

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LOCALIZADO AL ESTE DEL
LAGO DE VALENCIA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO ARAGUA**

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela,
Por el Br. Otamendi C. Francisco R.

Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2021

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LOCALIZADO AL ESTE DEL
LAGO DE VALENCIA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO ARAGUA**

TUTOR ACADÉMICO: Prof. Laura Torres.

Presentado ante la Ilustre
Universidad Central de Venezuela,
Por el Br. Otamendi C. Francisco R.
Para optar al Título
de Ingeniero Geólogo

Caracas, 2021

Caracas, febrero de 2021

Los abajo firmantes, miembros del Jurado designado por el Consejo de Escuela de Geología, Minas y Geofísica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por el Bachiller Francisco Rafael Otamendi Celis, titulado:

“ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LOCALIZADO AL ESTE DEL LAGO DE VALENCIA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO ARAGUA”

Consideran que el mismo cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios

conducente al Título de Ingeniero de Geólogo, sin que ello signifique que se hacen solidarios con las ideas expuestas por el autor, lo declaran APROBADO.

Prof. Osmar Zambrano
Jurado Principal

Prof. Ramón Montero
Jurado Principal

Profa. Laura Torres
Tutora Académica

AGRADECIMENTOS

Primeramente doy gracias a Dios, porque gracias a Él, pude mantener mi fé, perseverancia y tolerancia ante las circunstancias adversas.

A mis padres y hermanos, que siempre creyeron en mí y me apoyaron incondicionalmente con paciencia, amor y orgullo desde el primer día que ingrese a esta noble casa de estudios.

A la Universidad Central de Venezuela, que pese a las grandes problemáticas que afronta para mantenerse funcionando, nunca dejo de ser la mejor universidad de Venezuela.

A mis profesores, que con su profesionalismo, paciencia y vocación ayudaron a formarme como el profesional que hoy día soy.

A mi tutora, la profesora Laura Torres, por dedicar su tiempo e introducirme, guiarme en esta etapa importante de mi carrera.

Al personal del INAMEH y a los ingenieros Roraima Alfonso, Feliciano De Santis, Antonio Gonzales y Simón Valera por proporcionar información, apoyo técnico y digital necesario para desarrollar el presente trabajo.

Al ingeniero Marco Arturo, por facilitar el acceso a las áreas restringidas donde se realizaron los trabajos concernientes al presente trabajo.

A la ingeniera Scarlet Blanco por apoyarme incondicionalmente y ayudarme a lograr esta importante meta.

Y a todas esas personas, compañeros, profesores y familia que de alguna u otra manera me acompañaron y contribuyeron en esta etapa de mi vida.

Otamendi C. Francisco R
ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DEL ACUÍFERO LOCALIZADO AL ESTE DEL
LAGO DE VALENCIA, MUNICIPIO LIBERTADOR, ESTADO ARAGUA

Tutor Académico: Prof. Laura Torres
T.E.G. Caracas, U.C.V. Facultad de Ingeniería. Escuela de Geología,
Minas y Geofísica. Año 2020.

Resumen

Las aguas subterráneas son un recurso clave para el desarrollo de las actividades agrícolas al este del Lago de Valencia, al sur de la población de Palo Negro; zona que constituye una importante fuente de trabajo para los que habitan las adyacencias de dicho lago. El constante trabajo agrícola en la zona demanda un gran volumen de agua proveniente tanto del Lago de Valencia como de la Laguna de Taiguai y, por supuesto, del acuífero que allí yace, más aún de este último en periodos secos. Por tal motivo, surge la necesidad de caracterizar hidrogeológicamente el acuífero presente al este del Lago de Valencia, para así extraer las aguas subterráneas de manera eficiente, responsable y preservando el acuífero. A fin de lograr dicho objetivo, fue preciso construir un modelo conceptual y un mapa hidrogeológico para lograr mostrar la evolución y funcionamiento del acuífero observado. Para ello, se ejecutó la siguiente metodología; 1) se caracterizó la litología con la interpretación de registros eléctricos de pozos cercanos a la zona de estudio, 2) se confirmó dicha interpretación ejecutando métodos geoelectrónicos en la zona de estudio, 3) se hizo un seguimiento a través del tiempo de los niveles piezométricos en los pozos de la zona estudiada, 4) se estimaron teóricamente los parámetros hidráulicos del acuífero estudiado, 5) se tomaron valores de conductividad eléctrica y pH en distintos pozos presentes en el área de estudio, 6) se adquirieron datos pluviométricos del área de estudio durante todo el lapso de tiempo de la investigación. Como resultado se pudo concluir que el acuífero al este del Lago de Valencia es un acuífero confinado por 90 m de material arcilloso con presencia de lentes arenosos saturados de agua interconectados entre sí. El mismo se encuentra constituido por material arenoso, su conductividad hidráulica es moderadamente alta con una transmisividad excelente que hacen al acuífero muy permeable, ideal para el trabajo agroindustrial al cual se somete en la actualidad. La principal dirección de flujo va en dirección oeste (hacia el Lago de Valencia, el cual es la probable zona de descarga), con ciertos desvíos a nivel local debido a la actividad antrópica ocasionada por pozos activos. Por otro lado, su principal fuente de recarga se encuentra al este de la región, además del aporte secundario por parte de las precipitaciones locales de la zona de estudio evidenciado por las variaciones locales de la piezometría.

Palabras clave: *Hidrogeología, Acuífero, Pozos, Lago de Valencia, Palo Negro.*

ÍNDICE

| | |
|--|----|
| ÍNDICE | 6 |
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | 8 |
| ÍNDICE DE TABLAS..... | 12 |
| CAPÍTULO I..... | 13 |
| FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN | 13 |
| I.1 INTRODUCCIÓN..... | 13 |
| I.1.1 Objetivo general | 15 |
| I.1.2 Objetivos específicos: | 16 |
| I.2 UBICACIÓN | 16 |
| I.3 ANTECEDENTES..... | 17 |
| I.1.3 Nacionales..... | 17 |
| I.1.4 Internacionales | 21 |
| CAPITULO II..... | 24 |
| MARCO CONCEPTUAL..... | 24 |
| II.1 MARCO TEÓRICO..... | 24 |
| II.1.1 Aguas subterráneas y acuífero | 24 |
| II.1.2 Caracterización litológica de acuíferos | 31 |
| II.1.3 Comportamiento de aguas subterráneas..... | 35 |
| II.2 MARCO GEOLÓGICO..... | 40 |
| II.2.1 Unidades litodémicas..... | 40 |
| II.2.2 Geología estructural | 43 |

| | |
|---|----|
| II.2.3 Sedimentos cuaternarios..... | 44 |
| CAPÍTULO III..... | 48 |
| MARCO METODOLÓGICO | 48 |
| III.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA..... | 49 |
| III.2 SEGUIMIENTO DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS O FREÁTICOS ... | 49 |
| III.3 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE LOS DISTINTOS POZOS PRESENTES | 51 |
| III.4 EJECUCIÓN DE LOS SONDEOS SEV Y DE TOMOGRAFÍAS GEOELECTRICAS | 53 |
| III.5 ANÁLISIS DE REGISTROS DE POZO..... | 54 |
| III.6 CONSTRUCCIÓN DEL MAPA HIDROGEOLOGÍCO..... | 56 |
| III.7 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO..... | 57 |
| CAPÍTULO IV..... | 59 |
| RESULTADOS..... | 59 |
| IV.1 CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA..... | 59 |
| IV.1.1 Registros de pozos..... | 59 |
| IV.1.2 Correlación de pozos | 70 |
| IV.1.3 Métodos geofísicos eléctricos | 74 |
| IV.2 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLOGÍCA | 79 |
| IV.2.1 Parámetros hidrogeológicos del acuífero | 79 |
| IV.2.2 Datos pluviométricos del año 2019-2020 | 82 |
| IV.2.3 Seguimiento de los niveles piezométricos a través del tiempo..... | 84 |
| IV.2.4 Análisis general del estudio piezométrico en el tiempo | 93 |
| IV.2.5 Análisis espacial de los niveles piezométricos | 96 |

| | |
|------------------------------|-----|
| IV.3 MODELO CONCEPTUAL | 104 |
| CONCLUSIONES..... | 108 |
| RECOMENDACIONES | 110 |
| BIBLIOGRAFÍA | 111 |
| ANEXOS..... | 117 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| <i>Figura 1. Consumo de agua a nivel mundial, tomado de (FAO, 2010).....</i> | 13 |
| <i>Figura 2. Ubicación de la zona de estudio a) mapa de Venezuela, b) mapa del estado Aragua respecto a Venezuela, c) zona de estudio respecto al Estado Aragua, (Tomado y modificado de Google Earth)</i> | 17 |
| <i>Figura 3. Ciclo hidrológico, tomado de (Pozo y Murillo, 2002)</i> | 25 |
| <i>Figura 4. Acuífero multicapa, tomado de (Pozo y Murillo, 2002).....</i> | 26 |
| <i>Figura 5. Tipos de acuíferos, nivel freático y nivel piezométrico, tomado de (Sanchez, 2010)</i> | 26 |
| <i>Figura 6. Porosidad y permeabilidad, tomado de (Pozo y Murillo, 2002).....</i> | 27 |
| <i>Figura 7. Modelo de caudal por unidad de sección, tomando como base la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico, tomado de Sanchez (2010).....</i> | 29 |
| <i>Figura 8. Pozo de bombeo y pozos de observación para ensayo de bombeo, (Villanueva e Iglesias, 1984).....</i> | 31 |
| <i>Figura 9. Configuración Wenner y Schlumberger, tomado de (Alvarez, 2003). </i> | 32 |
| <i>Figura 10. Tomografía geoeléctrica, tomado de (Molina, 2004).....</i> | 33 |
| <i>Figura 11. Sondeo eléctrico vertical, tomado de (Molina, 2004).....</i> | 34 |
| <i>Figura 12. Ejemplo de Registro de pozo, tomado y modificado de (COALCO Estudios Hidrológicos, C.A., 2012).....</i> | 35 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 13. Sistema cerrado de montaña a planicie aluvial, tomado de (Cruickshank,1992).....</i> | 36 |
| <i>Figura 14. Interacción entre aguas subterráneas y cuerpos de aguas superficiales, tomado y modificado de (Sanchez, 2010).....</i> | 36 |
| <i>Figura 15. Estructura de un pozo, tomado de (WaterAid, 2018)</i> | 38 |
| <i>Figura 16. Abertura piezométrica utilizada para monitorear pozos, tomado de (Espinoza, 2009)</i> | 39 |
| <i>Figura 17. Perfil esquemático de un modelo conceptual, tomado de (IGRAC, 2007)</i> | 39 |
| <i>Figura 18. Distribución de sedimentos cuaternarios y unidades litodémicas alrededor del Lago de Valencia, tomado y modificado de (Urbani y Hackley, 2006). </i> | 41 |
| <i>Figura 19. Sistema de fallas de la Victoria y Rio Guárico, tomado y modificado de (Audemard Y Machette, 2000)</i> | 43 |
| <i>Figura 20. Etapas del lago de Valencia, Valencia I (línea naranja), Valencia II (línea verde oscuro) y Valencia III (línea verde claro), tomado de (Ughi, 2014)</i> | 45 |
| <i>Figura 21. Flujograma de metodología aplicada, (Elaboración propia)</i> | 48 |
| <i>Figura 22. Ubicación de los pozos en la hacienda Punta Larga, (Tomado y modificado de Google Earth)</i> | 50 |
| <i>Figura 23. Sonda piezométrica utilizada para tomar profundidad en los pozos estudiados, (fotografía tomada en campo)</i> | 50 |
| <i>Figura 24. Uso de la sonda piezométrica, teniendo en cuenta la altura del pozo respecto al suelo, tomado de (Da Lio, 2013)</i> | 51 |
| <i>Figura 25. Conductímetro portátil utilizado en campo, (fotografía tomada en campo).....</i> | 52 |
| <i>Figura 26. Muestreo y lectura de conductividad en campo, (fotografía tomada en campo).....</i> | 52 |
| <i>Figura 27. Sistema SARIS usado para SEV y tomografías geoeléctricas, tomado de (Docplayer.com)</i> | 53 |

| | |
|--|----|
| <i>Figura 28. Comparación e interpretación de los cambios generalizados de las curvas SP y SPR, tomado y modificado de (COALCO Estudios Hidrogeológicos, C.A., 2010)</i> | 56 |
| <i>Figura 29. Ejemplo de mapa hidrogeológico, (INAMHI, 2005).....</i> | 57 |
| <i>Figura 30. Ejemplo de modelo conceptual, (IGRAC, 2007)</i> | 58 |
| <i>Figura 31. Mapa de ubicación de las perforaciones y sus registros de pozo, (Tomado y modificado de Google Earth)</i> | 60 |
| <i>Figura 32. Caracterización litológica del subsuelo Rg A, (Elaboración propia) .</i> | 61 |
| <i>Figura 33. Caracterización litológica del subsuelo Rg B, (Elaboración propia) .</i> | 62 |
| <i>Figura 34. Caracterización litológica del subsuelo Rg C, (Elaboración propia) .</i> | 63 |
| <i>Figura 35. Caracterización litológica del subsuelo Rg D, (Elaboración propia) .</i> | 64 |
| <i>Figura 36. Caracterización litológica del subsuelo Rg E, (Elaboración propia) .</i> | 65 |
| <i>Figura 37. Caracterización litológica del subsuelo Rg F, (Elaboración propia)..</i> | 66 |
| <i>Figura 38. Caracterización litológica del subsuelo Rg G, (Elaboración propia) .</i> | 68 |
| <i>Figura 39. Caracterización litológica del subsuelo Rg H, (Elaboración propia) .</i> | 69 |
| <i>Figura 40. Correlaciones y unidades observadas a partir de los registros de pozo, (elaboración propia)</i> | 70 |
| <i>Figura 41. Columna general, (elaboración propia).....</i> | 71 |
| <i>Figura 42. Corte E-W al este del Lago de Valencia, (elaboración propia)</i> | 73 |
| <i>Figura 43. Sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)</i> | 74 |
| <i>Figura 44. Sondeos eléctricos verticales realizados al sur de la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth).....</i> | 75 |
| <i>Figura 45. Sondeos eléctricos verticales ejecutados en la zona de estudio, (elaboración propia).....</i> | 75 |
| <i>Figura 46. Sondeos eléctricos verticales hechos al sur de la zona de estudio, (elaboración propia).....</i> | 76 |

| | |
|--|-----|
| Figura 47. Ubicación de la tomografía geoelectrica respecto a la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)..... | 77 |
| Figura 48. Tomografía geoelectrica realizada en la zona de estudio, (elaboración propia)..... | 77 |
| Figura 49. Precipitaciones 2019-2020, (elaboración propia) | 83 |
| Figura 50. Pozos chequeados dentro del área de estudio, (tomado y modificado de Google Earth) | 84 |
| Figura 51. Hidrograma del Pozo 2, (elaboración propia) | 85 |
| Figura 52. Hidrograma del Pozo 3, (elaboración propia) | 87 |
| Figura 53. Hidrograma del Pozo 4, (elaboración propia) | 87 |
| Figura 54. Hidrograma del pozo 5, (elaboración propia) | 89 |
| Figura 55. Hidrograma del Pozo 6, (elaboración propia) | 90 |
| Figura 56. Hidrograma del Pozo 7, (elaboración propia) | 91 |
| Figura 57. Hidrograma del Pozo 8, (elaboración propia) | 92 |
| Figura 58. Ejemplo hidrograma del Pozo 4, con picos registrados después de lluvias importantes, (elaboración propia)..... | 94 |
| Figura 59. Mapa de niveles piezométricos finalizando el mes de junio, tomados a inicios del periodo de lluvias, (elaboración propia) | 97 |
| Figura 60. Mapa de niveles piezométricos superficiales, tomados en el periodo de lluvias, (elaboración propia)..... | 100 |
| Figura 61. Niveles piezométricos profundos, tomados en el periodo de seco del 2020, (elaboración propia)..... | 101 |
| Figura 62. Mapa Hidrogeológico de Venezuela, (División Hidrogeológica del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1972) | 103 |
| Figura 63. Mapa geológico del este del Lago de Valencia, tomado y modificado de (Urbani y Hackley, 2006) | 103 |
| Figura 64. Modelo conceptual 2D del acuífero localizado al este del Lago de Valencia, (elaboración propia) | 107 |

ÍNDICE DE TABLAS

| | |
|---|----|
| <i>Tabla 1.</i> Porosidad en distintos materiales no consolidados, <i>tomado de (Comisión Nacional del Agua, 2007)</i> | 28 |
| <i>Tabla 2.</i> Unidades litodémicas presentes en la región de Aragua, <i>(Comisión redactora del Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1956)</i> . Continúa | 41 |
| <i>Tabla 3.</i> Unidades litodémicas presentes en la región de Aragua, <i>(Comisión redactora del Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1956)</i> . Continuación | 42 |
| <i>Tabla 4.</i> Datos para el cálculo de conductividad hidráulica K , <i>(elaboración propia)</i> | 80 |
| <i>Tabla 5.</i> Valores aproximados del orden de magnitud de la conductividad hidráulica en diversos materiales, <i>tomado de (Villanueva e Iglesias, 1984)</i> | 81 |
| <i>Tabla 6.</i> Valores aproximados del orden de magnitud de transmisividad en diversos materiales, <i>tomado de (Custodio & Llamas, 1983)</i> | 81 |
| <i>Tabla 7.</i> Datos pluviométricos del año 2019 y parte del 2020, <i>(proporcionados por Agropecuaria Punta Larga)</i> | 82 |
| <i>Tabla 8.</i> Tabla comparativa de oscilación y recuperación según los niveles piezométricos, <i>(elaboración propia)</i> | 95 |

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

I.1 INTRODUCCIÓN

El uso del agua no se limita exclusivamente al consumo humano, además de su empleo doméstico, este recurso se utiliza en ámbitos industriales, agrícolas, pecuarios. Conservarlo es un trabajo a desarrollar en cada una de las áreas ya mencionadas, puesto que las mismas son las responsables de la adecuada aplicación del recurso.

De acuerdo con la Organización Alimentaria y Agrícola de las Naciones Unidas, FAO (2010), a pesar de que la industria actualmente posee un acelerado crecimiento del consumo de agua, la actividad agrícola es responsable del 69% de la extracción del recurso hídrico, demandando un gran volumen del recurso y dejando rezagado el consumo doméstico como se ve en la figura 1.

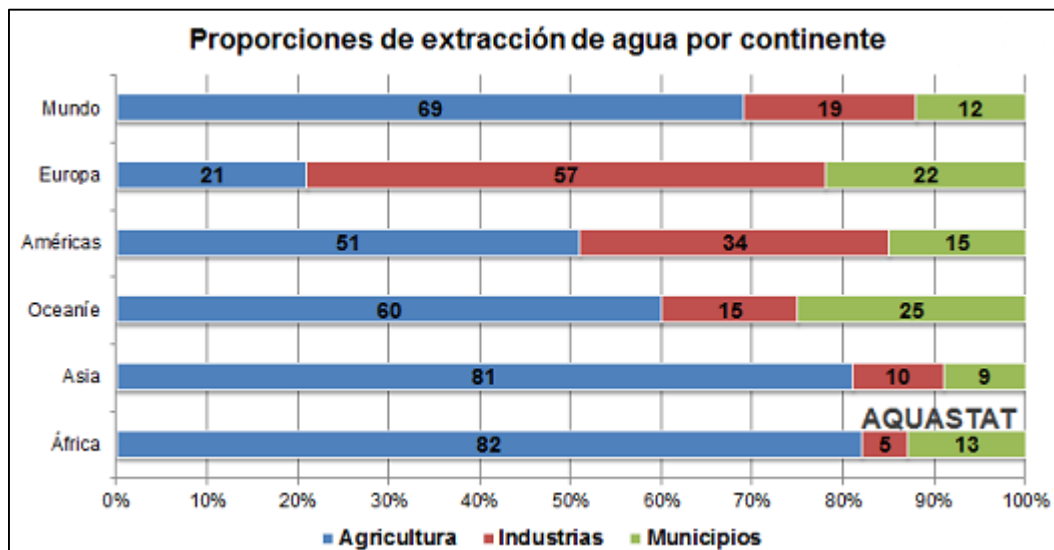


Figura 1. Consumo de agua a nivel mundial, tomado de (FAO, 2010)

Dicha actividad depende de tres fuentes para abastecerse, una de ellas son las precipitaciones, las cuales dependen directamente del factor clima a lo largo del

año; la segunda son los cuerpos de aguas superficiales (quebradas, lagunas, lagos, represas, embalses, entre otros); y la tercera son las aguas subterráneas. Normalmente, las regiones cercanas al trópico poseen el beneficio de tener los tres tipos de fuentes, mientras que en zonas desérticas existe solo la presencia de uno o ninguno (Foster y Shah, 2013).

Las aguas subterráneas ocupan un importante porcentaje dentro de las reservas de agua potable en el planeta, estas reservas se encuentran a distintas profundidades en el subsuelo, alojadas en reservorios denominados acuíferos (De Wiest, 1965). Antes de llegar al acuífero, el agua superficial debe atravesar distintas capas en el subsuelo, que se comportan como filtros naturales, debido a esto las aguas subterráneas son una vasta fuente de agua potable y son aptas para las actividades humanas, por lo que es fundamental conocer los factores que controlan la conducta de un reservorio de agua subterránea para el adecuado uso del mismo y su debida preservación (López y Fernandez, 2004).

A nivel mundial, la agricultura de regadío es uno de los mayores extractores de los recursos hídricos subterráneos, habiendo surgido ampliamente importantes agro-economías dependientes del agua subterránea (Herrera y Orozco, 2006). La extracción se lleva a cabo a través de pozos instalados en puntos estratégicos dependiendo del interés agrícola.

Para construir estos puntos de extracción es necesario conocer la estructura del reservorio subterráneo. De esta manera, establecer las características del acuífero ayuda a determinar las zonas de recarga del reservorio y sus fuentes de agua, también es útil para ubicar posibles fuentes de contaminación y construir un plan de explotación que preserve el acuífero.

El Lago de Valencia es una cuenca endorreica alimentada por los ríos Güigüe, Turmero, Limón, Cabriales, Los Guayos, Aragua, entre otros. Distintas actividades económicas, especialmente agrícolas se localizan alrededor del Lago de Valencia, abasteciéndose con las aguas provenientes del lago y de las aguas subterráneas que

ahí yacen. Las diversas actividades conllevan a un aumento poblacional, demandando así, un mayor volumen de aguas subterráneas para las labores diarias. Este aumento de actividades, genera una sobre explotación que, a corto y largo plazo, pueden dañar el sistema hidrodinámico natural de los reservorios de agua subterránea de la región.

Sin embargo, se desconoce la estructura interna y el comportamiento general y características del acuífero. Por ende, existe la necesidad de entender cómo funciona el acuífero o los acuíferos presentes en esta área y su relación con los cuerpos de agua superficial más cercanos, como lo es el mismo Lago de Valencia. Siendo esto un requerimiento necesario para un plan de extracción adecuado, que sólo es posible conociendo la estructura interna del reservorio y sus parámetros hidráulicos como transmisividad, gradiente hidráulico, entre otros.

El desconocer estas características hidrogeológicas deriva en manejar el recurso con desconcierto en el futuro, tomando en cuenta que, aunque el agua subterránea es un recurso renovable, es posible agotar el acuífero si se extrae agua de manera desmesurada, aunado a una posible falta de precipitaciones que recarguen el sistema.

En este orden de ideas, el desconocimiento de la hidrodinámica actual de las aguas subterráneas y su relación con las aguas superficiales del sector; además, de la incertidumbre que se tiene sobre la configuración interna del o los acuíferos presentes, no permite una adecuada extracción del recurso, puesto que, no existe para dicho acuífero, un estudio hidrogeológico que permita observar la dinámica del mismo.

Para dar solución a esta situación se plantean los siguientes objetivos:

I.1.1 Objetivo general

Estudiar hidrogeológicamente el acuífero localizado en una zona agrícola al este del Lago de Valencia, Municipio Libertador del Estado Aragua.

I.1.2 Objetivos específicos:

- (a) Caracterizar la estructura interna del acuífero a través de métodos geofísicos geoelectricos y geológicos.
- (b) Determinar los factores involucrados en las fluctuaciones del nivel piezométrico, a través del seguimiento de los niveles de aguas subterráneas.
- (c) Evaluar el comportamiento hidrodinámico del acuífero a través de la construcción de un mapa hidrogeológico.
- (d) Construir un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero al este del Lago de Valencia.

I.2 UBICACIÓN

La zona de trabajo está ubicada al este del Lago de Valencia, en las inmediaciones del municipio Libertador, ciudad de Palo Negro, estado Aragua (figura 2). Específicamente, se localiza en las instalaciones de la Hacienda Agropecuaria Punta Larga, dedicada al cultivo del banano y el pasto.

El acceso a la Hacienda Punta Larga se realiza a través de la Autopista Regional del Centro en sentido Caracas-Valencia. Se toma la entrada del peaje de Palo Negro, y en la redoma El Avión se incorpora a la avenida Los Aviadores, sentido sur, hasta llegar a la plaza de La Encrucijada en la población de Palo Negro, donde se toma la carretera Palo Negro-Magdaleno. La hacienda se encuentra a 2,5 km de la plaza.

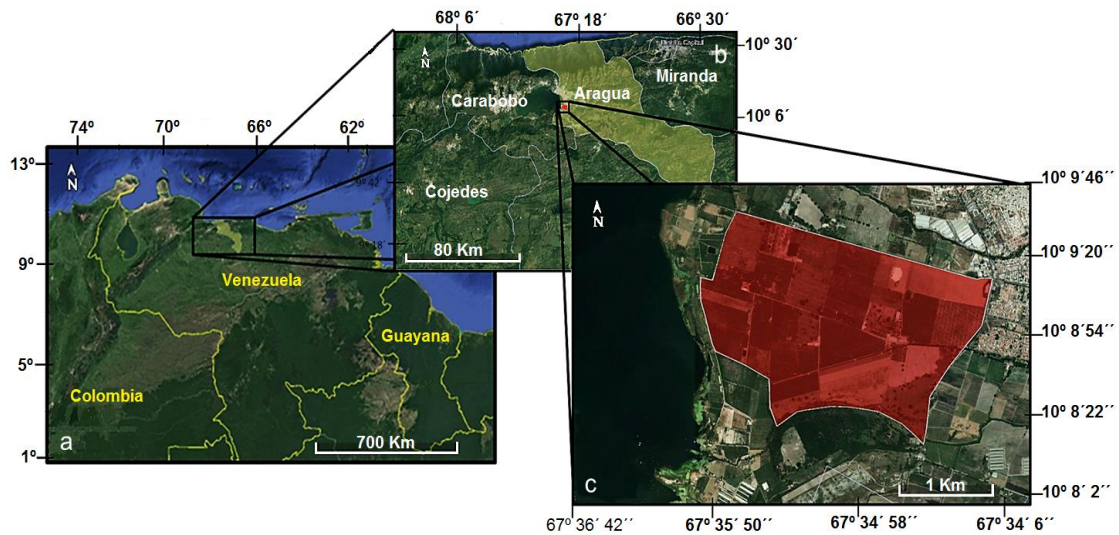


Figura 2. Ubicación de la zona de estudio a) mapa de Venezuela, b) mapa del estado Aragua respecto a Venezuela, c) zona de estudio respecto al Estado Aragua, (Tomado y modificado de Google Earth)

I.3 ANTECEDENTES

A continuación, se presentan una serie de trabajos previos, tanto nacionales como internacionales, en los cuales se han tratado objetivos parecidos al del presente trabajo de investigación, así como metodología similar.

I.1.3 Nacionales

- Muñoz (1988), realizó su trabajo sobre el acuífero de Maracay, ubicado en la zona oriental de la mencionada ciudad, esto con el objetivo de caracterizar el acuífero, establecer sus dimensiones y determinar qué tipo de aguas yacen en el acuífero, para luego proponer un plan de extracción adecuado que permitiera trabajar con el acuífero de manera responsable. Para esto, fue necesario realizar un seguimiento a través del tiempo de los niveles piezométricos y la construcción de un mapa piezométrico, se ejecutó un perfil con los datos adquiridos para determinar el volumen del acuífero, a su vez, se tomaron muestras de agua en los pozos de la zona para realizar un conteo de los sólidos disueltos. Esto dio como resultado la clasificación de las aguas allí presentes para uso doméstico, agrícola e industrial, sin mencionar que también se logró

establecer un modelo conceptual útil junto al mapa piezométrico para la determinación del gradiente hidráulico del acuífero de Maracay.

- Richard (1994), estudió el acuífero de Valencia, cerca del Lago de Valencia, con el objeto de establecer la relación que existe entre las aguas subterráneas de dicho acuífero y el lago. Para ello, se realizó una recopilación bibliográfica de registros de pozos y niveles piezométricos del año 1970 y a su vez se compararon con los niveles del año 1994. Además, se realizaron pruebas de bombeo para establecer parámetros hidráulicos. Entre los resultados se estableció que el acuífero es semi-confinado y que su nivel piezométrico se encontraba por debajo del nivel del lago, motivo por el cual el acuífero se está contaminando parcialmente. Por último, se comprobó que el nivel de este acuífero se encontraba más profundo para la época, en comparación del año 1970, por una diferencia de 20 metros de profundidad.
- Olivar y Pedrique (2006), trabajaron en el Valle del río de Tucutunemo, ubicado al noreste de la población de Villa de Cura, municipio Zamora, estado Aragua. Dicho trabajo fue realizado con el objetivo de establecer las reservas de aguas subterráneas, para sincerar el volumen del recurso, ya que el mismo ha sido explotado sin ningún tipo de estrategia para su consumo. Para tal fin, se hizo una compilación de información bibliográfica del territorio, lo cual ayudó a la construcción de 5 perfiles stratigráficos que señalan los lugares con mayor volumen de fluido y se ejecutaron dos pruebas de bombeo para establecer los parámetros hidráulicos presentes. Asimismo, se compararon dos mapas piezométricos, uno del año 1984 y el otro del año 2004, para mostrar la variación del volumen a través del tiempo, por último se tomaron muestras de agua tomadas de los pozos para medir conductividad eléctrica. Se determinaron dos áreas donde predominan materiales permeables, una al suroeste de régimen confinado, y el otro al sureste de régimen libre. De acuerdo a los

valores de transmisibilidad, la zona más productiva se encuentra hacia el oeste y centro del valle, específicamente hacia el sector El Cortijo, se determinó que la dirección de flujo de las aguas subterráneas es en sentido este-oeste, siendo ésta la misma dirección en la cual la permeabilidad aumenta. Se calculó que el espacio poroso existente en el subsuelo aloja aproximadamente $61.906.280 \text{ m}^3$ de agua representando así una pérdida en las reservas de agua de 39% en los últimos 20 años. La calidad del agua es apta tanto para riego como para consumo humano a excepción de 8 pozos que presentan coliformes en sus resultados, restringiendo de esta manera su uso

- Biondo y Esteves (2010), realizaron un estudio hidrogeológico del acuífero que yace en la cuenca de la Laguna de Taiguaiguai, 5 km al sur de la ciudad de Cagua, específicamente en la zona sur-oriental de la depresión del Lago de Valencia, municipio Zamora, estado Aragua. Para conocer la situación real del mismo, puesto que dicho yacimiento ha sido explotado sin ningún plan de manejo. Para ello, fue necesario en un principio realizar un inventario de los pozos activos en el área, así como también se construyó un corte geológico con base en los pozos hallados, además, se realizaron dos pruebas de recuperación para estimar los parámetros hidráulicos. Se compararon dos mapas piezométricos, uno del año 1986 y otro del año 2010; y por último, se hizo el mapa hidrogeológico de la zona. Se concluyó que existían dos tipos de acuíferos, uno de régimen libre ubicado al sur del territorio, y el otro de régimen semi-confinado ubicado al noroeste. A partir de la morfología de la superficie piezométrica se determinó que la dirección de flujo de las aguas subterráneas es en sentido noroeste, siendo ésta la misma dirección en la cual la permeabilidad aumenta. Asimismo, se calculó que las reservas permanentes del acuífero son de $237.755.925 \text{ m}^3$ de agua y se observa una disminución de los niveles de agua entre los años 1986 y 2010 causado principalmente por la sobreexplotación de los acuíferos asociado al incremento de pozos productores

debido al aumento de industrias y asentamientos campesinos en la zona. La cuenca de la Laguna de Taiguaiguay posee un 57,14 % de pozos aptos para el uso doméstico; y el 42,86 % de los pozos no son aptos para el consumo. En general, los valores de conductividad muestran que todos los pozos son útiles para el riego por tener valores menores a 2000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

- Barelli (2011), llevó a cabo su trabajo en Bare estado Anzoátegui, en el área de Ayacucho de la Faja Petrolífera del Orinoco. Este trabajo tuvo por finalidad generar un estudio detallado en torno a un modelo de flujo de aguas subterráneas, para el adecuado ejercicio de su extracción para consumo humano, agrícola y del sector petrolero. Para dar cumplimiento al objetivo, se recopiló la bibliografía de la geología regional de la zona de estudio correspondiente a la Formación Mesa, un levantamiento de la información de geología local y datos de los tres pozos que allí se encuentran para caracterizar el comportamiento de las rocas que fungen de reservorios de aguas subterráneas. Adicionalmente, fue elaborado un perfil litológico que muestra las unidades lito-estratigráficas, profundidades de perforación y distribución de rocas permeables entre los tres pozos. Con los resultados obtenidos se generó una base cartográfica de georreferencia digital de la zona de estudio en la plataforma ArcGis 9.2®, conteniendo información geológica tanto regional como local. De igual manera, se pudo determinar que la permeabilidad en la zona es de media a alta, donde las aguas subterráneas se mueven a través de sedimentos granulares, en este caso de rellenos del Pleistoceno (terrazas aluvionales), del Período Cuaternario/Época Pleistoceno/Formación Mesa (Qpm). De acuerdo a la clasificación de permeabilidades, el acuífero de la zona de estudio en el Campo Bare, se puede clasificar como un acuífero de alto rendimiento. Por último, se concluye que el acuífero es recargado en dirección norte-sur y noreste-sur desde la región de Jusepín-El Furrial, hasta Mesa La

Tentación, debido a la infiltración que ocurre en los afloramientos dentro de la cuenca del río Guarapiche.

I.1.4 Internacionales

- Hernández (1999), realizó una caracterización hidrogeológica en las inmediaciones de la Universidad Autónoma de Nuevo León en México, con el fin de reactivar los pozos que se alimentan del acuífero que ahí yace, para así contrarrestar la creciente necesidad de agua producto del crecimiento de la población y de periodos cálidos cada vez más prolongados. Para ello, se recopilaron los caudales que bombearon los pozos utilizados el último año (1998), igualmente se hizo un seguimiento de los niveles piezométricos para construir un perfil piezométrico y ver el comportamiento del acuífero a través del tiempo. En concreto se detectó la existencia de al menos un paleo-cauce, lo que indica que se trata de una zona privilegiada para perforaciones nuevas, ya que estos, por contener una mayor conductancia de agua, pueden reducir considerablemente los abatimientos producidos por el bombeo
- Herrera y Orozco (2010), Presentan las características geológicas e hidrogeológicas del sector de Ojo de Agua en la cuenca sur de la ciudad de Guatemala. Este sector es de vital importancia para el abastecimiento de agua potable, haciéndose necesaria esta investigación para determinar el modelo hidrogeológico conceptual y numérico. Para esto, fue necesario seguir los niveles piezométricos del acuífero a través del tiempo, además de pruebas de bombeo y recuperación, afloramiento y la caracterización geológica con ayuda de la información archivada de los pozos. Como resultado se caracterizó un acuífero multicapa donde, el superior está constituido por material de relleno de piroclastos y sedimentos fluviales, con permeabilidad primaria, de tipo libre, y valores de transmisividad para los piroclastos de 50 a 750 m²/día, así como de

150 a 2000 m²/día para los sedimentos. Los valores de coeficiente de almacenamiento de los piroclastos es 0,09 y para los depósitos aluviales de 0,20. El acuífero inferior presenta una permeabilidad secundaria, encontrándose también bajo condiciones de confinamiento. La transmisividad oscila entre 1600 y 9500 m²/día en los pozos de Ojo de Agua, con un valor de coeficiente de almacenamiento para rocas volcánicas fracturadas de 0,014. Los niveles estáticos de los pozos de Ojo de Agua han descendido hasta 13,2 m con un promedio de 9 m en más de 20 años. El nivel de agua respecto al nivel del suelo varía de 12 y 14 m y el caudal de los principales pozos varía de 134 a 232 l/s. finalmente, la dirección de flujo de las aguas subterráneas es principalmente de norte a sur y tiene un control tectónico por un sistema de fallas con orientación N-S, que ha originado estructuras de horst y gráben en las cercanías.

- López (2012), llevó a cabo estudios hidrogeológicos en áreas desérticas y remotas de difícil acceso localizadas en el complejo Dunar de Erg Chebbi (Marruecos). Trabajo que buscó lograr una estrategia de explotación bien detallada, puesto que al año solo precipita una media de 150mm de agua, tomando en cuenta que es la única recarga con la que cuenta el acuífero, el sistema es bastante delicado ante la sobre explotación. Fue necesaria la determinación de los distintos parámetros hidráulicos del acuífero a través de 2 pruebas de bombeo y los chequeos de los niveles piezométricos para determinar el gradiente hidráulico. Los resultados logrados representan un ejemplo de una zona de trabajo de dimensiones reducidas (105 km²), posee un espesor promedio de arena de 30 m, el espesor máximo saturado de agua del sistema dunar se ha estimado en unos 20 m. Por otro lado, el sistema de flujo es radial desde las zonas interiores del conjunto dunar hacia las zonas de borde, con un gradiente hidráulico entre la zona central del área de trabajo y el borde oeste del 7 por mil, mientras que, en la zona sur del área de trabajo, donde el

espesor de arenas es más reducido, el gradiente máximo obtenido es del 1,5 por mil.

- Paoletti (2014), desarrolló la caracterización hidrogeológica del acuífero freático en el entorno inmediato y próximo a la Laguna Moreno, situada a unos 3 km al norte de la localidad de Pico Truncado, en el sector centro-norte de la provincia de Santa Cruz, Argentina. Las principales fuentes de aporte al cuerpo lagunar responden en forma directa a las precipitaciones, al escurrimiento superficial transitorio y al subterráneo, este último definido por el comportamiento centrípeto de la superficie freática. Tomando muestras de agua de los pozos que se encontraban cerca y lejos de la laguna se observó que coincide la red de flujo subterránea, con los valores de conductividad eléctrica del agua de laguna que aumentan progresivamente hacia el centro del cuerpo lagunar. Las características y hallazgos de las componentes hidrodinámicas e hidroquímicas del sistema freático investigado, permitieron dilucidar el funcionamiento del acuífero somero respecto a la variable ambiental y antrópica que caracterizan el sitio, por tanto, la Laguna Moreno posee una conexión directa con el acuífero, descartando la idea de que no existía relación entre el cuerpo de agua superficial y el acuífero.

CAPITULO II

MARCO CONCEPTUAL

Para este capítulo se explican definiciones esenciales necesarias para entender que es un acuífero y cómo funciona, lo cual es indispensable para comprender cómo trabaja el sistema de aguas subterráneas estudiado en este trabajo. A su vez se expone la geología que predomina al este del Lago de Valencia, explicando litología y estructuras de deformación asociadas al área de trabajo.

II.1 MARCO TEÓRICO

Seguidamente se procede a exponer y explicar una serie de conceptos, términos e información de carácter geológico esenciales para el mejor entendimiento del trabajo realizado.

II.1.1 Aguas subterráneas y acuífero

El agua es la sustancia líquida más abundante en la superficie de la Tierra y constantemente está en circulación sobre la misma mediante el fenómeno conocido como el Ciclo hidrológico. Fenómeno en el cual el agua presente en los océanos o cualquier otra superficie de agua, es evaporada pasando a ser parte de la atmosfera, más tarde el vapor de agua precipita generando lluvias que alimentan quebradas, ríos, humedales, pantanos y lagos, cuyas aguas se infiltran en el subsuelo, llegando a reservorios de agua subterránea que, más tarde, descargan dicho fluido en manantiales. El ciclo finaliza cuando estas aguas llegan nuevamente al océano para repetir el ciclo infinitas veces (Ferrer, 2007).

Las aguas subterráneas, se encuentran en depósitos que se recargan por la superficie del terreno, circulan por un complejo conjunto de masas rocosas con poros, fisuras y grietas, a profundidad variable y en ambientes biofísicoquímicos diversos, y, finalmente, descargan en manantiales, nacientes, arroyos, ríos, lagos o al

mar; o son evaporadas y evapotranspiradas en humedales, así como también, pueden ser extraídas artificialmente por el hombre mediante pozos, sondeos, galerías y drenes como se aprecia en la figura 3 (Lee y Fetter, 1994).

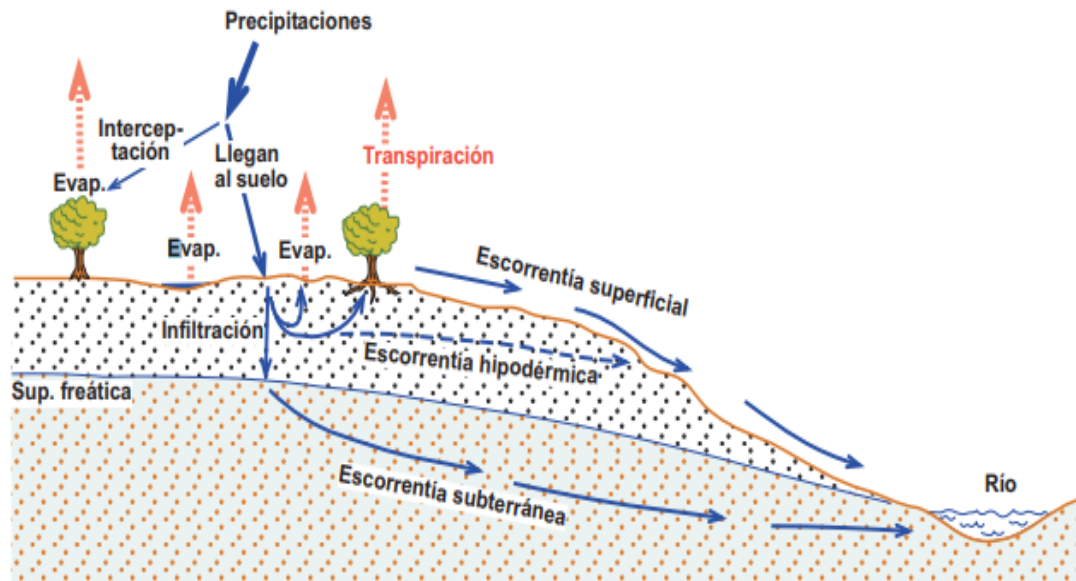


Figura 3. Ciclo hidrológico, tomado de (Pozo y Murillo, 2002)

El agua subterránea es parte de una fase del ciclo hidrológico, siendo un recurso de gran riqueza que requiere un mayor y más detallado trabajo especializado para su extracción y preservación, puesto que representan las reservas de agua potable de origen natural más grandes del mundo (Hiscock, 2005).

Sabiendo esto, es necesario introducir el concepto de los acuíferos. Según Sánchez (2010) son el espacio físico donde se almacenan las aguas subterráneas. De manera más detallada, los acuíferos son una formación geológica capaz de contener agua en cantidades apreciables y que, a su vez, permite una fácil circulación a través de ella. Normalmente, están formados de materiales como arenas, gravas o rocas fracturadas o parcialmente disueltas, es común que existan varios acuíferos separados por capas impermeables compuestas por arcillas, a estos acuíferos se les llama acuíferos multicapa y son bastante comunes en la naturaleza, los mismos se pueden observar en la figura 4.

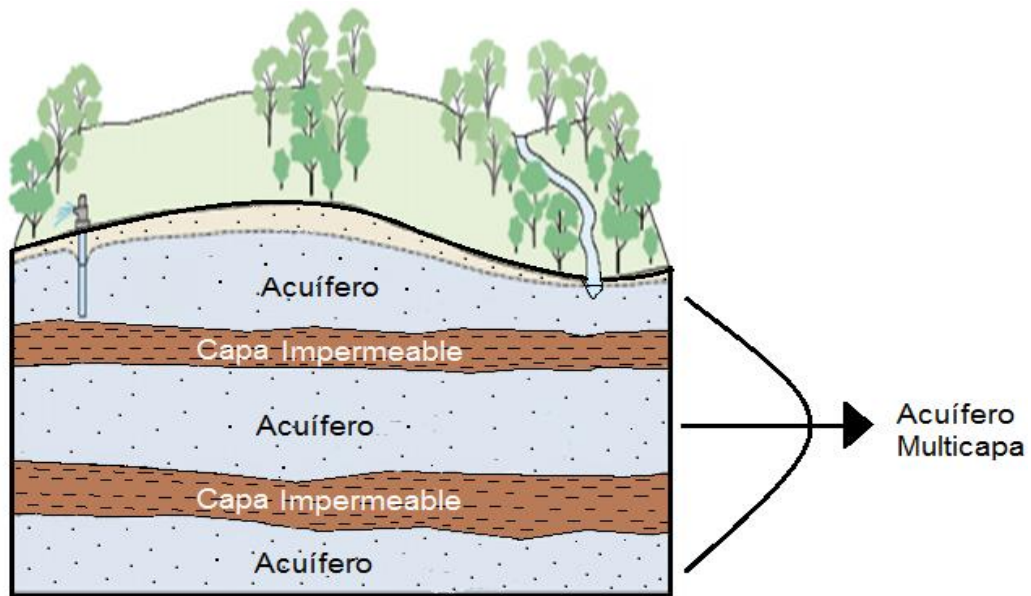


Figura 4. Acuífero multicapa, tomado de (Pozo y Murillo, 2002)

Según Lee y Fetter (1994), existen 2 tipos de acuíferos; el acuífero libre, el cual no posee una capa impermeable que confine la capa acuífera, por tanto la profundidad del fluido está marcada por el llamado nivel freático, el cual entra en contacto con la presión atmosférica. Luego está el acuífero confinado, el cual se caracteriza por estar limitado por capas impermeables que confinan el acuífero, por tanto la presión a la que están sometidas estas aguas es superior a la atmosférica, la profundidad del agua está marcada por el llamado nivel piezométrico que se genera al construir un pozo y despresurizar el acuífero como se observa en la figura 5.

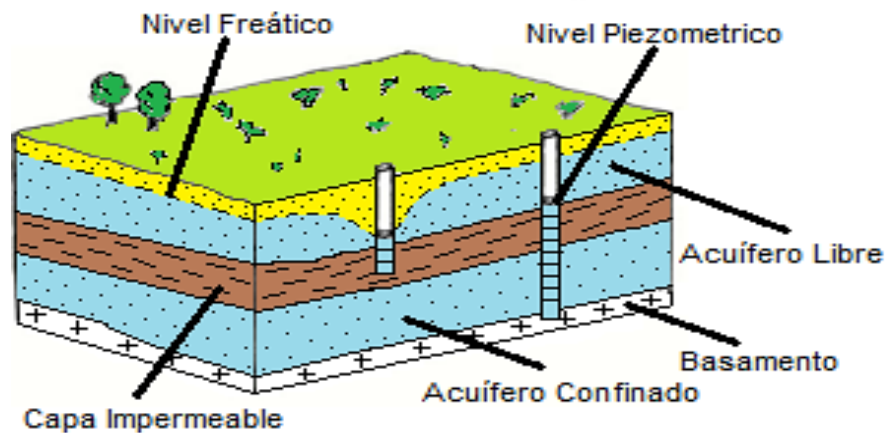


Figura 5. Tipos de acuíferos, nivel freático y nivel piezométrico, tomado de (Sanchez, 2010)

Sanchez (2010) también aclara que los acuíferos son parte de las unidades hidrogeológicas. Las mismas las define como un conjunto de formaciones geológicas cuyo funcionamiento hidrogeológico se considera conjuntamente. Dentro de la unidad puede haber uno o varios acuíferos. Se consideran una unidad porque están conectados de modo que su funcionamiento (entradas, salidas, balance) se estudia de manera conjunta.

Por otro lado, es necesario mencionar que los acuíferos poseen propiedades hidráulicas que permiten el almacenamiento y circulación de los fluidos a través de ellos. Una de ellas es la porosidad, donde la Comisión Nacional del Agua (2007), la considera como el volumen de vacíos o poros que existen en un material por unidad de volumen (figura 6).

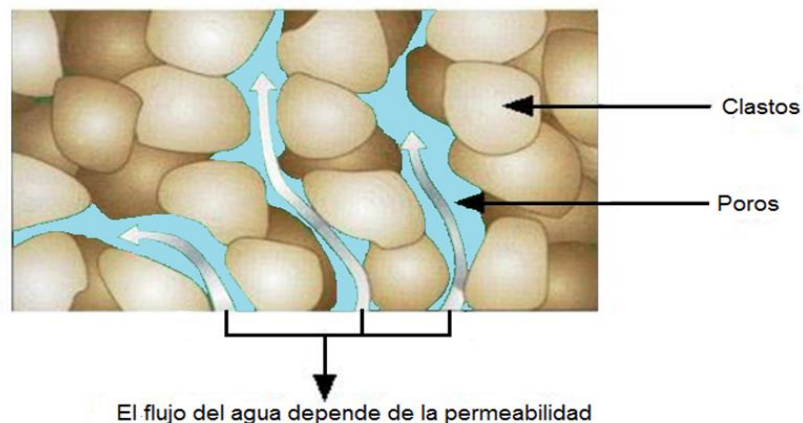


Figura 6. Porosidad y permeabilidad, tomado de (Pozo y Murillo, 2002)

Específicamente se establece como la relación que existe entre el volumen que ocupan dichos espacios vacíos y el volumen total que ocupa el material expresada en porcentaje (Hiscock, 2005), es decir:

Porosidad
$$n(\%) = (V_v / V_t) \times 100 \quad \text{Ec. (1)}$$

Dónde:

n: porosidad adimensional

V v: volumen de espacios vacíos en el material

V t: volumen total del material

En la Tabla 1 se establecen valores de porosidad para materiales no consolidados. De los datos mostrados se establece que el valor de la porosidad es inversamente proporcional al tamaño de las partículas.

Tabla 1. Porosidad en distintos materiales no consolidados, tomado de (Comisión Nacional del Agua, 2007)

| MATERIALES | N (%) |
|---------------------------|---------|
| Depositos no consolidados | |
| Arcilla | 40 – 70 |
| Limo | 35 – 50 |
| Arena | 25 – 50 |
| Grava | 25 - 40 |

Otra propiedad importante es la permeabilidad, como puede verse en la figura 6 es el parámetro hidráulico que establece la comunicación que existe entre poro y poro, es decir son los canales por donde fluye el agua en el acuífero. Normalmente las arenas son las que por excelencia tienen la mejor permeabilidad. Tomando en cuenta que los acuíferos poseen una entrada de fluido (zona de recarga) y una salida del mismo (zona de descarga), dicho flujo de agua se rige por principios como la Ley de Darcy, que establece que el caudal que atraviesa un medio poroso es linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico (figura 7) (Lariónov, 1985).

Ley de Darcy:
$$Q = K \cdot \text{Sección} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l}$$
 Ec. (2)

Donde K es el valor de la permeabilidad, Q es el caudal por metros cuadrados de sección, $\Delta h/\Delta l$ es el gradiente hidráulico expresado en incrementos infinitesimales.

En hidrogeología, la permeabilidad es llamada conductividad hidráulica (K), propiedad que posee una componente vertical y una horizontal, donde su concepto

más preciso es: la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico, de esta manera tenemos que el caudal por unidad de sección es igual a la conductividad hidráulica por el gradiente hidráulico (Sanchez, 2010). Tal como se ve en la figura 7 el caudal que atraviesa el medio poroso perpendicularmente a la sección señalada es linealmente proporcional al gradiente hidráulico.

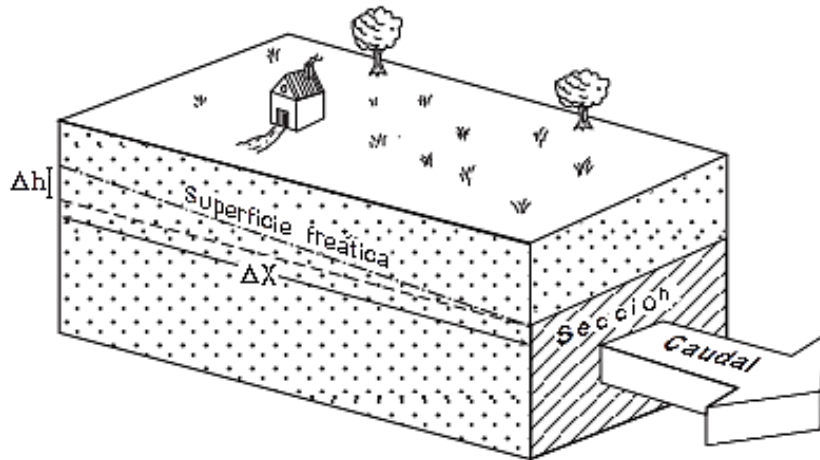


Figura 7. Modelo de caudal por unidad de sección, tomando como base la conductividad hidráulica y el gradiente hidráulico, tomado de Sanchez (2010)

Por otra parte, Sanchez (2010) describe la transmisividad como el parámetro que indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica, dicha facilidad es el producto de la conductividad hidráulica y del espesor de una sección del acuífero. Es representativa de la capacidad que tiene el acuífero para ceder agua. Partiendo de la definición, sus dimensiones son las siguientes:

Dimensiones:
$$T = (L^3/T)/L = L^2 T^{-1} \quad \text{Ec. (3)}$$

Donde:

T= dimensión tiempo

L= dimensión longitud

Villanueva e Iglesias (1984) concuerdan que lo más común es que la transmisividad se mide en m²/Días, m²/horas o m²/segundos. Sin embargo, la unidad que da cifras manejables es m²/Días.

Por último, la Comisión Nacional del Agua (2007) define el coeficiente de almacenamiento como la cantidad de agua que libera (o toma) una columna del acuífero, de sección horizontal unitaria y altura igual a su espesor saturado, cuando la carga hidráulica desciende (o asciende) una unidad. Consecuentemente, no tiene dimensiones. En el caso de que el acuífero trabaje como libre, el coeficiente de almacenamiento representa el volumen de agua que puede ceder un volumen unitario de acuífero. Cuya ecuación es:

$$S = \gamma b (m_e \beta + \alpha) \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

γ : peso específico del agua

b : espesor saturado del acuífero

α : módulo de compresibilidad del acuífero

β : Módulo de compresibilidad del agua

m_e : es el cociente entre el volumen de poros conectados que presenta el acuífero por donde puede circular efectivamente el agua subterránea referidos al volumen total del mismo.

Estos parámetros se calculan a partir de datos que se obtienen de pruebas de bombeo. La Comisión Nacional del Agua (2007) señala que una prueba de bombeo tiene por objetivo determinar las características hidráulicas de los acuíferos. Este tipo de pruebas estudian al acuífero en sí, y al pozo, más no a la bomba, son llamadas también pruebas de acuífero. Cuando se planifican y llevan a cabo correctamente estas pruebas pueden proporcionar información básica para la solución de problemas locales y regionales sobre el flujo del agua subterránea.

A partir del comportamiento de los abatimientos de los niveles, la distancia entre los pozos de observación y el pozo bombeado y el caudal de bombeo, se

puede obtener información sobre las características del acuífero, como son: su conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento, existencia de barreras impermeables cercanas, así como de recarga, y definir y confirmar el tipo de respuesta hidráulica del acuífero.

Asimismo, para realizar una prueba de bombeo, la Comisión Nacional del Agua (2007) también explica; que primero se debe bombear un pozo que esté perforado en el acuífero que se desea estudiar, durante un cierto tiempo, a un determinado caudal y medir la evolución del nivel piezométrico debido al bombeo, tanto en el mismo pozo de bombeo como en piezómetros y pozos cercanos (pozos de observación) (figura 8).

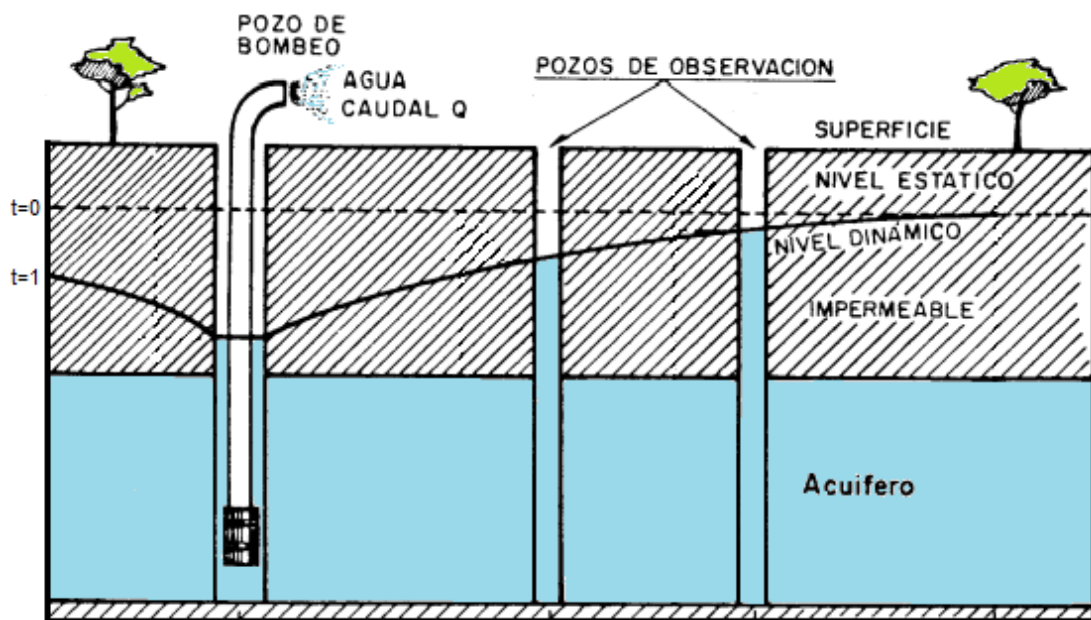


Figura 8. Pozo de bombeo y pozos de observación para ensayo de bombeo, (Villanueva e Iglesias, 1984)

II.1.2 Caracterización litológica de acuíferos

Para identificar los tipos de acuíferos es preciso conocer la litología del subsuelo, para ello, existen diversos métodos que se valen de las propiedades físicas de los minerales presentes en el acuífero, entre ellos los métodos geofísicos geoelectrónicos.

Alvarez (2003) comenta que los métodos eléctricos se basan en la medición de las propiedades eléctricas del subsuelo, teniendo en cuenta que todos los materiales presentes en la corteza terrestre oponen resistencia al flujo de la corriente eléctrica. Esta propiedad se llama resistividad, permite diferenciar entre los distintos materiales que componen la corteza terrestre. Existen varias metodologías para obtener la resistividad del suelo, los sondeos eléctricos verticales (SEV) y las tomografías geoeléctricas son algunas de ellas.

Las mismas consisten en obtener una serie de medidas de resistividad aparente con un dispositivo tetraelectródico determinado y con una separación constante entre electrodos (figura 9); e ir variando las distancias entre los pares de electrodos emisor-receptor por múltiplos de un valor, de tal forma que el resultado final será en el caso de los SEV una perforación donde varía la resistividad respecto a la profundidad, y una sección o corte con calicatas a varios niveles de profundidad en el caso de las tomografías.

También explica, que el procedimiento para llevar a cabo dichas metodologías, radica en inyectar por medio de los electrodos AB una carga de corriente continua al subsuelo según la configuración de tendido Schlumberger, Wenner para los SEV y Wenner-Schlumberger para las tomografías geoeléctricas, como se ve en la figura 9, esta acción tendrá una respuesta que será captada por los electrodos MN, esta resistividad es medida en ohms/m.

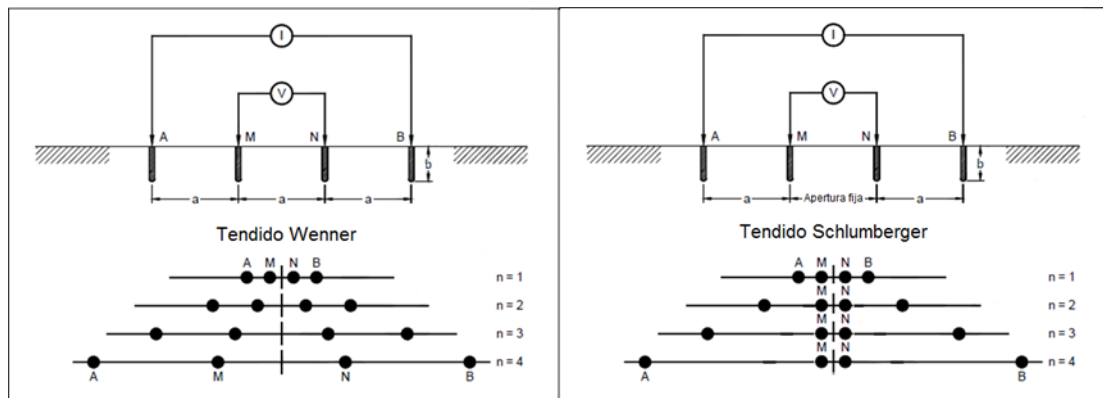


Figura 9. Configuración Wenner y Schlumberger, tomado de (Alvarez, 2003)

Esto, es útil puesto que cada litología tiene un rango de resistividad característica, detalle que ayuda a esclarecer el cómo está compuesto litológicamente el acuífero, además se utiliza para estimar cuales son las capas que albergan agua. Cabe acotar, que las tomografías eléctricas ayudan a identificar la configuración estratigráfica presente en la formación (figura 10), por esta razón, también es posible ver la geometría y dimensiones del acuífero, cosa que no es posible ver con el sondeo eléctrico vertical.

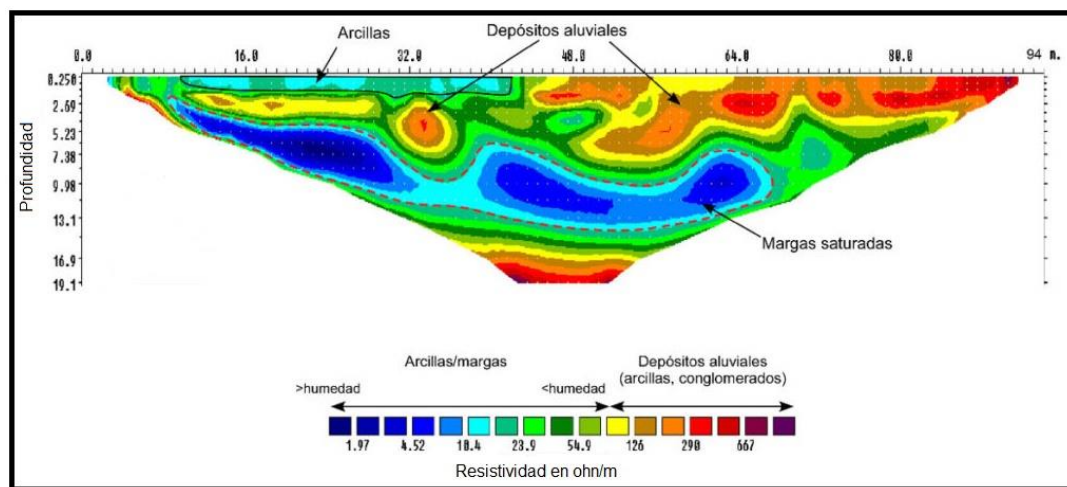


Figura 10. Tomografía geoelectrica, tomado de (Molina, 2004)

El SEV gráficamente se visualiza como una columna donde se ven los espesores de cada capa con su respectiva resistividad (figura 11), no es posible calcular otras dimensiones que no sean los espesores de capa. Sin embargo, se pueden correlacionar un determinado numero de SEV e interpretar la geometría de las capas.

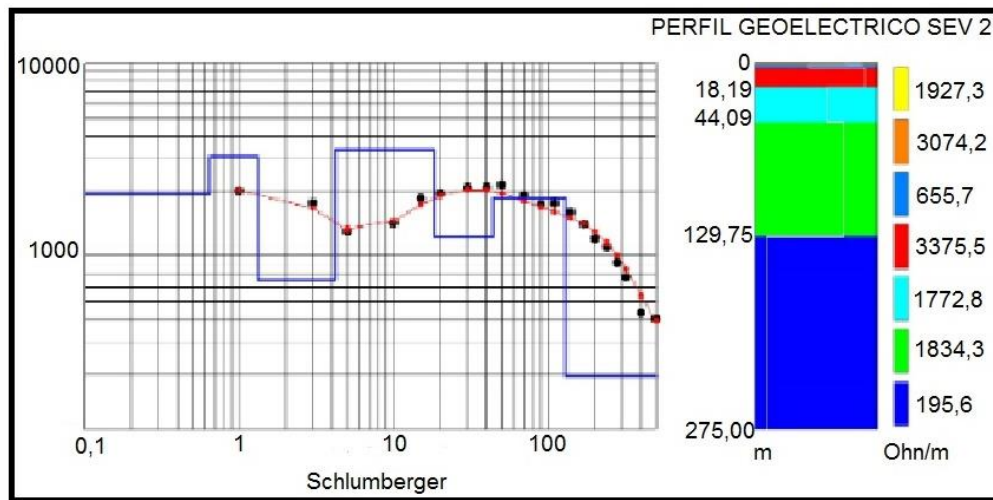


Figura 11. Sondeo eléctrico vertical, tomado de (Molina, 2004)

Otra manera de interpretar la litología de los acuíferos es analizando el comportamiento de las curvas SP, Gamma Ray y Resistividad respecto a como varían en el subsuelo a distintas profundidades (figura 12). Para ello, se utilizan los registros de pozo, los cuales son gráficos a escala que ilustran la evolución de las curvas ya mencionadas a lo largo de toda una perforación.

De acuerdo con Falla (2005), la corriente espontánea se genera debido a que las formaciones geológicas concentran agua en los poros. Esta porta componentes salinos (iones en solución), y es el movimiento de los iones de las sales la que genera una corriente eléctrica. La técnica que se utiliza para calcular estas corrientes se denomina Registro de Potencial Espontáneo (SP).

El Registro de Rayos Gamma (Gamma), por su parte, es un gráfico que mide la radioactividad natural de las formaciones geológicas, es decir, es la medida de la radiación que emite espontáneamente el macizo rocoso o un suelo. Es por lo tanto útil en la detección y evaluación de minerales ricos en Potasio (K) y Uranio (U), y particularmente, es de gran utilidad para diferenciar Lutitas y Arcillas de Areniscas y Arenas, ya que el material arcilloso es rico en K, el cual puede ser radioactivo, además que las Lutitas y Arcillas tienen la capacidad de absorber Uranio y Torio (Falla, 2005).

Y para finalizar, el autor describe al Registro Electrico (SPR), como la técnica geofísica que mide la resistividad de cada una de las capas litológicas. Los mismos son de gran utilidad para identificar el tipo de material en función de su resistividad característica. Aunado a esto, es de resaltar que dicho material presentará una baja resistividad generalizada si el medio se encuentra saturado de agua, regularmente este registro se suele estudiar en conjunto con la curva SP para la detección de acuíferos.

Usualmente, no se hacen interpretaciones con base en una sola de las curvas ya expuestas, puesto que los métodos geofísicos ejercidos para la adquisición de las mismas no son 100% precisas. Por ende, las tres curvas se suelen analizar en conjunto para identificar litologías y niveles de saturación.

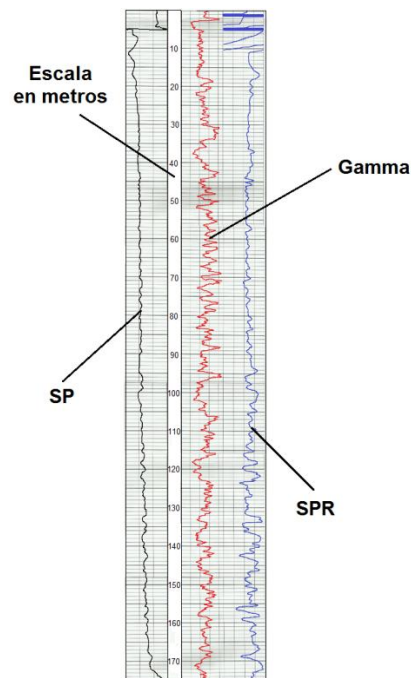


Figura 12. Ejemplo de Registro de pozo, tomado y modificado de (COALCO Estudios Hidrológicos, C.A., 2012)

II.1.3 Comportamiento de aguas subterráneas

En cuanto a las posibles fuentes de agua que pueden recargar un acuífero, las precipitaciones no son las únicas fuentes que existen, Cruickshank (1992) indica que

los flujos de entrada a un acuífero son diversos y, en general, de difícil evaluación. Por una parte, se tiene la infiltración, que a veces es frecuente que se deba al escurrimiento superficial proveniente de las zonas montañosas con altas pendientes y superficies impermeables, véase la figura 13. También proviene de cauces de ríos no revestidos y lagos con un nivel superior al freático (muchos de los cuales escurren sólo en época de lluvia).

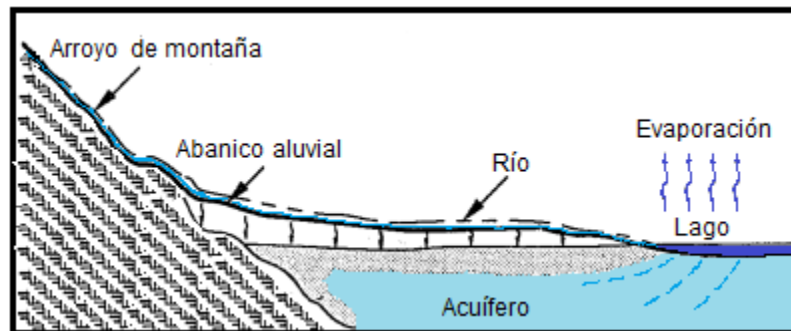


Figura 13. Sistema cerrado de montaña a planicie aluvial, tomado de (Cruickshank, 1992)

Con base a lo anterior, tanto las quebradas como lagos pueden ser tanto zonas de recarga como zonas de descarga para los acuíferos, todo dependerá de donde se encuentre el nivel piezométrico o freático, ya que, si el nivel del agua en un río o lago es superior a este nivel, los mismos serán fuente de recarga para los acuíferos, de lo contrario el agua emanará a través de manantiales a los cuerpos de aguas superficiales. Se puede resaltar que este tipo de interacciones solo son posibles, si y solo si existe una capa permeable que conecte el acuífero y los cuerpos de agua superficiales (Cruickshank, 1992), dicha interacción se ve en la figura 14.

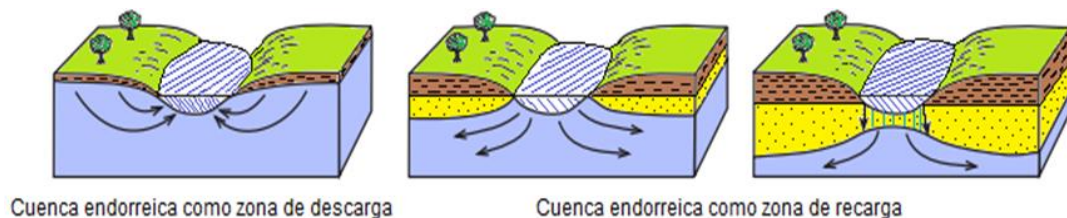


Figura 14. Interacción entre aguas subterráneas y cuerpos de aguas superficiales, tomado y modificado de (Sanchez, 2010)

El agua, desde que precipita, se infiltra en el subsuelo, llega a la superficie freática y finalmente alcanza los puntos de descarga, adquiere características químicas debido a la cantidad de iones disueltos (electrolitos) en contacto con ella a lo largo de su recorrido por el sistema subterráneo. La presencia de iones comunes como SO_4^{2-} y Ca^{2+} , Cl^- Na^+ , HCO_3^- y Ca^{2+} , otorgan al agua conductividad electrolítica, la cual es la medida de la capacidad de una solución para conducir una corriente eléctrica y es a veces denominada "conductancia específica". La conductividad electrolítica también se define como la inversa o recíproca de resistencia eléctrica (ohmios) y utiliza las unidades de medida denominadas mhos, donde la millonésima parte de un mhos es igual a un micromhos o microsiemens (como es conocido comercialmente, μS) (Suarez, 2015).

Montero y López (1997) afirman que, el agua proveniente de precipitaciones al infiltrarse en los primeros metros de suelo se torna ácida, ya que en los primeros poros hay CO_2 que junto con el H_2O generan HCO_3^- y H^+ , a medida que profundizan las reacciones ácido-base disminuye la acidez del agua hasta llegar a la superficie freática.

También aclaran que, mientras más tiempo dure el agua dentro del acuífero más salina se vuelve (debido a los iones que agrega a su paso), pero este hecho depende directamente de la litología, puesto que un litro de agua que permanece una hora en contacto con minerales como la halita (cloruro de sodio) es más salina que un litro de agua que permaneció 10 años en contacto con minerales como el cuarzo (SiO_2).

Así como existen zonas de recarga para los reservorios de agua subterránea, también están presentes aquellas zonas donde el acuífero descarga agua, tanto de forma natural (manantiales) o por la mano del hombre. Da Lio (2013) aclara que hay dos formas de extraer el recurso hídrico, una es naturalmente a través de manantiales, y la otra, instalando pozos que llegan directamente al acuífero (figura 15). Este último es un procedimiento muy utilizado y preferido ya que se puede

manipular directamente el caudal de salida, hecho muy provechoso para actividades agrícolas e industriales.

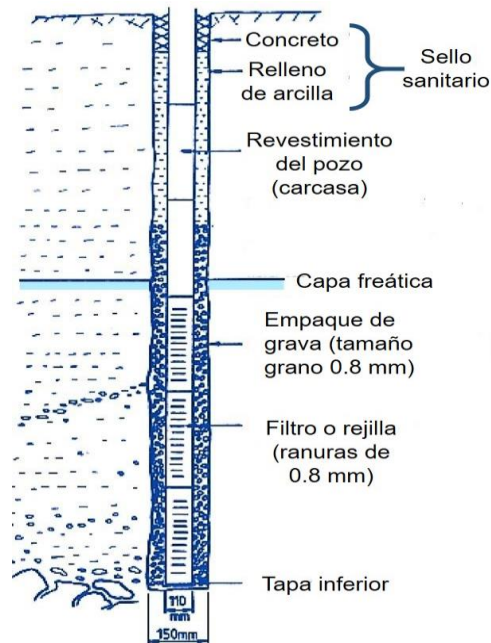


Figura 15. Estructura de un pozo, tomado de (WaterAid, 2018)

Al instalar el pozo se debe dejar una abertura llamada piezómetro, la cual tiene por función facilitar el control eventual del estado del pozo y del comportamiento del acuífero a través del tiempo, con la ayuda de una sonda piezométrica, tal y como se ve en la figura 16. Este último detalle es fundamental y de carácter obligatorio para poder extraer el recurso de manera eficaz pero al mismo tiempo preservando el acuífero, y así evitar que se seque a corto o largo plazo (Da Lio, 2013).

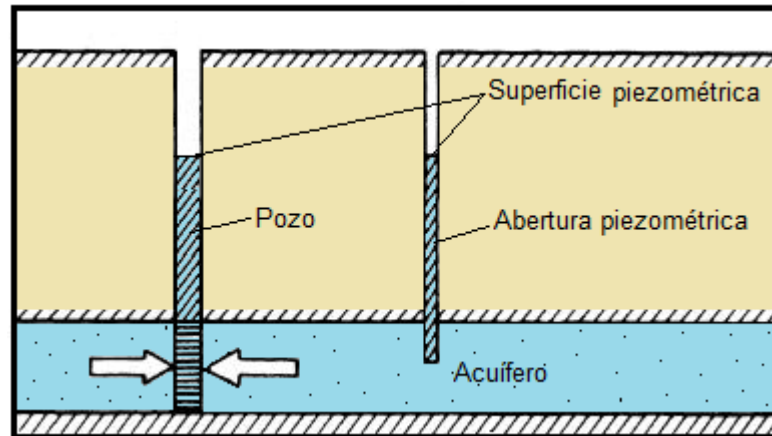


Figura 16. Abertura piezométrica utilizada para monitorear pozos, tomado de (Espinoza, 2009)

Todos los aspectos antes expuestos, son características necesarias para entender el comportamiento de cualquier acuífero, sin embargo es necesario sintetizar estos datos para obtener un modelo conceptual que ayude a entender de manera más práctica la dinámica de los acuíferos. INGEOMINAS (2004) define un modelo hidrogeológico conceptual como un esquema lógico, a nivel cualitativo y cuantitativo, que da a entender las propiedades, condiciones y procesos que rigen el comportamiento de los acuíferos, con base en la estructura interna, litología, gradiente hidráulico, entre otros, ejemplo de esto se muestra en la figura 17.

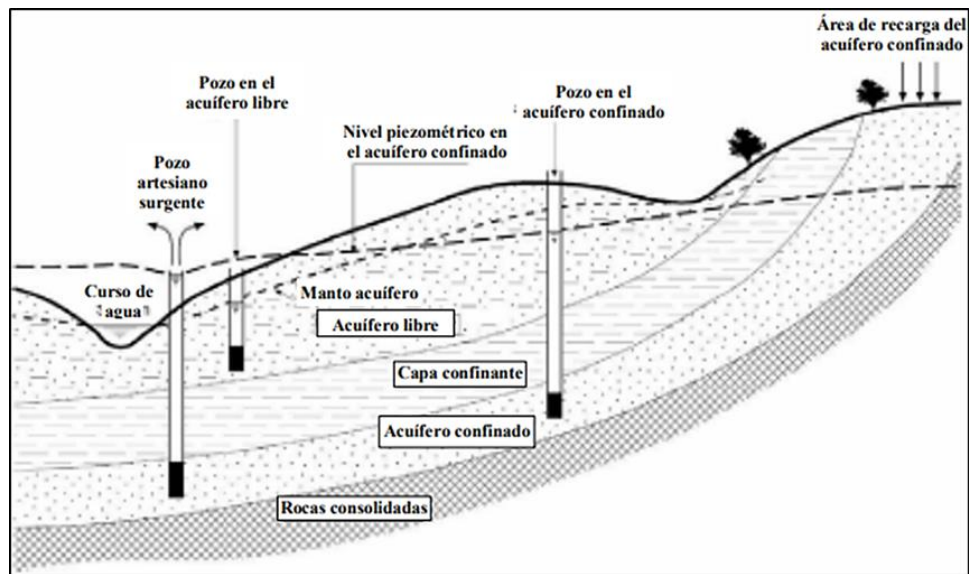


Figura 17. Perfil esquemático de un modelo conceptual, tomado de (IGRAC, 2007)

Asimismo, dicho modelo permite entender la dinámica de los acuíferos, para anticipar su comportamiento y determinar sus recursos extraíbles, además es útil para establecer nuevos puntos de extracción, predecir posibles consecuencias medio ambientales sobre el sistema y para la gestión efectiva del recurso hídrico.

II.2 MARCO GEOLÓGICO

La región de Aragua está caracterizada por cuatro unidades geomorfológicas: Serranía del Litoral, Depresión del Lago de Valencia, Serranía del Interior y Llanos Centrales. La cuenca del Lago de Valencia está constituida por sedimentos muy recientes, mientras que los principales orógenos alrededor del lago son: la Serranía del Litoral, al norte, y la Serranía del Interior al sur, ambas altamente afectadas por el metamorfismo regional (figura 18).

II.2.1 Unidades litodémicas

Regionalmente, la Serranía del Litoral está representada por la Faja Caracas y la Faja Ávila, y la Serranía del Interior, por su parte, posee la Faja Caucagua-El Tinaco, la Faja Villa de Cura y la Faja Loma de Hierro. De estas, la Faja Caucagua-El Tinaco y la Faja Caracas constituyen el basamento del Lago de Valencia, tal como se observa en la figura 18; las cuales se describen con sus distintas unidades litodémicas en la tabla 2.

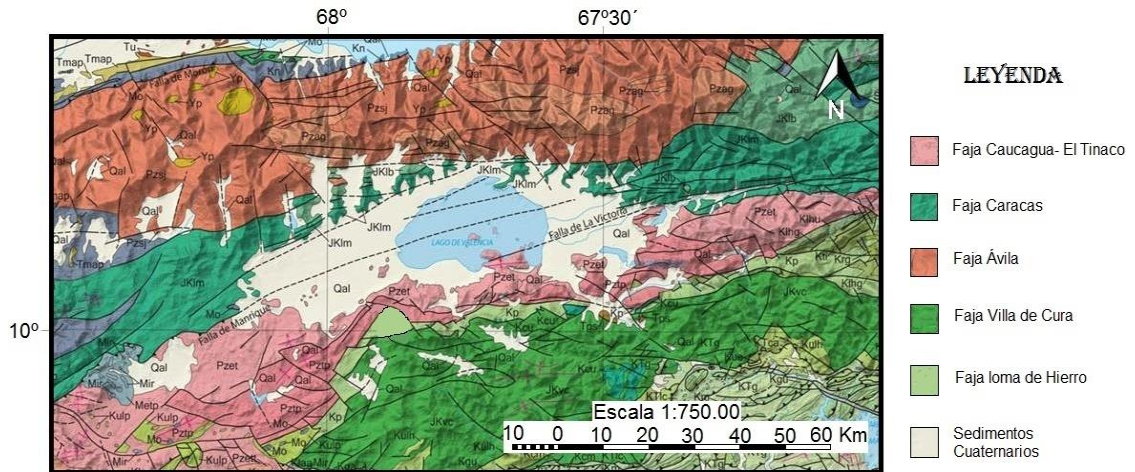


Figura 18. Distribución de sedimentos cuaternarios y unidades litodémicas alrededor del Lago de Valencia, tomado y modificado de (Urbani y Hackley, 2006)

Tabla 2. Unidades litodémicas presentes en la región de Aragua, (Comisión redactora del Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1956). Continúa

| UNIDAD LITODÉMICA | DESCRIPCIÓN | AUTOR |
|--------------------------|---|---|
| Filita de Tucutunemo | Forma parte de la Faja Caucagua-El Tinaco, meta-areniscas y meta-conglomerados con cantos volcánicos, y filitas carbonáticas con intercalaciones limosas y arenosas | (Grande, 1995), (Gonzalez, 1972), (Gonzales de Juana, 1980) (Shagam, 1960), (Beck, 1986) y (Smith, 1952) |
| Filita de Paracotos | Forman parte de la Faja Lomas de Hierro, son filitas, meta-conglomerados y meta-limolitas asociadas a filitas carbonáticas | (Bechara y Matos, 2006), (Shagam, 1960), (Gonzales de Juana, 1980), (Menendez, 1966) (Beck, 1986) y (Navarro, 1988) |
| Metalava de Los Naranjos | Forma parte de la Faja Caucagua-El Tinaco, son Meta-lavas macizas intercaladas con filitas pertenecientes a la Filita de Tucutunemo | (Grande, 1995), (Maclachlan, 1960), (Ostos, 1990), (Beck, 1986) y (Benjamini, 1986) |

Tabla 3. Unidades litodémicas presentes en la región de Aragua, (Comisión redactora del Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1956). Continuación

| UNIDAD LITODÉMICA | DESCRIPCIÓN | AUTOR |
|---|--|--|
| Complejo El Tinaco | Pertenece a la Faja Caucagua- El Tinaco, está representando por la Metadiorita de La Guacamaya y cuerpos menores de metatrandhjemita, además hay gran variedad rocas sedimentarias metamorfizadas | (Grande, 1995), (Mackenzie, 1966), (Renz Y Short, 1960) (Menendez, 1966) |
| Esquisto de Las Mercedes | Pertenece a la Faja Caracas, se definen como esquistos principalmente calcítico, con zonas micáceas. La litología predominante consiste en esquisto cuarzo-muscovítico-calcítico-grafítico con intercalaciones de mármol grafítico en forma de lentes | (Aguerrevere y Zuloaga, 1937) y (Ostos, 1990) |
| Esquisto de Las Brisas | Pertenece a la Faja Caracas, se reconoce metagrauvaca y metaconglomerado, esquisto cuarcífero y pocos afloramientos, de cuarcita carbonática. Las litologías gruesas son las más abundantes con porfidoclastos redondeados de cuarzo y feldespatos | (Ostos, 1990) y (Prada, 1983) |
| Metalava de Tiara | Pertenece a la Faja Loma de Hierro, se reconoce por su Meta-basalto porfídico, de color verde, de grano fino, formados por fenocristales grandes de augita, plagioclasas, magnetita titanífera y olivino, en una pasta de microcristales de augita y plagioclasa | (Beck, 1986), (Navarro, 1988), (Shagam, 1960) y (Smith, 1952) |
| Complejo Ofiolítico de Loma de Hierro | Forma parte de la Faja Loma de Hierro y se compone de peridotita serpentinizada, troctolita y gabro asociado a basalto. | (Beck, 1986) |
| Complejo El Ocumo | Conglomerados carbonaticos y rocas pelíticas con fragmentos de diabasa y gabro, matriz ferruginosa y con basamento de lavas y serpentinas de la Formación Tiara | (Beck, 1986) |
| Asociación Meta-volcanoclastica Villa de Cura | Pertenece a la Faja Villa de Cura, donde destaca la Meta-toba afanítica máfica, laminada, de color azul, que constituyen el 70% de la unidad, además de meta-lavas con fenocristales de Piroxeno y granofel compuesto predominantemente por cuarzo y albita no maclada | (Beck, 1986), (Navarro, 1988), (Shagam, 1960) |

II.2.2 Geología estructural

La cuenca del Lago de Valencia está limitada al sur por el sistema de fallas del río Guárico y al norte por el sistema de fallas de La Victoria, formando la separación entre la Faja Caucagua-El Tinaco y la Faja Caracas, ambos son sistemas de fallas con fuerte componente transcurrente dextral (Pereira, 2002).

- (a) Sistema de fallas de La Victoria: Representa un sistema de fallas longitudinales que se ha seguido por aproximadamente 140 km de distancia, desde la zona central del estado Miranda (Pereira, 2002) (figura 19). Este sistema posee una dirección noreste y se mueve con una tasa de 0,5 mm/año y cruza la Cordillera de la Costa al norte de Venezuela, cortando principalmente rocas metamórficas, bordeando la cuenca del río Tuy.
- (b) Sistema de fallas del río Guárico: Está ubicado en la región norcentral de Venezuela específicamente cruzando la Cordillera de la Costa en dirección oblicua Sureste, con una longitud de 120 km y una tasa de 0,3 mm/año, (figura 19) (Pereira, 2002).

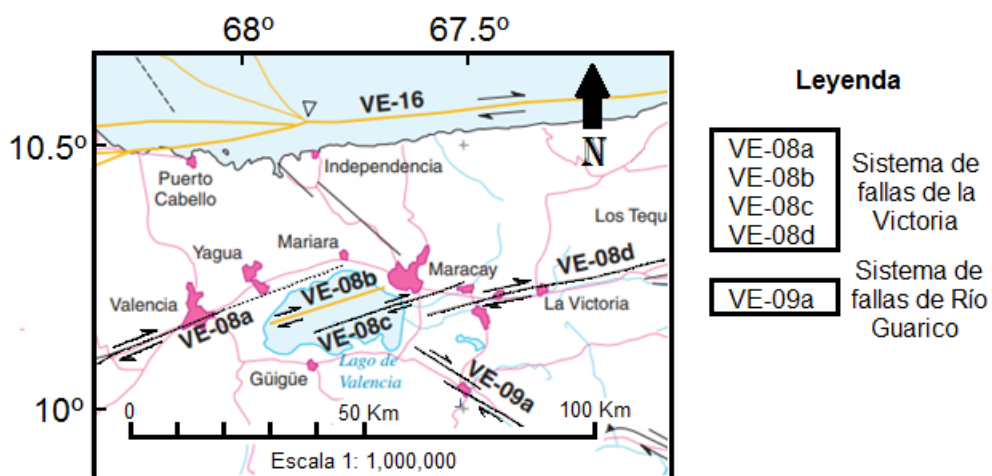


Figura 19. Sistema de fallas de la Victoria y Río Guárico, tomado y modificado de (Audemard Y Machette, 2000)

II.2.3 Sedimentos cuaternarios

En general, la cuenca del Lago de Valencia esta rellena, según Muñoz (1988), por sedimentos fluviales y lacustrinos, los cuales estan constituidos por una alternancia irregular de limos y arcillas, arenas y gravas de granulometría variable, de edad Cuaternario (ver figura 18).

De manera más específica, con la ayuda de perforaciones geológicas en zonas cercanas al Lago de Valencia y el acuífero de Maracay, dicho autor determinó que la planicie del Lago de Valencia, se caracteriza por tener granulometrías más finas intercaladas con gravas finas y medias.

A su vez, la llanura aluvial de Caño Aparo al sur y a escasos metros de la zona de estudio muestra sedimentos netamente arcillosos, mientras que en las vegas de río Paya, Polvorín y Pedregal ubicadas al noreste del Lago de Valencia y al norte de Turmero, municipio Mariño, se caracterizan por contener suelos limosos y arcillosos. Por otro lado, en las terrazas de río Aragua y Turmero se encuentran estratos de arenas finas y limosas sobre un substrato gravoso (Anexo I).

Díaz (1966) por su parte, explica, que sobre la autopista Valencia-Tejerías, a la altura de las estaciones de Servicio de Maracay y La Encrucijada, se efectuó una exploración del subsuelo, la misma permitió establecer que el subsuelo del sector, hasta las profundidades exploradas (20 m) estaba constituido por una secuencia de suelos predominantemente arenosos con intercalaciones de arcillas y limos. Las arenas tienden a ser limo arcillosas a limo-gravosas, generalmente de grano fino, mientras que las arcillas son generalmente limosas y los limos varían entre arcillosos y arenosos.

En general, el autor señala que se trata de materiales de fácil excavación, mediana a baja estabilidad para los taludes de corte y pobres para la fundación de estructuras pero con una permeabilidad primaria alta que permite la existencia de acuíferos en el sector.

Peeters (1968) describe los suelos circundantes del lago de Valencia separándolos según distintos periodos geológicos. Dichos periodos geológicos son Pleistoceno inferior, medio y superior-Holoceno representados en tres etapas: Valencia I, Valencia II y Valencia III (figura 20).

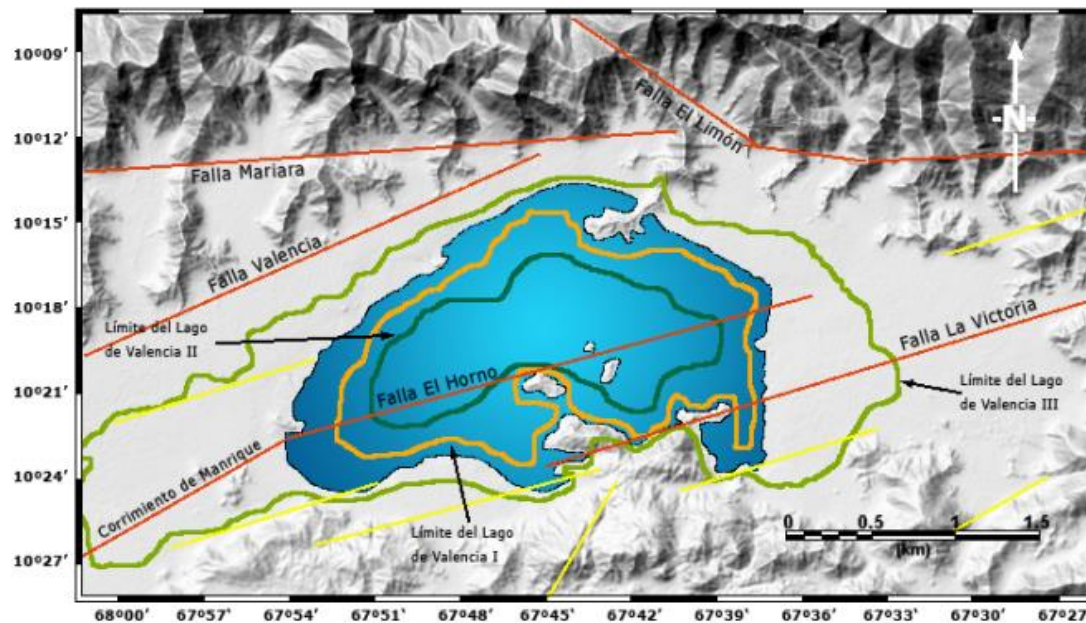


Figura 20. Etapas del lago de Valencia, Valencia I (línea naranja), Valencia II (línea verde oscuro) y Valencia III (línea verde claro), tomado de (Ughi, 2014)

El autor explica que la formación de los suelos que rodean el Lago de Valencia, en gran parte se debe a la evolución geológica del lago. En principio, un gran conjunto de fallas se produjo en la dirección este – oeste, entre la Serranía del Interior Central y la Serranía del Litoral, originando la formación de un graben, el cual es una depresión de forma alargada cuya orientación es esencialmente noreste, en el que, por ser el punto de coincidencia de ambas serranías, desembocan las aguas provenientes de las mismas. El arrastre de sedimentos provenientes de las serranías originó la formación de conos de deyección y sedimentos fluviales, los cuales terminaron de configurar una zona donde era muy factible el represamiento de agua; esta época es conocida con el nombre de lago de Valencia I, caracterizada por su extensión a lo largo del piedemonte de la Cordillera de la Costa, bordeando

ambas serranías, la del Interior la cual está ubicada al sur, y la del Litoral, la cual está ubicada al norte.

Este período se vio influenciado por un incremento alarmante de las temperaturas, lo cual trajo como consecuencia la desecación de gran parte del lago de Valencia I, y por ende una disminución considerable de su superficie, dando origen a una nueva época del lago conocida como lago de Valencia II. Ésta desecación mencionada anteriormente, trajo una serie de implicaciones, a parte de la disminución del área del lago, ya que los conos de deyección o aluvionales fueron avanzando en dirección al nuevo lago.

El transporte de sedimentos gruesos se vio favorecido por la existencia de una pendiente pronunciada, que provocaba un descenso de las aguas con mayor velocidad, por lo que fueron arrastrados: peñones, grava y arena gruesa, además de rocas meteorizadas de gran tamaño en su mayoría gneis (producto del considerable aumento de temperatura de las rocas ígneas ubicadas en la Cordillera). Estos grandes sedimentos se depositaron con la zona desecada del lago, ubicada al norte del mismo y solo los sedimentos más finos pudieron ser transportados, ya que a medida que se desplazaban más hacia el sur de Maracay, la pendiente iba menguando y con ellas la velocidad del río y su poder de arrastre de sedimentos. Esta condición de sedimentación fluvio-deltaica, se mantuvo durante mucho tiempo, ya que el agua bajaba por las montañas, y sus sedimentos se iban desplazando a lo largo de los ramales de los ríos.

Otro cambio de condiciones climáticas, en este caso de áridas a pluviales tuvo lugar en las cercanías del lago de Valencia, lo que trajo como consecuencia un comportamiento el cual se caracterizaba por las crecidas y retiradas de dicho lago, este periodo recibe el nombre de lago de Valencia III. Este proceso generaba lagunas cuando el lago se retiraba, en las cuales se favorecían los depósitos limo-arcillosos, distribuidos en forma de bolsones a lo largo de diferentes sectores del centro de la ciudad. El último crecimiento del lago, que tuvo lugar en la época cuaternaria, las

condiciones climáticas originaron la sedimentación de los suelos arenosos, podría justificando así la presencia de sendos bolsones de suelos de grano fino a gran profundidad.

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

El presente trabajo, cumple con el diseño de investigación experimental-de campo, del tipo descriptivo.

Ferrer (1993) explica que el diseño experimental, en general consiste en el método clásico de ensayo, resultados, observaciones y repetición del ejercicio, N cantidad de veces hasta obtener respuestas claras ante las hipótesis planteadas.

En el caso de campo, consiste en la adquisición de datos (variables en el tiempo) a través del trabajo de campo. Estos datos son procesados, manipulados y sometidos a un trabajo de laboratorio en general. Y, finalmente, es del tipo descriptivo, puesto que el objeto de investigación fue observado y descrito sin intervenir en su comportamiento natural.

La metodología de investigación empleada en el siguiente trabajo se llevó a cabo de acuerdo con los pasos presentados en el siguiente flujograma (figura 21).

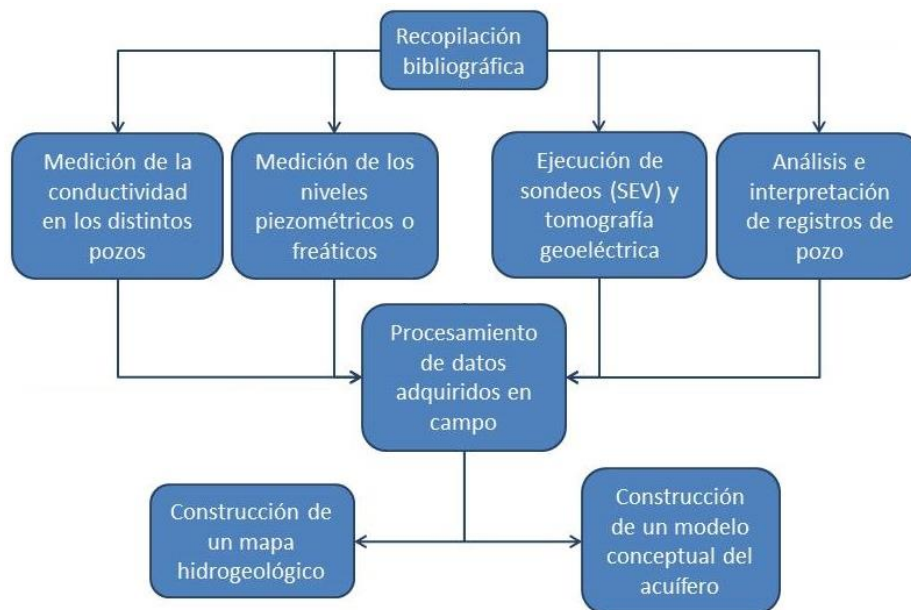


Figura 21. Flujograma de metodología aplicada, (Elaboración propia)

III.1 RECOPIACIÓN BIBLIOGRÁFICA

En esta etapa se revisó todo lo concerniente al marco conceptual teniendo en cuenta conceptos fundamentales. Luego se cumplieron los siguientes pasos:

1. Se realizó una recopilación bibliográfica del lugar de estudio, teniendo en cuenta tesis, informes técnicos, libros, artículos de revista y publicaciones científicas.
2. La empresa COALCO Estudios Hidrológicos, C.A., facilitó un total de 8 registros de pozos cuya ubicación se puede observar en la figura 30. Asimismo, la compañía Aguas Subterráneas Consulting, C.A. suministró un total de 5 sondeos eléctricos verticales ubicados según la figura 44.
3. Se recopilaron datos topográficos de la zona de trabajo proporcionados por la Hacienda Agropecuaria Punta Larga, esto ayudó a relacionar o diferenciar niveles piezométricos y freáticos que se encuentran a distintas profundidades.

III.2 SEGUIMIENTO DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS O FREÁTICOS

Se realizó un seguimiento de los niveles de agua, una vez por semana, que empezó el 23 de febrero del 2019 y culminó el 25 de febrero del 2020 con una duración total de 10 meses, ya que los meses marzo y diciembre del 2019 y enero del 2020 representaron vacíos de información por indisponibilidad de la sonda piezométrica. Con el objetivo de observar las profundidades piezométricas del agua y ver el comportamiento del acuífero, este seguimiento se ejerció sobre un total de 7 pozos localizados en el área de estudio según la figura 22.

De los cuales los pozos 3, 5 y 8 se mantuvieron permanentemente inactivos durante el intervalo de tiempo ya mencionado, mientras que los pozos 2, 4, 6 y 7 fueron clausurados y reabiertos de manera aleatoria por razones de mantenimiento. El pozo 1 por su parte, no pudo ser estudiado debido a distintos obstáculos que no permitieron el acceso de la sonda piezométrica dentro del pozo.

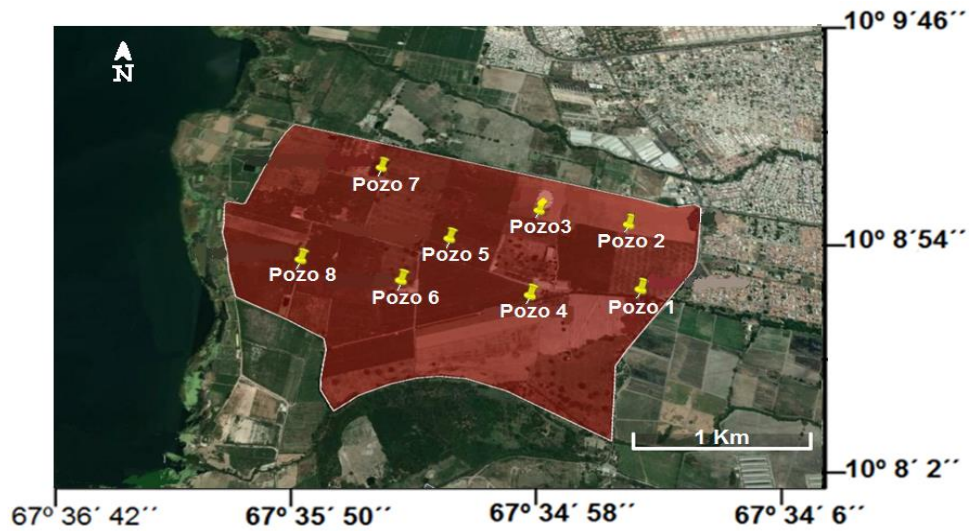


Figura 22. Ubicación de los pozos en la hacienda Punta Larga, (Tomado y modificado de Google Earth)

La medición de los distintos niveles de agua se llevó a cabo a través de los pozos con una sonda piezométrica, instrumento que posee un carrete donde se encuentra enrollado un cable con una cinta métrica adosada, en cuyo extremo sostiene una sonda eléctrica con el tamaño adecuado para introducirse en un piezómetro, tal como se observa en la figura 23.

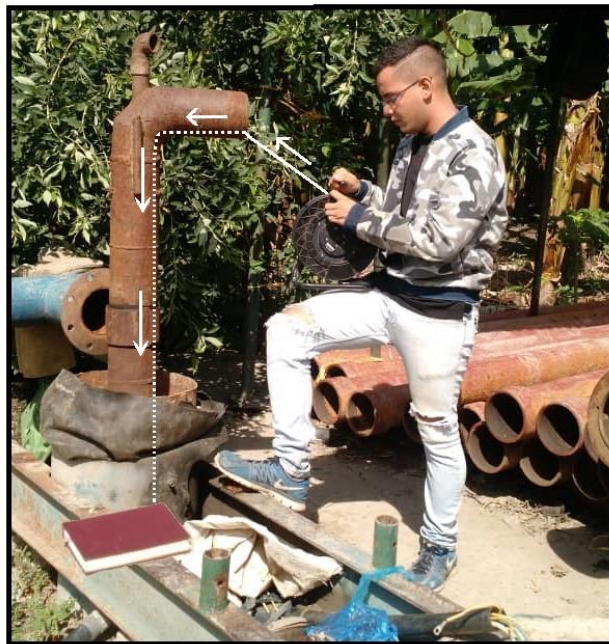


Figura 23. Sonda piezométrica utilizada para tomar profundidad en los pozos estudiados, (fotografía tomada en campo)

El modo de emplearlo es introduciendo la sonda a través del piezómetro, o punto de observación y con la ayuda del carrete descender el dispositivo hasta que el mismo llegue al nivel del agua, una vez que la sonda entre en contacto con el fluido esta emitirá una alarma lumínica y sonora que indica la llegada del dispositivo al agua, luego se debe proceder a anotar la profundidad medida desde el suelo, por ello fue necesario restar la altura a la que se encuentra el piezómetro respecto al suelo, como se ve en la figura 24.

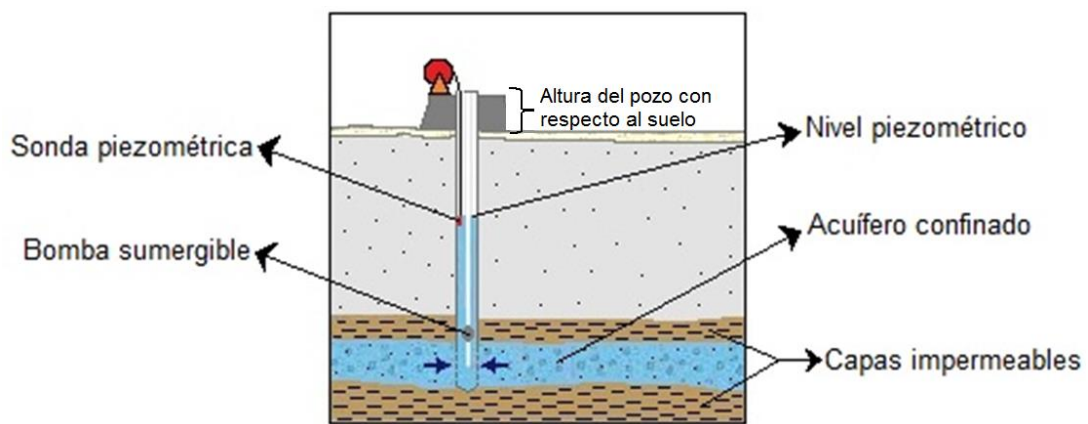


Figura 24. Uso de la sonda piezométrica, teniendo en cuenta la altura del pozo respecto al suelo, tomado de (Da Lio, 2013)

Es importante mencionar que, observar de forma estrictamente constante la variación de los niveles del agua, permitirá ver el comportamiento del reservorio de manera eficaz, minimizando posibles errores.

III.3 MEDICIÓN DE LA CONDUCTIVIDAD DEL AGUA DE LOS DISTINTOS POZOS PRESENTES

Para tomar la conductividad eléctrica del agua fue necesario el uso de un equipo llamado conductímetro portátil, ideal para el trabajo en campo, tal como se aprecia en la figura 25.



Figura 25. Conductímetro portátil utilizado en campo, (fotografía tomada en campo)

Para evaluar este parámetro se utilizó un recipiente de 2 litros, el cual fue previamente enjuagado con el agua de cada pozo estudiado para evitar una lectura errónea por parte del conductímetro. Posteriormente, se procedió a limpiar cuidadosamente la célula de conductividad con agua destilada.

Luego se sumergió la célula de conductividad en una solución cuyo pH era un valor conocido, esto para asegurarse que dicho dispositivo estuviese correctamente calibrado. Una vez calibrada la célula se procedió a remover con la misma ligeramente la solución a estudiar, y se dejó en reposo hasta que la medición se estabilizara y se pudiera tomar la lectura (figura 26).



Figura 26. Muestreo y lectura de conductividad en campo, (fotografía tomada en campo)

Con esto, se midió la conductividad de las aguas de los pozos 1, 6 y 7; en las fechas 21 de mayo de 2019 los pozos 1, 6 y 7, y el 16 de noviembre de 2019 nuevamente el pozo 7.

III.4 EJECUCIÓN DE LOS SONDEOS SEV Y DE TOMOGRAFÍAS GEOELECTRICAS

Para la ejecución de los métodos geofísicos geoelectrónicos se requirió usar el equipo SARIS facilitado por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), el cual es un sistema integrado portátil perfecto para el uso en campo, el mismo cuenta con una batería recargable, módulo multielectrónico, consola principal, electrodos de corriente y de potencial, entre otros como se puede ver en la figura 27.

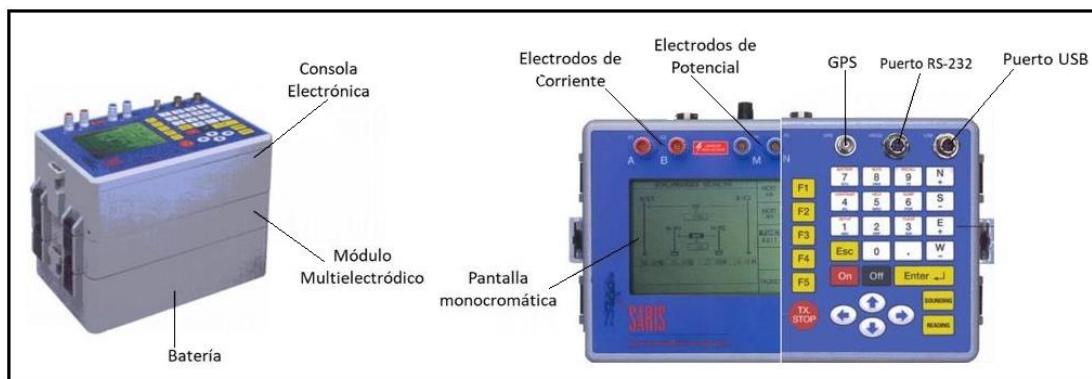


Figura 27. Sistema SARIS usado para SEV y tomografías geoelectrónicas, tomado de (Docplayer.com)

Gracias al dispositivo SARIS fue posible realizar tres sondeos eléctricos verticales y una tomografía eléctrica dentro del área donde se realizó el estudio, donde la distribución de los mismos se puede ver en las figuras 43 y 47 respectivamente.

El modo de empleo es sencillo, debe haber un operador que se encargue de la unidad SARIS a la hora inyectar la corriente continua y anotar las lecturas, mientras cuatro asistentes se dan la tarea de mover los electrodos según la configuración del tendido, el proceso puede tardar menos de 30 minutos en el caso

de los SEVs, en cuanto a las tomografías geoeléctricas tardan más, pero trabajando de manera eficiente el tiempo se extiende hasta tres horas máximo.

Para procesar los datos adquiridos en campo, en cuanto a los sondeos eléctricos verticales y la tomografía geoeléctrica se utilizó la siguiente fórmula para calcular la resistividad aparente:

Resistividad aparente:
$$Pa = \left(\frac{V}{I}\right) * K \quad \text{Ec. (5)}$$

Factor K:
$$K = \frac{\{PI * (AB^2 - MN^2)\}}{4MN} \quad \text{Ec. (6)}$$

Los valores dados por las ecuaciones anteriores son calculados y graficados por el software libre IPI2WIN® versión 3.0.1e, en donde se reproducen las curvas de campo en resistividad aparente y se generan las curvas teóricas para cada sondeo. Con esta misma herramienta se hizo el ajuste de la curva teórica a la de campo, lo cual generó una serie de capas con sus respectivas resistividades y espesores interpretados.

Para la tomografía geoeléctrica, fue necesaria la ayuda del Ing. Geofísico José Cavada. El mismo, tomo la resistividad aparente adquirida en campo y la proceso con el software libre RES2DINV® versión 3.5.3g que generó una sección trapezoidal que mostró la disposición en dos dimensiones de las capas presentes en el subsuelo.

III.5 ANÁLISIS DE REGISTROS DE POZO

En esta etapa se analizaron e interpretaron un total de 8 registros de pozo cercanos a la zona de estudio (figura 31). De estos registros estudiados, los registros H y G (Rg H y Rg G) no indicaban su ubicación, sin embargo, ambos registros revelan que se realizaron dentro de una parcela en el sector La Cuarta. Sector que se encuentra en la Parroquia San Martín de Porres limitada al norte por la Parroquia Santa Rita, al este por la Parroquia Palo Negro, al sur por la encrucijada de Palo

Negro y al oeste por el Lago de Valencia, por tanto, se asumió que fueron ejecutados en esta zona agrícola delimitada según la figura 31.

De manera general, se tomaron todas las descripciones litológicas hechas por los operadores y técnicos a cargo de las perforaciones en aquel entonces, y se procedió a construir cada una de las columnas estratigráficas. Cabe mencionar, que los registros H y G no poseen descripción litológica anexada, por ello se utilizaron los registros de Rayos Gamma para discriminar entre material arcilloso y arenoso y así, poder construir sus columnas.

Una vez construidas las columnas se correlacionaron las más cercanas entre sí y se establecieron las unidades características de la zona. Luego, para describir espacialmente la disposición de estas unidades se elaboró un corte geológico con dirección general E-W (figura 42).

A partir de los mismos registros, se interpretaron las profundidades en las cuales empiezan los niveles de saturación. Comparando directamente las curvas SP y SPR de cada registro y observando los cambios marcados que dividen cada una de las curvas en dos o más secciones con comportamientos totalmente distintos como puede verse en la figura 28. Estos cambios de comportamiento en ambas curvas, a la misma profundidad, evidenciaron la presencia del agua en cada registro.

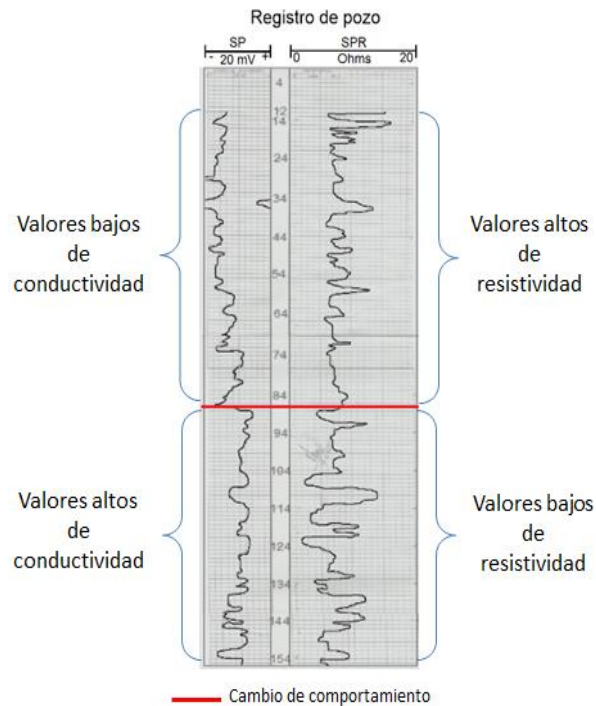


Figura 28. Comparación e interpretación de los cambios generalizados de las curvas SP y SPR, tomado y modificado de (COALCO Estudios Hidrogeológicos, C.A., 2010)

III.6 CONSTRUCCIÓN DEL MAPA HIDROGEOLÓGICO

IGRAC (2007) indica que los datos relativos al nivel del agua subterránea se presentan normalmente mediante mapas hidrogeológicos o de isolíneas, o con hidrogramas. Estos mapas presentan la altura del nivel del agua respecto a un nivel de referencia, generalmente el nivel del mar.

También indica que, normalmente, para su elaboración las isolíneas deben corresponder a un intervalo de tiempo determinado para indicar el valor medio a lo largo de este periodo de tiempo y también mostrar los niveles del manto acuífero o bien la profundidad a la que éste se encuentra.

Las medidas de los niveles de agua deben ser llevadas al mapa para cada sondeo señalado y de forma separada para cada una de las diversas unidades hidrogeológicas. La fecha o el periodo de tiempo correspondiente a las medidas deben quedar reseñados en el mapa.

Igualmente, menciona que, para marcar las líneas de igual potencial, los puntos se deben unir a mano o mediante un programa de trazado. Para este propósito, se deberá tener un especial cuidado en unir solamente las medidas de las mismas fechas o los periodos de tiempo correspondientes a la misma unidad hidrogeológica, para evitar resultados equivocados.

La dirección del flujo subterráneo puede indicarse trazando líneas perpendiculares a las isopiezas, el sentido del flujo va de la altura más alta a la más baja y esto se puede indicar gráficamente con flechas. Un claro ejemplo de un mapa hidrogeológico se puede ver en la figura 29, donde se muestra un mapa que exhibe la variación del espesor de un acuífero.

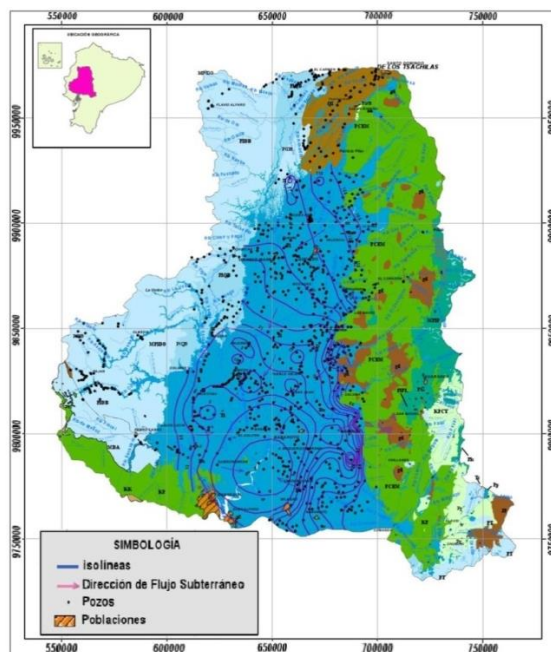


Figura 29. Ejemplo de mapa hidrogeológico, (INAMHI, 2005)

III.7 CONSTRUCCIÓN DEL MODELO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO

IGRAC (2007) indica que para construir correctamente un modelo conceptual es preciso ubicar o establecer un mapa hidrogeológico de la zona a estudiar, para así elegir una sección que abarque en su totalidad todo el sistema de aguas subterráneas. Del mismo modo se deben tener claros aspectos como:

- (a) Litología
- (b) Numero de acuíferos
- (c) Tipos de acuíferos
- (d) Capas impermeables
- (e) Dirección de flujo
- (f) Niveles piezométricos
- (g) Basamento
- (h) Puntos de recarga
- (i) Puntos de descarga

Una vez reunidos los parámetros ya mencionados es posible ilustrar el modelo conceptual a través de un perfil esquemático, un mapa o modelo 3D como se ve en la figura 30.



Figura 30. Ejemplo de modelo conceptual, (IGRAC, 2007)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

En este capítulo se presentan cada uno de los resultados obtenidos según la metodología expuesta, para dar cumplimiento a los objetivos trazados en el presente Trabajo Especial de Grado.

IV.1 CARACTERIZACIÓN LITOLÓGICA

Esta sección expone el análisis e integración de los métodos geofísicos eléctricos, junto con la información geológica recopilada en los antecedentes, que dieron como resultado la interpretación litológica existente al este del Lago de Valencia.

IV.1.1 Registros de pozos

En este apartado se procede a evaluar los registros de pozos (Rg) proporcionados por COALCO Estudios Hidrológicos, C.A., realizados en los años 1996, 2009, 2010 y 2012 en las adyacencias de la zona de estudio, específicamente en la zona Base Aérea Libertador Maracay (Rg A, C y E), Santa Rita (Rg F) y al sur de la población de Palo Negro cerca de la urbanización La Coquera (Rg D y B), además de los Rg H y G ubicados en el sector La Cuarta para un total de 8 registros de pozos localizados al este del Lago de Valencia distribuidos según el mapa de la figura 31.

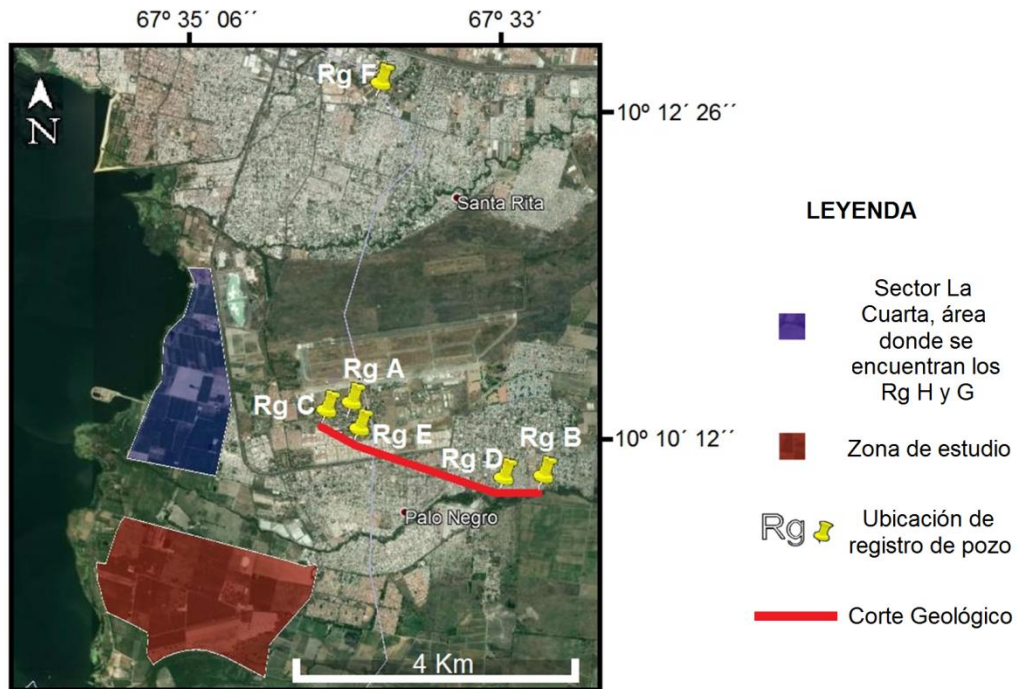


Figura 31. Mapa de ubicación de las perforaciones y sus registros de pozo, (Tomado y modificado de Google Earth)

Todos los registros presentan una curva de Potencial espontáneo (SP en mV), y otra de Resistividad (SPR en ohms), además algunos registros presentan una curva de Gamma Ray (GR en cps). Gracias a la evaluación de las curvas fue posible identificar el posible nivel de saturación de fluidos, teniendo presente que, en general para este segmento saturado, los valores de la curva SP tienden a aumentar mientras que los valores de SPR disminuyen, en cuanto a los segmentos del pozo que no están saturados de fluido, la curva SP arrojará valores en descenso y la curva SPR valores ascendentes.

Este cambio de comportamiento, con el cual se identificó el posible nivel saturado, se marca a continuación con una línea roja en las siguientes figuras (figura 32 a la 39), igualmente se muestra la litología con su descripción y escala.

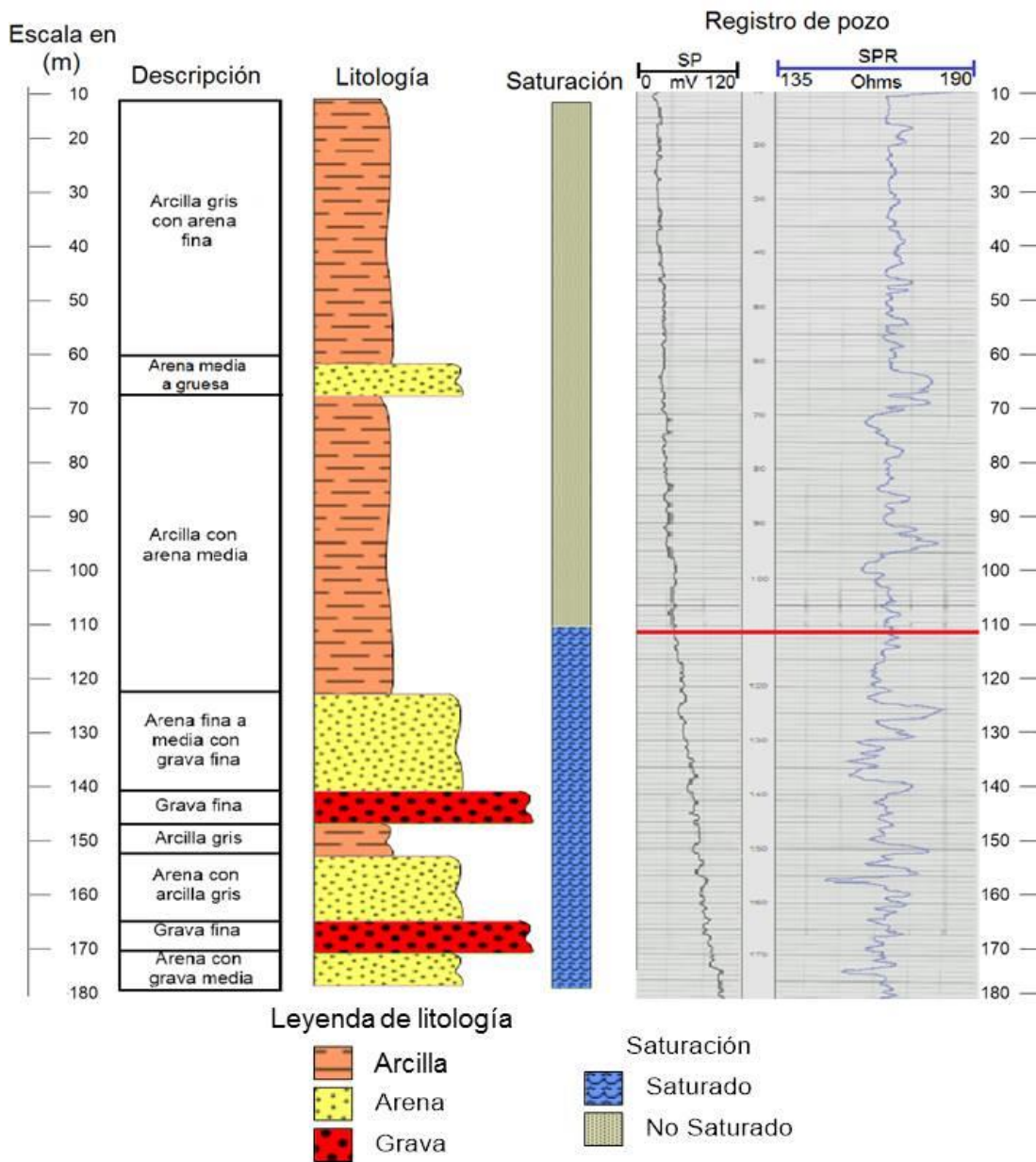


Figura 32. Caracterización litológica del subsuelo Rg A, (Elaboración propia)

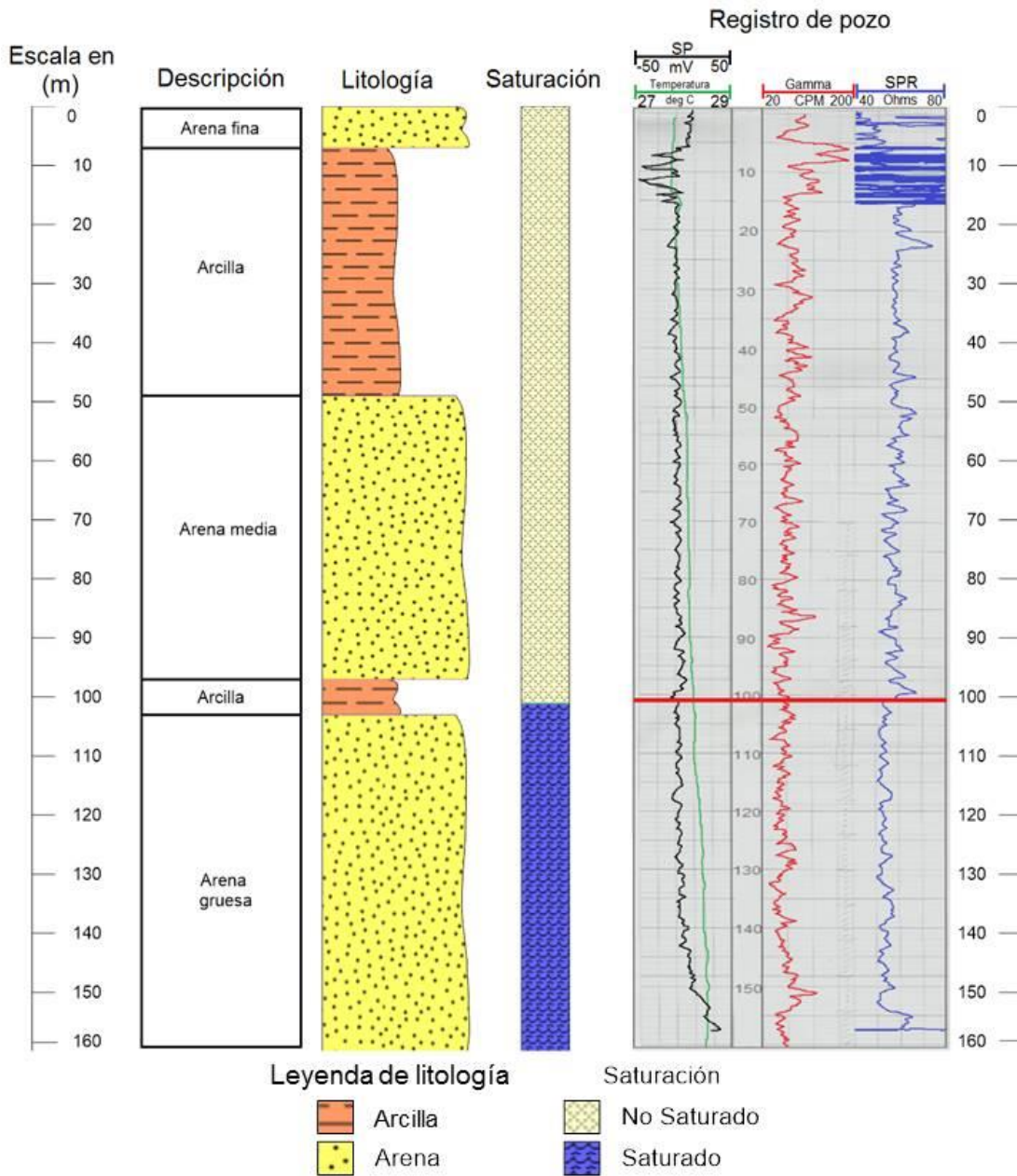
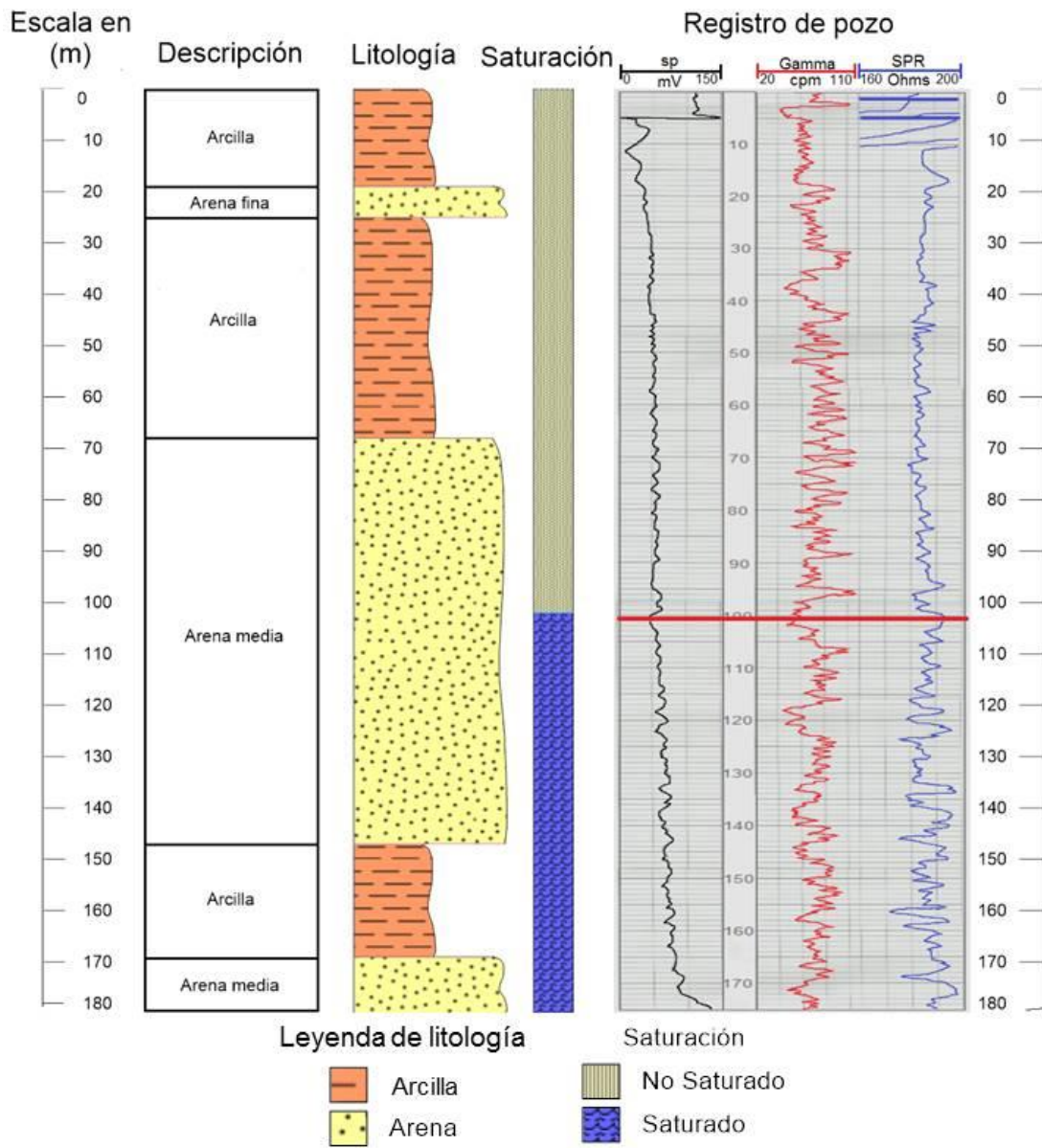


Figura 33. Caracterización litológica del subsuelo Rg B, (Elaboración propia)



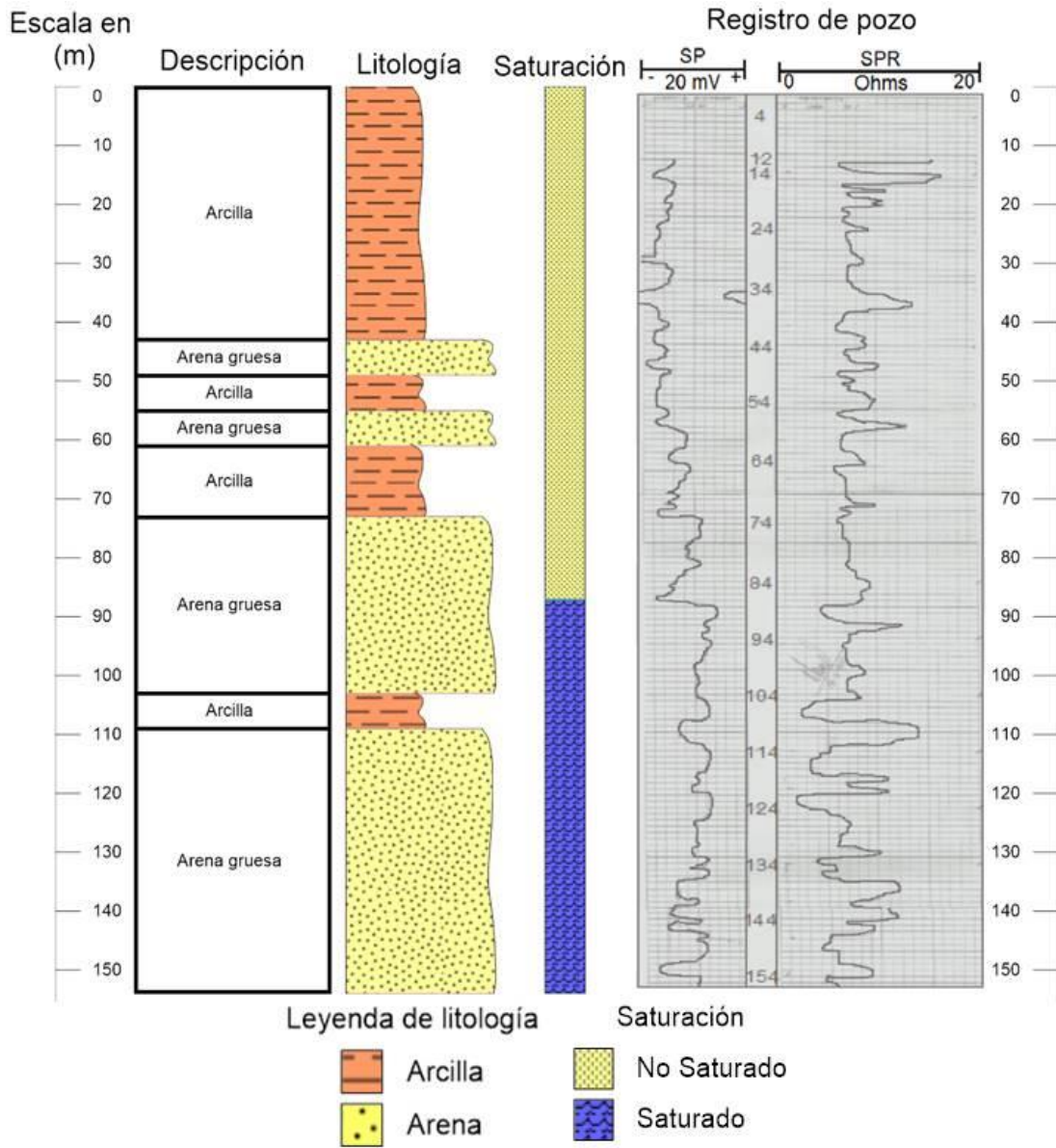


Figura 35. Caracterización litológica del subsuelo Rg D, (Elaboración propia)

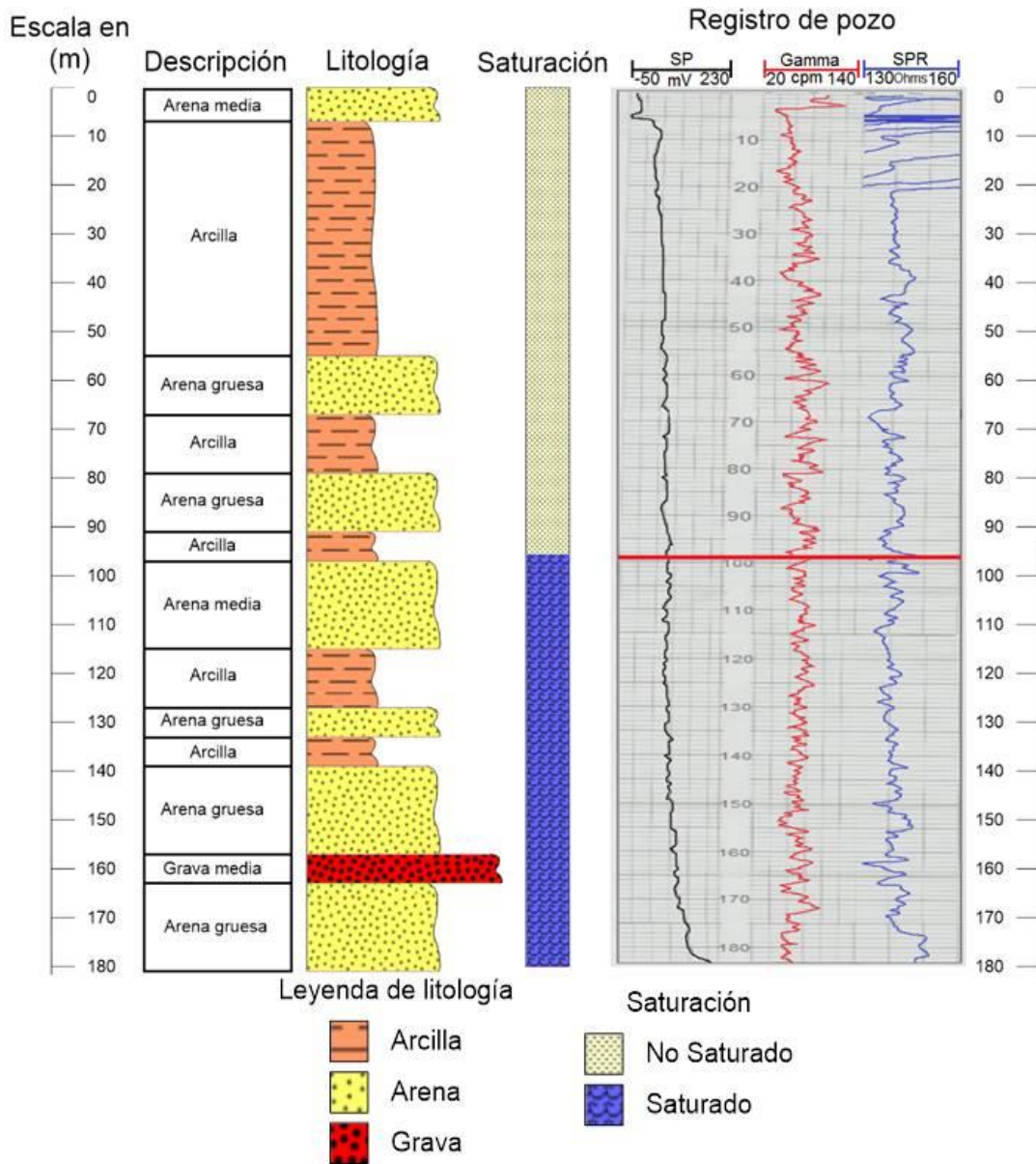


Figura 36. Caracterización litológica del subsuelo Rg E, (Elaboración propia)

En el caso de los registros Rg G y Rg H no poseen las observaciones litológicas, por tanto, fue necesario analizar a detalle las curvas de GR para discriminar materiales arcillosos y materiales arenosos, considerando que, el mineral arcilla, en general, contiene una amplia variedad de elementos, entre los cuales los elementos radioactivos son bastante comunes. Mientras que, el material arenoso por su parte, contiene en su gran mayoría Cuarzo, Feldespatos, y poco o nada de elementos radioactivos.

Con base en esto, se interpretó la litología de ambas columnas, donde se observó gran similitud en la distribución estratigráfica de las demás columnas de la zona. Cabe acotar que, las curvas de GR, SP y SPR de ambos pozos adquieren rasgos parcialmente similares a las curvas de los pozos A y E, corroborando así la correcta interpretación y relación de los dos registros de pozos con las perforaciones presentes al este del Lago de Valencia.

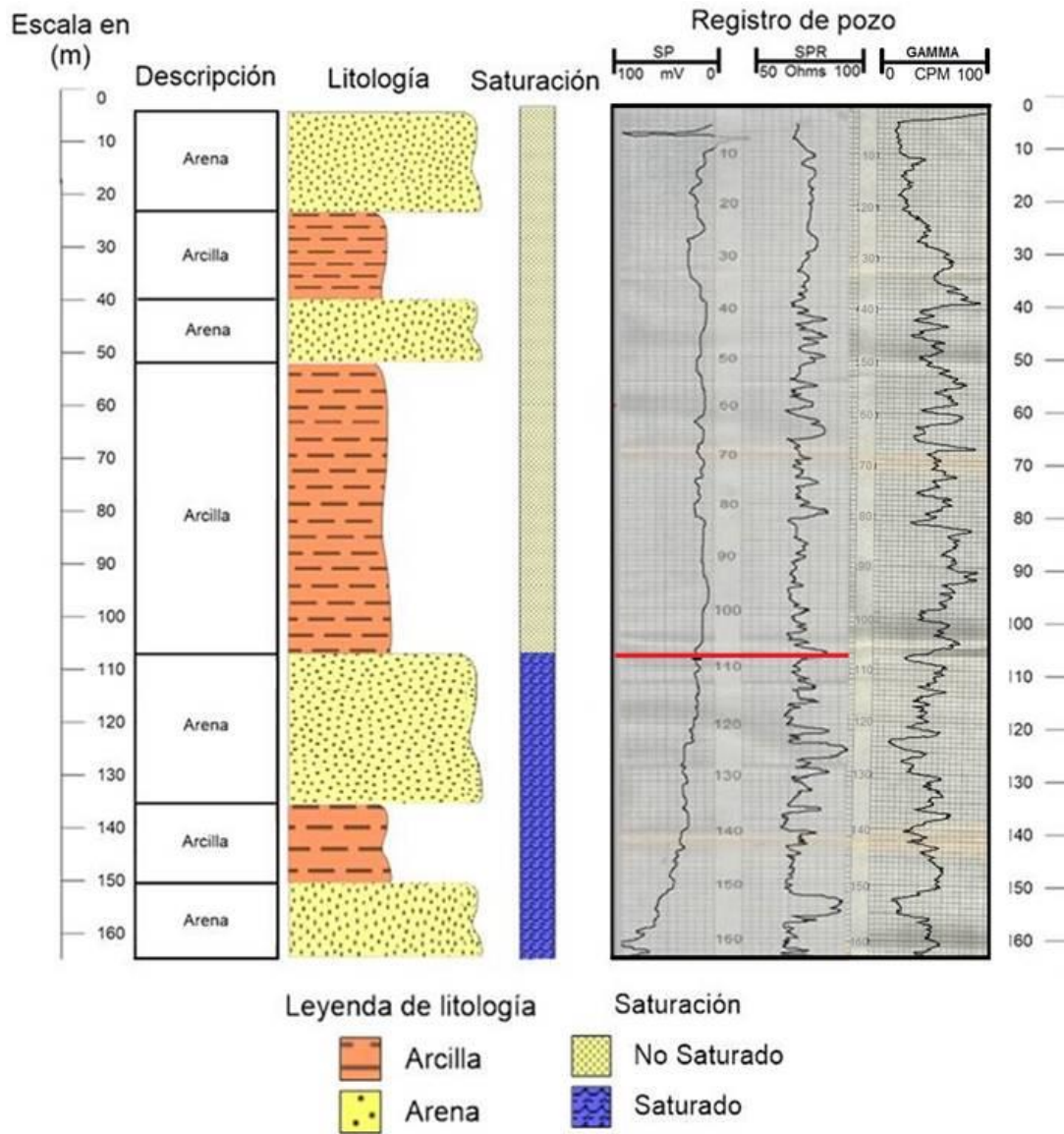


Figura 38. Caracterización litológica del subsuelo Rg G, (Elaboración propia)

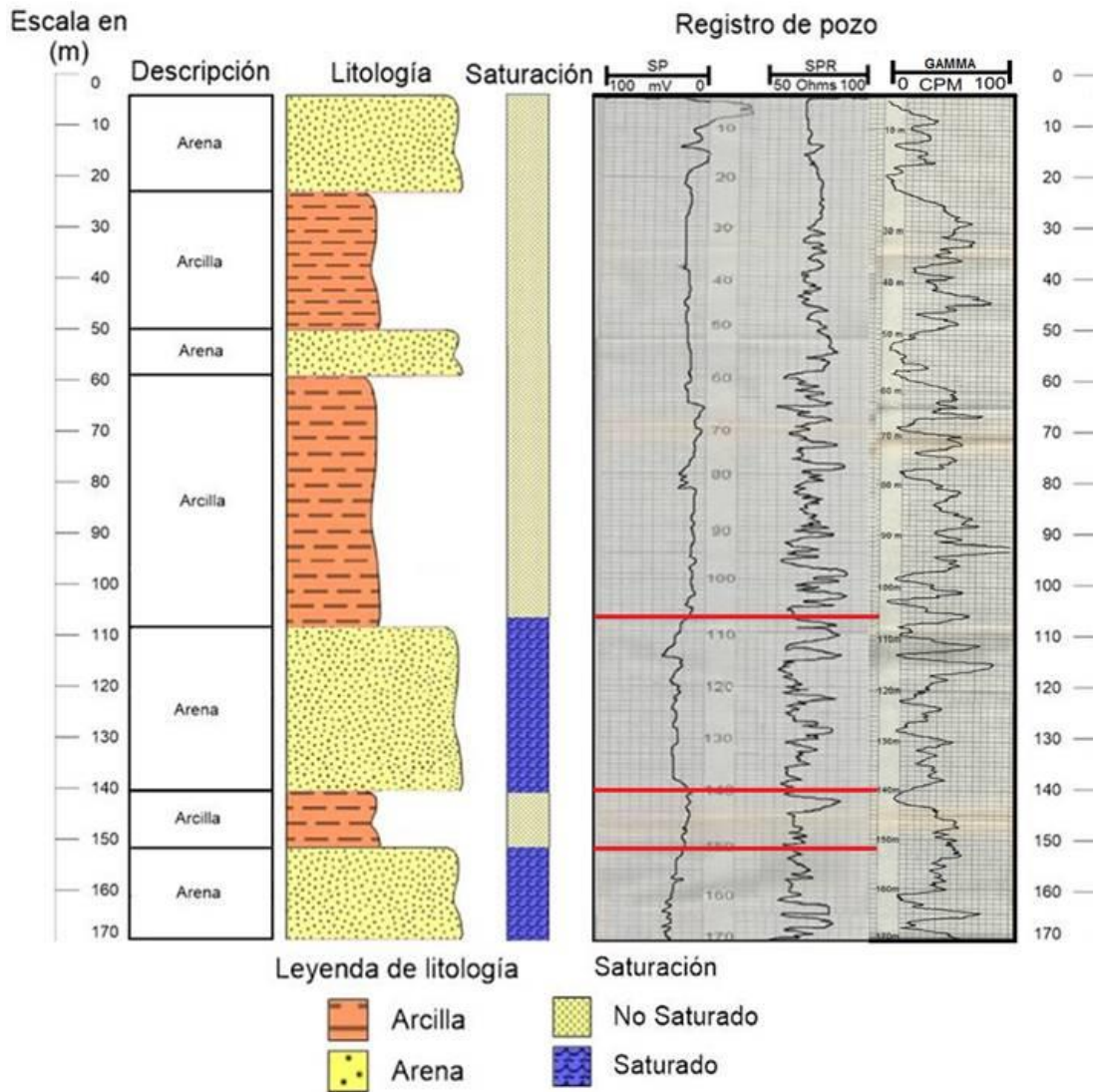


Figura 39. Caracterización litológica del subsuelo Rg H, (Elaboración propia)

En general, las primeras capas de sedimentos con profundidades de 0-70 m (Rg B, C, D y E) y de 0-110 metros (Rg A, F, G y H) son principalmente arcillosas con la existencia de algunas capas delgadas de arena. Al superar estos rangos de profundidad se empiezan a visualizar materiales de grano más grueso, en su mayoría arena.

IV.1.2 Correlación de pozos

Una vez establecidas las litologías características de cada registro, se procedió a correlacionar las columnas de los registros más cercanos entre sí, de acuerdo con la figura 31. Asimismo, se interpretaron las unidades presentes, con base a la litología vista anteriormente, y en la correlación efectuada como se presenta en la figura 40.

Es importante explicar que, aunque los Rg A y F se encuentran bastante distantes entre sí (figura 31) fueron correlacionados, ya que poseen rasgos muy similares entre sí, así como también mantienen gran similitud con los Rg H y Rg G.

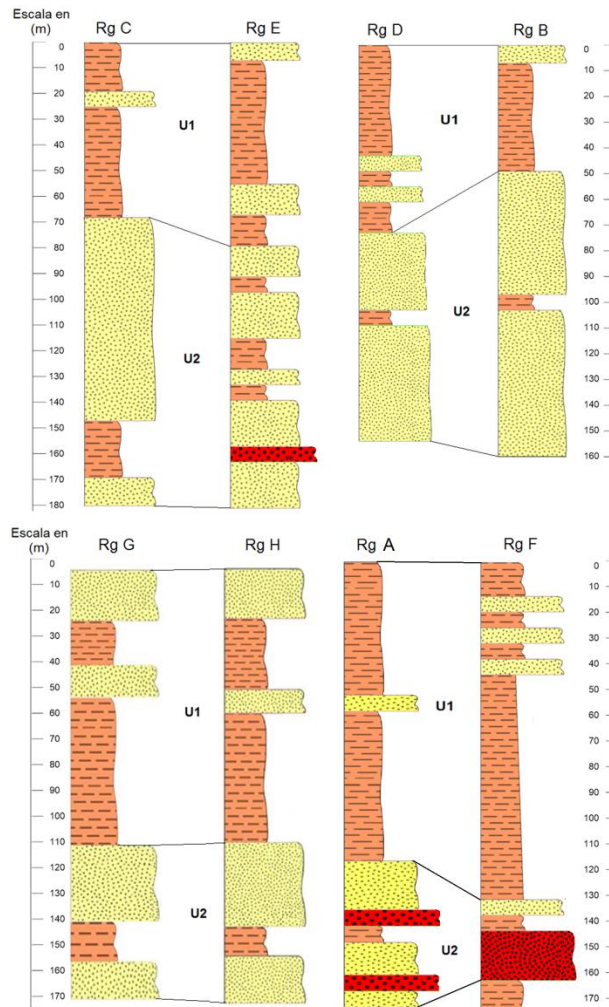


Figura 40. Correlaciones y unidades observadas a partir de los registros de pozo, (elaboración propia)

Los 8 pozos coinciden en dos unidades, la primera unidad U1 es principalmente arcillosa con presencia de capas de arena, esta unidad armoniza con un ambiente de bajo nivel de energía. La unidad U2, en su mayoría es arenosa y grada a grava fina en algunos sectores (Rg A, E y F), además posee una distintiva capa de arcilla, separando dos niveles arenosos espesos, que se encuentra en cada una de las columnas, la unidad evidencia niveles de energía más altos que pueden corresponder a ambientes de tipo aluviales y/o fluviales.

Tomando en cuenta esta información, se construyó una columna general (figura 41) que representa la litología del subsuelo presente al este del Lago de Valencia.

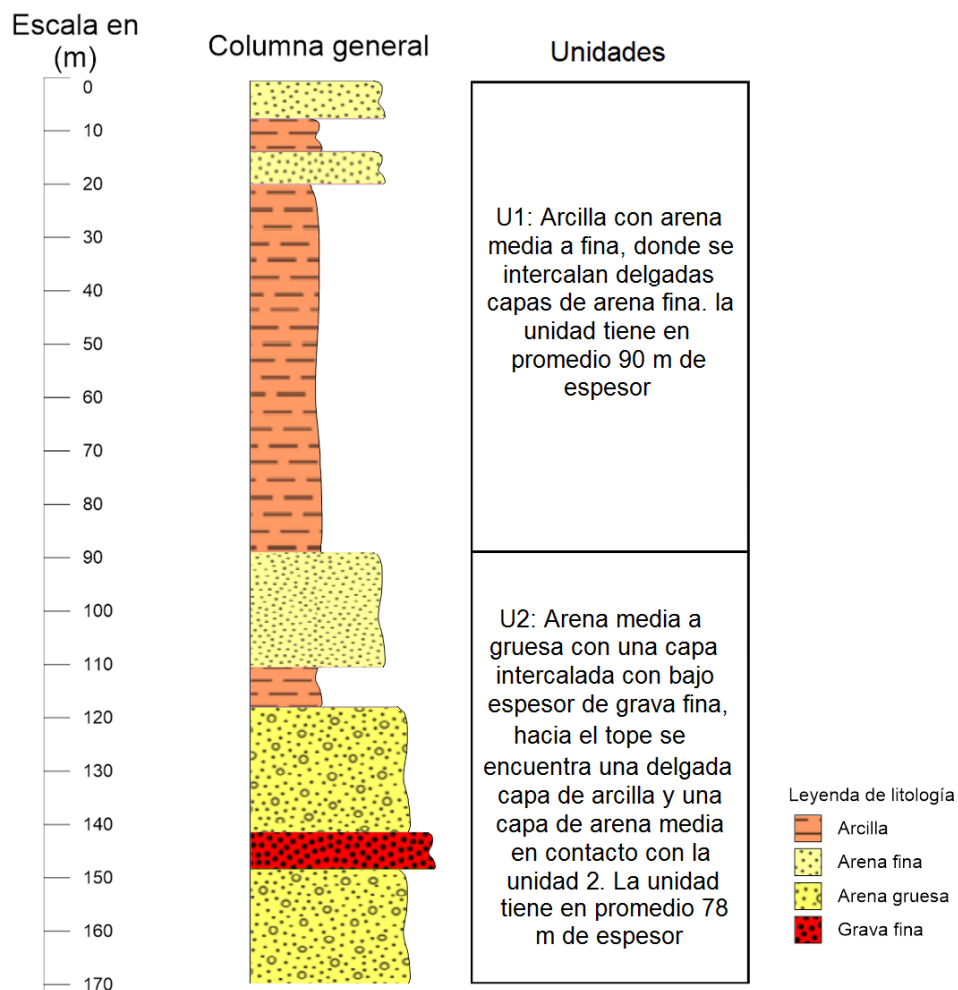


Figura 41. Columna general, (elaboración propia)

La Unidad 1 está caracterizada por ser principalmente arcillosa con inclusiones de capas o lentes de arena fina hacia el tope, y gana espesor en dirección norte llegando a tener un promedio de 118 m de espesor (Rg F). Mientras que, en dirección sur disminuyen los espesores, llegando a tener un promedio de 69 m de espesor cerca de la zona de estudio.

Por su parte, la Unidad 2 es, en su mayoría, de arena gruesa y grava fina con arcilla y arena media ubicada hacia el tope. La arena, infrayacente a la capa de arcilla, posee su granulometría más fina hacia el oeste alrededor de la ubicación de los Rg A, C y E, y su granulometría más gruesa hacia el norte en la zona de Santa Rita (Rg F) y hacia el este en el extremo sur de la población de Palo Negro (Rg B y D). La unidad se encuentra a mayor profundidad en dirección oeste (Rg H y G), y también en dirección norte con base al Rg F. Sin embargo, este último registro exhibe una capa de arcilla en la base, la cual podría ser el posible basamento de la unidad o bien la capa de arcilla perteneciente a la unidad, que en dicho caso estaría mucho más profunda que en los Rg A, H y G.

Es importante señalar que, a pesar de la gran cercanía entre los pozos correspondientes a los Rg A, C y E (figura 31), el espesor y profundidad de las unidades 1 y 2 respectivamente vistas en el Rg A es totalmente opuesta a los espesores y profundidades presentados en los Rg C y E (figura 40). Lo cual, marca un cambio brusco de los espesores y profundidades de ambas unidades en la zona de la Base Aérea Libertador Maracay, por ende, se establece que, a partir de la ubicación de Rg A hasta la ubicación de Rg F la unidad 1 posee sus mayores espesores y la unidad 2 se encuentra a mayor profundidad.

Finalmente, tomando en cuenta la gran profundidad y granulometría más fina que adquiere la Unidad 2 en dirección oeste (Lago de Valencia), además del aumento granulométrico en dirección norte y este, se puede interpretar que el aporte de sedimentos viene del norte (Rg F) y del este (Rg B y D), acumulando los

clastos más finos en dirección oeste (Rg H, G y el Lago de Valencia) donde el nivel de energía es más tranquilo.

Con las unidades ya definidas, se construyó un corte (figura 42) cuya orientación general es E-W (figura 31), que muestra la disposición espacial de la unidad 1 con sus espesores mínimos y la unidad 2 con sus espesores máximos, con el objetivo de exhibir la configuración estratigráfica más próxima a la zona de estudio.

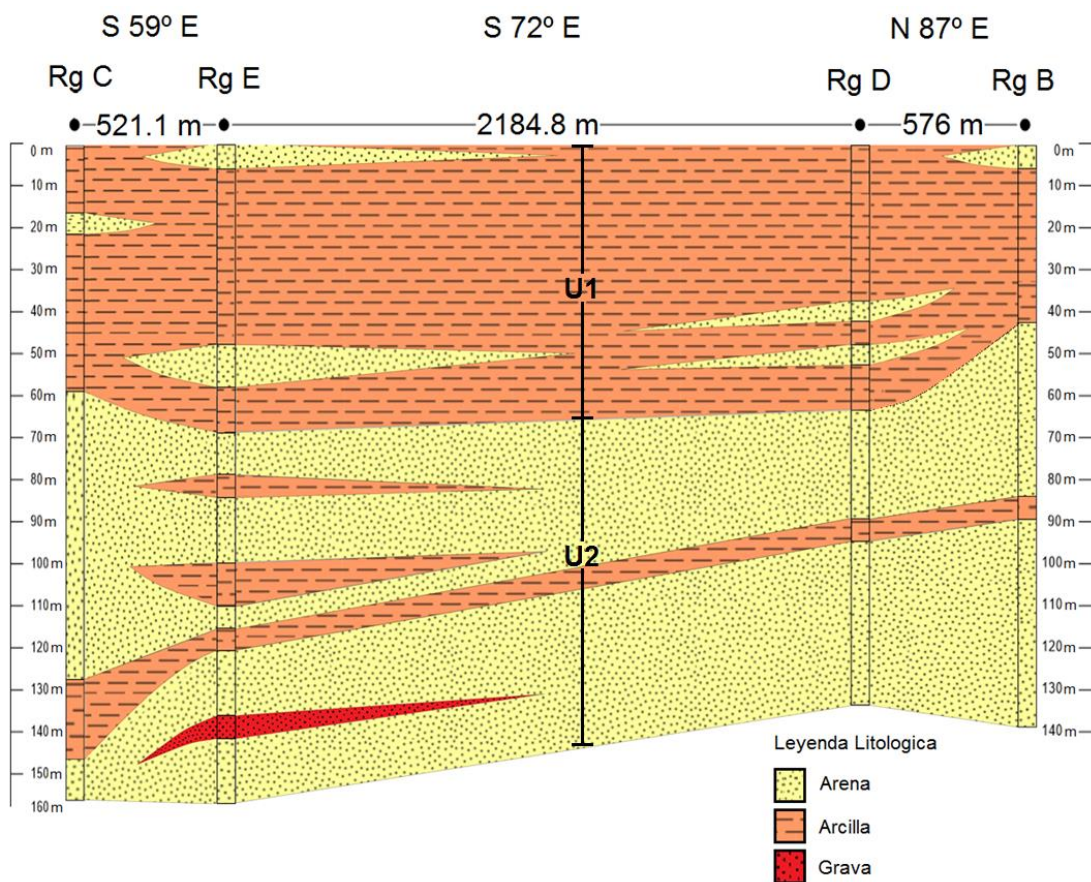


Figura 42. Corte E-W al este del Lago de Valencia, (elaboración propia)

Es de notar que la unidad 1 se muestra plenamente arcillosa, pero con presencia de lentes arenosas, además de un sutil aumento del espesor en dirección oeste (Rg C). La unidad 2 por su parte, es arenosa con algunos lentes arcillosos, y su

granulometría más gruesa a partir de los 90 m de profundidad, a su vez puede visualizarse un sutil aumento de la profundidad de la unidad en dirección oeste.

IV.1.3 Métodos geofísicos eléctricos

En la zona de estudio (figura 2) se realizaron un total de 3 sondeos eléctricos verticales (SEV) cercanos al pozo 4 de la zona de estudio en el mes de abril del 2019, que pueden observarse en la figura 43. Estos SEV fueron procesados e interpretados con el software IPI2WIN y plasmados con la ayuda del software STRATER (Anexos II).

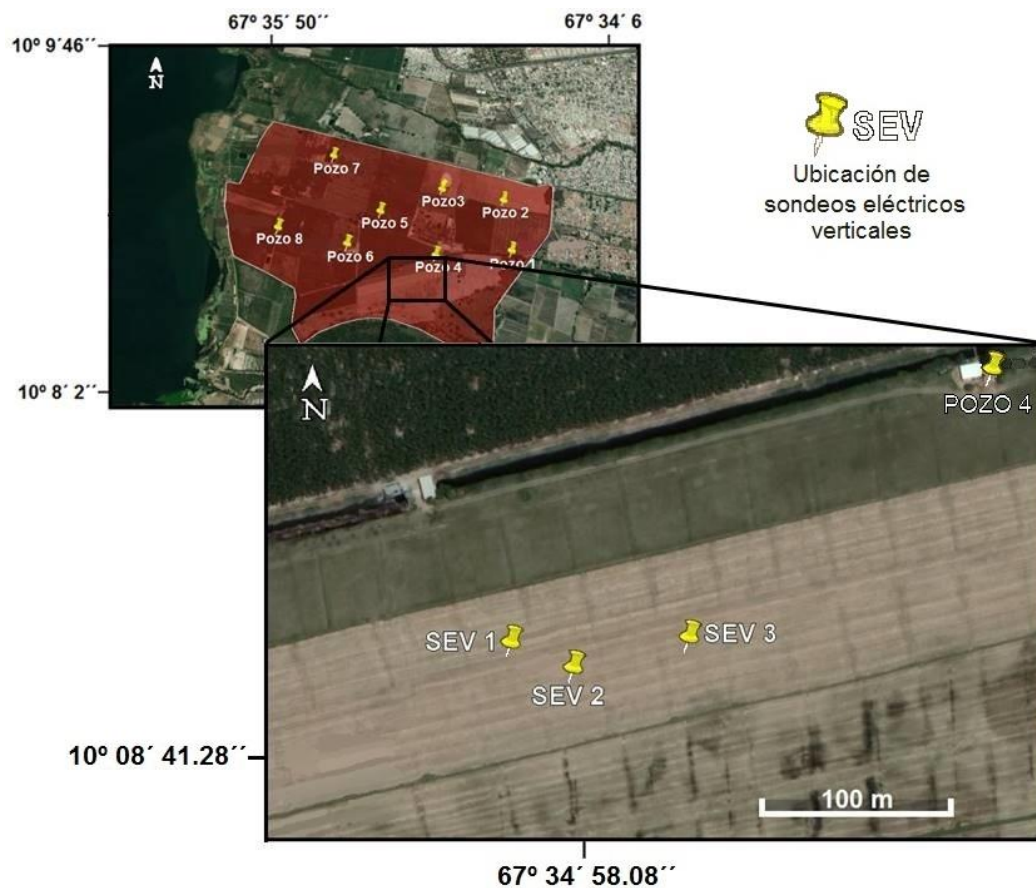


Figura 43. Sondeos eléctricos verticales realizados en la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)

Además, también se interpretaron los sondeos eléctricos verticales ejecutados por Aguas Subterráneas Consulting, C.A. en el año 2007, los cuales se realizaron a 5,1 Km de la zona de estudio en dirección sur, específicamente en una zona agrícola

ubicada entre las poblaciones de Magdalena y Tocatorón, tal como se observa en la figura 44.

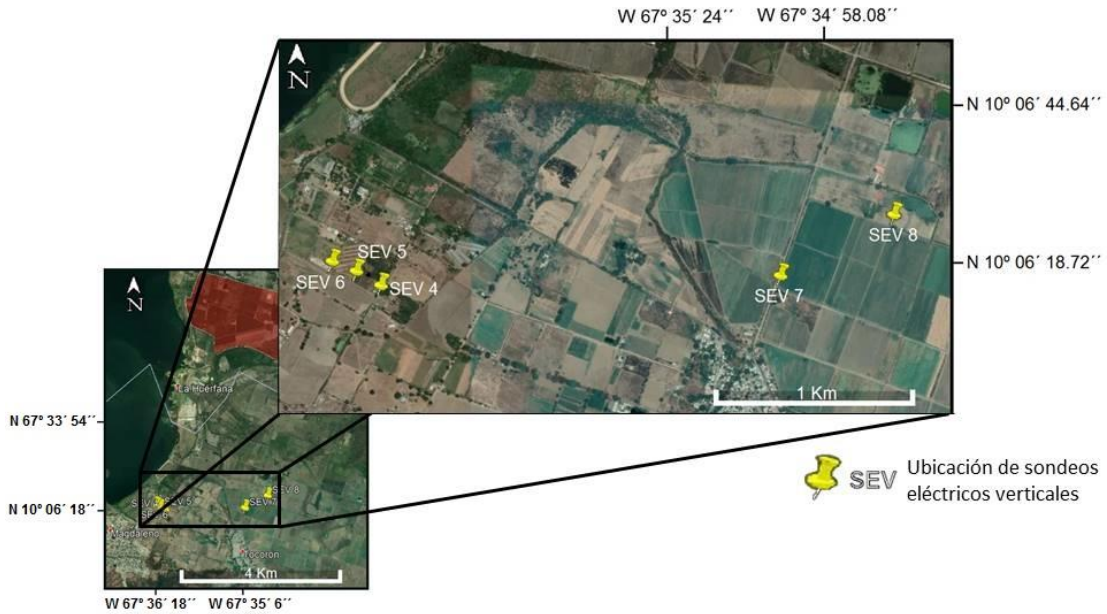


Figura 44. Sondeos eléctricos verticales realizados al sur de la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)

A continuación, se muestra en la figura 45 la interpretación de los 3 sondeos efectuados dentro de las instalaciones de la hacienda donde se realizó la investigación.

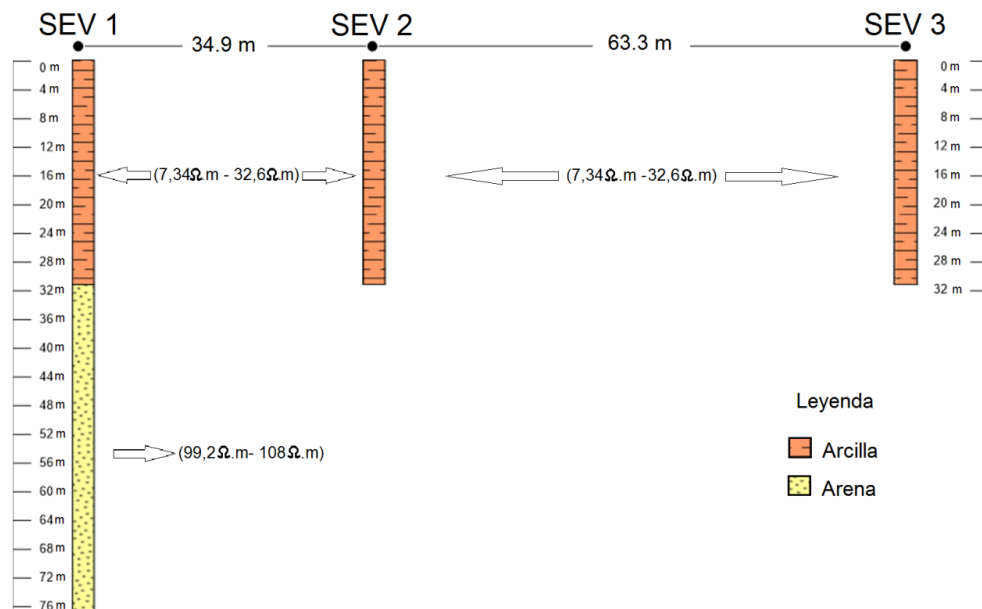


Figura 45. Sondeos eléctricos verticales ejecutados en la zona de estudio, (elaboración propia)

Se observa como semejanza principal la presencia de arcilla en los primeros 32m de profundidad lo cual concuerda con lo definido en la Unidad 1. Solo el SEV 1 muestra la existencia de una posible arena después de los 32 m de profundidad.

De igual forma, la interpretación de los sondeos hechos en el año 2007, revelan un espesor promedio de 62 m de arcilla, con algunas capas de arena hacia el tope (figura 46). Esta interpretación coincide, parcialmente, con los resultados obtenidos de los sondeos hechos en la zona de trabajo y con la Unidad 1.

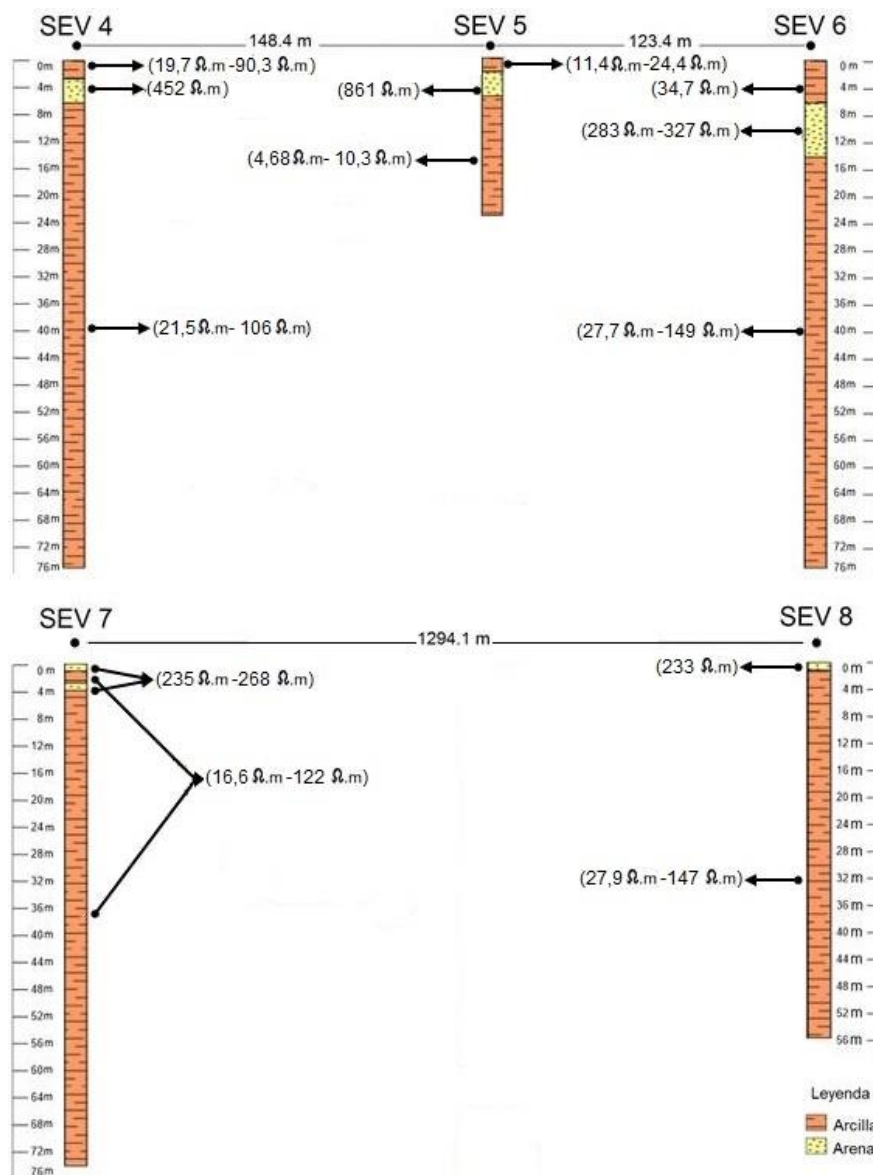


Figura 46. Sondeos eléctricos verticales hechos al sur de la zona de estudio, (elaboración propia)

De igual manera, se realizó un perfil geoelectrico dentro de la zona de estudio cerca del Pozo 7, con una orientación N 76° W como se puede visualizar en la figura 47, con el objetivo de ver la litología e identificar la configuración estratigráfica del subsuelo.

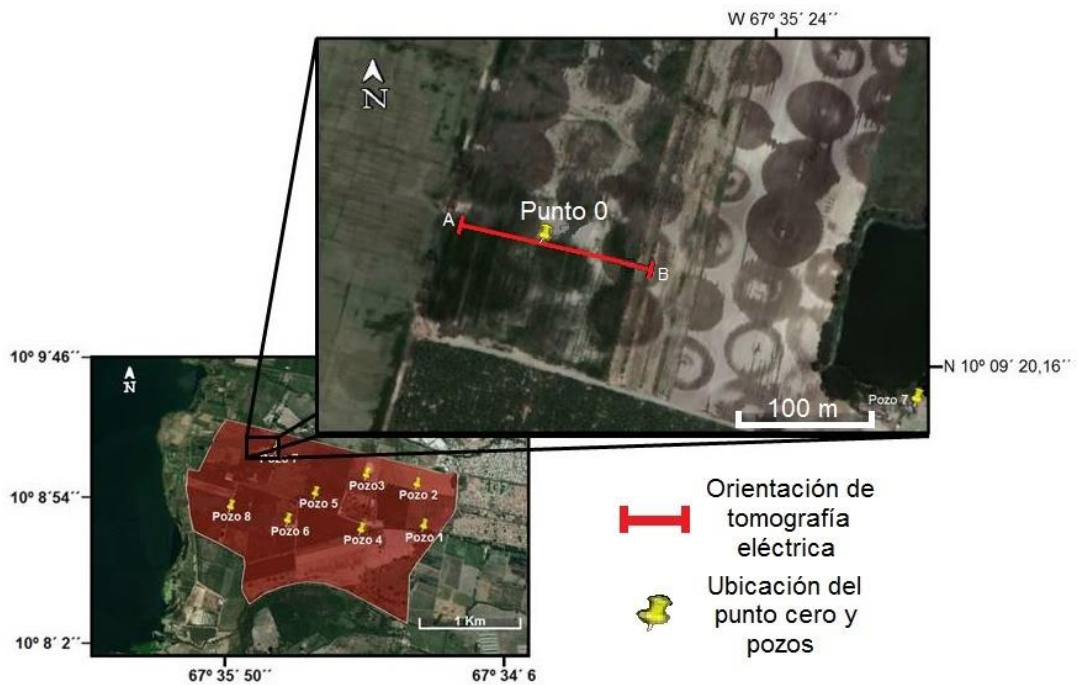


Figura 47. Ubicación de la tomografía geoelectrica respecto a la zona de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)

La tomografía geoelectrica no presentó grandes variaciones en cuanto a resistividad aparente a lo largo de 29 m de profundidad, exhibiendo esencialmente un material de tipo arcilloso, como puede verse en la figura 48, debido a los valores tan bajos de resistividad (máximo 14 Ohm.m). No obstante, este método geofísico al igual que los sondeos, respalda la litología descrita en la Unidad 1.

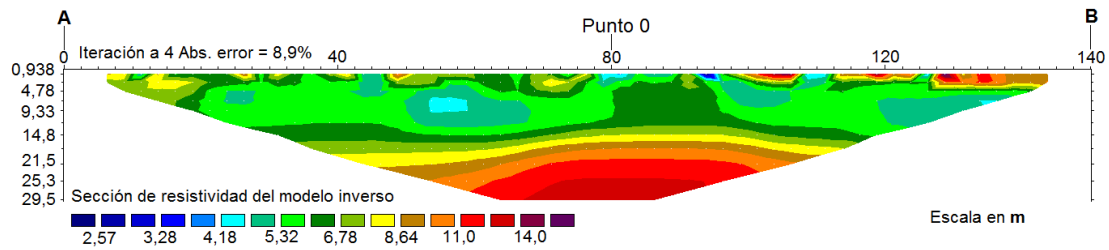


Figura 48. Tomografía geoelectrica realizada en la zona de estudio, (elaboración propia)

En resumen, tanto los SEVs como la tomografía geoelectrica corroboraron los análisis hechos en base a los registros de pozo trabajados. Tomando en cuenta que los SEV realizados por Aguas Subterráneas Consulting, C.A., en general, alcanzaron un máximo de 76 m de profundidad, la litología interpretada a partir de ellos se asemeja en gran medida a los primeros 76m de profundidad correspondientes a la Unidad 1 de la mayoría de los registros de pozo, al igual que los SEV y la tomografía hechos en la zona de estudio concuerdan con los primeros 30 m de profundidad de la Unidad 1. Por lo cual, aunque la Unidad 2 no pudo ser alcanzada por los sondeos eléctricos verticales, se puede interpretar una profundidad de esta unidad cercana o parecida a la encontrada en los Registro G y H, al norte de la zona de estudio (figura 31).

Ahora bien, tanto la interpretación de los registros de pozo como los resultados dados a partir de los SEVs y la tomografía geoelectrica, armonizan con la evolución geológica del Lago de Valencia descrita por Peeters (1968). Donde la Unidad 1 concuerda con la etapa Valencia III (figura 20), caracterizada por grandes depósitos de arcilla, etapa en la cual ocurrieron grandes fluctuaciones climáticas que trajeron periodos de inundación y desecación generando pequeñas lagunas que formaron importantes lentes limo-arenosos.

Finalmente, la interpretación de los sedimentos de la Unidad 2, concuerdan con la etapa Valencia II (figura 20), caracterizada por la gran disminución del área del lago y el avance de abanicos aluviales y con ellos grandes depósitos de arena y grava fina, producto de las pronunciadas pendientes de los abanicos y los rápidos flujos de agua.

IV.2 CARACTERIZACIÓN HIDROGEOLÓGICA

A continuación, se presentan los resultados concernientes a los datos hidrogeológicos recabados en campo, su interpretación, y el análisis del comportamiento del acuífero en la zona de estudio.

IV.2.1 Parámetros hidrogeológicos del acuífero

Con base en la litología ya establecida, es concluyente decir que, el acuífero presente al este del Lago de Valencia está representado por la Unidad 2, ya definida en el apartado IV.1, que posee características más permeables, en general una granulometría con tamaño distintivo entre las arenas, por lo tanto, cuenta con más presencia de poros interconectados que la unidad suprayacente. La unidad acuífera se encuentra soterrada por la Unidad 1, unidad que actúa como capa impermeable y confinante del acuífero estudiado, debido esencialmente a su gran espesor promedio estimado de 88 m (ver figura 41), y su granulometría de tamaño arcilla con poros poco o nada interconectados. Gracias a estas cualidades, el acuífero en cuestión se define como un **acuífero confinado**.

Para evaluar la calidad de un acuífero o una capa acuífera como reservorio subterráneo, se calculan los parámetros hidráulicos, a saber, la conductividad hidráulica y la transmisividad. Dado que, no se pudieron realizar pruebas de bombeo o recuperación en la zona de estudio, se estimaron los parámetros antes mencionados mediante cálculos teóricos, ya que no existe información al respecto en la zona.

Para determinar la conductividad hidráulica K , se utilizaron las bases dadas en la Ley de Darcy, la cual se plantea en la Ec. (2). Para ello, se calculó el gradiente hidráulico $(\Delta h/\Delta l)$ con la diferencia de los niveles piezométricos de los pozos 2 y 7 (Δh) registrados el 06 de octubre de 2019, y la distancia Δl que separa ambos pozos. La misma estimación también se realizó para los valores observados entre los pozos 2 y 4. Además, se tomó una **Sección** del acuífero, tal como se idealiza en la figura 7,

la misma se obtuvo a partir del producto de la longitud de la sección elegida (en este caso 600 m) y el espesor aproximado de la Unidad 2 (80 m) (figura 41). Por último, se utilizó el caudal de descarga Q del Pozo 7 medido en campo, y este mismo se asumió como caudal de descarga del Pozo 4. Todos los valores antes mencionados se encuentran en la tabla 4, a continuación.

Tabla 4. Datos para el cálculo de conductividad hidráulica *K*, (elaboración propia)

| Datos | Valores | |
|---|-----------------------------|--------------------|
| | Pozos 2-7 | Pozos 2-4 |
| ($\Delta h / \Delta l$) | (4,71 m/ 1689,37 m) | (0,55 m/ 846,34 m) |
| Sección | (600 m* 80 m) | |
| Q | 1434,24 m ³ /día | |

De la tabla anterior, se tomaron los parámetros para el cálculo de la conductividad hidráulica horizontal *K*, como se ve en la Ec. (7) y (8), a continuación:

$$K(2 - 7) = \frac{1434,24 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{(600 \text{ m} * 80 \text{ m}) * \left\{ \frac{4,71 \text{ m}}{1689,37 \text{ m}} \right\}} = \frac{1434,24 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{133,83 \text{ m}^2} = 10,71 \text{ m/día} \quad \text{Ec. (7)}$$

$$K(2 - 4) = \frac{1434,24 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{(600 \text{ m} * 80 \text{ m}) * \left\{ \frac{0,55 \text{ m}}{846,34 \text{ m}} \right\}} = \frac{1434,24 \frac{\text{m}^3}{\text{día}}}{31,19 \text{ m}^2} = 45,98 \text{ m/día} \quad \text{Ec. (8)}$$

Dicha ecuación se ejecutó para otros dos valores de **Sección** transversal, con longitudes transversales de 500 y 1000 m, arrojando valores respectivamente de **K(2-7)** 12,80 m/día y 6,40 m/día, respectivamente; mientras que para el caso de **K(2-4)** dieron valores de 55,16 m/día y 27,6 m/día, para las longitudes mencionadas. En general se encontraron valores dentro del rango de $K = 10$ y 50 m/día, indicando que, según la tabla 5, la Unidad 2 posee una conductividad hidráulica dentro del intervalo característico de arenas de grano medio y arenas de grano grueso correspondiendo así con la descripción realizada a partir de la interpretación de los registros eléctricos del apartado IV.1.1.

Tabla 5. Valores aproximados del orden de magnitud de la conductividad hidráulica en diversos materiales, tomado de (Villanueva e Iglesias, 1984)

| MATERIAL | K (m/día) |
|----------------------------------|-----------------------|
| Arcilla | 10^{-3} - 10^{-8} |
| Arcilla débilmente arenosa | 10^{-1} - 10^{-2} |
| Arcilla arenosa | 10^{-1} -1 |
| Arena arcillosa | 0,5 - 1,0 |
| Arena de grano fino | 1 - 5 |
| Arena de grano medio | 5 - 15 |
| Arena de grano grueso | 15 - 50 |
| Arena con grava | 5 - 100 |
| Grava | 100 - 200 |
| Arcilla, arena y grava mezcladas | 10^{-3} - 10^{-4} |

Los valores de conductividad de las ecuaciones (7) y (8) fueron utilizados para estimar la transmisividad, como se muestra en las Ec. (9) y (10), a continuación:

$$T(2 - 7) = (10,71 \text{ m/día}) * (80\text{m}) = 856,8 \text{ m}^2/\text{día} \quad \text{Ec. (9)}$$

$$T(2 - 4) = (45,98 \text{ m/día}) * (80\text{m}) = 3678,4 \text{ m}^2/\text{día} \quad \text{Ec. (10)}$$

También se obtuvo la transmisividad **T** para la **Sección** transversal con longitudes de 500 m y 1000 m, dando como resultado los siguientes valores respectivamente de **T(2-7)**; 1024 m²/día y 512 m²/día, en el caso de **T(2-4)** sería; 4412,8 m²/día y 2208 m²/día. Estos valores de **T** fueron comparados con la tabla 6, indicando que la transmisividad de la unidad 2 corresponde a la de un acuífero permeable, de regular a bueno hasta excelente y muy permeable.

Tabla 6. Valores aproximados del orden de magnitud de transmisividad en diversos materiales, tomado de (Custodio y Llamas, 1983)

| T en m ² /día | 0 - 1 | 1 - 10 | 10 - 100 | 100 - 1000 | de 1000 en adelante |
|--------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---|--|---|
| Calificación | Impermeable | Poco permeable | Algo permeable | Permeable | Muy permeable |
| Calificación de acuífero | Sin acuífero | Acuífero muy pobre | Acuífero pobre | Acuífero de regular a bueno | Acuífero excelente |
| Tipo de material | Arcilla compacta, pizarra o granito | Limo arenoso, limo o arcilla limosa | Arena fina, arena limosa, caliza poco fracturada, basalto | Arena limpia, grava y arena, arena fina, caliza fracturada | Grava limpia, dolomías, calizas muy fracturadas |

Tomando en cuenta que, en la caracterización litológica los registros de pozo nunca llegaron al basamento o más allá de la Unidad 2 y, por consiguiente, no se tiene el espesor completo del acuífero, la transmisividad obtenida con sólo 80 m de espesor de acuífero es bastante buena, con una excelente permeabilidad y una conductividad hidráulica horizontal moderadamente alta.

IV.2.2 Datos pluviométricos del año 2019-2020

A fin de examinar la posible influencia de las precipitaciones sobre la zona de estudio, y principalmente, sobre el acuífero estudiado, fue necesario analizar los datos pluviométricos registrados por la Hacienda Agropecuaria Punta Larga, C.A., resumidos de manera mensual a lo largo de todo el año 2019 y parte del 2020. Los valores presentados a continuación en la tabla 7, representan los mm de agua evaporada, evapotranspirada y precipitada en la zona de interés.

Tabla 7. Datos pluviométricos del año 2019 y parte del 2020, (proporcionados por Agropecuaria Punta Larga)

| MES | EVAPORACIÓN (mm) | PRECIPITACIÓN (mm) | EVAPOTRANSPIRACION (mm) |
|-----------------|---------------------|-----------------------|----------------------------|
| ENERO-2019 | 224,7 | 0 | 179,7 |
| FEBRERO-2019 | 220,8 | 0 | 176,7 |
| MARZO-2019 | 254,8 | 18,796 | 203,8 |
| ABRIL-2019 | 216,1 | 31,496 | 172,9 |
| MAYO-2019 | 209,2 | 138,176 | 167,3 |
| JUNIO-2019 | 154,8 | 78,743 | 123,8 |
| JULIO-2019 | 169,6 | 90,17 | 135,6 |
| AGOSTO-2019 | 159,9 | 123,19 | 127,9 |
| SEPTIEMBRE-2019 | 164,5 | 146,558 | 131,6 |
| OCTUBRE-2019 | 146,9 | 118,11 | 117,6 |
| NOVIEMBRE-2019 | 162,3 | 51,308 | 129,8 |
| DICIEMBRE-2019 | 185,3 | 2,794 | 148,3 |
| ENERO-2020 | 193,8 | 0 | 155,1 |
| FEBRERO-2020 | 230,5 | 0 | 184,4 |
| | 2.693,13 | 799,34 | 2.154,56 |

Se puede considerar que los mm de evaporación medida en la zona tuvieron los valores más altos entre enero y mayo, variando entre 254,8 mm a 209,2 mm. Luego, a partir de junio hasta diciembre ocurrió una disminución marcada en la cantidad de mm, variando de 185,3 mm a 146,9 mm.

Por su parte, los mm de agua precipitada son totalmente nulos en los meses de enero y febrero, sólo hasta marzo y abril se empiezan a registrar los primeros mm de agua del año con 18,80 mm y 31,50 mm, respectivamente. A partir de mayo hasta octubre se registran importantes fluctuaciones que varían entre 146,56 mm y 78,74 mm, dejando los meses de noviembre y diciembre rezagados con apenas 51,31 y 2,79 mm, además de los meses marzo y abril ya mencionados.

En resumen, como se identifica en la figura 49, el periodo seco empieza desde el mes de noviembre y culmina en el mes de abril, mientras que, desde el mes de mayo hasta el mes de octubre se presenta el periodo de lluvias, el cual dura 6 meses aproximadamente, de acuerdo a los datos aportados para el año 2019.

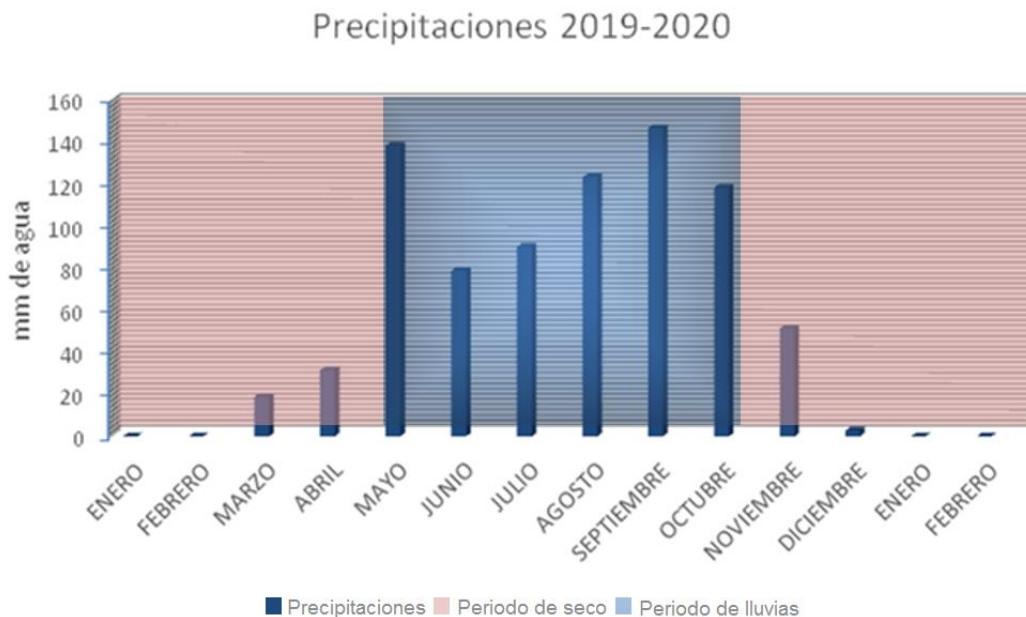


Figura 49. Precipitaciones 2019-2020, (elaboración propia)

IV.2.3 Seguimiento de los niveles piezométricos a través del tiempo

Para este apartado se midieron y analizaron todos los niveles piezométricos recabados en campo a lo largo del año 2019 y parte del 2020, donde las fluctuaciones determinaron el comportamiento del nivel piezométrico dentro del sistema poroso y permeable presente en el subsuelo al este del Lago de Valencia (Anexo III). A su vez, los resultados fueron contrastados con los registros pluviométricos tomados diariamente por la gerencia de la hacienda, balance que ayudó a interpretar las variaciones en el nivel piezométrico del acuífero.

Con los datos tomados en campo se realizaron una serie de hidrogramas elaborados a partir de las mediciones semanales de 7 pozos localizados dentro de la zona de interés (figura 50). Este seguimiento se realizó de manera constante (a excepción de los meses marzo y diciembre del 2019 y enero del 2020), con el objetivo de plasmar los grandes y pequeños cambios que ocurrieron dentro del acuífero durante este intervalo de tiempo que duró 10 meses.

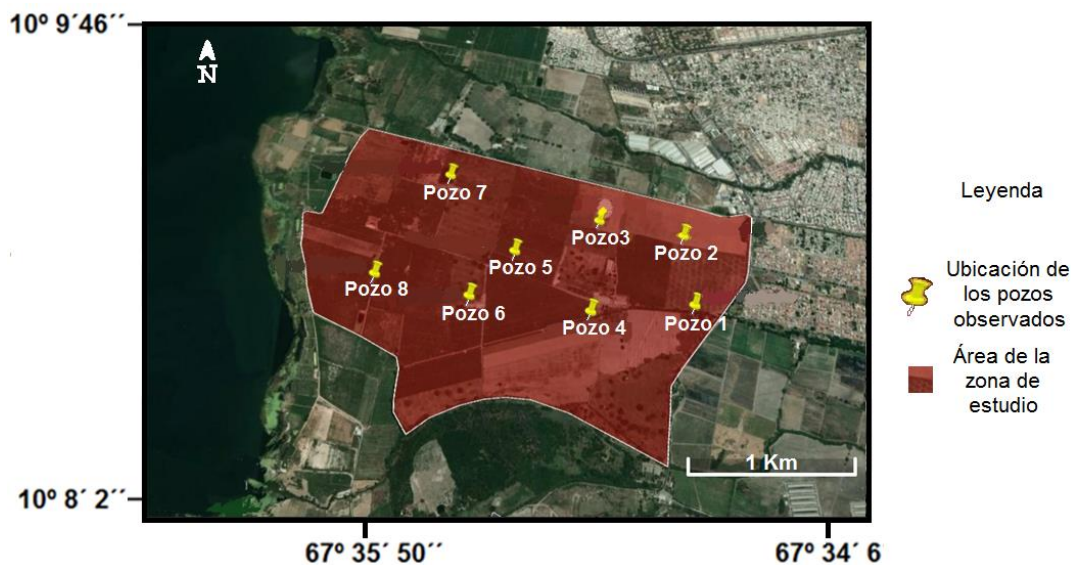


Figura 50. Pozos chequeados dentro del área de estudio, (tomado y modificado de Google Earth)

Debe aclararse que, la información técnica de los pozos estudiados tales como: profundidad total del pozo, profundidad en la que se encuentran la bomba eléctrica,

el revestimiento ranurado, entre otros, no fueron proporcionados por la hacienda donde se realizó la investigación. Por otra parte, es preciso añadir, que el Pozo 1 no pudo ser cotejado debido a distintos inconvenientes para introducir la sonda piezométrica en el mismo. Asimismo, los pozos 6 y 7 fueron chequeados a partir del mes de junio; ya que el pozo 6 se encontraba clausurado; y el pozo 7, tenía las aberturas para introducir la sonda piezométrica totalmente selladas. Con estos puntos ya aclarados, enseguida se exponen los siguientes hidrogramas comenzando con el pozo 2 y culminando con el pozo 8.

- Pozo 2:** se comenzó a monitorear finalizando el mes de abril porque en los meses anteriores se mantuvo en operación constante, lo cual dificultó la lectura de los niveles de agua en el periodo febrero-abril. De hecho, es uno de los pozos más utilizados en las labores diarias ejercidas dentro de la zona de estudio, siendo sometido a un frecuente bombeo que pudo ser causante de un comportamiento con marcadas fluctuaciones en el nivel del agua durante todo el tiempo de monitoreo, tal como se aprecia en la curva de la figura 51.

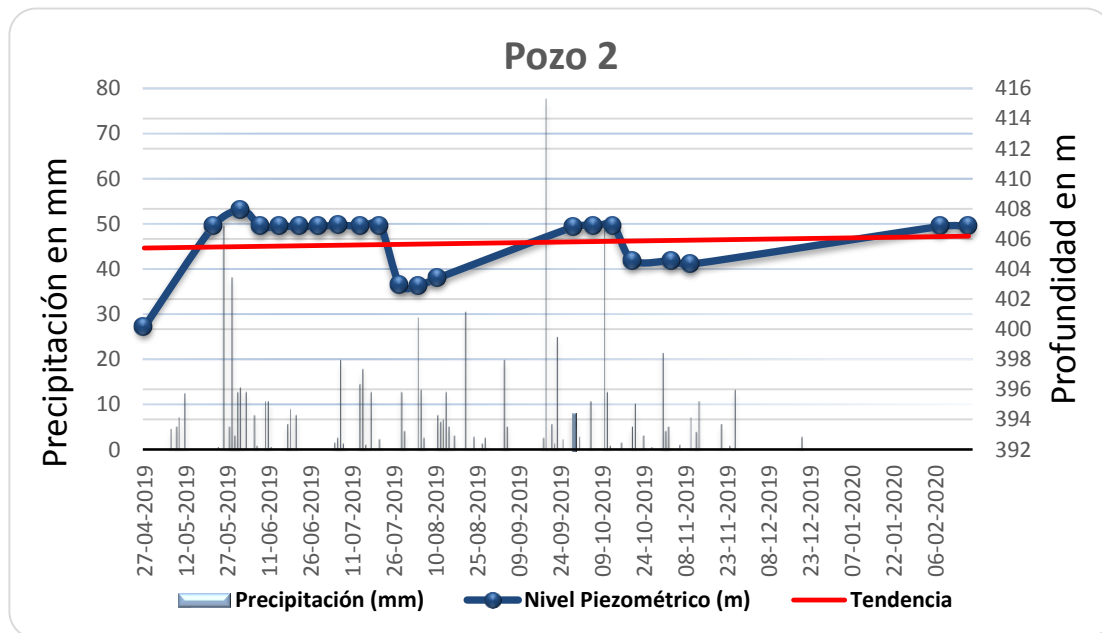


Figura 51. Hidrograma del Pozo 2, (elaboración propia)

Como se puede ver, el Pozo 2 ubicado a una altura de 424 m sobre el nivel del mar, tuvo dos caídas considerables, una en el mes de julio y otra finalizando octubre con niveles de 402,93 msnm y 404,56 msnm, respectivamente; posiblemente, a causa de las prolongadas jornadas de bombeo. De igual manera, tuvo un ascenso notable del nivel que llegó a los 407,94 msnm el 01/06/2019 producto, posiblemente, de fuertes precipitaciones del día 26/05/2019 con unos 49,53 mm medidos, siendo la precipitación más importante de mayo, elevando el nivel piezométrico en su punto máximo en 6 días. Luego de esto, el 13/10/2019 vuelve a ocurrir un ascenso hasta los 406,84 msnm, 24 días después de la precipitación más grande del año el 19/09/2019, con 77,47 mm registrados.

En general, el pozo varía entre 407 msnm y 399 msnm oscilando un total de 7,81 m de desnivel. No obstante, la tendencia natural se mantiene sin muchos cambios a lo largo del tiempo.

- **Pozo 3:** representado por la figura 52, fue uno de los tres pozos observados desde el inicio del estudio en febrero del 2019; y constituye el punto donde se visualizaron los niveles de agua más profundos, estando el mismo a 422,7 m sobre el nivel del mar

Sus valores varían entre los 388 msnm y 400 msnm, oscilando un total de 11,73 m de desnivel. El nivel más profundo se registró el 23/02/2019 con 388,07 msnm y el nivel más superficial el 06/10/2019 con 399,8 msnm, esta última lectura tuvo lugar 17 días después de la precipitación más importante del año (19/09/2019). Por ende, este crecimiento puntual podría estar influenciado por dicho evento climático.

Aunado a esto, el comportamiento de los niveles se manifiesta de manera ascendente a partir del mes de febrero. Sin embargo, después del mes de noviembre la sonda piezométrica, de 31 m de alcance, no volvió a tocar el nivel del agua, por lo que se cree que, a partir de noviembre comenzó el descenso del nivel piezométrico.

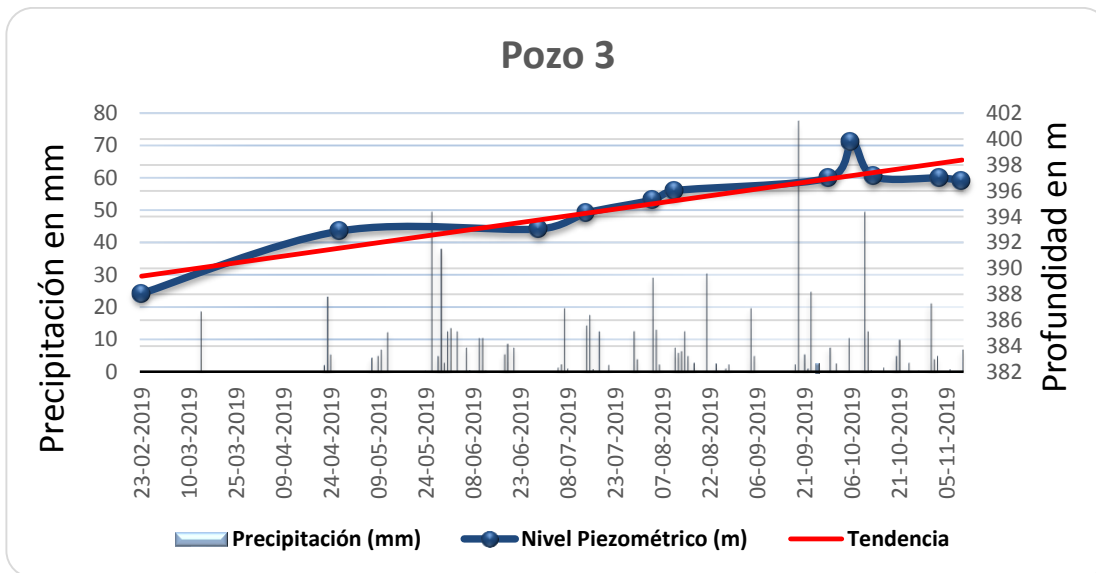


Figura 52. Hidrograma del Pozo 3, (elaboración propia)

Es importante mencionar que, la curva trazada en la figura 52 dibuja el comportamiento del acuífero sin la intervención de bombes artificiales, debido a que el Pozo 3 se encuentra fuera de servicio.

- **Pozo 4:** este pozo (figura 53) fue desmantelado en el mes de junio 2019 y restaurado para el mes de febrero del 2020.

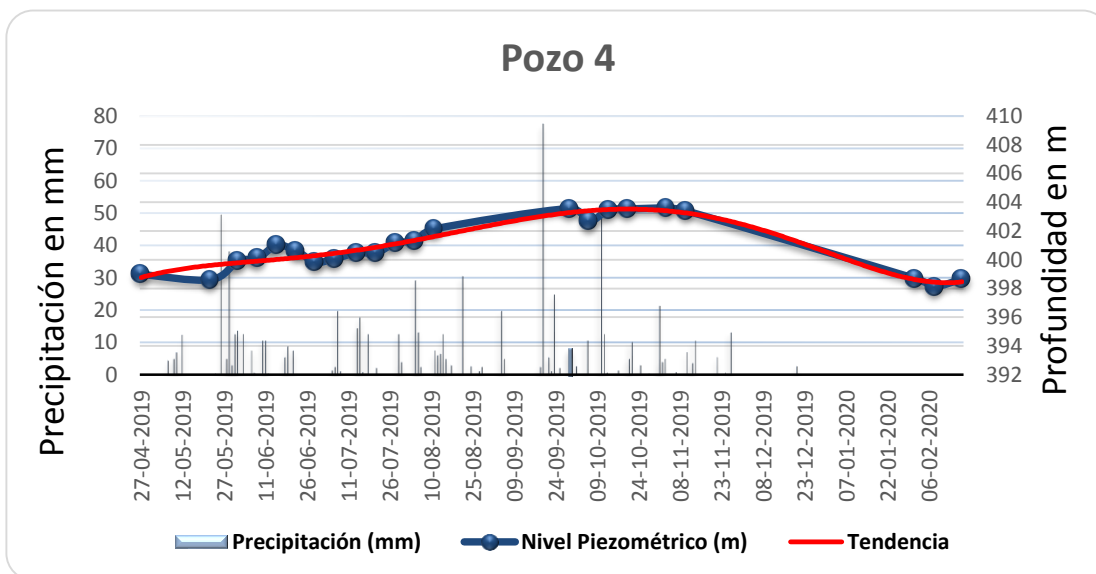


Figura 53. Hidrograma del Pozo 4, (elaboración propia)

Como se presenta en el hidrograma de la figura 53 los niveles de agua del Pozo 4 se conservaron entre 403 msnm y 397 msnm para un total de 5,46 m de fluctuación, teniendo su nivel más superficial a 403,6 msnm registrado el 03/11/2019, 24 días después de la precipitación más importante de octubre el 10/10/2019 con 49,53 mm medidos. Además, su nivel más profundo se midió en febrero del 2020 con 398,14 msnm.

Este pozo, al igual que el Pozo 2, sólo pudo ser monitoreado cuando la bomba eléctrica estuvo apagada. A pesar de ser uno de los pozos más usados para las labores de la hacienda, no mantiene fluctuaciones que exhiban grandes crecimientos o caídas en el nivel del agua como consecuencia del continuo bombeo. De manera que, la curva podría estar modelando un comportamiento natural del nivel del agua, cuyas profundidades se hacen más superficiales a partir de mayo y descienden progresivamente a partir de noviembre, hecho que apoya la hipótesis de que el Pozo 3 también posee valores descendentes a partir de este mes a pesar de que no pudieron medirse.

- **Pozo 5:** fue otro pozo inactivo durante todo el periodo de estudio (figura 54), y al igual que el pozo 3 (figura 52) pudo ser sondeado desde el mes de febrero del 2019 generando una extensa curva.

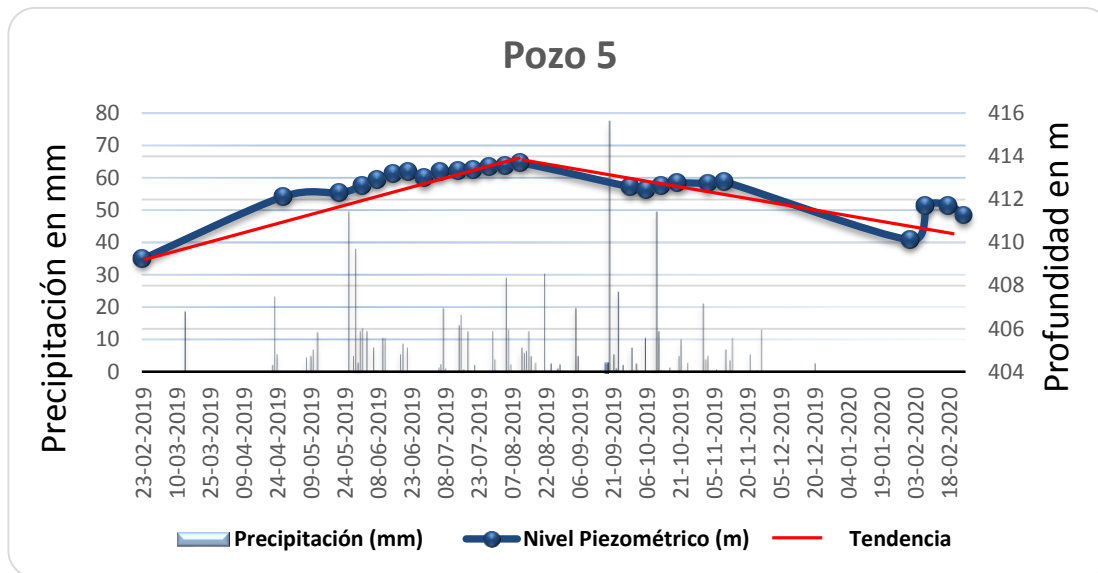


Figura 54. Hidrograma del pozo 5, (elaboración propia)

La figura 54 muestra que los niveles de agua fluctúan entre los 413 msnm y 408 msnm con un máximo de 4,45 m de amplitud, el máximo nivel fue registrado el 23/02/2019 con 409,24 msnm y el nivel más somero el 11/08/2019 con 413,69 msnm, el cual podría atribuirse a las grandes y seguidas precipitaciones que dieron comienzo 77 días antes a partir del 26/05/2019 en adelante. Es de resaltar que el ascenso del nivel del agua empieza en el mes de febrero y persiste hasta el mes de agosto, donde empieza a descender progresivamente.

El hidrograma en sí, expone una transición natural sin alteraciones artificiales producto de bombeos. Además, la curva no plasma picos predominantes asociados a grandes precipitaciones, a excepción de un salto en el mes de febrero del 2020 con un ascenso de 1,57 m en tan sólo una semana, siendo el cambio más anómalo en todo el tiempo que se estudió el pozo.

- **Pozo 6:** este manifestó los niveles de agua más superficiales de la zona de estudio, con menos de 2,35 m de oscilación entre 418 msnm y 415 msnm de profundidad como se representan en la figura 55.

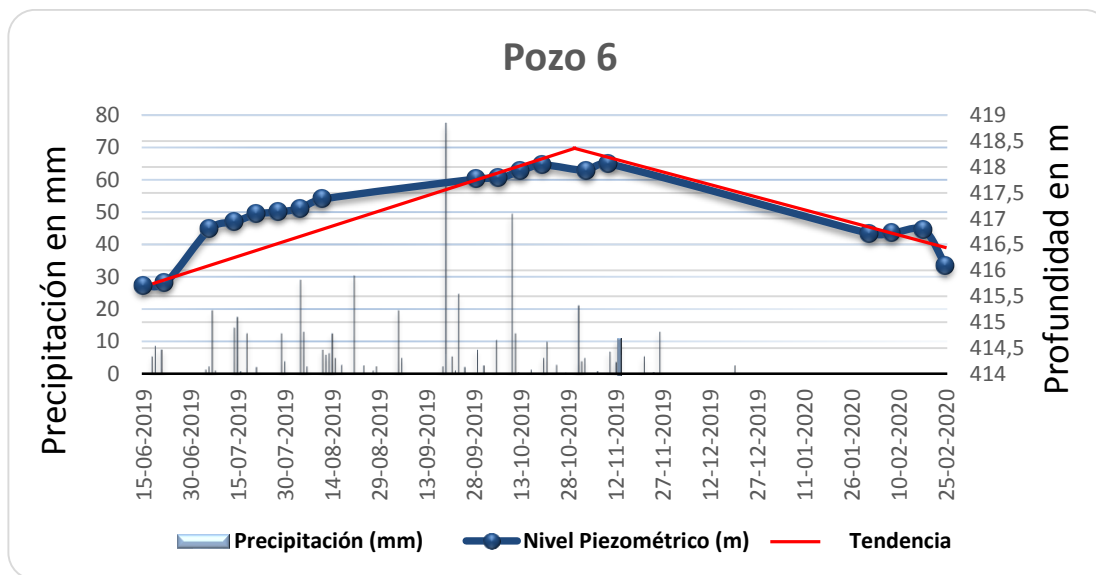


Figura 55. Hidrograma del Pozo 6, (elaboración propia)

La figura muestra un nivel máximo observado a 415,71 msnm el 15/06/2019 y un nivel mínimo registrado de unos 418,06 msnm el 10/11/2019, éste último se observó 31 días después de la precipitación más importante de octubre el 10/10/2019 con 49,53 mm registrados. No obstante, el Pozo 6 comienza a tener valores ascendentes de profundidad a partir de mayo, y valores descendentes empezando noviembre.

Adicionalmente, se registró una profundidad atípica el 29/06/2019 a 403,46 msnm, luego que el pozo fuese utilizado por 4 días seguidos. Hay que destacar que, el Pozo 6 y el Pozo 5 comparten varias similitudes, tanto en el comportamiento de sus curvas a lo largo del tiempo, como los bajos valores de profundidad y fluctuaciones no tan marcadas.

- **Pozo 7:** es sometido a un trabajo continuo, puesto que es utilizado para surtir cisternas diariamente y para llenar la laguna artificial que se encuentra justo al lado del mismo que es utilizada, a su vez, para el riego. De modo que, es de esperarse que el nivel de agua presente ciertas fluctuaciones a lo largo de todo el tiempo de estudio, comportamiento que se pudo confirmar en la figura 56.

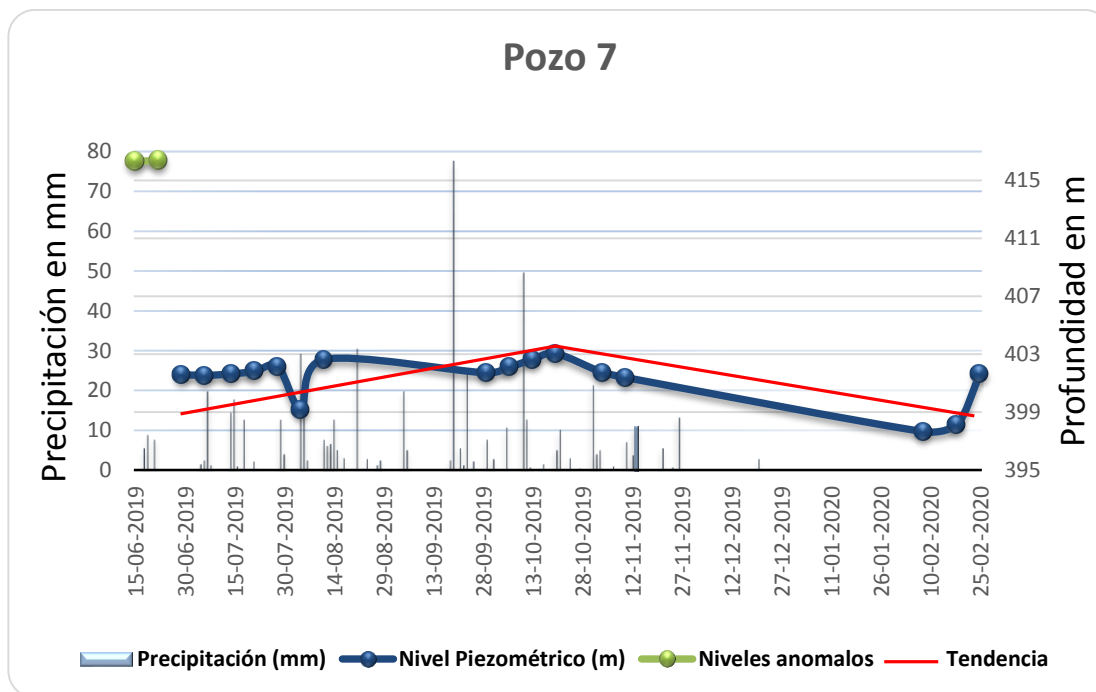


Figura 56. Hidrograma del Pozo 7, (elaboración propia)

De la figura anterior se puede ver que el Pozo 7 conservó niveles de agua que ondean entre los 402,82 msnm y 396,82 msnm oscilando 5,39 m; llegando a sus niveles más profundos el 08/02/2020 con 397,65 msnm y su nivel más cercano a la superficie el 20/10/2019 con 403,04 msnm. Este último tuvo lugar 31 días después de la precipitación más importante del año el 19/09/2019, lo que pudo incidir en el ascenso del nivel piezométrico.

Es de notar que, el nivel del agua tiende a descender en el mes de octubre del 2019 y a ascender finalizando el mes de febrero del 2020. Aunque el hidrograma exhibe fluctuaciones irregulares, la tendencia de ascenso y descenso coincide con el comportamiento obtenido en los demás pozos, manteniendo una relación con los mismos.

En este caso, también se presentó un ascenso anómalo en el nivel del agua, registrado el 15 y 22 de junio del 2019 con 416,32 msnm y 416,4 msnm, respectivamente, correspondientes a las primeras medidas piezométricas de este pozo, lo cual pudiese deberse a que el mismo estuvo clausurado por falta de

mantenimiento durante un periodo de tiempo que se desconoce, pero que culmina en las fechas ya mencionadas, en este tiempo sin bombeos artificiales, se pudo propiciar un ascenso general del nivel de agua a valores parecidos a los del Pozo 6. Luego, con el pozo nuevamente operando, surtiendo cisternas diariamente y llenando la laguna artificial más cercana, empezaron a registrarse niveles piezométricos más profundos, con los cuales se construyó el grafico del Pozo 7.

- **Pozo 8:** al igual que el Pozo 5 y el Pozo 3, se mantuvo permanentemente fuera de funcionamiento, además también fue monitoreado desde el mes de febrero del 2019 mostrando una curva bastante extensa (figura 57).

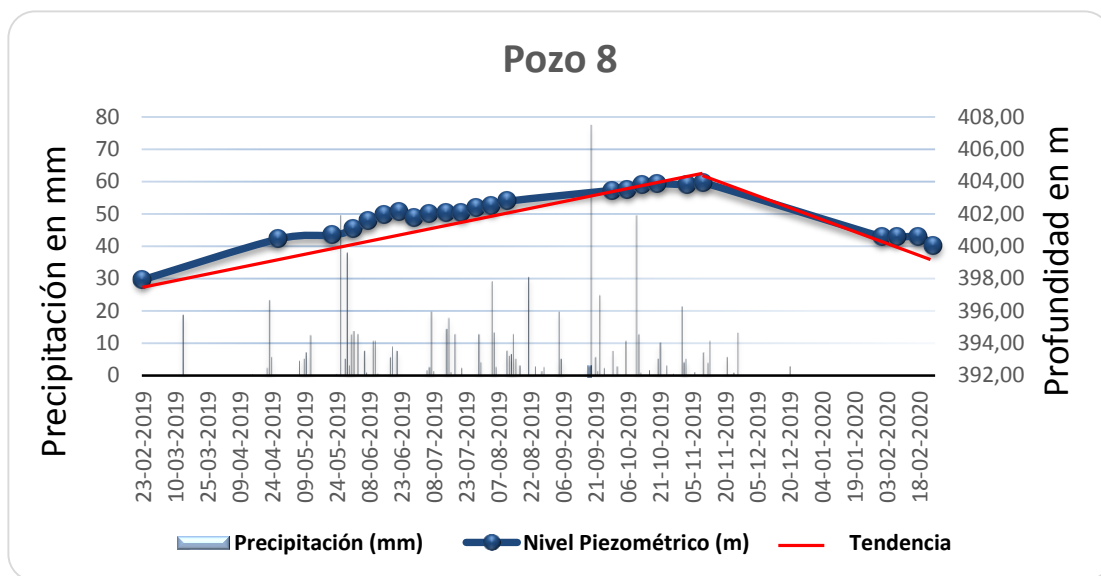


Figura 57. Hidrograma del Pozo 8, (elaboración propia)

El Pozo 8 registró niveles piezométricos que alternan entre los 404,58 msnm y 397,93 msnm, con una oscilación de 5,98 m de desnivel, y con 397,93 msnm de nivel máximo alcanzado el 23/02/2019, y su nivel más superficial de 403,91 msnm alcanzado el 10/11/2019, este último valor se registró exactamente al mismo tiempo que el punto más somero del Pozo 6 en su, 31 días después de la precipitación más importante de octubre el 10/10/2019.

La curva como tal, refleja un comportamiento natural sin alteraciones artificiales de los niveles de agua. Al igual que los anteriores pozos, la figura 57 muestra un ascenso de los niveles de agua después del mes de febrero y un descenso a partir del mes de noviembre.

IV.2.4 Análisis general del estudio piezométrico en el tiempo

En general, los 7 hidrogramas analizados permiten interpretar el comportamiento de la dinámica natural del agua a través del tiempo monitoreado. El nivel piezométrico del acuífero se mantuvo en aumento durante 8 meses (desde marzo hasta finales de octubre y comienzos de noviembre) y, luego permaneció en constante descenso por 2 meses (diciembre y enero). Siendo noviembre y febrero meses transicionales, en otras palabras, representan la mínima profundidad antes de descender y la máxima profundidad antes de ascender que alcanza el acuífero al este del Lago de Valencia, respectivamente.

El Pozo 2, por su parte, no coincide con el comportamiento ya descrito, más bien su tendencia promedio suele verse de forma lineal, con fluctuaciones aleatorias, producto muy probablemente de los bombeos constantes, aun así, sus niveles piezométricos no se encuentran alejados de los niveles registrados para los pozos 4, 7 y 8. Asimismo, el Pozo 5 posee sus niveles más superficiales en agosto, difiriendo del resto de los pozos que logran estas profundidades entre octubre y noviembre.

En general, las oscilaciones entre los niveles bajos (profundos) y altos (superficiales) registrados en la zona de estudio son bastante similares, estando alrededor de los 5 m de intervalo para la mayor parte de los pozos; excepto para el Pozo 3, quien registró la oscilación de niveles más alta, incluso duplicando al resto ($\approx 12\text{m}$); y el Pozo 6, quien, por el contrario, registró una oscilación mucho menor ($\approx 2,5\text{m}$) (tabla 8).

Al comparar los datos de precipitación con los datos piezométricos se puede establecer que existe un aumento consistente y progresivo de la piezometría desde el mes de febrero y persiste durante todo el periodo lluvioso registrado, hasta finales de noviembre. Es importante recordar que, hasta el mes de abril la zona de estudio se encontraba en el periodo seco (figura 49), con precipitaciones mensuales bastante bajas (18,80 mm y 31,50 mm para los meses de marzo y abril, respectivamente), de modo que, las precipitaciones registradas en la hacienda no explican el ascenso piezométrico durante los meses de marzo y abril.

Por lo cual, se podría interpretar que el ascenso del nivel piezométrico que experimenta el acuífero al final del periodo seco, y que podría relacionarse a la recarga del mismo, está influenciado por una fuente distinta a las precipitaciones registradas en la zona de estudio y, por ende, es externa a la misma.

Otro punto a destacar, es que durante el período lluvioso se dieron tres precipitaciones que marcaron ascensos muy puntuales sobre los niveles piezométricos (figura 58), con un desfase en el tiempo que varía para cada pozo.

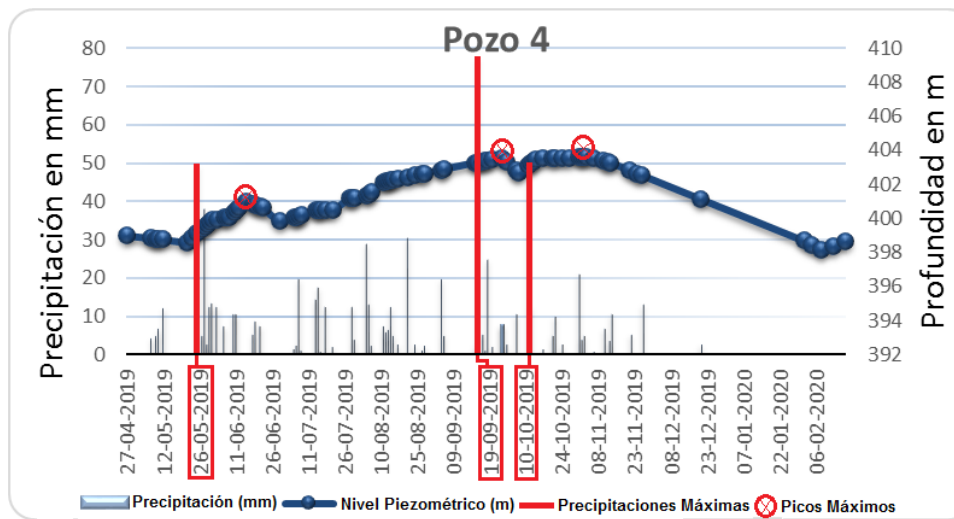


Figura 58. Ejemplo hidrograma del Pozo 4, con picos registrados después de lluvias importantes, (elaboración propia)

A partir del ejemplo mostrado en la figura 58, se puede señalar que, la lluvia más importante de mayo y la más importante de septiembre intervinieron en la

piezometría del Pozo 4. Lo mismo ocurre en los demás pozos, sin embargo, no todos registran reacciones frente a las mismas lluvias ni en los mismos periodos de tiempo como puede observarse a continuación en la tabla 8.

Tabla 8. Tabla comparativa de oscilación y recuperación según los niveles piezométricos, (elaboración propia)

| Pozo | Rango Piezométrico | Oscilación | Reacción de la piezometría ante la precipitación del día 26/05/2019 | Reacción de la piezometría ante la precipitación del día 19/09/2019 | Reacción de la piezometría ante la precipitación del día 10/10/2019 |
|--------|--------------------|------------|---|---|---|
| Pozo 3 | 388 m - 400 m | 11,73 m | - | 17 días | - |
| Pozo 4 | 397 m - 403 m | 5,46 m | 20 días | 10 días | 24 días |
| Pozo 5 | 408 m - 413 m | 4,45 m | 27 días | - | 31 días |
| Pozo 6 | 415 m - 418 m | 2,35 m | - | 31 días | 31 días |
| Pozo 7 | 397 m - 403 m | 5,39 m | - | 31 días | - |
| Pozo 8 | 398 m - 405 m | 5,98 m | 27 días | 31 días | 31 días |

De la tabla anterior, se aprecia que el nivel piezométrico para las fechas cercanas al 26/05/2019 reaccionó en promedio a los 25 días después de la precipitación más importante de mayo, mientras que, las fluctuaciones después del 19/09/2019 y del 10/10/2019, frecuentemente, sucedieron a los 31 días, existiendo de esta manera una diferencia ordinaria de 4 días siendo ambos valores bastante parecidos.

Por otro lado, el Pozo 3 exhibe importantes diferencias en relación al resto de los pozos, entre ellas el tiempo de reacción respecto a la precipitación del día 19/09/2019 de apenas 17 días frente a los 31 días que tardó el resto. Además, presenta fluctuaciones que oscilan unos 11,73 m, frente a un promedio de 5,32 m registrados en los pozos 4, 7 y 8, los cuales fluctúan en rangos menos profundos (tabla 8).

Por otra parte, el Pozo 5 también presenta importantes contrastes, empezando con el hecho, ya mencionado, de que el hidrograma muestra sus niveles

más superficiales en el mes de agosto, además oscila 4,45 m (408-413 m), cifras que difieren ligeramente de los valores presentados por el resto de los pozos.

De igual forma, en comparación con el resto de los pozos, el Pozo 6 osciló con una amplitud muy pequeña de apenas 2,35 m dentro del rango piezométrico más somero de toda la zona de estudio (415-418 m).

Por estas razones, se propone que los pozos 3, 5 y 6 pertenecen a superficies piezométricas distintas entre sí, y distintas a su vez, a la superficie piezométrica de los Pozos 2, 4, 7 y 8. Por consiguiente, se plantea que en la zona de estudio existen 4 capas acuíferas. Para determinar si la piezometría de los primeros tres pozos mencionados pertenecen a acuíferos o capas acuífera distintas, es necesario, realizar mayores pruebas de campo.

Conociendo que el acuífero reacciona ante las lluvias registradas en la misma zona de estudio se puede deducir o inferir la existencia de un leve aporte de las mismas en la recarga, hasta cierto punto, ya que la lluvia del lugar debe atravesar un espesor de 88 m aproximadamente antes de llegar al acuífero, por lo que el aporte puede provenir más bien de la capa confinante de arcilla, es decir, al estar la capa de arcilla saturada de agua y recibir luego un aporte de agua, la presión ejercida por la lluvia, eventualmente, puede desplazar parte del agua almacenada en la arcilla hacia el acuífero permitiendo la recarga de la capa de arena. También podría sólo ser transmisión de presión que permite el aumento ligero y puntual de la piezometría.

En síntesis, en cualquiera de los dos casos mencionados, al final la lluvia local ejerce un efecto en las fluctuaciones del nivel piezométrico, sin embargo, no se sabe con certeza si se trata de recarga indirecta.

IV.2.5 Análisis espacial de los niveles piezométricos

Para esta sección se presentan y analizan los mapas piezométricos generados a partir de los datos obtenidos del seguimiento de los niveles observados en los pozos 2, 4, 7 y 8 a través del tiempo de estudio. Para ello, se tomaron en cuenta tres

fechas; una empezando el periodo de lluvias donde se puntualizan los datos de conductividad y pH tomados a mediados de mayo del 2019 por Marcano (s/f), otra en el periodo de lluvias, donde se exhiben los niveles más superficiales, y finalmente una en el periodo seco, donde se tienen los niveles más profundos del acuífero.

El primer mapa piezométrico corresponde al inicio del periodo de lluvias, el cual se elaboró con base a las mediciones tomadas el día 29 de junio de 2019, representado por la figura 59.

Niveles piezométricos finalizando junio

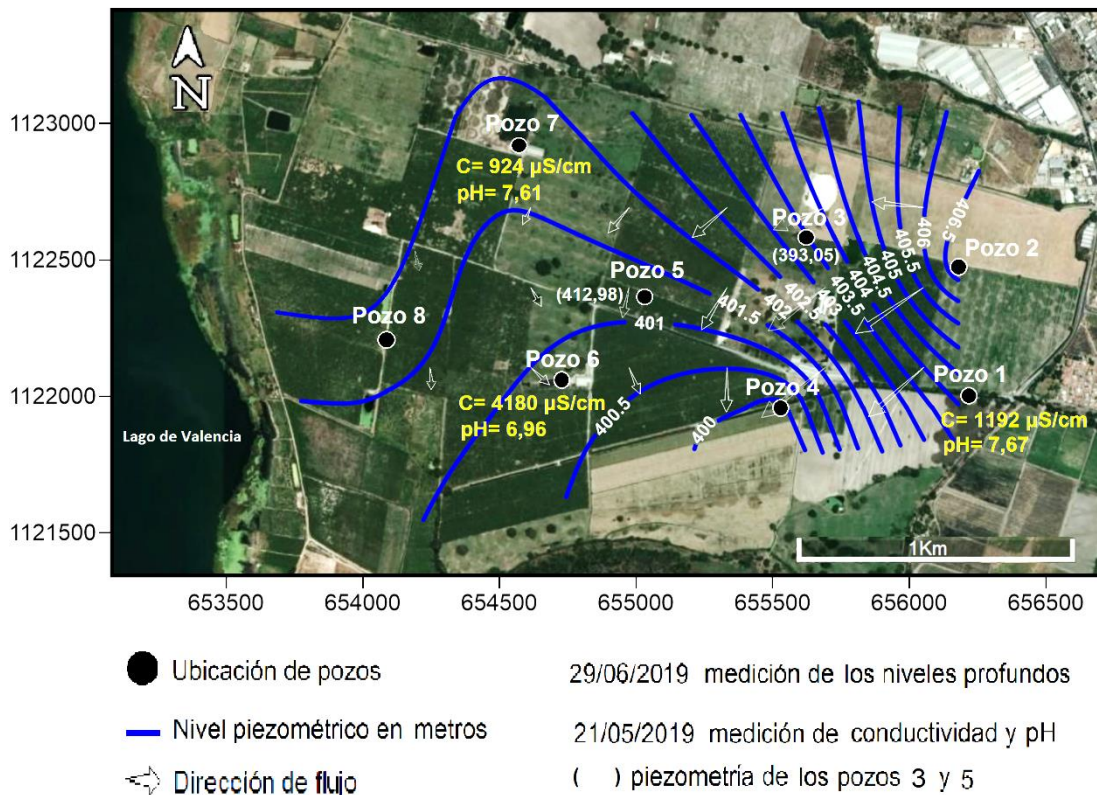


Figura 59. Mapa de niveles piezométricos finalizando el mes de junio, tomados a inicios del periodo de lluvias, (elaboración propia)

De este mapa, destacan las pendientes relativamente pronunciadas en los niveles piezométricos entre los pozos, viéndose como ejemplo el gradiente hidráulico ($\Delta h/\Delta l$) de $8,26 \times 10^{-3}$ que se aprecia entre los pozos 2 y 4 según la Ec. (11), el cual es el gradiente más notorio del mapa. También, es de resaltar que, el flujo

general de las aguas subterráneas se dirige de este a oeste coincidiendo con el Mapa Hidrogeológico de Venezuela de 1972 (figura 62).

$$G(2 - 4) = \frac{406,83 \text{ m} - 399,84 \text{ m}}{846,34 \text{ m}} = 8,26 \times 10^{-3} \text{ Ec. (11)}$$

Sin embargo, puede observarse que el flujo tiende a desviarse hacia el sur, en dirección al Pozo 4. Sin embargo, el Pozo 4 no es utilizado de manera prolongada en los trabajos diarios de la zona, lo cual se verifica en su hidrograma (figura 53), donde se puede ver la ausencia de grandes fluctuaciones que distorsionen el comportamiento natural del acuífero. Por lo tanto, dicho flujo en dirección sur pudo ser causada por una posible fuente de recarga externa ubicada hacia el norte de la zona estudiada o un factor externo a la zona estudiada que este atrayendo el flujo hacia el sur (bombeo, por ejemplo).

En cuanto a los datos físico-químicos, estos se midieron durante una campaña de campo en la zona de estudio en mayo de 2019 (Marcano, s/f), donde se tomaron medidas de conductividad eléctrica y pH en los pozos 1, 6 y 7, únicos pozos operativos para esa época.

Los valores de conductividad eléctrica entre los Pozos 1 y 7 son parecidos (1192 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 924 $\mu\text{S}/\text{cm}$, respectivamente). No obstante, el Pozo 6 presentó 4180 $\mu\text{S}/\text{cm}$ mostrando un fuerte contraste con los anteriores pozos. La diferencia entre los pozos 1 y 7 puede ser consecuencia de que, el agua contenida en las cercanías del Pozo 7 pueda verse afectada por una mezcla con aguas provenientes de otro lugar, esto podría explicar la diferencia de conductividad, ya que se hubiese pensado más bien que el Pozo 7 estando después del Pozo 1 en la misma línea de corriente subterránea presentara más sólidos disueltos totales (inferido por la conductividad eléctrica), sin embargo, es todo lo contrario. Por otra parte, no se sabe con certeza si los pozos 1 y 7 se encuentran en la misma capa acuífera.

La alta conductividad eléctrica del Pozo 6 puede atribuirse a la cercanía de este a la superficie. La diferencia de sus niveles piezométricos con los demás pozos

medidos, además de presentar los niveles más altos (someros) de todos, podrían ser factores que vuelven al acuífero más vulnerable a la contaminación del lugar que el resto de los puntos tratados durante la investigación.

Al ser el Pozo 6 una “ventana” cercana a la superficie, se puede asumir que, esta capa acuífera recibe parcialmente la percolación de aguas de riego o aguas residuales que llevan consigo niveles de acidez más altos (6,96). Además, el pozo se encuentra en las adyacencias de un almacén de la hacienda en donde hay mucha actividad por parte del personal de la misma, los empleados tienen a su disposición baños en ese lugar, y posiblemente (aunque la información no fue suministrada), exista un foso séptico en el lugar que puede tener una fuga, contaminando de esta manera las aguas adyacentes al Pozo 6.

El mapa piezométrico correspondiente al periodo de lluvias se muestra a continuación, el cual se elaboró con base a las mediciones tomadas el día 20 de octubre de 2019, representado por la figura 60.

Niveles piezométricos superficiales



Figura 60. Mapa de niveles piezométricos superficiales, tomados en el periodo de lluvias, (elaboración propia)

En general, la primera diferencia que resalta en comparación con el mapa de la figura 59, es el distanciamiento entre las isolíneas, en este caso mucho más amplio, generando un gradiente hidráulico más discreto entre los pozos 2 y 4 de $1,21 \times 10^{-3}$ según la Ec. (12), formando, por ende, una superficie piezométrica más aplanada que la observada a finales del mes de junio.

$$G(2 - 4) = \frac{404,56 \text{ m} - 403,54 \text{ m}}{846,34 \text{ m}} = 1,21 \times 10^{-3} \text{ Ec. (12)}$$

Al igual que, a finales de junio, la principal dirección de flujo del agua se mantuvo hacia el oeste, con un desvío hacia el Pozo 4. Pero, además se evidenció un flujo en dirección norte, hacia el Pozo 7, flujo totalmente ausente en el mapa anterior (figura 59), creando así una “divisoria de aguas” donde las aguas

subterráneas se redireccionan hacia el norte y hacia el sur. Es importante recordar que el mapa de la figura 59 fue elaborado a finales de junio, época en la cual el Pozo 7 retomaba apenas su funcionamiento después de estar clausurado por un tiempo desconocido. Por tal motivo, es posible que la actividad antrópica del Pozo 7 esté influenciando el flujo local de la zona estudiada en el mapa de la figura 60.

Por otra parte, se observa que la conductividad eléctrica en el Pozo 7 aumentó a 1238 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y el pH disminuye ligeramente para el periodo de lluvia. Esto podría deberse a que al constante bombeo del Pozo 7 que atrae aguas del este en contraste con lo observado durante los registros de junio.

Por último, se muestra el mapa correspondiente al periodo seco, elaborado con los datos medidos el 08 de febrero de 2020 y representado por la figura 61, a continuación.

Niveles piezométricos profundos

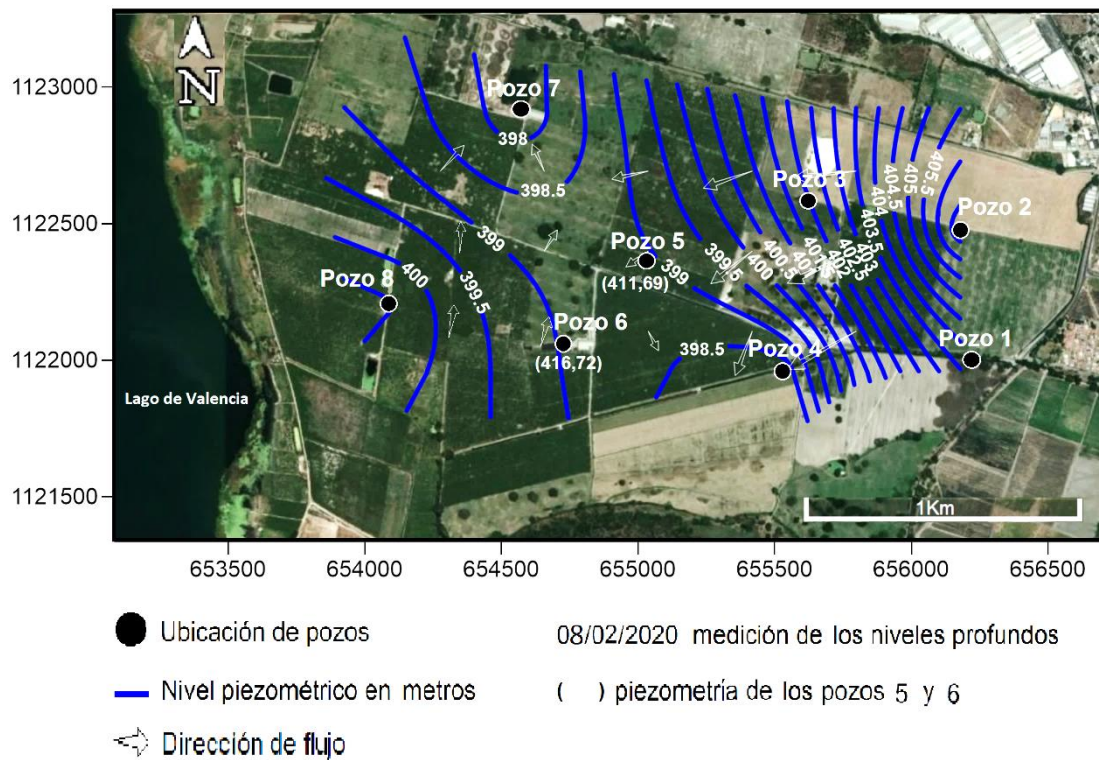


Figura 61. Niveles piezométricos profundos, tomados en el periodo seco del 2020, (elaboración propia)

Para el periodo seco es notorio un aumento en las profundidades de los niveles piezométricos y, a su vez, del gradiente hidráulico entre los Pozos 2 y 4 con $10,26 \times 10^{-3}$ según la Ec. (13). Esto genera una superficie piezométrica mucho más pronunciada que la resultante al inicio del periodo de lluvias de junio de 2019.

$$G(2 - 4) = \frac{406,83 \text{ m} - 398,14 \text{ m}}{846,34 \text{ m}} = 10,26 \times 10^{-3} \text{ Ec. (13)}$$

El flujo local se mantiene principalmente de este a oeste, conservando la “divisoria de aguas” vista en el mapa de la figura 60, en donde el agua se dirige hacia el norte y hacia el sur a nivel del Pozo 5. Para este periodo donde las precipitaciones son nulas y la demanda de agua es mayor el Pozo 7 es sometido a trabajo pesado diariamente, desarrollando más actividad antrópica de lo normal, lo cual puede estar influyendo en mayor medida el flujo local de la zona; esto se refleja en una atracción del agua cercana al Lago de Valencia (Pozo 8) hacia el Pozo 7. Sin embargo, no se pudieron tomar mediciones de parámetros físico-químicos durante esta época.

A partir de la información recabada en los tres mapas se puede deducir que, posiblemente exista una fuente de agua que recargue el acuífero fuera de la zona de estudio, considerando de esta manera que la zona de recarga podría estar ubicada al este de la región, idea consistente con el Mapa Hidrogeológico de Venezuela (1972) (figura 62). Al comparar los mapas anteriores con este último, se observa que, el flujo regional de las aguas subterráneas que circula en la cuenca del Lago de Valencia, en general se dirige directamente al lago, mostrando una concordancia entre los datos actuales y los del mapa de 1972.

La divisoria presente en los últimos 2 mapas, no se aprecia en el Mapa Hidrogeológico de Venezuela de 1972 dadas las diferentes escalas que se están manejando, pudiendo encontrar más detalles en los mapas locales. De igual manera, en vista del incremento de la población y las actividades agrícolas e industriales en la región se han instalado nuevos pozos, tanto en la zona estudiada como en sus

adyacencias, lo que aumenta la demanda de agua que también puede afectar la dirección del flujo.

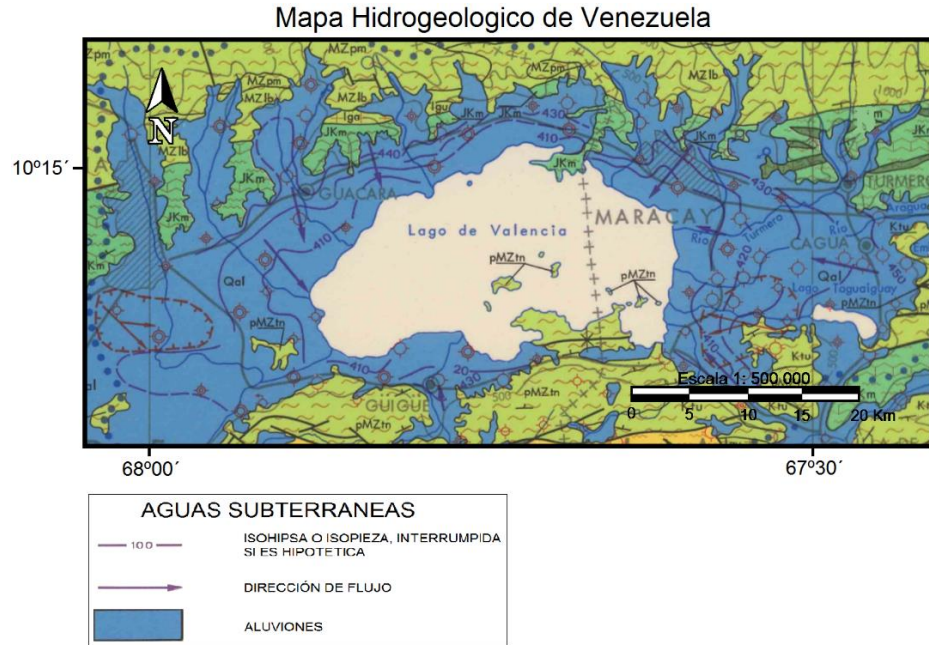


Figura 62. Mapa Hidrogeológico de Venezuela, (División Hidrogeológica del Ministerio de Minas e Hidrocarburos, 1972)

En resumen, la principal dirección de flujo es de este a oeste dentro de una superficie piezométrica observada a través de los Pozos 2, 4, 7 y 8, superficie que se visualiza más aplanada en el periodo de lluvias por su bajo gradiente hidráulico, posiblemente esto es consecuencia de la recarga para este periodo en el acuífero, formando una superficie piezométrica más homogénea; comportamiento que contrasta con el de periodo seco, donde la superficie se torna más irregular a causa de un gradiente hidráulico más elevado, exhibiendo una superficie piezométrica más heterogénea que la del periodo de lluvias.

En cuanto a las características físico-químicas, la superficie piezométrica de los pozos mencionados, no muestra grandes diferencias en su conductividad eléctrica y pH, salvo algunas alteraciones producto del cambio de periodos o a la posible mezcla de aguas de distintas fuentes. No obstante, el Pozo 6 difiere por completo,

refiriéndolo a una capa acuífera distinta, posiblemente contaminada y mucho más cercana a la superficie.

IV.3 MODELO CONCEPTUAL

El acuífero ubicado al este del Lago de Valencia, es un acuífero confinado compuesto de arena media a gruesa (U2), soterrado por una gran capa de arcilla (U1) de aproximadamente 90 m de espesor que presenta lentes arenosos saturados de agua, tal como se idealiza en la figura 64.

En cuanto a su granulometría, el acuífero presenta sedimentos más gruesos en dirección este, mientras que los sedimentos más finos se encuentran en dirección oeste. Asimismo, la U2 se ubica en un nivel más profundo en dirección oeste y más cercano a la superficie en dirección este, comportamiento que corresponde con la estructura de los abanicos aluviales generados en el Pleistoceno-medio en la cuenca del Lago de Valencia (periodo de máxima desecación alcanzada en la mencionada cuenca).

Este acuífero posee una conductividad hidráulica promedio de 28,35 m/día, la cual es una conductividad moderadamente alta, característica de arenas medias y gruesas. Además, presenta una transmisividad promedio de 2267,6 m²/día, valores que califican al acuífero como bueno y excelente y, permeable a muy permeable.

En la zona se registraron dos superficies piezométricas; la primera de ellas, promediando un nivel piezométrico de 417,11 msnm es la más somera de ambas (línea azul que se aprecia en la figura 64), contiene aguas con altos valores de conductividad (4180 μ S/cm) y bajos niveles de pH (6,96), indicando que podría estar siendo afectada por la actividad antrópica del lugar. Este nivel se puede asociar probablemente a los lentes arenosos saturados de agua de la U1, los cuales podrían tener conexión entre sí permitiendo entonces que se genere una superficie piezométrica cercana a la superficie.

La segunda superficie piezométrica es más profunda (ver línea roja en la figura 64), contiene aguas con conductividad más baja (oscilando entre 924 $\mu\text{S}/\text{cm}$ y 1238 $\mu\text{S}/\text{cm}$) y pH más cercano a la neutralidad (oscilando entre 7,61 y 7,28). El nivel promediado es de unos 402,45 msnm, y se asocia a la capa acuífera estudiada (U2), y es la que frecuentemente se utiliza para extraer agua a través de los diferentes pozos.

El acuífero posee un gradiente hidráulico donde las aguas subterráneas fluyen principalmente de este a oeste, lo que expone la existencia de una fuente de recarga externa a la zona estudiada, fuente proveniente del este de la región, donde a 20 Km de la zona de estudio aflora la Faja Caucagua-El Tinaco y la Faja Caracas como posibles fuentes de recarga tal como puede verse en la figura 63. A su vez, existen dos flujos a nivel local que se dirigen hacia el norte y hacia el sur (figura 63), indicando así que los efectos de las actividades antrópicas afectan a la piezometría en la zona de estudio, a tal punto de cambiar su desagüe natural en dirección oeste.

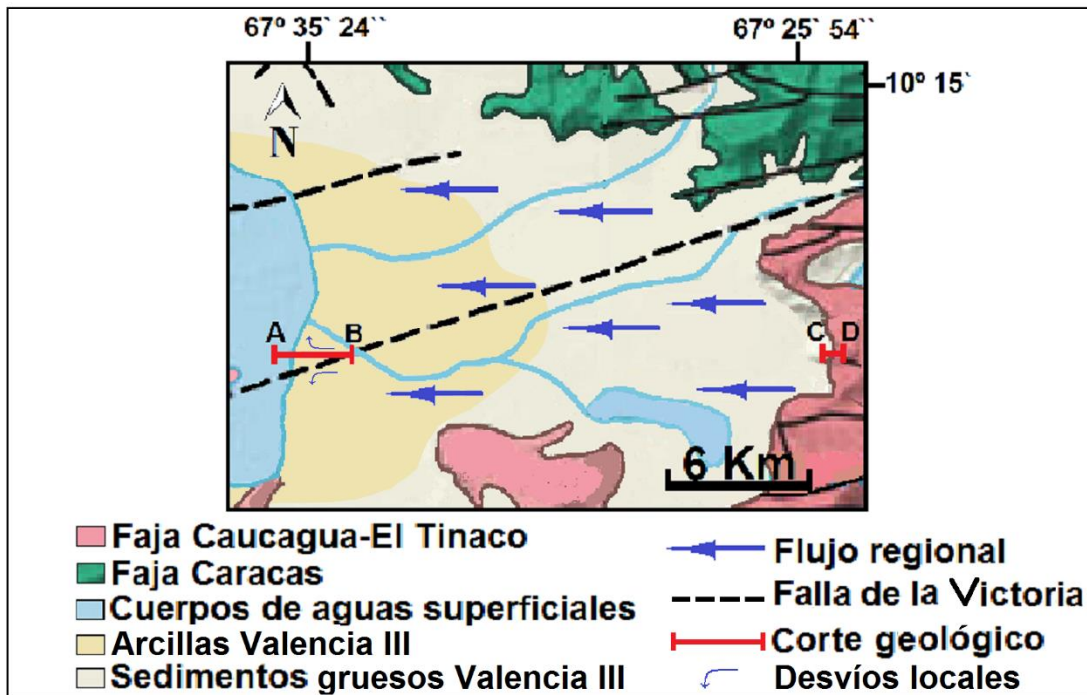


Figura 63. Mapa geológico del este del Lago de Valencia, tomado y modificado de (Urbani y Hackley, 2006)

Por otro lado, los niveles piezométricos varían acorde al periodo de lluvias y al periodo seco de la región, teniendo los niveles más profundos en febrero y los más superficiales en octubre-noviembre, permitiendo intuir que el acuífero es recargado con el agua de las precipitaciones de la región. Sin embargo, esta recarga no se realiza directamente en la zona de estudio, sino que es principalmente de la posible fuente ubicada al este de la zona de estudio. Por otra parte, se considera que igual las precipitaciones locales podrían estar influyendo como recarga o transmisión de presión en la piezometría.

Con base en lo anterior, aunque la interacción acuífero-Lago aún no ha sido debidamente estudiada, se puede asumir que el acuífero descarga las aguas de manera natural en el Lago de Valencia, puesto que, en ausencia aparente de manantiales en los alrededores del lago, dicho cuerpo de agua superficial es el único lugar de posible descarga que se encuentra al oeste de la región.

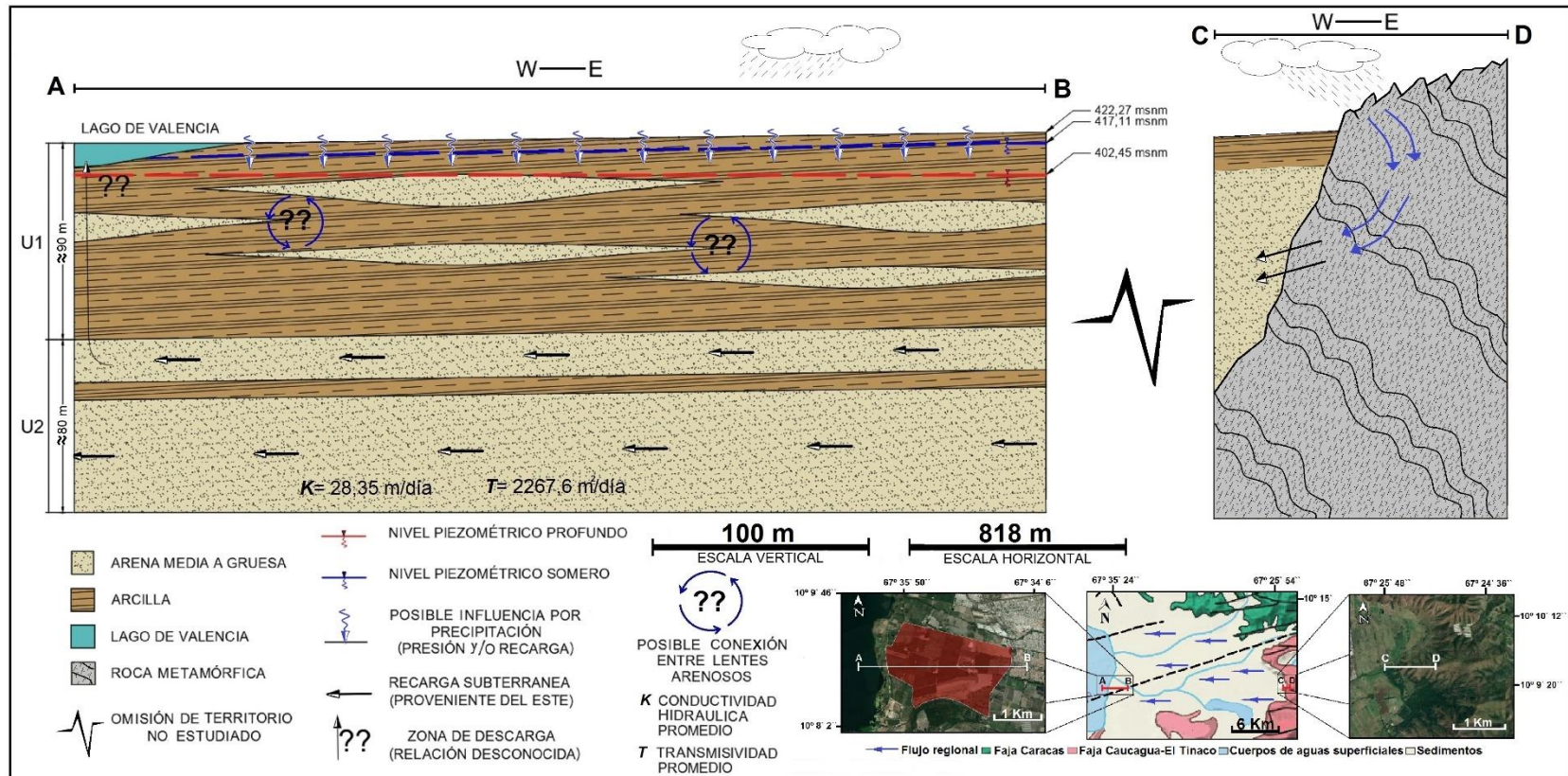


Figura 64. Modelo conceptual 2D del acuífero localizado al este del Lago de Valencia, (elaboración propia)

CONCLUSIONES

- El acuífero estudiado corresponde a la U2, es un acuífero confinado que consta de arena media a gruesa, donde la granulometría aumenta hacia el este y disminuye hacia el oeste, definiendo el aporte de sedimentos provenientes del este. Este acuífero está soterrado por la U1, compuesta por arcilla con presencia de lentes arenosas.
- Los parámetros hidráulicos estimados señalan que el acuífero posee una transmisividad muy buena, con una excelente permeabilidad y una conductividad hidráulica moderadamente alta.
- Los datos pluviométricos contrastados con los niveles piezométricos evidencian que las precipitaciones influyen de manera puntual las fluctuaciones del nivel del agua, más no son la principal fuente de recarga. Asumiendo así, que la principal fuente de recarga del acuífero se encuentra externa a la zona de estudio.
- El principal flujo de aguas subterráneas va de este a oeste, directamente hacia el Lago de Valencia, teniendo desvíos a nivel local hacia el norte y hacia el sur, debido a la actividad antrópica desarrollada por los pozos de la zona. Esta dirección de flujo señala que la principal fuente de recarga se encuentra al este de la región.
- La dirección principal de flujo indica que la zona de descarga natural del acuífero es el Lago de Valencia, ya que es la única zona al oeste de la región, como posible desahogo del sistema acuífero.
- El constante bombeo ejercido en el Pozo 7 genera distorsiones a nivel local en el flujo natural de las aguas subterráneas, y adicionalmente propicia la mezcla de aguas de distintas fuentes, generando aumentos en la conductividad y acidez de sus aguas.

- Debido a los someros niveles piezométricos, el Pozo 6 se alimenta probablemente de los lentes de arenas de la U1. Incluso, es posible que se conecten entre sí, ya que en dicho pozo se demanda diariamente el bombeo de agua para las actividades desarrolladas en el galpón con el que colinda.
- El Pozo 6 extrae agua con altos valores de conductividad y bajo pH, respecto a los valores de otros pozos, considerándose que podría tratarse de aguas contaminadas, producto probablemente de la percolación de aguas con mayores niveles de acidez o de la presencia de viejos fosos sépticos abandonados que estén en contacto con los someros lentes de arena mencionados.
- Los Pozos 3 y 5 pese a mostrar comportamientos similares al resto de los pozos a través del tiempo, los mismos parecen pertenecer a superficies piezométricas distintas entre sí y distintas a las demás superficies piezométricas identificadas. De modo que, no se sabe con certeza a qué unidad pertenecen cada una de ellas.

RECOMENDACIONES

- Hacer un seguimiento de los niveles piezométricos con más pozos cuya distribución se extienda por toda la región, para mantener un control sobre el uso del acuífero y, además, establecer una idea más clara de la dirección de flujo del acuífero estudiado.
- Llevar a cabo ensayos de bombeo para establecer el comportamiento general del acuífero y comprobar si los pozos estudiados están conectados entre sí a través de una misma capa acuífera. De igual manera, permitiría comprobar los parámetros del acuífero calculados en esta investigación.
- Realizar un estudio comparativo de los niveles piezométricos del acuífero y los niveles presentados por el Lago de Valencia para así vislumbrar la relación entre el acuífero y el cuerpo de agua superficial, además de detectar qué tipo de comportamiento mutuo presentan.
- Efectuar un seguimiento físico-químico y químico sobre las aguas del Lago de Valencia y las aguas provenientes del acuífero que permita inferir la posible relación entre el Lago de Valencia y el acuífero estudiado.
- Ejecutar estudios geofísicos (resonancias magneto-telúricas o magneto-protónicas, SEVs y/o tomografías eléctricas) con la suficiente capacidad para penetrar a más de 250 m de profundidad, para con ello, lograr establecer el verdadero espesor de la capa acuífera y la ubicación del basamento.
- Hacer estudios con video-cámaras para establecer información dentro de los pozos cuyos datos técnicos como; profundidad de perforación, profundidad de revestimiento ranurado y profundidad de bomba no se encuentran disponibles.
- Realizar una recopilación bibliográfica de todos los registros de pozos, información litológica, datos técnicos de perforación de toda la región al este del Lago de Valencia, para de esta manera facilitar la construcción de más modelos conceptuales y numéricos.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguerrevere, S., y Zuloaga, G. (1937). *Observaciones Geológicas de la parte central de la Cordillera de la Costa, Venezuela. Boletín de Geología y Minas*. Caracas: 1(2-4): 8-24.
- Alvarez, A. (2003). *Geofísica aplicada en los proyectos básicos de ingeniería civil*. Mexico DF, México: SCT. 34-38.
- Audemard, F., y Machette, M. (2000). Map and Database of Quaternary Faults in Venezuela and its Offshore Regions . USGS.
- Barelli, E. (2011). *Estudio hidrogeológico de aguas subterráneas en un sector del campo de Bare, estado Anzoátegui*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas. 18-21.
- Bechara, V., y Matos, H. (2006). *Estudio geológico y caracterización geomecánica de la zona comprendida entre Charallave y Paracotos, estado Miranda. Universidad Central de Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Beck, C. (1986). *Geologie de la chaine Caraïbe su meridien de Caracas (Venezuela)*. Paris: Soc. Geol. de Nord, Villeneuve s'Ascq, Francia. 98-102.
- Benjamini, C. (1986). *Formación Tucutunemo. Memoria VI Congreso Geológico Venezolano*. Caracas: 10: 655.
- Biondo, L., y Steves, N. (2010). *Evaluación Hidrogeológica de la Laguna de Taiguaiguay*. Caracas.
- COALCO Estudios Hidrológicos, C.A. (8 de abril de 2012). REGISTROS ELÉCTRICOS EN POZOS. Municipio Libertador, Aragua, Venezuela.
- COALCO Estudios Hidrológicos, C.A. (21 de marzo de 2010). REGISTROS ELÉCTRICOS EN POZOS. Municipio Libertador, Aragua, Venezuela.

- Comisión Nacional del Agua. (2007). *MANUAL DE AGUA POTABLE*,. Ciudad de Mexico: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales .
- Comisión redactora del Léxico Estratigráfico de Venezuela. (1956). *Léxico estratigrafico de Venezuela*. Caracas: M.J editores Caracas.
- Cruickshank Villanueva, C. (1992). *Relación entre las aguas superficiales y las subterráneas en una cuenca*. UNAM, Instituto de Ingeniería, Ciudad de Mexico. 48-54.
- Custodio, E., y Llamas, M. (1983). *Hidrología subterránea*. Barcelona: Omega.
- Da Lio, C. (2013). *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. Italia.: EL SEVIER.75-83.
- De Wiest, R. (1965). *Geohidrology*. New York, Estados Unidos: John Wiley & Sons.
- Obtenido de https://books.google.co.ve/books?id=OPj61eak4ycC&pg=PA72&dq=aguas+subterranas+en+agua+dulces&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiEgtWdl_bjAhUyxVkKHeRKBXUQ6AEIJzAA#v=onepage&q&f=false
- Diaz , A. (1966). *Estudio geotécnico para las Fundaciones de las Estaciones de Servicio CVP, en la Encrucijada, Autopista Valencia-Tejerías*. Maracay: MOP.
- División Hidrogeológica del Ministerio de Minas e Hidrocarburos. (1972). *Mapa Hidrogeológico de Venezuela*. Caracas: Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Docplayer.com*. (s.f.). Obtenido de <https://docplayer.es/92942712-Universidad-simon-bolivar-decanato-de-estudios-profesionales-coordinacion-de-ingenieria-geofisica.html>
- Espinoza, C. (2009). *Hidráulica de Aguas Subterráneas y Su Aprovechamiento*. Santiago de Chile: Universidad de Chile.
- Falla, E. (2005). *Interpretación de Registros de Pozos de Petróleo*. Trabajo Especial de Grado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas. EAP. de Física, Lima.

- FAO. (2010). *Sistema mundial de información de la FAO sobre el agua en la agricultura*. New York: AQUASTAT. Obtenido de <http://www.fao.org/aquastat/es/overview/methodology/water-use>
- Ferrer, A. (1993). *Diccionario Básico del Proceso Investigativo*. Ediciones CIAR, 152pp.
- Ferrer, M. (2007). *El Ciclo Del Agua/ The Water Cycle*. Minnesota: Mankato.32-44.
- Foster, S., y Shah, T. (2013). Agua subterráneas y agricultura de regadío: haciendo una relación beneficiosa más sostenibl. (C) *Global Water Partnership*, 2, 1-4. Recuperado el 15 de septiembre de 2019, de https://www.gwp.org/globalassets/global/toolbox/publications/perspective-papers/perspective-paper_gwp-and-irrigated-agriculture_spanish.pdf
- Gonzales de Juana, C. (1980). *Geología de Venezuela y de sus cuencas petrolíferas*. Caracas: Ediciones Foninves Tomo I. 205-214.
- Gonzales, L. (1972). *Geología de la Cordillera de la Costa, zona centro occidental*. IV Cong. Geol. Venezolano. Caracas: Memoria, Bol. Geol.
- Grande, S. (1995). *Caracterización geoquímica de la metalavas del Miembro Los Naranjos, Formación Tucutunemo, Aragua Central, y su interpretación tectónica*. Caracas : Trabajo de ascenso.UCV.
- Hernandez, L. (1999). *Caracterización de la ciudad universitaria de la Universidad Autonoma de Nuevo Leon*. Mexico.
- Herrera, I., y Orozco, E. (2006). Acuíferos e hidrogeofísica de Guatemala. *REVISTA GEOLÓGICA DE AMÉRICA CENTRAL*, 24-26.
- Herrera, I., y Orozco, E. (2010). Hidrogeología de Ojo de Agua, cuenca sur de la ciudad de Guatemala. *REVISTA GEOLÓGICA DE AMÉRICA CENTRAL*, 6-12.
- Hiscock, K. (2005). *Hydrogeology. Principles and practice*. Londres: Oxford Blackwell Scientific Publications , REINO UNIDO. 176-186.
- IGRAC. (2007). *Guía para el: Seguimiento General de las Aguas Subterráneas*. Informe nº GP 2006-1, Madrid. 22-30.

- INAMHI. (2005). *Mapa hidrogeológico de la cuenca de río Guayas*. Quito: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología .
- INGEOMINAS. (2004). *Programa de exploración de aguas subterráneas*. Bogotá.D.C.
- Lariónov, A. (1985). *Hidrogeología recreativa*. Moscú: Moscú Mir , URSS. 98-104.
- Lee, k., y Fetter, C. (1994). *Hydrogeology laboratory manual*. New York MacMillan , ESTADOS UNIDOS. 56-62.
- López, J., y Fernandez, L. (2004). *Proteccion de las aguas subterranas frente a vertidos directos e indirectos*. Madrid: Instituto Geologico y Minero de España. Obtenido de https://books.google.co.ve/books?id=GpVdS5jAM74C&pg=PA70&dq=factores+que+controlan+los+acuiferos&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwjWqNr9m_bjAhWOjFkKHcyPC8UQ6AEINzAE#v=onepage&q=factores%20que%20controlan%20los%20acuiferos&f=false
- Lopez, L. (2012). *Estudios Hidrogeológicos en zonas remotas con sig: Erg Chebbi (Marruecos)*. Marruecos.
- Mackenzie, B. (1966). *Geología de la región norte-central de Cojedes*. *Boletín de Geología*. Caracas: 5 (15): 3-72.
- Maclachlan, J. (1960). *Geology of the La Victoria area, Aragua, Venezuela*. Bull. Geol. Soc. Am., 71(3): 241-248.
- Marcano, E. (s/f). *Evolución geoquímica de las aguas superficiales y subterráneas de una zona agrícola al este del Lago de Valencia*. UCV. Sin publicar.
- Menendez, V. (1966). *Tectónica de la parte central de las Montañas Occidentales del Caribe, Venezuela*. Caracas: Bol. Geol.
- Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Servicios Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional. (1974). Mapa hidrológico de Venezuela Maracay Este. 6646-ISE. 41x60. escala 1:25.000. Mapa topográfico
- Molina, R. (2004). *Tomografía Geoeléctrica: desarrollo y potenciales aplicaciones en geotecnia*. Buenos Aires: Universidad Nacional de Córdoba.

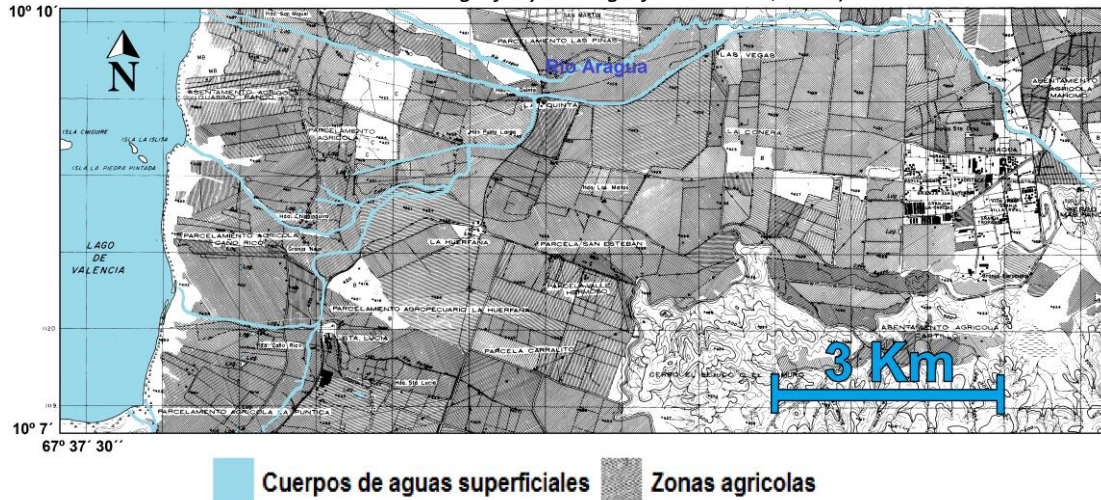
- Montero, R., y Lopez, E. (1997). *Caracterización hidrogeoquímica de aguas subterráneas en la región norcentral del Estado Monagas, Venezuela*. Trabajo Especial de Grado, Caracas.
- Muñoz, A. (1988). *Estudio hidrogeológico y regimen de aguas subterráneas del acuífero de Maracay*. Caracas.
- Navarro, E. (1988). *Revisión y redefinición de unidades litoestratigráficas y síntesis de un modelo tectónico para la evolución de la parte Norte - Central de Venezuela durante el Jurásico Medio - Paleógeno*. Acta Científica Venezolana.
- Olivar, M., y Pedrique, R. (2006). *Evaluación hidrogeológica del valle del Río Tucutunemo, municipio Zamora estado Aragua*. Caracas.
- Ostos, M. (1990). *Evolución tectónica del margen sur-central del caribe basado en datos geoquímicos*. geos. Caracas: (30): 1-294.
- Paoletti, H. (2014). *Caracterización hidrogeológica del acuífero freático en el*. Buenos Aires.
- Peeters, L. (1968). *Origen de la evolución de la cuenca del lago de Valencia, Venezuela*. Caracas: Instituto para la Conservación del lago de Valencia, 66 p.
- Pereira, Z. (2002). *Investigación sismológica en Venezuela*. Caracas: Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas.
- Pozo, M., y Murillo, J. M. (2002). *Aguas subterráneas, paisaje y vida: acuíferos de España*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- Prada, A. (1983). *Geología de los alrededores de San Juan de los Morros y geotecnia*. Revalida en ingeniería geológica.
- Renz, O., y Short, K. (1960). *Estratigrafía de la región comprendida entre El Pao y Acarigua, estados Cojedes y Portuguesa*. Memoria III Congreso Geológico Venezolano. Caracas: 1: 277-315.
- Richard, G. (1994). *Estudio hidrogeológico del acuífero de Valencia estado Carabobo*. Caracas.

- Sanchez, J. (2010). *Conceptos Fundamentales De Hidrogeologia*. España: Universidad de Salamanca.
- Shagam, R. (1960). *Geología de Aragua central (Venezuela)*. Memoria III Geológico Venezolano. Caracas: Boletín de Geología.
- Smith, J. (1952). *Geología de la región de Los Teques*. Caracas: Cúa. Boletín de Geología.
- Suarez, A. (2015). La Conductividad y Resistividad Electrica. *HACH COMPANY*, 3-4.
- Ughi, A. (2014). Estudio hidrogeofísico para caracterizar los acuíferos de la cuenca baja del Río Guey al noreste del Lago de Valencia, Venezuela. *Revista Venezolana de Ciencias de la Tierra*, 1042-A.
- Urbani, F., y Hackley, P. (2006). *Mapa Geologico de Venezuela: Hoja 1 de 2*. Caracas: USGS.
- Villanueva, M., e Iglesias, A. (1984). *Pozos y acuíferos, Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.
- WaterAid. (2018). Tecnologías de abastecimiento de agua. *Technology notes*, 15-20.

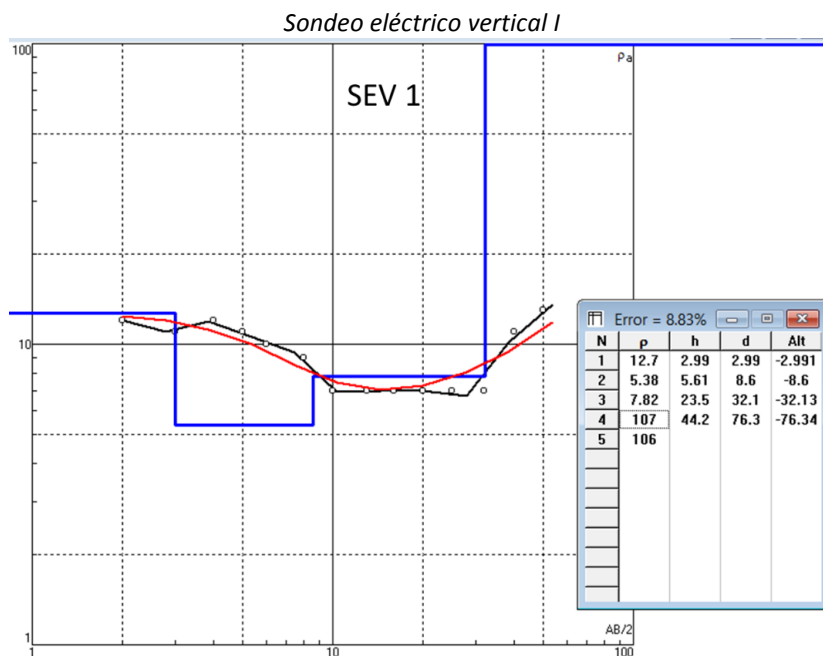
ANEXOS

Anexo I: Mapa hidrológico del este del Lago de Valencia, distribución de principales drenajes que desembocan en el Lago de Valencia.

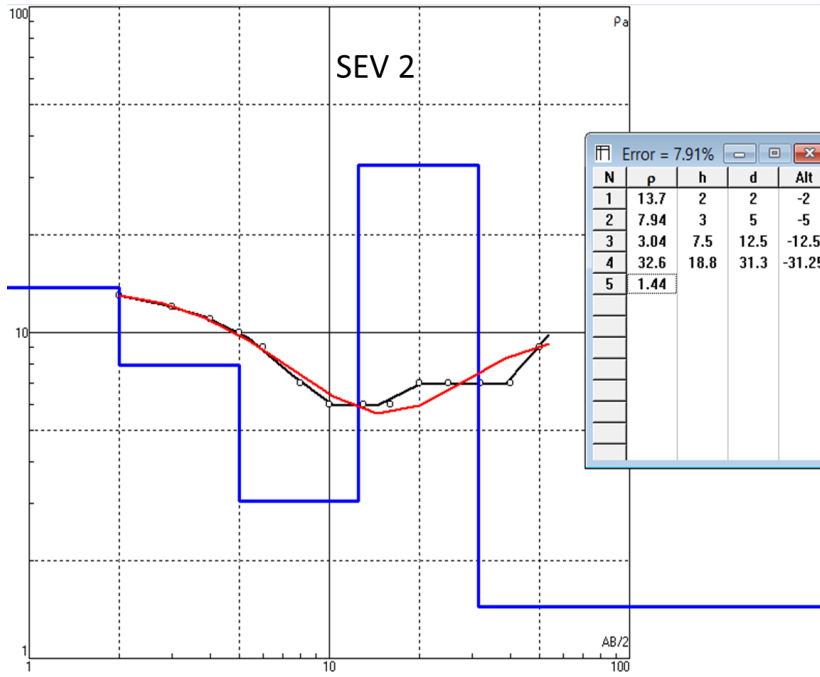
Tomado y modificado de (Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables, Servicios Autónomo de Geografía y Cartografía Nacional, 1974).



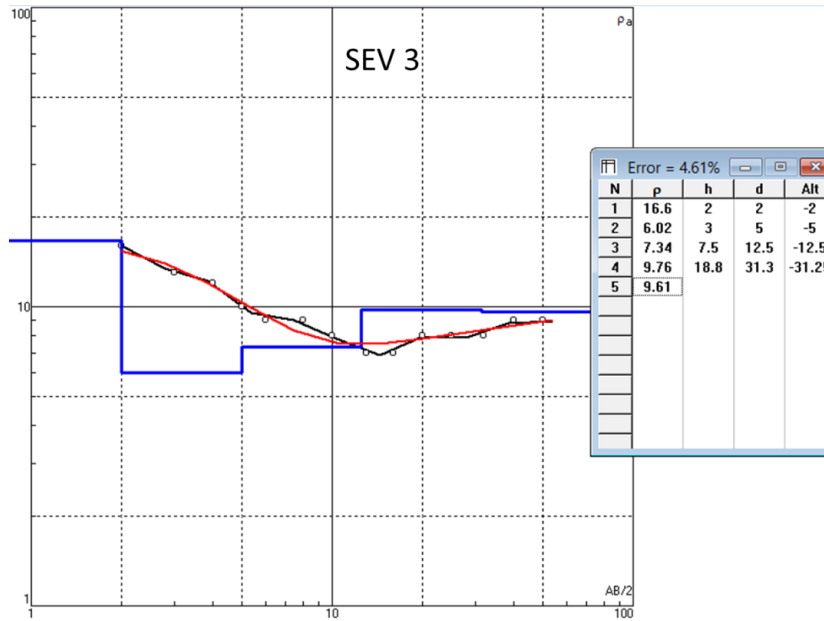
Anexo II: Gráficos de sondeos eléctricos verticales elaborados en IPI2WIN® versión 3.0.1e.



Sondeo eléctrico vertical II



Sondeo eléctrico vertical III



Anexo III: Tablas de niveles piezométricos registrados en metros sobre el nivel del mar (MSNM), observados en cada uno de los pozos estudiados dentro la zona de trabajo.

Pozo 2, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 2 | 656203 m E 1122471 m N | 27-04-2019 | 400,13 |
| | | 22-05-2019 | 406,88 |
| | | 01-06-2019 | 407,94 |
| | | 08-06-2019 | 406,83 |
| | | 15-06-2019 | 406,83 |
| | | 22-06-2019 | 406,83 |
| | | 29-06-2019 | 406,83 |
| | | 06-07-2019 | 406,91 |
| | | 14-07-2019 | 406,83 |
| | | 21-07-2019 | 406,84 |
| | | 28-07-2019 | 402,96 |
| | | 04-08-2019 | 402,88 |
| | | 11-08-2019 | 403,41 |
| | | 29-09-2019 | 406,81 |
| | | 06-10-2019 | 406,83 |
| | | 13-10-2019 | 406,84 |
| | | 20-10-2019 | 404,56 |
| | | 03-11-2019 | 404,54 |
| 10-11-2019 | 404,32 | | |
| 08-02-2020 | 406,83 | | |
| 18-02-2020 | 406,83 | | |

Pozo 3, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 3 | 655622 m E 1122583 m N | 23-02-2019 | 388,07 |
| | | 27-04-2019 | 392,9 |
| | | 29-06-2019 | 393,05 |
| | | 14-07-2019 | 394,3 |
| | | 04-08-2019 | 395,3 |
| | | 11-08-2019 | 396,02 |
| | | 29-09-2019 | 397,01 |
| | | 06-10-2019 | 399,8 |
| | | 13-10-2019 | 397,11 |
| | | 03-11-2019 | 397 |
| | | 10-11-2019 | 396,78 |

Pozo 4, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 4 | 655529 m E 1121960 m N | 27-04-2019 | 398,98 |
| | | 22-05-2019 | 398,6 |
| | | 01-06-2019 | 399,9 |
| | | 08-06-2019 | 400,09 |
| | | 15-06-2019 | 401 |
| | | 22-06-2019 | 400,63 |
| | | 29-06-2019 | 399,84 |
| | | 06-07-2019 | 400,07 |
| | | 14-07-2019 | 400,48 |
| | | 21-07-2019 | 400,48 |
| | | 28-07-2019 | 401,17 |
| | | 04-08-2019 | 401,32 |
| | | 11-08-2019 | 402,14 |
| | | 29-09-2019 | 403,57 |
| | | 06-10-2019 | 402,67 |
| | | 13-10-2019 | 403,47 |
| | | 20-10-2019 | 403,54 |
| | | 03-11-2019 | 403,6 |
| | | 10-11-2019 | 403,42 |
| | | 01-02-2020 | 398,69 |
| 08-02-2020 | 398,14 | | |
| 18-02-2020 | 398,64 | | |

Pozo 5, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 5 | 655031 m E 1122366 m N | 23-02-2019 | 409,24 |
| | | 27-04-2019 | 412,14 |
| | | 22-05-2019 | 412,3 |
| | | 01-06-2019 | 412,64 |
| | | 08-06-2019 | 412,92 |
| | | 15-06-2019 | 413,2 |
| | | 22-06-2019 | 413,26 |
| | | 29-06-2019 | 412,98 |
| | | 06-07-2019 | 413,26 |
| | | 14-07-2019 | 413,32 |
| | | 21-07-2019 | 413,36 |
| | | 28-07-2019 | 413,5 |
| | | 04-08-2019 | 413,55 |
| | | 11-08-2019 | 413,69 |
| | | 29-09-2019 | 412,57 |
| | | 06-10-2019 | 412,46 |
| | | 13-10-2019 | 412,63 |
| | | 20-10-2019 | 412,76 |
| | | 03-11-2019 | 412,75 |
| | | 10-11-2019 | 412,81 |
| 01-02-2020 | 410,12 | | |
| 08-02-2020 | 411,69 | | |
| 18-02-2020 | 411,72 | | |
| 25-02-2020 | 411,26 | | |

Pozo 6, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 6 | 654727 m E 1122061 m N | 15-06-2019 | 415,71 |
| | | 22-06-2019 | 415,76 |
| | | 06-07-2019 | 416,8 |
| | | 14-07-2019 | 416,94 |
| | | 21-07-2019 | 417,09 |
| | | 28-07-2019 | 417,13 |
| | | 04-08-2019 | 417,2 |
| | | 11-08-2019 | 417,38 |
| | | 29-09-2019 | 417,77 |
| | | 06-10-2019 | 417,78 |
| | | 13-10-2019 | 417,93 |
| | | 20-10-2019 | 418,04 |
| | | 03-11-2019 | 417,93 |
| | | 10-11-2019 | 418,06 |
| | | 01-02-2020 | 416,71 |
| | | 08-02-2020 | 416,72 |
| | | 18-02-2020 | 416,78 |
| 25-02-2020 | 416,09 | | |

Pozo 7, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 7 | 654572 m E 1122923 m N | 15-06-2019 | 416,32 |
| | | 22-06-2019 | 416,4 |
| | | 29-06-2019 | 401,6 |
| | | 06-07-2019 | 401,54 |
| | | 14-07-2019 | 401,64 |
| | | 21-07-2019 | 401,82 |
| | | 28-07-2019 | 402,14 |
| | | 04-08-2019 | 399,18 |
| | | 11-08-2019 | 402,65 |
| | | 29-09-2019 | 401,71 |
| | | 06-10-2019 | 402,12 |
| | | 13-10-2019 | 402,65 |
| | | 20-10-2019 | 403,04 |
| | | 03-11-2019 | 401,73 |
| | | 10-11-2019 | 401,39 |
| | | 08-02-2020 | 397,65 |
| | | 18-02-2020 | 398,12 |
| 25-02-2020 | 401,67 | | |

Pozo 8, (datos recabados en campo)

| POZO OBSERBADO | COORDENADAS | FECHAS | MSNM |
|----------------|---------------------------|------------|--------|
| Pozo 8 | 654086 m E 1122208 m N | 23-02-2019 | 397,93 |
| | | 27-04-2019 | 400,45 |
| | | 22-05-2019 | 400,67 |
| | | 01-06-2019 | 401,05 |
| | | 08-06-2019 | 401,54 |
| | | 15-06-2019 | 401,97 |
| | | 22-06-2019 | 402,12 |
| | | 29-06-2019 | 401,77 |
| | | 06-07-2019 | 401,98 |
| | | 14-07-2019 | 402,06 |
| | | 21-07-2019 | 402,07 |
| | | 28-07-2019 | 402,35 |
| | | 04-08-2019 | 402,48 |
| | | 11-08-2019 | 402,77 |
| | | 29-09-2019 | 403,45 |
| | | 06-10-2019 | 403,51 |
| | | 13-10-2019 | 403,76 |
| | | 20-10-2019 | 403,85 |
| | | 03-11-2019 | 403,8 |
| | | 10-11-2019 | 403,91 |
| 01-02-2020 | 400,57 | | |
| 08-02-2020 | 400,56 | | |
| 18-02-2020 | 400,57 | | |
| 25-02-2020 | 400,04 | | |