

UCUENCA

Universidad de Cuenca

Facultad de Ingeniería

Carrera de Ingeniería Civil

PERFORACIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO EN LA MICROCUENCA RÍO CHURUTE PARROQUIA TAURA

Trabajo de titulación previo a la
obtención del título de Ingeniera
Civil

Autor:

Fanny Edith Cabrera Córdova

Director:

Gerardo Vicente Arbito Contreras

ORCID:  0009-0009-5433-312X

Cuenca, Ecuador

2024-01-05

Resumen

El movimiento del agua subterránea está determinado por factores hidrogeológicos; por lo tanto, mediante el registro de condiciones controladas, como operaciones de bombeo y recarga en un pozo exploratorio, es posible estimar los parámetros característicos del acuífero en estudio; para este caso en particular, se estudia las características de la zona de mayor interés hidrogeológico en la Unidad Ambiental Piedemonte Andino, específicamente en la Formación Depósitos Aluviales, ubicada en el recinto Miranda Girón II, parroquia Taura, cantón Naranjal, provincia Guayas.

Se investigó los aspectos geológicos y geofísicos en la zona de estudio, determinando el punto idóneo para la perforación de un pozo exploratorio denominado MCH-01; a partir de las pruebas de bombeo y recarga realizadas en el pozo antes mencionado, así como en pozos de observación o piezómetros denominados RM-01 y RM-02, ubicado a 87,75 y 57,36 metros de distancia del pozo MCH-01, respectivamente; se determina los parámetros para la caracterización hidrogeológica del acuífero, como la transmisividad [T ($m^2/día$)] y coeficiente de almacenamiento [S (adimensional)].

De acuerdo con los estudios y pruebas realizadas, se concluye la presencia de un acuífero de productividad media y alta según los valores de transmisividad y de tipo semiconfinado por los valores del coeficiente de almacenamiento, alcanzando un caudal de producción de hasta 50 (l/s).

Palabras clave: prospección geofísica, transmisividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento



El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Cuenca ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por la propiedad intelectual y los derechos de autor.

Repositorio Institucional: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Abstract

Groundwater movement is determined by hydrogeological factors, therefore, by logging controlled conditions, such as pumping and recharge operations of an exploratory well, it is possible to estimate the characteristic parameters of the aquifer under study; for this particular case, it is studied the characteristics of the area of greatest hydrogeological interest in the Piedemonte Andino Environmental Unit, specifically in the Alluvial Deposits formation, located in Miranda Girón II, Taura parish, Naranjal canton, Guayas province.

Geological and geophysical aspects were investigated in the study área, determining the ideal point for the drilling of an exploratory well called MCH-01; from the pumping and recharge tests carried out in the aforementioned well, as well as in an observation well or piezometers called RM-01 and RM-02, located 87.75 and 57.36 meters away from the MCH-01 well, respectively; the parameters for the hydrogeological characterization of the aquifer are determined, as the transmissivity [T (m^2/day)] and storage coefficient [S (dimensionless)].

According to the studies and tests performed, the presence of an aquifer of medium and high productivity is concluded according to the transmissivity values, and semi-confined type by the values of the storage coefficient, achieving a production flow of up to 50 (l/s).

Keywords: geophysical prospecting, hydraulic transmissivity, storage coefficient



The content of this work corresponds to the right of expression of the authors and does not compromise the institutional thinking of the University of Cuenca, nor does it release its responsibility before third parties. The authors assume responsibility for the intellectual property and copyrights.

Institutional Repository: <https://dspace.ucuenca.edu.ec/>

Índice de contenido

Organización de capítulos	15
Capítulo I	17
1. Introducción	17
1.1. Antecedentes y Justificación	17
1.2. Objetivos	20
1.2.1 Objetivo General	20
1.2.2 Objetivos Específicos	20
Capítulo II	21
2. Marco Teórico	21
2.1. El agua subterránea en formaciones geológicas	21
2.2. Metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas	21
2.2.1. Etapa 1: Estudios hidrogeológicos de reconocimiento a escalas iguales o menores que 1:500.000	22
2.2.2. Etapa 2: Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas entre 1:250.000 y 1:50.000	22
2.2.3. Etapa 3: Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor de 1:25.000	26
2.3. Métodos geoelectricos de prospección geofísica de agua subterránea	27
2.3.1. Prospección geoelectrica 1D. Sondeo Eléctrico Vertical y Sondeos Dipolares	28
2.3.1.1. Dispositivos Electrónicos	29
2.4. Constante Geométrica	32
2.5. Curvas en los Sondeos Eléctricos Verticales	35
2.6. Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)	39
2.7. Elaboración de los cortes geoelectricos y cortes geológicos	41
2.8. Perforación de pozos exploratorios	42
2.8.1. Perforación a rotación con circulación directa de lodos	43
2.8.2. Perfilajes de pozos exploratorios	45
2.8.2.1. Perfilajes durante la perforación exploratoria	46
2.8.2.2. Perfilajes posteriores a la perforación exploratoria	47
2.9. Hidráulica de acuíferos	50
2.9.1. Parámetros hidrogeológicos	52

UCUENCA	5
2.9.2. Pruebas de bombeo	56
2.9.3. Métodos convencionales para la evaluación de pruebas de bombeo	57
2.9.3.1. Ecuaciones fundamentales de flujo	58
2.9.3.2. Métodos en régimen permanente	60
2.9.3.3. Métodos en régimen variable	62
2.9.3.4. Métodos analíticos aplicados a acuíferos libres	63
2.9.3.5. Métodos analíticos aplicados a acuíferos confinados	64
2.9.3.6. Métodos analíticos aplicados a acuíferos semiconfinados	65
2.10. Determinación del coeficiente de transmisividad y coeficiente de almacenamiento con la fórmula de Theis simplificada por Jacob	66
Capítulo III	72
3. Marco Metodológico	72
3.1. Etapa 1: Caracterización hidrogeológica del área de estudio	72
3.1.1. Ubicación geográfica y aspectos generales	72
3.1.2. Caracterización del medio físico	73
3.1.2.1. Climatología	74
3.1.2.2. Precipitación	75
3.1.2.3. Temperatura	76
3.1.2.4. Humedad Relativa	77
3.1.2.5. Nubosidad	77
3.1.2.6. Viento	78
3.1.2.7. Topografía	78
3.1.2.8. Relieve – Suelo	78
3.1.2.9. Hidrología	82
3.1.3. Caracterización geomorfológica y geopedológica	83
3.1.3.1. Unidad genética, morfología y morfometría	85
3.1.3.2. Unidad ambiental	89
3.1.3.3. Formación geológica, tipo de roca y depósitos superficiales	90
3.1.3.4. Taxonomía de los suelos	91
3.2. Etapa 2: Exploración geofísica	97
3.2.1. Análisis preliminar	97
3.2.2. Operación de campo para la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)	97

3.2.3. Análisis y procesamiento de la información	100
3.3. Etapa 3: Pozo exploratorio	101
3.3.1. Propuesta de los puntos de perforación	101
3.3.2. Diseño preliminar del pozo exploratorio MCH-01	102
3.3.3. Perforación del pozo exploratorio MCH-01	103
3.3.4. Perfil estratigráfico y registro geofísico	105
3.3.5. Entubado definitivo y colocación de prefiltro	109
3.3.6. Limpieza, desarrollo del pozo exploratorio y prueba de verticalidad	113
3.3.6.1. Pruebas de bombeo y control de tiempos/abatimientos	115
3.4. Etapa 4: Procesamiento de la información para la caracterización del acuífero	118
3.4.1. Parámetros hidrogeológicos	118
Capítulo IV	126
4. Interpretación de Resultados	126
4.1. Caracterización geoelectrica del subsuelo en la zona de estudio	126
4.1.1. Correlación Geológica – Geoelectrica	128
4.2. Pruebas de bombeo y caracterización hidrogeológica	129
4.2.1 Prueba de bombeo y control de niveles en el pozo exploratorio MCH-01	131
4.2.2 Control de niveles en el piezómetro de observación RM-01	135
4.2.3 Control de niveles en el piezómetro de observación RM-02	139
4.2.4 Uso y comprobación mediante el software AcuíferTest2016.1	143
4.2.5 Resumen de datos obtenidos	148
Capítulo V	151
5. Conclusiones y Recomendaciones	151
Anexo A. Tablas de valores referenciales de los parámetros hidrogeológicos de las formaciones.	157
Anexo B. Pruebas de bombeo	160
Anexo C. Fórmula de Theis	161
Anexo D. Resultados análisis de los estratos del suelo perforado	162

Índice de figura

Figura 2-1. Flujo diagrama conceptual para la exploración hidrogeológica.....	22
Figura 2-2. Circuito de emisión y recepción.....	27
Figura 2-3. Medida de la resistividad aparente, en dos estratos de diferente resistividad ..	28
Figura 2-4. Configuración dispositivos electródicos.....	29
Figura 2-5. Dispositivo electródico Wenner, visto en planta.	30
Figura 2-6. Dispositivo electródico Schlumberger, visto en planta.	30
Figura 2-7. Dispositivo electródico Semi-Schlumberger, visto en planta.	31
Figura 2-8. Dispositivo dipolar axil, visto en planta.	31
Figura 2-9. Esquema resistencia y resistividad	32
Figura 2-10. Resistividad de sedimentos secos, saturados con agua dulce y con agua salada.....	33
Figura 2-11. Sondeo eléctrico en una capa de espesor infinito, homogéneo e isótropo	36
Figura 2-12. Representación Bi-Logarítmica - curva de una capa	36
Figura 2-13. Sondeo eléctrico en un estrato de suelo de dos capas; una superior resistiva (200 Ohm.m) y espesor E_1 y, una inferior conductiva (20 Ohm.m) con espesor infinito.....	37
Figura 2-14. Representación Bi-Logarítmica, curva desarrollada en dos capas	37
Figura 2-15. Sondeo eléctrico en un estrato de suelo de dos capas; una superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_1 y, una inferior resistiva (200 Ohm.m) con espesor infinito.....	37
Figura 2-16. Representación Bi-Logarítmica, curva desarrollada en dos capas	37
Figura 2-17. Curva tipo K; capa superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_1 , capa intermedia resistiva (200 Ohm.m) y espesor E_2 y capa inferior conductiva (20 Ohm.m) de espesor infinito	38
Figura 2-18. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo K....	38

Figura 2-19. Curva tipo H; capa superior resistiva (200 Ohm.m) y espesor E1, capa intermedia conductiva (20 Ohm.m) y espesor E2 y capa inferior resistiva (200 Ohm.m) de espesor infinito38

Figura 2-20. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo H ..38

Figura 2-21. Curva tipo A; capa superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E1, capa intermedia resistiva (100 Ohm.m) y espesor E2 y capa inferior resistiva (300 Ohm.m) de espesor infinito38

Figura 2-22. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo A...38

Figura 2-23. Curva tipo Q; capa superior resistiva (300 Ohm.m) y espesor E1, capa intermedia resistiva (100 Ohm.m) y espesor E2 y capa inferior conductiva (20 Ohm.m) de espesor infinito38

Figura 2-24. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo Q ..38

Figura 2-25. Interpretación de un SEV. Modelo generado por IPI2WIN, donde [18] es la resistividad (Ohm.m) de la capa o estrato, [h] su espesor (m), [d] la profundidad del fondo la capa respecto al suelo (m) y [Alt] la cota del fondo de la capa (msnm)40

Figura 2-26. Sección geoelectrica de correlación de los SEV41

Figura 2-27. Curva de resistividades aparentes (curva en puntos), curva interpretada (curva en rojo), profundidades y resistividades verdaderas correspondientes al modelo (curva en azul)41

Figura 2-28. Perfil litológico y perfil de cronometraje en un pozo exploratorio47

Figura 2-29. Cono de influencia al bombear un pozo de explotación50

Figura 2-30. Elemento diferencial de un medio poroso. Condiciones de continuidad de flujo59

Figura 2-31. Condiciones de flujo en un elemento diferencial de un medio poroso.60

Figura 2-32. Pozo artesiano sometido a bombeo a flujo constante.....67

Figura 2-33. Abatimientos observados en un pozo de observación en dos instantes sucesivos70

Figura 3-1. Ubicación de la zona de estudio - mapa satelital.72

Figura 3-2. Distribución mensual de la precipitación en (mm).....	75
Figura 3-3. Mapa de susceptibilidad a inundaciones. Parroquia Taura.....	76
Figura 3-4. Distribución mensual de la temperatura	77
Figura 3-5. Mapa geopedológico de la parroquia Taura.....	80
Figura 3-6. Mapa del tipo de pendiente en el territorio de la parroquia Taura.....	81
Figura 3-7. Mapa Geomorfológico del cantón Naranjal	88
Figura 3-8. Mapa Geopedológico del cantón Naranjal	96
Figura 3-9. Proceso de inversión de datos de resistividad geoeléctrica	101
Figura 4-1. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 1	127
Figura 4-2. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 2	127
Figura 4-3. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 3	128
Figura 4-4. Tendencia del caudal en el tiempo (3horas con 15minutos).....	130
Figura 4-5. Tendencia del caudal en el tiempo (3horas con 15minutos).....	131
Figura 4-6. Nivel dinámico vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01.....	133
Figura 4-7. Abatimiento vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01	133
Figura 4-8. Recuperación vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01	134
Figura 4-9. Nivel dinámico vs tiempo - pozo de observación RM-01.....	136
Figura 4-10. Abatimiento vs tiempo - pozo de observación RM-01	137
Figura 4-11. Recuperación vs tiempo - pozo de observación RM-01	138
Figura 4-12. Nivel dinámico vs tiempo - pozo de observación RM-02.....	141
Figura 4-13. Abatimiento vs tiempo - pozo de observación RM-02	141
Figura 4-14. Recuperación vs tiempo - pozo de observación RM-02.....	142
Figura 4-15. Introducción de datos. AcuíferoTest2016.1	144
Figura 4-16. Tipo de régimen. AcuíferoTest2016.1	144

Figura 4-17. Gráfica (abatimientos vs tiempos) MCH-01. AquiferTest2016.1	145
Figura 4-18. Gráfica (abatimientos vs tiempos) RM-01. AquiferTest2016.1	145
Figura 4-19. Gráfica (abatimientos vs tiempos) RM-02. AquiferTest2016.1	146
Figura 4-20. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento MCH-01. AquiferTest2016.1	146
Figura 4-21. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento RM-01. AquiferTest2016.1147	
Figura 4-22. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento RM-02. AquiferTest2016.1147	
Figura 4-23. Ubicación de los pozos en plano y dirección del flujo. AquiferTest2016.1	148
Figura 4-24. Esquema de los pozos en condiciones de bombeo	149
Figura 4-25. Esquema de los pozos en condiciones de recarga	149
Figura 4-26. Esquema pozo exploratorio MCH-01	150

Índice de tablas

Tabla 2–1. Criterios para la selección de los dispositivos	30
Tabla 2–2. Sondeos eléctricos en una sucesión de una capa.....	36
Tabla 2–3. Sondeos eléctricos en una sucesión de dos capas	37
Tabla 2–4. Sondeos eléctricos en una sucesión de tres capas.....	38
Tabla 2–5. Rangos para las resistividades de diferentes materiales.....	40
Tabla 2–6. Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos libres.....	64
Tabla 2–7. Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos confinados	65
Tabla 2–8. Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos semiconfinados	66
Tabla 3–1. Resumen climatológico microcuenca Río Churute	74
Tabla 3–2. Parámetros fisiográficos de las cuencas	82
Tabla 3–3. Continuación. Parámetros fisiográficos de las cuencas	82
Tabla 3–4. Caudales medios mensuales (m3s). Cuenca Río Taura	83
Tabla 3–5. Material como base de información para la microcuenca Río Churute	84
Tabla 3–6. Geomorfología en la zona de estudio	86
Tabla 3–7. Principales características Unidad Ambiental Piedemonte Andino	89
Tabla 3–8. Principales características Unidad Ambiental Llanura Aluvial Reciente	90
Tabla 3–9. Clasificación taxonómica de los suelos en la zona de estudio	92
Tabla 3–10. Equipo utilizado en la campaña de prospección geoelectrica	98
Tabla 3–11. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales en el área de estudio	99
Tabla 3–12. Registro fotográfico realización Sondeos Eléctricos Verticales	100
Tabla 3–13. Propuesta ubicación pozo exploratorio MCH-01	102
Tabla 3–14. Diseño técnico preliminar pozo exploratorio MCH-01.....	102

Tabla 3–15. Resumen de las pruebas hidráulicas realizadas en pozos existentes en el recinto Miranda Girón 2 ubicados en la zona de estudio	102
Tabla 3–16. Fotografías adecuación del sitio - perforación pozo exploratorio MCH-01	103
Tabla 4–1. Características de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados	126
Tabla 4–2. Valores de resistividad en las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio	128
Tabla 4–3. Corte geológico - geoelectrico 2-2 _a	129
Tabla 4–4. Aforos pozo exploratorio MCH-01	130
Tabla 4–5. Características generales pozo exploratorio MCH-01	131
Tabla 4–6. Registros prueba de bombeo pozo exploratorio MCH-01	132
Tabla 4–7. Cálculo transmisividad pozo exploratorio MCH-01	135
Tabla 4–8. Características pozo de observación RM-01	135
Tabla 4–9. Registros prueba de bombeo pozo de observación RM-01	136
Tabla 4–10. Cálculo transmisividad y coeficiente de almacenamiento pozo de observación RM-01	139
Tabla 4–11. Características pozo de observación RM-02	139
Tabla 4–12. Registros prueba de bombeo pozo de observación RM-02.....	140
Tabla 4–13. Cálculo transmisividad y coeficiente de almacenamiento pozo de observación RM-02	143
Tabla 4–14. Resumen de datos obtenidos	148

Dedicatoria

A mis padres y hermanos, quienes me han brindado su apoyo incondicional y han sido el soporte para cumplir mis metas ...

Agradecimientos

Mi profundo agradecimiento a las autoridades y personal de la Junta de Riego y Drenaje Manuel de J. Calle, por la confianza brindada y permitirme realizar el proceso de este proyecto técnico.

De igual manera mis agradecimientos a la Universidad Estatal de Cuenca, a la Facultad de Ingeniería y en especial, a mis maestros, quienes con la enseñanza de sus valiosos conocimientos me han permitido recibirme como profesional.

Organización de capítulos

En la presente guía se desarrolla los conceptos básicos relacionados a las distintas etapas para estimar la caracterización hidrogeológica de un acuífero, se evalúa la metodología en base a un fundamento teórico explícito y práctico, que es llevado a la práctica logrando la perforación de un pozo exploratorio con la finalidad de explotar agua para fines de riego y usos complementarios.

- 1. Introducción:** En este capítulo se expone de manera general los antecedentes del proyecto técnico de titulación, la justificación del problema y la importancia de abordar el mismo, considerando el estado del arte actual. También se incluyen los objetivos tanto general como específicos.
- 2. Marco Teórico:** En este capítulo se sintetiza los conceptos fundamentales para el estudio de acuíferos, síntesis de los métodos eléctricos para la prospección geofísica de agua subterránea, técnicas de perforación y perfilajes de un pozo exploratorio, el análisis del flujo de agua a través de pozos tubulares, el desarrollo y evaluación de ensayos o pruebas de bombeo; por consecuencia, se indican el desarrollo matemático de los diferentes métodos analíticos más representativos para el estudio de problemas de flujo a través de pozos tubulares en condición de régimen permanente o establecida y variable o transitoria, según el tipo de acuífero que se requiere evaluar.
- 3. Marco Metodológico:** A partir de un caso de estudio, se detalla las diferentes etapas para el desarrollo y evaluación de la caracterización del acuífero o zona de estudio, mediante la determinación de parámetros hidrogeológicos como transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).

Análisis de Resultados: Se presenta la aplicación de las metodologías descritas en los capítulos anteriores, a la ejecución de prospección hidrogeológica y geofísica; a la determinación de los puntos idóneos para la perforación de un pozo tubular de exploración (de una profundidad de 30 metros y diámetro de 6 pulgadas); a la ejecución de ensayos o pruebas de bombeo detallando el desarrollo de los niveles dinámicos del agua tanto en el pozo de exploración como en los pozos o piezómetros de observación, así como también los niveles dinámicos en los ensayos o pruebas de recuperación; con lo descrito anteriormente el desarrollo de un análisis sobre los valores determinados de los parámetros hidrogeológicos característicos del acuífero o zona de estudio.

- 4. Conclusiones y Recomendaciones:** Por último, se presentan los comentarios finales de la metodología sugerida, de limitaciones y alcances de los análisis, de los resultados obtenidos y recomendaciones para futuras aplicaciones.

Capítulo I

1. Introducción

1.1. Antecedentes y Justificación

En Ecuador, el volumen total nacional continental de recursos hídricos superficiales es de 361.747 hm³, distribuido en: costa con 18%; sierra el 17% y oriente 66%. Por otro lado, la disponibilidad promedio de recursos hídricos subterráneos es de 56.556 hm³, donde el 27% corresponde a la región litoral; 15% a la región interandina y 58% a la región amazónica (ARCA, 2022).

El agua subterránea es una fuente de gran importancia para aproximadamente la mitad de la población mundial (UNESCO, 2022), representando un tercio de toda el agua extraída para el consumo humano, el desarrollo agrícola e industrial, especialmente en zonas donde el recurso hídrico superficial es limitado, ya sea por calidad o escases temporal (inundaciones y sequías) (Döll et al., 2022). Sin embargo, la información del recurso hídrico subterráneo del cual dispone el país es incompleta, desactualizada y limitada (Camacho y Astudillo, 2020).

Los recursos hídricos subterráneos en las microcuencas Sur-Este de la Demarcación Hídrica Guayas, no han sido cuantificados minuciosamente; sin embargo, su explotación lleva décadas. Estudios enfocados en la determinación de zonas potencialmente acuíferas y áreas prioritarias para la explotación en la cuenca Río Taura; concluyen que, la información disponible sobre zonas acuíferas y la existencia de pozos tubulares para la extracción del recurso agua, sean estos autorizados o no, al tener su enfoque en únicamente dos parámetros: levantamiento hidrogeológico e inventario de puntos de agua, no es suficiente; por lo tanto, es una limitante para evaluar con exactitud las reservas y potencial hidrogeológico de los diferentes sistemas acuíferos de la zona. (Burbano et al., 2021).

De acuerdo al modelo de asignación de recursos hídricos, la cuenca Río Taura (GU-02) presenta un déficit hídrico superficial, con una media anual del 64% y en sequía del 80%, donde incluso la baja uniformidad de la distribución espacio/temporal de la escorrentía hace que el desbalance entre oferta y demanda se profundice; mientras que al considerar el relieve, dos tercios del área de la cuenca Río Taura es montañosa, siendo adecuada para la construcción de obras de almacenamiento de agua; mientras que, donde el área

de la cuenca es prácticamente plana, se considera adecuada para el desarrollo del riego agrícola (Secretaría del Agua, 2021). En este contexto, los principios para resolver esta problemática serían: dar prioridad al uso de fuentes locales de agua subterránea, y en cuanto al trasvase (transferencia) de agua superficial desde fuentes externas, esta tendría que ser considerada al darse inexistencia o dificultades en el uso de los recursos hídricos locales, o en el caso de producirse una recesión económica; enfatizando que, al no incorporar nuevos proyectos para el abastecimiento de agua para diferentes usos, el déficit en los años correspondientes a los horizontes de planificación aumentará considerablemente (PDOT-GAD-TAURA, 2019).

Con el afán de concretar el proyecto “Riego Tecnificado” que se desarrolla gracias a la “Renovación de la Concesión de Agua” y “Uso y Aprovechamiento de Agua de las cuencas hidrográficas de los ríos Bulubulu, Cañar y Taura” entregado por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica a la Junta de Riego y Drenaje Manuel de J. Calle del cantón La Troncal, conocida como la más grande del país, posibilita la viabilidad que en los próximos años, la Junta gestione ante otros organismos competentes: inversión en obras; asistencia técnica y gestión, a fin de garantizar eficiencia y ampliación de la cobertura de superficie de terreno regado. Con esta resolución, a nivel global se permite la autorización de cerca de 14 m^3 por segundo por diez años con condición de renovación a nivel regional, beneficiando alrededor de 8.000 habitantes de los cantones: La Troncal en la provincia de Cañar; el Triunfo y Naranjal en la provincia del Guayas (Prefectura del Cañar, 2021).

Dentro del Plan Hidráulico regional de la Demarcación Hidrográfica Guayas (2016-2035) y el Plan Nacional de Riego y Drenaje (2012-2027) se han propuesto proyectos, fundamentalmente para la contratación de estudios de: pre inversión e inversión; nueva infraestructura; rehabilitación, ampliación y mejoramiento; manejo y gestión de agua destinada a la irrigación; fortalecimiento organizativo y generación de conocimiento e información. Lo anteriormente expuesto, con la finalidad de que, para el año 2035, la demanda total de agua de la cuenca Río Taura alcance los $1170,07 \text{ hm}^3$, y una vez que los diferentes proyectos entren en funcionamiento, la tasa de déficit de agua alcance un 9,63%; adicionalmente, la tasa de garantía para riego agrícola alcance al 75%, para consumo doméstico al 97%, y para industrialización y servicios al 95% (Consejo Provincial del Guayas, 2021).

Durante el diseño del proyecto “ANÁLISIS ACTUALIZADO DEL SISTEMA DE RIEGO Y DRENAJE MANUEL de J. CALLE, LA TRONCAL, CAÑAR – 2020” se realizó una recopilación de información de fuentes secundarias, pero a la vez se determinó que existía un vacío respecto a información hidrogeológica, la cual es necesaria para caracterizar y conocer a detalle los acuíferos de la zona (JRD-MJC, 2020). A la fecha, existe la necesidad

de contar con una mejor recopilación e interpretación de información considerada como importante para la implementación de proyectos de carácter hidrogeológico, sobre todo en el marco de la adaptación al cambio climático y en la opción de fortalecer los sistemas de abastecimiento de agua para riego y uso complementario. Por tanto, es de suma importancia contar con el proyecto técnico "PERFORACIÓN DE UN POZO EXPLORATORIO EN LA MICROCUENCA RÍO CHURUTE - PARROQUIA TAURA -". Y con ello la investigación de aspectos geológicos y geofísicos de la zona de interés, la estimación de la caracterización hidráulica, a partir de pruebas de bombeo, con las que se determinan parámetros como la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S); con la finalidad de dar a conocer aproximaciones de las condiciones hidrogeológicas de la zona.

En este sentido, el ámbito en que se desarrolla la oportunidad de poner en práctica diferentes aportaciones técnicas, es en el estudio detallado de pruebas de bombeo para la caracterización de acuíferos; tradicionalmente, la aplicación de los diferentes métodos analíticos a problemas prácticos de la ingeniería geotécnica se la realiza de forma empírica, sin llevar a cabo un estudio a fondo sobre los conceptos de la teoría de acuíferos, flujo de agua a través de estratos permeables, interpretación de estudios de prospección geofísica y pruebas de bombeo; y sobre todo, al desarrollo de análisis teóricos y numéricos que permitan vincular el análisis de pruebas de bombeo al diseño de galerías o pozos de explotación de aguas subterráneas.

A lo anterior, los fundamentos teóricos del estudio del flujo en los acuíferos a través de pozos tubulares en condiciones de régimen permanente para el análisis de las propiedades hidráulicas de los acuíferos, se establecen en el siglo XIX mediante las aportaciones de Henry Darcy (1803-1858), Jules Dupuit (1804-1866), Adolph Theim (1836-1908) y Phillipp Forchheimer (1852-1933). Para principios del siglo XX, Charles V. Theis (1900-1908) desarrolla el primer modelo matemático para el estudio de flujo de agua bajo condiciones de régimen variado o transitorio, sentando las bases de posteriores modelos para el análisis aplicado condiciones más complejas de flujo. Las aportaciones más destacadas en el ámbito de la hidrogeología aplicada corresponden a Charles E. Jacob (1914-1970), Mahid S. Hantush (1921-1984), Paul A. Whitherspoon (1919-2012) y Shlomo P. Neuman (1983).

1.2. Objetivos

1.2.1 Objetivo General

Perforar un pozo exploratorio para la captación de agua subterránea en la microcuenca Río Churute, Demarcación Hídrica Guayas.

1.2.2 Objetivos Específicos

1. Integrar información secundaria sobre aspectos hidrogeológicos respecto al área de estudio.
2. Establecer el punto idóneo para la perforación de un pozo exploratorio mediante estudios de exploración geofísica.
3. Identificar las características hidráulicas del acuífero mediante el análisis de variables como: transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).

Capítulo II

2. Marco Teórico

2.1. El agua subterránea en formaciones geológicas

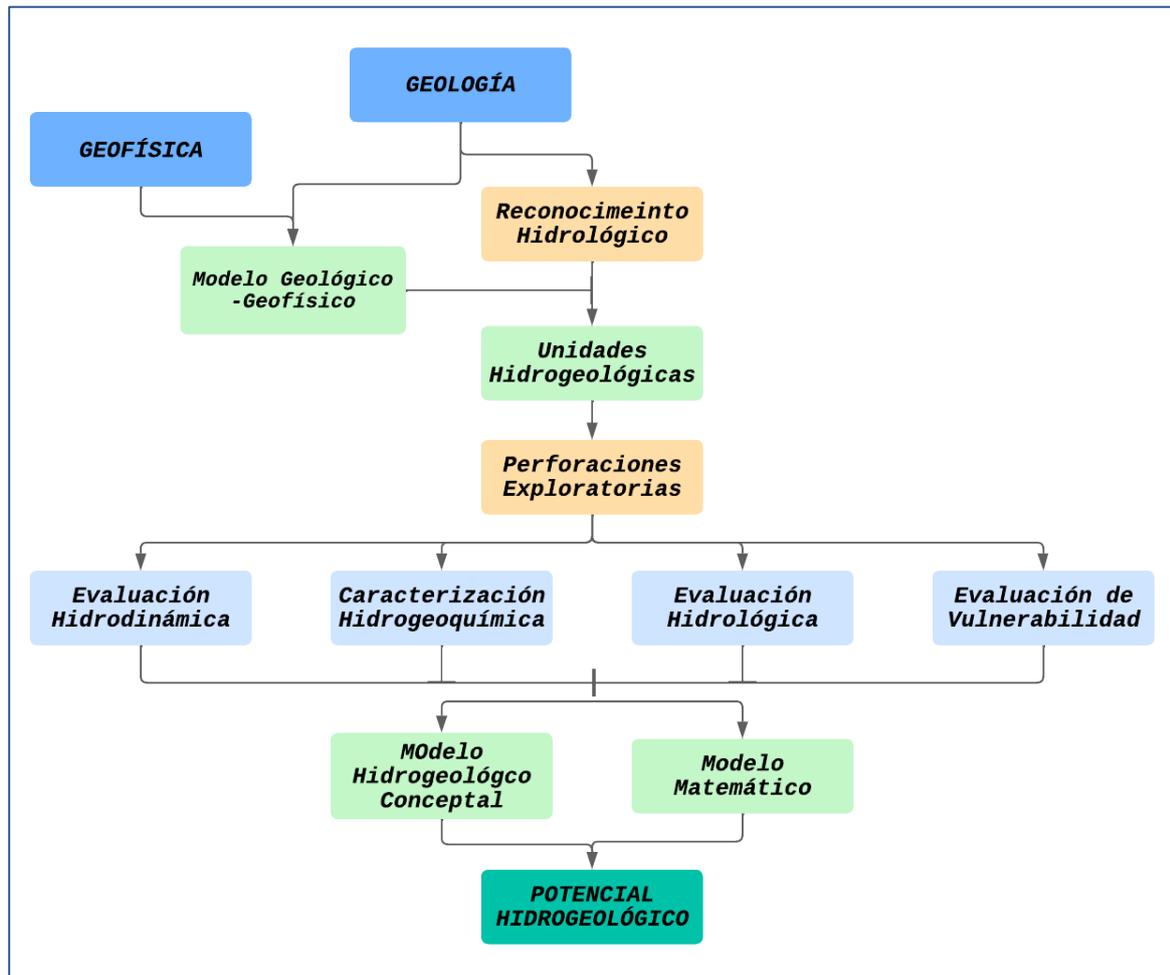
La corteza terrestre presenta ambientes geomorfológicos variados y complejos. Encontrándose suelos, rocas y sedimentos de origen; por lo que su composición y disposición estructural diversificada es lo que determina las propiedades y característica para el movimiento subterráneo del agua (medio poroso o fracturado), así como su potencial para almacenarla y transmitirla. Por procesos geológicos que las formaciones litológicas han sufrido, se han conformado estructuras y zonas con condiciones geométricas o texturales singulares que permiten el almacenamiento y movimiento de las aguas subterráneas, como los perfiles de meteorización en rocas ígneas y metamórficas, los plegamientos en secuencias de rocas sedimentarias, zonas de fracturamiento y fallas regionales, permeabilidad secundaria por disolución en medios kársticos, acumulación de sedimentos superficiales, entre otros. (Custodio & Llamas, 1966). De esta manera, las condiciones hidrodinámicas, así como las propiedades químicas y mineralógicas de los suelos, rocas, sedimentos y perfiles de meteorización, determinan la composición química del agua que contienen (Davis & De Wiest, 1966).

2.2. Metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas

La exploración de aguas subterráneas abarca todos los estudios que estén encaminados a su ubicación, determinación de dimensiones y caracterización de las zonas favorables para la acumulación y explotación del agua. Al respecto, existe una metodología con estándares internacionales, con suficiente difusión en documentos técnicos y puesta en práctica. El nivel del estudio y evaluación, así como el alcance de la exploración hidrogeológica, depende de la escala del trabajo asignado en diferentes etapas. (Ingeominas, 2004)

Los estudios de exploración hidrogeológica contemplan varias disciplinas con metodologías definidas, que siguen un orden secuencial en su desarrollo, donde cada etapa aporta información fundamental e indispensable para las posteriores etapas. En la Figura 2-1, se presenta el orden secuencial para el desarrollo de un estudio hidrogeológico.

Figura 2-1. Flujo diagrama conceptual para la exploración hidrogeológica.



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Ingeominas (2004).

2.2.1. Etapa 1: Estudios hidrogeológicos de reconocimiento a escalas iguales o menores que 1:500.000

Esta etapa contempla los estudios preliminares de una extensa región como unidad hidrogeológica. En esta primera etapa se identifican las unidades geomorfológicas, estructuras geológicas y unidades hidrológicas de mayor interés, lo que permitirá planificar adecuadamente la posterior etapa de exploración.

El objetivo de esta etapa es conocer y presentar las condiciones hidrogeológicas generales del territorio mediante la compilación y la síntesis de información secundaria; de carácter orientativo con la finalidad de contribuir al diseño de planes sistemáticos de exploración a escalas regionales y semiregionales.

2.2.2. Etapa 2: Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica regional de escalas entre 1:250.000 y 1:50.000

En esta etapa predominan los estudios de evaluación y caracterización, permitiendo determinar las particularidades del origen, distribución y régimen de las aguas subterráneas en las estructuras hidrogeológicas (definidas en la etapa anterior), incluyendo yacimientos de minerales y aguas termales.

El objetivo de esta etapa es identificar, delimitar y caracterizar las estructuras hidrogeológicas, estimando como pronóstico las reservas de agua subterránea. Los resultados de estos estudios permiten definir las zonas con mayor potencial para el aprovechamiento de agua subterránea estableciendo lineamientos para su protección y conservación.

A continuación, se presenta de forma sistemática el análisis del diagrama de flujo para la exploración hidrogeológica expuesto en la Figura 2-1, como pasos a seguir integrados en las etapas de la metodología general para la exploración y evaluación de aguas subterráneas.

a) Geología

La geología es catalogada como información base para llevar a cabo los estudios hidrogeológicos, ya que determina las propiedades de las estructuras geológicas para el favorable almacenamiento de agua subterránea. La cartografía geológica debe realizarse enfatizando: la litología, textura, porosidad, estructuras tectónicas y geomorfológicas, así como la composición mineralógica de suelos, rocas y sedimentos. En esta fase es indispensable hacer uso de herramientas y disciplinas, tales como interpretación de imagenología aérea, imagen de radar y satelital, levantamiento de las secuencias estratigráficas, sedimentología, vulcanología y geología estructural; el estudio de las formas e intensidad de fracturamiento para el caso de rocas ígneas y metamórficas; sistemas de discontinuidades (ancho, continuidad, rugosidad y relleno) así como las condiciones hidráulicas de los macizos rocosos.

Existen especiales circunstancias en la que la geomorfología de la zona estudiada cumple un papel determinante en la forma de infiltración del agua, en la secuencia de cómo se realiza el movimiento del agua al sistema fracturado y de éste a las zonas de almacenamiento y alimentación de fuentes de agua superficiales.

b) Exploración geofísica

Esta rama estudia las propiedades físicas del subsuelo y permite correlacionarlas con la geología de superficie que se realizó en la etapa anterior; lo cual, para el caso de

exploración de agua subterránea, contribuye a determinar la disposición de zonas acuíferas; que, a su vez se valida con el desarrollo de perforaciones exploratorias.

Generalmente se hace uso de metodologías geofísicas convencionales, tales como resistividad, gravimetría, sísmica, magnetometría, electromagnetismo, registros geofísicos de pozos tubulares y resonancia magnética de protones o nuclear.

La exploración geofísica ayuda a determinar el nivel de profundidad del agua subterránea, estimar el espesor de la zona saturada como no saturadas, porosidad de las rocas, grado de mineralización de las aguas subterráneas, localizar fracturas e identificar yacimientos geotérmicos y aguas termales (Keith & Mays, 2005).

c) Reconocimiento hidrogeológico

Constituido como la fase inicial y esencial en la exploración de aguas subterráneas, comprende: obtención de datos de campo mediante inventarios de puntos de agua (manantiales, aljibes, humedales, corrientes de agua, pozos tubulares de extracción de agua) y el diseño como desarrollo de una red de monitoreo que confirme el modelo conceptual.

Los datos obtenidos en esta fase, son de fundamental importancia para clasificar y caracterizar las unidades geológicas, y así determinar las características hidrogeológicas preliminares del área en estudio.

d) Perforaciones exploratorias

Estas son de vital importancia para validar los modelos geológicos, geofísicos e hidrogeológicos logrados en las fases anteriores, así como para la caracterización de los acuíferos desde un punto de vista hidráulico y geoquímico. La ubicación y diseño de estas perforaciones dependerán de las particularidades hidrogeológicas de cada zona en estudio. También, si en los modelos se determina que los puntos existentes de extracción de agua subterráneas, no cumplen con los requerimientos de exploración, es recomendable realizar perforaciones exploratorias adicionales.

e) Evaluación hidrodinámica

Este punto refiere al estudio del movimiento de las aguas subterráneas en las rocas y sedimentos, desde los puntos o zonas de recarga hacia las de descarga (dirección del flujo subterráneo). Los principales parámetros hidrodinámicos a considerar son: la presión piezométrica, el gradiente y los parámetros hidráulicos del acuífero (transmisividad y coeficiente de almacenamiento), los cuales caracterizan el almacenamiento y movimiento

del agua en las zonas acuíferas. Estos parámetros hidráulicos se determinan a partir de ensayos de acuífero o pruebas de bombeo. Los puntos idóneos para las perforaciones exploratorias y el desarrollo de los ensayos o pruebas de bombeo, deben determinarse a partir de las fases previas a este estudio.

f) Caracterización hidrogeoquímica

La hidrogeoquímica está relacionada con el origen, los procesos y la evolución de la composición del agua almacenada en las unidades hidrogeológicas. Esta herramienta, además de determinar (mediante análisis fisicoquímicos e isotrópicos) la calidad natural del agua en reserva, ya sea para diferentes usos como: de consumo humano, agrícola, industrial, usos complementarios, entre otros; aporta información al modelo hidrogeológico conceptual como: tiempo de residencia del agua subterránea, identificación de ocurrencia de agua mineral y termal, identificación de las zonas de recarga como descarga y dirección del flujo subterráneo.

g) Evaluación hidrológica

El ciclo hidrológico está conformado por agua atmosférica, superficial y subterránea, encontrándose en constante interacción. Incluso la principal fuente de alimentación de las aguas subterráneas, son las aguas meteóricas. Por tal razón, evaluar las condiciones meteorológicas e hidrológicas, es de gran importancia para contribuir al modelo hidrogeológico con información sobre posibles fuentes y/o zonas de recarga, descarga y disponibilidad de agua para la recarga (balance hídrico).

h) Evaluación de vulnerabilidad intrínseca a la contaminación

Las características litológicas de la zona no saturada, la caracterización del acuífero, la profundidad del nivel del agua para los casos de acuíferos libres o la profundidad de las capas impermeables en acuíferos confinados, son determinantes para establecer la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos a la contaminación. Dicha vulnerabilidad debe revisarse periódicamente, ya que ciertas variables de las antes mencionadas son temporales de acuerdo a situaciones particulares, por ejemplo: la proximidad existente a cuerpos de agua salobre, sistemas de riego en zonas agrícolas con uso de agroquímicos, vertederos de desechos o aguas negras, descargas de sistemas de alcantarillado, plantas o sistemas de tratamiento de aguas servidas, entre otras.

i) Modelo hidrogeológico conceptual y matemático

Para entender la circulación del agua subterránea en el subsuelo, es necesario definir lo que a modelo conceptual hidrogeológico refiere; en el cual, es posible identificar las condiciones de recarga y descarga de cuerpos de agua, las características litológicas de las rocas permeables, las secuencias estratigráficas y las diferentes condiciones hidrogeológicas locales como: dirección del flujo del agua subterránea de la zona estudiada, gradientes hidráulicos, transmisividad, capacidad de almacenamiento, entre otras.

Para construir un modelo hidrogeológico conceptual, se recomienda seguir los siguientes pasos: a) definir las unidades hidroestratigráficas; b) realizar un balance hídrico; c) definir el sistema de flujo (Anderson & Woessner, 1992).

Las unidades hidroestratigráficas, las cuales forman la estructura o eje central del modelo conceptual, comprenden unidades geológicas de similares propiedades hidrogeológicas. Los datos geoquímicos, así como la información hidrogeológica como: precipitación, evaporación y cabezas piezométricas; son de uso esencial para analizar el movimiento del agua subterránea a través de un sistema geológico. Con los datos sobre las cabezas piezométricas y direcciones de flujo subterráneo, se definen las zonas de recarga y descarga como las conexiones entre los acuíferos o con los sistemas de agua superficial.

Un modelo conceptual permite: entender el funcionamiento de las zonas acuíferas, incluyendo aguas minerales y termales; predecir su comportamiento y determinar la capacidad de los recursos explotables; para mitigar posibles impactos ambientales sobre los sistemas acuíferos, y para la gestión integral del recurso hídrico (Foster et al., 2006)

Por otro lado, un modelo matemático es una representación numérica de las condiciones hidrogeológicas, cuyo objetivo permite reforzar el conocimiento que se tenga sobre el funcionamiento de la zona acuífera estudiada, así como la posibilidad de evaluar la potencialidad del agua subterránea almacenada. Es una representación simple de la realidad, este término es usado para describir la formulación matemática y un algoritmo de computador junto con los datos de entrada.

2.2.3. Etapa 3: Estudios de exploración y evaluación hidrogeológica de detalle a escala igual o mayor de 1:25.000

Estos estudios permiten llegar a un conocimiento detallado de la zona específica para el aprovechamiento del agua subterránea, termal y mineral; con el fin de localizar el punto idóneo de perforación y diseñar obras de captación o resolver problemas específicos como:

contaminación, construcción de obras civiles, exploración y explotación minera, ordenamiento territorial, planeación de usos intensivos del suelo, etc. Este nivel de detalle requiere levantamientos precisos de campo, evaluaciones geofísicas y toma sistemática de muestras de roca, suelo y aguas para los análisis posteriores de laboratorio.

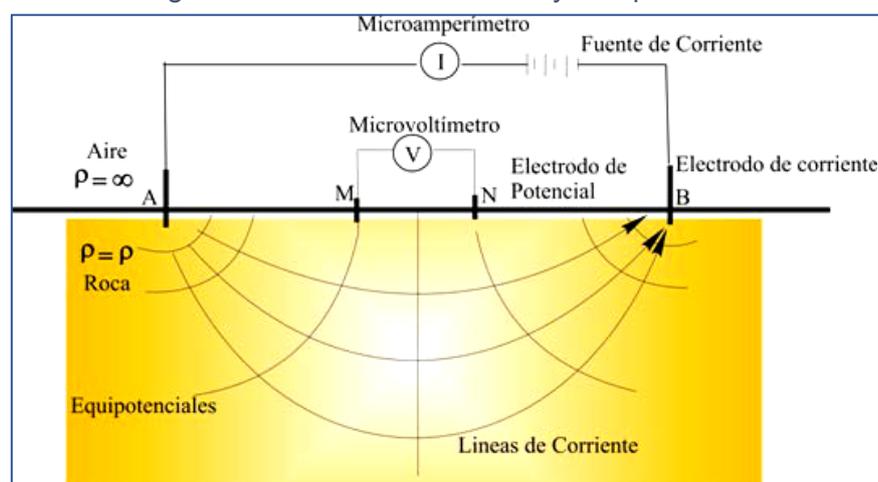
2.3. Métodos geoelectricos de prospección geofísica de agua subterránea

La metodología para la prospección de aguas subterráneas es variada y su aplicación dependerá de las necesidades de la investigación.

La prospección geoelectrica es un estudio geofísico específico donde se prospecciona las propiedades eléctricas de las rocas y de los líquidos que se encuentran en los intersticios porosos. La característica física que se considera en este método, que emplea corriente eléctrica, es la capacidad que poseen los estratos geológicos naturales en conducir corriente eléctrica. Si en un terreno natural cualquiera, se le aplica una corriente eléctrica, esta se propaga de tal forma que es posible asignarle al terreno una resistividad o resistencia específica, una capacitancia y una inductancia; pero si la corriente eléctrica empleada es continua, la resistividad es el único parámetro de importancia, recordando que solo los metales y sus sales conducen la electricidad. Así en la mayoría de los casos, el suelo y subsuelo actúan como aislante o de resistividad muy alta.

Si se insertan dos electrodos en una superficie de suelo isotrópico, aplicando una corriente eléctrica continua de intensidad $[I]$, se observa una caída de potencial $[\Delta V]$ entre dos puntos del terreno. A partir de estas medidas y la ley de Ohm, se puede determinar la resistencia del suelo en el circuito.

Figura 2-2. Circuito de emisión y recepción



Fuente: García (2003)

2.3.1. Prospección geoelectrónica 1D. Sondeo Eléctrico Vertical y Sondeos Dipolares

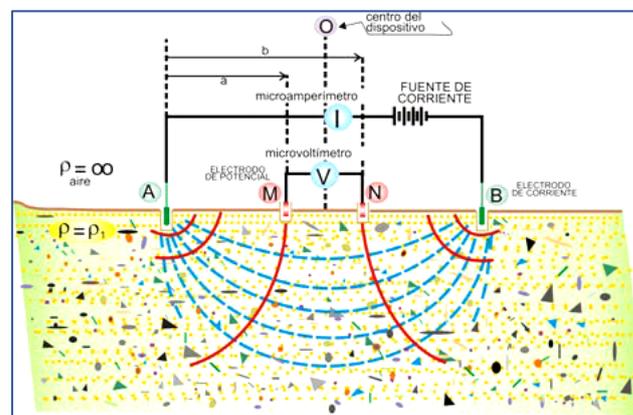
El sondeo eléctrico vertical (SEV) consiste en registrar desde la superficie, la variación de la resistividad aparente en profundidad, a medida que los electrodos situados en dos puntos sobre una base recta, alejándose del centro [O] del dispositivo, en forma progresiva y regular, a intervalos de escala logarítmica (Modelo 1D). Con las mediciones obtenidas, en función de la distancia entre electrodo y centro del sistema, se puede establecer la curva de variaciones de resistividad aparente.

Los pares de valores de resistividad aparente (distancia [OA]) se traducen a un gráfico logarítmico dando como resultado una curva de campo, que posteriormente será interpretada por métodos cuantitativos y cualitativos. Los resultados de esta interpretación permiten determinar los espesores y las resistividades aparentes de las diferentes capas de suelo, cuya interpretación recibe el nombre de corte geológico (Modelo 1D).

Dentro de esta metodología, también se incluyen los Sondeos Dipolares (SD), donde la separación entre electrodos de corriente [AB] y el potencial [MN], son pequeños en comparación con la distancia [R] que los separa. Los Sondeos Dipolares, surgen como consecuencia de las dificultades que presentaban la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV), a causa de la gran longitud que exige entre [A] y [B] (Orellana, 1982).

Resistividad aparente: Generalmente la medición de la resistividad en un medio homogéneo e isotrópico, pocas veces se encuentra factible, puesto que en la mayoría de casos, los materiales de la corteza terrestre se disponen en capas horizontales, donde sus propiedades incluida la resistividad varían considerablemente. Cuando en un circuito de emisión – recepción, están involucradas dos o más capas, la resistividad medida en la superficie será un promedio entre las resistividades de los materiales por donde pasa la corriente; a esta resistividad se la denomina *resistividad aparente*.

Figura 2-3. Medida de la resistividad aparente, en dos estratos de diferente resistividad

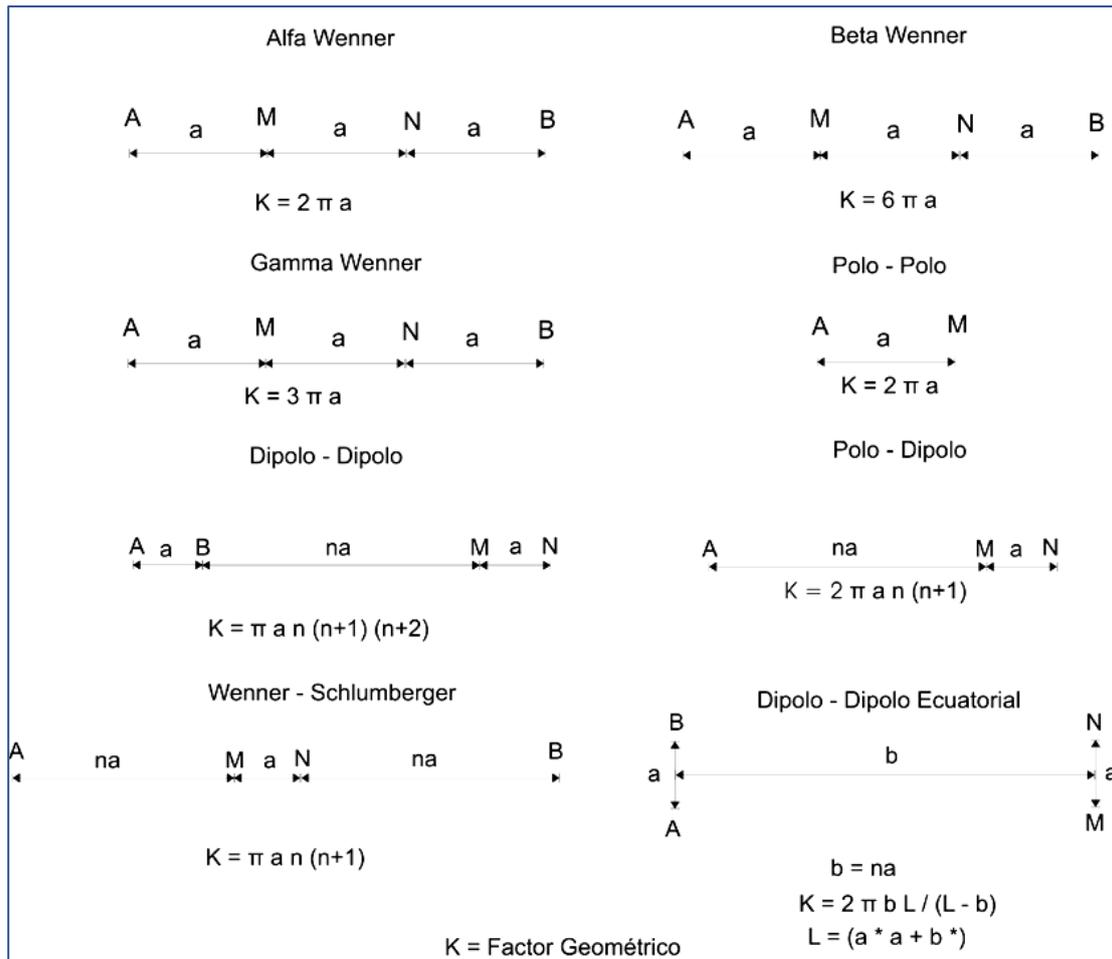


Fuente: García (2003)

2.3.1.1. Dispositivos Electrónicos

La forma de disponer los electrodos por los que se introduce la corriente eléctrica, registrando el potencial e investigando la resistividad en la superficie de un medio, da lugar a los diferentes dispositivos o arreglos electrónicos. La importancia de estos dispositivos radica en que sus formulaciones matemáticas condicionan el trabajo en campaña, permitiendo menor o mayor agilidad de las operaciones.

Figura 2-4. Configuración dispositivos electrónicos



Fuente: García (2003)

La configuración de los dispositivos empleados en el método geoelectrónico, poseen diferencias entre sí por la distancia relativa entre electrodos, y la posición de dichos electrodos de corriente respecto a los electrodos de potencial. Al momento de seleccionar los dispositivos geoelectrónicos, son varios los factores a considerar (Ward, 1990):

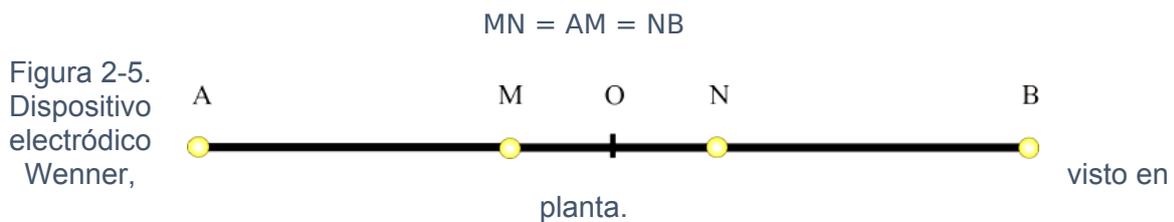
Tabla 2-1. Criterios para la selección de los dispositivos

Factores que influyen en la selección de dispositivos				
Dispositivo	Intensidad de la señal de respuesta	Resolución	Sensibilidad a heterogeneidades del terreno	Ruido de acoplamiento electromagnético
Wenner	A	A	C	C
Schlumberger	B	A	C	B
Dipolo-Dipolo	C	B	A	A

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Ward (1990)

a) Dispositivo de Wenner

Dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico, en donde las distancias [MN], [AM] y [NB] son iguales, es decir mantienen dimensiones constantes durante las mediciones, por lo tanto:

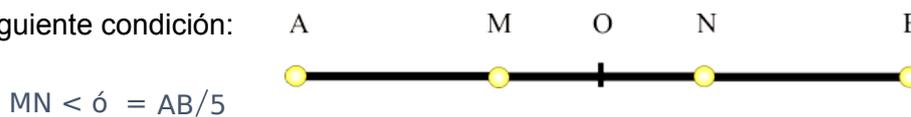


Fuente: Orellana (1984)

Cada vez que la distancia [AB] se amplie, es indispensable modificar la distancia [MN], por lo que el desarrollo con este dispositivo resulta trabajoso.

b) Dispositivo Schlumberger

Conocido también como un dispositivo tetrapolar, rectilíneo y simétrico, que cumple con la siguiente condición:



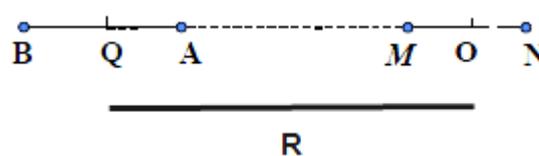
Fuente: Orellana (1984)

La ventaja del uso del dispositivo Schlumberger, es que para una misma posición de los electrodos [M] y [N], los electrodos [A] y [B] puedan disponerse a cualquier distancia que respete la condición mencionada, por lo que esto acelera el trabajo en campaña al ahorrar gran cantidad de operaciones.

c) Dispositivo Semi-Schlumberger

Con este dispositivo, consiste en ubicar un electrodo de corriente [B] en posición fija e inamovible a 90° respecto a la línea [AMN], y de esta manera anular la diferencia de potencial del electrodo [B] con respecto a [MN], por lo que el electrodo de corriente [A] es el único que se

Figura 2-7.
electrónico Semi-
visto en planta.



desplaza.
Dispositivo
Schlumberger,

Fuente: Orellana (1984)

Este tipo de dispositivos se emplean en lugares donde existen dificultades para tender los cables en forma simétrica, o en lugares en donde los condicionamientos geológicos los impiden.

d) Dispositivo Dipolo-Dipolo

Estos dispositivos se caracterizan por tener la distancia de los electrodos de corriente [A] y [B] lo suficientemente cercana entre sí respecto a la distancia en la que se miden sus efectos para puedan considerarse un dipolo. Existen dos dipolos, el [A] y [B] de emisión y el [M] y [N] de recepción, cuya posición mutua puede ser en principio cualquiera; y para que puedan considerarse realmente dipolos, se debe cumplir lo siguiente:

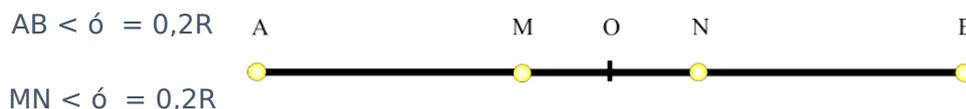


Figura 2-8. Dispositivo dipolar axil, visto en planta.

Fuente: Loke (2004)

Para el dispositivo axil, la constante viene dada por la ecuación: $K = \frac{\pi R^3}{ABMN}$

El problema que presentan, se establece cuando en campo dipolar decrece con el cubo de la distancia entre los dipolos de corriente y de potencial, por lo que es necesario intensidades de corriente mucho mayores que los dispositivos lineales. Generalmente son usados en investigaciones geoelectricas profundas, ya que los circuitos de potencial y de corriente son independientes.

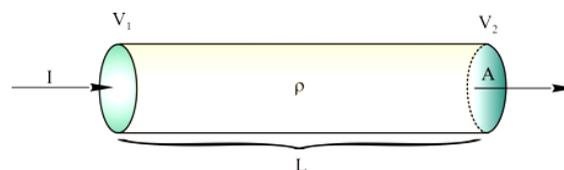
2.4. Constante Geométrica

Ley de Ohm: Esta ley representa la resistencia [R] que ofrece un conductor al flujo de una corriente, que es directamente proporcional a la diferencia de potencial [ΔV] entre los extremos del material, e inversamente proporcional a la intensidad [I] del flujo de corriente.

$$R = \frac{\Delta V}{I}$$

Con unidad de medida Ohmio, que surge de: cuando por un conductor se hace circular una corriente de intensidad [I = 1 (amperio)] y la diferencia de potencial entre sus extremos es de un voltio, la resistencia es [R = 1Ohmio (Ω)].

A su vez la resistencia [R] del conductor es directamente proporcional a la longitud [L] del material considerado, e inversamente proporcional a su sección [A], multiplicada por una constante de proporcionalidad, conocida como resistividad [ρ = (Rho)].



$$R = \rho \frac{L}{A} \text{ y } \rho = \frac{\Delta V}{I} * \frac{A}{L}$$

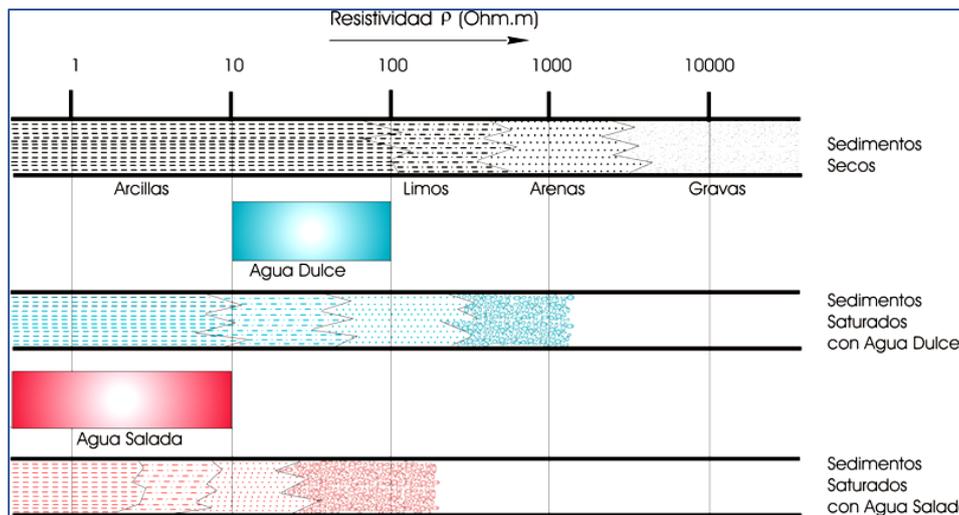
Figura 2-9. Esquema resistencia y resistividad

Fuente: Paredes (2017)

La resistividad, denominada también resistencia específica, es una constante propia e intrínseca de cada material, independientemente de su forma. Con una unidad de medida Ohmio*metro ($\Omega * m$). un conductor de $1m^2$ de sección y un metro de longitud, posee

una resistividad de $1 (\Omega \cdot m)$, cuando pasa un corriente de intensidad $[I = 1 \text{ (amperio)}]$, mientras la diferencia de potencial registrada en los extremos es igual a $[V = 1 \text{ voltio}]$.

Resistividad de las rocas más comunes: Los materiales que conforman la corteza terrestre generalmente son *materiales aislantes o malos conductores*, ya que los materiales como los metales y las sales se comportan como buenos conductores, significando que las rocas poseen resistividades muy elevadas. El agua también tiene una resistividad muy alta, pero la presencia de sales disueltas la convierten en conductor electrolítico. En la mayoría de las rocas, que componen la porción más superficial de la corteza, están meteorizadas en menor o mayor medida y poseen fisuras o poros, donde por lo general se encuentran un cierto contenido de humedad, dicha humedad o agua contenida en los poros o fisuras poseen sales disueltas, que contribuyen a aumentar la capacidad de conducir corriente eléctrica. Por dicha razón, la resistividad de las rocas consolidadas y no consolidadas dependen de su constitución mineralógica, de su



porosidad, del grado de saturación y del tipo de fluido que están en los poros o fisuras.

El agua destilada posee una resistividad que alcanzan los $3.000 (\Omega \cdot m)$, mientras que el agua marina alcanza los $0,03 (\Omega \cdot m)$, como la resistividad del grado de saturación, se da el caso que una grava saturada puede tener una resistividad similar a la de la arena seca, o bien de un limo desecado puede ser igual de un resistivo que la arena saturada.

Figura 2-10. Resistividad de sedimentos secos, saturados con agua dulce y con agua salada

Fuente: Paredes (2017)

La relación entre resistividad, porosidad y textura de la roca, es fundamental para los estudios geoelectrónicos; a su vez, la resistividad también varía según la movilidad, concentración y disociación de los iones presentes en el agua, contenida en los intersticios de la roca. La ley de Archie, establece la relación entre la resistividad y la porosidad, determinando la siguiente relación empírica (Archie, 1942):

$$\rho_r = \frac{a \rho_w}{\rho_m S^n}$$

Siendo:

- S coeficiente de saturación
- ρ_w resistividad del líquido en los poros o fisuras
- ρ_r resistividad del terreno
- ρ porosidad

En todos los dispositivos se efectúa la fórmula ya conocida para el cálculo de la resistividad, pero en cada uno de ellos varía una constante que depende de la geometría de la disposición eléctrica. La base de las técnicas de medición es ampliar los circuitos de emisión – recepción, aumentando de manera regular y progresiva la distancia entre los electrodos, logrando una profundidad de investigación cada vez mayor. Cuando se modifica la distancia entre los electrodos, es recomendable usar una constante geométrica diferente; las distancias eléctricas y las constantes están estandarizadas y tabuladas.

$$\bar{\rho} = \frac{\rho \cdot V}{I} \cdot \frac{S}{L}$$

$$K = \frac{S}{L} \quad (K = \text{constante geométrica})$$

Analizando la disposición eléctrica tetrapolar Schlumberger, se observa que el potencial en un punto [M] es:

$$V_M = \frac{\rho \cdot I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$

Entonces, el potencial en el punto [N] es:

$$V_N = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} - \frac{1}{b} + \frac{1}{a} \right)$$

Mientras que la diferencia de potencial entre dos puntos [M] y [N] será:

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} - \frac{1}{b} + \frac{1}{a} \right)$$

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{2\pi} \left(\frac{2}{a} - \frac{2}{b} \right)$$

Simplificación:

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{\pi} \left(\frac{1}{a} - \frac{1}{b} \right)$$

Operando, queda:

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{\pi} \left(\frac{b - a}{a * b} \right)$$

En el dispositivo Schlumberger

- (a) será igual a OA - OM
- (b) será igual a OA + OM

Esta última expresión permite escribir:

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{\pi} \left(\frac{(OA + OM) - (OA - OM)}{(OA - OM) * (OA + OM)} \right)$$

Si se efectúa la operación matemática correspondiente queda:

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{\pi} \left(\frac{OA + OM - OA + OM}{OA^2 + OA * OM - OA * OM - OM^2} \right)$$

$$V_{MN} = \frac{\rho * I}{\pi} \left(\frac{OM + OM}{OA^2 - OM^2} \right)$$

Si se despeja la resistividad y se reemplaza 2[OM] por [MN] se obtiene:

$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} * \frac{\pi}{MN} (OA^2 - OM^2)$$

Luego:

$$K = \frac{\pi}{MN} (OA^2 - OM^2)$$

Finalmente:

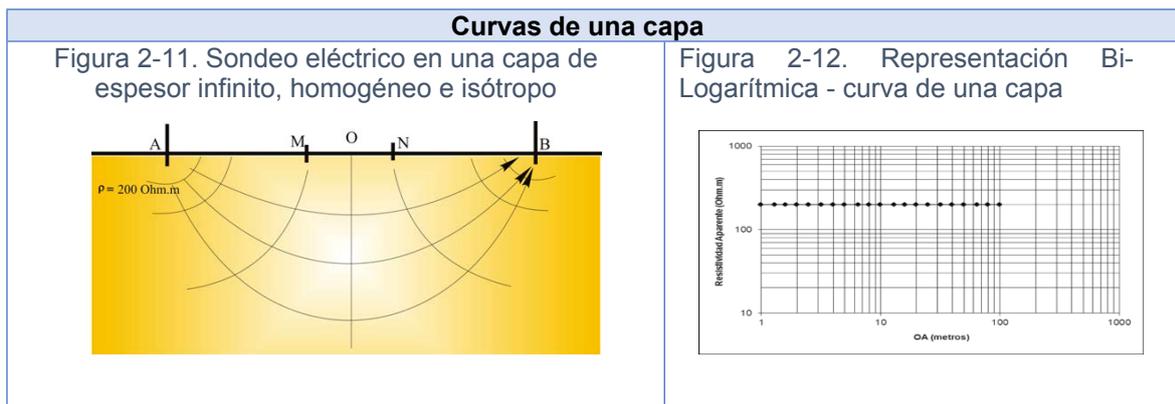
$$\rho = \frac{V_{MN}}{I} * K$$

2.5. Curvas en los Sondeos Eléctricos Verticales

Son el resultado de graficar en este caso usando un papel especial llamado Bi-Logarítmico (cuyas escalas x-y se encuentran divididos en segmentos proporcionales a los logaritmos con un número de ciclos variables en cada eje), las resistividades aparentes en las ordenadas y las distancias de [OA] o [AB/2] correspondientes en las abscisas. Las curvas (SEV) pueden ser:

Curva de una capa: Cuando el medio es homogéneo e isótropo, con un espesor lo suficientemente grande como para ser considerado infinito, la resistividad aparente permanece constante a lo largo de toda la serie de mediciones, siendo igual a la resistividad verdadera. En la Figura 2-11, se muestra el desarrollo de un sondeo eléctrico vertical en una sola capa en el subsuelo cuya resistividad [ρ] es de 200 ($\Omega \cdot m$).

Tabla 2–2. Sondeos eléctricos en una sucesión de una capa

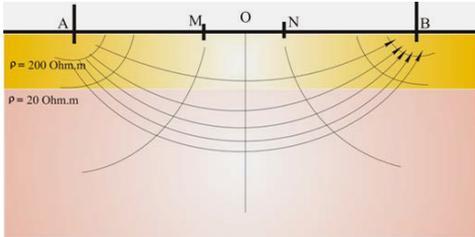
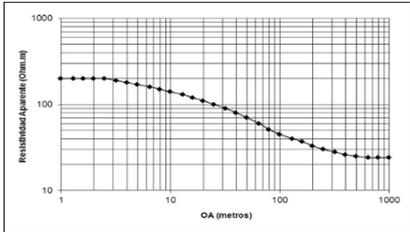
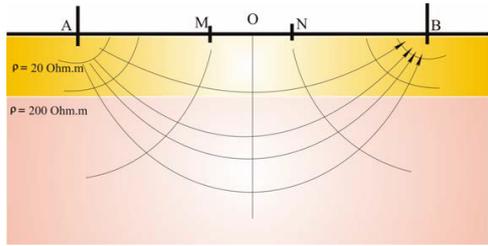
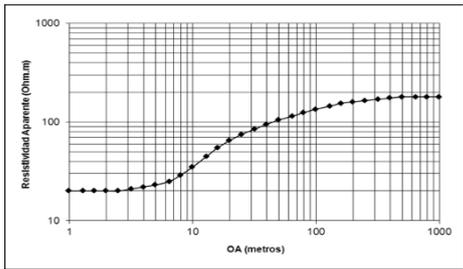


Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de García (2003)

Curva de dos capas: Cuando el subsuelo está conformado por capas de materiales con resistividades diferentes y el límite entre estas capas, es un plano paralelo a la superficie, la curva de resistividades aparentes comienza con un valor asignado a la resistividad verdadera de la primera capa o primer estrato, siempre cuando su espesor sea lo

suficientemente significativo y que no alcance la influencia de la capa infrayacente. A medida que los electrodos de corriente se separan, mientras el circuito experimenta espesores crecientes de subsuelo, las líneas de corriente comienzan a circular por el estrato inferior (siendo de menor o mayor resistividad que la suprayacente). En los puntos del terreno, donde el circuito involucre ambos estratos, la resistividad aparente será un promedio entre las resistividades verdaderas.

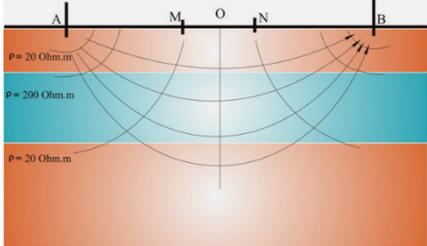
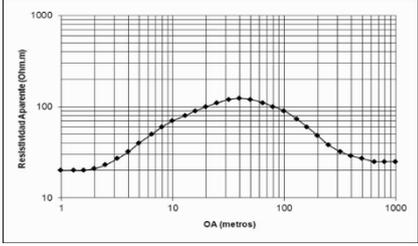
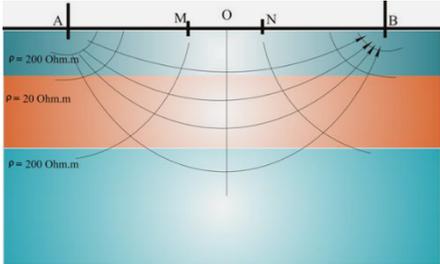
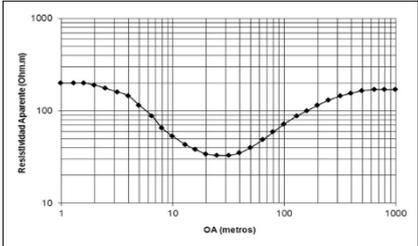
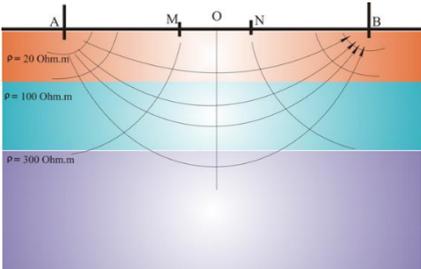
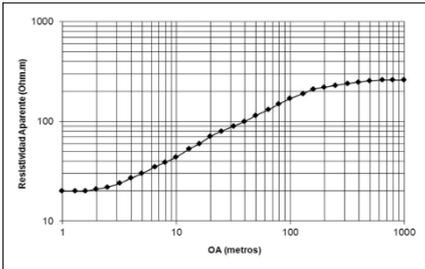
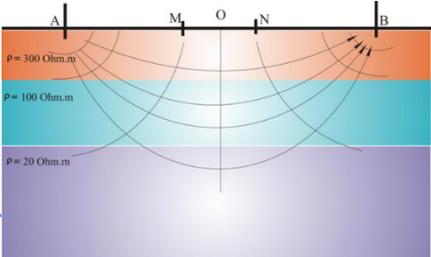
Tabla 2–3. Sondeos eléctricos en una sucesión de dos capas

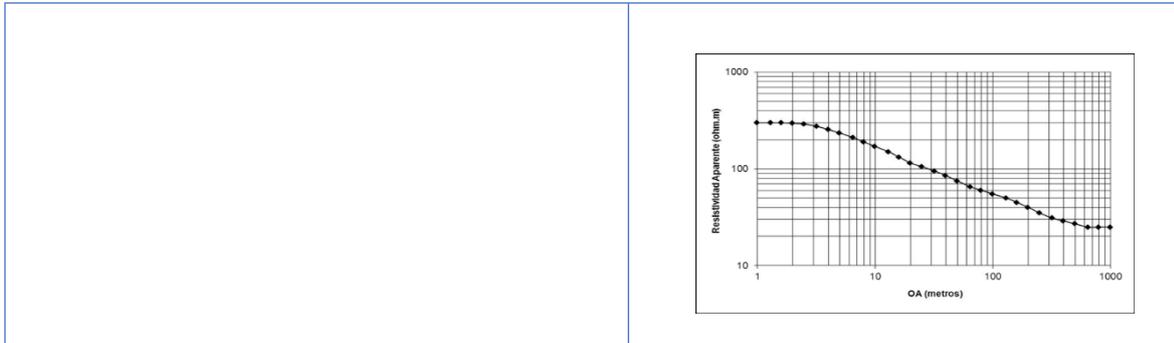
Curvas de dos capas	
<p>Figura 2-13. Sondeo eléctrico en un estrato de suelo de dos capas; una superior resistiva (200 Ohm.m) y espesor E_1 y, una inferior conductiva (20 Ohm.m) con espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-14. Representación Bi-Logarítmica, curva desarrollada en dos capas</p> 
<p>Figura 2-15. Sondeo eléctrico en un estrato de suelo de dos capas; una superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_1 y, una inferior resistiva (200 Ohm.m) con espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-16. Representación Bi-Logarítmica, curva desarrollada en dos capas</p> 

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de García (2003)

Curva de tres o más capas: Cuando el subsuelo está conformado por capas de diferentes resistividades y el límite entre ellas es un plano paralelo a la superficie, la curva de resistividades aparente comienza con los valores de la resistividad verdadera del primer estrato, siempre que tenga un espesor significativo que no sea influenciado por la capa infrayacente.

Tabla 2-4. Sondeos eléctricos en una sucesión de tres capas

Curvas de tres capas (H, K, Q y A)	
<p>Figura 2-17. Curva tipo K; capa superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_1, capa intermedia resistiva (200 Ohm.m) y espesor E_2 y capa inferior conductiva (20 Ohm.m) de espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-18. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo K</p> 
<p>Figura 2-19. Curva tipo H; capa superior resistiva (200 Ohm.m) y espesor E_1, capa intermedia conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_2 y capa inferior resistiva (200 Ohm.m) de espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-20. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo H</p> 
<p>Figura 2-21. Curva tipo A; capa superior conductiva (20 Ohm.m) y espesor E_1, capa intermedia resistiva (100 Ohm.m) y espesor E_2 y capa inferior resistiva (300 Ohm.m) de espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-22. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo A</p> 
<p>Figura 2-23. Curva tipo Q; capa superior resistiva (300 Ohm.m) y espesor E_1, capa intermedia resistiva (100 Ohm.m) y espesor E_2 y capa inferior conductiva (20 Ohm.m) de espesor infinito</p> 	<p>Figura 2-24. Representación Bi-Logarítmica, mostrando una curva de tres capas tipo Q</p> 



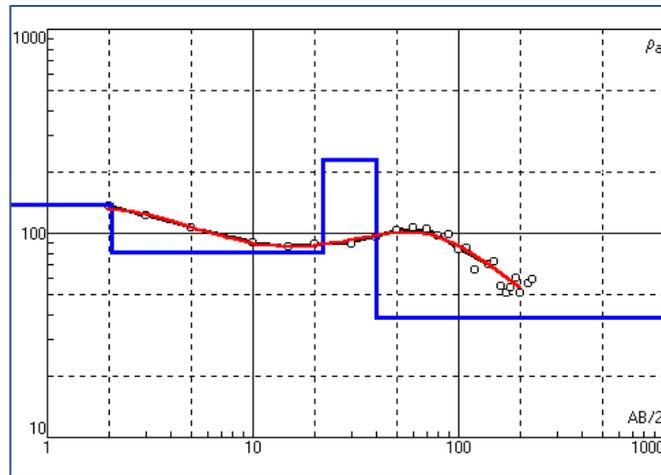
Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de García (2003)

2.6. Interpretación de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Mediante la interpretación de un sondeo eléctrico vertical, desde un diagrama de variación de las resistividades aparentes en función de la distancia $[AB/2]$, se llega a conocer las *resistividades verdaderas y los espesores* de las capas o estratos de un terreno natural. Para la interpretación de las curvas de resistividad se han desarrollado diferentes procedimientos, donde la mayoría de los métodos son empíricos; sin embargo, el *método de superposición* tiene una base teórica física con supuestos claramente definidos; y con ello el uso del software de acceso libre IPI2WIN desarrollado por el Departamento de Geofísica de la Universidad Estatal de Rusia (Alexei et al., 2000).

El software IPI2WIN, a partir de los datos de resistividad aparente y sus correspondientes profundidades, genera una interpretación automática de la curva de resistividad, para cada sondeo eléctrico vertical, representada como un modelo de capas de resistividad; especificando el valor de la resistividad, espesores y profundidades, como muestra la Figura 2-25. Entonces, la interpretación consiste en asignarle a las capas de resistividad el tipo de suelo asignado como especifica la Tabla 2-5.

Figura 2-25. Interpretación de un SEV. Modelo generado por IPI2WIN, donde $[\rho]$ es la resistividad (Ohm.m) de la capa o estrato, $[h]$ su espesor (m), $[d]$ la profundidad del fondo la capa respecto al suelo (m) y $[Alt]$ la cota del fondo de la capa (msnm)



N	ρ	h	d	Alt
1	138.4	2.049	2.049	119.95
2	80.62	18.82	20.87	101.13
3	194.3	22.1	42.96	79.037
4	37.8			

Fuente: Arismendy et al.,

(2003)

Tabla 2-5. Rangos para las resistividades de diferentes materiales

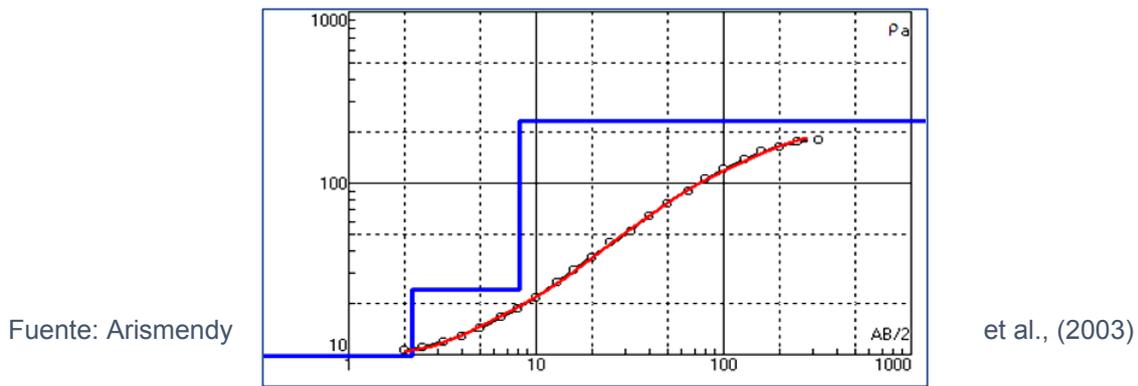
Tipo de material	Resistividad	
	$[\rho]$ seco (Ohm.m)	$[\rho]$ saturado (Ohm.m)
Arcilla	-	5-10
Limo	30-50	10-15
Arenas finas	50-100	15-50
Arenas media a gruesa	100-250	50-80
Conglomerados	250-500	80-150
Roca	>500	-

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Auge (2008)

A su vez, el software IPI2WIN permite adicionar o suprimir las capas, realizando variaciones sobre ellas y generando secciones geoelectricas para correlacionar perfiles de resistividad de diferentes sondeos eléctricos verticales con base en los rangos de resistividad ya establecidos, los cuales son representados por una gama de colores como detalla la Figura 2-26, donde muestra los espesores, las cotas de sus techos (m) y los rangos de resistividad de las capas; en la parte inferior se acotan las distancias (km); el color gris, con resistividades entre 0-20 (Ω .m) corresponden a estratos finos (limos y arcillas); el color naranja, con resistividades entre 20-50 (Ω .m) corresponden a arenas finas; el color amarillo, con resistividades entre 50-100 (Ω .m) corresponden a arenas medias y gruesas; los colores café y verde, con resistividades entre 100-500 (Ω .m)

corresponden a conglomerados; y el color azul con resistividades mayores a los 500 ($\Omega.m$) corresponden a rocas.

Figura 2-26. Sección geoelectrica de correlación de los SEV

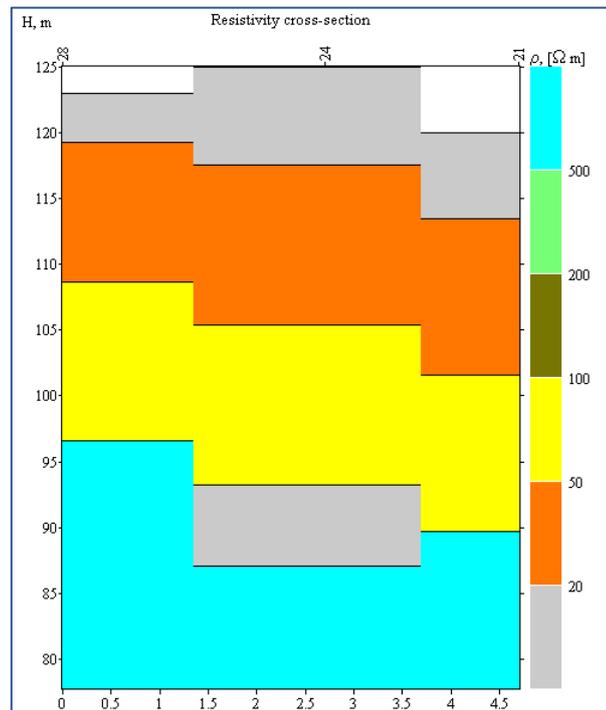


Mediante estas secciones, se convierten las capas de resistividad a capas de los estratos de suelo, concluyendo así, la interpretación cuantitativa de las curvas de resistividad; además por la forma gráfica, se permite reconocer si existe correlación entre los sondeos eléctricos verticales y la distribución de la secuencia espacial de los estratos en la zona de estudio.

2.7. Elaboración de los cortes geoelectricos y cortes geológicos

La interpretación de la curva de resistividades aparentes, con las especificaciones de resistividades y espesores verdaderos de cada una de las capas de subsuelo identificadas, recibe el nombre de corte geoelectrico (Modelo 1D).

Figura 2-27. Curva de resistividades aparentes (curva en puntos), curva interpretada (curva en rojo), profundidades y resistividades verdaderas correspondientes al modelo (curva en azul)



Fuente: Arismendy

et al., (2003)

El corte geoelectrico presentado en la Figura 2-27, está conformado por una sucesión de tres electrocapas; la primera, es conductiva de 10 ($\Omega.m$) hasta una profundidad de 2,2 (m); la segunda, es una capa semiresistiva de 24 ($\Omega.m$) hasta los 8,5 (m); por último, una capa resistiva de 229 ($\Omega.m$). Con un error de ajuste del 1,23%.

El corte geológico corresponde al corte geoelectrico, siendo la interpretación y la asignación de una determinada litología a los valores de resistividad verdadera, por lo que estará en función del ambiente geológico en donde se realiza la prospección geofísica. En el caso anteriormente presentado, considerando el ambiente geológico donde se ha realizado el estudio geofísico, el valor de la resistividad verdadera de 10 ($\Omega.m$) corresponde a arcillas; el valor de 24 ($\Omega.m$) se asigna a una secuencia de arenas arcillosas; y los 229 ($\Omega.m$) corresponden a facies de gravas y arenas secas. Observando en este caso, una favorable correspondencia entre los valores de resistividad verdadera interpretados y las profundidades de cada una de las capas de estrato involucradas

2.8. Perforación de pozos exploratorios

Un pozo es conocido como un laboreo minero vertical que tiene por objetivo poner en contacto capas productivas de fluidos (agua, petróleo o gas) con la atmósfera. Existe principalmente tres métodos para la perforación de pozos tubulares: percusión, rotación y rotopercusión; cada uno de ellos, presenta ventajas como desventajas en lo que respecta a la facilidad de construcción, factores de costos, equipos según el carácter de la litología a atravesar, profundidades de perforación, desarrollo y ejecución. Actualmente es muy común el uso de métodos rotativos, de los cuales se puede mencionar el *rotativo directo manual* (para pequeños diámetros de exploración), *rotativo directo* con circulación de lodos, el *rotativo de aire reverso* y el de *diamantina (DDH)*, (estos últimos para diámetros mayores para explotación), entre otros. Para fines de esta investigación, se describe a continuación sintetizadamente el sistema de perforación de rotación con circulación directa de lodo de inyección, con la finalidad de perforar un pozo tubular exploratorio de máximo 30 metros de profundidad para un tubo de producción de 6 pulgadas de diámetro.

2.8.1. Perforación a rotación con circulación directa de lodos

Esta técnica tiene la característica de poder perforar cualquier tipo de roca o suelo, a grandes profundidades e incluso en diferentes tipos de inclinación, con extracción de testigos de forma continua. Consiste en perforar con la acción rotatoria de un *trépano* y remover mediante un fluido de inyección (lodo) los fragmentos que se van produciendo en el proceso. El *trépano* se fija en el extremo inferior de la *sarta de herramientas* por cuyo interior (espacio anular) circula el fluido verticalmente hacia la superficie. Los principales elementos para esta técnica son:

a) Suspensión y transporte

La torre de perforación es una estructura metálica de características varias que soporta el peso de toda la sarta de herramientas y de acuerdo a sus especificaciones técnicas como constructivas, se desprende la capacidad de perforación del equipo. Esta torre suele estar asentada sobre una plataforma de camión y es rebatible para su movilización, su estructura mecánica está constituida por el motor del mismo camión, la longitud o altura de la torre determina el largo de las barras de sondeo a utilizar, que comúnmente son de 4, 6 o 9 metros.

b) Sarta de perforación:

El *trépano* es el elemento activo de la perforación, este está provisto de orificios que despiden un fuerte chorro de fluido (lodo) a presión, cuya función es la de limpiar, lubricar

y refrigerar la parte activa de la sarta de herramientas; entre los más usados o comunes están:

³⁵/₁₇ Triconos: Utilizados para perforar prácticamente cualquier tipo de litología; son trépanos de tres conos que giran cada uno sobre un eje individual, sobre cada cono se tallan o insertan dientes de diferentes aleaciones, de acuerdo al tipo de unidad geológica a perforar.

³⁵/₁₇ Trépanos de lámina o cola de pescado: Utilizados para perforar secuencias sedimentarias blandas, como las arcillas; son trépanos cuyo principal objetivo es escariar el orificio del sondeo.

³⁵/₁₇ Trépanos de diamantes o coronas: Utilizados para la perforación de terrenos muy duros; estos son trépanos que generalmente utilizan diamantes artificiales que actúan por abrasión.

El portamechas son barras huecas de pared gruesa, cuyo objetivo es proporcionar al trépano, el peso necesario para obtener un óptimo avance y verticalidad en la perforación; el peso en la perforación a rotación es un parámetro fundamental, razón del uso de esta herramienta; normalmente su peso oscila entre los 600 y 2.500 kilogramos, según su diámetro y longitud.

Las *barras de sondeo* son de acero, huecas y de pared delgada, estas permiten por su interior que el fluido de inyección circule y que llegue a las boquillas del trépano; estas barras son añadidas sucesivamente, a medida que se avanza la perforación.

El *vástago* es una barra introducida, que se desliza por el interior de la mesa de rotación; de sección hexagonal, octogonal o cuadrada (comúnmente más utilizada); lleva en la parte superior la cabeza de inyección y en la inferior las barras de sondeo, la longitud de esta barra suele ser variable, pero generalmente se la encuentra entre los 4 a 9 metros, según la altura de la torre.

La *mesa de rotación* es una plataforma horizontal, en cuyo interior existe una sección igual a la sección del vástago, con la finalidad de adaptarse perfectamente a ella y transmitir el movimiento de rotación que recibe a través de un motor.

La *cabeza de inyección* permite que el fluido de circulación atraviese el varillaje y llegue a la batería de perforación, esta herramienta se encuentra enroscada en la extremidad superior del vástago mediante una unión (entre el vástago y manguera de inyección), esta unión es flexible lo que asegura la inmovilidad del sistema durante los giros.

c) Sistema de circulación:

Las *bombas loderas* son las encargadas de succionar el fluido de perforación desde las piletas de inyección y conducirlo a través de mangueras flexibles hacia la cabeza de inyección, sarta de herramientas y a las boquillas del trépano; una bomba de lodo está compuesta esencialmente de dos o tres cilindros horizontales o pistones, estos llevan camisas desmontables de diámetros variables entre los tres y ocho pulgadas.

Las *piletas de inyección* son los depósitos del lodo de inyección y están ubicadas cerca del lugar de perforación, estas piletas pueden ser acondicionadas en el suelo, de manera tal que contengan un volumen suficiente de inyección; lo recomendable es, tener por lo menos dos depósitos de lodo inyección, uno de succión y otro de retorno, con un paso intermedio donde se logre la sedimentación de los materiales finos arrastrados por el fluido de perforación. La descarga del lodo de inyección de retorno (que viene cargado de cutting), se la lleva a cabo en la zaranda vibratoria.

El fluido de inyección o lodo de perforación, tiene las funciones de: refrigerar la herramienta de corte (trépano), lubricar la línea de perforación, mantener por su presión hidrostática las paredes del pozo, por su viscosidad y tixotropía elevar y/o mantener el detritus (cutting) de perforación en la superficie y transmisión de potencia hidráulica al trépano.

2.8.2. Perfilajes de pozos exploratorios

Bajo este apartado, según (Camargo, 2005) se denomina una serie de procedimientos y técnicas destinadas a obtener información del material de las capas o estratos de suelo atravesados durante una campaña de perforación exploratoria y, eventualmente del tipo de fluido que pueda estar ocupando los poros o fisuras del material que conforma el subsuelo. Existen numerosos tipos de perfilajes o registros de pozos, siendo cada uno de ellos casi una especialidad. Sin embargo, para fines de esta investigación se menciona los más comunes en hidrogeología.

El *cutting* o material detrítico originado por el accionar abrasivo del trépano, debe ser recogido en un recipiente adecuado para preservar la muestra; una vez obtenida la muestra, esta debe estar lavada repetidamente a fin de eliminar contaminantes en especial el de origen del lodo de inyección. Sin embargo, hay que tener presente que cuando se perforan secuencias litológicas finas y a la vez se usa lodo bentonítico, el lavado debe ser cuidadoso a fin de no descartar fracciones finas. El cutting lavado, debe colocarse en un vidrio de reloj lo suficientemente amplio para luego ser llevado bajo lupa donde podrá ser analizado (tanto en húmedo como seco). Una vez analizada la muestra, esta debe

colocarse en recipientes convenientemente rotulados (bolsas o cajas) indicando la profundidad de la que proviene.

La descripción del cutting, deberá seguir las directrices que permitan determinar las características más sobresalientes del estrato o roca, es decir: nombre, tamaño de grano, color, redondez, forma, selección matriz y/o cemento, grado de compactación, fisilidad, entre otros.

El intervalo del muestreo está directamente vinculado al desarrollo de las secuencias que se esperan atravesar y al detalle del trabajo a efectuar. Para campañas de perforación de pozos de agua, es conveniente realizar el muestreo en cada cambio litológico.

2.8.2.1. Perfilajes durante la perforación exploratoria

a) Cronometraje

El perfil del cronometraje está estrechamente ligado al perfil litológico, básicamente consiste en ir registrando el tiempo neto que se toma en perforar un metro de perforación, siempre bajo las mismas condiciones de perforación; con el objetivo de correlacionar los descensos o caídas de tiempo para materiales fiables y no muy coherentes, mientras que los registros altos de tiempo corresponderían a formaciones más coherentes.

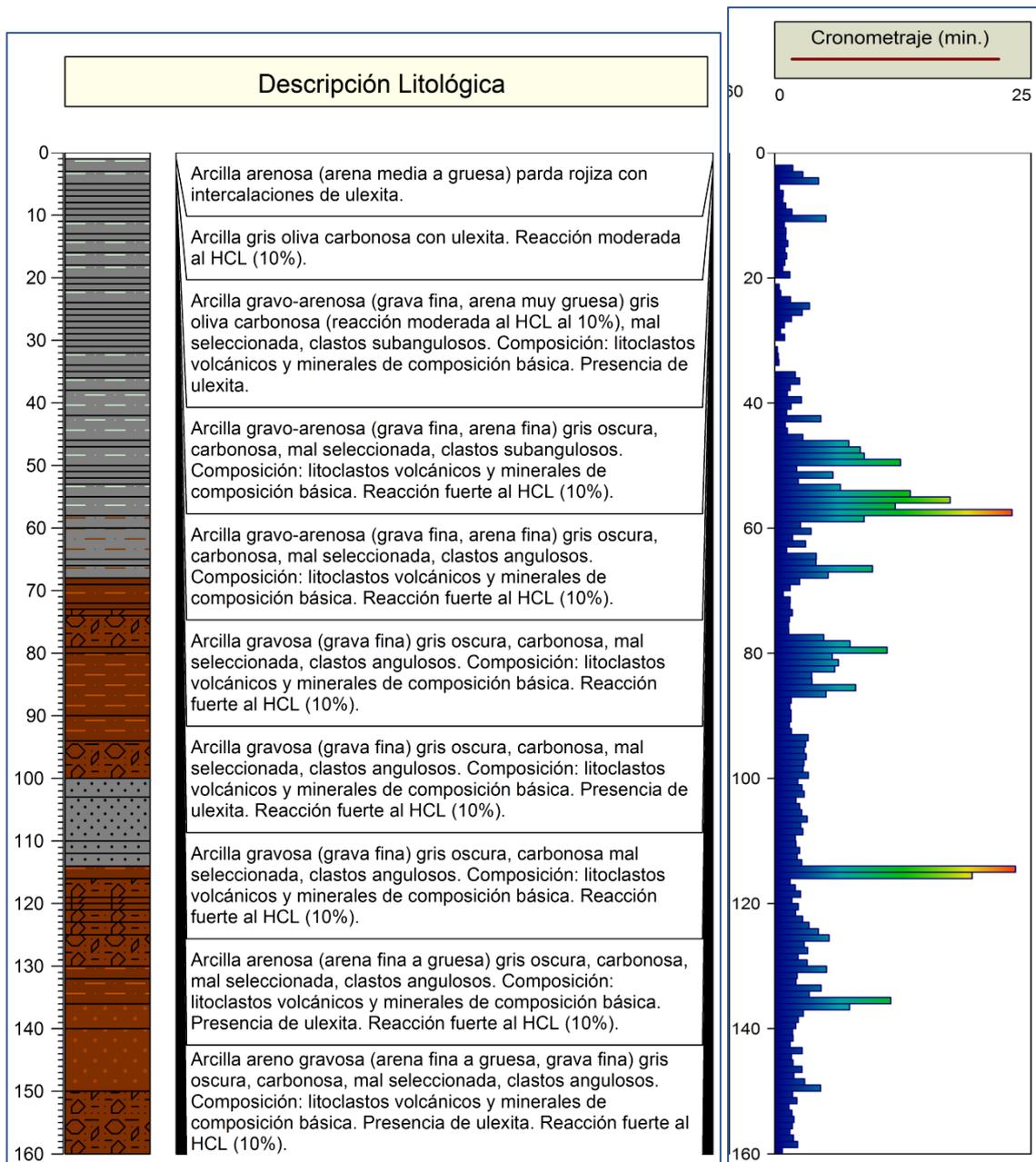
b) Litológico

Al mismo tiempo que se lleva a cabo el análisis del cutting, es posible ir construyendo el perfil litológico del pozo en perforación, en base a las descripciones litológicas efectuadas in situ, con la finalidad de analizar y describir la secuencia de las unidades o formaciones geológicas atravesadas durante la perforación con su respectivo porcentaje. En la Figura 2-28, se visualiza la interpretación de un perfil litológico y a la par su cronometraje.

c) Comportamiento de la máquina

Es decir, registrar la velocidad de la perforación; si la máquina se mueve y golpea, si la inyección cambia de color, densidad o se pierde inyección, entre otros, puede servir como indicativo para comprender alguna situación geológica en particular que, de otra forma es casi imposible analizar.

Figura 2-28. Perfil litológico y perfil de cronometraje en un pozo exploratorio



Fuente: Camargo (2005)

2.8.2.2. Perfilajes posteriores a la perforación exploratoria

Previo a mencionar los distintos perfilajes que se realizan al interior de un pozo tubular exploratorio (pozo abierto), se debe aclarar que cuando un pozo se perfora mediante el uso de un fluido de perforación, las paredes del mismo sufren cambios o alteraciones. En la actualidad, en la región, los pozos se perforan generalmente bajo el sistema de rotación directa, sistema que utiliza lodo de inyección, este a su vez genera un revoque o pared dentro del pozo y una zona denominada *zona invadida* (superficie hasta donde el lodo se

filtra dentro de las capas perforadas). La distancia radial hasta donde el lodo de inyección se infiltra, estará en función del tipo del lodo y de la permeabilidad de las capas; el conocimiento de este concepto es de suma importancia, puesto que existen perfilajes en pozos abiertos que miden las propiedades del revoque, otros de la zona invadida y zona no invadida.

Dentro de los perfilajes más comunes de aplicación en la hidrogeología se tiene los siguientes:

a) Perfilaje de potencial espontáneo

Este tipo de perfilaje es uno de los más antiguos, utiliza un equipo sencillo para realizar el registro en pozos abiertos, pero su interpretación puede resultar muy compleja, particularmente en ambientes o zonas de estudio con presencia de acuíferos de agua dulce. Esta complejidad ha llevado al desarrollo de falsas interpretaciones, por lo que los registros obtenidos no han sido considerados. El perfil de potencial espontáneo ha sido ampliamente usado en el desarrollo de pozos petrolíferos, a fin de obtener información sobre la litología y salinidad del agua intersticial; pero hay que recalcar, que este perfilaje no es universalmente aplicable en ambientes de acuíferos de agua dulce.

b) Perfilaje de resistividad

Los registros de resistividad miden, los efectos producidos por una corriente eléctrica que transmite a la formación mediante electrodos situados al interior del pozo abierto. Para el desarrollo de estos perfilajes, se emplea un amplio número de configuraciones electrónicas; la resistividad del sistema fluido-roca saturada, depende de tres factores fundamentales: salinidad del fluido intersticial, porosidad de la roca, temperatura fluido-roca saturada, mineralogía de los materiales sólidos y la geometría del espacio poroso.

El principio prácticamente se asemeja al método geoelectrico en superficie, basándose en la ley de Ohm; la diferencia por decirlo así, radica en el dispositivo geométrico y por lo tanto su constante.

El dispositivo más utilizado se denomina *Normal*, donde un electrodo de corriente [A] y de potencial [M] se encuentran en la sonda que se introduce en el pozo, y un electrodo de potencial [N] que se dispone en superficie de terreno o también en la pileta de inyección, y el segundo electrodo de corriente [B] puede instalarse en superficie en la boca del pozo, o puede estar en el cable a 15 metros por encima de la sonda.

Existen dos tipos comunes de resistividad Normal: **Corta**, donde [A] se localiza a una distancia de 0,4 metros de [M]; y **Larga**, donde la distancia [AM] es de 1,6 metros. Los instrumentos utilizados son un voltímetro y amperímetro, al igual que un equipo de geoelectrónica. El equipo brinda una lectura de Potencial e Intensidad de corriente cuyo cociente multiplicado por una constante geométrica es igual al valor de la resistividad aparente.

La constante geométrica para un dispositivo, adquiere valores de: 5 para la Normal Corta y de 20 para la Normal Larga. En el campo de investigación de una sonda Normal, se asume que es una esfera cuyo diámetro vale $2[AM]$; con ello se asume que, una sonda Normal Corta investiga hasta una distancia desde el centro del pozo de 0,4 metros y una Normal Larga hasta 1,6 metros. Por lo expuesto, se asume que la resistividad Normal Corta corresponde a la resistividad de la zona invadida y la sonda Normal Larga da una resistividad influenciada tanto por la zona invadida como por la zona donde el agua de formación nativa está presente. Se debe considerar que la resistividad medida es aparente y que puede transformarse en verdadera con el uso de ábacos especiales. El distinto radio de investigación en función de la distancia [AM] es importante y en muchos casos de suma utilidad para interpretaciones cualitativas de la salinidad del agua de formación. Es por ello que siempre es conveniente correr dos registros de resistividad.

En un caso común donde se hayan perforado acuíferos con presencia de agua dulce, siempre la resistividad Normal Corta es menor que la resistividad de la Normal Larga. Esto se debe a que, el lodo de inyección principalmente bentonítico y conductivo, produce una baja de la resistividad de la zona invadida. Supóngase ahora el caso donde se ha perforado un acuífero con agua salada con un lodo de menor salinidad que la del acuífero; en este caso el remplazo en la zona invadida del agua de formación por la del filtrado de lodo va a producir un aumento de la resistividad en la zona invadida y por lo tanto la resistividad Normal Corta será superior a la resistividad de la Normal Larga. Esta inversión en la relación entre las resistividades de la Normal Corta y de la Normal Larga es muy importante para la detección de acuíferos que portan agua salada.

c) Perfilaje sísmico

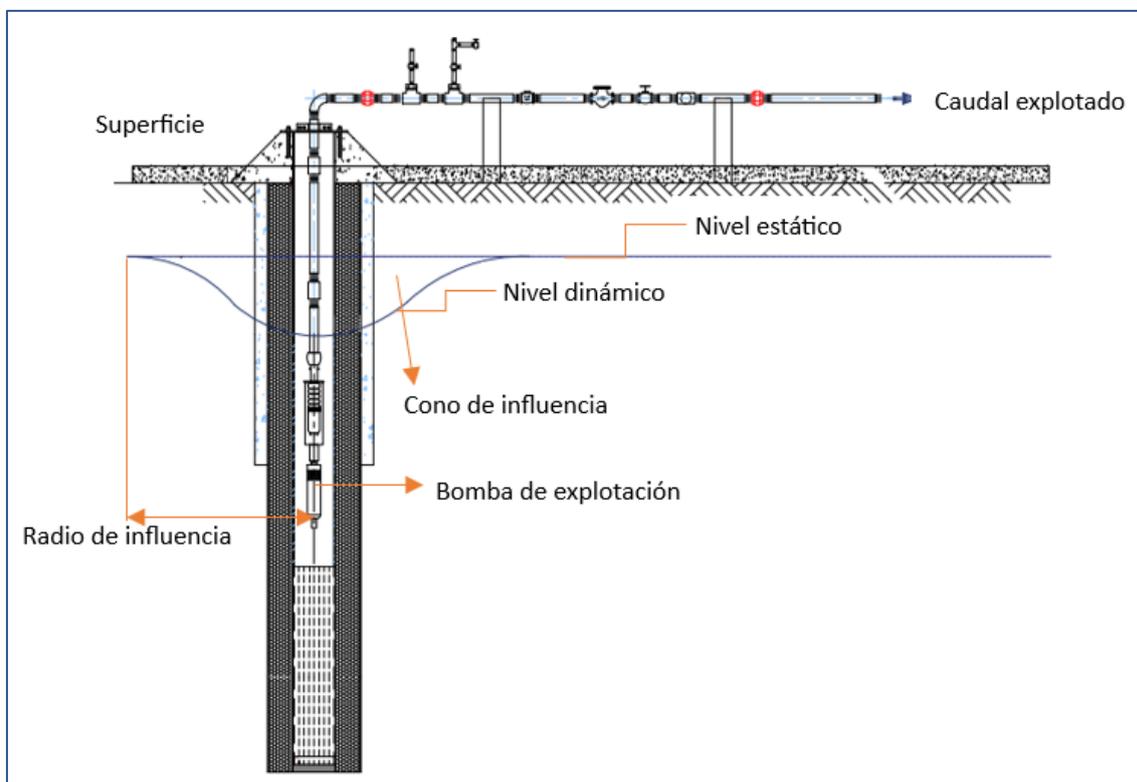
En el perfil sísmico se destaca la medición del sonido que se transmite mediante el fluido al interior del pozo hacia las formaciones próximas al mismo. Para el logro de este objetivo, se usan diferentes tipos de perfilajes sísmicos, cuya diferencia radica en la frecuencia de onda emitida. Los perfiles sísmicos brindan información sobre la porosidad, litología, cementación y localización de fracturas.

2.9. Hidráulica de acuíferos

Cuando se bombea un pozo para la extracción de agua subterránea, el nivel de agua en el mismo experimenta descensos, así como en toda superficie de acuífero circundante a él. Este descenso del nivel de agua, es más pronunciado en el pozo; mientras que, los descensos se acortan a medida que se extiende en el área circundante del acuífero (Villanueva & Iglesias, 1984).

La distancia existente entre el pozo del bombeo y la extensión del acuífero, hasta donde la influencia de dicha distancia pueda considerarse nula, se conoce como *radio de influencia*, tal como se esquematiza en la Figura 2-29.

Figura 2-29. Cono de influencia al bombear un pozo de explotación



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Villanueva & Iglesias (1984).

En torno al pozo de bombeo, se forma un cono de depresión en la zona del acuífero, cuya superficie es la *superficie piezométrica dinámica* y los valores que adquieren el nivel del agua en dicha superficie es conocido como *nivel dinámico*; y el nivel que existía antes de empezar el bombeo, *nivel estático*.

Desde el punto de vista de la textura de las formaciones geológicas, existen fundamentalmente tres tipos de materiales acuíferos (Vélez, 2011):

- a) Acuíferos cuya permeabilidad se debe a grietas y fisuras, tanto de origen mecánico como de disolución; en conjunto forman *acuíferos kársticos* y fisurados, que entre ellos se encuentran: las calizas, dolomías, granitos, basaltos, etc. Denominados como acuíferos heterogéneos, con menor capacidad para almacenar agua, por lo que podrían ser considerados, acuíferos rápidos, en que los radios de influencia son más altos que el resto de acuíferos.
- b) Acuíferos cuya permeabilidad se debe a su porosidad intergranular, denominados *acuíferos porosos*, donde la porosidad resulta de los huecos que quedan al sedimentar las rocas detríticas. Los poros representan el único tipo de vacíos que poseen las rocas no-consolidadas; es decir, suelos y sedimentos sueltos como: gravas, arenas, arcosas, etc. Por lo general son acuíferos homogéneos, aún dentro de la heterogeneidad que se les atribuye a todos los acuíferos. Tanto este tipo de acuífero como los kársticos-porosos, que se detalla en el punto (c), son capaces de almacenar gran cantidad de agua por unidad de volumen de acuífero y, por tanto, son acuíferos que reaccionan con inercia a la acción del bombeo, con radios de influencia más cortos que los acuíferos kársticos.
- c) Por último, están los acuíferos cuya permeabilidad se debe a una combinación de las dos anteriores, conocidos como los *acuíferos kársticos-porosos* como las calcarenitas. Por otro lado, estos acuíferos, según sus circunstancias hidráulicas y estructurales, pueden presentarse en tres formas distintas:
- i. Los *acuíferos libres*, donde el nivel de agua se encuentra por debajo del techo de la formación permeable y el agua que cede, es el agua que se encuentra almacenada en sus poros; este volumen es alto en comparación con el acuífero tipo que serán mencionados posteriormente, por lo que presentan altos valores de inercia; los conos de bombeo suelen ser esbeltos, es decir, con profundos descensos en el nivel de agua en el pozo y corto radio de influencia.
 - ii. Los *acuíferos cautivos o confinados*, son aquellos que están aislados en el subsuelo; es decir, rodeados de capas impermeables. Son acuíferos que se encuentran a presión o en carga, por el peso que experimentan debido a los materiales superiores. El agua que ceden, es proveniente de la descompresión de estas capas superiores, cuando se produce la depresión del acuífero. Son acuíferos rápidos de muy poca inercia, debido a su poca capacidad de almacenar agua; los conos de bombeo suelen ser de menor altura que en los conos libres, pero con largos radios de influencia.

- iii. En los *acuíferos semiconfinados*, el material que les rodea no son del todo impermeable, así de esta manera, el componente semipermeable que rodea la parte superior, es por donde se permite el paso del agua de otros acuíferos superiores al inferior confinado; consecuentemente, la velocidad de reacción de los acuíferos semiconfinados ante la acción de bombeo es más moderada que en los cautivos o confinados y sus radios de influencia varían entre valores característicos de libres a confinados.

De acuerdo con lo detallado anteriormente, se puede tener una idea cualitativa de la forma de los conos, radios de influencia y de la velocidad de reacción de los diversos tipos de acuíferos ante un bombeo.

En cuanto al funcionamiento de los acuíferos, para entender y explicar cómo influye las propiedades del suelo sobre la composición del agua subterránea, es necesario conocer en detalle su funcionamiento. Un acuífero puede ser considerado como un embalse superficial que, en ambas situaciones puede hablarse de una capacidad de almacenamiento, con entradas y salidas, de una capacidad de regulación, un plan de explotación, etc. De forma natural los acuíferos disponen de zonas por las cuales ingresa el agua, son las zonas de recarga, y una vez que se llega al límite de su capacidad de almacenar agua, los “rebosaderos” naturales, son considerados como zona de descarga.

El agua de recarga que se infiltra a través de superficies permeables, procede de las precipitaciones (lluvia o nieve), de la infiltración de ríos o ramblas, de la aportación subterránea de otros acuíferos con que él tiene contacto hidráulico, etc. Sin embargo, debido a la acción del hombre han surgido nuevas formas de recarga, que en muchos casos representan un volumen significativo del total de agua infiltrada, por mencionar algunas las fuentes son las siguientes: retornos de riego, infiltración de acequias y canales no revestidos o en mal estado, infiltración de vertidos urbanos, fugas de embalses, formas controladas de infiltración y los sondeos de inyección.

2.9.1. Parámetros hidrogeológicos

La caracterización hidrogeológica de cualquier roca o formación geológica está determinada por dos factores:

- a) Su capacidad de almacenar agua y luego cederla (porosidad eficaz y coeficiente de almacenamiento).
- b) Su cualidad de transmitir o permitir que el agua circule a través de ella (permeabilidad o conductividad hidráulica y transmisividad).

a) Porosidad total y eficaz:

La propiedad del suelo que le permite contener agua se define técnicamente como *porosidad*, o porcentaje de intersticios existentes en los sólidos, en relación con el volumen total de la unidad roca-sedimento (Quintana, 2008).

Porosidad total (m_t): Puede expresarse en (%) en tanto por 1 (en cualquier caso, es adimensional). Por ejemplo, 28% equivale a 0,28; pero dejando claro que esta expresado en porcentaje, puesto que pueden existir porosidades extremadamente bajas del orden de 0,28%.

$$m_t = \frac{\text{volumen de espacios}}{\text{volumen total}}$$

Porosidad eficaz (m_e): El numerador de esta expresión representa el volumen de los poros que se ha vaciado. Se expresa al igual que la porosidad total (% o en tanto por 1).

$$m_e = \frac{\text{volumen de agua drenada por gravedad}}{\text{volumen total}}$$

Y la diferencia entre los dos parámetros anteriores, se conoce como *retención específica*.

En la sección Anexos, en la Tabla A1-1 se presenta los valores estimados para la porosidad (Sanders, 1998).

Al hablar de porosidad, intuitivamente se les asigna a los poros de un material detrítico, como las arenas; pero las rocas en sus fisuras también pueden contener cierta porción de agua. Normalmente, estas fisuras son fracturas producidas por esfuerzos tectónicos, pero también pueden deberse a otras circunstancias como: enfriamiento (rocas volcánicas), planos de descompresión, discontinuidades sedimentarias, etc. Tras su formación, estos materiales pueden ser ocluidas por minerales arcillosos resultantes de la alteración, o por lo contrario produce aumento de las aberturas, logrando la formación de amplios conductos (en especial en calizas).

De igual manera está determinada la *porosidad primaria y secundaria*. Se denomina porosidad primaria al resultado de su origen en la formación geológica; porosidad secundaria serían las aberturas producidas posteriormente. Dicho esto, por ejemplo: a los poros de las arenas se les denomina porosidad primaria, y a las fracturas que se producen en una roca compacta debido a los esfuerzos tectónicos, porosidad secundaria.

Tanto la porosidad total como la porosidad eficaz dependen de los siguientes factores:

- La heterometría, debido a que el material fino ocupa los poros que deja el material más grueso, por lo tanto, la porosidad disminuye.
- La forma y disposición de los granos.
- La compactación, cimentación y recristalización, que disminuirán la porosidad.

Para el caso de la porosidad intergranular, la porosidad total no depende del tamaño de grano; en cambio, la porosidad eficaz se ve muy afectada por el tamaño de grano, es decir, mientras más fino es el grano, mayor retención específica.

La porosidad por fracturación, está determinada por la historia tectónica de la zona y por su litología; es decir, como las rocas han respondido ante los esfuerzos que han sido sometidos; en este tipo de porosidad es determinante la posible disolución de la fractura, o caso contrario, la colmatación por minerales arcillosos o precipitación de otros minerales (Sanders, 1998).

b) Coeficiente de almacenamiento (S):

Mediante la porosidad eficaz es posible calcular el volumen de agua que proporciona un acuífero libre, pero para el caso de los acuíferos confinados este parámetro ya no es tan útil. En los acuíferos confinados, cuando ceden agua, por el hecho de que todos sus poros continúan saturados, solo se experimenta la disminución de la presión; de este modo, el dato de la porosidad eficaz indica nada; por lo tanto, es necesario un parámetro que indique el volumen de agua liberada al disminuir la presión, como el coeficiente de almacenamiento:

$$S = \frac{\text{volumen de agua liberada}}{\text{volumen total que ha descendido la superficie piezométrica}}$$

Para un acuífero confinado con una columna de 1m^2 de base, en la que la superficie piezométrica haya disminuido 1m , el volumen de agua extraído es (S); de igual manera, para el caso de un acuífero libre, con la misma sección de columna, el descenso en un 1m de la superficie freática, el volumen de agua obtenido es la porosidad eficaz (m_e); pero, recalando que son dos conceptos diferentes (Stephens et al., 1998):

³⁵/₁₇ Para el caso de los acuíferos libres, entre dos posiciones sucesivas en la superficie freática, la superior cede los m^3 de agua (por vaciado).

³⁵₁₇ Y en los acuíferos confinados, el aporte de agua (por descompresión) es de toda la columna vertical del acuífero; por lo tanto, su magnitud depende del espesor geológico del acuífero.

El coeficiente de almacenamiento es, como la porosidad eficaz, adimensional $\frac{\text{volumen}}{\text{volumen}}$ y los valores que representan, son mucho menores en los confinados perfectos que en los semiconfinados:

Acuíferos libres (porosidad eficaz): 0,3 a 0,1 $3,10^{-1}$ a 10^{-2}	El agua proviene del vaciado de los poros
Acuíferos semiconfinados (coeficiente de almacenamiento): 10^{-3} a 10^{-4}	El agua proviene de descompresión y de los rezumes desde las capas confinantes
Acuíferos confinados (coeficiente de almacenamiento): $3,10^{-4}$ a 10^{-5}	El agua proviene de descompresión

En la sección Anexos, en la Tabla A1-2 se presenta los valores estimados del coeficiente de almacenamiento para varios estratos (Iglesias, 2022).

c) Conductividad hidráulica o coeficiente de permeabilidad (K): En Hidrogeología la permeabilidad o conductividad hidráulica, es definida como la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico.

$$\text{Caudal por unidad de sección} = K * \text{gradiente hidráulico}$$

$$\frac{\text{Caudal (m}^3\text{/día)}}{\text{Sección (m}^2\text{)}} = k * \frac{\Delta h \text{ (m)}}{\Delta l \text{ (m)}}$$

(metro/día)

Por lo tanto, este parámetro indica la facilidad con la que el material de una formación, permite el paso de agua a través de él, y se define como el volumen de agua que escurre a través de un área unitaria bajo una gradiente unitaria y por unidad de tiempo (Stephens et al., 1998).

Generalmente se considera la conductividad hidráulica horizontal, y a veces se hace referencia a su componente vertical, la cual es mucho menor, pues se encuentra afectada por la compactación de las diferentes capas.

En la sección Anexos, en la Tabla A1-3 se presenta los valores estimados para la permeabilidad o conductividad hidráulica.

d) **Coefficiente de transmisividad (T):** Determinado como el parámetro que nos indica la facilidad del agua para circular horizontalmente por una formación geológica, combinando la conductividad hidráulica y el espesor.

$$\text{Transmisividad} = \text{Conductividad hidráulica} * \text{Espesor}$$
$$(\text{m}^2/\text{día})$$

En acuíferos confinados la transmisividad es constante debido a su espesor constante; en cambio; en acuíferos libres, con un espesor saturado que varía según las oscilaciones de la superficie freática (por ejemplo: invierno y verano), experimenta valores variables de transmisividad.

En la sección Anexos, en la Tabla A1-4 se presenta los valores estimados para la transmisividad (Iglesias, 2022).

2.9.2. Pruebas de bombeo

Las pruebas de bombeo son un método adecuado para aproximar la caracterización de una zona de interés para la explotación de agua subterránea, mediante la obtención de los parámetros hidrogeológicos de un acuífero. Las expresiones que se utilizan para alcanzar dicho propósito consideran el régimen de flujo logrado durante el ensayo. En el caso de un *régimen constante o establecido*, los niveles de agua en el pozo de bombeo y en los pozos o piezómetros de observación permanecen constantes después de cierto tiempo de bombeo, analizándose el descenso total alcanzado en cada uno de los puntos de observación. Por otro lado, en el *régimen variable o transitorio* se evalúa el comportamiento del descenso de los niveles de agua a lo largo del tiempo, incluso sin la necesidad de alcanzar la estabilidad (Gibson & Singer, 1990).

Existen diversos tipos de ensayos o pruebas de bombeo, como se muestra en la sección Anexos, en la Tabla A2-1 (Villanueva & Iglesias, 1984).

Antes de actuar con un ensayo de bombeo, es necesario revisar cierta información preliminar y adicional, como se detalla a continuación (Villanueva & Iglesias, 1984):

- Estudios previos hidrogeológicos que permitan conocer el tamaño de la cuenca y la favorable posición (distancia y orientación) de los puntos idóneos donde serán ejecutados los pozos de bombeo y los pozos o piezómetros de observación.
- Estudios de caracterización geotécnica y análisis de sondeos geofísicos realizados en la zona de interés, de ser posible identificar el tipo de acuífero a estudiar; conocer los

niveles iniciales de agua, detallar la estratificación y propiedades generales de los estratos con la finalidad de definir el tipo de tubería de captación del pozo de bombeo y su profundidad.

- Realizar las pruebas de aforo que permitan definir el o los caudales adecuados de bombeo durante la ejecución de las pruebas.
- Previo a la lectura de la variación de los niveles de agua ante un caudal de extracción, es necesario considerar la limpieza del pozo (que no contenga recortes de perforación), que la calidad de agua se mantenga constante una vez se tenga limpio el pozo, y que no presente variaciones en la turbiedad del agua ni cambios bruscos o intermitencias en el flujo.
- La duración de los ensayos está en función de la distancia entre el pozo de bombeo y el pozo o piezómetro de observación. A mayor distancia entre estos dos pozos, es necesario que la prueba de bombeo sea mayor.

Durante la ejecución de la prueba de bombeo, la frecuencia de la toma de la medida de los niveles de agua en los diferentes puntos de observación, debe regir con lecturas uniformes espaciadas en una escala logarítmica. Por lo que se recomienda que, en las primeras tres horas, el intervalo de medición sea en minutos, posteriormente se puede considerar un espacio de 30 minutos y cuando haya transcurrido varias horas, o un día, se puede realizar lecturas en un espacio corto de tiempo y evaluar la evolución del descenso (Villanueva & Iglesias, 1984).

Para poder determinar que se ha alcanzado una condición de flujo establecido, las medidas de los niveles de agua en los pozos o piezómetros de observación ya no varían con el tiempo, siempre que se mantengan a un caudal constante en el pozo de bombeo.

En el caso de contar con las lecturas de las pruebas de bombeo previas realizadas en zonas cercanas, es recomendable comparar los datos obtenidos (niveles piezométricos, tiempo de estabilización del flujo, caudales de bombeo, niveles de descensos, tiempos y niveles de recuperación, etc.) a fin de identificar tendencias similares.

2.9.3. Métodos convencionales para la evaluación de pruebas de bombeo

A continuación, se expone los métodos teóricos generales para la interpretación de los ensayos de bombeo, considerando que los ensayos se basan en fórmulas matemáticas, es decir, modelos simplificados de la realidad física y como la interpretación de

determinadas circunstancias de la naturaleza, por lo que es indispensable obtener basta información de la zona a estudiar.

2.9.3.1. Ecuaciones fundamentales de flujo

El estudio del movimiento del flujo de agua en los acuíferos y el comportamiento durante las pruebas de bombeo o inyección, se basa en las ecuaciones fundamentales que estudian el flujo del agua subterránea en medios porosos o kársticos.

La Ley de Darcy, establece la relación entre un caudal que atraviesa un medio poroso y las características de dicho medio, siendo:

$$Q = -kAi \tag{1}$$

Donde:

Q	Caudal [L ³ /t]
k	Permeabilidad [L/t]
A	Área transversal por donde circula el flujo [L ²]
i	Gradiente hidráulico [adimensional], que a su vez se define como la pérdida de carga por unidad de longitud: $\Delta h/L$

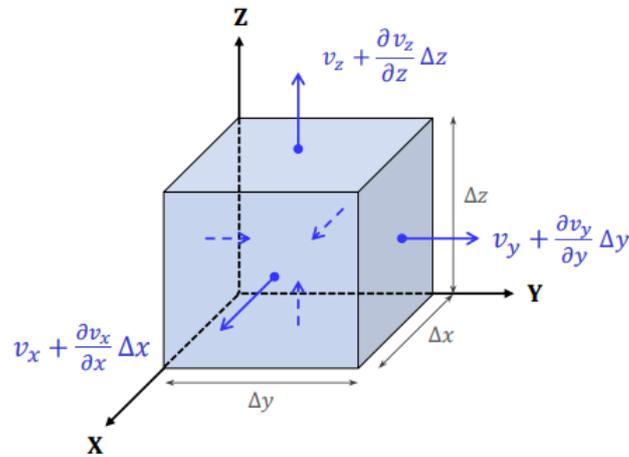
Para condiciones de flujo laminar la expresión (1) es válida, por lo que toda situación que estudie las condiciones de flujo a través de acuíferos, pozos de bombeo e inyección se asume que cumple con esta condición.

La ecuación de continuidad de flujo estacionario establece, la cantidad de flujo que entra es igual a la que sale en un elemento diferencial que sea representativo del medio poroso, dándose una carga piezométrica constante en un punto de análisis, independientemente del tiempo, por lo tanto:

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0 \tag{2}$$

Los términos v_x , v_y y v_z representan el caudal por unidad de área (Q/A) que atraviesa cada una de las caras en dirección x , y , z , mientras que $v_x + \frac{\partial v_x}{\partial x}$, $v_y + \frac{\partial v_y}{\partial y}$, $v_z + \frac{\partial v_z}{\partial z}$ representan las salidas en las caras opuestas, como detalla en la Figura 2-30:

Figura 2-30. Elemento diferencial de un medio poroso. Condiciones de continuidad de flujo



Fuente: González de Vallejo et al., (2004)

La ecuación fundamental de Laplace representa las condiciones de flujo en régimen estacionario o permanente, considerando la ausencia de fuentes externas, y se la obtiene aplicando la ecuación de Darcy (1) y la ecuación de continuidad de flujo (2):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{3}$$

La ecuación de Poisson, a diferencia de Laplace, determina bajo condiciones de flujo estacionario, que la suma de las entradas y salidas de agua, debe ser igual a la aportación de bombeo o recarga. Por lo que, en esta ocasión, se integra el término (R_w), positivo para casos de recarga y negativo para casos de bombeo.

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{R_w}{T} = 0 \tag{4}$$

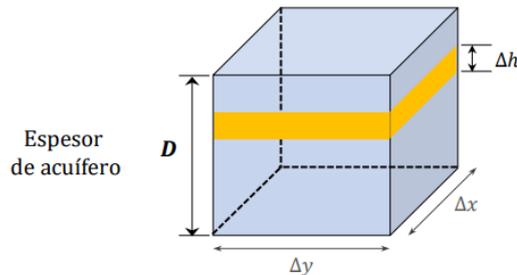
Donde (R_w) se define como el caudal (Q) que atraviesa una unidad de acuífero ($\Delta x \Delta y$) y (T) como la transmisividad, que está determinada como la permeabilidad (k) por el espesor de acuífero (D).

En la ecuación de flujo en régimen transitorio involucra el factor tiempo, al considerar que el volumen (salida) del sistema (ΔV_w) es igual, al volumen (entrada) menos el volumen que aporta el medio poroso, en un intervalo de tiempo dado, por lo tanto:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} + \frac{R_w}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{5}$$

En la ecuación antes presentada (5), (S) es el coeficiente de almacenamiento, definido como el volumen de agua (ΔV_W) aportado por una unidad de estrato ($\Delta x \Delta y$) y por unidad de carga (Δh), como se presenta en la Figura 2-31.

Figura 2-31. Condiciones de flujo en un elemento diferencial de un medio poroso.



Fuente: González de Vallejo et al., (2004)

Finalmente, las ecuaciones (3), (4) y (5) se desarrollan en un medio homogéneo e isótropo, considerando para cualquier dirección ($k_x = k_y = k_z$) un mismo valor de permeabilidad. De la misma manera, con propiedades constantes de agua como densidad y viscosidad.

Ahora, expresadas en coordenadas cilíndricas:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \tag{6}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{R_w}{T} = 0 \tag{7}$$

$$\frac{\partial^2 h}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial h}{\partial r} + \frac{R_w}{T} = \frac{S}{T} \frac{\partial h}{\partial t} \tag{8}$$

Al resolverse las ecuaciones fundamentales de flujo en medios porosos para varias condiciones de frontera, se cuenta con ecuaciones analíticas aplicables a problemas de circulación de agua a través de medios porosos, así como se presenta en los siguientes apartados.

2.9.3.2. Métodos en régimen permanente

En los ensayos o pruebas de bombeo en régimen permanente, el nivel dinámico de agua permanece prácticamente invariable después de un cierto tiempo de bombeo o tiempo de estabilización. En estas circunstancias el término $\frac{S \partial h}{T \partial t}$ de la ecuación general se considera nulo.

La metodología práctica para este tipo de ensayos o pruebas de bombeo, es relativamente simple; y en general, requiere poco esfuerzo para la toma de datos de las mediciones de campo. En primer lugar, se toma las medidas de la profundidad del agua tanto en el pozo exploratorio como en los piezómetros donde se observarán el descenso de niveles a distintas distancias del punto de bombeo. En el pozo asignado para llevar a cabo los ensayos de bombeo, se puede bombear el agua a un caudal constante. Al transcurrir varias horas hasta un día, se miden sucesivamente los niveles del agua en un tiempo determinado, preferiblemente corto, con la finalidad de observar si aún se experimenta descensos. Esta prueba puede repetirse, hasta comprobar que los niveles se hayan estabilizado. Se toma la medida del nivel logrado en el momento de la estabilización y por diferencia con los niveles iniciales, se obtienen las depresiones producidas en el pozo de bombeo y piezómetro de observación a causa de la extracción de un caudal determinado.

Con los valores obtenidos de las depresiones, con el caudal de bombeo y la distancia entre el pozo de bombeo y piezómetros de observación, se procede a interpretar el ensayo por los diferentes métodos; pudiendo obtener valores de transmisividad (T), radio de influencia e incluso pérdidas de carga en un pozo, en el caso de disponer varios piezómetros de observación. En el caso de no contar con pozos de observación para las consecuentes lecturas, se logrará obtener solo la transmisividad (T). El cálculo del coeficiente de almacenamiento (S) no es posible por métodos de régimen permanente, ya que el nivel dinámico de agua permanece constante y consecuentemente no se producen vaciados en el acuífero; por lo que, en teoría el acuífero se limita a cumplir el papel de solo transmisor de agua.

Las soluciones de los métodos analíticos que son considerados en este apartado, surgen como una primera evaluación a los problemas de flujo de pozos, considerando la ecuación de Poisson (7) para condiciones de flujo permanente o establecido.

Las hipótesis que se consideran respecto a las características de los acuíferos y a las condiciones hidráulicas del pozo de bombeo son las siguientes:

- Todos los estratos son horizontales y de extensión infinita.
- El acuífero es homogéneo e isótropo, espesor constante. El área de estudio no cambia con el tiempo, ni sus propiedades.
- El acuífero está limitado en su base por un estrato impermeable, el cual es determinado como datum o plano de referencia.

- La carga hidráulica inicial es uniforme y no sufre variaciones significativas antes de realizar la prueba de bombeo.
- Se considera un único pozo de bombeo.
- Durante las pruebas de bombeo, el caudal de extracción (Q) es constante.
- Una vez alcanzada la condición de flujo constante, se tiene un área de influencia por el bombeo, determinado como cono o radio de influencia (R).
- Debido al efecto del bombeo de un único pozo, todos los cambios de nivel de agua ocurren dentro del radio de abatimiento.
- Se desprecia el almacenamiento dentro del pozo, considerando como radio infinitesimal ($r_0 \rightarrow 0$).

2.9.3.3. Métodos en régimen variable

En los métodos de régimen variable o transitorio, no se interpreta el descenso total, si no la evolución del nivel dinámico de agua a lo largo de los ensayos o pruebas de bombeo. Evidentemente su desarrollo es más complejo que los métodos del régimen permanente. Para estos casos, el término $\frac{S\partial h}{T\partial t}$ de la ecuación general, no se anula.

Estos ensayos de bombeo proporcionan de forma más precisa las variantes para determinar la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S) a escala puntual o en una zona limitada; o también, si se pretende conocer el caudal de explotación más aconsejable para un pozo en función de las horas de bombeo diarias.

Dentro de la metodología general, en primer lugar, se miden las profundidades a las que se encuentra el nivel dinámico de agua, es decir los niveles iniciales, tanto en el pozo exploratorio como en los piezómetros de observación. Una vez iniciado el bombeo, se miden la evolución de los niveles de agua en el tiempo, en el pozo exploratorio como en los piezómetros de observación, el descenso de las medidas del nivel del agua en el tiempo, deben ser tal que se registre lo más uniforme posible en una escala logarítmica; por ejemplo: los minutos transcurridos desde el inicio del bombeo, para la toma de medidas pueden ser: min 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 15, 20, 25, 30, 40, 50, 60, 80, 100, 120, 160, 200, para un transcurso de las primeras horas; luego debe medirse a intervalos más amplios de tiempo como de horas, requiriendo medidas muy espaciadas si es que el ensayo resulta largo. Por último, una vez completado el ensayo de bombeo, debe medirse

en el pozo los niveles del ascenso del nivel dinámico de agua de forma análoga como en el descenso, de tal manera que permita obtener las lecturas del ensayo de recuperación.

Bajo condiciones de flujo en régimen variable o transitorio, los métodos analíticos desarrollados a partir de la ecuación fundamental de flujo (8) requiere del uso de herramientas matemáticas más complejas, y en la mayoría de los casos no se logra una solución cerrada, si no que se aproxima con métodos numéricos.

Manteniendo la hipótesis de características del acuífero y del pozo de bombeo, en condiciones de flujo establecido o permanente, a excepción que las mediciones durante las pruebas de bombeo no requieren condiciones de estabilidad, pero si garantizar la toma de lecturas en tiempos suficientes.

Para este tipo de métodos, se considera un parámetro hidrogeológico adicional, el coeficiente de almacenamiento (S), el cual relaciona el volumen que libera el acuífero en función con las condiciones de frontera y tiempo de ejecución de la prueba de bombeo.

Para fines pertinentes de esta investigación, en el apartado (2.10) se detalla el método que desarrolla las fórmulas y ecuaciones de Theis modificada por Jacob, para la obtención de la transmisividad (T) y el coeficiente de almacenamiento (S), para los tipos de ensayos de bombeo a caudal constante y régimen variable; hasta que, en un determinado punto de las lecturas de variación de abatimientos, alcance el régimen permanente.

2.9.3.4. Métodos analíticos aplicados a acuíferos libres

Los métodos para analizar y evaluar las pruebas de bombeo en acuíferos libres consideran además de las hipótesis básicas, algunas hipótesis complementarias como:

³⁵₁₇ El acuífero es libre, homogéneo con un espesor uniforme en el área de influencia a realizar las pruebas de bombeo.

³⁵₁₇ La profundidad del pozo alcanza el espesor total del acuífero.

En la Tabla 2-6, se presenta los métodos que comúnmente son utilizados en la práctica profesional para la interpretación de las pruebas de bombeo realizados en acuíferos de tipo libre.

Tabla 2–6. Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos libres

Método	Ecuación	Estado del caudal	Observaciones
Theim – Dupuit (1906)	$dQ = (2\pi rhK_h) \frac{dh}{dr}$	Estacionario (el flujo hacia el pozo no depende del tiempo)	Flujo horizontal con velocidad constante en la sección vertical. Método: Deducción por cálculo
Bulton (1963)	$s = \frac{Q}{4\pi KDJ} W(U_A, r/B)$	Transitorio (el flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo)	$y =$ variable de integración $\gamma = \frac{S_A + S_Y}{S} > 100$ Método: Ajuste de curva
Neuman (1975)	$S = \frac{Q}{4\pi KDJ} W(U_A, U_B\beta)$	Transitorio (el flujo hacia el pozo es dependiente del tiempo)	Medio isótropo o anisótropo $\frac{S_A}{S_Y} > 10$ Método: Ajuste de curva

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Kruseman & Ridder (1994)

2.9.3.5. Métodos analíticos aplicados a acuíferos confinados

Los métodos para analizar y evaluar las pruebas de bombeo en acuíferos confinados consideran además de las hipótesis básicas, algunas hipótesis complementarias como:

- ³⁵/₁₇ El acuífero es confinado, homogéneo, isotrópico y con un espesor uniforme en el área de influencia de explotación.
- ³⁵/₁₇ La superficie piezométrica es horizontal antes del bombeo.
- ³⁵/₁₇ La profundidad del pozo abarca todo el espesor del acuífero, captando agua por flujo horizontal.
- ³⁵/₁₇ Generalmente con diámetros de pozo pequeños y pérdidas de carga despreciables.

En la Tabla 2-7, se presenta los métodos que comúnmente son utilizados en la práctica profesional para la interpretación de las pruebas de bombeo realizados en acuíferos de tipo confinado.

Tabla 2–7. Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos confinados

Método	Ecuación	Estado de caudal	Observaciones
Thiem (1906)	$Q = \frac{2\pi T (h_2 - h_1)}{\ln \frac{r_2}{r_1}}$	Estacionario	Método: Deducción por cálculo
Theis (1935)	$s = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty e^{-y} \frac{dy}{y}$	Transitorio	Método: Ajuste de curva
Cooper – Jacob (1946)	$s = \frac{Q}{4\pi T} \left(-0.5772 - \ln u + u - \frac{u^2}{4} + \frac{u^3}{18} - \dots \right)$	Transitorio	Método: Ajuste línea recta
Chow (1952)	$s = \frac{Q}{4\pi T} (W(u))$	Transitorio	Método: Ajuste de curva

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Kruseman & Ridder (1994)

2.9.3.6. Métodos analíticos aplicados a acuíferos semiconfinados

Cuando se somete a bombeo un acuífero semiconfinado, el agua extraída además de venir del acuífero, proviene también de la capa suprayacente. El nivel piezométrico del acuífero desciende por acción del bombeo, provocando una carga hidráulica entre el acuífero y la capa semipermeable, generando que el agua del acuitardo descienda; por lo que, el caudal que fluye del acuitardo hacia el acuífero es directamente proporcional a la diferencia de la carga hidráulica (entre nivel freático del acuitardo y piezómetro del acuífero) e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica de la capa semipermeable.

Los métodos para analizar y evaluar las pruebas de bombeo en acuíferos semiconfinados consideran además de las hipótesis básicas, algunas hipótesis complementarias como:

³⁵₁₇ El acuífero es semiconfinado.

³⁵₁₇ El acuitardo al igual que el acuífero semiconfinado se consideran de área infinita.

³⁵₁₇ Tanto el acuitardo como el acuífero son homogéneos, isotrópicos y con un espesor uniforme en el área de influencia de la prueba.

³⁵₁₇ La profundidad del pozo abarca todo el espesor del acuífero, recibiendo agua del acuífero por flujo horizontal.

En la Tabla 2-8, se presenta los métodos que comúnmente son utilizados en la práctica profesional para la interpretación de las pruebas de bombeo realizados en acuíferos de tipo semiconfinado.

Tabla 2–8.Métodos convencionales para pruebas de bombeo en acuíferos semiconfinados

Método	Ecuación	Estado de caudal	Observaciones
Glee (1930 - 1951)	$s_m = \frac{Q}{2\pi T} k_0 \frac{r}{L}$	Estacionario	Método: Ajuste de curva
Hantush - Jacob (1955)	$s_m = \frac{2,30Q}{2\pi T} (\text{Log} 1,12 \frac{r}{L})$	Estacionario	Método: Ajuste línea recta
Walton (1962)	$s = Q \int_u^\alpha \frac{1}{y} \exp(-y - \frac{r^2}{4L^2y}) dy$	Transitorio	T, S y c tienen similitud razonable Método: Ajuste de curva
Hantush (1956)	$s_p = \frac{Q}{2\pi T} k_0 \frac{r}{L}$	Transitorio	Método: Punto de inflexión
Hantush III (1960)	$S = \frac{Q}{4\pi T} W(u,\beta)$	Transitorio	Método: Ajuste de curva
Neuman – Withersponn (1972)	$S = \frac{Q}{4\pi KD W(u,\beta)}$	Transitorio	Método: Ajuste de curva

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Kruseman & Ridder (1994)

2.10. Determinación del coeficiente de transmisividad y coeficiente de almacenamiento con la fórmula de Theis simplificada por Jacob

- **Fórmula de Theis**

Charles V. Theis (1935) fue el primer hidrogeólogo en desarrollar un modelo matemático para el desarrollo de un pozo de bombeo bajo condiciones de régimen no permanente, al aplicar la analogía de conceptos entre flujo de calor en sólidos y flujo de agua en medios porosos, sentando las bases para posteriores soluciones numéricas que evalúan condiciones de flujo más complejas. A partir del desarrollo matemático de la ecuación fundamental de flujo transitorio (8), y aplicando las condiciones de frontera.

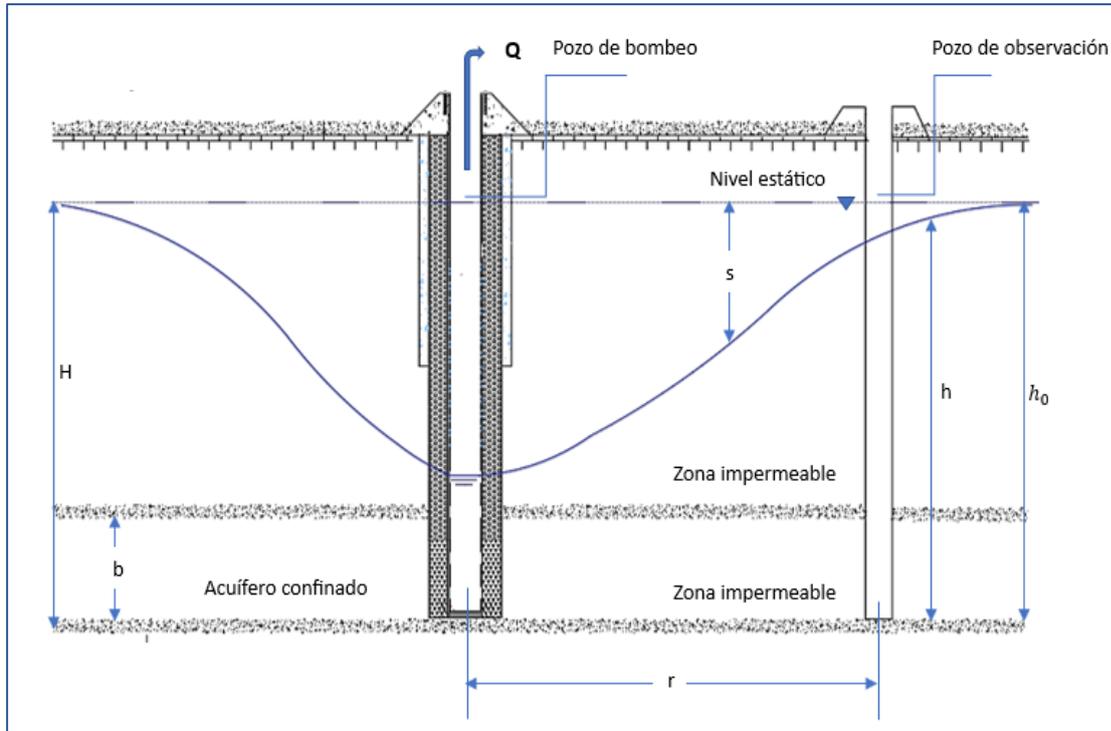
i. $s(r,0) = 0$

ii. $s(\infty,t) = 0$

iii. $\lim_{r \rightarrow 0} r \frac{\partial s}{\partial r} = -\frac{Q}{2\pi T}$

Para un acuífero confinado sin fuentes de recarga, como se detalla en la Figura 2-32.

Figura 2-32. Pozo artesiano sometido a bombeo a flujo constante.



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Villanueva & Iglesias (1984)

Y considerando un bombeo a gasto constante, la ecuación de Theis se expresa como:

$$s = H - b = \frac{Q}{4\pi T} \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (9)$$

O de la forma:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \quad (10)$$

Donde:

$$w(u) = \text{función de pozo} = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du \quad (11)$$

Siendo:

$$u = \frac{r^2 S}{4Tt} \quad (12)$$

Y donde los valores de $W(u)$ pueden ser encontrados por el desarrollo de la serie convergente:

$$w(u) = \int_u^\infty \frac{e^{-u}}{u} du = -0,5772 - \ln u + u - u^2 + \frac{u^3}{3.3!} - \frac{u^4}{4.4!} + \dots \quad (13)$$

En base a esta serie, se construye la tabla de valores de la función de pozo $W(u)$ en función de la variable (u) , definida por la ecuación (13), como se detalla en la sección de Anexos en la Tabla A3-1.

- **Fórmula de Theis modificada por Jacob**

Estudios realizados por C. E. Jacob (1940) en torno a la ecuación de Theis, ecuación (9), para un régimen no permanente, llevaron a concluir que, para valores suficientemente pequeños de (u) , se puede considerar, con buena aproximación la ecuación (13) limitada al desarrollo de sus dos primeros términos:

$$w(u) = \int_u^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du = -0,5772 - \ln u. \quad (14)$$

Este método considera que cuando la variable auxiliar (u) sea menor a $(0,03)$, aunque a efecto de casos prácticos para valores menores a $(0,1)$, la expresión $w(u) = -0,5772 - \ln(u)$, es suficiente para casi la totalidad de los casos. De esta manera, para un tiempo lo suficientemente largo, que equivale a pequeños valores de (u) , Jacob reescribe la ecuación de Theis en la siguiente forma aproximada:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} W(u) \approx \frac{Q}{4\pi T} (-0,5772 - \ln(u)) \quad (15)$$

Donde: $-0,5772 = \ln(x)$, $x = 0,56147$

$$-0,5772 - \ln(u) = \ln(0,56147) - \ln(u) = \ln(0,56147/u)$$

Entonces:

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{0,56147}{u}\right)$$

Siendo que: $u = \frac{r^2 S}{4Tt}$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{0,562 * 4Tt}{r^2 S}\right)$$

$$s = \frac{Q}{4\pi T} \ln\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right)$$

Efectuando la división $(1/4\pi)$ y multiplicando por $(2,3)$, para pasar de logaritmo neperiano a logartimo decimal, se obtiene:

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log\left(\frac{2,25Tt}{r^2 S}\right) \quad (16)$$

Que es la expresión de Jacob, en donde:

- d Desenso en un punto situado a la distancia r del pozo de bombeo

- Q Caudal de bombeo constate
- T Transmisividad del acuífero
- S Coeficiente de almacenamiento del acuífero
- t Tiempo transcurrido desde que se inicia el bombeo

La ecuación (16) es la fórmula de Theis simplificada por Jacob, para abatimientos en un pozo de observación a una distancia (r) del pozo de bombeo. Esta fórmula es válida para tiempos (t) suficientemente grandes, o valores de (u) pequeños. En la práctica, para valores: $u < 0,1$, los valores de la ecuación (16) son prácticamente idénticos a los de la ecuación (9).

• **Determinación del coeficiente de transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S).**

Las características de un acuífero pueden ser determinadas a partir del levantamiento de un conjunto de valores abatimiento/tiempo (s_i, t_i), considerando para el tiempo valores desde el inicio de la prueba de bombeo.

Para una representación gráfica conveniente, los valores del abatimientos observados en función del tiempo, son ploteados de tal manera que, los valores de abatimiento (s) son ubicados en ordenadas, en escala aritmética; y los valores del tiempo (t), son ubicados en las abscisas, en escala logarítmica.

En efecto, reescribiendo la ecuación (16):

$$s = \frac{0,183 Q}{T} \log(t) + \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{2,25T}{r^2S}\right) \tag{17}$$

Cual es del tipo $y = ax$. Para la ecuación (17), la pendiente de una recta en una gráfica de (s) vs $\log(t)$ es igual a: $0,183\frac{Q}{T}$.

Por lo tanto, el coeficiente de transmisividad puede ser calculado a partir de dos pares de valores de (s) y (t), situados sobre la recta $s = f(\log t)$:

– Para el instante (t_1):

$$s_1 = \frac{0,183 Q}{T} \log(t_1) + \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{2,25T}{r^2S}\right)$$

– Para el instante (t_2):

$$s_2 = \frac{0,183 Q}{T} \log(t_2) + \frac{0,183Q}{T} \log\left(\frac{2,25T}{r^2S}\right)$$

Seindo $s_2 - s_1$, resulta:

$$s_2 - s_1 = \frac{0,183 Q}{T} \log \frac{t_2}{t_1}$$

$$T = \frac{0,183 Q}{s_2 - s_1} \log \frac{t_2}{t_1} \tag{18}$$

Por lo tanto, tomando $t_2 = t_1$

$$T = \frac{0,183 Q}{s_2 - s_1} \tag{19}$$

En la Figura 2-33, son representados los abatimientos (s_1) y (s_2) en el pozo de observación, correspondientes a los tiempos (t_1) y (t_2).

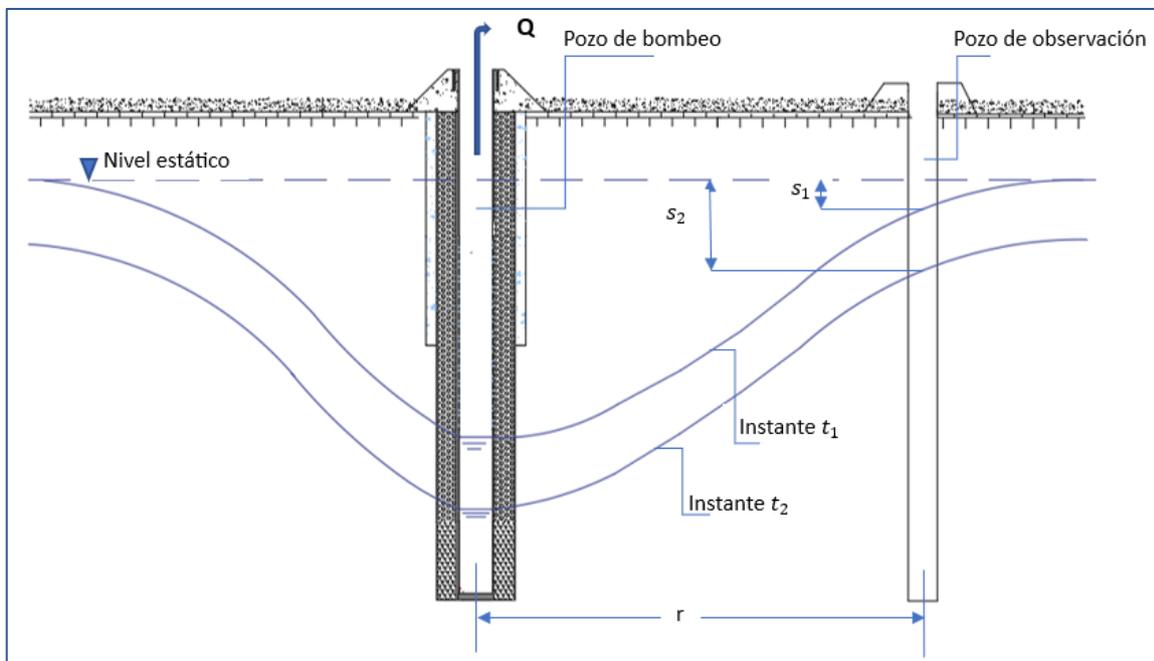


Figura 2-33. Abatimientos observados en un pozo de observación en dos instantes sucesivos

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Villanueva & Iglesias (1984)

El coeficiente de almacenamiento también puede ser estimado en base a la construcción de la gráfica de (s) vs $\log(t)$. De igual manera, con base en la ecuación (16), para $s = 0$ (abatimiento nulo), se tiene:

$$\frac{2,25Tt_0}{r^2S} = 1$$

Una vez que $Q \neq 0$ y conociendo el valor del coeficiente de transmisividad (T):

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2S}$$

(20)

Capítulo III

3. Marco Metodológico

La metodología desarrollada para el logro de la perforación de un pozo exploratorio para el abastecimiento de agua de riego y usos complementarios, en una sección de la microcuenca Río Churute, específicamente en el Recinto Miranda Girón II, cooperativa Velasco Ibarra, cantón Naranjal, provincia del Guayas; sigue los lineamientos y requerimientos de la “Guía para la Formulación de Proyectos de Riego y Drenaje” y a los “Parámetros para la elaboración del informe de la prueba de bombeo requerido para el análisis de disponibilidad de agua subterránea” actualizado al 2022 y alineada a la normativa vigente expedida por el Ministerio del Ambiente, Agua y Transición Ecológica.

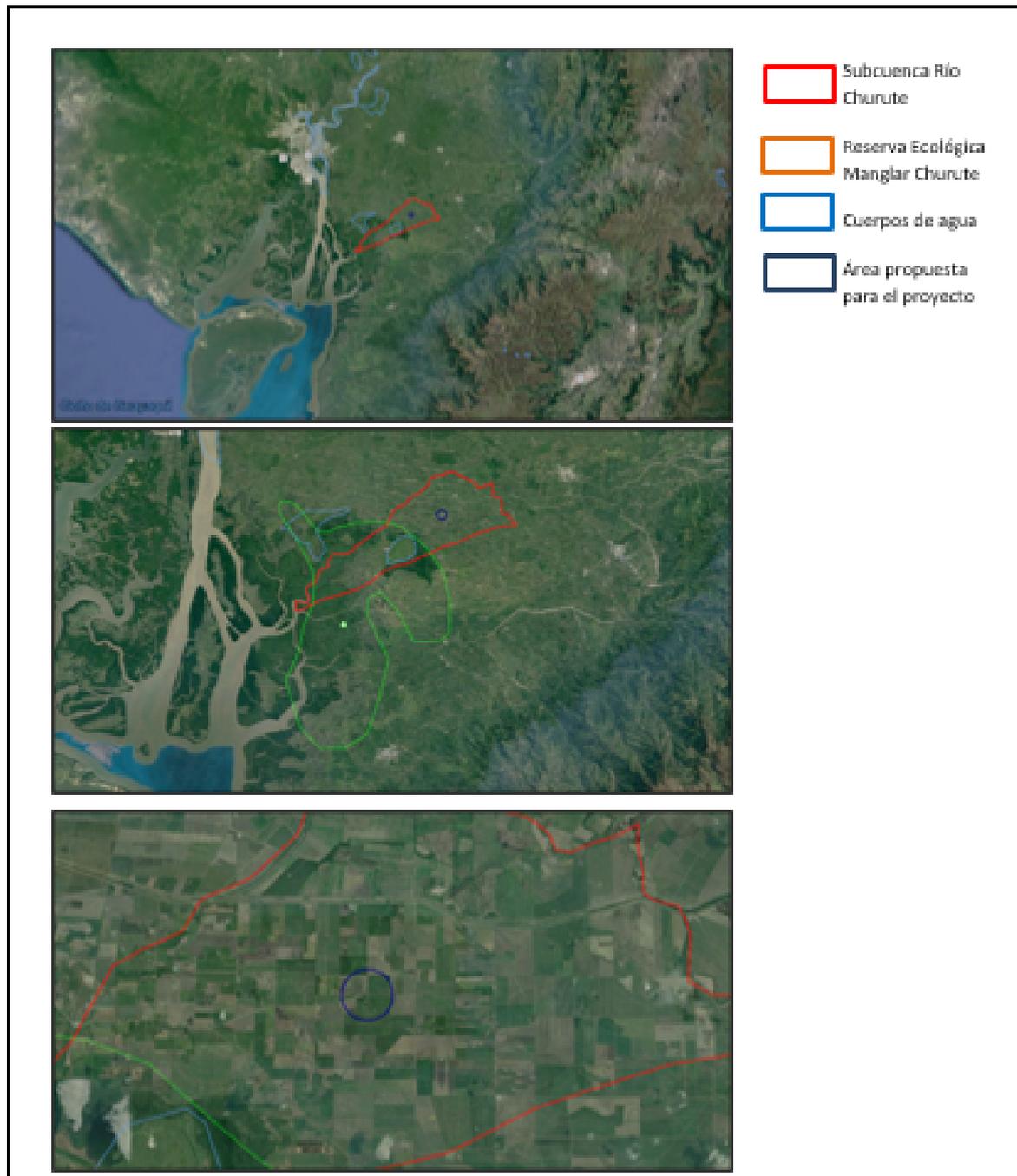
3.1. Etapa 1: Caracterización hidrogeológica del área de estudio

3.1.1. Ubicación geográfica y aspectos generales

El área de estudio se encuentra en el módulo de riego y drenaje denominado “El Martillo” perteneciente a la Junta de Riego y Drenaje Manuel D. J. Calle, ubicado en el recinto Miranda Girón II, Cooperativa Velasco Ibarra, parroquia Taura, cantón Naranjal, provincia Guayas.

Según la demarcación hídrica del Ecuador, la microcuenca Río Churute, en donde se encuentra el área descrita, pertenece a la cuenca Río Taura de la Demarcación Hídrica Guayas. La superficie de terreno, donde se lleva a cabo el desarrollo de las diferentes metodologías a fin de perforar un pozo exploratorio para caracterizar hidrológicamente el acuífero de la zona, cuenta con un área circular de 132, 50 ha y de coordenadas céntricas: latitud 2°22'56.65"S y longitud 79°33'12.32"O.

Figura 3-1. Ubicación de la zona de estudio - mapa satelital.



Fuente: Elaborado por la autora, imagen tomada y editada de Google Earth Pro 2020

3.1.2. Caracterización del medio físico

Para la verificación de los componentes del medio físico de la zona de intervención, se lleva a cabo la sintetización de la información secundaria correlacionando con expediciones de campo para lograr la caracterización de las condiciones de línea base del entorno, para lo cual se determina un área de influencia directa e indirecta. El objetivo

básico del trabajo de campo es evidenciar directamente, in situ, y reconocer en el área de influencia y las condiciones actuales que presenta el área.

3.1.2.1. Climatología

La identificación climática, como la variación en el tiempo y espacio de los parámetros meteorológicos, caracterizada de acuerdo a los registros históricos de fuentes, como estaciones climáticas más cercanas al sitio de ejecución del proyecto; así como de medios digitales de monitoreo climática.

La microcuenca Río Churute está ubicada en la región tropical del país, con variedad estacional climática, entre los meses de junio a noviembre se registra la estación seca o de verano (temporada caliente, húmeda y parcialmente nublada); entre enero y abril presenta la estación lluviosa o de invierno (temporada caliente, opresiva y nublada); mientras que, de mayo a diciembre se tiene el periodo de transición climática. Durante el transcurso del año, generalmente la temperatura varía de 22°C a 32°C y muy rara vez las temperaturas descienden de 20°C o ascienden más de 33°C.

En cuanto a los pisos climáticos, la parroquia Taura cuenta con dos clasificaciones: a) Clima tropical mega térmico seco; y b) Clima mega térmico semihúmedo, siendo el segundo piso climático característico en la zona de estudio, con un área total del 38,5% ubicado al este de la parroquia; donde las temperaturas medias fluctúan entre los 23°C y 32°C, con una oscilación térmica de 5°C entre el mes más frío y el mes más caliente; aunque datos más puntuales registran variaciones de hasta 10°C en un día; con una humedad relativa entre los 70 y 90%; los pluviómetros anuales varían generalmente entre 1000 y 1500 mm, con valores mayores en las bajas estribaciones de la cordillera o piedemonte, las lluvias están concentradas en un periodo único (diciembre a abril), siendo seco el resto del año (PDOT-GAD-TAURA, 2019).

Tabla 3–1. Resumen climatológico microcuenca Río Churute

DATOS PROMEDIO MENSUAL		
Precipitación (mm)	142mm	2mm
Nubosidad (%)	13%	70%
Humedad relativa (%)	95%	25%
Temperatura (°C)	24° a 35°	18° a 29°
Meses	enero a abril	mayo a diciembre

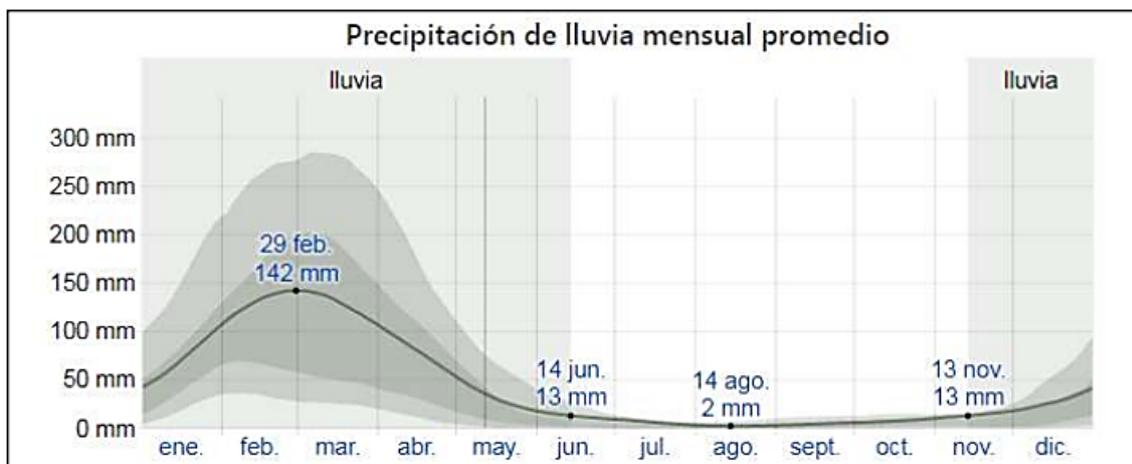
Fuente: Documento técnico para la planificación y desarrollo del territorio de la parroquia Taura para el periodo de gestión 2019 -20123

3.1.2.2. Precipitación

El régimen pluviométrico interanual muestra una distribución variable, donde la temporada de mayor precipitación abarca alrededor de cuatro meses (mediados de enero a finales de abril); y la temporada seca abarca 8,6 meses (finales de abril a mediados de enero).

La distribución de la lluvia mensual dura siete meses (mediados de noviembre a mediados de junio), con un intervalo móvil de 31 días de lluvia de por lo menos 14 mm. La mayor concentración de lluvias se registra alrededor de finales de febrero, con una acumulación total promedio de 142 mm; y el promedio del año sin lluvias dura alrededor de cinco meses (mediados de junio a mediados de noviembre), tal como se visualiza en la Figura 3.2.

Figura 3-2. Distribución mensual de la precipitación en (mm)

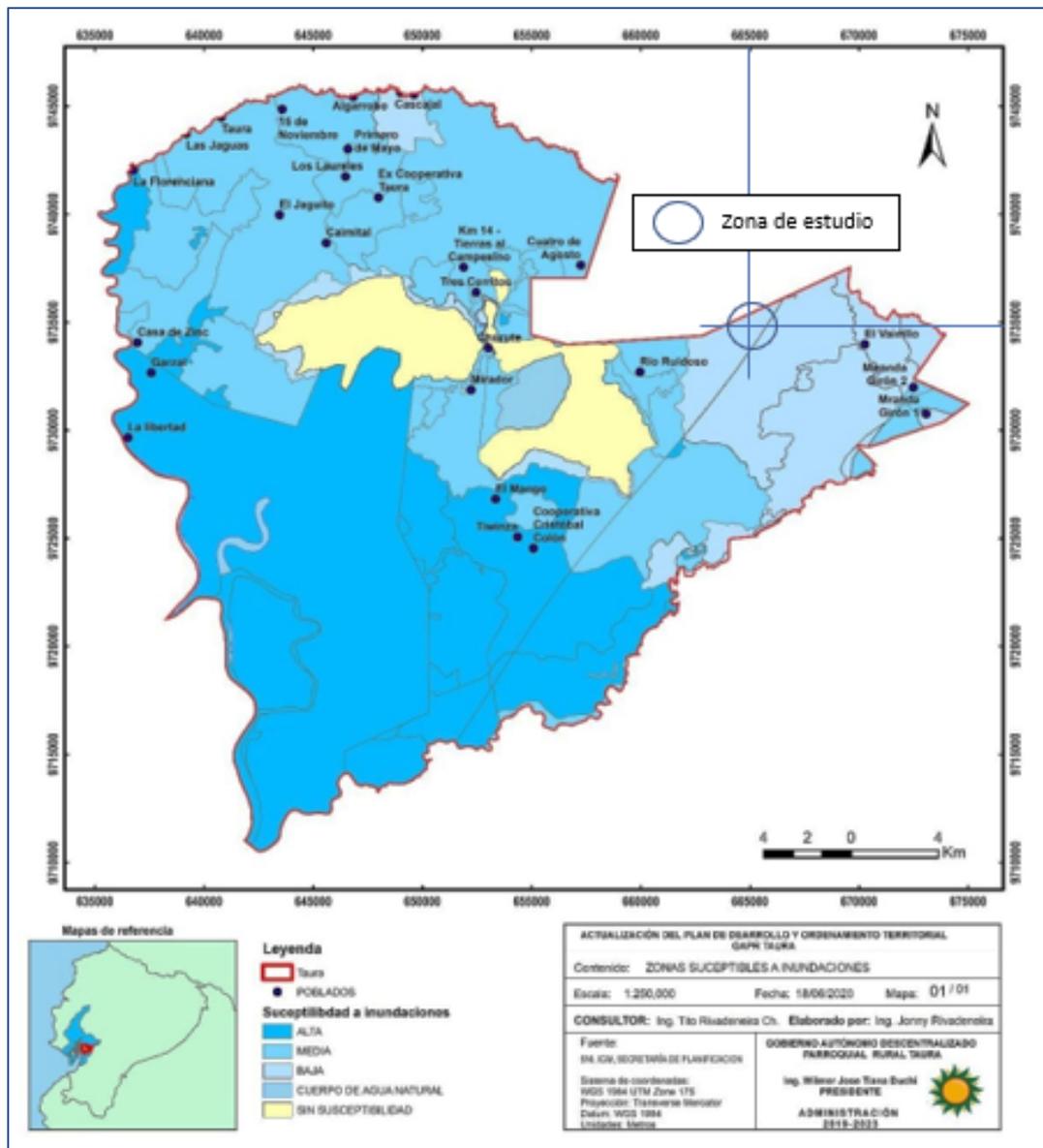


Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2022)

Las inundaciones en la Demarcación Hídrica Guayas, específicamente en la cuenca Río Taura, sobre la base de estudios (INAMHI, 2022) da como resultado la ocurrencia de lluvias intensas en amplias áreas, con la consecuente formación de considerables volúmenes de agua formando ríos torrenciosos con alta capacidad de erosión hídrica en los tramos superiores de los causes, provocando desbordamientos e inundaciones. Tanto en áreas aledañas como en la zona de proyecto, las llanuras de Daule, Babahoyo, Yaguachi, Bulubulu – Taura y Churete, son consideradas áreas con mayor riesgo de inundación en la Demarcación Hídrica Guayas, donde las superficies con mayor afectación resultan las áreas agrícolas, especialmente las dedicadas al cultivo de arroz, café y caña de azúcar (CEDEGE, 2021).

En la Figura 3-3, se visualiza bajo denominación por color el grado de afectación por inundaciones según el sector a lo largo del territorio de la parroquia Taura.

Figura 3-3. Mapa de susceptibilidad a inundaciones. Parroquia Taura.



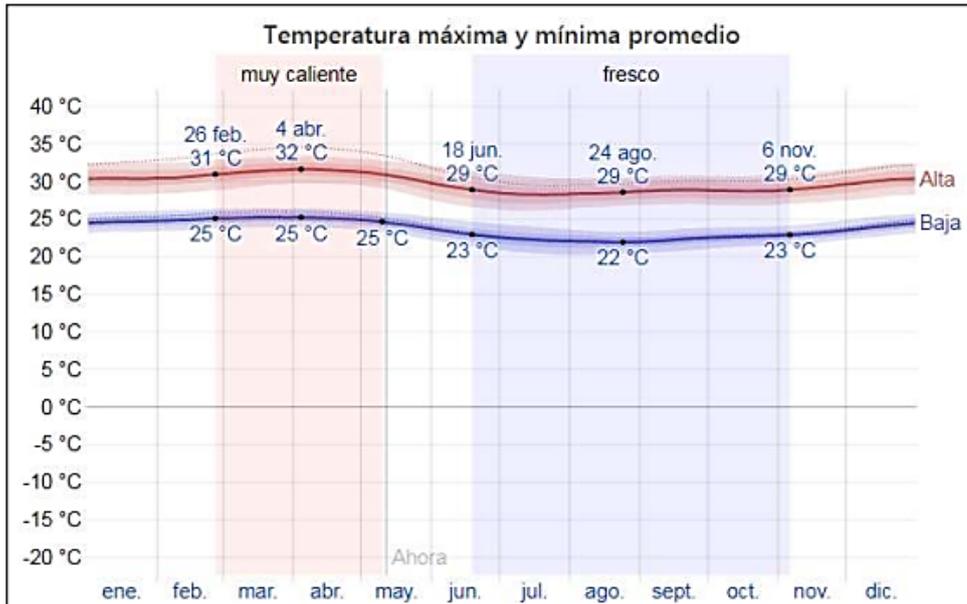
Fuente: Documento técnico para la planificación y desarrollo del territorio de la parroquia Taura para el periodo de gestión 2019 -20123

3.1.2.3. Temperatura

En la zona de estudio, la temporada calurosa dura aproximadamente 2,5 meses (mediados de febrero a principios de mayo), con una temperatura máxima promedio diario de 30°C. Los días más calurosos oscilan a principios de abril con temperaturas de hasta 32°C y una temperatura mínima promedio de 25°C.

La temporada fresca por decirlo así, dura 4,6 meses (mediados de junio a principios de noviembre), con temperaturas máximas promedio diario menores a 29°C y con temperaturas mínimas de 22°C.

Figura 3-4. Distribución mensual de la temperatura



Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2022)

3.1.2.4. Humedad Relativa

La humedad registrada en la microcuenca Río Churute, varía extremadamente. El periodo más húmedo del año dura nueve meses (inicios de octubre a inicios de julio), y durante ese tiempo el nivel de comodidad referido es opresivo por lo menos durante el 43% del tiempo. El día más húmedo probable del año es a inicios de marzo, presentado humeado el 95% del tiempo. El día menos húmedo probable es a inicios de septiembre con condiciones húmedas el 25% del tiempo (INAMHI, 2022).

3.1.2.5. Nubosidad

La nubosidad tiene una relación directa con la precipitación, humedad relativa y temperatura. La nubosidad media en la zona varía en el transcurso del año, la temporada más despejada del año comienza aproximadamente a mediados de mayo, con una duración de cinco meses, terminando a mediados de octubre; los primeros días de agosto se prevé mayores condiciones despejadas, mayoritariamente o parcialmente nublado el 70% del tiempo, y nublado o mayormente nublado el 30% del tiempo. La temporada más nublada del año comienza aproximadamente a principios de octubre, estableciéndose por siete meses y termina aproximadamente a mediados de mayo (INAMHI, 2022).

3.1.2.6. Viento

La velocidad promedio del viento tiene variaciones estacionales leves en el transcurso del año. La temporada más ventosa dura aproximadamente seis meses (finales de septiembre a mediados de marzo), con velocidades promedio de viento mayores a 7,7 km/h. La temporada más calmada del año dura cerca de seis meses (mediados de marzo a finales de septiembre) (INAMHI, 2022).

3.1.2.7. Topografía

La topografía de la microcuenca experimenta variaciones modestas de altitud, con una altitud promedio sobre el nivel del mar de 5 a 28 metros. En un radio de 5 kilómetros experimenta variaciones de altitud de 70 metros; en un radio de 20 kilómetros (2.000 metros); y en un radio de 80 kilómetros, experimenta variaciones extremas de altitud (2.500 metros).

En un radio de 5 kilómetros alrededor de la zona de estudio, el área está cubierto en un 55% de árboles y un 36% de cultivos; en un radio de 15 kilómetros, el área está cubierto de árboles en un 53% y cultivos en un 22%; y en un radio de 80 kilómetros, el área tiene 35% cubierto de árboles y un 27% de cultivos (GAD-NARANJAL, 2021).

3.1.2.8. Relieve – Suelo

La evolución geomorfológica del área de la cuenca Río Taura, entre los ríos mencionados en el siguiente apartado, ha sido determinada principalmente por la dinámica fluvial. Las diversas acumulaciones fluviales están distribuidas en dos grandes paisajes o grupos: a) La planicie o piedemonte o zona de acumulación de materiales detríticos aluvionales; y b) La llanura de inundación.

La primera opción, la planicie de piedemonte, está determinada por la unión sucesiva lateral de varios abanicos o conos de explayamiento, cuya morfogénesis se encuentra en función de ciertos factores. Como primer factor, la magnitud de la cuenca de erosión que corresponde a los ríos Churute y Ruidoso, ubicados al noreste de la cuenca; en cambio, hacia el suroriente, los explayamientos son menores, dado a que los ríos que descienden de las montañas tienen un recorrido corto. Como segundo factor, es el medio aluvial del río Babahoyo y el prelitoral del golfo de Guayaquil. Los conos de explayamientos, presentan características comunes en su material, de granulometría gruesa, con texturas variables por efecto de los estratos mezclados con abundante piedra, grava y gravillas muy heterogéneas y redondeadas.

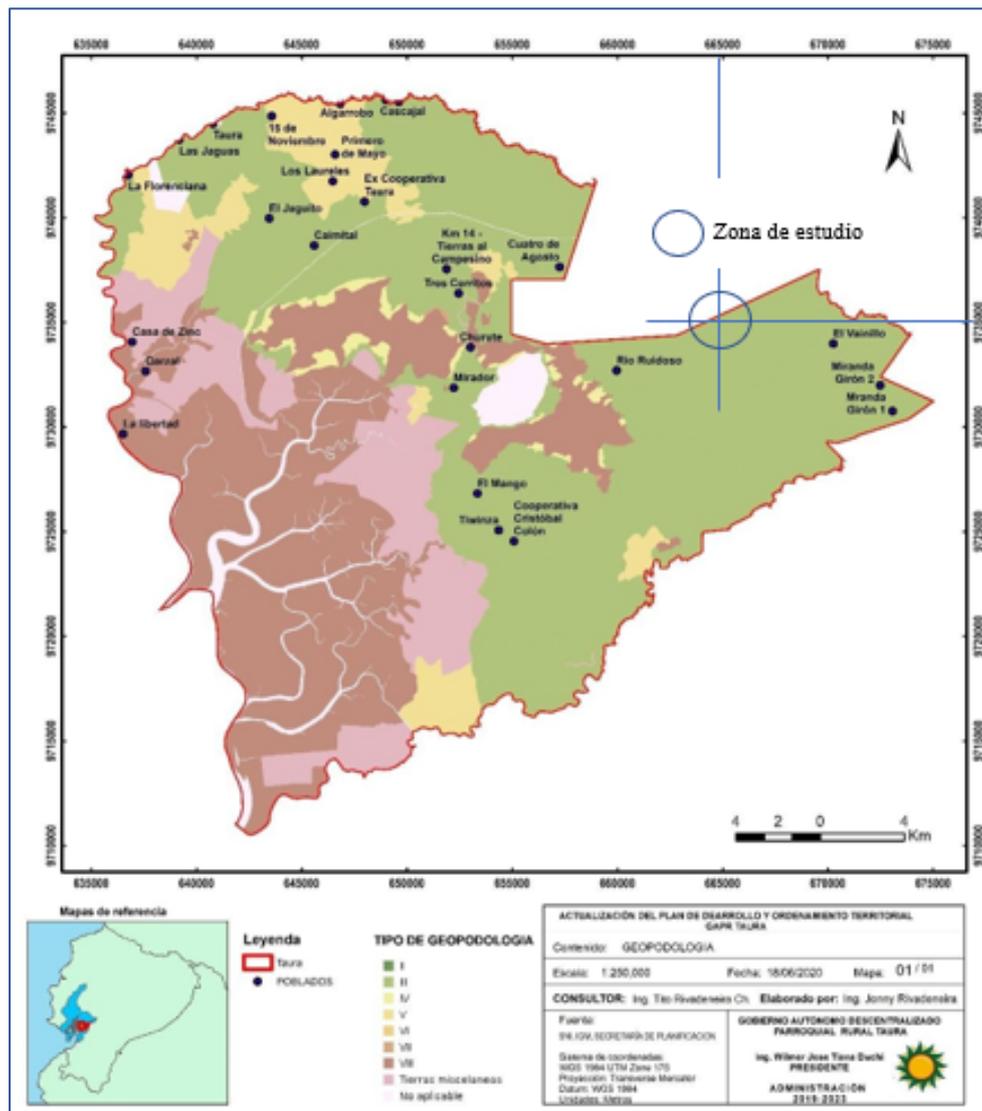
Por otro lado, la llanura de inundación, no está catalogada como un cauce ni posee límites precisos, por el hecho de corresponder a un fenómeno hidrológico sin acción morfogenética. Esta llanura se caracteriza por poseer acumulación de material más fino que los conos de explayamiento; generalmente cuando el río se desborda de su cauce mayor o natural, va depositando su carga en los márgenes formados, por lo que las inundaciones son turbulentas causando tanta erosión como acumulación de sedimentos, que el patrón resultante de los suelos es complejo en varios grados.

En cuanto al tipo de suelo según la geopodología, la cuenca Río Taura posee tres tipos: a) Suelos clase II; b) Suelos clase IV; y c) Suelos clase VIII. En la Figura 3-5, se detalla el tipo de geopodología a lo largo de la extensión de la parroquia Tura, determinándose en la zona de estudio, suelo con geopodología tipo II.

Suelos con geopodología clase II

Son suelos característicos que soportan actividades pecuarias, agrícolas o forestales, permitiendo el uso de maquinaria para el arado. Tierras con ligeras limitaciones, presentado pendientes menores al 5% con ligera erosión o sin evidencia, moderadamente profundos, con poca pedregosidad de tal manera que no limita o imposibilita las labores maquinables, con textura superficial del tipo 1, 2 y 3, fertilidad de mediana a alta, con drenaje natural bueno a moderado; estos también incluyen suelos ligeramente salinos y no salinos, con toxicidad ligera o nula, no presentan periodos de inundación o estos son muy cortos, se ubican en regímenes de humedad del suelo údico y ústico y ocupan regímenes de temperatura isohipertérmico a isotérmico.

Figura 3-5. Mapa geopodológico de la parroquia Taura

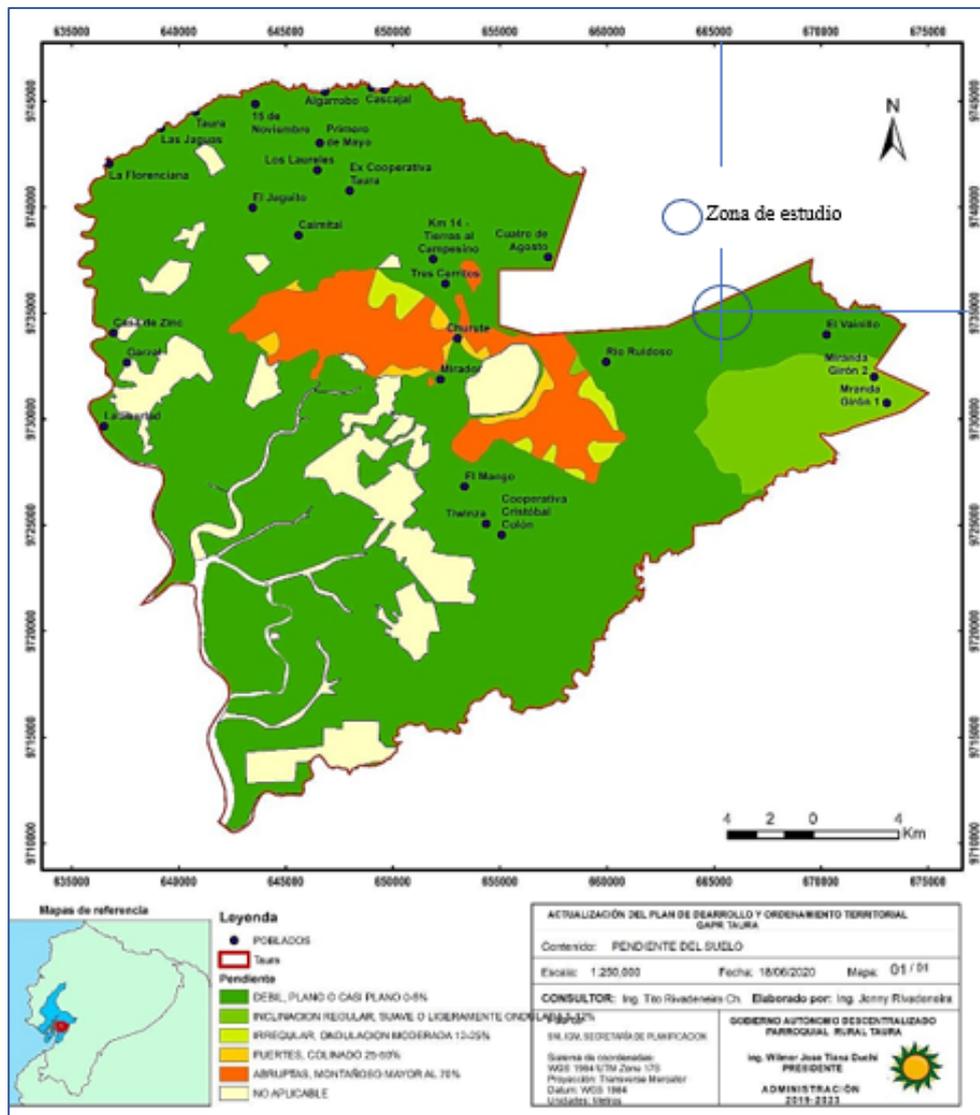


Fuente: Documento técnico para la planificación y desarrollo del territorio de la parroquia Taura para el periodo de gestión 2019 -20123

En la parroquia de Taura, prevalecen las áreas con pendientes de 0 a 5% cubriendo un área aproximada de 75.974,03 hectáreas equivalente al 94,40% de la extensión del terreno parroquial, en este espacio están asentados los centros poblados; mientras que, las zonas de pendientes mayores al 5% cubren un área mínima del territorio, ubicadas principalmente en la parte central del territorio.

A continuación, en la Figura 3-6 se muestra el detalle de la pendiente predominante en la extensión de terreno de la parroquia Taura, presentando en la zona de estudio una pendiente plana o casi plana (0-5%), en este rango de pendiente se denomina como “débil”, en la cual es favorable la realización de todo tipo de mecanización agrícola, por lo general los suelos ubicados sobre estas pendiente no son pedregosos.

Figura 3-6. Mapa del tipo de pendiente en el territorio de la parroquia Taura



Fuente: Documento técnico para la planificación y desarrollo del territorio de la parroquia Taura para el periodo de gestión 2019 -20123

Cabe resaltar que, como la mayor parte de la parroquia presenta superficies con pendientes no mayores al 5% y que los ríos son límites de la parroquia, da como resultado que el 76,27% de la extensión de terreno de la parroquia es propensa a riesgo de inundaciones; del cual, el 26,21% corresponden a zonas que presentan inundaciones permanentes, mientras que el 50,06% se denominan superficies propensas a inundaciones debido al desbordamiento de los ríos o por las fuertes precipitaciones. Sin embargo, las zonas menos susceptibles a este riesgo se encuentran principalmente en el centro y al este de la parroquia (Acosta & Andrade, 2008).

3.1.2.9. Hidrología

Las cuencas del Río Taura, Río Churute y Río Cañar, poseen características fisiográficas similares que incluyen la presencia de laderas en las estribaciones occidentales de la Cordillera de los Andes en las secciones altas y medias, y con presencia de relieves planos costeros en las secciones bajas.

Los ríos Bulubulu (Boliche) y Culebras que forman el río Taura, así como los ríos Ruidoso y Churute (Choalán) que forman el río Churute, tienen sus cauces con un recorrido de sentido este – oeste hasta su desembocadura en su río principal, que a su vez fluye en el mismo sentido hasta su desembocadura en el Golfo de Guayaquil a través del canal Mondragón.

En las Tablas 3-2 y 3-3 se presenta una síntesis de los parámetros fisiográficos de las subcuencas y microcuencas de la cuenca Río Taura ubicada al Sureste de la Demarcación Hídrica Guayas.

Tabla 3–2. Parámetros fisiográficos de las cuencas

Subcuenca	Microcuenca	Superficie (km ²)	Perímetro (km)	Desnivel (m)	L. Cauce (km)
Río Taura	Río Bulubulu (Boliche)	1112	175,8	3300	97,7
	Río Culebra	238,8	106,92	920	44,8
Río Churute	Río Churute (Choalán)	142	57,8	20	33
	Río Ruidoso	108,8	63,9	10,8	38
Río Cañar	Estero Trobador	68,8	41	17,8	24

Fuente: Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Hojas Topográficas (2000)

Tabla 3–3. Continuación. Parámetros fisiográficos de las cuencas

Subcuenca	Microcuenca	H.Máxima (msnm)	H. Mínima (msnm)	H. Media (msnm)	Pendiente (%)
Río Taura	Río Bulubulu (Boliche)	3325	18,8	162,9	3,25
	Río Culebra	928,8	11,6	35,8	1,98
Río Churute	Río Churute (Choalán)	47,7	16,9	25,8	0,15
	Río Ruidoso	79,8	10,7	30	0,18
Río Cañar	Estero Trobador	57,8	17,8	30,5	0,16

Fuente: Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Hojas Topográficas (2000)

Debido a que la información hidrométrica es escasa en la microcuenca de interés, así como en las subcuencas que podrían ser homólogas, el caudal se ha obtenido en base a la

información de la precipitación registrada en las estaciones meteorológicas Milagro (M037) para los datos de la subcuenca Río Taura; y puerto Inca (M477) para las subcuencas Río Churute y Cañar; mediante la aplicación de un coeficiente de escorrentía, se obtiene el caudal, el mismo que se asume igual a $6,66 \text{ (m}^3/\text{s)}$, conforme al tipo de suelo, pendientes y cobertura vegetal.

A continuación, se presenta un resumen de los caudales medios mensuales obtenidos para los diferentes puntos de generación.

Tabla 3–4. Caudales medios mensuales (m^3/s). Cuenca Río Taura

Microcuenca	Caudales (m^3/s)						
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul
R. Bulubulu	63,25	92,26	98,12	36,53	11,2	0,35	0,17
R. Culebra	14,66	21,12	16,88	6,93	1,98	0,06	0,05
R. Churute	2,01	2,68	2,48	2,06	0,56	0,28	0,32
R. Ruidoso	1,38	2,20	2,02	1,62	0,4	0,2	0,23
E. Trabador	0,89	1,29	1,24	0,96	0,26	0,14	0,16
Microcuenca	Caudales (m^3/s)						Medio
	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic		
R. Bulubulu	0,11	0,32	0,48	0,72	2,46		25,49
R. Culebra	0,03	0,07	0,11	0,15	2,01		5,33
R. Churute	0,42	0,48	0,84	0,52	0,76		1,12
R. Ruidoso	0,26	0,29	0,59	0,36	0,6		0,84
E. Trabador	0,18	0,2	0,4	0,26	0,38		0,53

Fuente: Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (2022)

3.1.3. Caracterización geomorfológica y geopedológica

Este apartado comprende la revisión, análisis y evaluación de la información secundaria referencial sobre el levantamiento geomorfológico – geológico y geopedológico, realizados en la microcuenca Río Churute y sus alrededores, con la finalidad de analizar sus características y establecer la compatibilidad con las especificaciones técnicas aplicables a los propósitos de este estudio.

La metodología detallada brevemente a continuación, adopta un enfoque geomorfológico y geopedológico (Rossiter, 2000), que comprende las siguientes perspectivas: Unidades Ambientales, Unidades Morfológicas, Tipo de roca o depósito superficial y Caracterización de los suelos a nivel de subgrupo taxonómico (Soil Survey Staff, 2006).

- i) Como primer paso, es indispensable identificar las Unidades Ambientales, catalogadas como áreas homogéneas por sus propiedades físicas, bióticas y su relación con procesos ecológicos.

- ii) De acuerdo al nivel de detalle de los estudios, las Unidades Morfológicas son delimitadas dentro de cada Unidad Ambiental y caracterizada por su origen o génesis, morfología, morfometría y morfodinámica.
- iii) En cada Unidad Morfológica se identifica el material parental o tipo de roca y/o depósito superficial, dato obtenido de la interpretación fotográfica e información secundaria, siempre corroborada por medio del levantamiento en campo.
- iv) Y generalmente el levantamiento de información en campo es registrado en fichas y según la guía de descripción de suelos (FAO, 2009), así como la clasificación según la taxonomía de suelos (Soil Survey Staff, 2006); corroborando el sitio de la unidad a la que corresponda al perfil modal y verificando los límites de las mismas unidades.

Para el desarrollo del análisis geomorfológico y geopedológico en la zona de estudio, se usa cartas morfopedológicas (escalas 1: 200 000) y hojas geológicas (escala 1: 100 000) como base de información, generadas por el Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE), adscrito al Ministerio de Energía y Recursos Naturales No Renovables. Así como, hojas topográficas (escalas 1: 50 000) y como referencia, el mapa de Paisajes Naturales del Ecuador (escala 1: 100 000) proporcionados por el Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM).

Tabla 3–5. Material como base de información para la microcuenca Río Churute

Escala	Cartas Morfopedológicas
1: 200 000	Guayaquil
	Machala
Código	Hojas Geológicas
CT-NV-A	Guayaquil
CT-NV-C	Naranjal
CT-NV-D	Gualleturo
CT-NV-E	Tenguel
Código	Cartas Topográficas
NV-C1	Río Guayas
NV-E2	Naranjal
NV-A4	Pedro J. Montero (Taura)
NV-C2	Laguna de Canclon (Churute)
NV-D3	Pancho Negro

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de: Instituto de Investigación Geológico y Energético (IIGE) e Instituto Geográfico Militar del Ecuador (IGM).

3.1.3.1. Unidad genética, morfología y morfometría

La unidad genética refiere al proceso responsable de la creación de las formas de relieve; por ejemplo, en la extensión del cantón Naranjal se encuentran: Denudativo (Den), Depositional o acumulativo (Dep), Depositional erosivo (DepE), Estructural (Est), Tectónico marino (TecM), Marino y Fluvio Marino (MFI), Tectónico erosivo (Tec), Volcánico (Vol) y Glaciar (Glc) (CODIGEM, 1999).

En cuanto a la morfología describe los aspectos cuantitativos y cualitativos de las formas de relieve, definiendo el tipo a través de un nombre representativo, en base al análisis de las características de la Unidad Ambiental; por ejemplo, en el cantón Naranjal se encuentran las siguientes: Valle fluvial (Va), Valle indiferenciado (Vi), Terraza baja y cauce actual (Tb), Terraza media (Tm), Terraza alta (Ta), Terraza indiferenciada (Ti), Superficie de cono de deyección reciente (Cy), Superficie de cono de deyección antiguo (Cds), Abrupto de cono de deyección antiguo (Cda), Superficie de cono de esparcimiento (Ces), Nivel plano (Nb), Nivel ondulado con presencia de agua (Na), Nivel ligeramente ondulado (No), Dique o banco aluvial (D), Meandro abandonado (M), Superficie poco disectada (L1), Superficie disectada (L2), Superficie muy disectada (L3), Depresión de decantación (Dc), Coluvión reciente (Cr), Coluvión antiguo (Can) y Coluvión aluvial reciente (Cv) (Duque, 2000).

La morfometría corresponde al análisis cuantitativo del relieve, considerando los aspectos medibles de lo descrito en la morfología: pendiente, desnivel relativo, longitud de la vertiente y variables geológicas como el tipo de drenaje y densidad del drenaje.

A continuación, en la Tabla 3-6 se especifica las unidades geomorfológicas existentes en la microcuenca Río Churute en base a su unidad genética.

Tabla 3–6. Geomorfología en la zona de estudio

Formación Geológica o Depósitos Superficiales	Forma del Relieve			
	Genética	Morfología	Morfometría	Símbolo
Unidad Ambiental: Piedemonte Andino				
Depósitos Coluvio Aluviales	Deposicional o Acumulativo	Superficie de cono de esparcimiento o disectado	Pendiente: 2-25% Desnivel: 5-15m	Cesd
		Superficie de cono de esparcimiento	Pendiente: 0-25% Desnivel: 0-15m	Ces
Unidad Ambiental: Llanura Aluvial Reciente				
Formación Macuchi	Tectónico erosivo	Cerro testigo	Pendiente: 25-70% Desnivel: 50-200m	Ct
Depósitos Aluviales	Deposicional o Acumulativo	Nivel ligeramente ondulado	Pendiente: 0-12% Desnivel: 0-5m	No
		Nivel ondulado con presencia de agua	Pendiente: 0-5% Desnivel: 0-5m	Na
		Nivel plano	Pendiente: 0-5% Desnivel: 0-5m	Nb

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de CODIGEM (1999)

a) Unidad Ambiental: Piedemonte Andino

a.1) Depósitos Coluvio Aluviales

Superficie de cono de esparcimiento disectado (Cesd): Unidad geomorfológica constituida por limos, arenas y clastos; de cima redondeada en algunos casos. Presenta una pendiente que va desde muy suave hasta media (2 a 25%), con un desnivel relativo que no excede los 15 metros y una longitud de vertiente menor a 15 metros.

Superficie de cono de esparcimiento (Ces): Unidad geomorfológica localizada en las bases del Piedemonte Andino a considerables distancias del relieve, razón por la que forma extensas zonas con pendientes muy suaves y en algunos casos con pendientes planas (0 a 25%) y un desnivel relativo que no excede de los 15 metros.

b) Unidad Ambiental: Llanura Aluvial Reciente

b.1) Formación Macuchi (K_M)

Cerro testigo (Ct): Localizado al norte del cantón Naranjal, parroquia Taura; geoforma caracterizada por presentar relieves tipo residual y de carácter aislado, determinado como resultado de los procesos erosivos de relieves primarios, litológicamente formado por andesita basáltica gris verdoso, con vetillas de cuarzo y sulfuros. Presenta una pendiente que fluctúa del 25 a 70% y un desnivel relativo que no excede de los 200 metros.

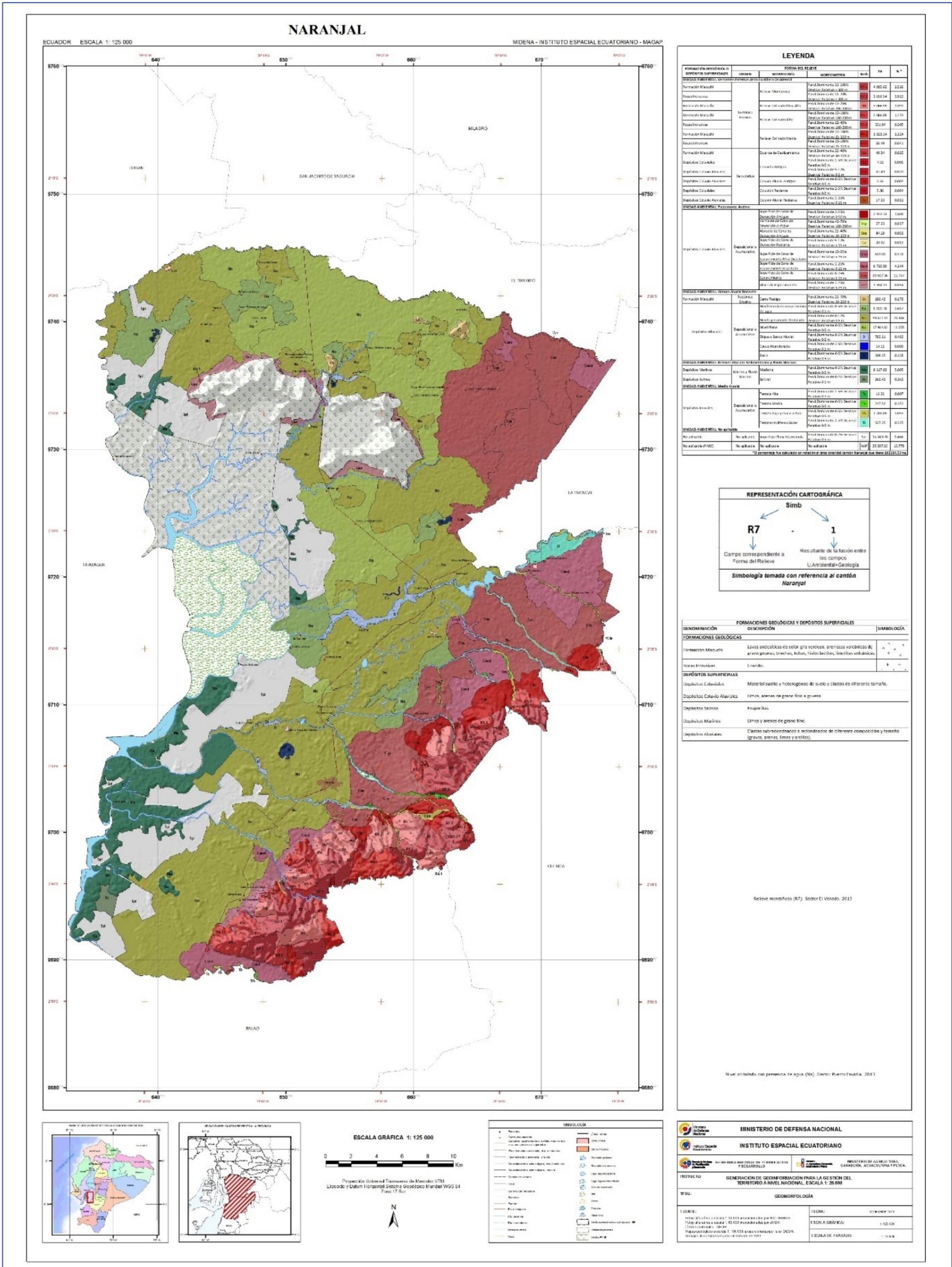
b.2) Depósitos Aluviales

Nivel ligeramente ondulado (No): Geoformas constituidas por extensiones casi planas a ligeramente onduladas asociada a la Unidad Ambiental Llanura Aluvial Reciente, litológicamente formados por arenas y limos marrón. Con pendientes que no sobrepasan el 12% y desniveles relativos que obedecen un rango de cinco metros.

Nivel ondulado con agua (Na): Dentro de la Unidad Llanura Aluvial Reciente, litológicamente constituidos por arcillas, limos y arenas, en la actualidad en estas superficies se desarrollan grandes extensiones de cultivos de caña de azúcar, plantaciones de banano y cacao. Con pendientes del orden del 5% como máximo y un desnivel relativo que no excede de los 5 metros.

Nivel plano (Nb): Geoformas característicos de la Unidad Ambiental Llanura Aluvial Reciente, con un desnivel relativo rigurosamente plano que no sobrepasa los cinco metros, razón por la cual sus extensiones de terreno son propensas a inundarse en épocas lluviosas. En la Figura 3-7, se detalla las formaciones geológicas y depósitos superficiales en el territorio del cantón Naranjal.

Figura 3-7. Mapa Geomorfológico del cantón Naranjal



Fuente: MEDINA – Instituto Espacial Ecuatoriano – MAGAP (2013)

3.1.3.2. Unidad ambiental

Ligada a la presencia de ciertas formas de relieve y reconocida como un área homogénea por sus características físicas, bióticas y su relación con procesos ecológicos, se lleva a cabo la interrelación y articulación de los elementos: relieve, vegetación, tipo de roca, suelos y uso del suelo. Y considerando al paisaje como el resultado de las combinaciones dinámicas de elementos físicos, biológicos y antropológicos, haciendo del paisaje como un cuerpo único, indisociable y en perpetua evolución (Winkell, 1997).

La unidad ambiental de la microcuenca Río Churute, se considera a partir de los factores morfológicos, morfométricos, a su génesis y litología, así como los factores externos modeladores como el clima y la vegetación.

El Piedemonte Andino, como Unidad Ambiental de la zona de estudio, por su relieve, suelo y clima; es considerada como una unidad de gran potencial de desarrollo; forma una franja longitudinal bajo las vertientes de la Cordillera de los Andes, construida por abanicos aluviales de diferente edad. Presenta conos de deyección o esparcimiento recientes, de topografía plana u ondulada, que podrían ser afectados por crecientes torrenciales. Esta Unidad Ambiental es la segunda en extensión, cubriendo una superficie de 32.470 hectáreas, que representa el 20% del área total ubicado al noreste y sureste de la parroquia Taura. Las principales características de esta Unidad Ambiental se detallan en la Tabla 3-7.

Tabla 3–7. Principales características Unidad Ambiental Piedemonte Andino

Ecología	Arboricultura con cacao, café y pastos
Formas de relieve	Superficie de cono de deyección reciente Superficie de cono de deyección antiguo Superficie de cono de deyección antiguo Superficie de cono de esparcimiento Superficie de cono de esparcimiento disectado
Geología	Depósito coluvio aluviales
Edafología	Anfisoles, suelos arcillosos duros a muy duros, con textura superficial, de francos a francos – arcillosos con drenaje moderado.
Cobertura natural	Arbórea y arbustiva
Uso actual de las tierras	Agropecuaria y ganadero
Infraestructura vial y poblacional	La vía principal conduce hasta la unidad ambiental, atraviesa Jaime Roldós, Las Mercedes, Santa Cruz, Jesús María, San Carlos, así como sus vías de segundo y tercer orden.
Peligros naturales	Erosión hídrica

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Núñez del Arco (2003)

Otra Unidad Ambiental que abarca la microcuenca Río Churute es la Llanura Aluvial Reciente, que corresponde a una extensa sección geográfica prácticamente plana o ligeramente ondulada, con geoformas como el nivel plano, niveles ondulados, bancos, basin y meandros; desarrollados en altitudes menores a los 20 metros, pero que en su mayoría no superan los cinco metros. Esta unidad está localizada al noreste de la parroquia Taura, que en su totalidad abarca 64.666,8 hectáreas, equivalente al 40% de la superficie total. Entre las principales características se detalla en la Tabla 3-8.

Tabla 3–8. Principales características Unidad Ambiental Llanura Aluvial Reciente

Ecología	Bosques de tierras bajas de la costa
Formas de relieve	Niveles ligeramente ondulados con presencia de agua. Niveles planos, bancos aluviales o diques y basin
Geología	Depósito coluvio aluviales Depósitos aluviales
Edafología	Suelos franco arcilloso arenoso en la superficie y arcillosos en la profundidad, presentan buen drenaje con pH medianamente ácido y fertilidad media
Cobertura natural	Vegetación herbácea húmeda medianamente alterada
Uso actual de las tierras	Plantaciones de banano, cacao, caña y arroz
Infraestructura vial y poblacional	Vías de primer y segundo orden. Con su vía principal Autopista Durán – Boliche. Con sus poblados principales: Taura, Mirador, Las Mercedes, Villa Nueva y Naranjal.
Peligros naturales	Erosión hídrica e inundaciones ocasionales en estaciones lluviosas

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Núñez del Arco (2003)

3.1.3.3. Formación geológica, tipo de roca y depósitos superficiales

Las formaciones geológicas que afloran en la zona de la microcuenca Río Churute son:

Formación Macuchi (K_M): Asociado a relieves colinado medio, alto y muy alto; con pendientes de media a fuertes. Litológicamente está compuesta por andesita basáltica gris verdoso, brechas volcánicas, con vetillas de cuarzo o sulfuros.

Depósitos Coluvio Aluviales (Q_3): De edad cuaternaria, compuesto por material heterogéneo como limos, arenas y clastos; que se depositan en extensas superficies de Piedemonte Andino cubriendo gran parte del cantón Naranjal, parroquia Taura.

Depósitos Aluviales (Q_1): De igual manera, constituyen depósitos de edad cuaternaria que comprenden material de desbordamiento de ríos como arena media y fina, de

tonalidades generalmente grises oscuras; localizado mayoritariamente en la Unidad Ambiental Aluvial Reciente al Sur y Noreste de la parroquia Taura.

3.1.3.4. Taxonomía de los suelos

La microcuenca Río Churute, está ubicada en la llanura aluvial, al pie de la vertiente occidental de la Cordillera Andina, al Sureste de la Demarcación Hídrica del Guayas, sector caracterizado por presentar clima tropical seco, donde predominan los depósitos aluviales de arcillas, limos, arenas, gravas y cantos rodados. Los subgrupos taxonómicos de suelos se encuentran dentro del régimen del suelo Isohipertérmico, a temperaturas mayores a los 22°C entre los 50 y 100 metros de profundidad, durante el año con leves variaciones.

Según (INIAP, 2000) en la zona de estudio, los subgrupos taxonómicos pertenecen a órdenes de suelos clasificados como:

- **Inceptisoles:** Suelos caracterizados por tener un incipiente desarrollo pedogenético, formando horizontes de alteración física y transformaciones químicas, como es el caso del horizonte de diagnóstico B cámbico.
- **Entisoles:** Suelos jóvenes o de escaso desarrollo pedogenético, sin horizontes B, y con presencia de material volcánico.
- **Vertisoles:** Suelos caracterizados por presentar grietas, caras de deslizamiento y alto contenido de arcilla 2:1 montmorillonítica.
- **Molisoles:** Suelos caracterizados por presentar un epipedón ócrico eluvial sobre un horizonte argílico, en este horizonte se observan cutanes (revestimientos de arcilla en poros).

Dentro de las Unidades Ambientales presentes en la microcuenca Río Churute, según la clasificación taxonómica de suelos, se tiene la siguiente descripción como detalla la Tabla 3-9.

Tabla 3–9. Clasificación taxonómica de los suelos en la zona de estudio

Subgrupo	Clave	Orden
Unidad Ambiental: Piedemonte Andino		
Entic Hapludolls	IHFQ	Molisoles
Unidad Ambiental: Llanura Aluvial Reciente		
Lithic Ustorthents	LEEB	Entisoles
Vertic Haplustepts	KEDE	Inceptisoles
Mollic Ustifluvents	LDDI	Entisoles
Udic Haplustepts	KEDV	Inceptisoles
Typic Haplusterts	FEEP	Vertisoles

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de INIAP (2009)

a) Unidad Ambiental: Piedemonte Andino

a.1) Depósitos Coluvio Aluviales

Entic Hapludolls (IHFQ): Corresponden al orden de los Molisoles, caracterizados por tener un epipedón de color negro, ricos en materia orgánica, con estructura y consistencia favorables al desarrollo radicular. Estos suelos se encuentran en el relieve de superficie de cono de esparcimiento con pendientes hasta un 5%, es decir, relieves casi planos a planos.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [Ap/A/AC] con profundidades en el rango de 20 a 50 centímetros, con buen drenaje, por la fácil eliminación del agua de precipitación, aunque a velocidades bajas. Caracterizado por un horizonte superficial [Ap], con un espesor de 20 centímetros, de estructura de tipo bloques subangulares finos de grado fuerte, de textura franca y color pardo. Subyace un horizonte [A] de 10 centímetros de espesor, con estructura de tipo bloques subangulares medios de grado moderado, de textura franca y color pardo. Seguido se encuentra un horizonte transicional [AC] con 15 centímetros de espesor, estructura tipo desmenuzable, textura arena francosa y de color pardo grisáceo oscuro.

Según resultados de laboratorio, datan como suelos de reacción neutra en la superficie (pH:7), con niveles medios de materia orgánica en la superficie (1,07% que es un rango característico de la costa ecuatoriana), con una capacidad media de intercambio (16 meq/100g) y con una saturación de bases alta (73,37%). Según los datos expuestos, se deduce como un tipo de suelo con un nivel de fertilidad natural alta, caracterizada por una óptima disponibilidad de nutrientes.

b) Unidad Ambiental: Llanura Aluvial Reciente**b.1) Formación Macuchi (K_M)**

Lithic Ustorthents (LEEB): Suelos que corresponden al orden de los Entisoles, caracterizados por tener ninguna o muy poca evidencia de formación de horizontes pedogenético, debido a desarrollarse en un periodo de tiempo muy corto. Suelos ubicados en la forma de relieve denominado cerro testigo, con pendientes en el rango del 25 al 70%.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [A/C] con profundidades de hasta 20 centímetros, con drenaje moderado, presentado texturas franco arcillosas tanto en la superficie como en la profundidad, con presencia de roca a 40 centímetros. Según resultados de laboratorio, químicamente son suelos de reacción neutra en la superficie y en la profundidad (pH: 7 - 8), con niveles bajos de materia orgánica (menores al 1%), con una capacidad de intercambio catiónico (10 a 20 meq/100g) y con una saturación de bases (menores al 50%). Según los datos expuestos, se deduce un tipo de suelo con un nivel de fertilidad natural mediana pero caracterizado por una buena disponibilidad de nutrientes.

b.2) Depósitos Aluviales

Vertic Haplustepts (KEDE): Suelos que corresponden al orden de los Inceptisoles, caracterizados por poseer un incipiente desarrollo pedogenético, provocando la formación de horizontes alterados; a este nivel de subgrupo se les caracteriza por presentar grietas en la superficie que llegan hasta los 30 centímetros de profundidad. Suelos ubicados en la forma de relieve denominado nivel plano, con pendientes que no superan el 2%.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [Ap/Ass/Bw/AC] con profundidades en el rango de 20 a 50 centímetros, con drenaje moderado. Caracterizado por un horizonte superficial [Ap], con un espesor de 12 centímetros, de estructura granular y de tipo bloques subangulares de tamaño grueso y grado fuerte, de textura arcillosa y color pardo fuerte. Subyace un horizonte [Ass] de 28 centímetros de espesor, presenta moteados de tamaño fino, de textura arcillosa sin estructura y color negro. Seguido un horizonte cámbico [Bw] con 20 centímetros de espesor, con estructura masiva a bloques angulares de tamaño grueso y grado débil, textura arcillosa y de color pardo grisáceo oscuro; en la profundidad yace un horizonte [C] de 20 centímetros de espesor, sin estructura, de textura arcillo arenosa y de color pardo amarillento oscuro.

Según resultados de laboratorio, químicamente son suelos de reacción neutra en la superficie y en la profundidad (pH: 6,7 - 7), con niveles altos de materia orgánica (3,5%

que es un rango característico de la costa ecuatoriana), con una capacidad de intercambio catiónico (35 meq/100g) y con una saturación de bases alta (78,73%). Según los datos expuestos, se deduce un tipo de suelo con un nivel de fertilidad natural alta.

Mollic Ustifluvents (LDDI): Suelos que corresponden al orden de los Entisoles, que tienen muy poca o ninguna evidencia de formación o desarrollo de horizontes pedogenéticos por experimentar tiempos de desarrollo muy cortos. Situados en formas de relieve ligeramente ondulado, con pendientes del 0 al 2%.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [Ap/C] con profundidades en el rango de 20 a 100 centímetros, bien drenado ya que existe una fácil eliminación de agua de precipitación. Caracterizado por un horizonte superficial [Ap] de 15 centímetros de espesor, de estructura de tipo bloques subangulares medios y de grado moderado, de textura franco arenosa y color pardo grisáceo muy oscuro. Subyace un horizonte [C] de 89 centímetros de espesor, con estructura de tipo grano simple, de textura arenosa y color pardo oliva claro.

Según resultados de laboratorio, datan como suelos de reacción ligeramente ácida en la superficie (pH:6,5), con niveles altos de materia orgánica (3,50% que es un rango característico de la costa ecuatoriana) en la superficie luego decreciendo en porcentaje hacia el interior, con una capacidad media de intercambio (15,9 meq/100g), y con una saturación de bases alta (87%). Según los datos expuestos, se deduce un tipo de suelo con un nivel de fertilidad natural alta y por la alta disponibilidad de nutrientes, son suelos con buenas características tanto físicas como químicas para actividades agrícolas.

Udic Haplustepts (KEDV): Estos suelos corresponden al orden de los Inceptisoles, caracterizados por poseer un incipiente desarrollo pedogenético, dando lugar a la formación de horizontes alterados. Situados en tipos de relieve ligeramente ondulados, con pendientes que van desde 2 al 5%.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [Ap/A/Bw] con profundidades en el rango de 20 a 50 centímetros, con buen drenaje pues presenta una buena eliminación de agua de precipitación, aunque a velocidades medias. Caracterizado por un horizonte superficial [Ap], con un espesor de cinco centímetros, de estructura de tipo bloques subangulares medios y grado moderado, de textura franca y color pardo fuerte. Subyace un horizonte [A] de 35 centímetros de espesor, presenta estructura de tipo bloques subangulares medios y de grado moderado, de textura franca y color pardo grisáceo oscuro. Seguido de un horizonte cámbico [Bw] con 18 centímetros de espesor, con estructura de tipo bloques subangulares de tamaño medio y grado débil, textura franca y de color gris oscuro.

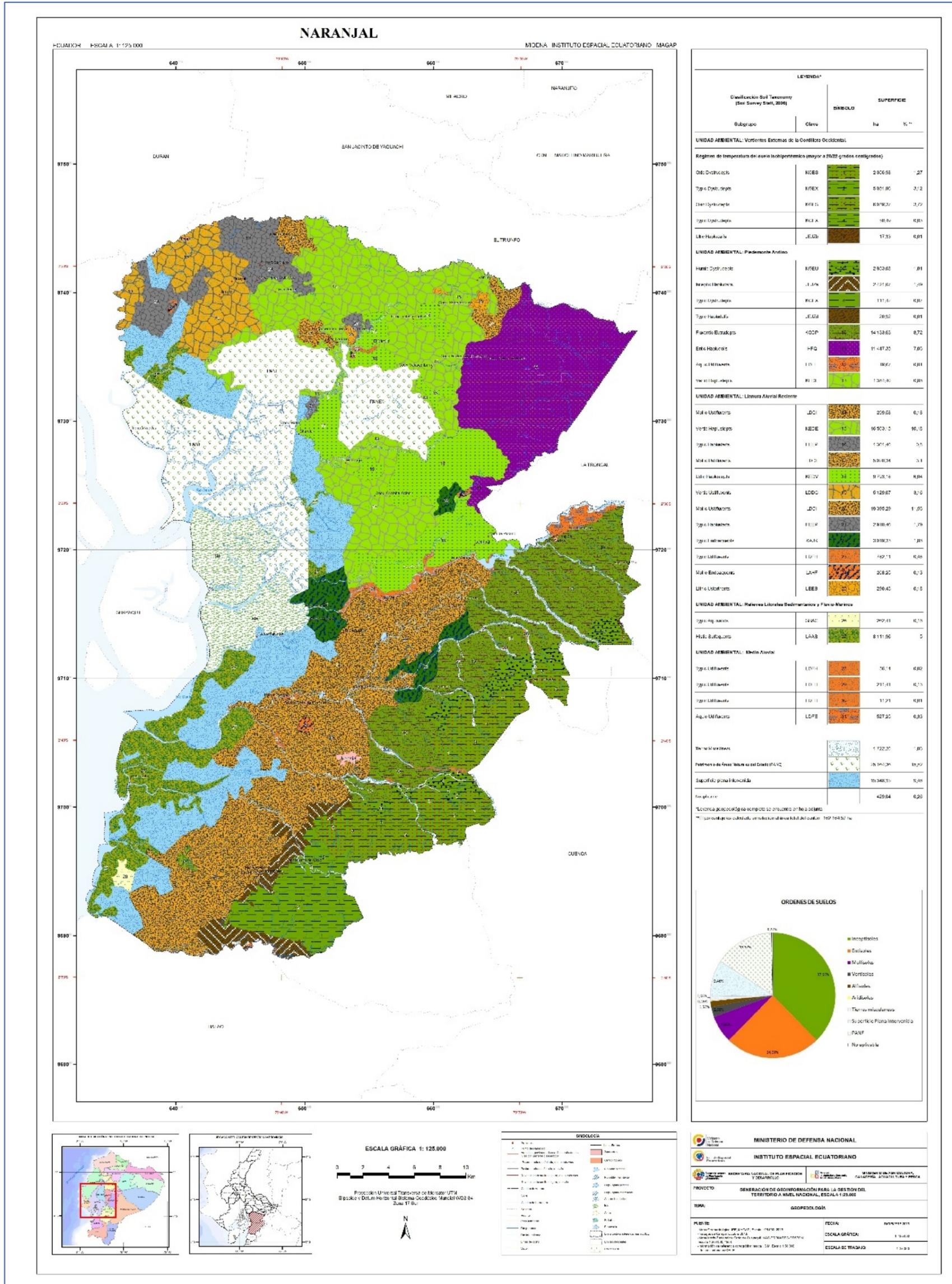
Según resultados de laboratorio, químicamente son suelos de reacción ligeramente ácida en la superficie (pH: 6,5), con niveles medios de materia orgánica en la superficie (1,50% que es un rango característico de la costa ecuatoriana), con una capacidad de intercambio catiónico (16 meq/100g), y con una saturación de bases alta (74,50%). Según los datos expuestos, se deduce un tipo de suelo con un nivel de fertilidad natural alta.

Typic Haplusterts (FEEP): Estos suelos corresponden al orden de los Vertisoles, caracterizados por presentar caras de deslizamiento, grietas y un alto contenido de arcilla 2:1 montmorillonítica. Situados en relieve ondulados con presencia de agua, con pendientes que van desde 0 al 5%.

Su morfología presenta un perfil edáfico del tipo [A/B/C] moderadamente profundo, de textura franco arcillosa tanto en la superficie como en la profundidad y presenta bajas propiedades de drenaje. Según resultados de laboratorio, químicamente son suelos de reacción ligeramente alcalina en la superficie, de bajo contenido de materia orgánica para un rango referencial de la región costa. La capacidad de intercambio catiónico y la saturación de sus bases son altas; deduciendo un nivel de fertilidad natural baja.

En la Figura 3-8, se detalla la taxonomía de los suelos en el territorio del cantón Naranjal.

Figura 3-8. Mapa Geopedológico del cantón Naranjal



Fuente: MEDINA – Instituto Espacial Ecuatoriano – MAGAP (2013)

3.2. Etapa 2: Exploración geofísica

3.2.1. Análisis preliminar

En primera instancia, se realizó el análisis preliminar del área de estudio, como se detalla en la sección antes descrita (Etapa 1), con la finalidad de ubicar las áreas para el levantamiento de los sondeos eléctricos verticales (SEV) a partir de la información disponible sobre: ortografía de la parroquia Taura; cartografía geológica, geopedológica y estructural del área de estudio; estructura vial y condiciones de acceso; sectores de mayor interés para la explotación de agua para riego y usos complementarios. De acuerdo a la información levantada, la localización de los sondeos eléctricos verticales, sobre las formaciones geológicas presentes, fue determinada considerando los siguientes criterios:

³⁵/₁₇ Los sondeos eléctricos verticales ubicados sobre los Depósitos Acumulativos y Terrazas Aluviales (predominantes en la zona de estudio), permitirán estimar el espesor y las condiciones hidrogeológicas de la formación geológica, además de identificar y evaluar las condiciones hidrogeológicas de las unidades litoestratigráficas que se encuentran cubiertas por estos depósitos.

³⁵/₁₇ Luego, los sondeos eléctricos verticales distribuidos sobre la zona de la formación con mayor potencial hidrogeológico, como en los niveles planos de los Depósitos Aluviales, permitirá reconocer los cuerpos y estructuras o estratos permeables que facilite la acumulación y transmisión de agua subterránea, así como sus espesores y profundidades.

Adicionalmente, se prevé que las áreas seleccionadas para la ejecución de los sondeos eléctricos verticales, cuenten con vías de fácil acceso y que las condiciones del terreno, así como las condiciones climatológicas faciliten las tareas de la campaña de campo.

3.2.2. Operación de campo para la ejecución de los Sondeos Eléctricos Verticales (SEV)

Una vez que, tentativamente se determinó la ubicación de los sondeos eléctricos verticales, se realizó en campo un reconocimiento del área de estudio, estableciendo la distribución final de los mismos de acuerdo a los objetivos del proyecto y a las condiciones del terreno. Se realizó una campaña de levantamiento de datos geofísicos el día viernes 16 de junio, realizando en total tres sondeos eléctricos verticales (SEV), los cuales se realizaron mediante el uso del dispositivo electrónico Schlumberger, donde la distancia de los electrodos de potencial [MN] se mantienen constante, siempre y cuando la distancia entre los electrodos de corriente [AB] varíe.

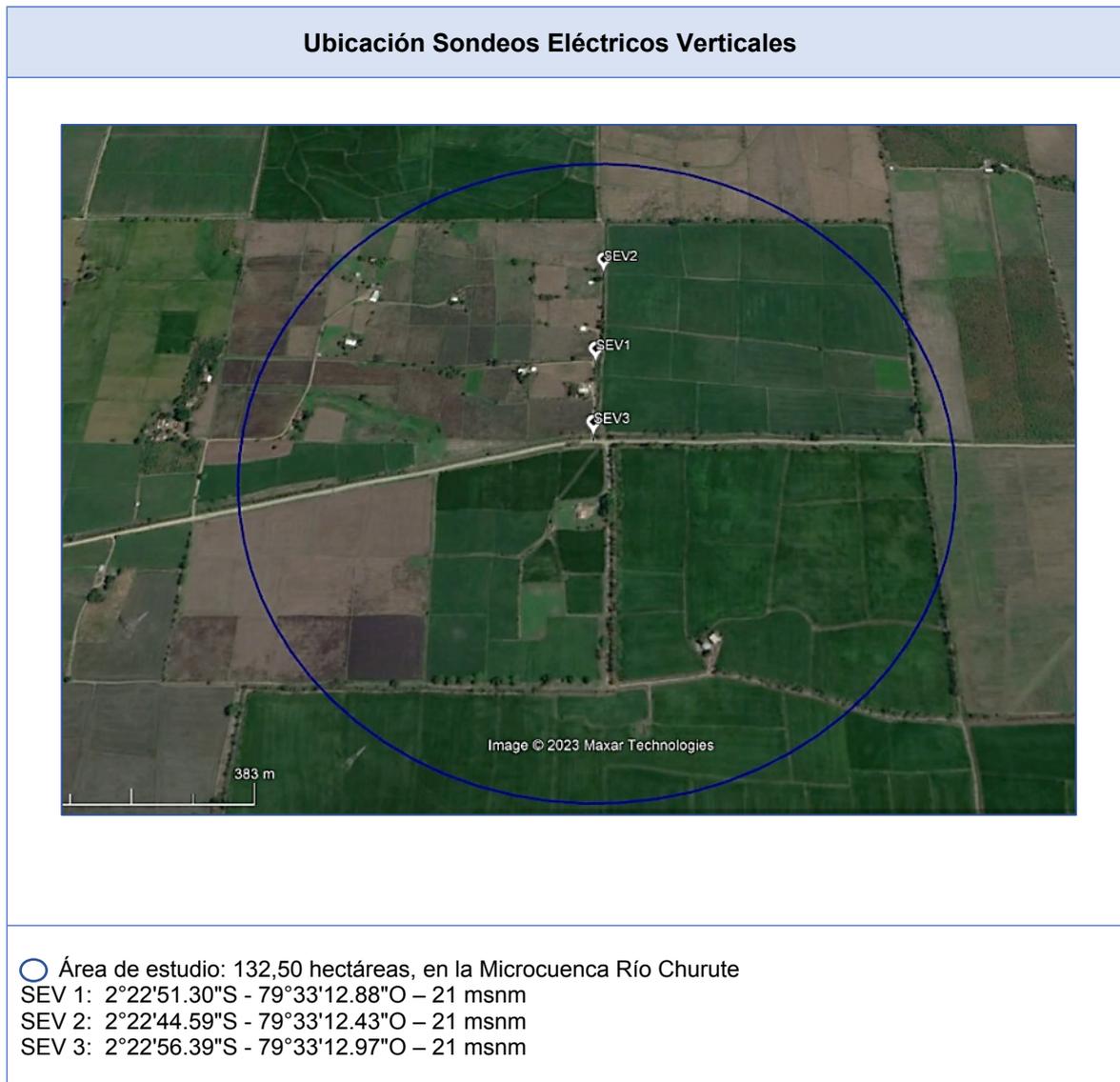
La adquisición de datos geofísicos se la realizó mediante un Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000, como se detalla en la Tabla 3-10; realizando los tres SEVs en el sitio, con una abertura máxima [AB] de 300 metros.

Tabla 3–10. Equipo utilizado en la campaña de prospección geoelectrica

Resistivímetro Terrameter ABEM SAS 1000
<p>(a) Terrameter SAS 4000, (b) selector de electodos ES10-64C y (b1 y b2) conectores de cable, (c) carretes de cable y (c1) conectores entre cables, (d) electodos de acero, (e) conectores cable-electrodo y (f) suministro de batería.</p>

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado del Manual de instrucciones ABEM (2018)

Tabla 3–11. Ubicación de los Sondeos Eléctricos Verticales en el área de estudio



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado Google Earth Pro 2023

Tabla 3–12. Registro fotográfico realización Sondeos Eléctricos Verticales



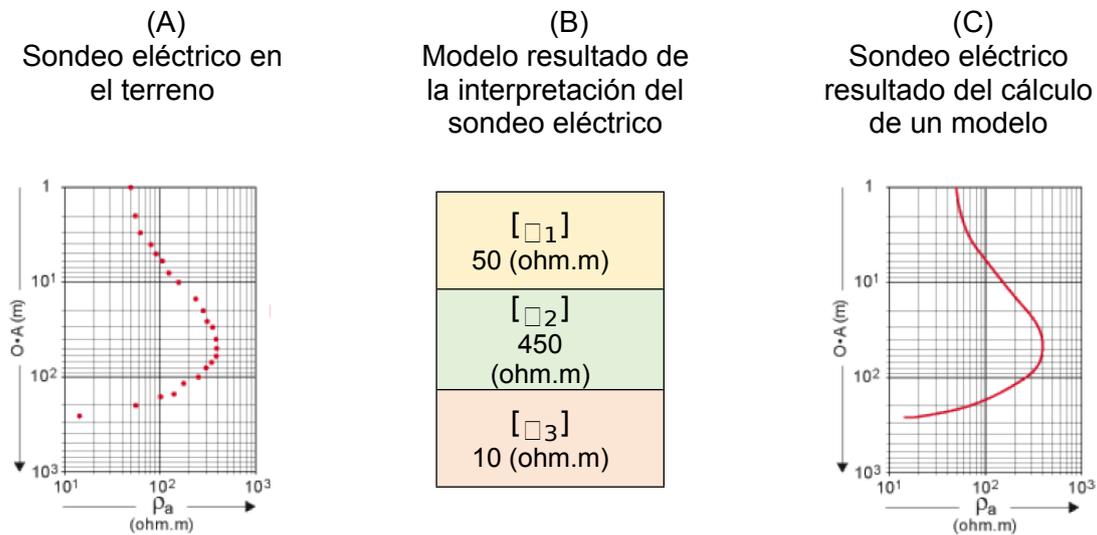
Fuente: Elaborado por la autora

3.2.3. Análisis y procesamiento de la información

Los perfiles del Modelo [1D] de resistividad eléctrica, fueron generados a partir del procesamiento de los datos levantados en las campañas de prospección geoelectrica en campo, mediante la teoría del problema inverso, que permite determinar el comportamiento del potencial eléctrico en un terreno natural, asumiendo que sus capas de estratos están limitadas por superficies más o menos planas y paralelas a la superficie de dicho terreno. El proceso de inversión se genera a partir de la curva de resistividad aparente, siendo un modelo que considera capas homogéneas e isotrópicas, con espesores de capas [h] y resistividad [ρ], esperando pueda ser considerado como una solución válida de los datos experimentales, de manera que el modelo teórico sea similar a las observaciones de campo, como se muestra en la Figura 3-9, donde se visualiza la comparación entre una curva calculada y una curva con los datos geoelectricos obtenidos en las campañas de

trabajo de campo, la coincidencia de las curvas A y C indica una interpretación y correlación óptima.

Figura 3-9. Proceso de inversión de datos de resistividad geoelectrica



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de SYSCOL CONSULTORES S.A.S (2017)

El criterio de convergencia del proceso de análisis de datos, está relacionado con el error cuadrático medio (RMS), que es determinado entre los datos experimentales (datos de campo) y la respuesta del modelo deducido. Cuando el valor fijado resulte menor al 10%, se considera que el valor entre los datos y los resultados es satisfactorio; caso contrario, si el valor resulta menor al 5%, este se define como un ajuste óptimo.

Para la obtención de los perfiles [1D] de resistividad eléctrica, a partir de las curvas de resistividad aparente levantadas en las campañas de trabajo de campo, se consideró un software de inversión (IPI2win), este es utilizado para el procesamiento de los datos geoelectricos.

3.3. Etapa 3: Pozo exploratorio

3.3.1. Propuesta de los puntos de perforación

Para determinar el sitio para la perforación exploratoria, se consideró los resultados obtenidos de la evaluación hidrogeológica realizada a partir de información secundaria y de prospección geofísica llevada a cabo por medio de sondeos eléctricos verticales (SEV); posteriormente se establece la disponibilidad de los predios involucrados para la ejecución de la perforación exploratoria, como se detalla en la Tabla 3-13.

Tabla 3–13. Propuesta ubicación pozo exploratorio MCH-01

Ubicación pozo exploratorio MCH-01				
Denominación	Latitud	Longitud	Altitud (m)	Profundidad (m)
Pozo exploratorio MCH-01	2°22'51.03"S	79°33'12.89"O	21	30

Fuente: Elaborado por la autora

3.3.2. Diseño preliminar del pozo exploratorio MCH-01

El diseño técnico preliminar de acuerdo a los estudios realizados en la zona de intervención, con fines de captación, exploración y abastecimiento de agua para riego y usos complementarios se expone en la Tabla 3-14.

Tabla 3–14. Diseño técnico preliminar pozo exploratorio MCH-01

Pozo exploratorio MCH-01	
Caudal de explotación estimado	1 – 1,67 (l/s)
Profundidad proyectada	30 (m)
Diámetro de perforación	9 (pulgadas)
Diámetro habilitado	6 (pulgadas)
Longitud de tubería ciega	12 (m) – 1,0 Mpa
Longitud de tubería filtrante	18 (m) – 1,25 Mpa

Fuente: Elaborado por la autora

La posición exacta de la tubería, es considerada según las características de los materiales extraídos de los diferentes extractos atravesados durante la perforación, el detalle de la estratigrafía litológica encontrada en la formación de interés, se detalla en la sección de Resultados. De igual manera, para la construcción del pozo de exploración MCH-01 y el diseño como obra de captación de agua para riego y usos complementarios, se considera los resultados de las pruebas hidráulicas realizadas, en dos pozos existentes en el recinto Miranda Girón II (denominados RM-01 y RM-02), detalles que se muestran en la Tabla 3-15.

Tabla 3–15. Resumen de las pruebas hidráulicas realizadas en pozos existentes en el recinto Miranda Girón 2 ubicados en la zona de estudio

Parámetros	Pozo RM-01	RM-02
Ubicación	2°22'48.33"S	2°22'52.71"S
	79°33'13.92"O	79°33'13.75"O
Cota	21 (msnm)	21 (msnm)
Cota piezométrica	19,20 (msnm)	19,20 (msnm)
Nivel Estático [NE]	1,8 (m)	1,8 (m)
Transmisividad [T]	50 a 150 (m ² /día)	50 a 150 (m ² /día)
Coefficiente de almacenamiento [S]	< a 10 ⁻⁵	< a 10 ⁻⁵
Caudal [Q]	1,5 (l/s)	1,47 (l/s)

Fuente: Elaborado por la autora

3.3.3. Perforación del pozo exploratorio MCH-01

La perforación exploratoria para el pozo MCH-01, se realizó con maquinaria PITMAN POLECAT MONTADO EN 1982 FORD LNT8000. Se inició la perforación a partir de la adecuación del lugar y la construcción de una pileta con su respectivo canal para el manejo de lodos, como se muestra en las fotografías de la Tabla 3-16.

Tabla 3–16. Fotografías adecuación del sitio - perforación pozo exploratorio MCH-01



Fuente: Elaborado por la autora

Se perforó a partir de las respectivas adecuaciones en el lugar, el día 16, 17 y 19 de junio, con el método de perforación rotacional con circulación directa de lodo natural. Con la finalidad de lograr una perforación de 30 metros de profundidad, con varillas y tricono de nueve pulgadas de diámetro en toda su longitud.

En principio, para realizar cualquier trabajo de perforación por el método rotacional con inyección y circulación directa de lodo, es necesario la construcción de un ante pozo o galería, que sirve como depósito para la circulación del lodo, la decantación del detritus (muestras de los estratos) y el almacenaje del mismo. La finalidad de la circulación del lodo natural durante la perforación, es para lograr suavizar los diferentes estratos que gradualmente se atraviesa con la perforación, de igual manera para lograr la estabilización del terreno y evitar que se desmorone al interior de la perforación tubular. Una vez ubicada y construida la pileta de lodos, se la llena de agua combinada con bentonita; a la vez, se construyen los canales de conexión con el pozo para la circulación de los fluidos y canales de desfogue; es indispensable el uso de bombas de inyección, como muestra en las fotografías de la Tabla 3-17.

Tabla 3-17. Fotografías sistema circulación de lodos - perforación pozo exploratorio MCH-01



Fuente: Elaborado por la autora

Una vez instalado el equipo de bombeo, se procede a colocar las barras de peso (barras drill / collar) y las brocas tricónicas, alineadas perpendicularmente con la superficie. Cada barra de peso tiene aproximadamente seis metros, los cuales serán montados con ayuda de la grúa que vienen incluidas en las maquinas perforadoras, y con el trabajo de los operadores, dichas barras serán empalmadas y alineadas con respecto a la superficie, los detalles se muestran en las fotografías de la Tabla 3-18.

Tabla3-18. Fotografías implementos - perforación pozo exploratorio MCH-01



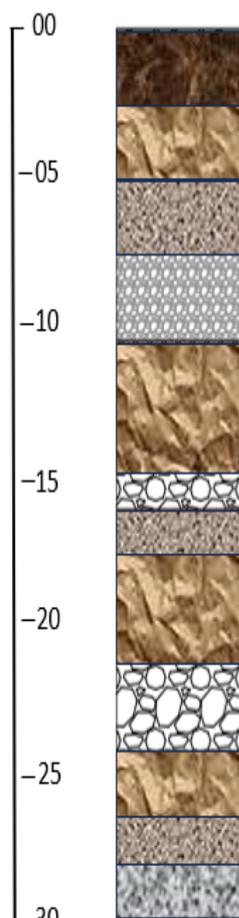
Fuente: Elaborado por la autora

3.3.4. Perfil estratigráfico y registro geofísico

Durante los trabajos de perforación exploratoria, se recolectaron muestras del subsuelo atravesado, que fueron colocadas en envases rotulados; con la finalidad de conocer las características granulométricas del material, muestras que fueron analizadas en el Laboratorio de Suelos, Tejidos Vegetales y Aguas - Estación Experimental del Litoral Sur – “Dr. Enrique Ampuero Pareja” del Instituto Nacional de Investigaciones Agropecuarias – INIAP. El detalle de los resultados del análisis de las diferentes muestras de suelo, se exponen en el Anexo 4. El conocer, el perfil estratigráfico correspondiente al pozo exploratorio MCH-01, tiene la finalidad de identificar qué zonas u horizontes del subsuelo tienen el potencial acuífero con el objetivo de explotación de agua, para este caso, agua

para riego y usos complementarios; y con ello, lograr el diseño definitivo de un pozo para explotación. En la Tabla 3-19, se detalla las fotografías de las muestras obtenidas en la zona de estudio y el plano del perfil litológico.

Tabla3-19. Fotografías muestras detritus y perfil estratigráfico del pozo exploratorio MCH-01

Perfil estratigráfico y muestras del subsuelo		
Pozo exploratorio perforado	Estrato del subsuelo	Descripción
 <p>NE: 1,60 m</p> <p>∅ perforado: 9 m</p>		<p>Clase textural: Franco % Arena: 38 % Limo: 26 % Arcilla: 26</p> <p>Clase textural: Arena-Franca % Arena: 86 % Limo: 6 % Arcilla: 8</p> <p>Clase textural: Franco-Arenoso % Arena: 68 % Limo: 22 % Arcilla: 10</p> <p>Clase textural: Arena-Franca % Arena: 84 % Limo: 10 % Arcilla: 6</p> <p>Clase textural: Arena-Franca % Arena: 82 % Limo: 12 % Arcilla: 6</p> <p>Clase textural: Franco-Arenoso % Arena: 64 % Limo: 22 % Arcilla: 14</p>
		

Fuente: Elaborado por la autora

En lo que corresponde a la campaña de toma del registro geofísico en el pozo exploratorio perforado, se lo realizó el día martes 20 de junio, con la toma de un registro geofísico. A diferencia de los estudios de prospección geofísica realizados antes de la perforación, estos registros tienen la finalidad de medir la resistividad y radioactividad natural de los diferentes horizontes litológicos atravesados por la perforación, mediante el uso de dos electrodos [N] y otro al interior del pozo [M_1], los valores de intensidad [I] y diferencia de potencial [V] utilizados en el cálculo de la resistividad aparente [R_a] fueron tomados en forma simultánea desde un resistivímetro y voltímetro digital, con un intervalo de estudio entre los 1,50 a 30 metros de profundidad.

Con este estudio, se busca precisar los límites de las diferentes capas del subsuelo, y reforzar los resultados de los análisis granulométricos, para definir su litología estratigráfica, determinando los tramos de las columnas filtrantes y su permeabilidad.

Los detalles del equipo utilizado para la toma de los registros geofísicos del pozo exploratorio se presentan en la Tabla 3-20, y los datos obtenidos del registro geofísico en la Tabla 3-21.

Tabla 3-20. Equipo utilizado en la campaña de la toma del registro geofísico del pozo exploratorio MCH-01

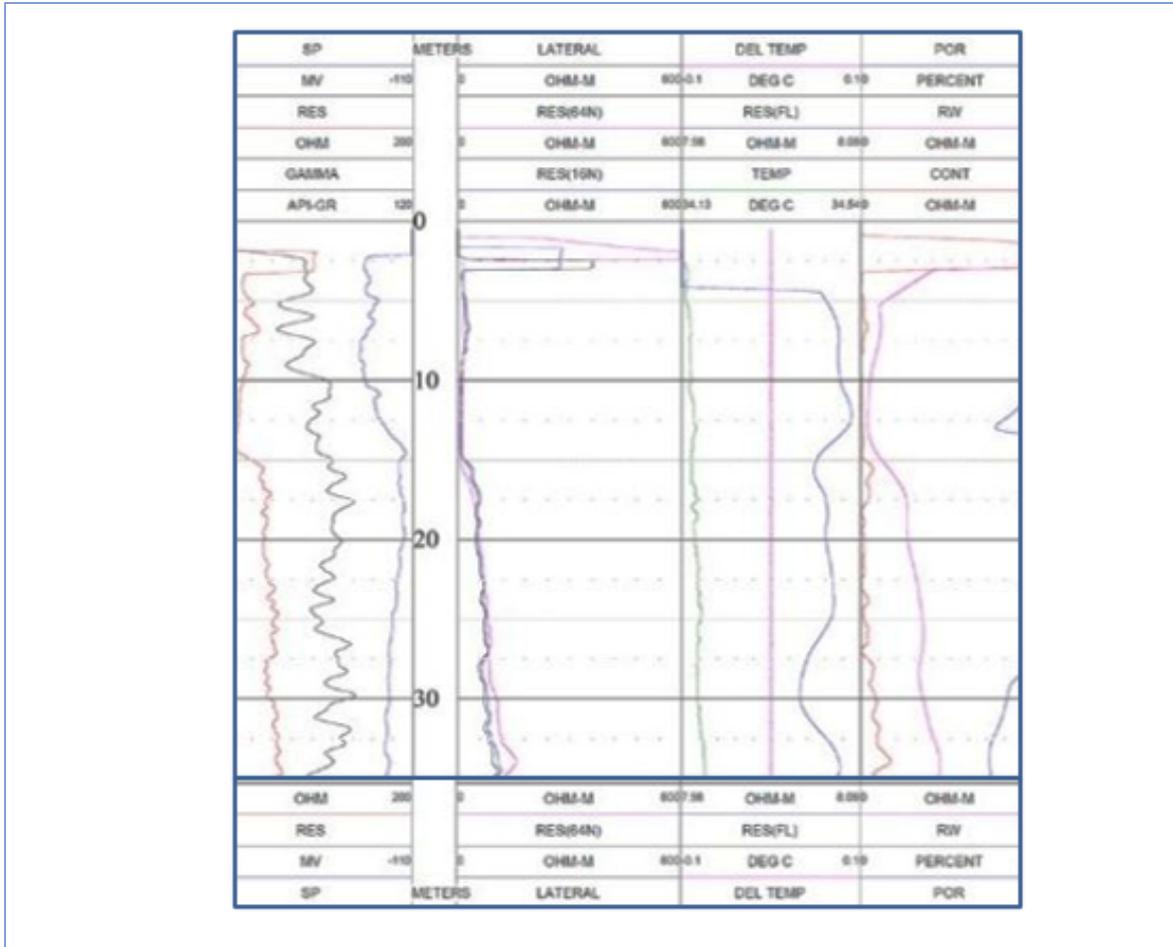


Equipo JGS-1B Well Logging
 Registro integrado digital de yacimientos de carbón
 Ingeniería Hidrológica Registro Integrado Digital
 Registro integrado digital de mineral de metal sólido
 Registro Integrado Digital de Otros Minerales
 Laptop externa (PC de escritorio)
 Para registro ascendente, también para registro descendente
 Recibir señal digital, señal analógica
 8 tomas de corriente de alimentación, Opcional
 Muestreo automático según el intervalo de profundidad, intervalo de muestreo arbitrariamente
 Registro de simulación en interiores, observación de repetibilidad de instrumentos y sondas
 Panel de membrana, atractivo y duradero.

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado del Manual de instrucciones ABEM (2018)

Tabla 3-21. Registro geofísico del pozo exploratorio MCH-01

Registro geofísico del pozo exploratorio MCH-01				
Profundidad (m)	Espesor (m)	Gamma Natural (API)	Litología	Permeabilidad
0,0 a 2,0	2	50 - 70	Suelo franco con arenas y gravilla fina, con presencia de arcilla en estado seco	Menor a la media
2,0 a 3,5	1,50	43 - 69	Suelo franco-arenoso con arenas gruesas a medianas, gravas y cantos rodados medianos y con poca presencia de arcillas en estado seco	Media
3,5 a 15,5	12,0	26 - 40	Suelo arenoso-franco arenas gruesas a medianas, gravas y cantos rodados medianos, con poca presencia de arcillas en estado saturado - acuífero	Alta
15,5 a 25,5	10			
25,5 a 30,0	4,5	22 - 40	Suelo arenoso-franco con arenas gruesas a medianas, gravas y cantos rodados medianos, con presencia de arcillas en estado saturado – acuífero	Muy alta
>30,0	--			
Curvas Gamma Natural – Profundidad 30 metros				



Fuente: Elaborado por la autora

3.3.5. Entubado definitivo y colocación de prefiltro

Una vez logrado el proceso de perforación, análisis granulométrico de las muestras de los diferentes estratos atravesados y registro geofísico al interior del pozo exploratorio; se procedió a ajustar el diseño preliminar que dieron los resultados, de los estudios hidrogeológicos y de las pruebas hidráulicas en los pozos alternos RM-01 y RM-02, a un diseño definitivo del entubado para el pozo exploratorio.

Los cinco tubos de seis metros cada uno, fueron colocados con la ayuda de la misma torre perforadora, empalmándolos uno a uno en los extremos, mediante el proceso de encolado o soldadura fría, mediante pegamentos que funden químicamente los materiales a unirlos, en este caso los tubos PVC, formando un solo cuerpo sin necesidad de aporte de calor. Considerando ciertos pasos importantes para la ejecución para una soldadura correcta, como: primero, se lija y se limpia tanto la zona del tubo que penetra como la zona interna de la pieza, luego se procede a aplicar el pegamento, acto seguido se realiza la

unión del tubo, se procede a la limpieza del pegamento sobrante y, por último, se procede a la fijación de la unión mediante pernos (cuatro pernos por cada unión).

En las Tabla 3-22 y 3-23 se muestran los detalles y el proceso de entubado definitivo del pozo exploratorio.

Tabla 3-22. Diseño técnico tubería pozo exploratorio MCH-01

Diseño técnico tubería pozo exploratorio MCH-01	
Descripción	Características
Profundidad de perforación (metros)	30
Diámetro de perforado o rimado (pulgadas)	9
Tubería ciega o lisa (metros)	12
Tubería ranurada (metros)	18
Diámetro tubería ciega o lisa (pulgadas)	6
Diámetro tubería ranurada o filtro (pulgadas)	6
Espesor tubería (milímetros)	160
Tipo de filtro en la base	Puente trapezoidal
Abertura ranuras filtro (centímetros)	5

Fuente: Elaborado por la autora

En cuanto a la colocación del prefiltro, para el espacio entre lo rimado de $\varnothing:9\frac{5}{8}$ y la columna de producción de $\varnothing:6\frac{5}{8}$, el diámetro de la grava destinada al relleno del espacio libre y en toda la longitud de los 30 metros de perforación, fue de $[\frac{1}{4}\frac{5}{8}]$ a $[\frac{3}{8}\frac{5}{8}]$. La aplicación del material fue realizada de forma manual, con previa adecuación de la entrada o boca del pozo para evitar el ingreso del mismo al interior del tubo. Los trabajos de llenado del material fueron efectuados al igual que la perforación con circulación de fluido, con la finalidad de que la grava se asiente ocupando todos los espacios anulares. En la Tabla 3-24, se muestran las fotografías referentes al prefiltro utilizado y su colocación.

Tabla 3-23. Fotografías entubado definitivo del pozo exploratorio MCH-01





Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 3-24. Fotografías prefiltro del pozo exploratorio MCH-01

Barras de peso – sistema de polea – empalme de las barras de peso	
	



Fuente: Elaborado por la autora

3.3.6. Limpieza, desarrollo del pozo exploratorio y prueba de verticalidad

Limpieza y recuperación de fondo con el empleo de aire comprimido:

Una vez concluido el engravado del pozo, antes de continuar con el bombeo del agua subterránea, se procedió con la limpieza y recuperación de fondo del pozo con aire comprimido, mediante tuberías sumergidas hasta la profundidad mínima que asegure un coeficiente práctico de sumergencia, esta actividad fue realizada el día 21 de junio.

Una vez iniciada la operación, las tuberías van descendiendo a medida que el agua expulsada por la tubería de descarga se halle libre de sólidos en suspensión, a medida que se iba ganando fondo, se registran las medidas tanto de la profundidad como del nivel dinámico, con la finalidad de ir aumentando la presión de trabajo de la compresora.

Desarrollo del pozo con inyección de aire comprimido:

El desarrollo del pozo exploratorio con inyección de aire comprimido, se efectuó empleando una línea de aire, con inyectores de avance lateral por fuera de la tubería de descarga. Al aplicar presión de trabajo, se logra desalojar la emulsión agua-aire creada al interior del pozo, hacia el acuífero, obligando que los finos encontrados cerca de la zona filtrante se introduzcan por las ranuras de la tubería del pozo y se alojen al fondo. La

finalidad es, dejar reposar los finos por un tiempo prudencial para luego extraerlos mientras se inyecta aire por la línea interior en posición de bombeo.

Suministro y aplicación de aditivos químicos defloculantes:

Con la inyección permanente de dos niveles de aire comprimido, se empleó aditivos químicos (tripolifosfato de sodio) para desprender los óxidos y arcillas impregnados a lo largo de la columna de la tubería del pozo y en la zona filtrante. Para los casos de presencia de suelos con contenido de arcilla, el empleo de químicos defloculantes, contribuyen a mejorar las condiciones de permeabilidad y porosidad del acuífero involucrado o circundante a la perforación.

Se utilizó dos inyectores de 4 a 5 [Km/cm²], con la finalidad de crear recirculación y agitación intensiva y permanente al interior del de la tubería del pozo. En la Tabla 3-25, se detalla las fotografías durante la limpieza y desarrollo del pozo exploratorio MCH-01.

Pruebas de verticalidad:

Para dar inicio a las pruebas de verticalidad, se considera el uso de un tecele que hace descender un cable de acero hasta la profundidad, al cable de acero se engancha una plomada metálica de 4 pulgadas de diámetro, la cual es introducida en toda la longitud hasta la profundidad de la tubería del pozo exploratorio MCH-01; se procedió a medir la desviación con respecto al centro, en las cuatro coordenadas de la boca del pozo, con la finalidad de corroborar el libre acceso de la bomba sumergible sin tocar las paredes de la columna de producción.

Tabla 3-25. Fotografías desarrollo del pozo exploratorio MCH-01

Desarrollo y limpieza



Fuente: Elaborado por la autora

3.3.6.1. Pruebas de bombeo y control de tiempos/abatimientos

En esencia, una prueba de bombeo es un método de análisis de los pozos de captación de agua subterránea y del acuífero en que se encuentran. Estas pruebas requieren una considerable inversión de tiempo y técnica, que de tal manera pueda obtenerse la máxima cantidad de información posible. La duración de las pruebas de bombeo, depende de la confiabilidad y uso de los datos obtenidos; por lo general, las pruebas para estimar la transmisividad $[T]$ y el coeficiente de almacenamiento $[S]$ duran más o alrededor de 24 horas, aunque en algunos casos se alcanzan hasta 72 horas o más.

Para realizar las pruebas de bombeo, se consideró el equipo necesario para medir y controlar los niveles de abatimiento y medidas volumétricas de caudal de bombeo, como se muestra en las fotografías de la Tabla 3-26. Como antesala a una prueba de bombeo de larga duración, que permitiera obtener los parámetros hidrogeológicos del acuífero en estudio, se realizaron una serie de pruebas preliminares, con la finalidad de: familiarización con el manejo de los equipos; observar el tipo de relación entre el pozo exploratorio MCH-01 y los piezómetros existentes RM-01 y RM-02; realizar una limpieza tanto al pozo exploratorio como a los piezómetros con el afán de evitar algún imprevisto durante la prueba de bombeo, tipo acumulación de sedimentos y fijación de caudales preliminares.

Prueba uno: Proceso de limpieza y verificación del rendimiento de los piezómetros.

Estas actividades se las realizó el día 22 de junio.

Piezómetro RM-01 y Piezómetro RM-02

El piezómetro RM-01 está ubicado a 87,75 metros al nororiente del pozo exploratorio MCH-01, presentado un nivel estático 1,80 metros con respecto a la superficie del suelo y con una profundidad aproximada de 20 metros.

El piezómetro RM-02 está ubicado a 57,36 metros al suroriente del pozo exploratorio MCH-01, presentado un nivel estático 1,80 metros con respecto a la superficie del suelo y con una profundidad aproximada de 20 metros.

Para lograr la limpieza de los dos piezómetros, se bombeo agua por 10 minutos con descanso de 10 minutos para la ventilación de la bomba, repitiendo este proceso por tres veces, siempre verificando los niveles dinámicos y su recuperación. Concluyendo que los piezómetros se encontraban en óptimas condiciones.

Prueba dos: Prueba de bombeo a caudal constante.

Consiste en bombear un pozo que este perforado en el acuífero en estudio, durante un cierto tiempo a un determinado caudal, mientras se obtiene los registros de la evolución del nivel dinámico; según la norma técnica, expone que: “Un pozo debe bombearse a un caudal constante al menos hasta que se observe una tendencia a una línea recta, en una gráfica del nivel de agua contra el logaritmo del tiempo ...”, lo cual significa que una vez que el nivel de abatimiento logre ser constante en un lapso de tiempo, la prueba de bombeo habrá culminado.

Los días 26 y 27 de junio se realizaron las estimaciones sobre la capacidad de producción del pozo exploratorio MCH-01, en base a pruebas de bombeo previas realizadas los días

23 y 24 de junio; concluyendo que la prueba definitiva debe ser realizada en un lapso de 24 horas con un caudal del orden de 1,00 a 1,67 (l/s). Bajo estas condiciones, la prueba de bombeo a caudal constante se dio inicio a las 8:00 am del día 26 de junio, finalizando a las 9:00 am del día 27 de junio, con el respectivo registro de los niveles dinámicos en un lapso de 16 horas (8 bombeo y 8 recarga); los datos se exponen en la sección 4.2 de Resultados.

Tabla 3-26. Pruebas de bombeo pozo exploratorio MCH-01

Desarrollo - pruebas de bombeo – bomba sumergible	
	
	
<p>Bomba Sumergible 1.5HP Industrial INGCO</p> <p>Voltaje: 110-120V ~ 60Hz Potencia de entrada: 1500W (2HP) Max.head: 112M Max.flow: 6.0M3 / H Diámetro de la tubería: 1 1/4" Cuerpo de bomba de pozo: 4" Impulsor: 14 etapas Motor de alambre de cobre Cuerpo bomba: acero inoxidable. Cables de 20m de longitud</p>	<p>Sonda Dipper-T 1100-300M 1133-T</p> <p>electrónico IP65 con modos seleccionables para niveles estáticos y de abatimiento.</p> <p>La sonda IP68 reemplazable en el campo tiene una clasificación de presión / profundidad total.</p> <p>Cinta de polietileno de acero de alta resistencia al estiramiento.</p>

Fuente: Elaborado por la autora

3.4. Etapa 4: Procesamiento de la información para la caracterización del acuífero

3.4.1. Parámetros hidrogeológicos

A partir de los datos registrados durante la prueba de bombeo definitiva a caudal constante, es posible determinar algunas características hidráulicas del acuífero, entre las variables concernientes a este estudio, se determina la transmisividad [T] y coeficiente de almacenamiento [S], como sigue en el siguiente apartado:

Ensayo de bombeo por el método de Theis con corrección de Jacob en un acuífero confinado a régimen variable.

Para la resolución de este caso, se dispone de tres sondeos abiertos en el mismo acuífero. El pozo (MCH-01) catalogado como pozo exploratorio, del cual se bombea agua a caudal constante mientras que paralelamente se miden los descensos, y en los pozos (RM-01 y RM-02) catalogados como piezómetros de observación, en los cuales también se miden los descensos.

Las medidas de campo son:

- Caudal constante de bombeo (Q).
- Distancia (r) entre el pozo de bombeo y los piezómetros de observación.
- Tiempos (t) y descensos o abatimientos (s) en los pozos.

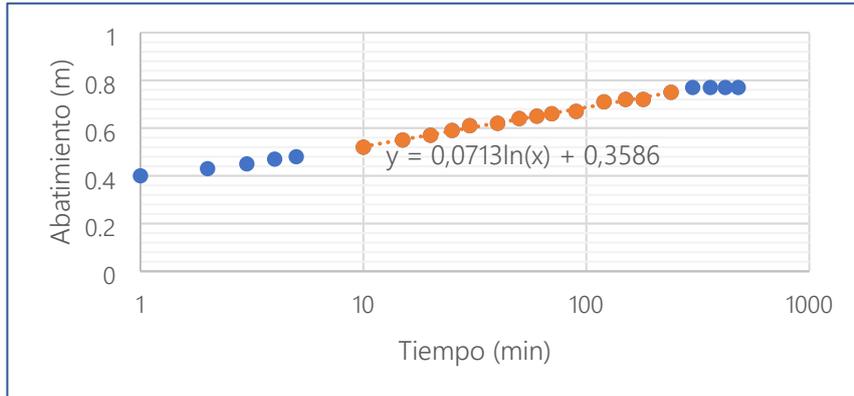
Datos:

En un acuífero a estudiar, se ha realizado un bombeo para medir los parámetros hidráulicos de dicho acuífero. En el pozo exploratorio (MCH-01) se ha bombeado un caudal constante de 1,65 l/s o 142,56 m³/d. En el piezómetro de observación (RM-01) ubicado a 87,75 m, y en el piezómetro de observación (RM-02) ubicado a 57,36 m del pozo de bombeo, se miden los siguientes descensos o abatimientos:

A. Datos piezómetro de observación (RM-01)

Solución:

1. Se



representan los
vs tiempo (t) en un
en abscisas,
ordenadas,
abatimientos.

1	0,40	2,20
2	0,43	2,23
3	0,45	2,25
4	0,47	2,27
5	0,48	2,28
10	0,52	2,32
15	0,55	2,35
20	0,57	2,37
25	0,59	2,39
30	0,61	2,41
40	0,62	2,42
50	0,64	2,44
60	0,65	2,45
70	0,66	2,46
90	0,67	2,47
120	0,71	2,51
150	0,72	2,52
180	0,72	2,52
240	0,75	2,55
300	0,77	2,57
360	0,77	2,57
420	0,77	2,57
480	0,77	2,57

datos, abatimientos (s)
gráfico semilogarítmico:
logaritmos de tiempo; en
descensos o

2. De la gráfica
una recta que se
los puntos de una

resultante, se interpola
ajuste lo mejor posible a
tendencia lineal. En

estos casos, para los primeros puntos, pueda que no cumplan con la linealidad, ya que la solución de Jacob puede no cumplirse para tiempos pequeños. En este caso vemos una tendencia a partir del minuto 10 al 240, obteniendo la ecuación $y = 0,0713 \ln(x) + 0,3586$.

3. En esta franja de valores, se selecciona dos tiempos, de tal forma que:

$$\begin{array}{lll} \text{Para } t_2 = 240 & y = 0,0713 \ln(240) + 0,3586 & y = 0,75 \\ s_2 = 0,75 & & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Para } t_1 = 10 & y = 0,0713 \ln(10) + 0,3586 & y = 0,52 & s_1 \\ & = 0,52 & & \end{array}$$

4. Aplicando la expresión: $s_2 - s_1 = 0,183 \frac{Q}{T}$ y convirtiendo el caudal de (l/s a m^3/d):

$$0,75 - 0,52 = 0,183 \frac{142,56}{T}$$

Despejando T (para el caso de operaciones de bombeo), y como los descensos están en metros y el caudal en (m^3/d), la transmisividad se obtiene en (m^2/d).

$$T = 115,13 \text{ m}^2/d$$

5. Ahora, prolongando la recta estudiada hasta cortar el eje de las abscisas (descenso = 0), leemos el valor de punto de corte $t_0 = 0,0065$ minutos (dividiendo entre 1440 para expresar en días). Y aplicando la expresión:

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2}$$

$$S = \frac{2,25 * 115,13 * \frac{0,0065}{1440}}{87,75^2}$$

$$S = 2 * 10^{-7}$$

6. El mismo procedimiento sigue para las lecturas de recarga obteniendo la transmisividad, que posteriormente se promedia con los valores de transmisividad obtenidas en la etapa de bombeo. Y así tener un valor de transmisividad representativa para cada sondeo o pozo.

**B. Datos piezómetro
02)**

Bombeo		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)
0		1,80
1	0,52	2,32
2	0,55	2,35
3	0,57	2,37
4	0,59	2,39
5	0,60	2,40
10	0,64	2,44
15	0,67	2,47
20	0,69	2,49
25	0,71	2,51
30	0,73	2,53
40	0,74	2,54
50	0,76	2,56
60	0,77	2,57
70	0,78	2,58
90	0,79	2,59
120	0,83	2,63
150	0,87	2,67
180	0,9	2,70
240	0,9	2,70
300	0,90	2,70
360	0,90	2,70
420	0,90	2,70
480	0,90	2,70

de observación (RM-

Solución:

1. De igual manera se tiene los datos, abatimientos (s) vs tiempo (t) en un gráfico semilogarítmico: en abscisas, logaritmos de tiempo; en ordenadas, descensos o abatimientos.

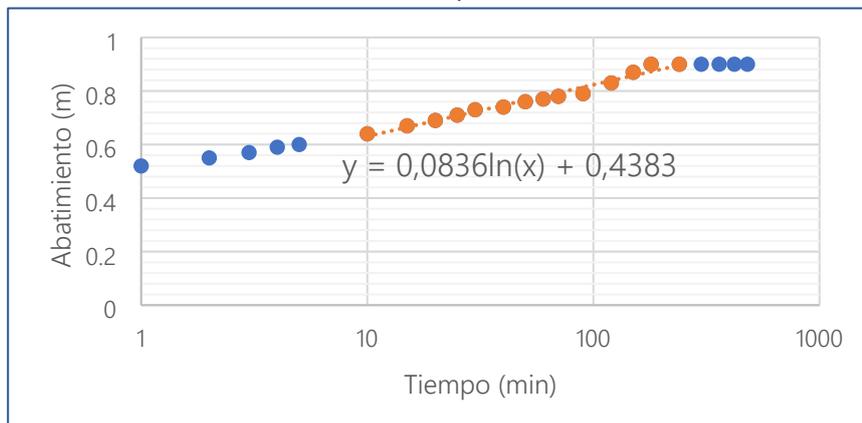
2. De la gráfica resultante, se interpola una recta que se ajuste lo mejor posible a los puntos de una tendencia lineal. En este caso vemos una tendencia a partir del minuto 15 al 240, obteniendo la ecuación $y = 0,0836 \ln(x) + 0,4383$.

3. En esta franja de valores, se selecciona dos tiempos, de tal forma que:

$$\begin{aligned} \text{Para } t_2 = 240 & & y = 0,0836 \ln(240) + 0,4383 & & y = 0,90 \\ s_2 = 0,90 & & & & \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \text{Para } t_1 = 15 & & y = 0,0836 \ln(15) + 0,4383 & & y = 0,66 & s_1 \\ & & = 0,66 & & \end{aligned}$$

4. Aplicando la expresión: $s_2 - s_1 = 0,183 \frac{Q}{T}$ y convirtiendo el caudal de (l/s a m³/d):



$$0,90 - 0,66 = 0,183 \frac{142,56}{T}$$

Despejando T (para el caso de operaciones de bombeo), y como los descensos están en metros y el caudal en (m^3/d), la transmisividad se obtiene en (m^2/d).

$$T = 112,55 \text{ m}^2/\text{d}$$

5. Ahora, prolongando la recta estudiada hasta cortar el eje de las abscisas (descenso = 0), leemos el valor de punto de corte $t_0 = 0,0053$ minutos (dividiendo entre 1440 para expresar en días). Y aplicando la expresión:

$$S = \frac{2,25Tt_0}{r^2}$$

$$S = \frac{2,25 * 112,55 * \frac{0,0053}{1440}}{57,36^2}$$

$$S = 3 * 10^{-7}$$

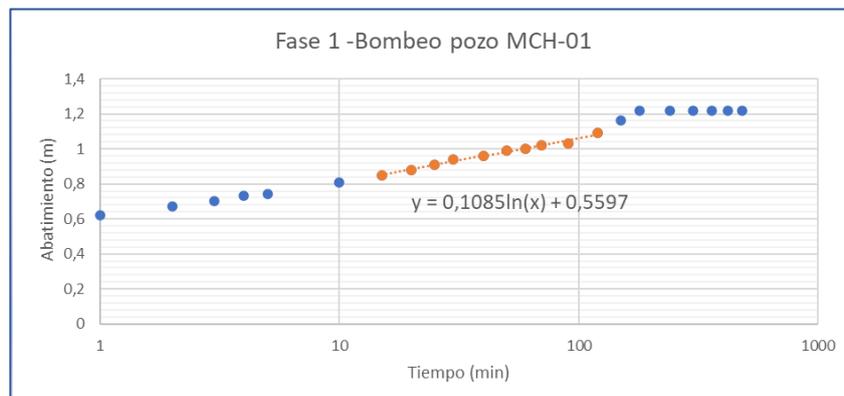
6. El mismo procedimiento sigue para las lecturas de recarga obteniendo la transmisividad, que posteriormente se promedia con los valores de transmisividad obtenidas en la etapa de bombeo. Y así tener un valor de transmisividad representativa para cada sondeo o pozo.

C. Datos pozo exploratorio (MCH-01)

Bombeo		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)
0		1,80
1	0,62	2,42
2	0,67	2,47
3	0,70	2,50
4	0,73	2,53
5	0,74	2,54
10	0,81	2,61
15	0,85	2,65
20	0,88	2,68
25	0,91	2,71
30	0,94	2,74
40	0,96	2,76
50	0,99	2,79
60	1	2,80
70	1,02	2,82
90	1,03	2,83
120	1,09	2,89
150	1,16	2,96
180	1,22	3,02
240	1,22	3,02
300	1,22	3,02
360	1,22	3,02
420	1,22	3,02
480	1,22	3,02

Solución:

1. Para los datos de abatimientos (s) vs tiempo (t) se tiene un gráfico semilogarítmico: en abscisas, logaritmos de tiempo; en ordenadas, descensos o abatimientos.



2. De la

gráfica

resultante, se interpola una recta que se ajuste lo mejor posible a los puntos de una tendencia lineal. En este caso vemos una tendencia a partir del minuto 15 al 120, obteniendo la ecuación $y = 0,1085 \ln(x) + 0,5597$.

3. En esta franja de valores, se selecciona dos tiempos, de tal forma que:

$$\begin{array}{llll} \text{Para } t_2 = 150 & y = 0,1085 \ln(150) + 0,5597 & y = 1,08 & s_2 \\ & = 1,08 & & \end{array}$$

$$\begin{array}{llll} \text{Para } t_1 = 15 & y = 0,1085 \ln(15) + 0,5597 & y = 0,85 & s_1 \\ & = 0,85 & & \end{array}$$

4. Aplicando la expresión: $s_2 - s_1 = 0,183 \frac{Q}{T}$ y convirtiendo el caudal de (l/s a m^3/d):

$$1,08 - 0,85 = 0,183 \frac{142,56}{T}$$

Despejando T (para el caso de operaciones de bombeo), y como los descensos están en metros y el caudal en (m^3/d), la transmisividad se obtiene en (m^2/d).

$$T = 104,42 \text{ m}^2/d$$

5. Para el caso del pozo de exploratorio o de bombeo, no aplica el cálculo del coeficiente de almacenamiento. El procedimiento para el cálculo de la transmisividad, sigue para las lecturas de recarga, que posteriormente se promedia con los valores de transmisividad obtenidas en la etapa de bombeo. Y así tener un valor de transmisividad representativa para cada sondeo o pozo.

Capítulo IV

4. Interpretación de Resultados

4.1. Caracterización geoelectrica del subsuelo en la zona de estudio

A partir del análisis y procesamiento de datos adquiridos en las campañas de prospección geofísica y la caracterización geológica del área de estudio, se lleva a cabo la correlación e interpretación de los resultados, con la finalidad de caracterizar las unidades litoestratigráficas encontradas en el área de estudio localizada en la zona de estudio recinto Miranda Girón II, ubicado en la microcuenca Río Churute.

Los resultados de los sondeos eléctricos verticales, son visualizados como sondeos unidimensionales que exhiben la variación de la resistividad $[\bar{\rho}]$ en función de la profundidad $[h]$. El resultado del procesamiento de los tres sondeos eléctricos verticales, evidencian un rango de resistividad que oscilan entre los 10 y 40 (Ohm.m) analizado a una profundidad de hasta 80 metros. La variación en los valores de resistividad, se debe a la variación de las características físicas de los materiales de los estratos que componen las unidades litoestratigráficas existentes. Las características de cada uno de los sondeos eléctricos verticales ejecutados en el área de estudio se presenta en la Tabla 4-1.

Tabla 4–1. Características de los Sondeos Eléctricos Verticales realizados

SEV-ID	Ubicación Coordenadas		Altura (msm)	[AB/2] máximo (m)	Profundidad de investigación (m)	% Error
	Sur	Oeste				
SEV-01	2°22'51.30"	79°33'12.88"	21	150	80	1,63
SEV-02	2°22'44.59"	79°33'12.43"	21	148	80	1,60
SEV-03	2°22'56.39"	79°33'12.97"	21	150	80	1,63

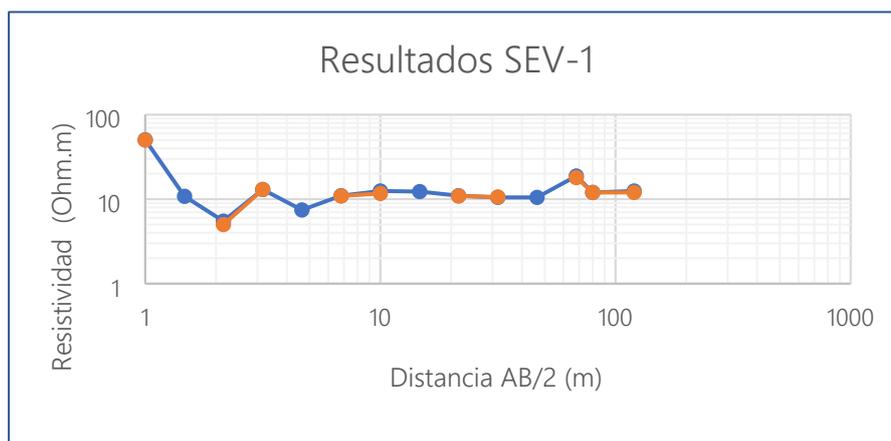
Fuente: Elaborado por la autora

La profundidad de investigación en la ejecución en campo de los sondeos eléctricos verticales, está condicionado por la separación de los electrodos de corriente $[AB]$; por lo que, si la separación entre estos electrodos aumenta, la profundidad de investigación $[h]$ será mayor y por lo tanto la densidad de datos disminuye. En las campañas de prospección geofísica del presente estudio, se intentó alcanzar la máxima separación de los electrodos $[AB]$ en cada uno de los lugares seleccionados. La profundidad a la que alcanza una corriente determinada, depende tanto de la estratificación (contrastes de resistividad) como

de la separación de los electrodos [AB]; sin embargo, como regla, generalmente la profundidad de investigación de los sondeos eléctricos verticales va del orden entre 0,1 a 0,3 veces la longitud de los electrodos [AB]. En general, los estratos del subsuelo de la zona de estudio, está representado por una secuencia geoelectrica homogénea donde se encuentran unidades litoestratigráficas caracterizadas por valores de resistividad particulares; por tanto, a partir del análisis de los resultados obtenidos del procesamiento de los datos adquiridos en campo, se define una profundidad de investigación promedio de 0,27 veces la longitud entre los electrodos [AB].

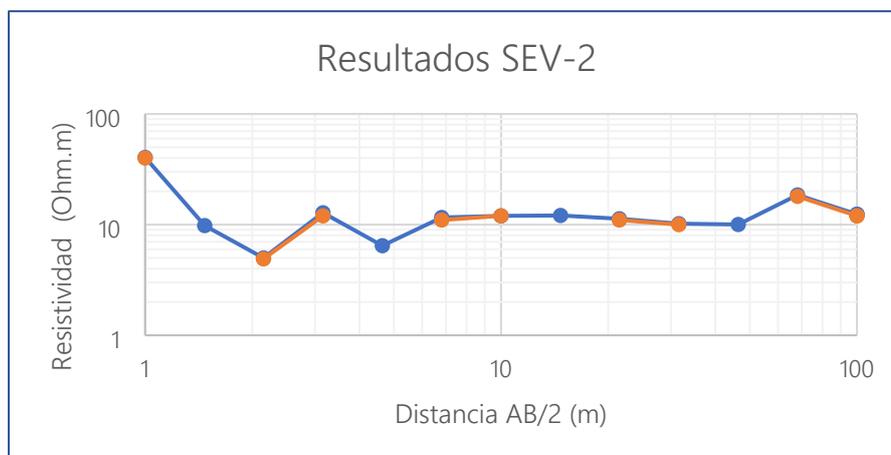
Los perfiles del Modelo [1D] de resistividad eléctrica de los SEV-1, SEV-2 y SEV-3, se exhiben en las Figura 4-1, 4-2 y 4-3 donde se puede observar el ajuste entre la curva de resistividad eléctrica aparente adquirida en campo (puntos azules – línea azul) y la curva de resistividad eléctrica calculada (línea naranja).

Figura 4-1. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 1



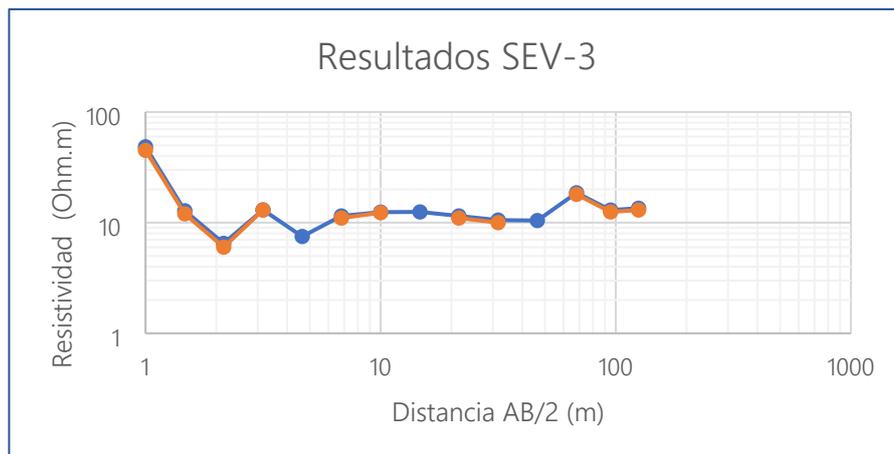
Fuente: Elaborado por la autora

Figura 4-2. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 2



Fuente: Elaborado por la autora

Figura 4-3. Resultados Sondeo Eléctrico Vertical 3



Fuente: Elaborado por la autora

4.1.1. Correlación Geológica – Geoeléctrica

A partir de los resultados obtenidos del procesamiento de los sondeos eléctricos verticales y la evaluación geológica, se realiza la correlación geológica – geoeléctrica, donde se establece un rango de resistividad de las unidades litoestratigráficas existentes en el área de estudio. En la Tabla 4-2, se detalla los valores de resistividad de la formación que predomina en la zona de estudio.

Tabla 4–2. Valores de resistividad en las unidades litoestratigráficas de la zona de estudio

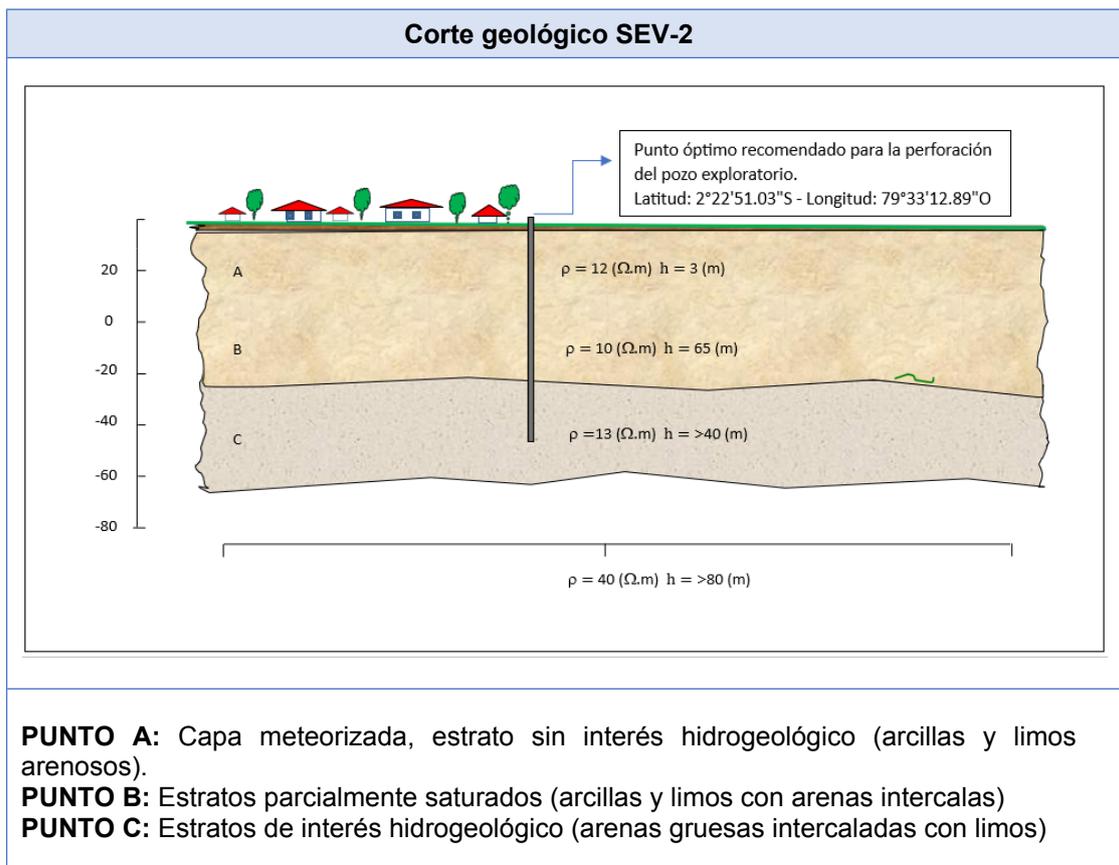
Unidad Ambiental	Formación geológica	Unidad	Descripción	Resistividad (Ohm.m)
Llanura Aluvial Reciente	Depósitos Aluviales	Nb (a)	Arcillas	10 - 12
		Nb (b)	Arenas saturadas, con porciones de arcillas y limos	10 - 13
		Nb (c)	Arenas y gravas saturadas	13
		Nb (d)	Arenas y gravas no saturadas (secas) o parcialmente saturadas	13

Fuente: Elaborado por la autora

La exposición de los valores de resistividad de los diferentes materiales de los estratos geológicos, permiten aplicar exitosamente el desarrollo del método de prospección geoeléctrica. En la Figura 2-10 del capítulo 2, donde se indica los rangos de resistividad que caracterizan a los estratos del subsuelo de la zona de estudio, en donde se puede apreciar las diferencias entre el material de grano fino (margas, limos – limonitas, arcillas – arcillolitas), los de grano medio (arenas y areniscas) y de grano grueso (gravas y conglomerados).

A partir de los resultados de la correlación geológica – geoelectrica, se ha generado los cortes geológicos – geoelectricos de acuerdo con los resultados de los sondeos eléctricos verticales realizados; estos cortes permiten visualizar, la continuidad y relación de las unidades litoestratigráficas existentes en el área de estudio. En la Tabla 4-3, se muestra la ubicación de los cortes geológicos – geoelectricos levantados en el área de estudio para la correlación de los sondeos eléctricos verticales, específicamente para el SEV-2, donde se propone el punto de perforación.

Tabla 4–3. Corte geológico - geoelectrico 2-2_a



Fuente: Elaborado por la autora

4.2. Pruebas de bombeo y caracterización hidrogeológica

Con el fin de observar el caudal de explotación del pozo exploratorio MCH-01, se realizó una prueba de bombeo, regulando la salida de caudal con una llave de bola previamente instalada. En la Tabla 4-4, se detalla el registro de datos de los aforos realizados en determinados tiempos, considerando un volumen de llenado de 14 litros.

En el detalle de las Figuras 4-4 y 4-5, se observa un descenso mínimo de caudal hasta su estabilización a los 120 minutos (dos horas), lo cual representa el caudal idóneo a utilizarse para las pruebas de bombeo de larga duración a caudal constante.

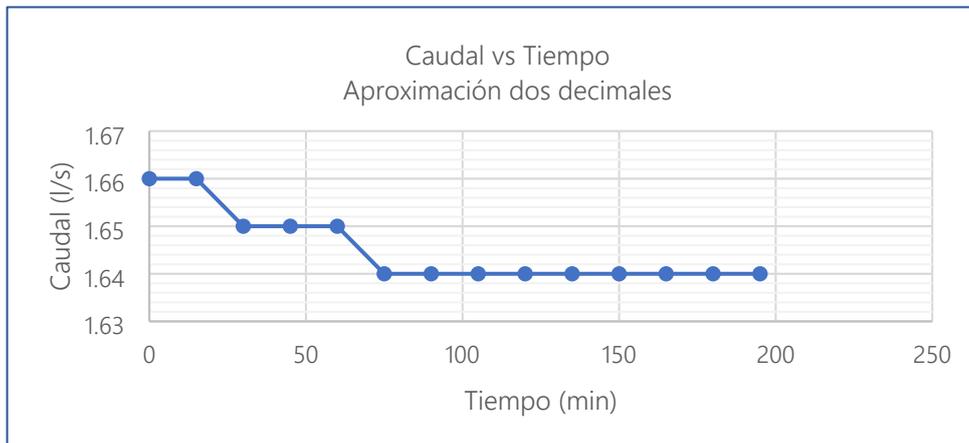
El registro de los niveles de agua se lo realizó con el uso de una sonda eléctrica sonora, considerando inicialmente el registro del nivel estático, luego niveles dinámicos con respecto al tiempo y nivel de recuperación una vez suspendida la acción de bombeo.

Tabla 4-4. Aforos pozo exploratorio MCH-01

Registro de aforos pozo exploratorio							
Volumen [l]	14 litros						
Tiempo [min]	Aforos [s]						Caudal [l/s]
0	8,42	8,40	8,40	8,48	8,50	8,50	1,66
15	8,38	8,45	8,40	8,49	8,56	8,48	1,66
30	8,50	8,48	8,42	8,40	8,52	8,54	1,65
45	8,45	8,48	8,50	8,52	8,51	8,49	1,65
60	8,48	8,52	8,50	8,51	8,50	8,48	1,65
75	8,40	8,45	8,58	8,66	8,58	8,46	1,64
90	8,62	8,56	8,50	8,56	8,50	8,48	1,64
105	8,56	8,59	8,56	8,52	8,55	8,46	1,64
120	8,01	8,78	8,70	8,70	8,60	8,48	1,64
135	8,60	8,62	8,51	8,52	8,54	8,48	1,64
150	8,60	8,62	8,50	8,51	8,50	8,56	1,64
165	8,63	8,60	8,58	8,52	8,50	8,46	1,64
180	8,65	8,62	8,52	8,50	8,51	8,48	1,64
195	8,64	8,60	8,51	8,48	8,50	8,50	1,64
Caudal promedio [l/s]							1,65

Fuente: Elaborado por la autora

Figura 4-4. Tendencia del caudal en el tiempo (3horas con 15minutos)



Fuente: Elaborado por la autora

Figura 4-5. Tendencia del caudal en el tiempo (3horas con 15 minutos)



Fuente: Elaborado por la autora

Una vez que se observa la estabilización del caudal alrededor de 1,6 (l/s), se procede a desarrollar las pruebas de bombeo en el área de interés hidrogeológico, las pruebas de bombeo se realizaron en el mes de junio (transición de invierno a verano), con la finalidad de obtener las características hidráulicas de la zona estudiada. Las pruebas se realizaron tanto en el pozo exploratorio MCH-01 como en los pozos de observación o piezómetros RM-01 y RM-02, analizando la evolución del nivel dinámico y abatimiento en el tiempo, así como los periodos de recuperación para determinar la capacidad de recarga del acuífero.

4.2.1 Prueba de bombeo y control de niveles en el pozo exploratorio MCH-01

Tabla 4–5. Características generales pozo exploratorio MCH-01

Características generales pozo exploratorio MCH-01	
Profundidad del pozo (metros)	30
Profundidad de la instalación (metros)	10-12
Diámetro del pozo revestido (pulgadas)	6
Diámetro de la tubería de succión (pulgadas)	1,25
Material de la tubería	PVC
Potencia (Hp)	2
Voltaje (voltios)	220
Caudal de producción (l/s)	1,6 – 1,67
Nivel estático (m)	1,80

Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 4–6. Registros prueba de bombeo pozo exploratorio MCH-01

Registro datos pozo exploratorio MCH-01					
Bombeo			Recuperación		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)	Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)
0		1,80	480		3,02
1	0,62	2,42	481	0,18	2,84
2	0,67	2,47	482	0,33	2,69
3	0,70	2,50	483	0,35	2,67
4	0,73	2,53	484	0,39	2,63
5	0,74	2,54	485	0,39	2,63
10	0,81	2,61	490	0,45	2,57
15	0,85	2,65	495	0,51	2,51
20	0,88	2,68	500	0,52	2,50
25	0,91	2,71	505	0,58	2,44
30	0,94	2,74	510	0,62	2,40
40	0,96	2,76	520	0,67	2,35
50	0,99	2,79	530	0,77	2,25
60	1	2,80	540	0,78	2,24
70	1,02	2,82	550	0,78	2,24
90	1,03	2,83	570	0,84	2,18
120	1,09	2,89	600	0,88	2,14
150	1,16	2,96	630	0,94	2,08
180	1,22	3,02	660	0,96	2,06
240	1,22	3,02	720	0,98	2,04
300	1,22	3,02	780	1,08	1,94
360	1,22	3,02	840	1,09	1,93
420	1,22	3,02	900	1,09	1,93
480	1,22	3,02	960	1,09	1,93

Fuente: Elaborado por la autora

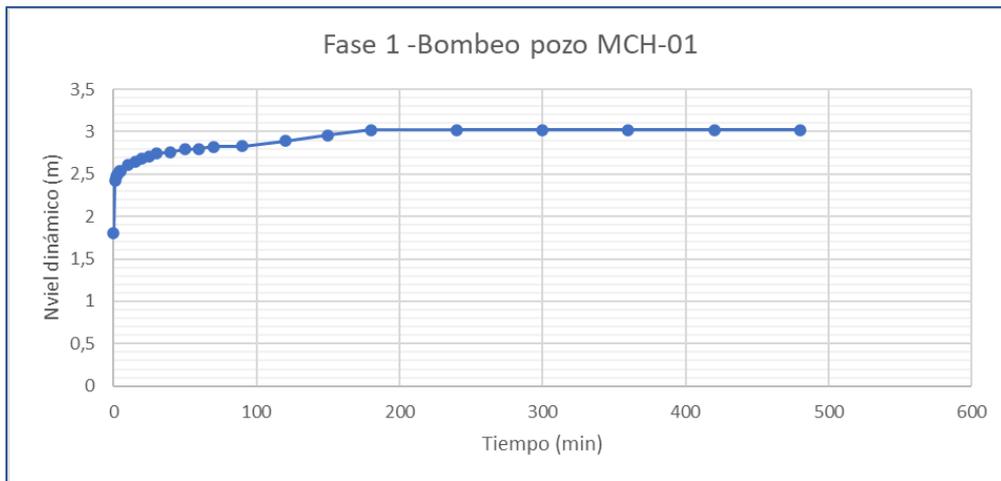
Curvas de interpretación

a) Nivel dinámico vs tiempo

En la Figura 4-6, se muestra de manera cualitativa el comportamiento general del pozo exploratorio, observando que a partir del minuto 180 (tres horas), comienza la estabilización hasta llegar al punto de equilibrio, razón por la cual se da por culminada la prueba de bombeo tal como detalla Villanueva & Iglesias (1984).

La curva nivel dinámico vs tiempo, muestra como es el comportamiento del nivel del agua durante el tiempo de bombeo hasta que se estabiliza el abatimiento, de este modo se observa que la línea con tendencia recta indica el periodo de estabilización de la prueba.

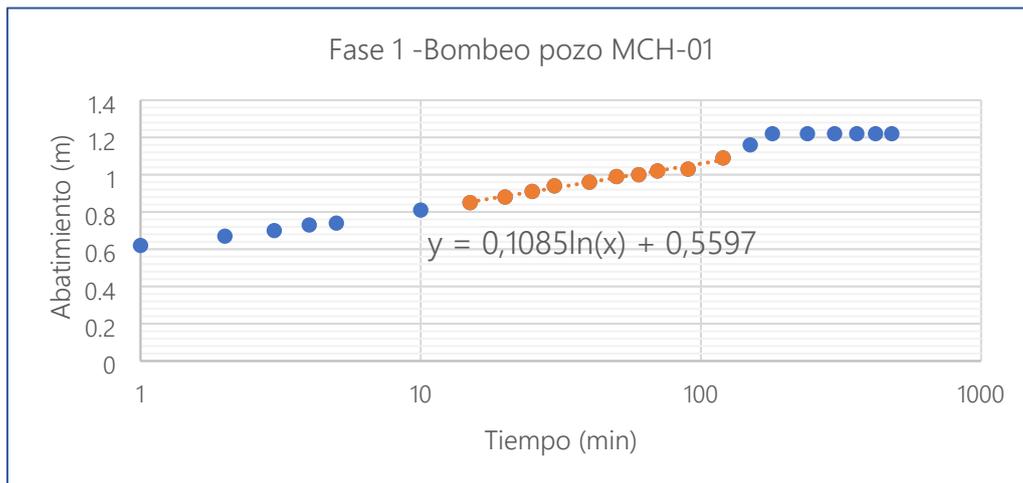
Figura 4-6. Nivel dinámico vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01



Fuente: Elaborado por la autora

b) Abatimiento vs tiempo

Figura 4-7. Abatimiento vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01

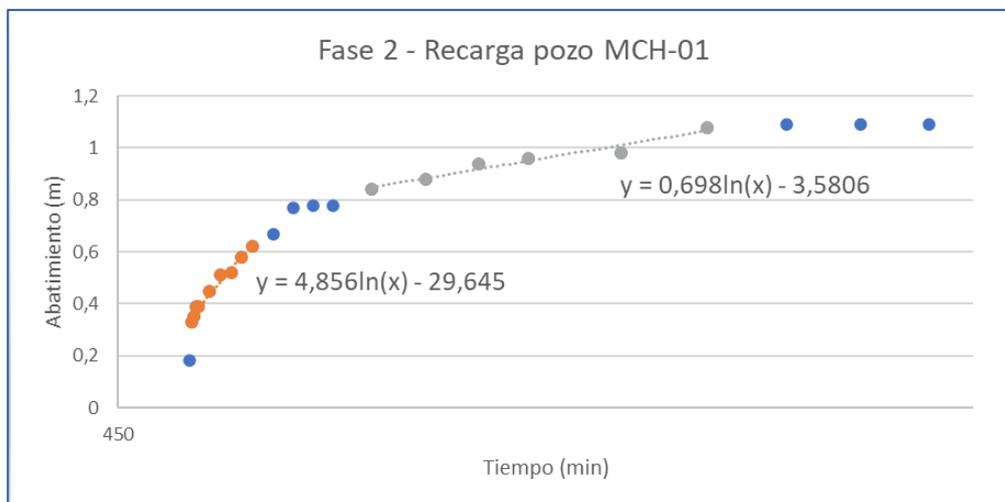


Fuente: Elaborado por la autora

La Figura 4-7, refleja el grado de estabilización de la prueba de bombeo, mediante representación semilogarítmica, enfocando los valores tal, que muestre una tendencia lineal con su respectiva ecuación $y = 0,1085\ln(x) + 0,5597$. A partir del minuto 180 (tres horas) de transcurrida la prueba de bombeo, se observa la tendencia a mantener el nivel dinámico alrededor de los tres metros de profundidad.

c) Recuperación vs tiempo

Figura 4-8. Recuperación vs tiempo - pozo exploratorio MCH-01



Fuente: Elaborado por la autora

En la Figura 4-8, se puede observar la capacidad del acuífero en recibir recarga, de esta manera se identifica que el periodo de recuperación fue continuo y progresivo, de igual manera obedeciendo una tendencia lineal representada en la ecuación $y = 0,698\ln(x) - 3,5806$, y posterior, la tendencia a estabilizarse a partir del minuto 840 (14 horas).

Para determinar las diferentes propiedades hidrogeológicas del acuífero en estudio, se considera las gráficas desarrolladas (abatimiento vs tiempo / recuperación vs tiempo), para que en base al método analítico de Theis con corrección de Jacob, se logre estar lo más cerca posible de la realidad de la dinámica de los pozos de agua.

Por lo tanto, al contar con un registro de datos de la variación del nivel dinámico en el tiempo, se obtiene valores para el abatimiento; seleccionando un rango de valores tal que, estos representen la fase final de la prueba, puesto que para fines de este proyecto se prevé una explotación de caudal a largo plazo, se asignan los valores $[t_1 - s_1]$ y $[t_2 - s_2]$, los cuales se encuentran incluidos en la tendencia lineal y con un caudal de operación $Q = 1,6$ (l/s) o $Q = 142,56$ (m³/día), se procede al cálculo de la transmisividad (m²/día) tanto para operaciones de bombeo como de recuperación; en la Tabla 4-7, se presenta los valores obtenidos de la transmisividad en la operación de bombeo / recuperación y con ello, la transmisividad representativa o global para el pozo exploratorio MCH-01.

Tabla 4–7. Cálculo transmisividad pozo exploratorio MCH-01

Bombeo pozo MCH-01		Recarga pozo MCH-01	
t_1	120	t_1	780
s_1	1,08	s_1	1,07
t_2	15	t_2	570
s_2	0,85	s_2	0,85
Q (l/s)	1,65	Q (l/s)	1,65
Q (m ³ /día)	142,56	Q (m ³ /día)	142,56
T (m²/día) 104,42		T (m²/día) 119,16	

T. representativa (m²/día)	111,79
--	---------------

Fuente: Elaborado por la autora

4.2.2 Control de niveles en el piezómetro de observación RM-01

Tabla 4–8. Características pozo de observación RM-01

Características generales pozo de observación RM-01	
Profundidad del pozo (metros)	20
Profundidad de la instalación (metros)	10-12
Diámetro del pozo revestido (pulgadas)	6
Diámetro de la tubería de succión (pulgadas)	1,25
Material de la tubería	PVC
Potencia (Hp)	2
Voltaje (voltios)	220
Caudal de producción (l/s)	1,5 – 1,6
Nivel estático (m)	1,80

Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 4–9. Registros prueba de bombeo pozo de observación RM-01

Registro datos pozo de observación RM-01					
Bombeo			Recuperación		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)	Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)
0		1,80	480		2,57
1	0,40	2,20	481	0,18	2,39
2	0,43	2,23	482	0,19	2,38
3	0,45	2,25	483	0,20	2,37
4	0,47	2,27	484	0,23	2,34
5	0,48	2,28	485	0,25	2,32
10	0,52	2,32	490	0,27	2,30
15	0,55	2,35	495	0,32	2,25
20	0,57	2,37	500	0,36	2,21
25	0,59	2,39	505	0,39	2,18
30	0,61	2,41	510	0,44	2,13
40	0,62	2,42	520	0,51	2,06
50	0,64	2,44	530	0,53	2,04
60	0,65	2,45	540	0,54	2,03
70	0,66	2,46	550	0,59	1,98
90	0,67	2,47	570	0,62	1,95
120	0,71	2,51	600	0,66	1,91
150	0,72	2,52	630	0,67	1,90
180	0,72	2,52	660	0,68	1,89
240	0,75	2,55	720	0,68	1,89
300	0,77	2,57	780	0,68	1,89
360	0,77	2,57	840	0,7	1,87
420	0,77	2,57	900	0,72	1,85
480	0,77	2,57	960	0,72	1,85

Fuente: Elaborado por la autora

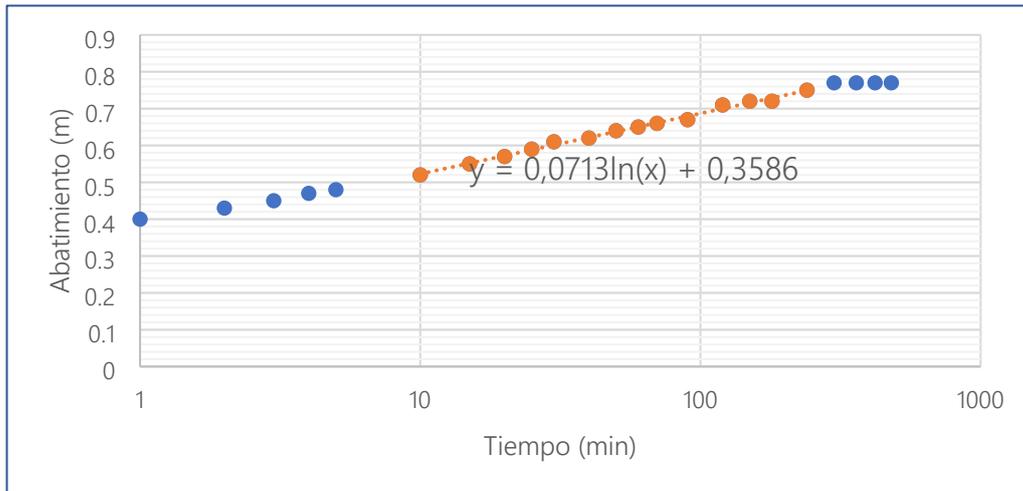
Curvas de interpretación

a) Nivel dinámico vs tiempo

En la Figura 4-9, al igual que en la interpretación de las curvas para la prueba de bombeo del pozo exploratorio MCH-01, se tiene la representación cualitativa del comportamiento general del pozo de observación o piezómetro RM-01, observando que a partir del minuto 300 (cinco horas) comienza la estabilización hasta llegar al punto de equilibrio, razón por la cual se da por culminada la prueba de bombeo tal como detalla Villanueva & Iglesias (1984).

La curva nivel dinámico vs tiempo, muestra cómo se comporta el nivel del agua durante el tiempo de bombeo hasta que el abatimiento logre estabilizarse, de este modo se observa que la línea con tendencia recta indica el periodo de estabilización de la prueba.

Figura 4-9. Nivel dinámico vs tiempo - pozo de observación RM-01

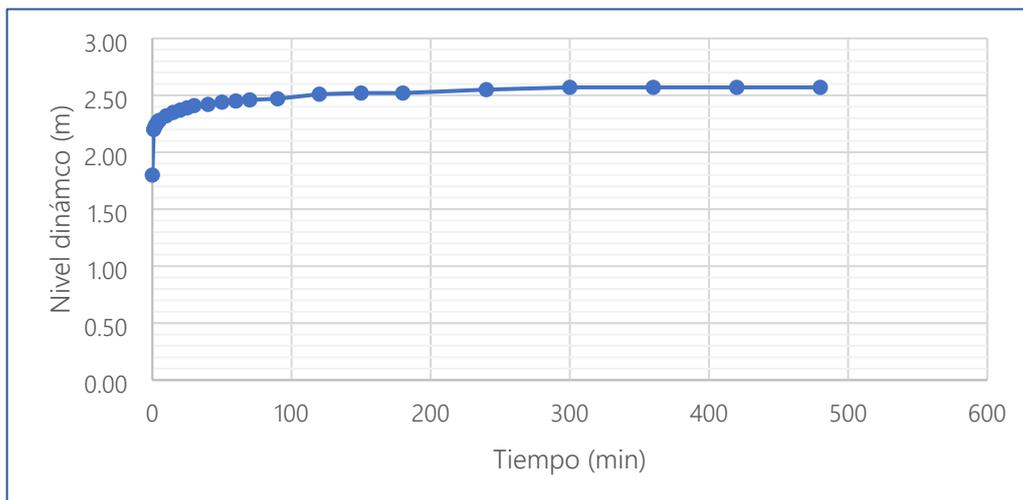


Fuente: Elaborado por la autora

b) Abatimiento vs tiempo

La Figura 4-10, refleja el grado de estabilización de la prueba de bombeo, mediante representación semilogarítmica, enfocando los valores tal que muestre una tendencia lineal, con su respectiva ecuación $y = 0,0713\ln(x) + 0,3586$.

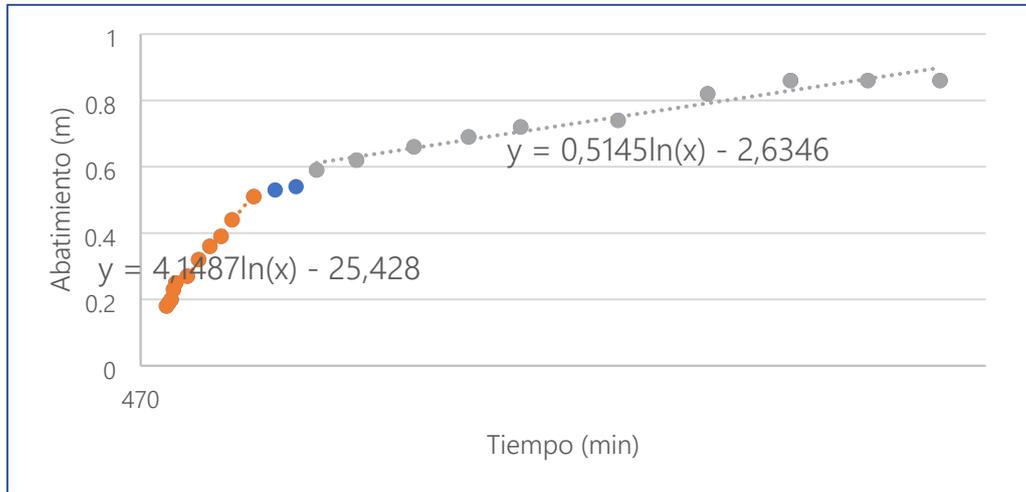
Figura 4-10. Abatimiento vs tiempo - pozo de observación RM-01



Fuente: Elaborado por la autora

c) Recuperación vs tiempo

Figura 4-11. Recuperación vs tiempo - pozo de observación RM-01



Fuente: Elaborado por la autora

En la Figura 4-11, se puede observar la capacidad del acuífero en recibir recarga, de esta manera se identifica que el periodo de recuperación fue continuo y progresivo. También se puede observar la tendencia en línea recta, representada por la ecuación $y = 0,5145\ln(x) - 2,6346$. Y como se realizó anteriormente para el caso de la prueba de bombeo del pozo exploratorio, se calcula la transmisividad en las operaciones de bombeo como de recuperación, como se detalla en la Tabla 4-12.

Para el caso de pozos de observación o piezómetros, se obtiene el coeficiente de almacenamiento para operaciones de bombeo, para un radio o distancia con respecto al pozo exploratorio MCH-01 de 87,75 metros.

Tabla 4–10. Cálculo transmisividad y coeficiente de almacenamiento pozo de observación RM-01

Descensos pozo RM-01		Recarga pozo RM-01	
t_1	240	t_1	960
s_1	0,75	s_1	0,90
t_2	10	t_2	550
s_2	0,52	s_2	0,61
Q (l/s)	1,65	Q (l/s)	1,65
Q (m ³ /día)	142,56	Q (m ³ /día)	142,56
T (m²/día) 115,13		T (m²/día) 91,03	

T. representativa (m²/día)	103,08
--	---------------

T (m²/día)	115,13
t_o	4,5431E-06
r(m)	87,75
S 0,0000002	

Fuente: Elaborado por la autora

4.2.3 Control de niveles en el piezómetro de observación RM-02

Tabla 4–11. Características pozo de observación RM-02

Características generales pozo de observación RM-02	
Profundidad del pozo (metros)	20
Profundidad de la instalación (metros)	10-12
Diámetro del pozo revestido (pulgadas)	6
Diámetro de la tubería de succión (pulgadas)	1,25
Material de la tubería	PVC
Potencia (Hp)	2
Voltaje (voltios)	220
Caudal de producción (l/s)	1,5 – 1,6
Nivel estático (m)	1,80

Fuente: Elaborado por la autora

Tabla 4–12. Registros prueba de bombeo pozo de observación RM-02

Registro datos pozo de observación RM-02					
Bombeo			Recuperación		
Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)	Tiempo (min)	Abatimiento (m)	Nivel agua (m)
0		1,80	480		2,70
1	0,52	2,32	481	0,21	2,49
2	0,55	2,35	482	0,22	2,48
3	0,57	2,37	483	0,23	2,47
4	0,59	2,39	484	0,26	2,44
5	0,60	2,40	485	0,26	2,44
10	0,64	2,44	490	0,3	2,40
15	0,67	2,47	495	0,35	2,35
20	0,69	2,49	500	0,39	2,31
25	0,71	2,51	505	0,42	2,28
30	0,73	2,53	510	0,47	2,23
40	0,74	2,54	520	0,54	2,16
50	0,76	2,56	530	0,56	2,14
60	0,77	2,57	540	0,57	2,13
70	0,78	2,58	550	0,62	2,08
90	0,79	2,59	570	0,65	2,05
120	0,83	2,63	600	0,69	2,01
150	0,87	2,67	630	0,69	2,01
180	0,9	2,70	660	0,7	2,00
240	0,9	2,70	720	0,8	1,90
300	0,90	2,70	780	0,8	1,90
360	0,90	2,70	840	0,82	1,88
420	0,90	2,70	900	0,83	1,87
480	0,90	2,70	960	0,83	1,87

Fuente: Elaborado por la autora

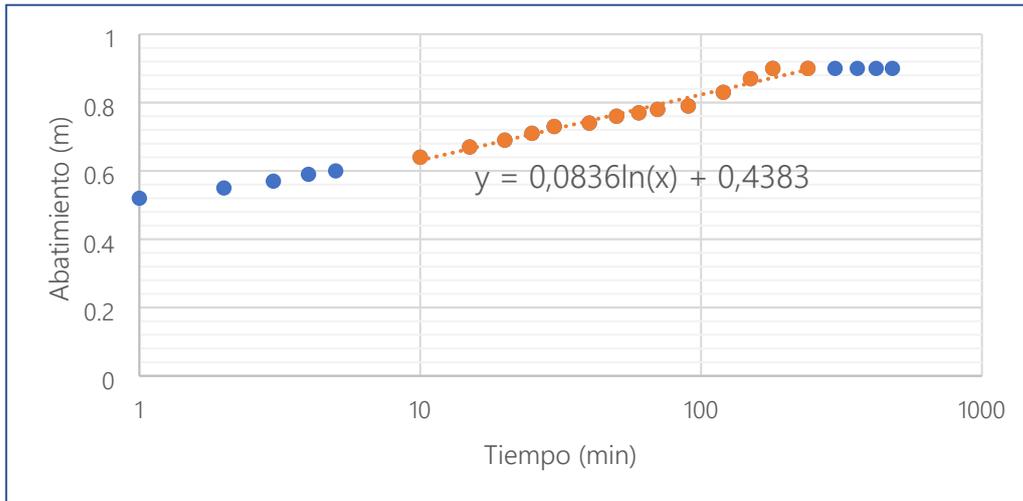
Curvas de interpretación

a) Nivel dinámico vs tiempo

En la Figura 4-12, al igual que en la interpretación de las curvas para la prueba de bombeo del pozo exploratorio RM-01, se tiene la representación cualitativa del comportamiento general del pozo de observación o piezómetro RM-02, observando que a partir del minuto 180 (tres horas) comienza la estabilización hasta llegar al punto de equilibrio.

La curva nivel dinámico vs tiempo, muestra cómo se comporta el nivel del agua durante el tiempo de bombeo hasta que el abatimiento logre estabilizarse, de este modo se observa que la línea con tendencia recta indica el periodo de estabilización de la prueba.

Figura 4-12. Nivel dinámico vs tiempo - pozo de observación RM-02

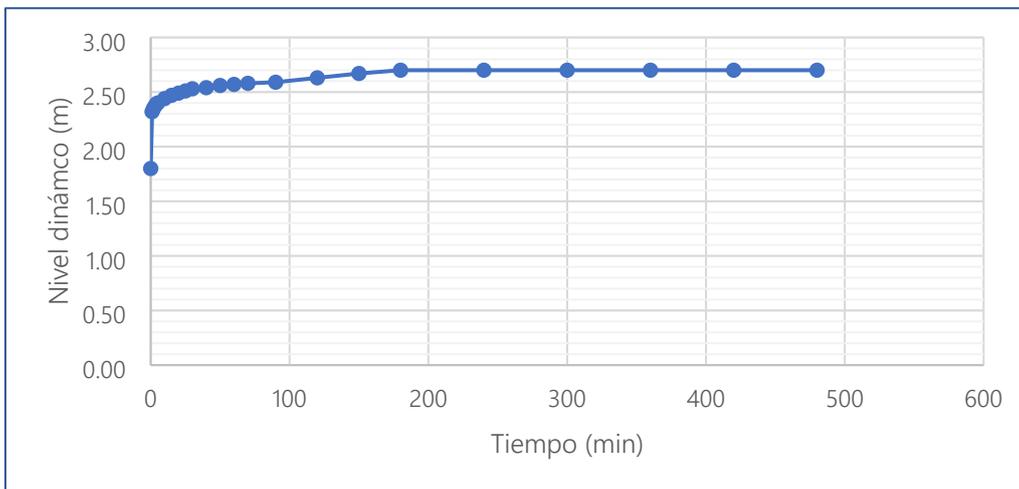


Fuente: Elaborado por la autora

b) Abatimiento vs tiempo

La Figura 4-13, refleja el grado de estabilización de la prueba de bombeo, mediante representación semilogarítmica, enfocando los valores tal que muestre una tendencia lineal, con su respectiva ecuación $y = 0,0836\ln(x) + 0,4383$.

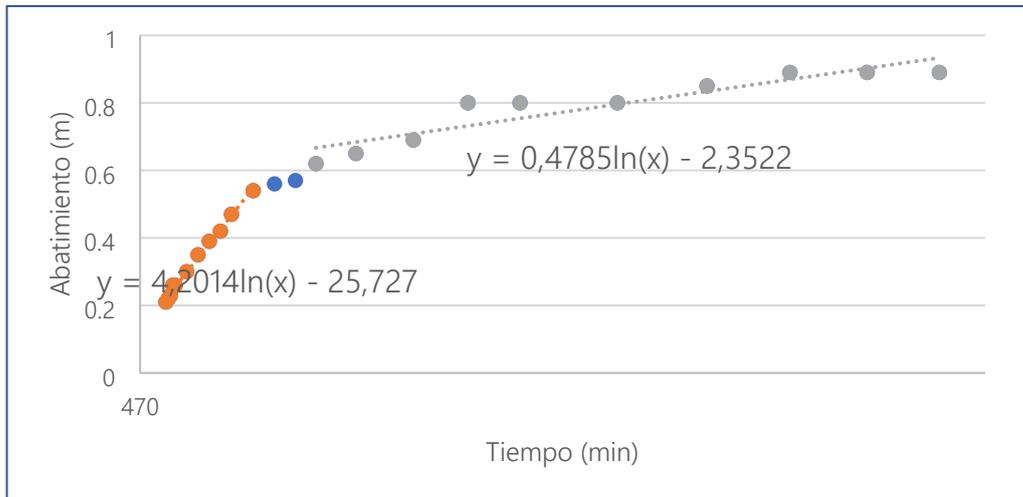
Figura 4-13. Abatimiento vs tiempo - pozo de observación RM-02



Fuente: Elaborado por la autora

c) Recuperación vs tiempo

Figura 4-14. Recuperación vs tiempo - pozo de observación RM-02



Fuente: Elaborado por la autora

En la Figura 4-14, se puede observar la capacidad del acuífero en recibir recarga, de esta manera se identifica que el periodo de recuperación fue de igual manera continuo y progresivo. También se observa la tendencia en línea recta, representada por la ecuación $y = 0,4785\ln(x) - 2,3522$. Y como se realizó anteriormente para el caso de la prueba de bombeo del pozo exploratorio MCH-01 y el piezómetro RM-01, se calcula la transmisividad en las operaciones de bombeo como de recuperación, como se detalla en la Tabla 4-13.

Para el caso de pozos de observación o piezómetros, se obtiene el coeficiente de almacenamiento para operaciones de bombeo, para un radio o distancia con respecto al pozo exploratorio MCH-01 de 57,36 metros.

Tabla 4–13. Cálculo transmisividad y coeficiente de almacenamiento pozo de observación RM-02

Descensos pozo RM-02		Recarga pozo RM-02	
t_1	240	t_1	960
s_1	0,90	s_1	0,93
t_2	15	t_2	550
s_2	0,66	s_2	0,67
Q (l/s)	1,65	Q (l/s)	1,65
Q (m ³ /día)	142,56	Q (m ³ /día)	142,56
T (m²/día) 112,55		T (m²/día) 97,88	

T. representativa (m²/día)	105,22
--	---------------

T (m ² /día)	112,55
t_0	3,67014E-06
r(m)	57,36
S 0,0000003	

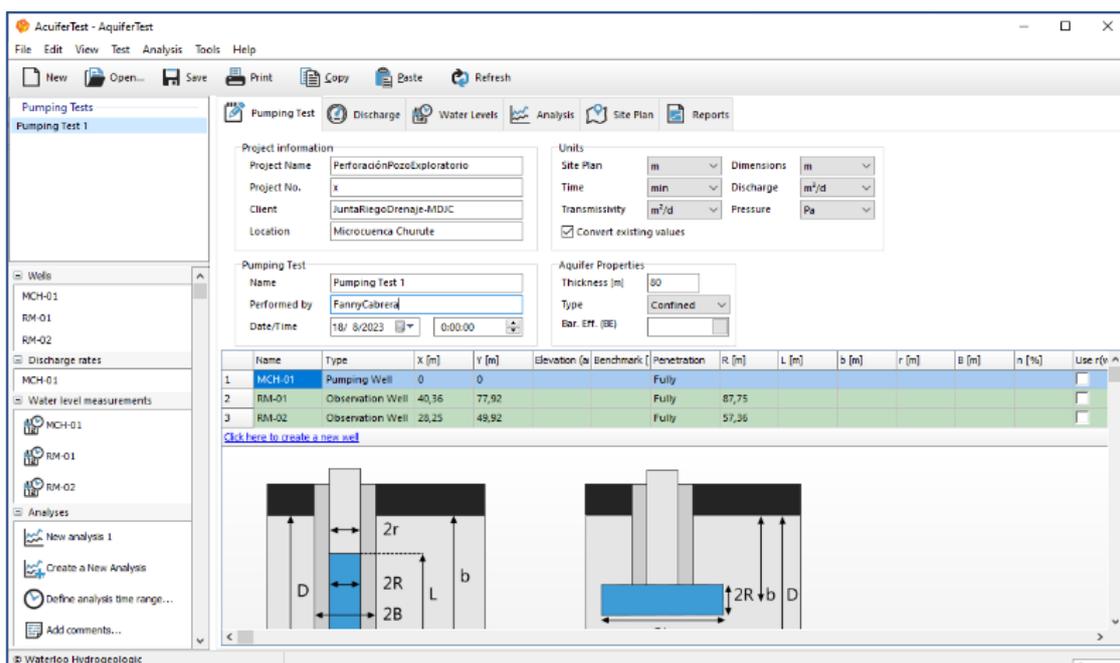
Fuente: Elaborado por la autora

4.2.4 Uso y comprobación mediante el software AquiferTest 2016.1

AquiferTest es un paquete de software diseñado para analizar, interpretar y visualizar datos de pruebas de bombeo. Este proporciona todas las herramientas necesarias para interpretar con precisión datos de todo tipo de acuíferos en todo tipo de condiciones de prueba. Para fines concernientes a este proyecto, se corrieron los datos obtenidos en campo de los tiempos y niveles dinámicos o niveles de agua, para el pozo exploratorio MCH-01, como para los piezómetros RM-01 y RM-02.

- a) Fijación de unidades a trabajar, creación e introducción de los datos del pozo exploratorio MCH-01, como de los piezómetros de observación RM-01 y RM-02.

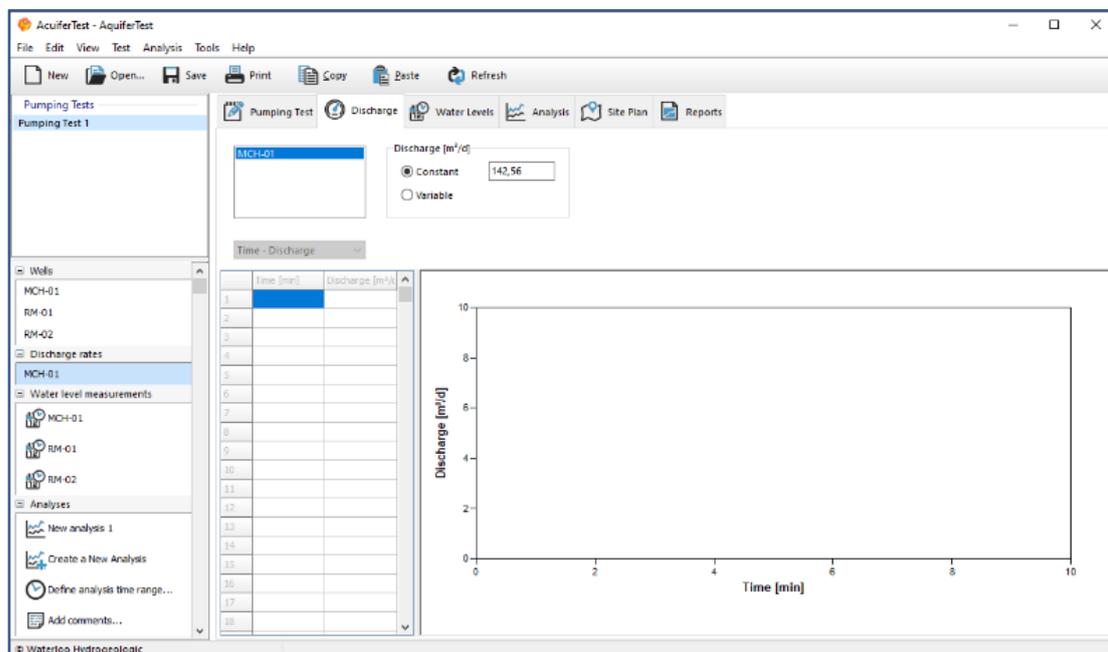
Figura 4-15. Introducción de datos. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

b) Especificación del régimen y el valor del caudal con que se trabaja.

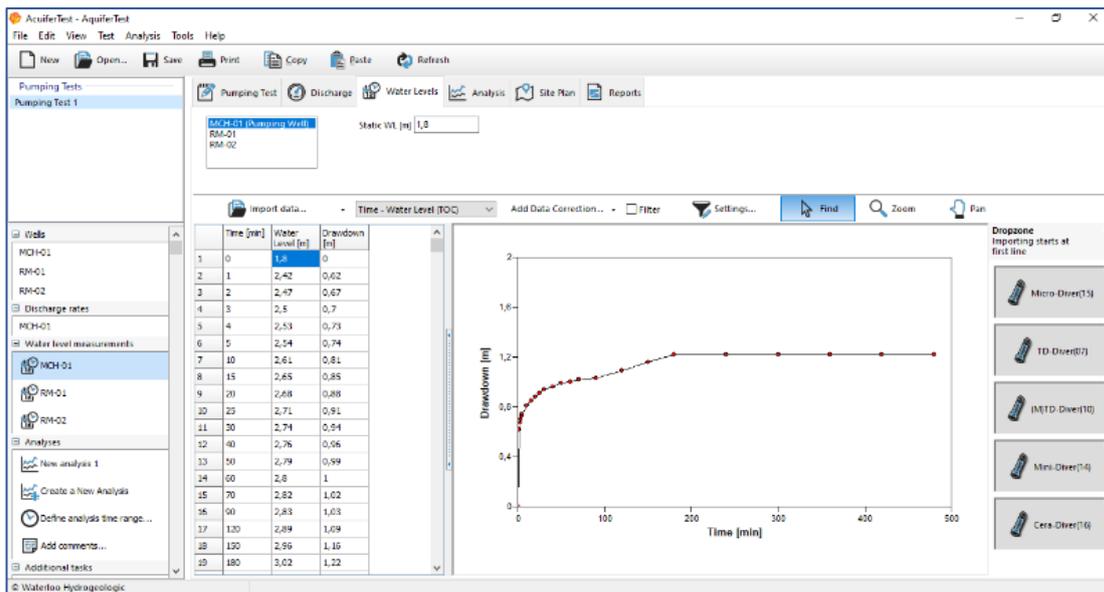
Figura 4-16. Tipo de régimen. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

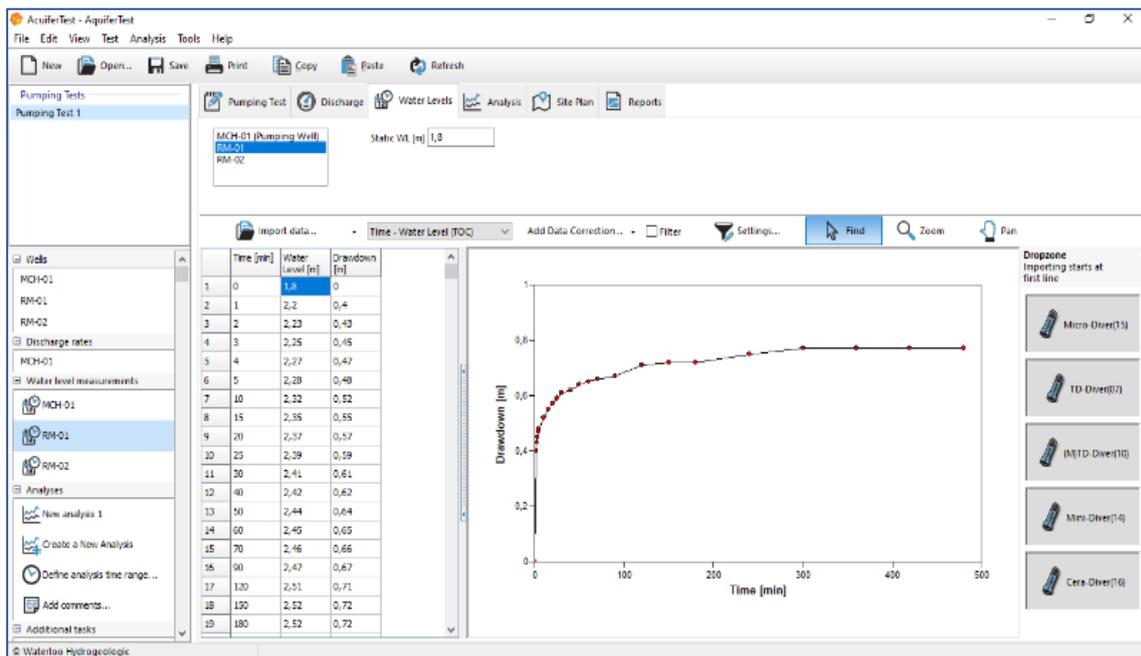
c) Ingreso de los tiempos y niveles dinámicos de cada pozo creado, con su respectivo valor del nivel estático. En esta ventana, los valores para los abatimientos son calculados automáticamente por el software, mostrando la gráfica semilogarítmica (abatimientos vs tiempos) para cada caso.

Figura 4-17. Gráfica (abatimientos vs tiempos) MCH-01. AquiferTest2016.1



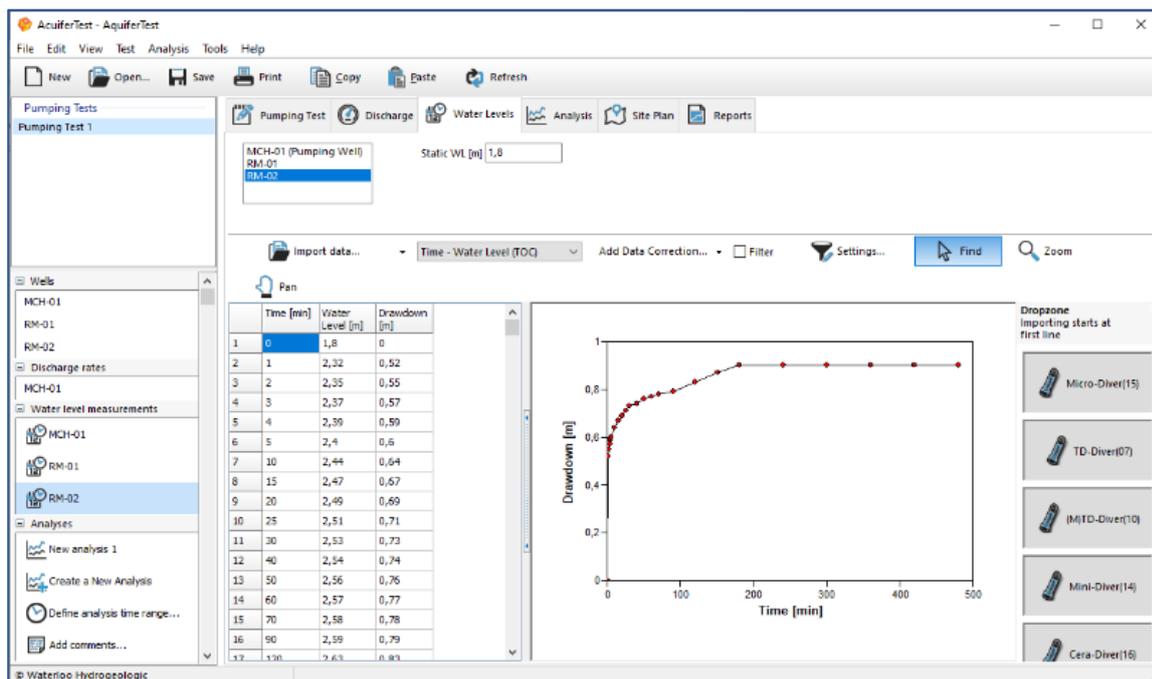
Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

Figura 4-18. Gráfica (abatimientos vs tiempos) RM-01. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

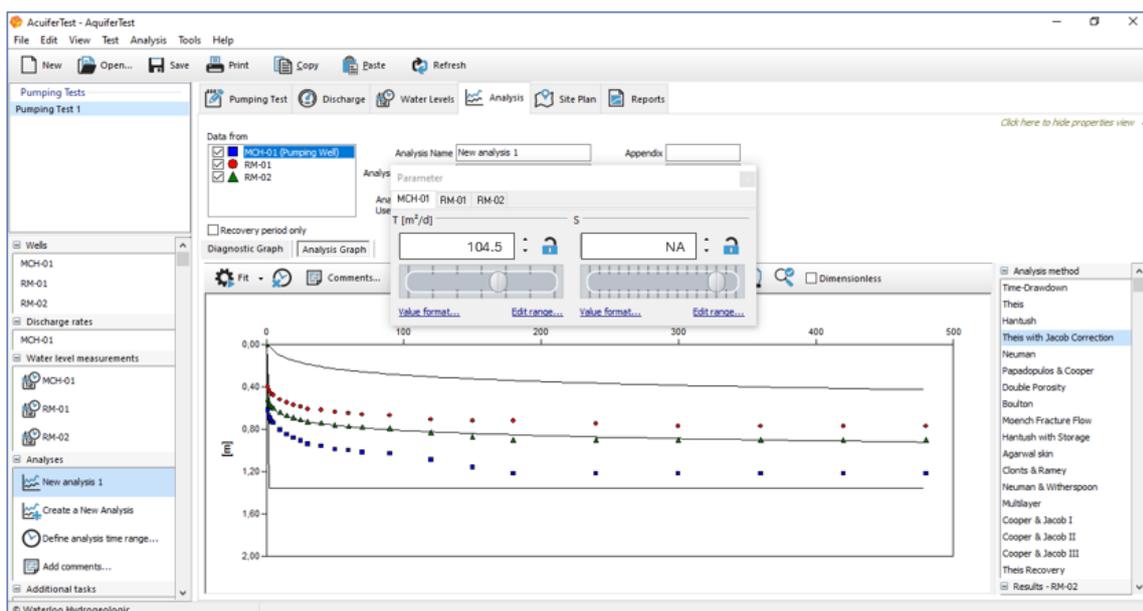
Figura 4-19. Gráfica (abatimientos vs tiempos) RM-02. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

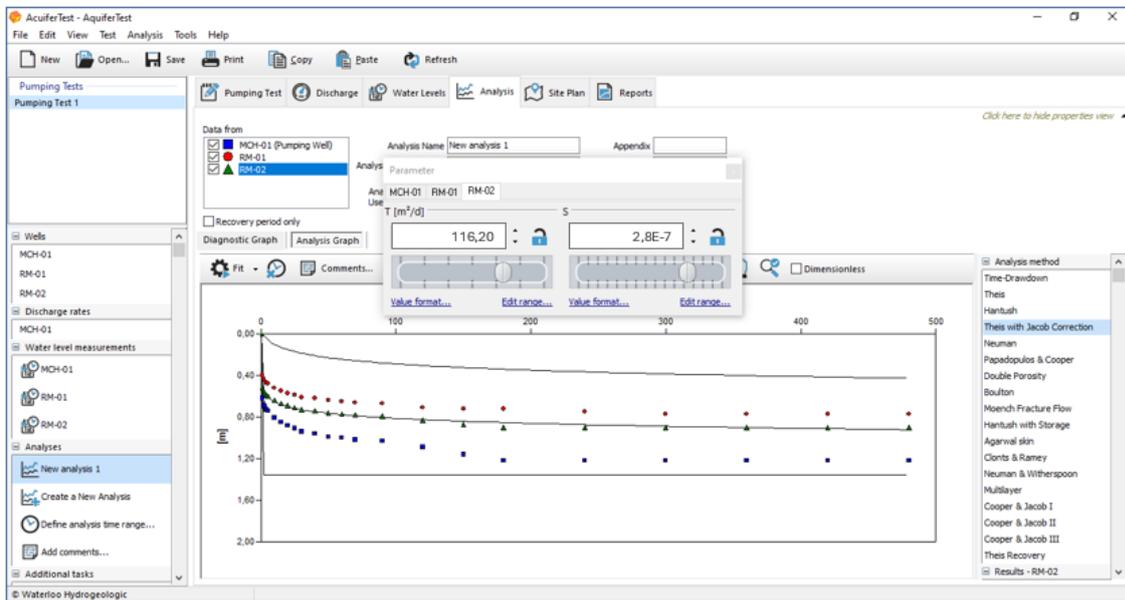
- d) Visualización de los valores obtenidos para la transmisividad (T) y coeficiente de almacenamiento (S) para cada pozo introducido, indicando el método a analizar. Como se muestra en las Figuras 4-20 a 4-22, los valores se aproximan a los calculados en Excel, considerando que para la obtención de (T) y (S), va a depender de los valores $(t_1 - t_2)$ y $(s_1 - s_2)$ escogidos para realizar los cálculos.

Figura 4-20. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento MCH-01. AquiferTest2016.1



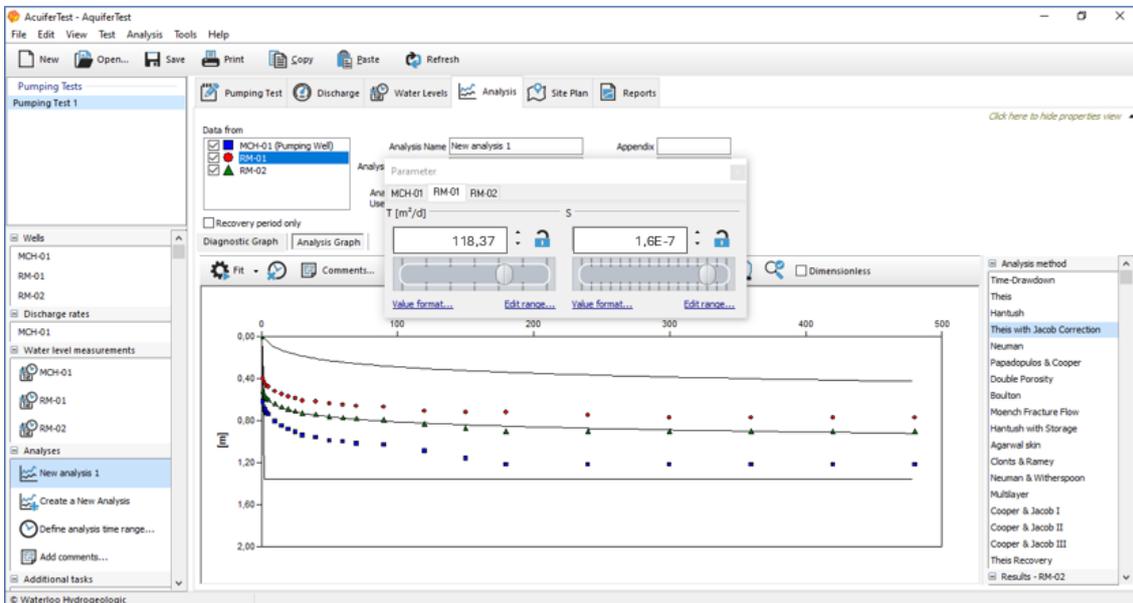
Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

Figura 4-21. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento RM-01. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

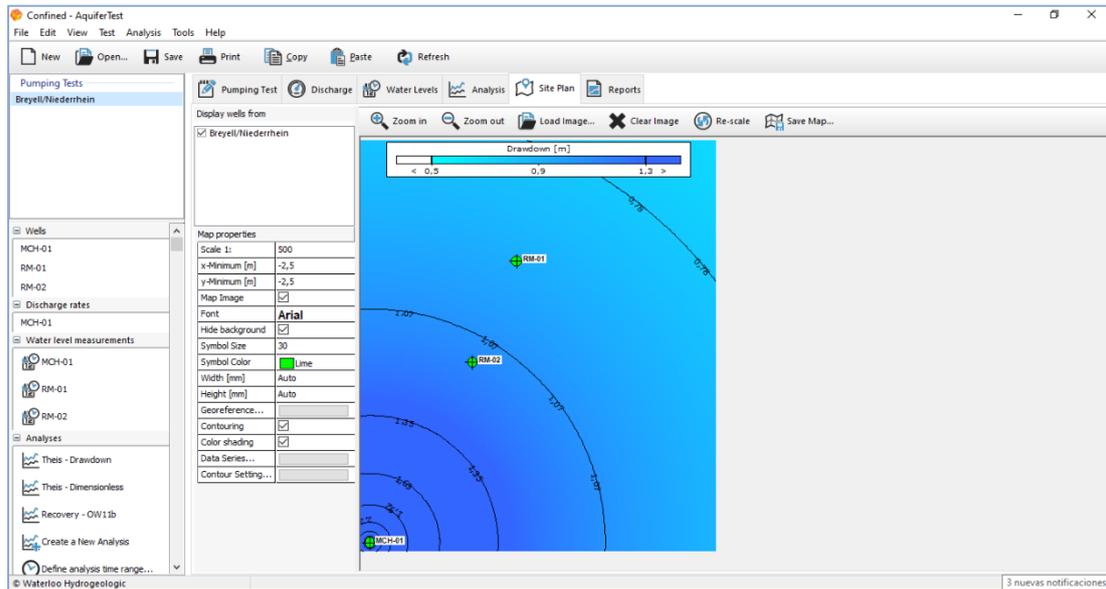
Figura 4-22. Transmisividad y coeficiente de almacenamiento RM-02. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

- e) Ubicación del pozo exploratorio MCH-01 y los piezómetros de observación RM-01/RM-02, según la distancia (radio con respecto al pozo de bombeo) y la dirección del flujo de agua subterránea. Aclarando que, por efectos de visualización, el software no considera el ángulo dirección de los piezómetros con respecto al pozo de bombeo.

Figura 4-23. Ubicación de los pozos en plano y dirección del flujo. AquiferTest2016.1



Fuente: Elaborado por la autora, adaptado en AquiferTest 2016.1

4.2.5 Resumen de datos obtenidos

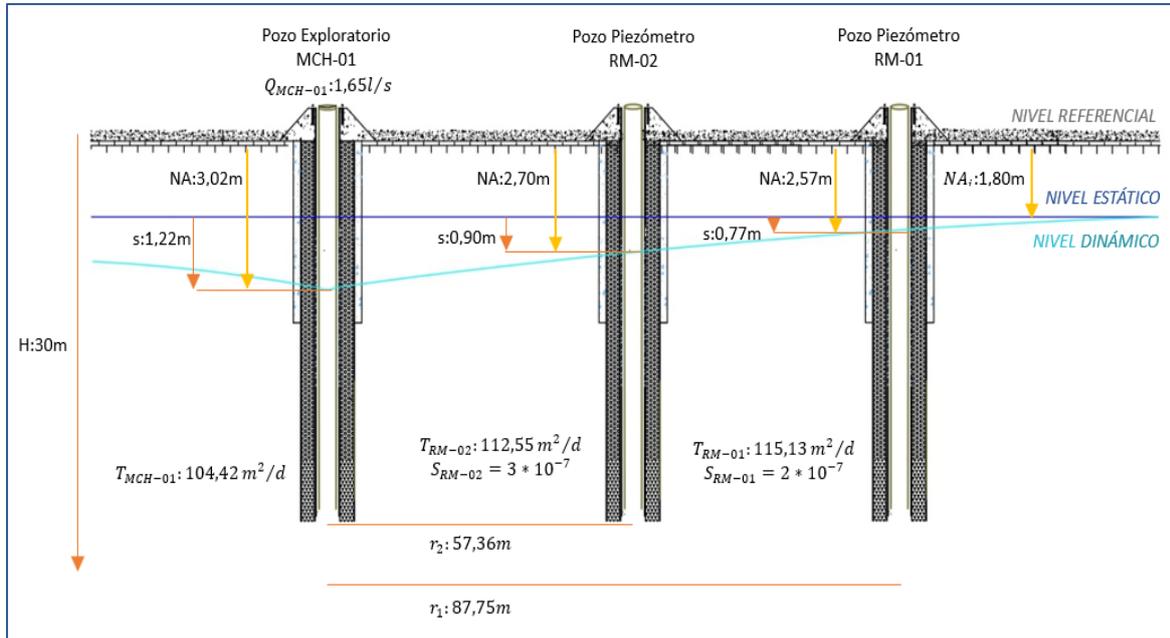
Tabla 4–14. Resumen de datos obtenidos

Pozo	Operaciones en bombeo				Operaciones en recarga			T. promedio (m ² /d)
	N.A (m)	s (m)	T (m ² /d)	S	N.A (m)	s (m)	T (m ² /d)	
MCH-01	3,02	1,22	104,4 2	NA	1,93	1,09	119, 16	111,79
RM-01	2,57	0,77	115,1 3	2E- 7	1,85	0,72	91,0 3	103,08
RM-02	2,70	0,90	112,5 5	3E- 7	1,87	0,83	97,8 8	105,22

Fuente: Elaborado por la autora

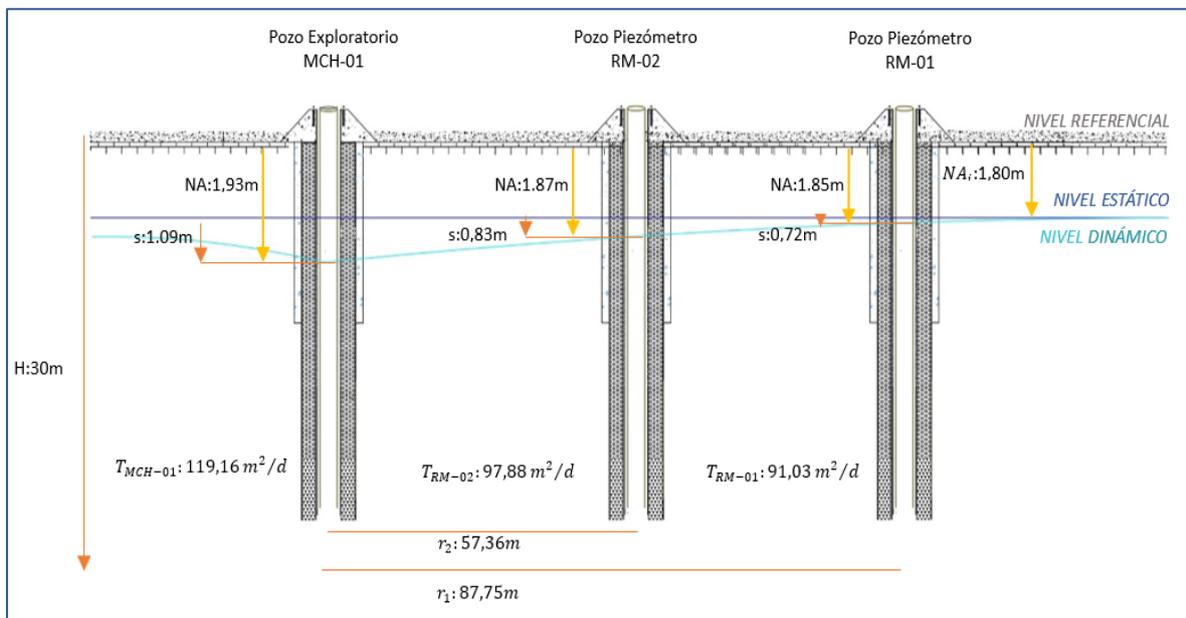
A. Esquema de los pozos utilizados para el estudio del acuífero.

Figura 4-24. Esquema de los pozos en condiciones de bombeo



Fuente: Elaborado por la autora

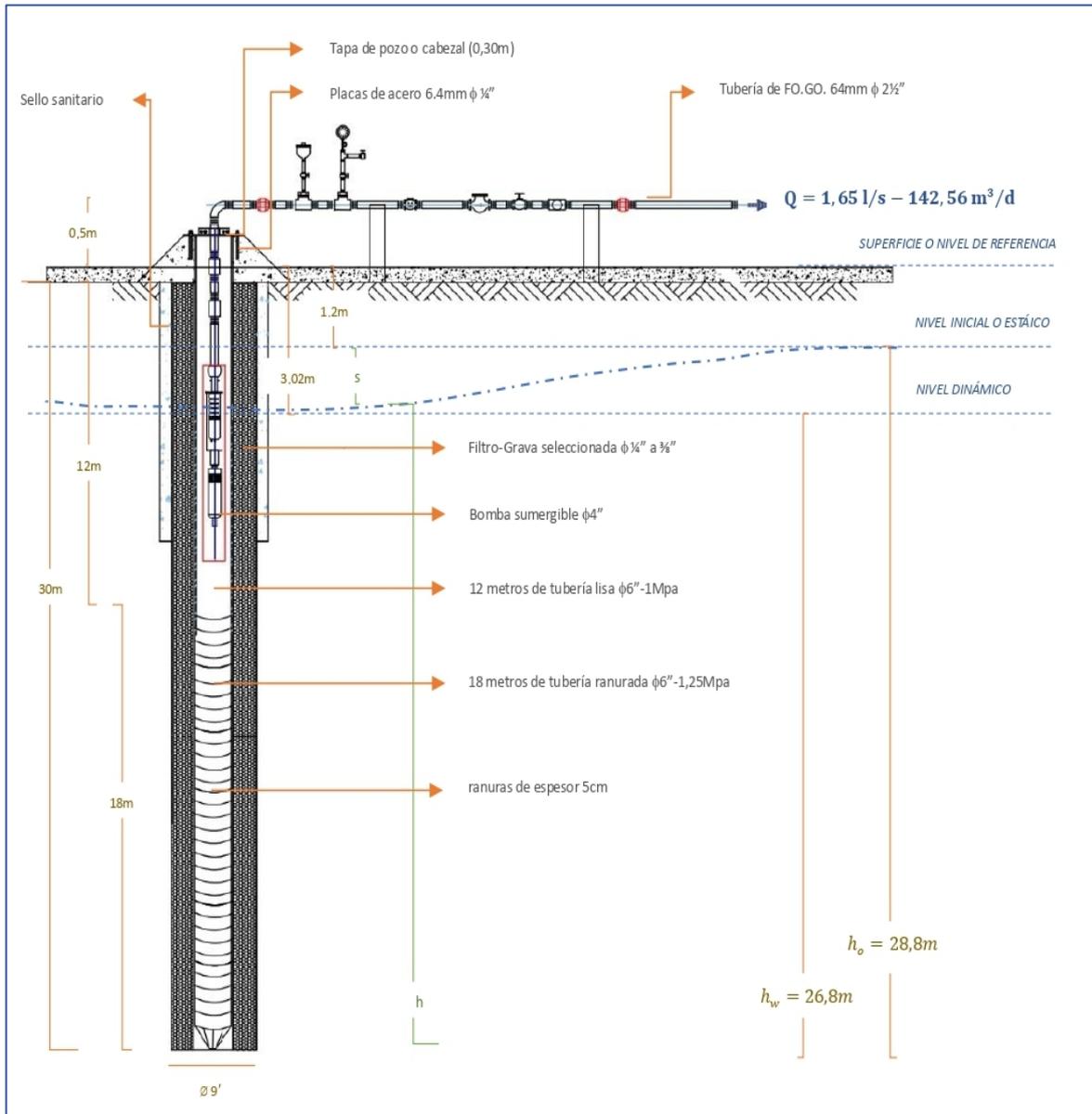
Figura 4-25. Esquema de los pozos en condiciones de recarga



Fuente: Elaborado por la autora

B. Esquema del pozo exploratorio MCH-01

Figura 4-26. Esquema pozo exploratorio MCH-01



Fuente: Elaborado por la autora

Capítulo V

5. Conclusiones y Recomendaciones

En la formación aluvial localizada en la microcuenca Río Churute, específicamente en el recinto Miranda Girón II, se perforó un pozo exploratorio denominado MCH-01 y se realizó las respectivas pruebas de bombeo y de recuperación en 16 horas, alcanzando un abatimiento total de 1,22 metros. De igual manera, se realizó dichas pruebas con duración de 16 horas alcanzando un abatimiento de 0,77 metros, en un pozo de observación o piezómetro denominado RM-01, el cual se encuentra a 87,75 metros del pozo exploratorio MCH-01. Y con un abatimiento de 0,90 metros para el piezómetro RM-02 ubicado a 57,36 metros con respecto a MCH-01.

Los registros obtenidos tanto en las pruebas de bombeo como en recuperación, muestran que las curvas (abatimiento vs tiempo) presentan comportamientos asociados a acuíferos con potencial hidrogeológico de media/alta, es decir con posibilidad de caudales del orden de 10 a 50 (l/s). En cada curva, se analizó la transmisividad cuyos valores obtenidos datan entre los 90 a 120 ($m^2/día$).

De acuerdo a los valores obtenidos para el coeficiente de almacenamiento, que van del orden del $3 * 10^{-7}$ a $2 * 10^{-7}$; determina en la zona de estudio, la presencia de un acuífero semiconfinado, con presencia de material permeable poroso intergranular, gravas y arenas.

El subsuelo del recinto Miranda Girón II, presenta resistividades del orden de 10 a 40 ($\Omega.m$), determinando la ubicación del nivel freático entre los 19 y 19,20 msnm, es decir aproximadamente a tres metros de profundidad desde la superficie; y determinando la presencia de material permeable entre arcilla, arena y gravas; información que fue correlacionada con los estudios litoestratigráficos, determinando porcentajes representativos del orden del 38 al 86% arenas; 6 al 22% limo y del 6 al 26% arcilla, concluyendo la presencia de un suelo generalmente franco-arenoso.

Considerando los resultados de los estudios realizados y las condiciones hidrogeológicas, se concluye que la zona estudiada perteneciente a la Demarcación Hídrica del Guayas, se encuentra apta para la explotación de agua subterránea, con caudales del orden de hasta 50 (l/s), considerando pozos de explotación con una profundidad aprovechable de hasta

100 metros, y espesores para la perforación de pozos tubulares de 14 a 16 pulgadas de tubería de producción y hasta 22 pulgadas de excavación.

Referencias

- Acosta, J. y Andrade, S. (2008). Evaluación de las inundaciones de la cuenca baja del río Guayas datos y manejo. In XI Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo. Quito, Ecuador.
- Alexei A. Bobachev, Igor. N. Modin, Vladimir A. Shevnin, 1990-2000. IPI2WIN
- Anderson, M. y Woessner, W. (1992). Applied Groundwater Modeling: Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press, Nueva York.
- ARCA (Agencia de Regulación y Control del Agua). (2022). Plan estratégico institucional 2018-2021.
- Auge, M. (2008) Métodos geoelectricos para la prospección de agua subterránea.
- Burbano, N., Becerra, S., y Pasquel, E. (2011). Caracterización Hidrogeológica de las Cuencas Portoviejo - Chone. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología. Quito, Ecuador.
- Camacho López y Astudillo Fernández. (2020). Evaluación del aprovechamiento empírico del agua subterránea somera del cantón Morona-Ecuador. Dominio de las Ciencias.
- Camargo, J. (2005). Introducción a la interpretación de perfiles de pozo abierto. Universidad Sur Colombiana. Neiva.
- CEDEGE (Comisión de Estudios para el Desarrollo de la Cuenca del Río Guayas). (2021). Examen especial al manejo y control socio-ambiental del Ecuador.
- CEPIS. OPS-OMS. UNATSABAR. (2000). "Guía para el montaje de la torre de perforación manual para pozos de agua". Perú.
- CODIGEM (Corporación de Desarrollo e Investigación Geológico-Minera-Metalúrgica). (1999). Hoja Geológica: Gualleturo, Naranjal, Guayaquil y Tenguel. Quito, EC. Esc. 1: 100 000.
- Consejo Provincial del Gobierno Autónomo Descentralizado del Guayas. (2021). Ordenanza provincial de aprobación del "Plan de desarrollo y ordenamiento territorial de la provincia del Guayas 2021-2023".
- Custodio, E. y Llamas, M. (1996). Hidrología subterránea. Tomos I y II. Ediciones Omega. Barcelona.
- Davis, S. y De Weist, R. (1966). Hydrogeology. John Wiley and Sons, New York.

Döll, P., Hoffmann-Dobrev, H., Portmann, F.T., et al. (2022). Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage variations, *J. Geodyn.*

Duque, P. (2000). *Léxico Estratigráfico del Ecuador*. Quito, EC, CODIGEM.

Eugenio Núñez del Arco. (2003). *Geología del Ecuador*. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Volumen 10 colección nuestros valores.

FAO (Organización para la Agricultura y la Alimentación). (2009). *Guía para la descripción de suelos*. Roma. Italia.

Foster, S., Garduño, H., Kemper, K., Tuinhof, A., Nanni, M. y Dumars, C. (2006). *Protección de la calidad del agua subterránea definición de estrategias y establecimiento de prioridades*. Banco Mundial.

García, R. (2003). *Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua*. Cátedra de Geofísica. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Gibson Y Singer. (1990). *Manual de Pozos Pequeños*. 7° edición Editorial Limusa-Noriega. México.

Gobierno Autónomo Descentralizado de Naranjal. (2021). *Estudio de Impacto Ambiental. Construcción, operación y mantenimiento del sistema de alcantarillado sanitario de la parroquia Taura*.

González de Vallejo, L. et al. (2004). *Ingeniería Geológica*. Pearson, Prentice Hall, Madrid.

Iglesias, A. (2002) *Hidrogeología*. Capítulo 5 de *Ingeniería Geológica*. Editor: González de Vallejo, L. Edit. Prentice May. Madrid.

INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología). (2022). *Anuario Hidrometeorológico 2022*.

INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC). (2000). *Metodologías de análisis físico químico de suelos, aguas y foliares*. Preparado por S. Alvarado, Estación Experimental Santa Catalina, Laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. Quito. Ecuador.

INIAP (Instituto Nacional Autónomo de Investigaciones Agropecuarias, EC). (2009). *Niveles para la Interpretación de análisis de suelos*. Estación Experimental Santa Catalina, Laboratorio del Departamento de Manejo de Suelos y Aguas. (Hoja de interpretación oficial). Quito. Ecuador.

INGEOMINAS (Instituto de Investigación e Información Geocientífica Minero Ambiental y Nuclear). (2004). Programa de exploración de aguas subterráneas. Bogotá D.C.

Instituto Geográfico Militar del Ecuador. Hojas Topográficas (2000).

INSTITUTO NACIONAL DEL AGUA (UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA) - CORANTIOQUIA. Evaluación Del Potencial Acuífero De Los Municipios De Puerto Berrio Y Puerto Nare, 2003.

Junta de riego y drenaje Manuel J. Calle (2020). "Análisis actualizado del Sistema de Riego y Drenaje Manuel D. J. Calle, La Troncal, Cañar – 2020".

Keith D. y Mays L. (2005). Groundwater Hydrology. Third Edition. Jhon Wiley and Sons.

Kruseman, GP y NA de Ridder, (1994). Análisis y evaluación de los datos de prueba de bombeo (2ª ed.). Publicación 47, Intern. Inst. para la Recuperación y Mejora de Tierras, Wageningen, Países Bajos.

Loke, M. H. (2004): Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies. A practical guide to 2-D and 3-D surveys. University of Birmingham web site, downloads: www.bham.ac.uk/EarthSciences/people/staff/loke_m.html

Núñez del Arco. (2003). Geología del Ecuador. Volumen 10. Colección nuestros valores. Escuela Superior Politécnica del Litoral. Ecuador.

Orellana, E. (1984). Prospección Geoeléctrica en Corriente Continua. 2ª ed. Madrid. Paraninfo. Vol.1.

Orellana, y Mooney. (1966). Tablas y curvas para sondeos eléctricos verticales.

Paredes, M. (2017). Aplicación y Comparación de los Principales Dispositivos Electrónicos en la Prospección Geoeléctrica. Tesis Profesional. Escuela de Geología. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta.

Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia de Taura. (2019). Documento técnico para la planificación y Desarrollo del territorio de la parroquia Taura para el periodo de gestión 2019 -20123.

Prefectura de Cañar (2021). Prefectura de Cañar subscribe convenios para fortalecer sistemas de riego de varias comunidades. <http://www.gobiernodelcanar.gob.ec/>.

Quintana, C. F. (2008). Estrategias y métodos de monitoreo de aguas subterráneas. Curso de aguas subterráneas. Concepción, Chile: Universidad de Concepción.

Rossiter, D. (1996). Evaluación de tierras: éxitos y retos. XIII Congreso Latino Americano de la Ciencia del Suelo. Sao Paulo, Brasil.

Sanders, L. (1998). A manual of Field Hydrogeology. Prentice-Hall.

Secretaría del Agua. (2021). Estado situacional del Ecuador en cuanto al manejo de los recursos hídricos. Oferta y demanda hídrica en Ecuador. Proyecto CEPAL – GIZ.

Soil Survey Staff. (1993). Soil survey manual. Soil Conservation Service. U.S. Department of Agriculture Handbook 18.

Stephens, D.B.; K. Hsu; M.A. Prieksat; M.D. Ankeny; N. Blandford; T.L. Roth; J.A. Kelsey; J.R. Whitworth. (1998). A comparison of estimated and calculated effective porosity. Hydrogeology Journal.

UNESCO (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura). (2022). Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos 2022: aguas subterráneas: hacer visible el recurso invisible.

Vélez, M. (2011). Hidráulica de Aguas Subterráneas. Universidad Nacional de Colombia. Facultad de Minas. Escuela de Geociencia y Medio Ambiente. Tercera Edición.

Villanueva, M. e Iglesias, A. (1984). Pozos y Acuíferos: Técnicas de Evaluación Mediante Ensayos de Bombeo. Madrid: Instituto Geológico y Minero de España.

Ward, S. (1990). Resistivity and Induced Polarization methods, in Ward, S.H. (ed.), Geotechnical and Environmental Geophysics. Soc. of Explor. Geophysicists, 147-189.

Winckell, A.; Zebrowski, C.; Sourdat, M. (1997). Los paisajes naturales del Ecuador. Quito, EC, CEDIG, IPGH, ORSTOM, IGM. v. 2 (Geografía Básica del Ecuador), tomo 4 (Geografía Física). Quito. Ecuador.

Anexos

Anexo A. Tablas de valores referenciales de los parámetros hidrogeológicos de las formaciones.

Tabla A1. Valores estimados de porosidad (%).

ESTRATO	POROSIDAD TOTAL	POROSIDAD EFICAZ
Arcillas	40 a 60	0 a 5
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Shale intacta	1 a 10	0,5 a 5
Shale fracturada/alterada	30 a 50	
Arenisca	5 a 35	0,5 a 10
Calizas, dolomías no carstificadas	0,1 a 25	0,1 a 5
Calizas, dolomías carstificadas	5 a 50	5 a 40
Rocas ígneas y metamórficas sin fracturar	0,01 a 1	0,0005
Rocas ígneas y metamórficas fracturadas	1 a 10	0,00005 a 0,01

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Sanders (1998)

Tabla A2. Valores de coeficiente de almacenamiento para varios tipos de estratos.

MATERIAL PERMEABLE	ACUÍFERO	S (valores medios)
Kárstico: calizas y dolomías jurásicas	Libre	$2 * 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 * 10^{-4}$
	Confinado	$5 * 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 * 10^{-2} - 6 * 10^{-2}$
	Semiconfinado	$1 * 10^{-3} - 5 * 10^{-4}$
	Confinado	$1 * 10^{-4} - 5 * 10^{-5}$
Poroso intergranular, gravas y arenas	Libre	$5 * 10^{-2} - 15 * 10^{-2}$
	Semiconfinado	$1 * 10^{-3}$
	Confinado	$1 * 10^{-4}$
Kársticos y porosos Calcarenitas marinas y terciarias	Libre	$10 * 10^{-3} - 18 * 10^{-2}$

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Iglesias (2022).

Tabla A3. Valores de permeabilidad o conductividad hidráulica.

		Domenico	Smith & W	Freeze	Fetter	Sander s
Sediment os	Grava	25 a 2500	100 a 10 ⁵	100 a 10 ⁶	10 a 1000	
	Grava con arena					
	Arena gruesa	0,1 a 500	0,01 a 1000	1 a 1000	1 a 100	1 a 100
	Arena media	0,1 a 50				
	Arena fina	0,02 a 20			0,01 a 1	
	Arena arcillosa			0,01 a 100	0,001 a 0,1	0,01 a 1
	Silt, loess	10 ⁻⁴ a 2	10 ⁻⁴ a 1	10 ⁻⁴ a 1	0,001 a 0,1	10 ⁻⁴ a 1
	Arcilla	10 ⁻⁶ a 4*10 ⁻⁴	10 ⁻⁷ a 10 ⁻³		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³	10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Arcilla marina inalterada	10 ⁻⁷ a 2*10 ⁻⁴		10 ⁻¹¹ a 10 ⁻		
Rocas Sedimentaria s	Calizas carstificadas	0,1 a 2000	0,05 a 0,5	0,1 a 1000		0,1 a 10 ⁷
	Calizas, dolomías	10 ⁻⁴ a 0,5	0,001 a 0,5	10 ⁻⁴ a 1		10 ⁻⁴ a 1
	Areniscas	3*10 ⁻⁵ a 0,5	10 ⁻⁵ a 1	10 ⁻⁵ a 1		
	Argilitas (siltstone)	10 ⁻⁶ a 0,001				
	Pizarras sedimentarias (Shale) intactas	10 ⁻⁸ a 2*10 ⁻⁴	10 ⁻⁸ a 10 ⁻⁴	10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸		10 ⁻⁴ a 10 ⁻⁸
	Pizarras sed. (Shale) fracturadas/alteradas		10 ⁻⁴ a 1			
Rocas cristalina s	Basalto inalterado, sin fracturar		10 ⁻⁶ a 10 ⁻³			10 ⁻⁶ a 10 ⁻³
	Basalto fracturado/vesicular cuaternario		10 a 1000			0,1 a 10 ⁶
	Escorias basálticas		0,001 a 1000			
	Basalto permeable	0,03 s 2000		0,02 a 1000		
	Rocas ígneas y metamórficas sinfracturar	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵	10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵		10 ⁻⁹ a 10 ⁻⁵
	Rocas ígneas y metamórfica sfracturadas	0,001 a 25	10 ⁻⁵ a 1	0,0005 a 20		10 ⁻⁵ a 1
	Granito alterado	0,3 a 5				
	Gabro alterado	0,05 a 0,3				

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de varios autores.

Tabla A1. Valores de transmisividad.

Valores de Transmisividad	Calificación	Estrato	Posibilidades de presencia de acuífero
$T < 10$	Muy baja	Arcilla compacta, pizarra, granito, limo arenoso	Menos de 1 (l/s) con 10 (m) de depresión
$10 < T < 100$	Baja	Arena fina, arena limosa, caliza poco fracturada, basaltos.	Entre 1 y 10 (l/s) con 10 (m) de depresión
$100 < T < 500$	Media a alta	Arena fina, grava, caliza fracturada	Entre 10 y 50 (l/s) con 10 (m) de depresión
$500 < T < 1000$	Alta		Entre 50 y 100 (l/s) con 10 (m) de depresión
$T > 1000$	Muy alta		Más de 100 (l/s) con 10 (m) de depresión

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Iglesias (2022).

Anexo B. Pruebas de bombeo

Tabla B1. Tipos de pruebas de bombeo

TIPO DE PRUEBA	TIPO DE CAUDAL	CONDICIONES DE ANÁLISIS	DESCRIPCIÓN
Prueba de Bombeo	A caudal constante	Régimen constante o establecido	Rige la evaluación de descensos de niveles una vez que se mantenga constante en el tiempo.
		Régimen variable o transitorio	Rige la evaluación de variación de descensos de niveles en un periodo determinado.
	A caudal variable	Bombeo a caudal crítico	Se mantiene constante el nivel de agua pre establecido, con una variación de tiempos de bombeo
		Bombeo escalonado	Se mide los niveles del agua y sus variaciones al existir cambios de caudal
Prueba de Recuperación	A caudal nulo	Régimen variable o transitorio	Rige la evaluación de recuperación o ascenso de niveles, una vez detenido el bombeo, hasta alcanzar las condiciones iniciales.

Fuente: Elaborado por la autora, adaptado de Villanueva e Iglesias (1984)

Anexo C. Fórmula de Theis

u	1,0	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0	7,0	8,0	9,0
x 1	0,219	0,049	0,013	0,0038	0,00114	0,00036	0,00012	0,000038	0,000012
x 10 ⁻¹	1,82	1,22	0,91	0,70	0,56	0,45	0,37	0,31	0,26
x 10 ⁻²	4,04	3,35	2,96	2,68	2,48	2,30	2,15	2,03	1,92
x 10 ⁻³	6,33	5,64	5,23	4,95	4,73	4,54	4,39	4,26	4,14
x 10 ⁻⁴	8,63	7,94	7,53	7,25	7,02	6,84	6,69	6,55	6,44
x 10 ⁻⁵	10,95	10,24	9,84	9,55	9,33	9,14	8,99	8,86	8,74
x 10 ⁻⁶	13,24	12,55	12,14	11,85	11,63	11,45	11,29	11,16	11,04
x 10 ⁻⁷	15,54	14,85	14,44	14,15	13,93	13,75	13,60	13,46	13,34
x 10 ⁻⁸	17,84	17,15	16,74	16,46	16,23	16,05	15,90	15,76	15,65
x 10 ⁻⁹	20,15	19,45	19,05	18,76	18,54	18,35	18,20	18,07	17,95
x 10 ⁻¹⁰	22,45	21,76	21,06	20,84	20,66	20,66	20,50	20,37	20,25
x 10 ⁻¹¹	24,75	24,06	23,65	23,36	23,14	22,96	22,81	22,67	22,55
x 10 ⁻¹²	27,05	26,36	25,95	25,66	25,44	25,26	25,11	24,97	24,86
x 10 ⁻¹³	29,36	28,66	28,26	27,97	27,75	27,56	27,41	27,28	27,16
x 10 ⁻¹⁴	31,66	30,97	30,56	30,27	30,05	29,87	29,71	29,58	29,46
x 10 ⁻¹⁵	33,96	33,27	32,86	32,58	32,35	32,17	32,02	31,88	31,76

$$u = r^2 S / (4Tt)$$

Tabla C1. Tabla Wenzel (1942) para los valores de función de pozo W(u), en términos de (u).

Fuente: Villanueva e Iglesias (1984)

Anexo D. Resultados análisis de los estratos del suelo perforado



ESTACIÓN EXPERIMENTAL DEL LITORAL SUR
"DR. ENRIQUE AMPUERO PAREJA"
LABORATORIO DE SUELOS, TEJIDOS VEGETALES Y AGUAS
Km. 26 Vía Durán - Tambo Apolo. Postal 09-01-7069 Yaguachi - Guayas - Ecuador
 Teléfono: 042724280 - 042724119 e-mail: labasuelos@iniap.gob.ec

LABORATORIO DE ENSAYO
ACREDITADO POR EL SAE
N°OAE LE C 11-007

INFORME DE ANALISIS DE SUELOS

DATOS DEL PROPIETARIO	
Nombre :	FANNY CABRERA
Dirección :	NE
Ciudad :	NE
Teléfono :	NE
Fax :	NE

DATOS DE LA PROPIEDAD	
Nombre :	S/N
Provincia :	SUAYAS
Cantón :	NE
Parroquia :	NE
Ubicación :	CHURUTE

DATOS DE LA MUESTRA	
Informe No. :	00224
Responsable Muestreo :	Cliente
Fecha Muestreo :	20/08/2023
Fecha Ingreso :	21/08/2023
Condiciones Ambientales :	T°C:23.8 %H: 54.1
Factura No. :	9750
Fecha Análisis :	26/08/2023
Fecha Emisión :	27/08/2023
Fecha Impresión :	28/08/2023
Cultivo Actual :	VACÍO

N° Laborat.	Identificación	* Textura (%)			* Clase Textural	meq/100ml			mS/cm	(%)		meq/100ml			Ca Mg Ca+Mg			
		Arena	Limo	Arcilla		* Al+H	* Al	* Na		C.E.	* M.O.	K	* Ca	* Mg	Σ Bases	Mg	K	K
77922	MUESTRA 1 (5 METROS)	38	36	26	Franco													
77923	MUESTRA 2 (10 METROS)	66	6	8	Arena-Franca													
77924	MUESTRA 3 (15 METROS)	68	22	10	Franco-Arenoso													
77925	MUESTRA 4 (20 METROS)	64	10	6	Arena-Franca													
77926	MUESTRA 5 (25 METROS)	82	12	6	Arena-Franca													
77927	MUESTRA 6 (30 METROS)	64	22	14	Franco-Arenoso													

Abreviatura	Interpretación	C.E.
Ad	+ Adecuado	80
L	+ Ligero	5
T	+ Tónico	85

Abreviatura	Interpretación
C.E.	Conductividad Eléctrica
M.O.	Materia Orgánica
CIC	Capacidad de Intercambio Cationico

Abreviatura	Metodología	Extracción
M.O.	Walkley Black	Luzmer 20%
OC		Azulado de Amonio
Na		Cloruro de Bario
C.E.	Extracto de pasta saturada	Agua

Abreviatura	Unidad	Valor	Unidad	Valor	Unidad	Valor	
Al+H	0.01 - 1.0	C.E.	2.0 - 4.0	Ca/Mg	2.0 - 8.0	K	0.2 - 0.4
Al	0.01 - 1.0	Meq/100ml				Ca	4 - 8
Na	0.5 - 1.0	M.O.	3.1 - 5.0	(Ca+Mg)/K	12.0 - 50.0	Mg	1 - 2

NE = No entregado

*CLC = Menor al Límite de Cuantificación
 Los resultados marcados en este informe, corresponden únicamente a la(s) muestra(s) sometida(s) al ensayo.
 Los ensayos marcados con (*) no están incluidos en el alcance de acreditación solicitado al SAE.
 Las opiniones, interpretaciones, etc. que se indican a continuación, están fuera del alcance de acreditación solicitado al SAE.
 ** Ensayo subcontratado.
 Se prohíbe la reproducción parcial, si se va a copiar que sea en su totalidad.
 Los datos marcados con cursiva y subrayados son proporcionados por el cliente.

[Firma]
Responsable Técnico del Laboratorio
[Firma]
Agda Lina Acosta

Página 2 de 3