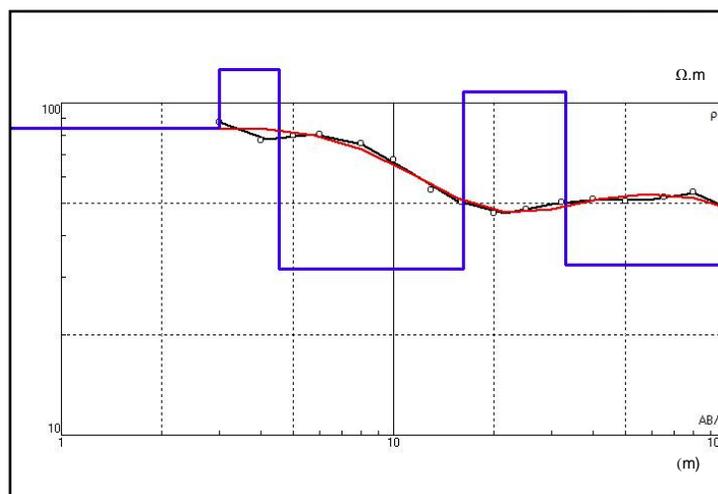


Figura 58. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 10.

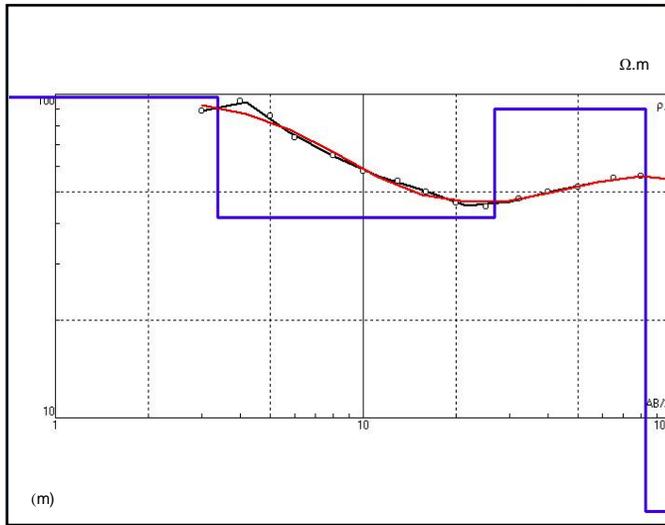


Figura 59. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 11

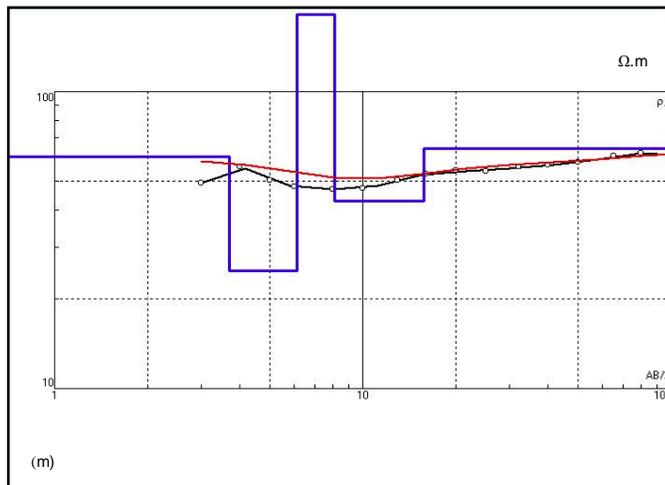


Figura 60. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 12

Tabla 14. Resultados obtenidos para los SEV 10, 11 y 12.

Sondeo	Coordenadas	Capa nº	Resistividad	Espesor (m)	Profundidad (m)
			ρ (Ohm/m)		
SEV 10	485888 E	1	84	2,98	2,98
		2	126	1,54	4,52
	1140458 N	3	37,7	11,7	16,3
		4	108	16,7	32,9
		5	32,6	-	-
SEV 11	485858 E	1	97,8	3,36	3,36
		2	41,6	23,3	26,6
	1140489 N	3	89,8	56,3	82,9
		4	5,12	-	-
SEV 12	485919 E	1	60,2	3,7	3,7
		2	24,8	2,4	6,1
	1140520 N	3	182	2	8,1
		4	42,6	7,65	15,8
		5	64,3	-	-

A través del perfil geoelectrico mostrados en la (Figura 63 y Tabla N° 15), se definieron 3 unidades geoelectricas. Dicho perfil muestra una continuidad lateral a lo largo de la primera capa representando a la Unidad Geoelectrica "B", constituida por limos saturados de aproximadamente 3 m de espesor y resistividades que oscilan entre 60 y 100 ohm-m.

La unidad anterior se observa en los SEV 10, SEV 11 y SEV 12 con condiciones acuíferas bajas. Luego, en los sondeos SEV 10 y SEV 12 se observa la Unidad Geoelectrica "C" la cual presenta resistividades que van de 108 a 182 ohm-m con espesores mayores a los 2 m y posee una litología de arenas con posibilidades de acumulación de aguas subterráneas, lo que hace que tenga buenas condiciones acuíferas. Intercalada con la Unidad Geoelectrica "C", se encuentra la Unidad Geoelectrica "D", la cual presenta condiciones acuíferas de muy bajas a nulas.

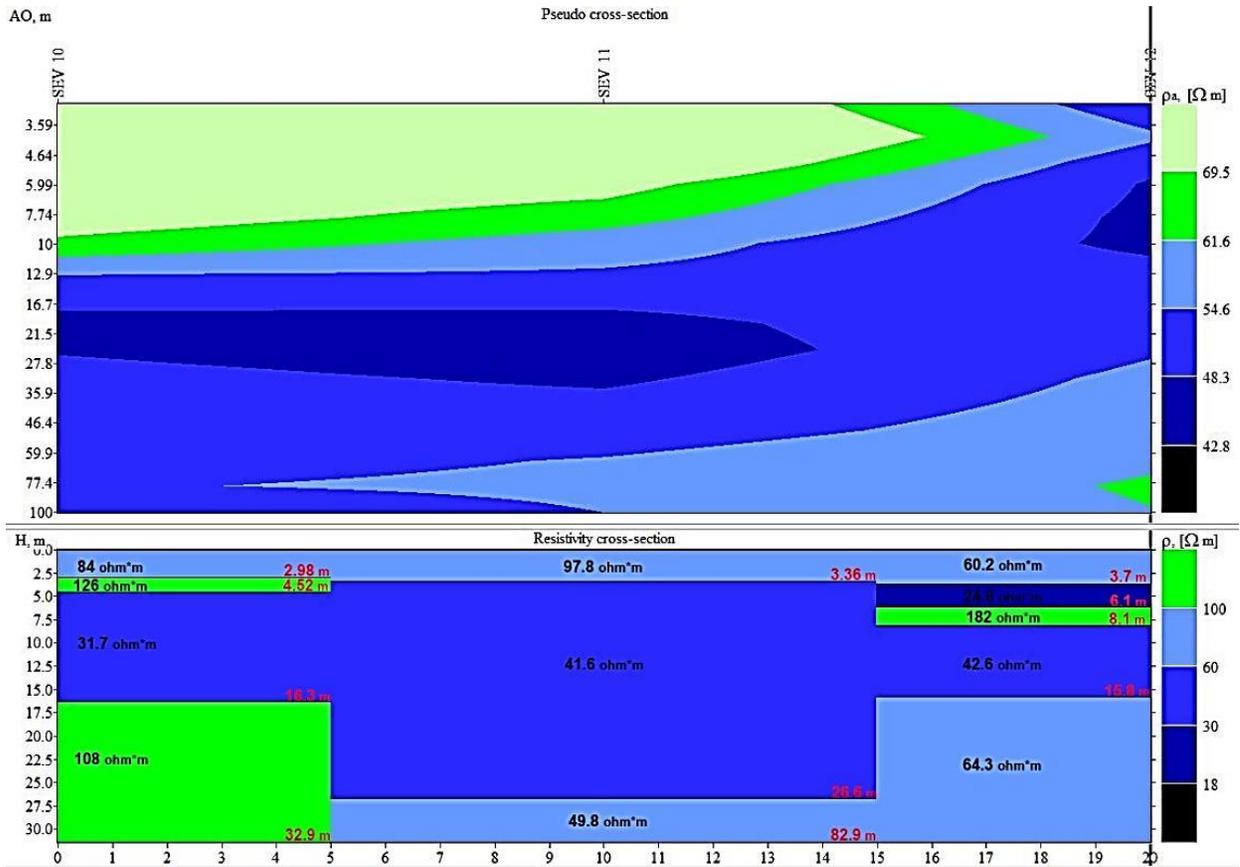


Figura 61. Pseudosección 3.

Tabla 15. Unidades geoelectricas de la pseudosección 3²⁺.

Unidad Geoelectrica	Resistividad (Ω-m)	Espesor (m)	Litología	Condiciones Acuiferas
B	60-100	2.96-3.7	Limos saturados	Bajas
C	108-182	2-12	Arenas con posibilidades de acumulación de agua	Muy buenas
D	30-43	8-23	Arcillas saturadas	De muy bajas a nulas

IV.9.4.-Sondeos Eléctricos Verticales 13, 14 y 15.

En la tabla 16 se presentan los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales 13, 14 y 15 aplicados en el sector de Licua, así como la ubicación geográfica de cada uno de ellos. El SEV 13 se observa en la figura 64, la profundidad alcanzada en esta medición es de aproximadamente 6 m; mientras que en la figura 65, se aprecia la curva teórica en función de la curva de campo para el SEV 14, donde se alcanzó una profundidad de 11,8 m. Por su parte, el SEV 15 (figura 66) alcanzó una profundidad hasta 40 m.

Tabla 16. Resultados obtenidos para los SEV 13, 14 y 15.

Sondeo	Coordenadas	Capa nº	Resistividad	Espesor (m)	Profundidad (m)
			ρ (Ohm/m)		
SEV 13	484675 E	1	17,5	1,31	1,31
		2	141	2,31	3,62
	1139810 N	3	5,95	1,86	6
		4	35,4	-	-
		5	-	-	-
SEV 14	484824 E	1	13,6	1,5	1,5
		2	111	2,12	3,62
	1139867 N	3	4,54	5,75	9,37
		4	32,6	2,39	11,8
			875	-	-
SEV 15	484714 E	1	10,2	1,71	1,71
		2	109	1	2,11
	1139683 N	3	30,3	37,29	40
		4	135	-	-
		5	-	-	-

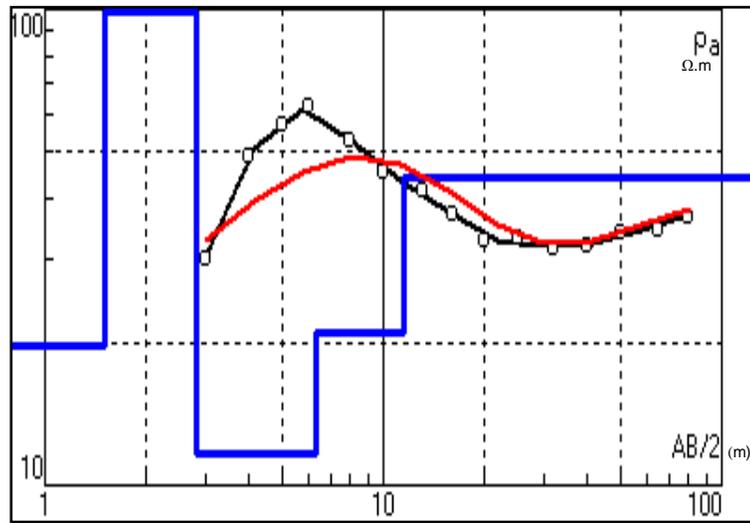


Figura 62. Curva Teórica frente a Curva de Campo SEV 13

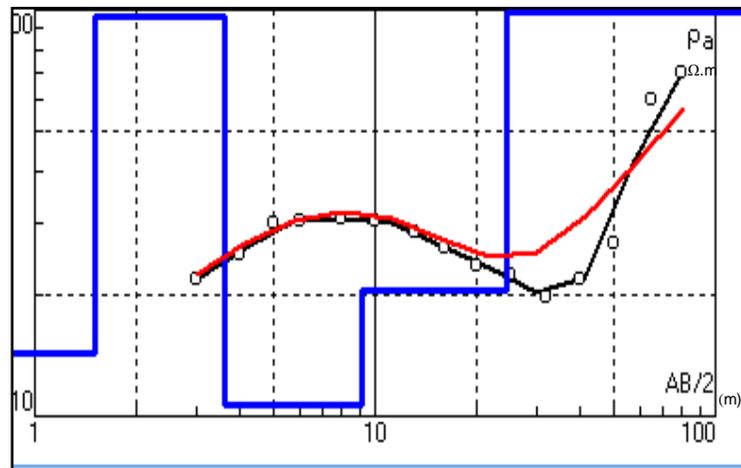


Figura 63. Curva Teórica en función de la Curva de Campo SEV 14

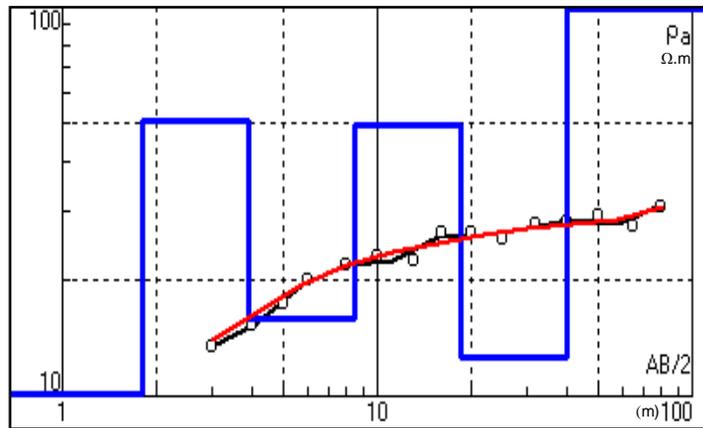


Figura 64. Curva Teórica frente a Curva de Campo SEV 15

La pseudosección mostrada en la figura 67 y Tabla N° 17, define cuatro unidades geoelectricas, la Unidad Geoelectrica “A” representa a una capa de arcillas no saturadas, con resistividades entre 13 y 25 ohm-m y abarca un espesor de 1,5 m, se observa en los sondeos SEV 13 y SEV 14 con condiciones acuíferas de muy bajas a nulas.

Seguidamente, por debajo de ésta unidad se encuentra la Unidad Geoelectrica “C” la cual se observa dos veces en toda la sección, intercalada con otras unidades, presenta resistividades que van de 100 a 285 ohm-m y espesor promedio de 5 m. Esta representa una capa de arenas saturadas con muy buenas condiciones acuíferas.

Justo debajo de la Unidad Geoelectrica “C” se encuentra la Unidad Geoelectrica “D”, que muestra resistividades que van de 4 a 6 ohm-m y espesor promedio de 8 m, correspondiendo a una litología de arcillas saturadas con muy bajas condiciones acuíferas. Por último, se observa la Unidad Geoelectrica “B” que se ve interrumpida por otras unidades, esta tiene resistividades de 30 a 40 ohm-m y espesor mayor a los 2 m, representando una litología de limos saturados con bajas condiciones acuíferas.

Tabla 17. Unidades geoelectricas de la pseudosección 4.

Unidad Geoelectrica	Resistividad ($\Omega\cdot m$)	Espesor (m)	Litología	Condiciones Acuíferas
A	13-25	1,5	Arcillas no saturadas	De muy bajas a nulas
B	30-40	2	Limos saturados	Bajas
C	100-285	1,5-8	Arenas saturadas	Muy buenas
D	4-6	8-9	Arcillas Saturadas	Muy bajas

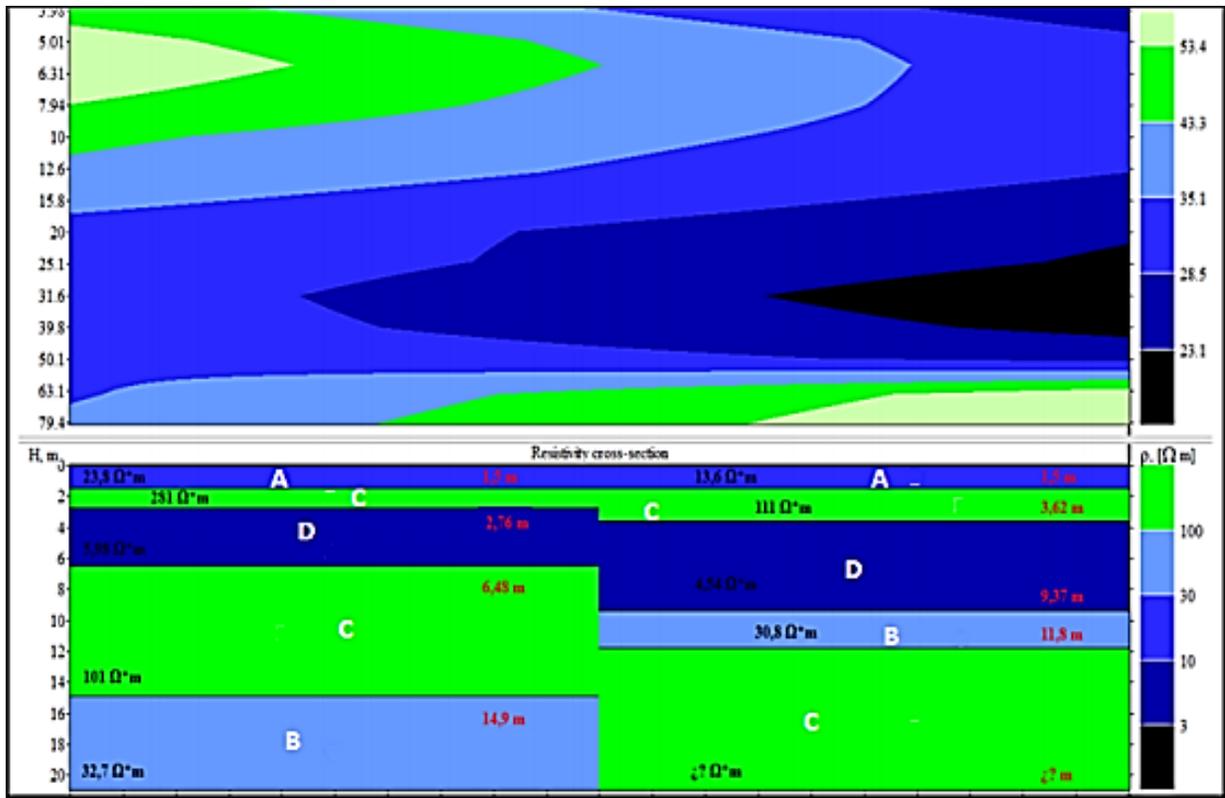


Figura 65. Pseudosección 4

IV.9.5.-Sondeos Eléctricos Verticales 16 y 17

Estos sondeos se realizaron en el sector sur-oeste de Licua. El corte geoelectrico de todos los sondeos está compuesto por 4 capas, la profundidad alcanzada en estas mediciones varía entre 16,4- 16,7 m. En la tabla 18 se presentan los resultados obtenidos de los sondeos eléctricos verticales, así como la ubicación geográfica de cada uno de ellos. Las curvas de estos sondeos se aprecian en las figuras 68 y 69.

El corte geoelectrico se realizó con los datos de los sondeos eléctricos verticales respectivos, específicamente entre las coordenadas E 484909.58 y N 1140692 – E 484803.11 y 1140235.74. La pseudosección tiene una orientación NW-SE.

Tabla 18. Resultados obtenidos para los SEV 16 y 17.

Sondeo	Coordenadas	Capa nº	Resistividad	Espesor (m)	Profundidad (m)
			ρ (Ohm/m)		
SEV 16	484875 E	1	193	1,51	1,5
		2	7,76	0,755	2,26
	1140001 N	3	22,2	14,5	16,7
		4	65,6	-	-
		5	-	-	-
SEV 17	484895 E	1	91,5	1,34	1,34
		2	22,6	11,7	13,1
	1139984 N	3	806	3,36	16,4
		4	31,4	2,39	-
		5	-	-	-

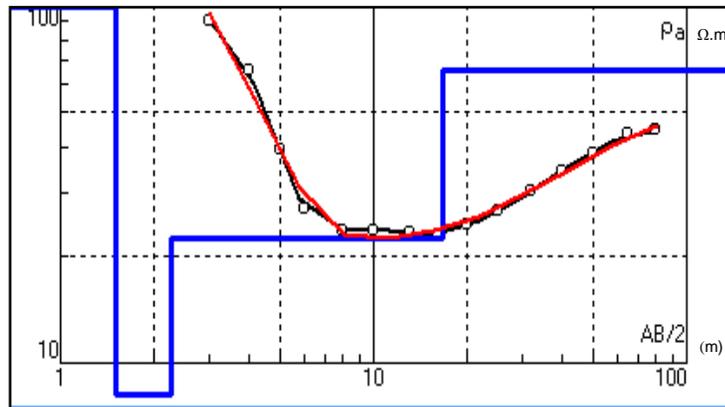


Figura 66. Curva Teórica frente a la Curva de Campo SEV 16V

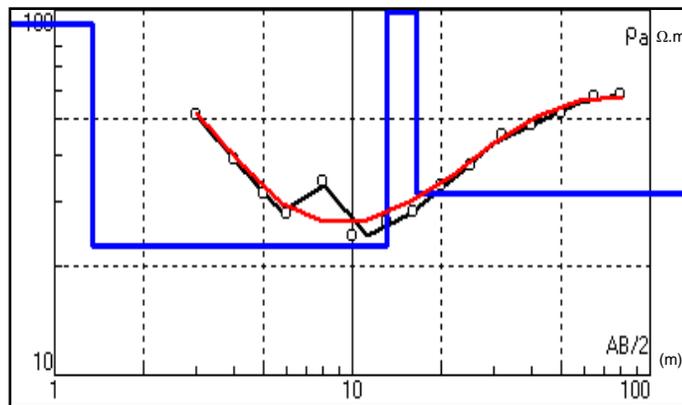


Figura 67. Curva Teórica en función de la Curva de Campo SEV 17.

El perfil geoelectrico, presentado en la (Figura 70 y Tabla 19), permitió definir 3 unidades geoelectricas. Este perfil muestra una continuidad lateral a lo largo de la primera capa representando a la Unidad Geoelectrica "C", constituida por arenas saturadas de aproximadamente 1,5 m de espesor. Sin embargo, ésta misma unidad se vuelve a encontrar a los 12,3 m de profundidad con espesor de 83 m y resistividades que oscilan entre 100 y 200 ohm-m.

Luego, en el sondeo SEV 16 se observa un pequeño espesor de la Unidad Geoeléctrica “D” la cual presenta resistividades que van de 7 a 10 ohm-m con espesores promedio de 1,5 m, correspondiente a una litología de arcillas saturadas con condiciones acuíferas muy bajas. La Unidad Geoeléctrica “B” se encuentra intercalada entre las unidades “D” y “C”, presentando resistividades de 30 a 31 ohm-m y espesores que llegan hasta los 80 m, correspondiendo a una litología de limos saturados con condiciones acuíferas bajas.

Tabla 19. Unidades geoeléctricas de la pseudosección 5

Unidad Geoeléctrica	Resistividad (Ω-m)	Espesor (m)	Litología	Condiciones Acuíferas
B	30-31	11-80	Limos saturados	Bajas
C	100-200	1-83	Arenas saturadas con posibilidades de acumulación de aguas subterráneas.	Muy buenas
D	7-10	1-2	Arcillas Saturadas	Muy bajas

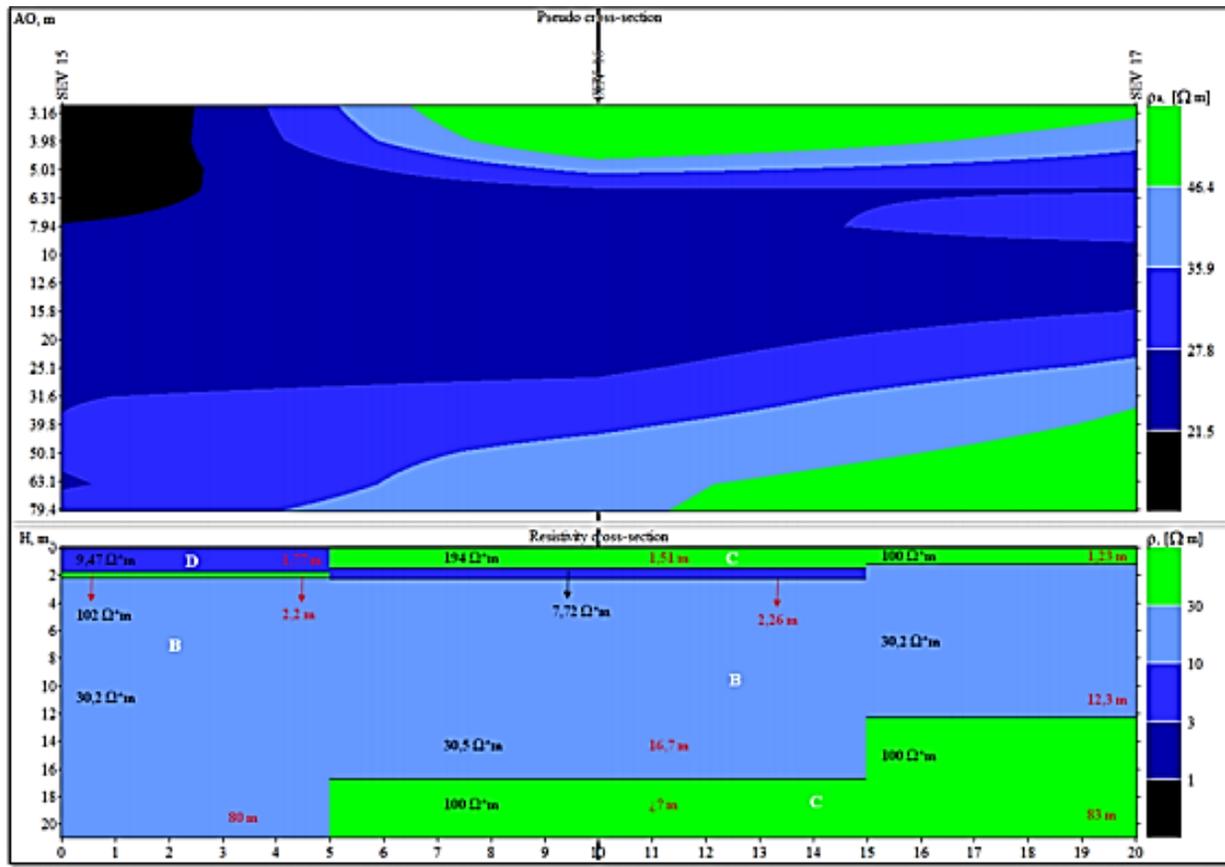


Figura 68. Pseudosección 5

Se puede indicar que las unidades litológicas identificadas tienen una alta correlación puesto que en las zonas donde se encuentran las aguas con valores bajos y medios de conductividad, son las cercanas a los sondeos eléctricos verticales que arrojan valores de resistividad altos. La mayoría de estas aguas son de tipo bicarbonatadas cálcicas, esto conlleva a señalar que existe correspondencia con respecto a la fuente de estos iones en dichas aguas; es decir, al existir por ejemplo las areniscas calcáreas en la zona, al estar en contacto con el agua, permite la lixiviación y transporte en solución de los iones hasta las aguas subterráneas de la zona.

Las características litológicas imperantes de las rocas de la zona de estudio son en su mayoría intercalaciones de limos, arcillas y areniscas; estas últimas, son las que mayor potencial y mejores condiciones acuíferas presentan desde el punto de vista hidrogeológico, pueden presentar para el almacenamiento y aprovechamiento del agua subterránea ya que están estrechamente relacionados con el cauce fluvial que los origina. Asimismo, las presencias de arcillas justifican el proceso de intercambio iónico propuesto en este estudio, como uno de los mecanismos controladoras de la composición química de las aguas subterráneas del sector Licua, así como el proceso de hidrólisis de aluminosilicatos y de los silicatos presentes tanto en este grupo de minerales como en los limos y areniscas.

V.CONCLUSIONES

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

- Se identificaron 3 tipos de aguas a saber: aguas $\text{Ca}^{2+}\text{-HCO}_3^-$ (55,5%), aguas $\text{Ca}^{2+}\text{-SO}_4^{2-}$ (33,3%) y aguas $\text{Ca}^{2+}\text{-Cl}^-$ (11,1%).
- Los valores de SDT determinados permiten señalar que todas las muestras estudiadas pueden ser clasificadas como dulces.
- El proceso que controla la composición química de las aguas de la localidad es principalmente el de interacción agua-roca, manifestando a través de la disolución de minerales carbonatados, así como la hidrólisis de silicatos y aluminosilicatos. Igualmente, el proceso de intercambio catiónico parece estar operando en las aguas estudiadas.
- Se ha logrado determinar una zona con claras evidencias de una contaminación antrópica por sustancias químicas, especialmente sulfatos. Esta zona corresponde al sector donde se ubican las muestras MASP-01, MASP-02 y MASP-06. Las aguas asociadas a estos pozos son del tipo sulfatadas cálcicas, a diferencia del resto de los pozos estudiados en el acuífero que son del tipo bicarbonatadas cálcicas.
- El 44,4 % de las muestras de agua no pueden estar disponible para el uso doméstico según lo establecido por la normativa para la clasificación y control de

la calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos del Decreto 883 (Gaceta Oficial N° 5.021, 1995).

- Los cinco cortes geológicos, generados a partir de las curvas de resistividades permiten definir tres unidades litológicas dominantes en la zona, correspondientes a intercalaciones de limos, arcillas y areniscas con espesores variables.
- A partir de la prospección geofísica se pudo definir las litologías correspondientes a las unidades geoelectricas. La unidad A, corresponde a arcillas no saturadas; la unidad B a los limos saturados, la unidad C, a arenas saturadas con posibilidades de acumulación de aguas subterráneas y la unidad D, correspondiente a arcillas saturadas. De forma general todas las unidades geoelectricas son consideradas de buen potencial y con grandes condiciones acuíferas desde el punto de vista hidrogeológico para ser explotadas.

VI.RECOMENDACIONES

Con la finalidad de ampliar el estudio de la calidad de aguas de esta zona, se proponen las siguientes recomendaciones:

- Planificar y realizar campañas de muestreo, con el propósito de estudiar la variabilidad en el tiempo, tanto de los parámetros fisicoquímicos, como las concentraciones de las especies químicas en las aguas subterráneas de la zona de estudio.
- Realizar un estudio orientado hacia la contaminación ambiental que ocurre en estas aguas subterráneas, mediante una evaluación bacteriológica con el propósito de identificar de manera exhaustiva, las fuentes de contaminación en la zona.
- Realizar la determinación de elementos traza Hg, Li, B, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, Sr y Ba que puedan estar presentes en las aguas subterráneas de esta región con la finalidad de sustentar y facilitar las interpretaciones en cuanto a la hidrogeoquímica de estas aguas se refiere.
- Realizar un estudio isotópico de D, ^{18}O y ^{15}N con el propósito de establecer el origen de las aguas subterráneas y así de esta manera identificar zonas de recarga, origen y procesos de contaminación.
- Considerar el estudio de parámetros microbiológicos como coliformes totales, coliformes fecales, entre otros, con la finalidad de mejorar la caracterización de la calidad de las aguas y verificar si realmente las muestras MASP-01, MASP-03, MASP-04, MASP-05, MASP-07 están disponibles para uso doméstico.

VII.REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Tarbuck, E. J. y Lutgens, F. K., (1999). Ciencias de la Tierra: Una Introducción a la Geología Física. Prentice Hall. Madrid, 616 p.
- [2] Gil, J. (2011). Recursos Hidrogeológicos. Disponible: <http://ciberia.ya.com> [Consulta: 2015, Agosto].
- [3] Davis, S. N. y De Wiest, R. J. M. (1971). Hidrogeología. Ediciones Ariel. Barcelona, España. 563p.
- [4] Vivot E., Rugna C., Gioco A., Sánchez C., Ormaechea M., Sequin C., (2010). Calidad del agua subterránea para usos agropecuarios en el departamento Villaguay, Entre Ríos. Asociación de Universidades Grupo Montevideo. Disponible: <http://revistas.unlp.edu.ar>. [Consulta: 2015, Agosto].
- [5] Pérez Carrera A., Moscuzza C.H., Fernández A., (2008). Efectos socioeconómicos y ambientales de la expansión agropecuaria. Estudio de caso: Santiago del Estero, Argentina.515p.
- [6] López G., Juan., Fornés A., Juan M., Ramos G. Gerardo y Villarroja G. Fermín. (2009). Las aguas subterráneas: Un recurso natural del subsuelo. 4º Edición. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 100p.
- [7] Aguasdecima (2013). Disponible: <https://www.aguasdecima.cl>. [Consulta: 2015, Agosto]

- [8] Montero, R. (1996). Caracterización hidrogeoquímica de las aguas subterráneas asociadas a zonas de explotación de hidrocarburos. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. 172 p.
- [9] Drever, James I. (1997). The Geochemistry of Natural Waters: Surface and Groundwater Environments. 3rd Edition. Prentice Hall. New Jersey, USA. 437p.
- [10] Fagundo, J. y González, P. (2005). Hidrogeoquímica. Centro Nacional de Medicina Natural y Tradicional. La Habana, Cuba. 314p.
- [11] Tipos de Acuíferos. Disponible: <https://sites.google.com> [Consulta: 2015, Septiembre].
- [12] Custodio, E. y Llamas, M. (1976). Hidrología Subterránea. Ediciones Omega. Barcelona, España. 2359p.
- [13] Arocha, S. (2003). Abastecimiento de agua. Teoría y diseño. Ediciones Vega. Universidad Central de Venezuela. 399 p.
- [14] Stanley, D., (1971). Hidrogeología. 2da Edición. Ediciones Ariel. Barcelona, España.
- [15] Castany, G., (1971). Tratado Práctico de las Aguas Subterráneas. Ediciones Omega. Barcelo, España. p. 347-348.
- [16] González De Vallejo L. y otros (2002). Ingeniería Geológica. Pearson Prentice Hall. Madrid. 715p.

[17] Angelone, S., (2006). Geología y Geotecnia-Permeabilidad de Suelos. Universidad Nacional de Rosario. Disponible en: <http://fiselect2.fceia.unr.edu.ar> [Consulta: 2015, Octubre].

[18] White, D. (1957). Magmatic, Connate, and Metamorphic waters. Geological Soc. Am Bulletin, v.68, p 1659 – 1682.

[19] Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the characteristics of natural water. United States Geological Survey. Washington, 363p.

[20] 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. 48p.

[21] Lillo, J. (2007) Técnicas Hidrogeoquímicas. [Documento en línea]. Disponible: http://www.escet.urjc.es/~jlillo/Tecnicas_Hidrogeoquimicas.pdf. [Consulta: 2016, Enero].

[22] Faye, S., Maloszewski, P., Stichler, W., Trimborn, P., Cissé, S. y Bécaye, C. (2005). Groundwater salinization in the Saloum (Senegal) delta aquifer: minor elements and isotopic indicators. Science of the Total Environment. 343, 243-259.

[23] Donado, L. (1999). Hidrogeoquímica [Documento en línea]. Disponible: <http://www.docentes.unal.edu.co>. [Consulta: 2016, Febrero].

[24] Espinoza, C. (2005). Estudio de intrusión salina en acuíferos costeros: sector costa-quebrada Los Choros, IV región. [Documento en línea]. Disponible: <http://documentos.dga.cl/SUB4438.pdf> [Consulta: 2016, Enero].

[25] Gaceta Oficial N° 5.021 (1995). Decreto 883, Normas para la Clasificación y el Control de la Calidad de los Cuerpos de Agua y Vertidos o efluentes líquidos. República de Venezuela.

[26] Keith, D. (1973). Hidrología. Agua subterránea. Ediciones Paraninfo. Madrid, España. 371p.

[27] Porras, J., Nieto, P., Álvarez, C., Fernández, A. y Gimeno, M. (1985). Calidad y Contaminación de las aguas subterráneas en España. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. Disponible: <http://aguas.igme.es> [Consulta: 2015, Noviembre].

[28] Pineda, M. (1982) Determinación de Na, K, Ca, Mg, HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} en muestras de agua de la Cuenca del Río Tuy. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Escuela de Química, Facultad de Ciencias. Caracas, 84 p.

[29] Sánchez, F. (2004) Hidroquímica, conceptos elementales. Universidad de Salamanca. España. Disponible en: <http://web.usal.es> [Consulta: 2015, Noviembre]

[30] Gibbs R. J., (1970). Mechanisms controlling worlds water chemistry. Science 170:1088-1090.

[31] Meybeck, M. (1987) Global chemical weathering of surficial rocks estimated from river dissolved load. American Journal of Science, 287. 401-428

[32] Decarli, F. (2009). Características de las aguas subterráneas en Venezuela. Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH). Disponible: <http://www.inameh.gob.ve> [Consulta: 2015, Noviembre].

[33] Auge M., (2008). Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea. Universidad de Buenos Aires. [Documento en línea]. Disponible: <http://tierra.rediris.es> [Consulta: 2016, Abril].

[34] Arias M., (2002). Aplicaciones geofísicas a la hidrogeología en Costa Rica. Revista geológica de América Central. 27: 21-26.

[35] Orellana, E. 1982: Prospección Geoelectrica en Corriente Continua. Paraninfo, S. A., Madrid.

[36] INAMEH (2015). Estudio geoelectrico realizado en el sector Licua, Municipio crespo, estado Lara. 36p. Informe no publicado.

[37] Prasanna, M. V., Chidambaram, S., Hameed, A. S., & Srinivasamoorthy, K. (2011). Hydrogeochemical analysis and evaluation of groundwater quality in the Gadilam river basin, Tamil Nadu, India. *Journal of Earth system science*, 120(1), 85-98.

[38] Atwia, M. G., Abu-Heleika, M. M., & El-Horiny, M. M. (2013). Hydrogeochemical and vertical electrical soundings for groundwater investigations, Burg El-Arab area, Northwestern Coast of Egypt. *Journal of African Earth Sciences*, 80, 8-20.

- [39]** Kumar, S. K., Bharani, R., Magesh, N. S., Godson, P. S., & Chandrasekar, N. (2014). Hydrogeochemistry and groundwater quality appraisal of part of south Chennai coastal aquifers, Tamil Nadu, India using WQI and fuzzy logic method. *Applied Water Science*, 4(4), 341-350.
- [40]** Bouderbala, A. (2015). Assessment of groundwater quality and its suitability for agricultural uses in the Nador Plain, north of Algeria. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 445-457.
- [41]** Hosseinifard, S. J., & Aminiyan, M. M. (2015). Hydrochemical Characterization of Groundwater Quality for Drinking and Agricultural Purposes: A Case Study in Rafsanjan Plain, Iran. *Water Quality, Exposure and Health*, 7(4), 531-544.
- [42]** Venkatramanan, S., Chung, S. Y., Rajesh, R., Lee, S. Y., Ramkumar, T., & Prasanna, M. V. (2015). Comprehensive studies of hydrogeochemical processes and quality status of groundwater with tools of cluster, grouping analysis, and fuzzy set method using GIS platform: a case study of Dalcheon in Ulsan City, Korea. *Environmental Science and Pollution Research*, 22(15), 11209-11223.
- [43]** Younis, A., Soliman, M., Moussa, S., Massoud, U., El Nabi, S. A., & Attia, M. (2016). Integrated geophysical application to investigate groundwater potentiality of the shallow Nubian aquifer at northern Kharga, Western Desert, Egypt. *NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics*.
- [44]** Hernández, M. (2007). Estudio geoquímico de las aguas subterráneas al sur de Calabozo, estado Guárico, Venezuela”. Trabajo especial de grado. Universidad Central de Venezuela. Facultad de Ciencias. 119p.

[45] Urrutia, E. (2009). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas del sector Este de la sub-cuenca del Río Zuata del área Junin de la Faja Petrolífera del Orinoco. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Facultad de Ciencias. Caracas, 132 p.

[46] Biondo I., Esteves, N. (2010). Evaluación Hidrogeológica de la Laguna de Taiguaiguay, Municipio Zamora, Estado Aragua. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela. 139 p

[47] Montero, R. L. M., Faublack, A. M., & Gutiérrez, J. V. (2011). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas entre los sectores Barbacoas, Estado Aragua y Cachamas, Estado Guárico, Venezuela. Facultad de Ciencias, Universidad Central de Venezuela.

[48] Granadinos, M. (2012). Evaluación hidrogeológica-geofísica de las Formaciones Mesa y Las Piedras aflorantes en santa clara, Estado Anzoátegui. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela. 139 p

[49] Kutos, O. (2012). Estudio hidrogeoquímico de las aguas subterráneas de la cuenca de la Laguna de Taigüaigüay, estado Aragua. Trabajo Especial de Grado. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela, 106p.

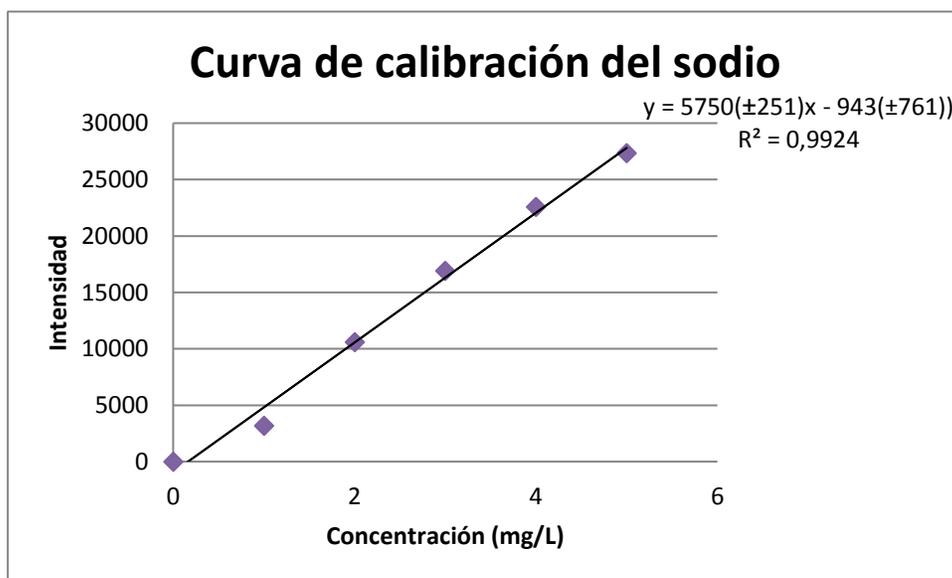
[50] Ughi A. (2014) Estudio hidrogeofísico para caracterizar los acuíferos de la cuenca baja del Río Güey al norte del Lago de Valencia, Venezuela. Volumen Especial Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra, 46(1):58-67.

- [51]** Código Estratigráfico de las Cuencas Petrolíferas de Venezuela (CECPV) (2011). PDVSA. Disponible: www.pdv.com/lexico [Consulta: 2015, Noviembre].
- [52]** American Public Health Association (APHA) (1995). Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington DC, 19th edition. pp. 932-938.
- [53]** Yanes, C. 1997. Estudio geoquímico regional de los ríos del Escudo de Guayana. Universidad Central de Venezuela, Trabajo Doctoral, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias de la Tierra, Facultad de Ingeniería, Escuela de Geología y Minas.
- [54]** Rajmohan, E. y Elango, N. (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.
- [55]** Ayala, L. (2006). Procesos, factores y calidad química de las aguas subterráneas de la región de Santa Ana, Península de Paraguaná, estado Falcón. Universidad Central de Venezuela, Trabajo Especial de Grado, Facultad de Ciencias, Escuela de Química, 142p.

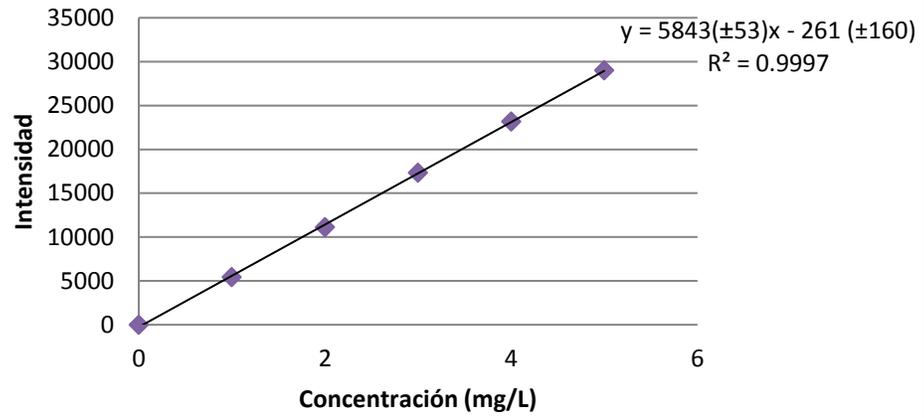
APÉNDICE A

Curvas de Calibración para los cationes y sílice disuelta.

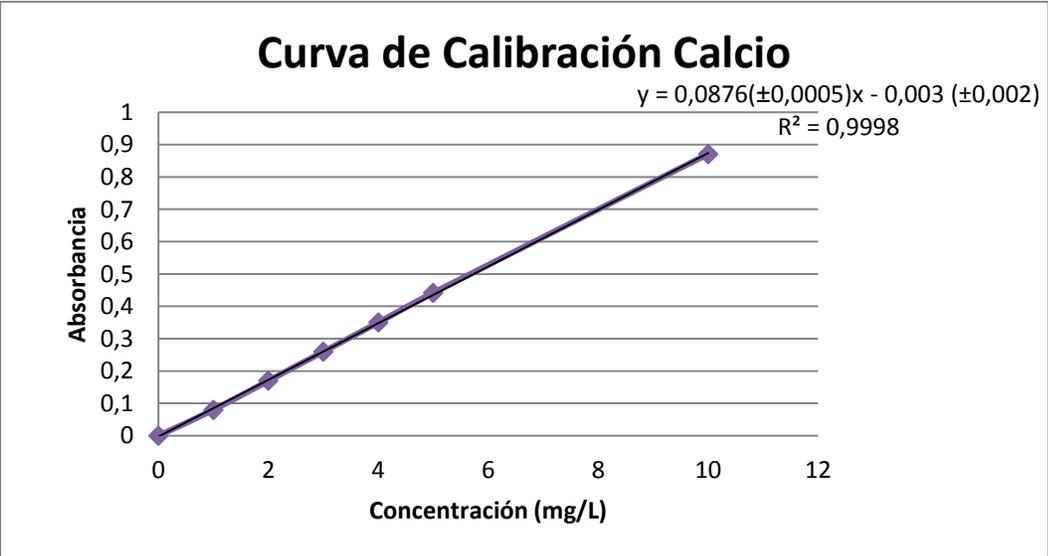
Na ⁺	
ppm	Intensidad
1	3169
2	10594
3	16905
4	22580
5	27339



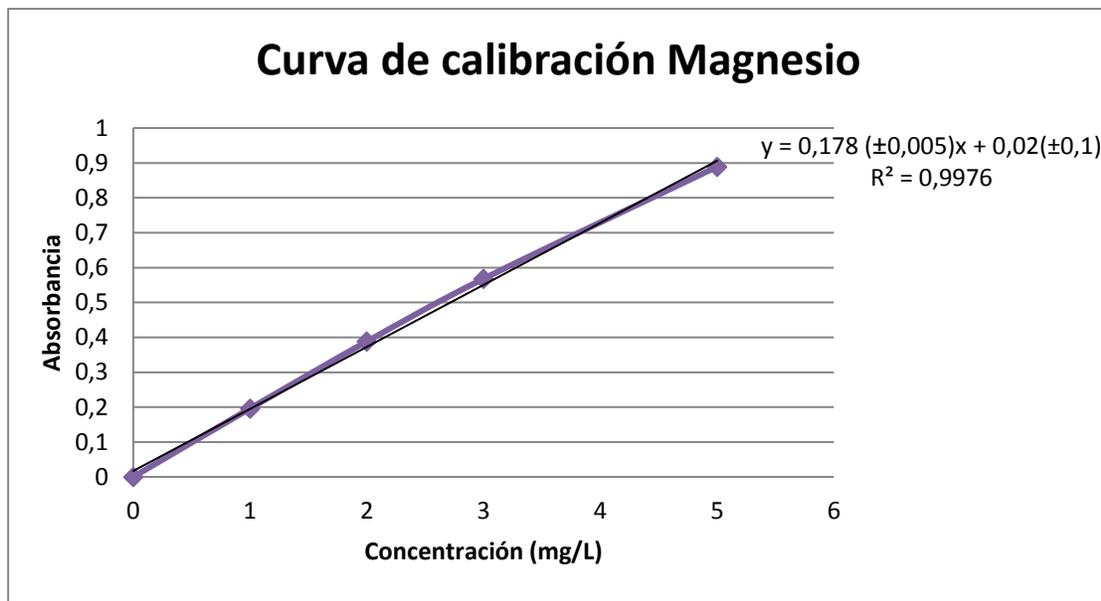
Curva de Calibración para potasio



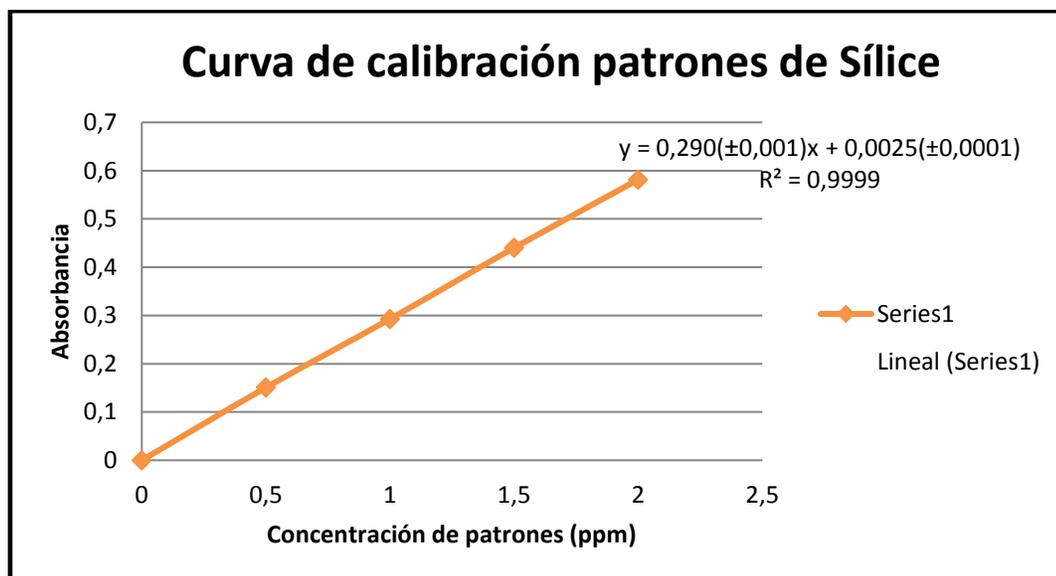
K ⁺	
Ppm	Intensidad
1	5436
2	11118
3	17341
4	23169
5	29018



Ca²⁺	
Ppm	Absorbancia
1	0,080
2	0,170
3	0,260
4	0,350
5	0,442
10	0,871



Mg²⁺	
Ppm	Absorbancia
1	0,196
2	0,388
3	0,568
5	0,889



Patrón ppm	R1	R2	R3	X
0.5	0,150	0,150	0,152	0,151
1	0,293	0,293	0,292	0,293
1.5	0,440	0,440	0,440	0,440
2	0,581	0,582	0,581	0,581
4	1,181	1,181	1,181	1,181

APÉNDICE B

Tabla 1 B. Localización y parámetros fisicoquímicos medidos durante la etapa de campo en los pozos de agua subterránea muestreados en el sector Licua, Municipio Crespo, Estado Lara.

Muestra	Nombre	Coordenadas UTM		Cota (m)	Temperatura (°C)	pH u	Conductividad uS/cm	SDT mg/L	Profundidad Pozo (m)
		Norte	Este						
MASP-01	Avilito	484600	1139522	640	25,2	6,97	1784	770	14,55
MASP-02	Vivero	485586	1140751	652	26,3	6,85	2166	908	-
MASP-03	La Pradera 1	484433	1140252	644	25,2	6,91	1220	544	17,58
MASP-04	El Gaban	485021	1140420	658	25,6	7,4	409	187	9,38
MASP-05	El llenadero	485254	1140299	638	25,5	6,86	1225	548	5,43
MASP-06	La Capilla	484590	1139733	631	25,6	6,82	1709	743	5,61
MASP-07	La Pradera 2	483823	1139129	645	25,2	6,9	947	427	-
MASP-08	El Guapito	482482	1137644	711	25,5	6,72	1817	790	28,89
MASP-09	El Guape	483292	1137618	725	24,7	6,75	2349	976	-

Tabla 2 B. Concentraciones de las especies químicas mayoritarias en las muestras estudiadas.

		K⁺	Na⁺	Mg²⁺	Ca²⁺	HCO₃⁻	SO₄²⁻	Cl⁻	NO₃⁻	SiO₂
Muestra	Nombre	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)	(mg/L)
MASP-01	Avilito	2,38	81,6	27,1	175,2	330,0	327,0	169,0	5,25	7,61
MASP-02	Vivero	6,72	101,8	50,2	232,5	418,1	563,0	132,0	14,80	10,87
MASP-03	La Pradera 1	2,36	48,8	26,5	12,4	319,5	254,0	67,9	8,43	10,5
MASP-04	El Gaban	4,42	23,8	6,6	27,4	94,0	68,2	22,0	1,62	1,59
MASP-05	El llenadero	1,72	49,4	24,0	124,6	330,0	237,0	79,1	4,25	7,71
MASP-06	La Capilla	6,50	72,5	22,5	200,2	397,7	397,0	98,8	22,80	9,86
MASP-07	La Pradera 2	1,23	36,4	9,1	142,0	301,7	106,0	76,4	3,60	6,51
MASP-08	El Guapito	2,22	162,0	20,0	162,4	460,9	208,0	220,0	51,00	6,93
MASP-09	El Guape	1,69	178,0	16,2	232,0	388,4	284,0	321,0	24,80	10,54

APÉNDICE C

Balance iónico

Cálculo 1

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

Dónde:

Σ^+ representa la sumatoria de las concentraciones de las especies catiónicas Na^+ , K^+ , Mg^{2+} y Ca^{2+} y Σ^- es la sumatoria de las especies aniónicas Cl^- , HCO_3^- y SO_4^{2-} , todos ellos expresados en meq/L.

Tabla 1 C. % Balance iónico.

		Suma Cationes	Suma Aniones	B.I.
Muestra	Nombre	mEq/L	mEq/L	%
MASP-01	Avilito	14,6	16,7	-7
MASP-02	Vivero	20,3	22,0	-4
MASP-03	La Pradera 1	10,6	12,3	-8
MASP-04	El Gaban	3,0	3,5	-7
MASP-05	El llenadero	10,4	12,4	-9
MASP-06	La Capilla	15,1	17,6	-7
MASP-07	La Pradera 2	9,4	9,2	1
MASP-08	El Guapito	16,8	18,6	-5
MASP-09	El Guape	20,6	21,4	-2

APÉNDICE D

Conductividad teórica:

Conductividad ideal catiónica + Conductividad ideal aniónica

Dónde:

Conductividad ideal catiónica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) = Σ (cationes * μ_o) + $[(e^{-\text{pH}}) * 1000] * 349,8$

Conductividad ideal aniónica ($\mu\text{S}/\text{cm}$) = Σ (aniones * μ_o)

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

Tabla 1D. Conductividades equivalentes de los iones en solución acuosa a 25°C
Conductividades equivalentes de los iones en solución a 25°C (Cravotta, 1986)

Espece iónica	Conductividad a 25 °C ($\mu\text{S-L}/\text{cm-mg}$)
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 2D. Conductividad ideal obtenida en las muestras en análisis

		Conductividad de campo	CI Catiónica	CI Aniónica	CI
Muestra	Nombre	uS/cm	uS/cm	uS/cm	uS/cm
MASP-01	Avilito	1784	546	1158	1704
MASP-02	Vivero	2166	657	1549	2206
MASP-03	La Pradera 1	1220	487	816	1303
MASP-04	El Gaban	409	280	232	513
MASP-05	El llenadero	1225	505	814	1319
MASP-06	La Capilla	1709	590	1195	1784
MASP-07	La Pradera 2	947	458	568	1026
MASP-08	El Guapito	1817	809	1218	2027
MASP-09	El Guape	2349	840	1477	2317

APÉNDICE E

Ecuaciones utilizadas para determinar la precisión de los análisis de las especies químicas en estudio:

- **Promedio (X)**

Ecuación # 1

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

Donde Xi representa la concentración de cada especie química o parámetro determinado y n el número de muestras totales.

- **Desviación Estándar (S)**

Ecuación # 2

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

Donde Xi representa la concentración de cada especie o parámetro, X representa el valor promedio de los datos y n el número de muestras totales.

- **Coefficiente de Variación Porcentual (CV)**

Ecuación # 3

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

Donde S es la desviación estándar de la muestra y X el promedio.

- **Límite de Detección (LD)**

Ecuación # 4

$$LD = Y + 3S$$

Donde Y representa al promedio del intersepto y "S" la desviación estándar asociada al intersepto.

Precisión de los análisis

Tabla 1E. Parámetros de la estadística descriptiva calculados para determinar la precisión de los análisis.

Muestra	Concentración	Réplica 1	Réplica 2	Réplica 3	X	S	CV	%CV	LD
MASP-03	Na ⁺ (mg/L)	48,8	48,5	48,7	48,7	0,1	0,003	0,31	0,1
MASP-03	K ⁺ (mg/L)	2,36	2,39	2,35	2,36	0,02	0,009	0,88	0,03
MASP-03	Mg ²⁺ (mg/L)	26,5	26,7	26,5	26,5	0,1	0,004	0,43	0,08
MASP-03	Ca ²⁺ (mg/L)	124,4	124,6	124,6	124,5	0,1	0,0009	0,09	0,02
MASP-03	SiO ₂ (mg/L)	10,53	10,30	10,66	10,50	0,2	0,017	1,73	0,01
MASP-06	Na ⁺ (mg/L)	72,5	72,7	72,8	72,6	0,2	0,002	0,21	0,1
MASP-06	K ⁺ (mg/L)	6,5	6,8	6,4	6,5	0,2	0,03	3,17	0,03
MASP-06	Mg ²⁺ (mg/L)	22,5	22,5	22,6	22,5	0,1	0,002	0,25	0,08
MASP-06	Ca ²⁺ (mg/L)	200,2	200,4	201,2	200,6	0,6	0,003	0,32	0,02
MASP-06	SiO ₂ (mg/L)	9,84	9,83	9,89	9,86	0,03	0,003	0,33	0,01

APÉNDICE F

Tabla 1 F. Índices de Saturación

Muestra	Nombre	IS Calcita	IS Aragonito	IS Dolomita	IS Anhidrita
MASP-01	Avilito	0,19	0,05	-0,08	-0,89
MASP-02	Vivero	0,25	0,11	0,2	-0,59
MASP-03	La Pradera 1	0	-0,14	-0,32	-1,11
MASP-04	El Gaban	-0,58	-0,73	-1,44	-2,19
MASP-05	El Llenadero	-0,03	-0,17	-0,43	-1,14
MASP-06	La Capilla	0,17	0,03	-0,25	-0,76
MASP-07	La Pradera 2	0,05	-0,09	-0,75	-1,4
MASP-08	El Guapito	0,05	-0,09	-0,45	-1,13
MASP-09	El Guape	0,14	-0,01	-0,53	-0,86