



UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERIA
ESCUELA DE INGENIERIA GEOLÓGICA
ESTADO MÉRIDA



Trabajo Final de Grado

**MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL
ACUIFERO DUACA, EL ENEAL, PERARAPA DEL
MUNICIPIO CRESPO, ESTADO LARA**

Como requisito para optar al título de Ingeniero Geólogo en la ilustre
Universidad de los Andes

www.bdigital.ula.ve

AUTORA

Br. Alba T. Bermúdez R.

Tutor Académico
Ing. Ricardina Díaz

Tutor Industrial
Lcdo. Manuel Figuera

Julio, 2014

Reconocimiento-No comercial-Compartir igual

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE GENERAL.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS.....	ix
ÍNDICE DE ECUACIONES.....	xi
AGRADECIMIENTOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPITULO I	
GENERALIDADES	
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	4
1.2. OBJETIVOS.....	5
1.2.1. Objetivo general.....	5
1.2.2. Objetivos específicos.....	5
1.3. JUSTIFICACIÓN.....	5
1.4. ALCANCES.....	6
1.5. LIMITACIONES.....	7
1.6. ANTECEDENTES.....	8
CAPITULO II	
MARCO REFERENCIAL	
2.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	12
2.2. RELIEVE.....	13
2.3. GEOMORFOLOGÍA.....	14
2.4. CLIMA.....	15
2.4.1. Precipitación.....	15
2.4.2. Temperatura.....	16
2.5. HIDROGRAFÍA.....	16
2.6. SUELO.....	17
2.7. VEGETACIÓN.....	19

2.8. GEOLOGÍA GENERAL	20
2.8.1. Geología regional	20
2.8.2. Estratigrafía regional.....	22
2.8.3. Geología estructural	25
2.9. GEOLOGÍA LOCAL	27
2.10. HIDROGEOLOGÍA LOCAL	28

CAPITULO III. MARCO TEÓRICO

3.1. HIDROGEOLOGÍA	31
3.2. CICLO HIDROLÓGICO	33
3.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN VENEZUELA	34
3.4. UNIDADES GEOLÓGICAS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO	35
3.4.1. Acuitardo.	35
3.4.2. Acuicludo.....	35
3.4.3. Acuífugo.....	35
3.4.4. Acuífero.	35
3.4.4.1. Tipos de acuífero según el material que lo conforman	36
3.4.4.2. Tipos de acuífero según su presión hidrostática	36
3.5. PARÁMETROS HIDRÁULICOS	38
3.5.1. Porosidad	38
3.5.2. Permeabilidad.....	39
3.5.3. Transmisividad.....	40
3.5.4. Almacenamiento específico	41
3.5.5. Coeficiente de almacenamiento.....	42
3.5.6. Gradiente hidráulico.....	43
3.6. BALANCE HÍDRICO	44
3.7. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA	48
3.8. PARÁMETROS DEL POZO	48
3.8.1. Abatimiento.....	48

3.8.2. Radio de influencia	49
3.8.3. Profundidad del agua.....	49
3.8.4. Nivel estático	49
3.8.5. Nivel dinámico	50
3.8.6. Aforo	50
3.8.6.1. Métodos de aforo.....	50
3.8.7. Nivel piezométrico	52
3.9. GRANULOMETRÍA Y LÍMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO.....	52
3.9.1. Clasificación de los suelos.....	53
3.9.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).....	53
3.9.3. Límite de Atterberg	55
3.10. PRUEBAS DE BOMBEO	57
3.10.1. Tipos de ensayos de bombeo.....	58
3.10.1.1. Método de recuperación, régimen variable	59
3.11. GEOESTADÍSTICA	61
3.12. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	61
3.13. ZONIFICACIÓN	61
3.14. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO.....	62
 CAPITULO IV.	
MARCO METODOLÓGICO	
4.1. ETAPA I. DOCUMENTACIÓN	66
4.1.1. Investigaciones previas del área de estudio	66
4.1.2. Revisión cartográfica	66
4.1.3. Revisión de imágenes satelitales.....	67
4.1.4. Diseño de las pruebas de bombeo	68
4.2. ETAPA II. CAMPO	70
4.2.1. Inventario de pozos	71
4.2.2. Mediciones realizadas en campo.....	72
4.2.3. Toma de muestras de suelo	74
4.2.4. Desarrollo de las pruebas de bombeo.	76

4.3. ETAPA III. LABORATORIO	81
4.3.1. Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el Tamiz de 4,75 mm (n° 4).....	81
4.3.2. Análisis granulométrico de la fracción fina.....	82
4.3.3. Determinación del Límite líquido.....	83
4.3.4. Determinación del Límite plástico	83
4.4. ETAPA IV. OFICINA	84
4.4.1. Obtención y compensación de datos obtenidos de las pruebas de bombeo.....	84
4.4.2. Adquisición de los parámetros hidráulicos del acuífero	86
4.4.3. Gradiente hidráulico.....	95
4.4.4. Determinación del balance hídrico.....	95
4.4.5. Elaboración de mapas	99
4.4.5.1. Mapa base.....	99
4.4.5.2. Mapa geológico	100
4.4.5.3. Mapa de pendientes.....	101
4.4.5.4. Mapas con interpolación.....	101
4.4.5.5. Modelo digital del terreno	108
4.4.6. Construcción del modelo hidrogeológico conceptual.....	109
4.4.6.1. Mapas de contorno y superficies 3D	111
4.4.6.2. Volumen de agua del acuífero.....	114
4.4.7. Zonificación de acuerdo al potencial hidráulico	115
4.4.8. Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación	118
4.4.8.1. Factores que determinan el índice de vulnerabilidad	121

CAPITULO V.

PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS.....	130
5.1.1. Ubicación de pozos e hidrografía	130
5.1.2. Pendientes del área de estudio	131

5.1.3. Geología local y estructural	132
5.1.4. Unidades hidrogeológicas	134
5.1.5. Piezometría y dirección de flujo preferencial	135
5.1.6. Caudales	137
5.1.7. Conductividades eléctricas	138
5.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL ACUÍFERO	139
5.2.1. Coeficiente de almacenamiento.....	140
5.2.2. Transmisividad y conductividad hidráulica.....	141
5.3. BALANCE HÍDRICO	143
5.3.1. Recarga por precipitación.....	144
5.4. ESPESOR SATURADO DEL ACUÍFERO	146
5.5. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LAS MUESTRAS DE SUELO ...	147
5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL.....	149
5.6.1. Volumen de agua del acuífero	151
5.6.2. Volumen de agua extraíble del acuífero	153
5.7. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN.....	154
5.8. ZONIFICACIÓN DE ACUERDO AL POTENCIAL HIDRÁULICO DEL ACUÍFERO.	155
CONCLUSIONES	159
RECOMENDACIONES.....	162
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	164
REFERENCIAS ELECTRÓNICAS.....	171
ANEXOS.....	174

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 2.1. Ubicación del área de estudio	12
Fig. 2.2. Hidrografía y relieve del área de estudio	14
Fig. 2.3. Gráfico de precipitación (PP) vs evapotranspiración (ETP) con datos tomados de la estación de Duaca (1990-2013).	16
Fig. 2.4. Distribución espacial de los suelos en el área	18
Fig. 2.5. Distribución espacial de las clases texturales en el estado Lara	19
Fig. 2.6. Vegetación característica del área de estudio	20
Fig. 2.7. Mapa geológico del estado Lara.....	21
Fig. 2.8. Columna estratigráfica regional del estado Lara	25
Fig. 2.9. Mapa de fallas cuaternarias del área de estudio	27
Fig. 3.1. Ciclo hidrológico	33
Fig. 3.2. Esquema de un acuífero libre y un acuífero confinado.....	37
Fig. 3.3. Esquema de un acuífero libre y un acuífero semiconfinado	37
Fig. 3.4. Valores estimados del coeficiente de almacenamiento para cada tipo de acuífero.....	42
Fig. 3.5. Esquema explicativo del gradiente hidráulico.....	43
Fig. 3.6. Esquema explicativo del gradiente hidráulico con dos puntos.....	43
Fig. 3.7. Esquema explicativo del abatimiento en un pozo.....	49
Fig. 3.8. Medición de aforo, método volumétrico	50
Fig. 3.9. Medición de aforo, método de la escuadra.....	51
Fig. 3.10. Carta de plasticidad de A. Casagrande	55
Fig. 3.11. Plasticidad del material, límites de Atterberg.....	56
Fig. 3.12. Tipos de ensayos de bombeo.....	58
Fig. 3.13. Recta de recuperación, prueba de bombeo.....	60
Fig. 4.1. Esquema metodológico	65
Fig. 4.2. Diseño de la prueba de bombeo en el software <i>Diver-Office</i>	69
Fig. 4.3. Ajuste de la prueba de bombeo en el software <i>Diver-Office</i>	69
Fig. 4.4. Equipo utilizado para realizar el método volumétrico	73

Fig. 4.5. Escuadra utilizada para realizar el método de la trayectoria	73
Fig. 4.6. Sonda automática de medición	74
Fig. 4.7. Conductivímetro utilizado en campo.....	74
Fig. 4.8. Toma de muestra del suelo	75
Fig. 4.9. Ubicación de los puntos de muestreo del suelo	76
Fig. 4.10. Modelo de <i>MicroDiver</i> y esquema de medición en el pozo.....	77
Fig. 4.11. Modelo de <i>BaroDiver</i> y esquema de medición fuera del pozo.....	78
Fig. 4.12. Ajuste del <i>Diver</i> para ingresarlo en el pozo	78
Fig. 4.13. Pozo sin orificio para ingresar el <i>MicroDiver</i>	79
Fig. 4.14. Ubicación de pozos con pruebas de bombeo	80
Fig. 4.15. Descarga de datos de los <i>MicroDiver</i> al programa.....	85
Fig. 4.16. Datos registrados por el <i>Diver</i> durante la prueba de bombeo	85
Fig. 4.17. Compensación barométrica de los datos registrados	86
Fig. 4.18. Importando archivos al <i>AquiferTest</i>	87
Fig. 4.19. Gráfica tiempo vs. Abatimiento en el <i>AquiferTest</i>	88
Fig. 4.20. Gráfico de tiempo vs abatimiento de la prueba del pozo 3	89
Fig. 4.21. Gráfico tiempo vs. abatimiento de la recuperación del pozo 5	92
Fig. 4.22. Determinación del gradiente hidráulico en el área de estudio	95
Fig. 4.23. Elaboración del mapa base del área de estudio en <i>ArcGIS 9.3</i> .	100
Fig. 4.24. Construcción del mapa de pendientes en <i>ArcGIS 9.3</i>	101
Fig. 4.25. Método de interpolación en <i>ArcGIS 9.3</i>	102
Fig. 4.26. Método de interpolación en <i>Surfer 11</i>	102
Fig. 4.27. Generación de las líneas de flujo en el mapa piezométrico.....	104
Fig. 4.28. Adquisición de los valores de niveles dinámicos generados de la interpolación.....	106
Fig. 4.29. Elaboración del mapa de transmisividades en <i>ArcGIS 9.3</i>	107
Fig. 4.30. Construcción de las curvas de niveles a cada 10 metros.....	108
Fig. 4.31. Construcción del modelo digital del terreno en <i>ArcScene</i>	109
Fig. 4.32. Obtención de variogramas experimentales y teóricos	111
Fig. 4.33. Parámetros del variograma añadidos a la malla.....	112

Fig. 4.34. Construcción del modelo conceptual	113
Fig. 4.35. Visualización de cada capa del modelo conceptual del acuífero	114
Fig. 4.36. Cálculo del volumen del acuífero.....	114
Fig. 4.37. Volumen entre las dos capas calculado por el programa	115
Fig. 4.38. Reclasificación de los parámetros en el programa <i>ArcGIS</i>	117
Fig. 4.39. Aplicación de la herramienta <i>Raster Calculator</i>	117
Fig. 4.40. Álgebra de mapas.....	118
Fig. 4.41. Distribución de los niveles estáticos	122
Fig. 4.42. Reclasificación de los niveles estáticos (Dr).....	123
Fig. 4.43. Reclasificación del parámetro litología del acuífero (Ar).....	124
Fig. 4.44. Reclasificación del parámetro tipo de suelo (Sr)	125
Fig. 4.45. Reclasificación de las pendientes del área de estudio (Tr).....	126
Fig. 4.46. Reclasificación de la conductividad hidráulica (Cr).....	128
Fig. 4.47. <i>Raster Calculator</i> en <i>ArcGIS</i> para determinar el índice de vulnerabilidad.....	128
Fig. 5.1. Mapa de ubicación de pozos	131
Fig. 5.2. Mapa de pendientes del área de estudio.....	132
Fig. 5.3. Mapa geológico del área de estudio	133
Fig. 5.4. Mapa de unidades hidrogeológicas	135
Fig. 5.5. Mapa piezométrico y líneas de dirección preferencial	136
Fig. 5.6. Mapa de caudales del área de estudio	138
Fig. 5.7. Mapa de conductividades eléctricas del área de estudio.....	139
Fig. 5.8. Mapa de transmisividad del área de estudio	142
Fig. 5.9. Gráfico precipitación vs. evapotranspiración potencial	144
Fig. 5.10. Mapa de espesor saturado del acuífero	146
Fig. 5.11. Resumen de las características granulométricas de las muestras de suelo.....	148
Fig. 5.12. Modelo hidrogeológico conceptual	151
Fig. 5.13. Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación	155
Fig. 5.14. Zonificación del acuífero de acuerdo a su potencial hidráulico...	156

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1. Delimitación de la zona de estudio según sus coordenadas	13
Tabla 3.1. Valores estimados de porosidad efectiva y porosidad eficaz de distintos materiales	39
Tabla 3.2. Clasificación de terrenos por la conductividad hidráulica	40
Tabla 3.3. Valores de la transmisividad	41
Tabla 3.4. Coeficiente de escorrentía	46
Tabla 3.5. Valores del coeficiente K para distintos diámetros de tuberías... ..	52
Tabla 4.1. Inventario de pozos	71
Tabla 4.2. Ubicación de puntos donde se tomaron las muestras de suelo... ..	75
Tabla 4.3. Ubicación de pozos donde se realizaron pruebas de bombeo	79
Tabla 4.4. Parámetros de la prueba del pozo 3.....	88
Tabla 4.5. Parámetros de la prueba del pozo 5.....	89
Tabla 4.6. Tiempos y abatimientos durante la recuperación de la prueba de bombeo del pozo 5.	90
Tabla 4.7. Clasificación climática según el índice de humedad.....	98
Tabla 4.8. Caudales medidos en la etapa de campo.....	102
Tabla 4.9. Conductividades eléctricas medidas en el área de estudio	103
Tabla 4.10. Datos de los niveles estáticos y piezométricos medidos en la etapa de campo	103
Tabla 4.11. Datos de los espesores saturados determinados para el área de estudio	105
Tabla 4.12. Valores de transmisividades de pozos en el área de estudio ..	107
Tabla 4.13. Espesores de cada capa para el modelo conceptual	110
Tabla 4.14. Reclasificación de los espesores saturados del área	116
Tabla 4.15. Reclasificación de los valores de transmisividad	116
Tabla 4.16. Pesos asignados a cada factor DRASTIC	119
Tabla 4.17. Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca ...	120
Tabla 4.18. Niveles estáticos del área de estudio	121

Tabla 4.19. Valoración para el parámetro, profundidad del agua (Dr).....	122
Tabla 4.20. Valoración para el parámetro, recarga (Rr)	123
Tabla 4.21. Valoración para el parámetro, litología del acuífero (Ar).....	124
Tabla 4.22. Valoración para el parámetro, cubierta edáfica bajo la superficie del terreno (Sr).....	125
Tabla 4.23. Valoración para el parámetro, topografía (Dr)	125
Tabla 4.24. Tipo de material de la zona no saturada.....	126
Tabla 4.25. Valores de conductividades hidráulicas calculadas	127
Tabla 4.26. Valoración del parámetro, conductividad hidráulica (Cr)	127
Tabla 5.1. Balance hídrico del área de estudio	144
Tabla 5.2. Comparación entre el volumen total del acuífero, el volumen de roca permeable y el volumen de agua	153

www.bdigital.ula.ve

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 3.1. Porosidad total	38
Ecuación 3.2. Porosidad eficaz.....	38
Ecuación 3.3. Permeabilidad	39
Ecuación 3.4. Transmisividad	40
Ecuación 3.5. Almacenamiento específico	41
Ecuación 3.6. Coeficiente de almacenamiento	42
Ecuación 3.7. Gradiente hidráulico	44
Ecuación 3.8. Balance hídrico	44
Ecuación 3.9. Escorrentía.....	46
Ecuación 3.10. Recarga del acuífero.....	46
Ecuación 3.11. Relación de valores para aplicación de balance hídrico a nivel de acuífero.....	47
Ecuación 3.12. Método de la trayectoria.....	51
Ecuación 3.13. Nivel piezométrico.....	52
Ecuación 3.14. Índice de plasticidad.....	56
Ecuación 3.15. Índice de retracción.....	57
Ecuación 3.16. Método de recuperación, régimen variable, transmisividad	59
Ecuación 4.1. Simplificación de Jacob - Cooper.....	93
Ecuación 4.2. Determinación de la transmisividad por regimen variable	93
Ecuación 4.3. Coeficiente de almacenamiento, expresión Jacob - Cooper .	94
Ecuación 4.4. Conductividad hidráulica	95
Ecuación 4.5. Determinación del gradiente hidráulico	95
Ecuación 4.6. Fórmula de ETP calculada para el estado Lara	97
Ecuación 4.7. Índice de humedad.....	98
Ecuación 4.8. Recarga por precipitación	99
Ecuación 4.9. Escorrentía.....	99
Ecuación 4.10. Transmisividad, régimen permanente.....	107

AGRADECIMIENTOS

Todos los errores humanos son fruto de la impaciencia, interrupción prematura de un proceso ordenado, obstáculo artificial levantado alrededor de una realidad artificial.

Franz Kafka

A mi madre, por apoyarme en todo momento y haberme dado la oportunidad de tener una excelente educación en el transcurso de mi vida, y que con su vivir me ha demostrado que en el camino hacia la meta se necesita de la dulce fortaleza para aceptar las derrotas y del sutil coraje para derribar los miedos.

A la Universidad de Los Andes, por formarme profesionalmente y permitirme alcanzar las metas. A la Facultad de Ingeniería y a la Escuela de Ingeniería Geológica, mil gracias.

A la profesora Ricardina Díaz, por servirme de guía y aportarme todas las nociones y conocimientos necesarios para llevar a cabo este trabajo.

A la coordinación de Hidrología Subterránea del INAMEH por integrarme al equipo de trabajo de la institución. Gracias, en especial a mi tutor el Lcdo. Manuel Figuera por los conocimientos aportados, y a Pedro Díaz y al Lcdo. Fernando Decarli por todo su apoyo y colaboración.

A la familia León Linares, por recibirme en su hogar como una integrante más, aportándome todo su apoyo y permitiéndome poder realizar este trabajo de grado, mil gracias.

A las personas que me brindaron su amistad y su apoyo incondicional a lo largo de toda mi carrera estudiantil; José David, Luiggi, Marianggy, Gabriela y Yorfrank.

A mis familiares, viejos amigos y a quienes recién se sumaron a mi vida para hacerme compañía con sus sonrisas de ánimo. A mi familia, sobre todo a mis primos Antonio y Orlando por todo el apoyo que me brindaron. Y a Maikí, porque aprendimos que nuestras diferencias se convierten en riqueza cuando existe respeto y verdadera amistad.

A todos, gracias totales.

MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL DEL ACUÍFERO DUACA, EL ENEAL Y PERARAPA DEL MUNICIPIO CRESPO, ESTADO LARA

Bermúdez, Alba ⁽¹⁾; Ricardina, Díaz ⁽²⁾; Manuel, Figuera ⁽³⁾
(1) albabermudez452@gmail.com, (2) Tutor Académico: ricardinad@ula.ve,
(3) Tutor Industrial: mfiguera@inameh.gob.ve

RESUMEN

La finalidad del presente trabajo consiste en construir un modelo hidrogeológico conceptual para comprender el comportamiento del acuífero ubicado en las poblaciones de Duaca, El Eneal, y Perarapa del municipio Crespo, estado Lara. El área de estudio está caracterizada por depósitos y terrazas cuaternarias conformadas de gravas, arenas y arcillas emplazadas sobre formaciones de edad Cretácica (Formación Mamey), constituida principalmente de esquistos pizarrosos. La principal unidad acuífera corresponde a litologías gravo-arenosas que conforman la capa permeable del acuífero, con presencia de lentes arcillosos que confinan la parte superior del acuífero. Basado en la red piezométrica, se observó que la dirección preferencial del flujo subterráneo es noreste-suroeste, siguiendo la pendiente del terreno a lo largo del valle de Duaca. Los parámetros hidráulicos se estimaron por medio de la interpretación de una prueba de bombeo de larga duración con caudal constante mediante el método de recuperación de Theis y el método de régimen permanente de Thiem. Los valores obtenidos de la conductividad hidráulica son consistentes con la literatura para materiales de arenas arcillosas a arenas medias. El comportamiento del acuífero es de tipo semiconfinado, y de acuerdo a la transmisividad obtenida se clasifica como un acuífero de baja a mediana importancia hidrogeológica, lo que permitió realizar una zonificación de acuerdo a su potencial hidráulico, encontrándose las mejores zonas de aprovechamiento hacia la población de Duaca.

Palabras clave: modelo hidrogeológico conceptual, prueba de bombeo, parámetros hidráulicos, zonificación, Duaca.

INTRODUCCIÓN

El recurso hídrico subterráneo es fundamental para la civilización, porque supone la mayor reserva de agua dulce de las regiones habitadas por los seres humanos. A nivel global, el agua subterránea representa el 20% del agua dulce de la Tierra (Clarke y King, 2004), ahí la importancia de esta agua como reserva y recurso para las actividades del día a día de los seres humanos. Por lo que el conocimiento de este recurso, su evaluación, explotación racional y conservación son de vital importancia y de gran valor para el consumo humano, así como el desarrollo agrícola, económico e industrial de una región.

En el estado Lara, específicamente en el municipio Crespo, se han evidenciado problemas en cuanto al suministro de agua potable. Dicho municipio se abastece principalmente de las aguas subterráneas presentes en la zona, mediante el bombeo de pozos. Por otro lado, distintos organismos pretenden realizar extracciones de agua para suministrar a un complejo habitacional al norte de Duaca, por lo que la finalidad del presente trabajo es realizar un modelo hidrogeológico conceptual, que permita evaluar las condiciones de las aguas subterráneas y realizar una zonificación de las áreas de aprovechamiento de acuerdo al potencial hidráulico del acuífero.

A fin de evitar la sobre explotación y su contaminación, debido a su difícil renovación, se hace indispensable la realización de prospecciones hidrogeológicas que ayuden a comprender el comportamiento del agua subterránea, que den base a que a futuro se puedan diseñar planes de gestión que considere las características geológicas e hidrogeológicas del acuífero, los factores de escorrentía subterránea, hidrogeoquímica, balance de aguas subterráneas y conocimiento de las zonas de recarga, características técnicas y económicas de las obras de captación, posibilidades técnicas y económicas de explotación y las políticas a largo plazo de la explotación.

Sin embargo, el objetivo principal de esta investigación es conocer los parámetros hidráulicos del acuífero con la ejecución de pruebas de bombeo, medición de niveles estáticos y dinámicos, medición de caudales de extracción de los pozos, además del reconocimiento de la geología de la zona, y la revisión bibliográfica de los perfiles litológicos realizados en la zona de estudio por otros autores, y así generar mapas de distribución de los parámetros hidrogeológicos e hidráulicos que permitan posteriormente establecer áreas de aprovechamiento del acuífero.

La presente investigación se desarrolla con base en cinco capítulos, los cuales comprenden un capítulo I, denominado generalidades, que consiste básicamente en el planteamiento del problema, objetivos, justificación, alcances, limitaciones y antecedentes; un capítulo II, marco referencial, que muestra la ubicación y los aspectos fisiográficos, así como la geología histórica y estructural del área en estudio; un capítulo III, marco metodológico, que expone las bases teóricas utilizadas en la investigación; un capítulo IV, marco metodológico, donde se plantea esquemáticamente y a detalle la metodología empleada para cumplir los objetivos establecidos y por último un capítulo V que se basa en representar los resultados e interpretaciones de acuerdo a la metodología aplicada, en los que se incluyen los mapas de cada parámetro estudiado, tablas y fotografías. Por último, se generan las conclusiones generadas de la interpretación de los resultados y las recomendaciones establecidas para que a futuro se puedan implementar líneas estratégicas para el control de producción y aprovechamiento del acuífero.

www.bdigital.ula.ve **CAPITULO I**
GENERALIDADES

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El problema de abastecimiento de agua potable es un asunto de interés mundial, por lo que se estudia el agua subterránea como recurso hídrico con la finalidad de abastecer las necesidades de la creciente población y establecer un control integrado en el manejo de este recurso tan importante. El agua subterránea en numerosas ocasiones presenta mejor calidad y mayores reservas de agua aprovechable que las corrientes superficiales, además se ven poco afectadas por cambios climáticos.

En algunos sectores del estado Lara, se han presentado numerosos problemas referentes a la escasez del suministro hídrico. Uno de esos sectores abarca a las poblaciones pertenecientes al Municipio Crespo, que debido a las pocas precipitaciones en el área, rasgo característico de un clima subhúmedo seco, se intensifica el problema de abastecimiento del recurso. Otro agente influyente en la escasez de dicho recurso, es el creciente desarrollo poblacional, agrícola, comercial e industrial en la zona, además de la construcción de un complejo habitacional cerca de la población de Duaca, donde existirá un desarrollo urbanístico que albergará aproximadamente 25000 personas, el cual no posee fuentes cercanas de aguas superficiales que permitan satisfacer las necesidades humanas básicas de dicha comunidad, por lo que pretenden extraer el recurso hídrico de los acuíferos de la población de Duaca y sus alrededores.

Es por ello que se requiere hacer una evaluación hidrogeológica e hidráulica del área de estudio, el cual permita conocer las condiciones en la que se encuentra el acuífero, que conlleve a la zonificación de la zona, de acuerdo a su potencial hidráulico y esta pueda ser usada como herramienta para una mejor gestión del recurso de agua subterránea en el municipio Crespo.

1.2. OBJETIVOS

1.2.1. Objetivo General

- Elaborar un modelo hidrogeológico conceptual caracterizando el comportamiento hidráulico del acuífero Duaca, El Eneal, Perarapa del municipio Crespo del estado Lara, estableciendo áreas de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo.

1.2.2. Objetivos Específicos

- Evaluar los parámetros hidráulicos del acuífero, a través de ensayos de bombeo y tomas de muestra de suelo.
- Determinar el balance hídrico climático a nivel de acuífero obteniendo información de infiltración.
- Construir el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero.
- Establecer zonas de aprovechamiento del recurso hídrico de acuerdo al potencial del acuífero.

1.3. JUSTIFICACIÓN

Las pocas precipitaciones, el aumento de la población y el mal uso y aprovechamiento del recurso hídrico han convertido la disponibilidad de agua potable en un problema, no sólo en Venezuela sino a nivel mundial. La contaminación de recursos hídricos, que pueden en el futuro ser de mayor demanda que otros recursos naturales, es una realidad en muchos países del planeta.

La función principal de la Coordinación de Hidrología Subterránea, perteneciente al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (en adelante INAMEH) es la supervisión, evaluación y monitoreo del recurso hídrico subterráneo a nivel nacional. Para cumplir con sus objetivos es necesario

realizar los estudios e investigaciones hidrogeológicas pertinentes a fin de determinar la dinámica y el comportamiento de los cuerpos hídricos subterráneos que permita un aprovechamiento sostenible en concordancia con el desarrollo del país.

La realización de éste estudio tiene la finalidad de generar un modelo hidrogeológico que permita relacionar los parámetros hidrogeológicos e hidráulicos característicos del acuífero, con el fin de elaborar propuestas de aprovechamiento que permitan contribuir con el desarrollo del municipio Crespo del estado Lara.

La unidad operativa del INAMEH en el estado Lara es la pionera en las regiones que ejercen la actividad hidrometeorológica, en donde se ha planificado actualizar y complementar la información existente en las área de hidrología y meteorología, por lo que será de importancia el aporte de nuevas ideas y propuestas que conduzcan a promover un aprovechamiento sustentable del recurso hídrico, optimizando su disponibilidad en la zona.

1.4. ALCANCES

La presente investigación pretende realizar el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero ubicado entre las poblaciones de Duaca, El Eneal y Perarapa, pertenecientes al municipio Crespo, del estado Lara, con la finalidad de actualizar y complementar la información hidrogeológica del área de estudio y poder establecer zonas de aprovechamiento del acuífero de acuerdo a su potencial hidráulico.

Se requiere obtener la mayor cantidad de parámetros posibles para elaborar una zonificación con miras al desarrollo de estrategias que garanticen un aprovechamiento sustentable del acuífero, además de evaluar la vulnerabilidad a la contaminación que presenta el acuífero, generando mapas de vulnerabilidad. De esta manera poder optimizar el suministro de agua en la

zona de estudio, evitando la extracción excesiva de esta vital fuente subterránea sin ocasionar daños que afecten al acuífero.

1.5. LIMITACIONES

Una de las principales limitantes es la poca información de parámetros hidráulicos de los pozos dentro del área de estudio, ya que impide obtener una idea de las posibles características del acuífero. Otra de las restricciones en el desarrollo de esta investigación es la falta de una serie extensa de datos pluviométricos y agrometeorológicos actualizados. En la zona se encuentran las estaciones pluviométricas Duaca y Bobare, pero entre ellas no es posible realizar una interrelación de datos debido a las distancias que las separan y a la elevada topografía presente entre ambas. También existe una estación climatológica del aeropuerto de Barquisimeto pero se encuentra muy alejada del área de estudio por lo que los valores de precipitación no serían adecuados para la investigación por la poca representatividad de los mismos.

Otras de las limitantes, es la poca disponibilidad de los propietarios de los pozos para realizar las pruebas de bombeo, como por ejemplo, alegan no poder mantener el pozo en funcionamiento por el número de horas necesarias para bombear o apagar el pozo en determinado tiempo, ya que son esencialmente de uso agrícola y el proceso afecta sus ciclos de riego diario. Además en aquellas parcelas donde hubo receptividad por parte de los productores, y los pozos estaban equipados con bombas eléctricas, las interrupciones de la energía eléctrica afectaba el desarrollo de la prueba. También sucede que algunos pozos no tienen el espacio u orificio para insertar los dispositivos con que se realizan los registros de la prueba de bombeo.

Por otro lado, la mayoría de los pozos son de poca profundidad, por lo tanto, los datos hidráulicos obtenidos no reflejan las características de todo el espesor saturado.

1.6. ANTECEDENTES

- **Conde, E., Narváez, G., y Sanz, J. (2000)** en su trabajo final de grado titulado “Evaluación potencial del acuífero ubicado entre las poblaciones Duaca – El Eneal del Municipio Crespo, estado Lara, con fines de abastecimiento urbano” de la Universidad Centrooccidental Lisandro Alvarado, realizaron el procesamiento de los datos obtenidos en campo con el uso de software como *Visual ModFlow 2.5*, *Surfer 7*, *GWW*, que permitieron la modelación del comportamiento de los niveles piezométricos del acuífero para diferentes situaciones de extracción y recarga. En este trabajo final de grado se realizaron perforaciones de 10 pozos a fin de obtener el dato real de las litologías que componen al acuífero, encontrándose arenas, gravas, arcillas y limos, además de esquistos pizarrosos.
- **Rojas, M. (2003)** en su trabajo final de grado titulado “Modelo Hidrogeológico del acuífero de la cuenca baja del río Motatán, estado Trujillo” obtuvieron y analizaron los parámetros hidrogeológicos del acuífero permitiendo calcular el volumen de roca permeable, las reservas permanentes y la permeabilidad, clasificando al acuífero como permeable de regular a bueno. Por otro lado, también realizaron estudios de calidad de agua subterránea mediante el análisis de los parámetros físico-químicos donde consideraron que el agua de dicho acuífero es apta para el consumo humano, basándose en los valores establecidos en el Decreto 883 de fecha 11 de octubre de 1995 publicado según la Gaceta Oficial nº 5.021, Extraordinario, de fecha 18 de Diciembre de 1995.
- **Pérez, A. y Rodríguez, T. (2005)** en su trabajo final de grado titulado “Evaluación de la disponibilidad del recurso de agua subterránea en la población de Duaca, estado Lara” de la Universidad de Los Andes, determinaron algunas propiedades hidráulicas como la transmisividad y el

coeficiente de almacenamiento; así como el modelo de las capas permeables del acuífero, permitiendo determinar un valor de aproximadamente 30.000.000 m³ de volumen de reservas permanentes del acuífero.

- **Mora, J. (2006)** en su trabajo final de grado titulado “Evaluación del acuífero comprendido entre los ríos Masparro y Boconó en el estado Barinas” donde determinaron los valores hidráulicos y el volumen de reservas permanentes del acuífero. Obtuvo las zonas de recarga del acuífero estableciendo que ocurre por infiltración de la corriente superficial y consiguiente flujo subterráneo. Por otro lado determinó la calidad del agua dando como resultado aceptable para el consumo humano y riego.
- **Sánchez, K. (2007)**, en su trabajo final de grado titulado “Disponibilidad de agua subterránea en la cuenca de la quebrada La Virgen, Los Teques, estado Miranda” elaboró un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero ubicado dentro de la quebrada La Virgen, en los alrededores de las instalaciones de INTEVEP, donde realizaron pruebas de bombeo y obtuvo los parámetros hidráulicos del acuífero como permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento, para finalmente determinar las zonas de recarga por precipitación de la zona y determinaron el tipo de acuífero.
- **Landaeta, Y. (2009)** en su proyecto final de grado “Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico con fines de aprovechamiento urbano en el eje Duaca-El Eneal, Municipio Crespo, estado Lara” donde realizaron una recopilación de datos hidrogeológicos y caracterizaron la cuenca que alimenta al acuífero y obtuvo que el mismo presenta poca capacidad con respecto a la demanda de agua generada por el crecimiento poblacional que se provee, y recomienda que se cumplan las normas legales que conduzcan a la preservación del recurso.

- **Mejía, J., Jégat, H., Mora, L. y Linares, M. (2010)** en un artículo titulado “Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela)” de la Revista Geográfica Venezolana, Vol. 52, evaluaron los parámetros hidrogeológicos para construir el modelo que les permitió obtener las reservas permanentes y, posteriormente, utilizaron para obtener el modelo matemático con el que se establecerían los escenarios de explotación.
- **Martínez, L. y Zerpa, G. (2010)** como parte del estudio integrado para la caracterización hidrogeológica de Venezuela, desarrollada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH), realizaron la evaluación hidrogeológica de las reservas de agua subterránea del acuífero del Valle de Quíbor, estado Lara, para obtener una serie de conocimientos técnicos sobre las reservas de agua subterránea de dicho acuífero.
- **Gómez, M. (2013)** en su trabajo final de grado titulado “Evaluación del recurso hídrico subterráneo en el eje Duaca, El Eneal, Perarapa, municipio Crespo, estado Lara” evaluó los parámetros hidrogeológicos del acuífero permitiendo delimitar las unidades hidrogeológicas y calcular el volumen de roca permeable y las reservas disponibles de agua subterránea del acuífero, además de determinar las secciones estratigráficas del área de estudio.

CAPITULO II

MARCO REFERENCIAL

www.bdigital.ula.ve

2.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio está ubicada en el municipio Crespo, específicamente en el eje localizado entre el valle de Duaca, la población de El Eneal y Perarapa, en la región centro occidental del país, al noreste del estado Lara y formando parte de la depresión de Barquisimeto. Posee una superficie de 87,32 km².

Al norte de Barquisimeto, a unos 30 km aproximadamente, se encuentra el municipio Crespo, con una elevación media de 700 m.s.n.m. y alberga una población de alrededor 49.697 habitantes según el censo realizado por el Instituto Nacional de Estadística en el año 2011. Sus principales actividades económicas son la agricultura, la ganadería y el comercio.

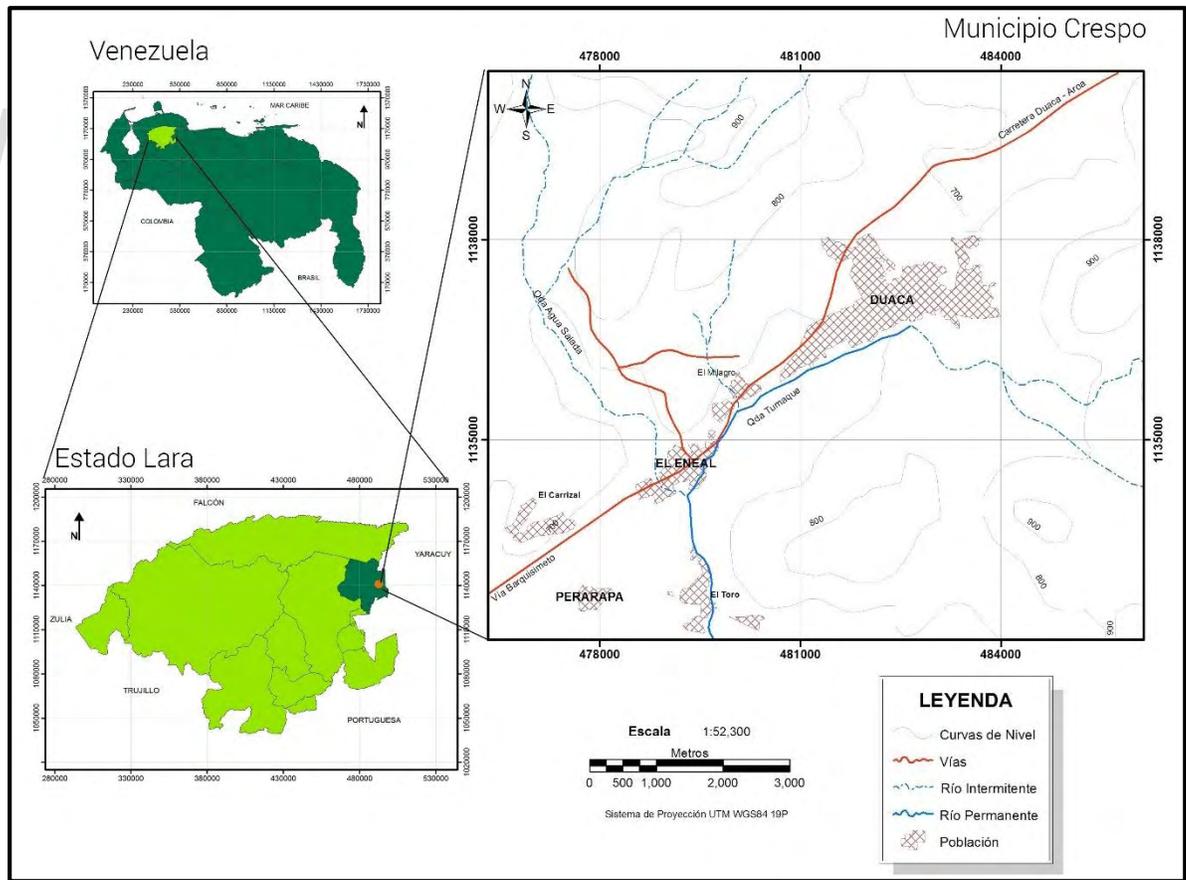


Figura 2.1. Ubicación del área de estudio.

La ubicación geográfica corresponde a la hoja cartográfica Maracaibo, número NC 19 IV a escala 1:500.000 y sus coordenadas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 2.1. Delimitación de la zona de estudio según sus coordenadas.

Punto de Referencia	Coordenadas UTM	Coordenadas geográficas
Duaca	1137842 N	10°17'36" N
	482855 E	69°09'24" W
El Eneal	1134961 N	10°16'02" N
	478877 E	69°11'34" W
Perarapa	1132213 N	10°14'32" N
	477700 E	69°12'13" W

2.2. RELIEVE

La parte central del estado Lara es una región de confluencia de los Sistemas Andino, Coriano y la Cordillera de la Costa, por lo cual está constituida por paisajes montañosos, interrumpidos por las distintas depresiones existentes en el área. El Sistema Andino está representado por las Sierras de Barbacoas y Portuguesa, que pueden considerarse como las últimas estribaciones de Los Andes, están localizadas al sur y suroeste de la zona, con alturas inferiores a los 3.600 metros, registrando la mayor altitud del estado en el Páramo de Cendé con 3.549 metros. Hacia la parte norte del área encontramos el sistema coriano representado por las Sierras de Baragua, Matatere y Bobare con alturas máximas de unos 1.400 metros. El tramo occidental de la Cordillera de la costa representado por la Serranía de Aroa conforma la parte centro-oriental del estado, dicha serranía termina en la población de Duaca, con alturas máximas de 1.000 metros. La Serranía de Bobare está separada de la Serranía de Aroa por la depresión de Barquisimeto-Duaca (Bellizzia, A. y Rodríguez, D., 1966).

De manera local, la zona de estudio posee un relieve caracterizado por sistemas de colinas bajas que van desde los 600 hasta los 900 m.s.n.m., con laderas redondeadas que se encuentran ubicadas hacia el oeste de la población de Duaca, hasta terrazas de bajas pendientes al suroeste, con un valle de topografía uniforme donde se emplazan las poblaciones de Duaca, El Eneal, Perarapa y El Toro (Fig. 2.2).

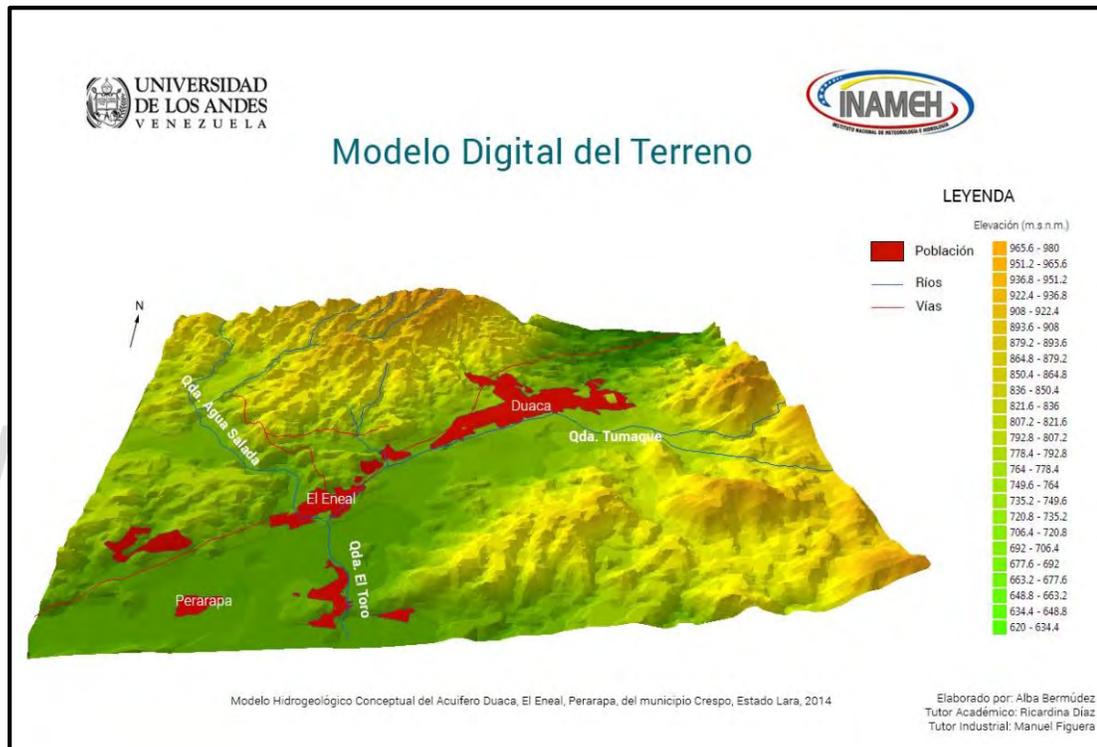


Fig. 2.2. Hidrografía y relieve del área de estudio.

2.3. GEOMORFOLOGÍA.

La geomorfología del área de estudio está caracterizada por ser una zona de piedemonte donde la forma de acumulación corresponde a un abanico de explayamiento. Duaca surgió de la existencia de un surco intermontano que forman las Sierras de Aroa y Bobare, ocupando una zona relativamente llana que sirve de divisoria de aguas entre las cuencas de los ríos Aroa y Turbio. Por lo tanto, la zona en estudio es de valle intramontano, de transición entre la

planicie El Cují-Tamaca (al sur de Duaca) y el sistema de la Serranía de Aroa, al este y noreste de Duaca. (Pérez, A. y Rodríguez, T. 2005).

2.4. CLIMA

La zona en estudio está caracterizada por presentar un clima que va de subhúmedo a seco, según la clasificación climática de Thornthwaite, con escasas precipitaciones y altas temperaturas debido a la ubicación relativa del área, la cual se encuentra en un aluvión limitado por las serranías de Aroa y Bobare, que actúan como un obstáculo para la circulación de los vientos que van desde el este con velocidad promedio de 4 m/s. La sequedad del ambiente es típica ya que la evaporación supera las precipitaciones.

2.4.1. Precipitación

El régimen pluviométrico es de aproximadamente 755 mm anuales durante los 23 años de registro (1990-2013). El período de lluvia cubre gran parte del año, desde los meses de Mayo a Noviembre, siendo los de mayor intensidad Junio y Agosto. El periodo seco se corresponde a los meses de Diciembre a Abril, según datos tomados de la estación pluviométrica de Duaca.

La evapotranspiración promedio anual para todas las estaciones climáticas de Venezuela, según trabajos realizados por la Dirección de Hidrología, Meteorología y Oceanología del Ministerio del Ambiente en el año 1997, indica que en la región de Duaca la evapotranspiración potencial (ETP) promedio anual está por el orden de los 1475 mm.

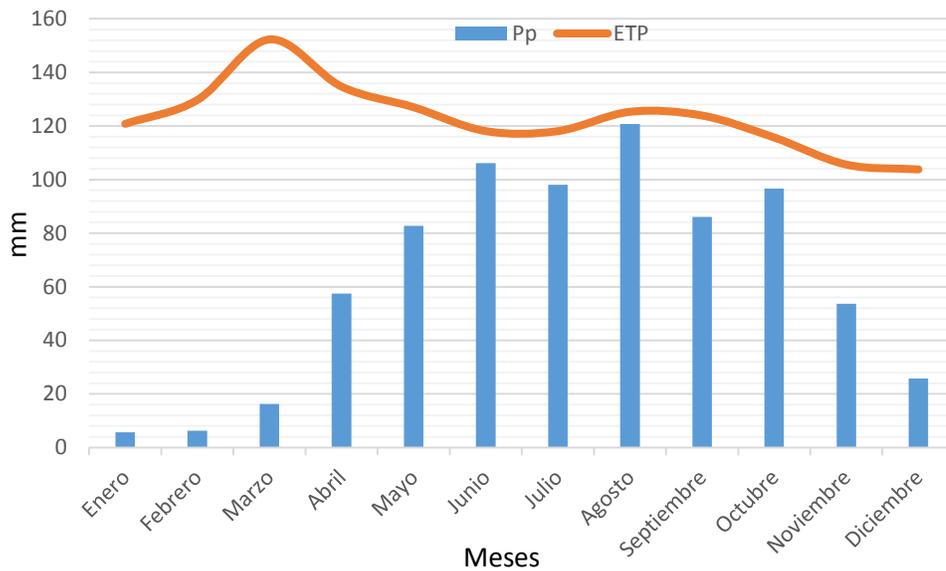


Fig. 2.3. Gráfico de precipitación (PP) vs. evapotranspiración (ETP) con datos tomados de la estación de Duaca (1990 – 2013).

Como se observa en la Figura 2.3, la evapotranspiración (ETP) es mayor que la precipitación (PP), lo que evidencia el carácter semiárido del área de estudio. La implementación de acciones para la restauración hidrológica ambiental de cuencas permitirá la recuperación de los suelos y la cobertura vegetal lo que fomentará la infiltración del agua de lluvia, la regulación del escurrimiento superficial y la disminución significativa de la erosión y la sedimentación, con lo que la disponibilidad de agua en la cuenca puede incrementarse.

2.4.2. Temperatura

Según datos medidos entre el 2010 y 2013 por el INAMEH, la temperatura media anual oscila entre 24 y 27°C.

2.5. HIDROGRAFÍA

La hidrografía en el área de estudio está constituida por pequeños cursos de agua, entre los cuales se encuentran las quebradas Tumaque y Agua

Salada, la primera fluye en sentido noreste al sur, y la segunda en sentido noroeste al sur, desembocando en la quebrada Agua Salada, esta última cambia de nombre hacia la población de El Toro, llevando el nombre de dicha población (quebrada El Toro). Se destaca el régimen intermitente en la quebrada Agua Salada. El patrón general de drenaje es de tipo dendrítico, formado por arroyos que se van ramificando de forma arborescente y el escurrimiento es de carácter torrencial en el frente montañoso (Serranía de Aroa), por otro lado, se ve el control estructural sobre la quebrada Tumaque ocasionando que ésta adquiera la dirección preferencial de la falla geológica que pasa por la zona (Fig. 2.2)

2.6. SUELO

La topografía y el clima son los factores formadores de los suelos en el estado Lara. Las clasificaciones taxonómicas de los suelos permiten resumir, ordenar y dar una nomenclatura internacional a esa amplia gama de suelos que poseemos.

Como se observa en la Figura 2.4, se representa la distribución y características de los principales suelos en el área de estudio a nivel de órdenes y subórdenes del sistema de clasificación vigente en los Estados Unidos (*Soil Taxonomy*) y usado corrientemente en Venezuela.

Hacia la parte norte del área, se observan suelos *Haplustols* (*Ultisols*), *Dystropepts* (*Tropepts*) y *Haplustalfs* (*Alfisols*), y en el resto del área se presentan suelos *Camborthids*, *Haplotorrerts*, *Haplagirds* del orden de los *Ardisols* y *Humitropepts* – *Ustropepts* del orden de los *Tropepts*, estos últimos ocurren frecuentemente en la primera terraza de planicies aluviales; en área con una marcada estación seca que gira alrededor de los 4 a 7 meses, según la 7ma aproximación y los suelos venezolanos (Comerma, 1971).

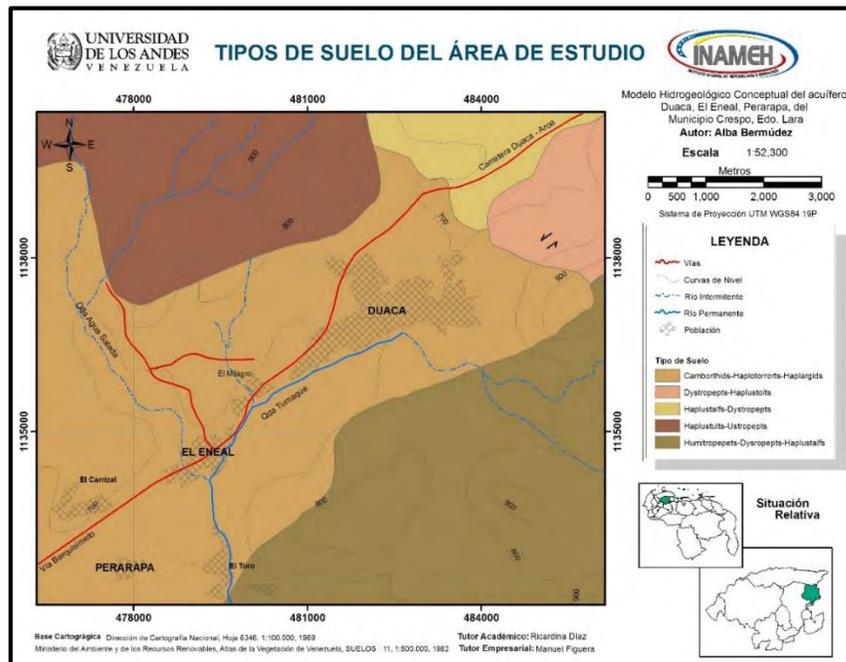


Fig. 2.4. Distribución espacial de los suelos en el área. (Modificado del Atlas de la Vegetación de Venezuela, 1982).

Los suelos en el área varían ampliamente en cuanto a su potencial agrícola y vulnerabilidad a los procesos de degradación. En el estado Lara, existe una predominancia de suelos con texturas medias, y se ubican indistintamente en los sistemas de relieves propios de montañas, colinas y valles. Las texturas finas, correspondientes a material arcilloso cubren un pequeño porcentaje del área y se encuentran de manera indistinta en sistemas de paisajes correspondientes a colinas, depresiones y valles. Por otro lado, las texturas gruesas se ubican en su mayoría al oeste del estado y cubren el menor porcentaje de la superficie. Los afloramientos rocosos aparecen aisladamente en distintas zonas del estado. La Figura 2.5 muestra la distribución espacial de las clases texturales del estado Lara.

Según Quiñonez, E y Dal Pozzo F. (2008), para las colinas en las áreas secas, el estado está compuesto por suelos pocos profundos con una textura muy fina y relativamente impermeables, donde la cubierta del suelo prácticamente no existe. Aunque muchos de los suelos en las principales

depresiones secas son más profundos, presentan limitaciones similares y son consideradas como susceptibles a la degradación.

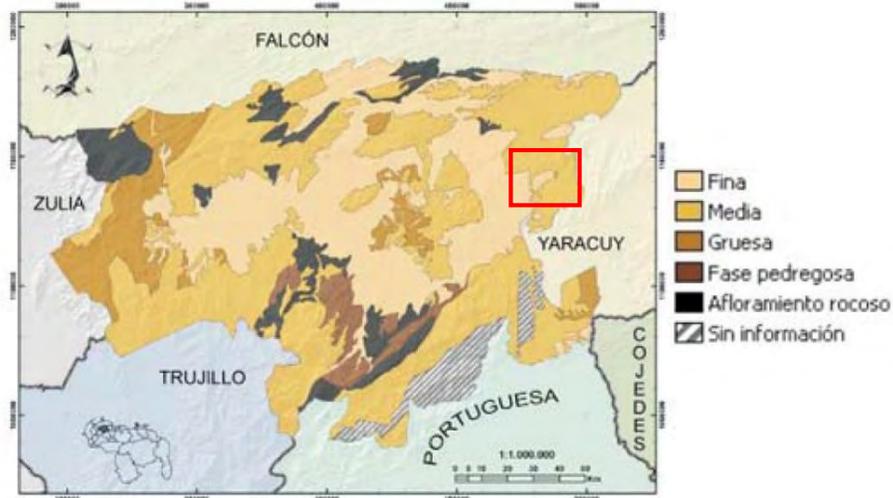


Fig. 2.5. Distribución espacial de las clases texturales en el estado Lara. (Tomado de Quiñones, E. y Dal Pozzo, F. 2008).

2.7. VEGETACIÓN

Debido al limitado régimen de disponibilidad de agua por lluvia en la zona, comparada con la alta evaporación, el tipo de vegetación es comúnmente arbustiva y espinar, caracterizada por cujíes, herbazales, y presencia de cardonales. Hacia el sur, la variación va desde matorrales y arbustos, hasta bosques siempreverde, en una pequeña parte del área. Las formaciones boscosas se ubican en las zonas montañosas, a excepción de los bosques deciduos que crecen en las tierras del norte y noreste. La acción antrópica, mediante pastos y cultivos, también es notoria en distintos sectores del área de estudio, que muestran evidencia del uso de actividades agrícolas.

De manera general, dentro de las variedades en la vegetación destacan: matorral denso, cujíes, cardones y herbazales. Sin embargo, en una pequeña parte del área (Parque Barro Negro), la vegetación se vuelve boscosa.



Fig. 2.6. Vegetación característica del área de estudio, herbazales en el sector El Milagro. (Fuente propia, 2014).

2.8. GEOLOGÍA GENERAL

2.8.1. Geología Regional

Esta región se encuentra caracterizada por ser el lugar de confluencia del Sistema Montañoso Andino, la Cordillera de la Costa y el Sistema Falconiano, y también por haber sido el primer lugar en Venezuela donde se demostró la presencia de deslizamientos sedimentarios desde su lugar de origen hacia el centro del Surco de Barquisimeto, emplazados en su posición actual como masas alóctonas dentro de una secuencia de sedimentos más jóvenes. En efecto, la mayoría de los cerros de colores blanquecinos o amarillentos, que se destacan sobre la planicie de suelos rojizos, se consideran representantes de estos alóctonos (Renz *et al.*, 1955).

La depresión central del estado Lara, comprendida entre las poblaciones de Carora, El Tocuyo, Barquisimeto y Sarare, es una planicie irregular con

llanadas terrazas, colinas, entre otros. Las mayores extensiones de suelos aluvionales se encuentran en la llamada Sabana de Carora y en la llanada entre Quíbor y Barquisimeto; el territorio al norte y al oeste de Barquisimeto, muestra mayor cantidad de arcillas terciarias y bloques alóctonos. (González, 1980).

Un aspecto importante en la geología del estado Lara, es el Surco de Barquisimeto, definido como el contacto entre los flyschs, Paleoceno-Eoceno perteneciente al Sistema Montañoso del Caribe, y la secuencia Cretácica-Eocena andina, considerada de naturaleza estratigráfica y discordante (Renz *et al.* 1955). Es decir, una cuenca flysch recibiendo sedimentación y deslizamientos submarinos caóticos extendida desde algún lugar al norte del Alto de Siquisique, bordeando la llamada hoy “Plataforma de Barbacoas” hasta alcanzar el estado Portuguesa. Los sedimentos más comunes del Surco de Barquisimeto pertenecen a la Formación Matatere, que Bellizzia y Rodríguez (1966) definen como una gruesa sección de turbiditas, principalmente areniscas impuras líticas o feldespáticas, conglomerados líticos, entre otros. Las areniscas están gradadas y muestran marcas típicamente turbidíticas; las lutitas que las acompañan son limolíticas (Duque, 2011).

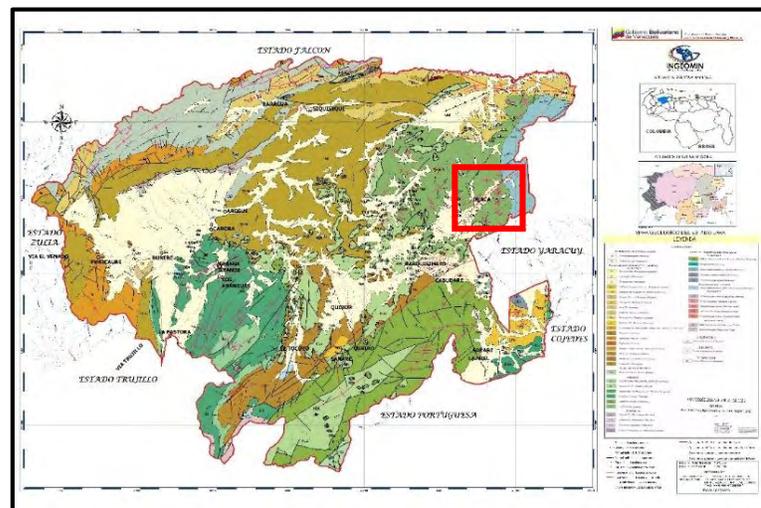


Fig. 2.7. Mapa geológico del estado Lara, modificado por Ingeomin 2009. (Elaborado por USGS en colaboración con FUNVISIS y la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la UCV, 2004).

2.8.2. Estratigrafía Regional

El estudio geológico en el estado Lara presenta en gran parte un complejidad estratigráfica y tectónica debido a ser el área de convergencia entre los sistemas orogénicos de la Cordillera de Los Andes y del Sistema Montañoso del Caribe, además de haber presentado gran influencia tectónica de deslizamientos submarinos durante el Cretáceo Superior-Paleoceno-Eoceno y la ausencia de fósiles en algunas de sus unidades.

▪ Formación Nirgua (*Neocomiense, Cretáceo Inferior*)

La formación consta de esquistos cuarzomícáceos, calizas cristalinas macizas, anfibolitas cuarcitas, esquistos gnéisicos cuarzo-micáceo-feldespáticos y esquistos cuarzo-micáceoclorito-granatíferos. Las rocas características de la formación son las diferentes variedades de anfibolitas y las calizas macizas cristalinas según Bellizzia y Rodríguez (1966). Otros tipos de minerales accesorios que se presentan en las anfibolitas son: cuarzo, calcita, albita, rutilo, esfena, moscovita, ilmenita, magnetita y pirita. En la unidad se incluyen unos 100 metros de espesor de calizas cristalinas marmóreas, que habían sido descritas por Bushman (1959, 1965) con el nombre de Formación Río Abajo, y que hoy se designan como Calizas de Río Abajo para constituir una litología local.

▪ Formación Aroa (*Barremiense, Cretáceo Inferior*)

Bellizzia y Rodríguez (1966) introdujeron este nombre para designar una espesa secuencia de rocas metamórficas, expuesta en el Distrito Minero de Aroa, con la cual se asocia la mena de piritas cupríferas. La unidad consiste esencialmente de esquistos calcáreos grafitosos, filitas grafitosas, esquistos cuarzo-micáceos-grafitosos, calizas laminadas y calizas macizas, que constituyen más del 75% de la unidad; las calizas laminadas se interstratifican con los esquistos calcáreo-grafitoso y filitas; la caliza cristalina

aflora en horizontes de hasta 20 metros de espesor. Algunas calizas son dolomíticas. Las rocas esquistosas exhiben una mineralogía de calcita, grafito, sericita, cuarzo, feldespato, clinozoisita, zoisita, pirita y clorita. Según Bellizzia y Rodríguez (1966) estas rocas constituyen buenas capas guías por su color variable entre verde pálido y oliva, que contrasta con la sección grafitosa restante; abundan hacia la parte media de la unidad, donde alcanzan 50 metros de espesor. Bushman (1959) se refirió a estos esquistos con el nombre de “esquistos de Agua Viva” y los incluyó en su formación (hoy Grupo) Los Cristales.

▪ Formación Mamey (*Aptiense, Cretáceo Inferior*)

La unidad cubre en, aparente concordancia, a la Formación Aroa y aflora al norte de Yaritagua y al este de Duaca. Su mejor sección se halla en las quebradas Mamey y Nonavana. Se compone esencialmente de esquistos cuarzo-micáceo-sericíticos, esquistos calcáreos, filitas grafitosas, meta-conglomerados, meta-areniscas calcáreas y calizas laminadas. En los alrededores de Duaca en la localidad de Tumaque, cerca de la base de la formación, se encuentra una espesa sección de calizas macizas puras, cristalinas y de carácter biohermal, que son utilizadas por la Compañía Venezolana de Cementos para la fabricación de cemento blanco (Bellizzia y Rodríguez, 1967).

La unidades características de la formación son los esquistos cuarzo-sericíticos y los meta-conglomerados, cuyos fragmentos muestran efectos cataclásticos, de fracturamientos y estiramientos producidos durante el metamorfismo. También se tienen micro y macro brechas en fragmentos líticos de calizas y filitas de una matriz arcillosa-calcárea. Los componentes principales de las meta-areniscas y los meta-conglomerados son cuarzo y feldespatos esencialmente potásicos en una matriz o cemento arcilloso-calcáreo. La formación se puede considerar como producto de una

sedimentación nerítica relacionada a probable levantamiento epirogénico de la Serranía de Aroa.

Bellizzia y Rodríguez (1969), estimaron 1400 m de espesor para la formación. En algunas localidades se observan fragmentos de amonites, muy semejantes a los descritos en la Formación Carorita; algunas calizas contienen pelecípodos, espinas de equinoideos y corales. La Formación Mamey se asigna al cretáceo temprano, a base de su contenido faunal (Léxico Estratigráfico de Venezuela, 1997).

▪ Formación Bobare (*Albiense, Cretácico Inferior*)

La Formación Bobare se compone principalmente de areniscas cuarzosas oscuras, gris claro y crema, de textura variable que va desde grano muy grueso, a veces conglomerático hasta grano fino, predominando las de grano medio. Las areniscas son duras, densas y con textura en parte sacaroide. Los granos poseen bordes sub-angulares y sub-redondeados, constituidos por cuarzo, micas y pequeñas cantidades de feldespatos, el cemento es silíceo y a veces calcáreo o ferruginoso. Algunas poseen algo de matriz arcillosa y es frecuente observar láminas o escamas de lutitas y perdigones de arcilla. Las areniscas cuarzosas frescas son de color gris, gris azulado, gris oscuro y algunas de color crema; en superficies meteorizadas, predominan los tonos rojizo, amarillento y marrón (Bellizzia y Rodríguez, 1967).

Estas rocas constituyen la serranía del mismo nombre en el estado Lara, que se extiende desde el norte de Barquisimeto hasta la Serranía de Churuguara-Siquisique al norte; hacia el este, el Valle de Duaca la separa de la Serranía de Aroa, y hacia el oeste, enlaza con la Serranía de Aroa, y hacia el oeste, enlaza con la Serranía de Matatere. (Bellizzia y Rodríguez *op cit*).

▪ Depósitos Cuaternarios

Son el conjunto de materiales transportados y sedimentados gracias a la acción exógena de las corrientes de agua superficiales; aunque también se originan por la acción de los glaciares, el viento y el mar. En este caso, los depósitos aluviales o relacionados con los cursos de agua son los más importantes, en especial están conectados a los ríos y quebradas que a su vez los han originado.

Una parte del área de estudio está cubierta de sedimentos recientes, entre ellos gravas, arenas, limos y arcillas, cubriendo la mayoría del área formando terrazas aluviales. Dichas terrazas y los abanicos aluviales disectados a niveles más altos que los valles que los circundan, indican levantamientos recientes según Bellizzia y Rodríguez (1967).

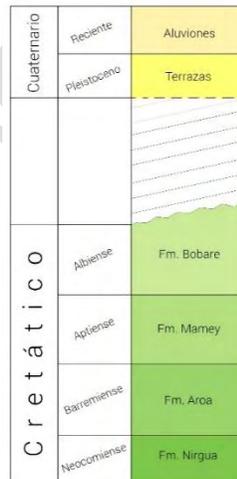


Fig. 2.8. Columna estratigráfica regional. Tomado del Mapa Geológico del estado Lara (1960). Modificado por Bermúdez, A. (2014).

2.8.3. Geología Estructural

De manera regional, las fallas de Boconó, Oca-Ancón y Valera, delimitan una región que conforma un conjunto de unidades fisiográficas correspondientes a grandes unidades geológicas. Esta región se caracteriza

por la presencia de seis depresiones de forma principalmente triangular (Audemard, F. *et al.* 1998). Dichas depresiones son; Sabana de Carora, Aroa-Yumare, Santa Inés-Moroturo, Llanos de Monay, Tocuyo-Quíbor y Duaca. Estas depresiones a su vez, están rodeadas por serranías de orientaciones diversas; Serranía de Bobare, Aguada Grande-Siquisique, Zaruma-Trujillo y Aroa, así como la vertiente norte de las estribaciones septentrionales de los Andes Venezolanos.

De acuerdo al mapa de fallas cuaternarias de Venezuela, que se observa en la Figura 2.9, en el área de estudio se presenta una gran influencia tectónica, ya que hacia su parte Norte se encuentra el sistema de fallas Oca-Ancón y hacia la parte sur de la zona, el sistema de fallas de Boconó.

Es importante señalar que la falla de Boconó representa uno de los elementos estructurales más importantes de la parte occidental del surco de Barquisimeto, ésta presenta un comportamiento transcurrente dextral, con desplazamientos horizontales de más de 30 km en los valles de los ríos Turbio y Yaracuy; el rumbo de la Falla de Boconó es de N55° a N70°E, y a lo largo de ella hay desarrollo de una ancha zona de cataclasis, puesta en evidencia por intenso brechamiento, trituración y presencia de bloques de diferentes unidades geológicas. Es posible que esta falla haya pasado por varios periodos de actividad geológica desde el Cretácico hasta nuestros días (Bellizzia y Rodríguez, 1966).

De manera local, hacia el este de Duaca se observan dos fallas aproximadamente paralelas entre sí; hacia el noreste de dicha población se encuentra una falla de rumbo sinistral y está limitada hacia el noreste por la falla inversa o corrimiento de Socremo, que presenta un comportamiento de tipo dextral inverso. La segunda falla es paralela a la anterior y se encuentra ubicada al noreste de la población de Yaritagua, es una falla rumbo dextral, tal y como se muestra en la Figura 2.9.

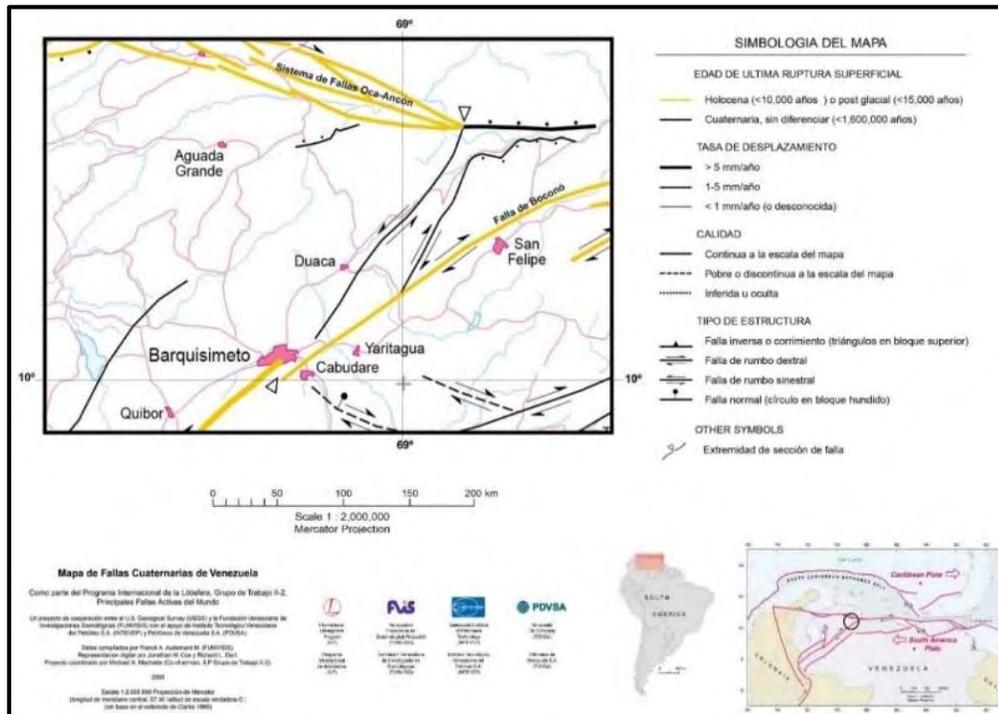


Fig. 2.9. Mapa de fallas cuaternarias del área de estudio. (Modificado del mapa de fallas cuaternarias de Venezuela elaborado por U.S. Geological Survey (USGS) y FUNVISIS, 2000)

2.9. GEOLOGÍA LOCAL

▪ Aluviones Cuaternarios

La geología característica de la zona en estudio está representada por sedimentos recientes (compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas) formando terrazas aluviales, predominando en la población de Duaca y sus alrededores.

Los grandes valles de Quíbor y Duaca cubiertos por material cuaternario, podrían tener un origen tectónico, o podrían ser el resultado del arreglo caótico producido por los deslizamientos submarinos. Posteriormente, por procesos de erosión diferencial en las rocas duras y blandas desarrollan esa fisiografía de “Lomo de Camello, característica de la parte central del estado Lara. Las terrazas y abanicos aluviales cortados a niveles más altos que los valles que los circundan, indican levantamientos recientes (Bellizzia y Rodríguez, 1969).

- Formación Mamey

De edad Cretácica Inferior, ésta representa la unidad impermeable, el basamento del acuífero, compuesta esencialmente de esquistos pizarrosos, filitas grafitosas y metaareniscas.

Los esquistos se ubican en las facies de los esquistos verdes debido a su grado de metamorfismo. Los minerales más resaltantes presentes son: micas biotita y moscovita, ortosa, cuarzo, entre otros. Su textura es talcosa porque el feldespato está caolinizado. El tamaño de los minerales no sobrepasa los 0.5mm.

Las filitas, que poseen un grado de metamorfismo menor, se encuentran meteorizadas y presentan planos de foliación bien definidos, los minerales presentes más resaltantes, al igual que los esquistos, son: micas, biotita y moscovita, ortosa y cuarzo, entre otros (Pérez y Rodríguez, 2005).

2.10. HIDROGEOLOGÍA LOCAL

La fuente de abastecimiento actual de la mayoría de las comunidades asentadas en el municipio, está representada por los pozos de 80 a 100 m de profundidad que explotan el acuífero Duaca – El Eneal, constituidos por 17 pozos operados por HIDROLARA, de un total de 28 pozos activos identificados en el estudio sobre la evaluación del recurso de agua subterránea, y que están conectados al sistema de acueducto que surte a todo el municipio. Estas poblaciones no poseen fuentes de aprovechamiento de aguas superficiales en el área. Por otro lado, existen diversos pozos encontrados en las haciendas de producción agrícola que les permite satisfacer sus actividades mediante un sistema de riego.

En 1986, el Ministerio del Ambiente y Recurso Naturales (MARN) implementó un modelo de simulación de acuíferos en condiciones de poca

información, entre las conclusiones obtenidas se establece que la información básica de la zona de Duaca no es suficiente para la modelación confiable del acuífero, y recomiendan realizar pruebas de bombeo con el propósito de obtener los valores de transmisividad y de coeficientes de almacenamientos del acuífero (Tomado de Gómez, 2013).

Según la recopilación de las diferentes investigaciones realizadas en el área de estudio, se tienen que los volúmenes de reservas de agua del acuífero para el 2013 (Gómez, M.) son de 9,8 millones de metros cúbicos, pero para estudios realizados en el 2005 (Pérez, A y Rodríguez, T.), se tienen reservas de aproximadamente 30.000 millones de metros cúbicos, pudiendo asumirse que la extracción del recurso es mayor comparada con la recarga del acuífero, rasgo que puede afectar la vida útil del mismo.

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.uita.ve

CAPITULO III

MARCO TEÓRICO

3.1. HIDROGEOLOGÍA

La hidrología subterránea o hidrogeología puede definirse como el estudio geológico de las aguas subterráneas, o bien aquella parte de la hidrología que estudia el almacenamiento, circulación y distribución de las aguas subterráneas en el interior de las formaciones geológicas, teniendo en cuenta sus propiedades físicas y químicas, sus interacciones, sus reacciones a la acción antrópica, entre otros, y que puede ser explotable económicamente (Custodio, 1996). El alcance de esta ciencia, abarca entre lo que es la ciencia en sí y lo que son sus aplicaciones prácticas a los problemas relacionados con el agua en la ingeniería, agricultura, abastecimiento, salud pública, entorno ambiental, entre otros.

La hidrogeología moderna pretende ocuparse de la investigación de las relaciones existentes entre formaciones geológicas y aguas subterráneas, del desarrollo de las ecuaciones matemáticas que rigen el movimiento del agua en el interior de las rocas y en las captaciones (hidráulica subterránea). Así como también del estudio de la composición química del agua subterránea (Hidrogeoquímica), la prospección de las aguas subterráneas; técnicas de localización y reconocimiento, y la explotación y gestión de dichas aguas dentro del conjunto de los recursos hidrológicos disponibles.

Importancia del agua subterránea

En la actualidad, gran parte del agua consumida provienen de los ríos y lagos. Aun así, la importancia económica que supone el aprovechamiento del agua subterránea en el mundo es enorme, pues el agua subterránea es preferida generalmente al agua superficial por las siguientes razones:

1. El agua subterránea tiene poca presencia de organismos patógenos y por ello no necesita ser tratada previamente, con el consiguiente menor coste al no pasar por depuradoras.

2. Su temperatura es constante, lo cual es una gran ventaja si se ha de utilizar para intercambios térmicos o como termorregulador.
3. No posee ni turbidez ni color.
4. Su composición química es generalmente constante, dependiendo del medio por donde transite.
5. Los volúmenes de agua subterránea almacenada son mayores que los volúmenes almacenados en superficie, por lo que el abastecimiento a partir de aguas subterráneas no suele verse poco afectado por las sequías prolongadas.
6. La contaminación de la mayor parte de las aguas subterráneas es poca, ya que las mismas rocas del subsuelo actúan de filtro.
7. El agua subterránea, acumulada durante largos periodos de años de recarga, constituye el único recurso en muchas regiones donde no es posible asegurar su abastecimiento a partir de las explotación de las aguas superficiales, ya sea por régimen climático o su viabilidad económica.

Por otro lado, existen inconvenientes que suelen impedir la utilización más intensiva de estas aguas; como el hecho de que muchas regiones están emplazadas sobre un subsuelo rocoso cuya porosidad o permeabilidad son insuficientes para proporcionar grandes caudales de agua en las captaciones. Y además, el coste de explotación mediante pozos de bombeo es generalmente mayor que el coste de explotación de las aguas superficiales de los ríos próximos a las zonas de consumo; sobre todo en regiones de pluviometría elevada o moderada (Montes, 2008).

3.2. CICLO HIDROLÓGICO

Todas las aguas circulantes de la Tierra se encuentran interrelacionadas en un sistema complejo que es conocido como el ciclo del agua o ciclo hidrológico. Las aguas subterráneas no representan más que una parte del ciclo total del agua, pero aun así en Hidrogeología se deben tener presentes todos los demás aspectos del ciclo hidrológico. Los océanos son los inmensos depósitos de los cuales procede toda el agua del ciclo hidrológico y a los cuales retorna, aunque bien es verdad que no todas las partículas de agua recorren el ciclo hidrológico de una manera completa; por ejemplo, el agua que se evapora sobre la superficie de la Tierra vuelve a la tierra en forma de lluvia, nieve o granizo. En el caso más completo, el agua se evapora desde el océano, forma las nubes, las cuales son transportadas por el viento hacia los continentes donde se condensan y caen en forma de precipitaciones, las cuales a su vez son conducidas por medio de los ríos, en forma de escorrentía, o por flujo subterráneo debido a la infiltración, hasta el océano. La energía solar es la que mantiene al ciclo hidrológico en marcha (Montes, 2008).

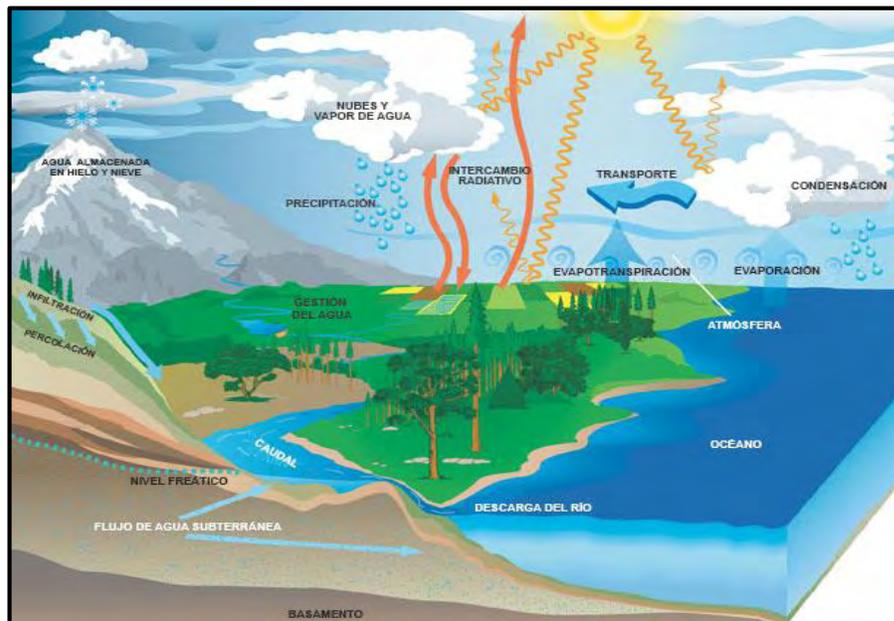


Fig. 3.1. Ciclo Hidrológico.

(Modificado de <http://vocabulariogeografico.blogspot.com/2011/11/ciclo-hidrologico.html>)

3.3. AGUAS SUBTERRÁNEAS EN VENEZUELA

El Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA) es el ente encargado del aprovechamiento del recurso hídrico, y en la actualidad, a través del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMEH) se encarga de estudiar y evaluar las condiciones de las aguas subterráneas en el país. Dentro de sus funciones está el manejo, procesamiento, verificación de la información hidrogeológica, control de la red de observación de pozos de agua, prospecciones e identificación de áreas potenciales de acumulación de aguas subterráneas en el ámbito nacional y lo conducente para la elaboración de planes y lineamientos en el aprovechamiento racional y sostenible del recurso.

La Coordinación de Hidrología Subterránea del INAMEH, posee una base de datos que registra alrededor de 32.000 puntos de agua en el país, los cuales contienen datos básicos, de litología, registros eléctricos, niveles, pruebas de bombeo, granulometría y datos de calidad de agua, sin embargo, se estima que existan más de 200.000 pozos productores en todo el país. Por esta razón, es necesaria la actualización del inventario de puntos de agua, con la operación de mediciones de campo e inventario en oficina, además del intercambio de información con las distintas regiones del país, con la finalidad de ampliar la base de datos de la institución (Decarli, 2009).

En Venezuela, los acuíferos o aguas subterráneas representan una superficie total de 829.000 km² y se pueden clasificar de acuerdo a su potencialidad en:

Acuíferos de gran potencialidad: Mesa de Guanipa, Sistema del río Guárico, Llanos de Barinas y Portuguesa, y por último los Llanos de Apure.

Acuíferos de potencial medio: Barlovento, Valle de Caracas.

Acuíferos en vías de agotamiento: valle de Quíbor, Coro. Según el Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar (IGVSB, 2010).

3.4. UNIDADES GEOLÓGICAS SEGÚN SU COMPORTAMIENTO HIDROGEOLÓGICO

3.4.1. Acuitardo.

Formación geológica que, conteniendo apreciables cantidades de agua, la transmiten muy lentamente, por lo que no son aptos para el emplazamiento de captaciones de aguas subterráneas, sin embargo, bajo condiciones especiales, permiten una recarga vertical de otros acuíferos, que pueden llegar a ser muy importantes en ciertos casos (Custodio, 1996).

3.4.2. Acuícludo.

Es definida como una formación geológica que, conteniendo agua en su interior, incluso hasta la saturación, no la transmite y por lo tanto no es posible su explotación. Se pueden citar como ejemplos, los depósitos de arcillas de cualquier origen (Custodio, 1996).

3.4.3. Acuífugo.

Son las formaciones geológicas incapaces de almacenar ni transmitir el agua; están representados por las rocas compactas, como granitos y gneises, y a veces incluso calizas muy compactas sin cárstificar; se muestra como impermeables salvo que existan fracturas que pueden permitir flujos (Custodio, 1996).

3.4.4. Acuífero.

Son formaciones geológicas subterráneas permeables que pueden almacenar, filtrar y transmitir cantidades significativas de agua, que puede ser captada en su caso para consumo humano. Estas características las cumplen, por ejemplo, los materiales detríticos no consolidados como las arenas y las gravas, ya que son materiales sumamente permeables. Estos tienen

capacidad de drenaje muy alta en las que se pueden perforar. (Custodio, 1996).

3.4.4.1. Tipos de Acuífero según el material que lo conforman

- *Acuíferos detríticos o porosos*: son aquellos en el que el agua circula a través de los poros del material. Están compuestos por gravas, arenas, arcosas y en general, por materiales detríticos con tamaño de grano o arena como mínimo. Estos acuíferos se forman por procesos de erosión en sectores montañosos.

- *Acuíferos kársticos fisurados*: son aquellos en el que el agua circula a través de sus grietas y fisuras. Están compuestos por calizas, dolomías, granitos, basaltos, entre otros. Su origen puede ser mecánico o por disolución.

- *Acuíferos kársticos porosos*: son acuíferos cuya permeabilidad es debida a un conjunto de las dos causas anteriores. Son típicas las calcarenitas. Los estratos solubles como las calizas y las evaporitas pueden tener vacíos creados por la disolución para formar túneles y cavernas.

3.4.4.2. Tipos de Acuíferos según su presión hidrostática

- *Acuífero libre*: aquellos en que el agua subterránea presenta una superficie libre, sujeta a la presión atmosférica, como límite superior de la zona de saturación. Está formado en general por un estrato permeable parcialmente saturado de agua que yace sobre otro estrato impermeable o relativamente impermeable. (Fig. 3.2).

- *Acuífero confinado*: en los acuíferos cautivos o confinados el agua está sometida a cierta presión, superior a la atmosférica, y ocupa la totalidad de los poros o huecos de la formación geológica que lo contiene,

saturándola totalmente. Sus límites superior e inferior están constituidos por estratos impermeables. (Fig. 3.2).

- **Acuífero semi-confinado:** son acuíferos saturados, sometidos a presión, que están limitados en su parte superior por una capa semi-impermeable o un Acuitardo y en su parte inferior por una capa impermeable o también otro Acuitardo. En ellos, la disminución de la carga piezométrica, inducirá un flujo vertical del agua contenida en el Acuitardo, que actuará como recarga del acuífero. (Fig. 3.3).

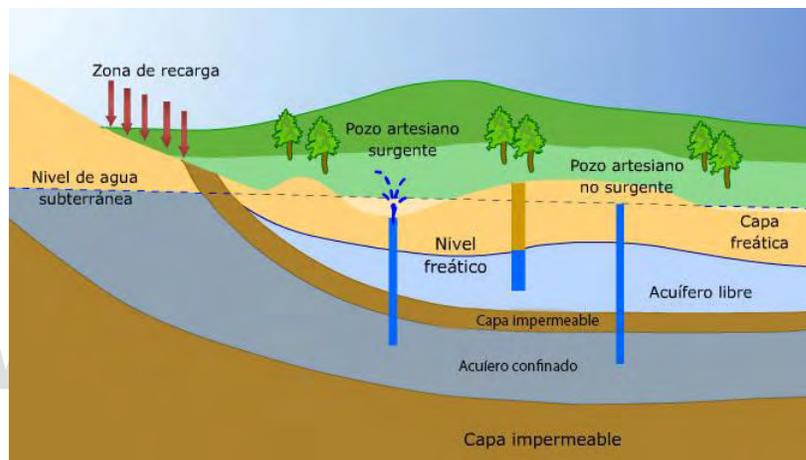


Fig. 3.2. Esquema de un acuífero libre y un acuífero confinado. (Modificado de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2584/html/12_aguas_subterneas.html)

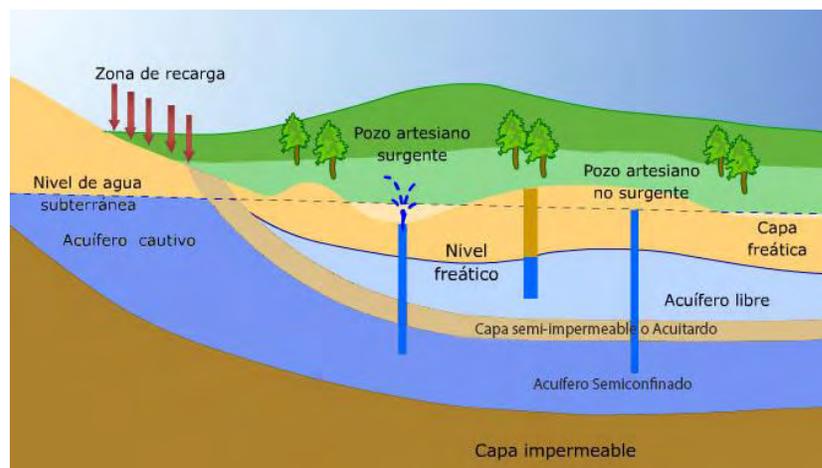


Fig. 3.3. Esquema de un acuífero libre y un acuífero semi-confinado. (Modificado de http://educativa.catedu.es/44700165/aula/archivos/repositorio/2500/2584/html/12_aguas_subterneas.html)

3.5. PARÁMETROS HIDRÁULICOS

Los acuíferos poseen ciertos parámetros de los cuales dependen, y estos permiten a su vez, definir o hasta incluso predecir la respuesta que el acuífero presentará ante determinadas acciones exteriores.

3.5.1. Porosidad

Es la relación entre el volumen de huecos y el volumen total de una roca. Es un parámetro adimensional y depende únicamente de la constitución de la roca o suelo, es decir, de su textura característica, sin que intervenga la forma geométrica ni el espesor de la formación o su mecanismo de funcionamiento hidráulico en la naturaleza. Ésta puede ser expresada en porcentaje (Barboza, 2010). Existen dos tipos de porosidad, la porosidad total y la porosidad efectiva;

- *Porosidad total (n):* se refiere al volumen total de poros, independientemente de que el fluido tenga la capacidad o no de circular entre ellos, y viene dada por la ecuación;

$$n = \frac{\text{volumen de huecos}}{\text{volumen total}} \quad \text{Ecuación 3.1}$$

- *Porosidad eficaz (n_e):* También denominada porosidad cinemática, se refiere al volumen de poros conectados por los que el transporte de fluido es posible, y está ligada no solo a la textura de la formación, sino también a las características del fluido, y viene dada por la ecuación;

$$n_e = \frac{\text{volumen de agua drenada por gravedad}}{\text{volumen total}} \quad \text{Ecuación 3.2}$$

También se habla de porosidad primaria y porosidad secundaria.

- *Porosidad primaria:* está asociada con la matriz de la roca y sus propiedades hidráulicas, se desarrolla u origina en el momento de la formación del estrato.

Los poros formados son espacios vacíos entre granos individuales de sedimento. Las arenas, permiten que el agua tenga espacio suficiente para fluir libremente, el agua no se adhiere a los granos.

- *Porosidad secundaria:* consiste en un sistema procesos geológicos subsecuente a la depositación, cuyas propiedades hidráulicas son, generalmente, el resultado de procesos tectónicos, fracturación y/o disolución por donde el agua realiza su recorrido.

Tabla 3.1. Valores estimados de porosidad efectiva y porosidad eficaz de distintos materiales

	Porosidad Total (%)	Porosidad Eficaz (%)
Arcillas	40 a 60	0 a 7
Limos	35 a 50	3 a 19
Arenas finas, arenas limosas	20 a 50	10 a 28
Arena gruesa o bien clasificada	21 a 50	22 a 35
Grava	25 a 40	13 a 26
Lutita Intacta	1 a 10	0,5 a 5
Lutita 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

Tomado de Sanders (1998)

3.5.2. Permeabilidad

O también llamada Conductividad Hidráulica, es la facilidad que un cuerpo ofrece a ser atravesado por un fluido, en este caso el agua. Es la constante de proporcionalidad lineal entre el caudal y el gradiente hidráulico. (Sánchez, 2013). Viene dada por la ecuación;

$$K = Q * I * A \quad \text{Ecuación 3.3}$$

Donde;

K: Permeabilidad (m/día)

Q: Caudal (m³/día)

I: Gradiente hidráulico (Adimensional)

A: Superficie de la sección (m²)

En la tabla 3.2, se observan las distintas características hidrogeológicas que presentan los distintos materiales según su permeabilidad.

Tabla 3.2. Clasificación de terrenos por la conductividad hidráulica.

Permeabilidad (m/día)	10 ⁻⁶	10 ⁻⁵	10 ⁻⁴	10 ⁻³	10 ⁻²	10 ⁻¹	1	10 ¹	10 ²	10 ³
Calificación	Impermeable	Poco Permeable		Algo Permeable		Permeable		Muy Permeable		
Calificación del Acuífero	Acuicludo	Acuitardo		Acuífero Pobre		Acuífero Regular a Bueno		Acuífero Excelente		
Tipo de Materiales	Arcilla Comp. Pizarra Granito	Limo Arenoso Limo Arcilla Limosa		Arena Fina Arena Limosa Caliza Frac.		Arena Limpia Grava y Arena Arena Fina		Grava Limpia		

Tomado de Mejía y Guerrero (2000).

Estos valores se refieren a permeabilidad horizontal. La permeabilidad vertical suele ser entre 2 a 20 veces menor. El grado de compactación puede afectar al valor de la permeabilidad sobre todo en los materiales más finos.

3.5.3. Transmisividad

Es el caudal que se filtra a través de una franja vertical de terreno, de ancho la unidad y de altura igual a la del manto permeable saturado de agua, bajo un gradiente hidráulico unidad y a una temperatura fija determinada. (Sánchez, 2013). Es la capacidad que tiene el acuífero de dejarse transmitir. Viene dado por la ecuación;

$$T = K * h_0 \quad \text{Ecuación 3.4}$$

Donde;

T: Transmisividad ($m^2/día$)

K: Permeabilidad ($m/día$)

h_0 : Espesor saturado del acuífero (m)

Lo más común es que la transmisividad se mida en $m^2/día$, $m^2/hora$, o $m^2/segundo$. Sin embargo, la unidad que da cifras más manejables es el $m^2/día$, por lo que es recomendable sea usada en todos los ensayos.

Tabla 3.3. Valores de la Transmisividad, según distintos autores.

T ($m^2/día$)	Calificación Estimativa	Posibilidades del Acuífero
$T < 10$	Muy Baja	Pozos de menos de 1 l/s
$10 < T < 100$	Baja	Pozos entre 1 y 10 l/s
$100 < T < 500$	Media a Alta	Pozos entre 10 y 50 l/s
$500 < T < 1000$	Alta	Pozos entre 50 y 100 l/s
$T > 1000$	Muy Alta	Pozos superiores a 100 l/s

Tomado de Villanueva, M. (1989).

3.5.4. Almacenamiento específico

Es el volumen de agua que un volumen unitario de acuífero puede liberar por expansión del agua y compactación de la matriz sólida cuando la carga hidráulica disminuye una unidad (Sánchez, 2013). Depende de las características de la matriz sólida y del fluido. Se expresa en L^{-1} y está representada por la ecuación;

$$S_s = \rho * g (\alpha + n\beta) \quad \text{Ecuación 3.5}$$

Donde;

ρ : Densidad del fluido ($g*día^2/m^2$)

g : Gravedad ($m/día^2$)

α : Comprensibilidad vertical del agua ($m/g*día^2$)

n : Porosidad total

β : Comprensibilidad del agua ($m/g*día^2$)

3.5.5. Coeficiente de almacenamiento

Representa la capacidad de liberar agua de un acuífero. Se define, según González de Vallejo (2002), como el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de base unitaria y de altura la del acuífero, cuando desciende 1m el nivel piezométrico. Es un parámetro físico referido al volumen cedido por unidad de volumen de acuífero y es adimensional. Los valores que presenta son mucho más bajo en acuíferos confinados perfectos que en los semi-confinados. Y en un acuífero libre, el coeficiente de almacenamiento es igual a la porosidad eficaz. En un acuífero confinado, sin embargo, este volumen de agua que causa un descenso de una unidad en el nivel piezométrico, coincide con la suma del agua liberada por el acuífero como consecuencia de la dilatación que ésta sufre al descomprimirse y el agua que cede el terreno al compactarse el armazón por tener que soportar en mayor parte el peso del terreno suprayacente. (Ver Figura 3.4).

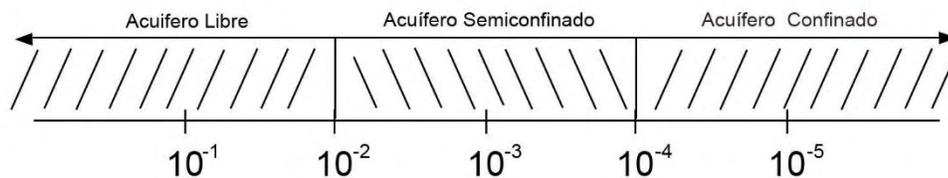


Fig. 3.4. Valores estimados del coeficiente de almacenamiento para cada tipo de acuífero, según autores.

El coeficiente de almacenamiento está relacionado con el almacenamiento específico mediante la ecuación;

$$S = m * S_s \quad \text{Ecuación 3.6}$$

Donde;

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

m: Espesor medio del acuífero (m)

S_s : Almacenamiento específico (m^{-1})

3.5.6. Gradiente hidráulico

El gradiente hidráulico (i), es un número adimensional que representa la pérdida de carga por unidad de longitud. Es decir, que es la pendiente de la superficie piezométrica si se acepta que los hilillos sobre la misma vertical son paralelos entre ellos (González, 2002).

En la Figura 3.5 se indica que el potencial (h) de agua en un cierto punto es la suma de la carga hidráulica (P/γ) y de la altura de elevación (z). La energía en el punto es la resultante de esas dos fuerzas, ya que la energía ligada a la velocidad del agua (cinética) puede despreciarse. En cualquier otro punto de la vertical varían z y P/γ pero la suma (h) permanece constante. Esa línea vertical se denomina, por tanto, línea equipotencial.

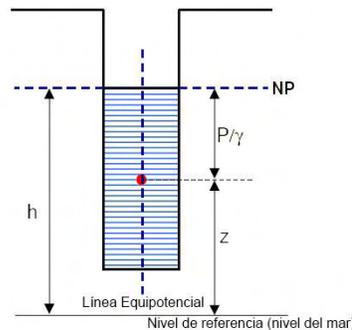


Fig. 3.5. Esquema explicativo del gradiente hidráulico. (Tomado de: <http://www.agua.uji.es>)

Si ahora se consideran dos puntos en un cierto acuífero;

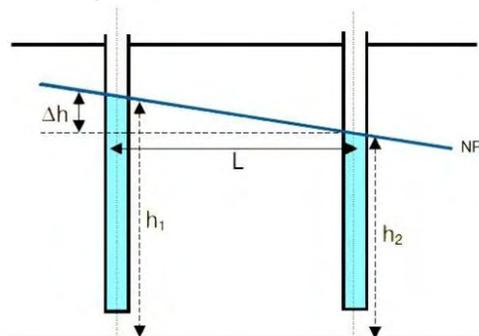


Fig. 3.6. Esquema explicativo del gradiente hidráulico. (Tomado de: <http://www.agua.uji.es>)

El flujo de agua se dirige de la línea equipotencial 1 a la línea equipotencial 2, y perpendicularmente a las mismas. Por lo que el gradiente hidráulico está definido por;

$$i = dh / L \quad \text{Ecuación 3.7}$$

Lo que viene a significar la pendiente de la superficie piezométrica entre los puntos 1 y 2. En muchos casos, las líneas equipotenciales no son verticales, es decir, que el flujo no es horizontal.

3.6. Balance hídrico

Se refiere a las relaciones entre las ganancias y pérdidas de agua (en forma de precipitación, evaporación, escorrentía o almacenamiento superficial subterráneo), en una región o una cuenca concreta. En hidrogeología, el balance hídrico es quién determina el volumen de agua proveniente de la precipitación, la cual recarga a los acuíferos infiltrándose directamente (Rebollo, 2010). El gasto y las entradas del agua son factores muy importantes en el balance hídrico, según esto se tiene la ecuación;

$$P_t = ETR + Esc + I \quad \text{Ecuación 3.8}$$

Donde;

P_t: Precipitación total (mm)

ETR: Evapotranspiración real (mm)

Esc: Escorrentía superficial (mm)

I: Infiltración (mm)

- Precipitación: Es el agua liberada desde las nubes en estado líquido o sólido, es decir, en forma de lluvia o granizo; y es el principal proceso mediante el cual el agua retorna a la Tierra. La mayor parte de la precipitación cae en forma de lluvia.

- **Evaporación:** es el proceso físico mediante el cual el agua cambia de estado líquido a gaseoso, retornando directamente a la atmósfera en forma de vapor. El agua en estado sólido (nieve, hielo, entre otros) puede pasar directamente a vapor y este fenómeno se llama sublimación. El término evaporación incluye el proceso de sublimación al momento de calcular las pérdidas de agua por evaporación.
- **Evapotranspiración:** es la transferencia de agua desde la tierra a la atmósfera, esta ocurre por la evaporación del agua de la superficie y del suelo, y por transpiración de la vegetación. En otras palabras, es la suma de la transpiración y evaporación.

Evapotranspiración potencial (ETP): es la máxima evapotranspiración posible bajo las condiciones existentes, cuando el suelo está abundante provisto de agua (colmada su capacidad de campo) y cubierto con una cobertura vegetal completa. Este parámetro se determina.

Evapotranspiración real (ETR): es la evapotranspiración que realmente ocurre en condiciones dadas, teniendo en cuenta que no siempre la cobertura vegetal es completa ni el suelo se encuentra en estado de saturación. Este valor se mide, y si bien hay fórmulas que permiten evaluar.

$$\text{Si } ETP > Pp: ETR = Pp + \Delta \text{Almacenamiento}$$

$$\text{Si } ETP < Pp: ETR = ETP$$

- **Escorrentía:** lámina de agua que circula sobre la superficie en una cuenca de drenaje, es decir, la altura en milímetros del agua de lluvia escurrida y extendida. Normalmente se considera como la precipitación menos la evapotranspiración real y la infiltración del sistema suelo.

La escorrentía es calculada de la siguiente manera:

$$Esc = Pp \times Ce$$

Ecuación 3.9

Donde:

Esc: Escorrentía (mm)

P: Precipitación (mm)

Ce: Coeficiente de escorrentía y se obtiene de la tabla 3.4.

Tabla 3.4. Coeficiente de escorrentía. Tomada de fundamentos del ciclo hidrológico.

Coeficiente de Escorrentía Ce						
Cobertura Vegetal	Tipo de suelo	Pendiente del Terreno				
		Pronuncia da	Alta	Media	Suave	Despreciable
			50%	20%	5%	1%
Sin Vegetación	Impermeable	0,8	0,75	0,7	0,65	0,6
	Semipermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Permeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
Cultivos	Impermeable	0,7	0,65	0,6	0,55	0,5
	Semipermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Permeable	0,4	0,35	0,3	0,25	0,2
Pastos Vegetación Ligera	Impermeable	0,65	0,6	0,55	0,5	0,45
	Semipermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Permeable	0,35	0,3	0,25	0,2	0,15
Hierba – Grama	Impermeable	0,6	0,55	0,5	0,45	0,4
	Semipermeable	0,5	0,45	0,4	0,35	0,3
	Permeable	0,3	0,25	0,2	0,15	0,1
Bosques Densa Vegetación	Impermeable	0,55	0,5	0,45	0,4	0,35
	Semipermeable	0,45	0,4	0,35	0,3	0,25
	Permeable	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05

Tomado de Pérez, J. (1976).

- **Infiltración:** es el proceso mediante el cual el agua desciende hacia el suelo o rocas. Va a depender de la estructura del suelo, es decir, mientras más poroso sea éste, mayor va a ser la infiltración. Por ejemplo, los depósitos de grava y arena, y los taludes detríticos son adecuados para la infiltración del agua, la cual se efectúa sin ninguna dificultad mientras que las áreas ricas en arcilla retardan la entrada de agua. El agua deja de infiltrarse en un terreno cuando los poros internos del suelo o de las rocas se llenan de agua.

La ecuación del balance hidráulico es la misma ecuación de la continuidad, y se expresa:

$$\text{Entradas} = \text{Salidas} + \text{Diferencias Almacenamiento.}$$

Esta ecuación es aplicable a una región o unidad cualquiera y en un tiempo cualquiera. Sin embargo, cuando la unidad de tiempo es grande, se considera que las variaciones en volumen almacenado son despreciables y en este caso, las entradas son iguales a las salidas (Rebollo, 2000).

De acuerdo con el Instituto Técnico Geominero de España (1992) la aplicación de un balance hídrico a nivel de acuífero tiene la siguiente relación:

$$I_e + I_s + Q_{sub} + R = E + Q'_{sub} + Q_{sup} + B + S \quad \text{Ecuación 3.11}$$

Donde:

I_e : Infiltración eficaz.

I_s : Infiltración de cuerpos de agua superficiales.

Q_{sub} : Aportes de agua desde otros acuíferos.

R : Recarga artificial o inducida.

E : Evapotranspiración.

Q'_{sub} : Aportes de agua hacia otros acuíferos.

Q_{sup} : Aportes de agua a cuerpos de agua superficiales.

B : Bombeo.

S : Surgencias naturales (manantiales, ojos de agua, entre otros.).

La razón fundamental del balance es evaluar la capacidad de recarga del acuífero comparando la entrada con la salida de agua del sistema. Para establecer esta relación es necesario el conocimiento detallado de variables hidrogeológicas como infiltración (I_e), flujo subterráneo desde y hacia otros acuíferos (Q_{sub} , Q'_{sub}), entre otros. El desconocimiento de estas variables limita la aplicación del balance, y como alternativa se puede aplicar el modelo utilizado por el Instituto Nacional de Tierras (INTI), método que consiste en

realizar cálculos adicionales con los resultados del balance hídrico de Thornwaithe. Utiliza los datos de almacenamiento de agua en el suelo, excesos y déficit para estimar los volúmenes de recarga y descarga que puedan ocurrir en el área de estudio. Cabe destacar, que los resultados arrojados por este método, no son exactos, pero su aproximación a la realidad es bastante confiable. Los datos que se calculan con este método son las recargas por precipitación, ríos y remanentes de riego y el volumen extraído para riego y otros usos.

3.7. CONDUCTIVIDAD ELÉCTRICA

Es la habilidad de una determinada sustancia para conducir la corriente eléctrica. El agua químicamente pura ostenta una conductividad eléctrica muy baja, por lo tanto es un buen aislante. Sin embargo, con la adición de una pequeñísima cantidad de minerales disueltos, el agua se vuelve conductiva. Esto tiene lugar cuando el material disuelto se separa en iones que llevan sus cargas positivas y negativas. Cuanto mayor es la cantidad de iones, mayor será la conductividad de la solución (González, 2002).

La unidad de medida de la conductividad es el inverso de ohmios, la unidad para expresar la resistencia y se escribe mhos. En las soluciones tan diluidas como son la mayoría de las aguas subterráneas, la conductividad eléctrica varía directamente con la cantidad de minerales disueltos contenidos en el agua. Las aguas con una conductividad alta, causan corrosión del hierro y del acero.

3.8. PARÁMETROS DEL POZO

3.8.1. Abatimiento

Se refiere al descenso del nivel de agua que ocurre en un pozo que se está bombeando o cuando este fluye naturalmente. Se determina mediante la diferencia, en metros, del nivel estático (NE) y el nivel dinámico (ND). El

abatimiento es una función de las propiedades del acuífero (conductividad hidráulica, k) y las características del pozo incluyendo su construcción. Se utiliza para estimar las propiedades de los acuíferos en ausencia de pruebas sistemáticas.

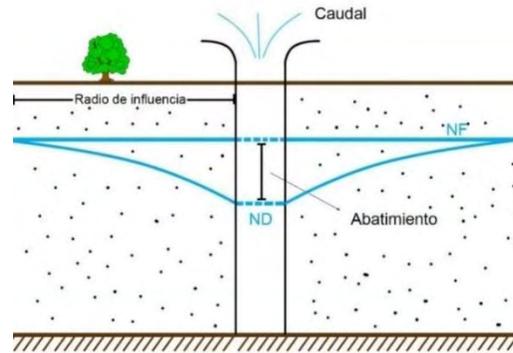


Fig. 3.7. Esquema explicativo del abatimiento en un pozo. (Fuente propia, 2014).

3.8.2. Radio de influencia

Distancia desde el eje de un pozo de bombeo o de recarga, a la cual los efectos del pozo en la superficie piezométrica o freática dejan de ser perceptibles, es decir, donde se intercepta la curva del cono de abatimiento con la línea que define el nivel freático (NF) del acuífero. (Ver Fig. 3.7).

3.8.3. Profundidad del agua

Es la distancia que existe desde la superficie del terreno al nivel de agua de un pozo que no está bombeando. Este puede variar debido a sequías, lluvias excesivas, presión barométrica y de mareas (Custodio, 1996).

3.8.4. Nivel estático

Es la distancia desde la superficie del terreno al nivel de agua en el pozo, cuando no se le bombea o no está por el bombeo de otros pozos. El nivel estático puede variar debido a sequías, lluvias excesivas, presión barométrica y de mareas (Castany, 1975).

3.8.5. Nivel dinámico

Indica cuanto desciende el nivel de agua del pozo cuando este se encuentra bombeando.

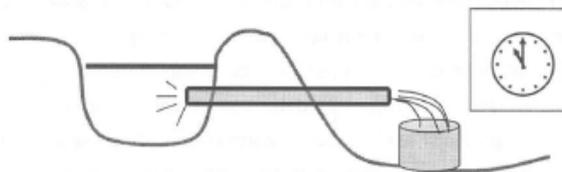
3.8.6. Aforo

Es el conjunto de mediciones que se efectúan a un cuerpo de agua, con la finalidad de estimar su caudal (volumen de agua de una corriente o flujo hídrico en una unidad de tiempo). Existen diferentes métodos para efectuar un aforo: sección-velocidad (parábola), volumétricos, químicos, entre otros. El método más común y práctico es el volumétrico que consiste en disponer de un recipiente de volumen conocido y cronometrar el tiempo que tarda en llenarse (Bello y Pino, 2000).

3.8.6.1. Métodos de aforo

Entre los métodos más usados para medir los caudales de agua se encuentran el Método Volumétrico, el Método de la trayectoria, entre otros.

1. Método volumétrico: Este método permite medir pequeños caudales de agua, como son los que escurren en surcos de riego o pequeñas acequias. Para ello es necesario contar con un recipiente de volumen conocido en el cual se colecta el agua, anotando el tiempo que demoró en llenarse. Esta operación puede repetirse 2 ó 3 veces y se promedia, con el fin de asegurar una mayor exactitud (Fig.3.8), (Bello y Pino, 2000).



$$Q = \frac{\text{Volumen Conocido (l)}}{\text{Tiempo (s)}}$$

Fig. 3.8. Medición de aforo volumétrico. (Tomado de Bello, M. y Pino, M., 2000).

2. Método de la trayectoria: es de gran utilidad para el aforo en tuberías y bombas. Con él es posible obtener una aproximación aceptable cuando se usa en forma adecuada. La ventaja que presenta es su fácil y rápida operación.

Se utiliza es una escuadra, cuya forma se indica en las Figura 3.9 (tubería a nivel). La característica de ella es que uno de sus lados (Y) debe medir 25 cm para poder hacer uso de las tablas que se detallan más adelante. La medición se realiza desplazando la regla hasta que el extremo inferior (mango) roce el chorro de agua que sale del tubo. El lado “X” de la regla debe quedar paralelo y apoyado en dicho tubo, para medir así la distancia horizontal que hay desde el punto donde el chorro toca la regla, a la boca de salida de la tubería. La tubería debe estar en forma horizontal. Debe cuidarse que no se produzcan curvaturas a lo largo de ella y que la tubería vaya llena de agua.

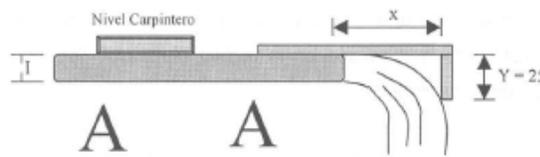


Fig. 3.9. Método de la trayectoria o de la escuadra. (Tomado de Bello, M. y Pino, M., 2000).

Es conveniente hacer varias lecturas con el fin de promediar los resultados y obtener una medición más próxima al caudal verdadero. Una vez realizada la medición en la reglilla horizontal “X” se mide el diámetro interno del tubo. Con estos dos valores se determina el caudal, de acuerdo a la siguiente formula;

$$Q = K * X \quad \text{Ecuación 3.12}$$

Donde:

Q: l/s

X: distancia en cm.

K: coeficiente

Donde, K es un coeficiente que depende del diámetro de la tubería y se puede determinar de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 3.5. Valores de K para distintos diámetros de tuberías.

D (Pulg)	K	D (Pulg)	K	D (Pulg)	K	D (Pulg)	K
2	0,0891	3 ^{1/4}	0,213	4 ^{1/2}	0,409	6	0,730
2 ^{1/4}	0,101	3 ^{1/2}	0,248	4 ^{3/4}	0,457	6 ^{1/4}	0,792
2 ^{1/2}	0,126	3 ^{3/4}	0,285	5 ^{1/4}	0,506	6 ^{1/2}	0,855
2 ^{3/4}	0,153	4	0,325	5 ^{1/2}	0,558	6 ^{3/4}	0,923
3	0,181	4 ^{1/4}	0,365	5 ^{3/4}	0,670	7	0,993

Tomado de Bello, M. y Pino, M. (2000).

3.8.7. Nivel piezométrico

Es el nivel que alcanzará el agua de un acuífero confinado en el supuesto de que se elimine el estrato confinante. Este nivel siempre está por encima de la capa saturada (Pérez, 2005). Es decir, es el nivel estático con respecto al nivel del mar. El nivel piezométrico puede ser calculado a partir de la ecuación;

$$NP = CT - PA \quad \text{Ecuación 3.13}$$

Donde;

NP: Nivel piezométrico (msnm)

CT: Cota del terreno (msnm)

PA: Profundidad del agua (m)

3.9. GRANULOMETRÍA Y LÍMITES DE CONSISTENCIA DEL SUELO

En cualquier masa de suelo, los tamaños de los granos varían considerablemente. Para clasificar apropiadamente un suelo, se debe conocer su distribución granulométrica. En suelos gruesos es generalmente determinada mediante análisis granulométrico por tamices. Para suelos de grano fino, puede obtenerse por medio del método del hidrómetro (Braja, 2001).

3.9.1. Clasificación de los suelos

Un sistema de clasificación de los suelos es un ordenamiento de los diferentes suelos en grupos que tienen propiedades similares. El propósito es dar facilidades para estimar las propiedades de un suelo por comparación con otros de la misma clase, cuyas propiedades se conocen, y para facilitar al ingeniero un método preciso para la descripción del mismo. Sin embargo, son tantas las propiedades diferentes de los suelos que interesan a los ingenieros y tantas las combinaciones de estas propiedades en cualquier depósito natural, que cualquier sistema de clasificación parece impracticable. En su lugar, los grupos o clases se basan en aquellas propiedades que son más importantes de acuerdo con el carácter particular de la obra de ingeniería para la cual se ha desarrollado la clasificación (Sowers y Sowers, 1972).

3.9.2. Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS).

El sistema cubre los suelos gruesos y los finos, distinguiendo ambos por el tamizado a través de la malla 200; las partículas gruesas son mayores que dicha malla y las finas, menores. Un suelo se considera grueso si más del 50% de sus partículas son gruesas. Y fino, si más de la mitad de sus partículas, en peso, son finas. (Badillo y Rodríguez, 2005). Se describirán en primera lugar los diferentes grupos referentes a suelos gruesos.

Suelos gruesos. El suelo de cada grupo está formado por dos letras mayúsculas, que son las iniciales de los nombres ingleses de los suelos más típicos de este grupo. El significado se especifica abajo;

- a. Gravas y suelos en los que predominan éstas. Símbolo genérico G (*Gravel*).
- b. Arenas y suelos arenosos. Símbolo genérico S (*Sand*).

Las gravas y las arenas se separan con el tamiz N° 4, de manera que un suelo pertenece al grupo genérico G, si más del 50% de su fracción gruesa (retenida en el tamiz 200) no pasa la malla N° 4, y es del grupo genérico S, en caso contrario.

Las gravas y las arenas se subdividen en cuatro tipos:

1. Material prácticamente limpio de finos, bien graduado. Símbolo genérico W (*Well Graded*). En combinación con los símbolos genéricos, se obtienen los grupos GW y SW.
2. Material prácticamente limpio de finos, mal graduado. Símbolo genérico P (*Poorly Graded*). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GP y SP.
3. Material con cantidad apreciable de finos no plásticos. Símbolo M (Del sueco *Mo* y *Mjala*). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GM y SM.
4. Material con cantidad apreciable de finos plásticos. Símbolo C (*Clay*). En combinación con los símbolos genéricos, da lugar a los grupos GC y SC.

Suelos finos. También en este caso el sistema considera a los suelos agrupados, formándose el símbolo de cada grupo por dos letras mayúsculas, elegidas con un criterio similar al usado para los suelos gruesos, y dando lugar a las siguientes divisiones:

- a. Limos inorgánicos, de símbolo genérico M (Del sueco *Mo* y *Mjala*).
- b. Arcillas inorgánicas, de símbolo genérico C (*Clay*)
- c. Limos y arcillas orgánicas, de símbolo genérico O (*Organic*).

Cada uno de estos tres tipos de suelos se subdivide, según su límite líquido, en dos grupos. Si este es menor de 50%, es decir, si son suelos de compresibilidad baja o media, se añade al símbolo genérico la letra L (*Low Compressibility*), obteniéndose por esta combinación los grupos ML, CL y OL. Los suelos finos con límite líquido mayor del 50%, es decir, de alta compresibilidad, llevan tras el símbolo genérico la letra H (*High Compressibility*), teniéndose así los grupos MH, CH y OH.

La grafica de plasticidad de Casagrande (Figura 3.10) es la base para la división de los suelos de grano fino y los distintos grupos de suelos finos ya mencionados se describen a continuación en forma más detallada.

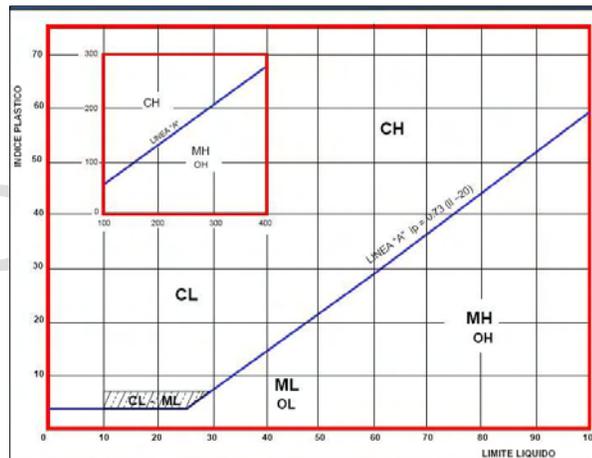


Fig. 3.10. Carta de plasticidad de A. Casagrande. Muestra el procedimiento, para determinar los símbolos de grupo para varios tipos de suelo de grano fino. (Tomado de: Gomez y Monsalve, 2010).

3.9.3. Límite de Atterberg

Los límites de Atterberg y sus índices de consistencia directamente relacionados, constituyen unos valores muy útiles para caracterizar los conjuntos de partículas de suelos. Los límites se basan en el concepto de que un suelo de grano fino solamente puede existir en cuatro estados de consistencia según su humedad. Así, un suelo se encuentra en estado sólido cuando está seco, pasando al añadir agua al estado semisólido, plástico y

finalmente líquido o fluido, como se indica en la Figura 3.11. Los contenidos de humedad y los puntos de transición de unos estados a otros se denominan límite de retracción o contracción, límite plástico y límite líquido respectivamente. Los cuatro índices citados en la Figura 3.11 se calculan a partir de esos límites (Braja, M., 2001 y Lambe y Whitman, 2006).

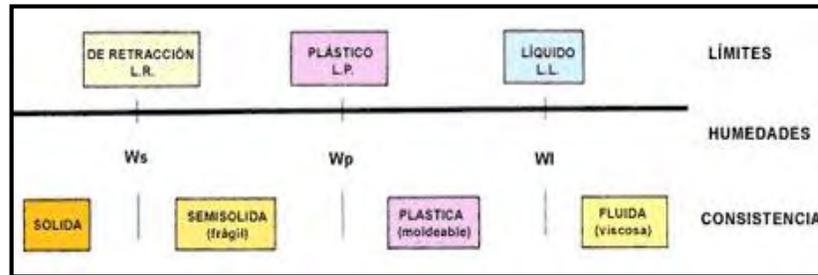


Figura 3.11. Plasticidad del material. Límites de Atterberg e índices de consistencia (Tomado de: Construmática, 2008).

El Límite líquido (LL) de un suelo es determinado por medio de la copa de Casagrande (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM) y se define como el contenido de agua con el cual se cierra una ranura de ½ pulgada (12.7 mm) mediante 25 golpes.

El Límite plástico (LP) se define como el contenido de agua con el cual el suelo se agrieta al formarse un rollito de 1/8 de pulgada (3.18 mm) de diámetro (Designación de Prueba D-4318 de la ASTM).

El Límite de contracción (LR) se define como el contenido de agua con el cual el suelo no sufre ningún cambio adicional de volumen con la pérdida de agua (Designación de Prueba D-427 de la ASTM).

La diferencia entre el límite líquido y el plástico de un suelo se define como Índice de Plasticidad (IP), muestra el rango de humedades dentro del cual el suelo se encuentra en estado plástico y de consistencia moldeable.

$$IP = LL - LP \quad \text{Ecuación 3.14}$$

La diferencia entre el límite plástico y el de contracción se define como *Índice de Retracción (IR)*, e indica la amplitud del rango de humedades dentro del cual el suelo se encuentra en estado semisólido.

$$IR = LP - LR \quad \text{Ecuación 3.15}$$

El concepto de un suelo como material que puede presentarse en varios estados, según su contenido de humedad, resulta muy útil. Cuanto mayor sea la cantidad de agua que contiene un suelo, menor será la interacción entre partículas adyacentes y más se aproximará el suelo en su comportamiento al de un líquido. Los límites de Atterberg y los índices asociados resultan muy útiles para la identificación y clasificación de suelos.

3.10. PRUEBAS DE BOMBEO

Un pozo de agua se prueba para lograr cualquiera de dos propósitos principales. El objetivo más usual es el de obtener información acerca del comportamiento y eficiencia del pozo mientras éste se bombea. En tal caso, el resultado se reporta en términos de la descarga, el abatimiento observado y la capacidad específica calculada. La anterior información, analizada bajo ciertas condiciones, nos dará una medida de la capacidad productora del pozo terminado y nos permitirá tener una base para la selección del equipo de bombeo. El otro objetivo de las pruebas, y que ha adquirido gran importancia, es el de suministrar datos de los cuales se obtienen los factores principales para calcular el comportamiento de los acuíferos.

Una prueba consiste en bombear de un pozo y registrar tanto el abatimiento de éste, como el producido por el bombeo en otros pozos vecinos de observación. Si la prueba se ha realizado correctamente, los datos que se obtengan pueden analizarse para descubrir las características hidráulicas del acuífero. Las mediciones que deben hacerse para lograr cualquiera de los propósitos antes descritos, incluyen los niveles estáticos antes de empezar el

bombeo, la razón de bombeo o descarga del pozo de bombeo, niveles de bombeo o niveles dinámicos durante varios intervalos de tiempo a lo largo de todo el período de bombeo, tiempo en que la bomba arranca, tiempo en que se haya observado cualquier cambio en la descarga, y tiempo al cual se detuvo el bombeo. Las mediciones de los niveles dinámicos después de cesar el bombeo son también de utilidad para el estudio de la recuperación (Keith, J. *et al*, 2006).

De manera general, estas pruebas pueden servir para dos objetivos principales:

- Determinar las características hidráulicas de acuíferos o de capas que transportan agua.
- Proporcionar información sobre el rendimiento y el descenso del nivel de agua en el pozo. Estos datos pueden ser utilizados para determinar la capacidad específica o la relación descarga-descenso del pozo, para seleccionar el tipo de bomba y para estudiar el coste del bombeo.

3.10.1. Tipos de ensayos de bombeo

Los diversos tipos de ensayos de bombeo, se resumen en el siguiente cuadro;

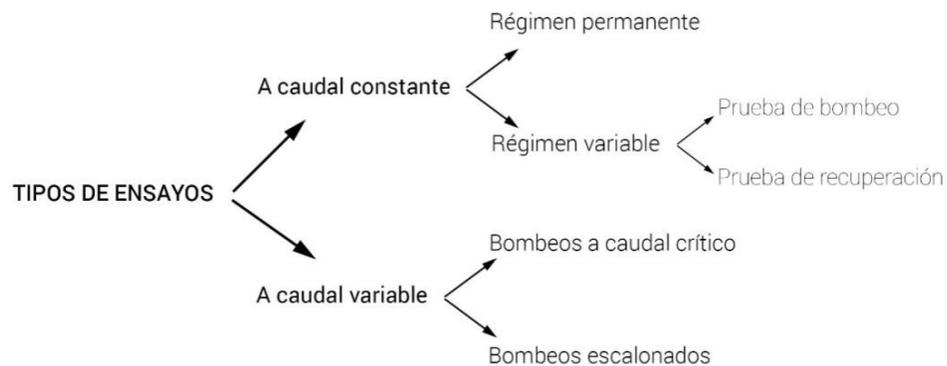


Fig. 3.12. Tipos de ensayo de bombeo

Se denomina régimen permanente aquel en el cual los niveles no varían con el tiempo, mientras que en el régimen variable si se produce esta variación.

Para la realización de las pruebas de bombeo, se requiere un proceso u orden a seguir, para una correcta toma de datos. Antes de empezar el bombeo, se debe medir la profundidad del nivel del pozo de bombeo, y los de observación o piezómetros si los hubiera.

En la realización de un bombeo a caudal constante Q , los niveles descienden durante cierto tiempo. La interpretación de los resultados de la variación del nivel respecto al tiempo se está en un régimen variable. Si transcurrido un tiempo de bombeo los niveles se estabilizan o varían poco, interpretando los descensos totales habidos con los niveles estabilizados en el pozo de bombeo o en los de observación, se estaría en un régimen permanente.

Para el caso del caudal variable, se realiza una prueba de modalidad de caudales escalonados. En esta se fija a voluntad o dependiendo del funcionamiento del tipo de bomba a usar distintos caudales, midiéndose la variación de nivel producida por cada uno de ellos.

3.10.1.1. Método de recuperación, régimen variable

Según Villanueva (1989), Los métodos de recuperación consisten en efectuar las interpretaciones del ensayo en base a los datos que se obtiene una vez que el pozo detiene su extracción de agua. A partir de la parada, los niveles empiezan a subir, hasta recuperar total o parcialmente el nivel inicial. Se basa en el análisis de la “recuperación” o evolución del ascenso de niveles posterior a la parada. La transmisividad T , que es el parámetro que puede obtenerse en el análisis de la recuperación, se saca directamente de la pendiente de la recta m haciendo uso de la relación;

$$m=0.183* \frac{Q}{T} \quad \text{Ecuación 3.16}$$

Donde;

m : es la pendiente de la recta.

Q : el caudal medido en $m^3/día$.

T : transmisividad en $m^2/día$.

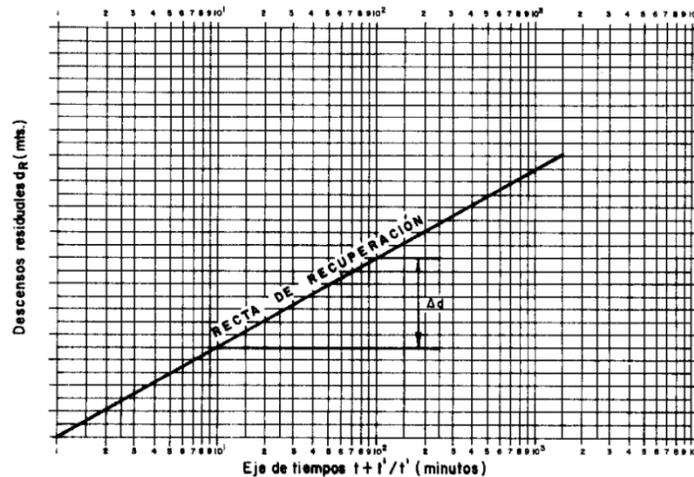


Fig. 3.13. Recta de recuperación, (Tomado de Villanueva, M. e Iglesias, A., 1989).

$m = \Delta d$, siendo Δd la caída por ciclo logarítmico, y por tanto:

$$T = 0.183 * Q / \Delta d$$

El caudal de bombeo Q debe expresarse en $m^3/día$ para obtener T en $m^2/día$. Se representa en un gráfico semilogarítmico los valores de los descensos residuales medidos versus el tiempo. Se grafican los descensos en escala métrica en el eje de las ordenadas y el tiempo de la forma $t + t' / t'$ en el eje de las abscisas en escala logarítmica. Se ajusta una recta a los puntos obtenidos y se obtiene el valor de T mediante la ecuación descrita anteriormente.

Esta recta puede representar anomalías en su parte inicial, que es la de valores t' bajos y, por tanto, valores altos para $t + t' / t'$. Por ello debe en general interpretarse los tramos rectos que pasan por el origen de coordenadas y que se encuentran en la zona de la curva más próxima al mismo.

3.11. GEOESTADÍSTICA

Es la rama de la estadística que se encarga de la aplicación de variables regionalizadas a la estimación de fenómenos naturales (geológicos, geográficos, entre otros) en el espacio, debido a que éstas variables son conocidas sólo en algunos puntos donde han sido tomadas mediciones, pero generalmente esta información no es suficiente, por lo tanto, es necesario determinar el valor de la variable en muchos otros puntos donde no se dispone de observaciones (Sánchez, 2007).

3.12. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

Es la idealización y/o simplificación de las características conocidas de un lugar para facilitar una aproximación práctica, comprende las siguientes características:

- Número de capas o unidades estratigráficas del acuífero.
- Condiciones de la superficie piezométrica.
- Límites horizontales y verticales.
- Zonas de recarga y descarga.

Para la elaboración de dicho modelo se utilizan principalmente datos de pozo, ya que son los principales medios de comunicación entre el reservorio de agua subterránea y la superficie del terreno.

3.13. ZONIFICACIÓN

La zonificación para el manejo ambiental de un territorio, es el resultado de la integración de los diagnósticos biofísico, sociocultural y económico, la cual permite dividir el territorio en zonas homogéneas en cuanto a características ecológicas, socioeconómicas y culturales. Esta zonificación, busca identificar los conflictos entre la oferta y la demanda del recurso hídrico, evaluando los distintos parámetros que permitan establecer el mejor aprovechamiento del

acuífero en el área de estudio, y así posteriormente establecer estrategias o lineamientos específicos de manejo que apunten a la optimización del uso del recurso, sin sobrepasar los límites de sostenibilidad, esto es, sin deteriorar la estructura y las funciones ecológica, que son la base natural de los recursos en cada una de las zonas.

3.14. VULNERABILIDAD A LA CONTAMINACIÓN DEL ACUÍFERO

El término vulnerabilidad a la contaminación del acuífero es usado para representar las características que determinan su susceptibilidad a ser adversamente afectado por una carga contaminante que cause cambios químicos, físicos o biológicos que estén por encima de las normas de utilización del agua (Auge, 2004).

La vulnerabilidad de un acuífero frente a la contaminación del agua subterránea es una propiedad del acuífero cualitativa, relativa, no medible y adimensional. La exactitud de la evaluación de la vulnerabilidad depende, sobre todo, de la cantidad y calidad de los datos, de su fiabilidad y representatividad. De forma genérica, el cálculo de la vulnerabilidad de un acuífero se puede realizar cualitativamente, estableciendo una categorización, por ejemplo, vulnerabilidad muy alta, alta, media y baja.

Según Auge (2004), existen muchas definiciones del concepto de vulnerabilidad del agua subterránea a la contaminación, en la actualidad existen dos grandes corrientes; aquellas que no tienen en cuenta la incidencia de la sustancia contaminante solo consideran las propiedades del medio como por ejemplo el tipo acuífero, cobertura, permeabilidad, profundidad, recarga, entre otros., llamada vulnerabilidad intrínseca; y aquellos que además del comportamiento del medio otorgan trascendencia al contaminante como el tipo y carga del mismo, denominada vulnerabilidad específica.

Existen cuatro grandes grupos de métodos para la evaluación de la vulnerabilidad a la contaminación; los métodos de simulación, los métodos estadísticos, los métodos de índices y de superposición y el método de ambientes hidrogeológicos. En este último, evalúan la vulnerabilidad de grandes ambientes hidrogeológicos en términos cualitativos, utilizando una superposición de mapas temáticos. Es aplicable cuando la información básica específica es inadecuada o escasa.

El método DRASTIC es el más utilizado para evaluar la vulnerabilidad a la contaminación, ya que es el que más parámetros engloba, analizando una carga contaminante puesta en superficie, es decir flujos verticales descendentes, dándole valoración a distintos parámetros que dependen de las características y el comportamiento del acuífero.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO IV

MARCO METODOLÓGICO

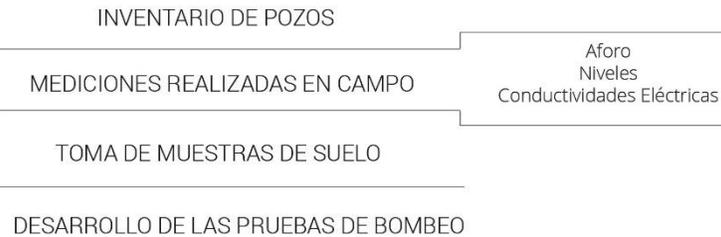
www.bdigital.ula.ve

**ETAPA I
DOCUMENTACIÓN**



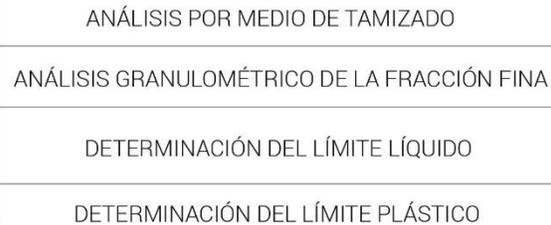
Mapa Geológico
Mapa Hidrogeológico

**ETAPA II
CAMPO**

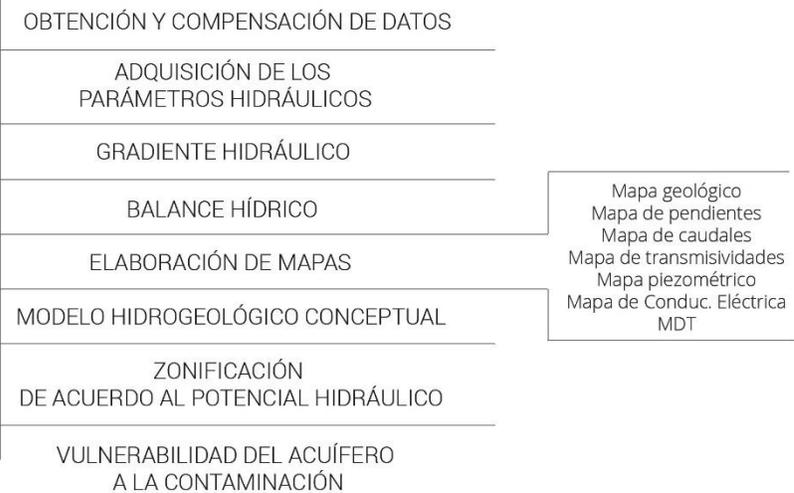


Aforo
Niveles
Conductividades Eléctricas

**ETAPA III
LABORATORIO**



**ETAPA IV
OFICINA**



Mapa geológico
Mapa de pendientes
Mapa de caudales
Mapa de transmisividades
Mapa piezométrico
Mapa de Conduc. Eléctrica
MDT

Fig. 4.1. Esquema metodológico.

4.1. ETAPA I. DOCUMENTACIÓN

4.1.1. Investigaciones previas del área de estudio

Esta etapa consiste en recopilar toda la información y los datos existentes de la zona de estudio, con el objetivo de conocer la disponibilidad de los mismos y comenzar la investigación, permitiendo así establecer un cronograma adecuado para el desarrollo del proyecto. Como primero se propone la búsqueda de información acerca de trabajos técnicos y de investigaciones realizadas en ésta y otras áreas adyacentes, trabajos finales de grado de la Universidad de Los Andes (ULA) y la Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado (UCLA), boletines de geología y minas, imágenes satelitales, además de la recopilación de información en informes técnicos realizados por el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente, el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología y el Centro Interamericano de Desarrollo Integral de Aguas y Tierras.

Se realizó una búsqueda de información técnica de pozos según las secciones extensas, se compilaron los datos básicos de dichos pozos provenientes de la unidad operativa del INAMEH en el estado Lara, tales como, coordenadas, niveles piezométricos, profundidades, caudales y litologías; finalmente se seleccionaron los pozos que poseen los datos más completos, así como también los pozos con litología para poder posteriormente realizar las correlaciones.

4.1.2. Revisión cartográfica

Recopilación de todo el material cartográfico de la zona de estudio, como mapas topográficos, geológicos e hidrogeológicos, con el objetivo de conocer las características fisiográficas, geológicas, estructurales e hidrogeológicas que permitirá una posterior delimitación del área y proporcionará una idea de cuál sería la mejor forma de recorrer la zona, conociendo donde se encuentran

las vías de acceso y los asentamientos de personas donde pudieran encontrarse pozos y sitios de muestreo.

Mapas utilizados

- Mapa Geológico de Venezuela a escala 1:750.000, elaborado por Urbani *et al.*, con la colaboración de la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela (UCV), actualizado en el año 2006.
- Mapa Geológico del estado Lara a escala 1:275.000, aportado por el Instituto de Geología y Minas del estado Mérida (INGEOMIN), modificado por Montilla J, en el 2008 y elaborado por Urbani *et al.*, en el año 2006. Perteneciente al *U.S. Geological Survey*, FUNVISIS y la Escuela de Geología, Minas y Geofísica, Universidad Central de Venezuela.
- Mapa Geológico Estructural a escala 1:500.000 (2da Edición) año 1976, hoja NC-19-IV, elaborado por el Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Mapa Hidrogeológico a escala 1:500.000 perteneciente a la hoja de Maracaibo NC-19-IV, elaborado en el año 1976 por el Ministerio de Minas e Hidrocarburos.
- Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela elaborado por *U.S Geological Survey (USGS)* y la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS), 2000.

4.1.3. Revisión de imágenes satelitales

Además de la recolección cartográfica, también fue necesario tener una idea espacial del área de estudio. Para esto se procedió a la recolección de imágenes satelitales que permitieron una visualización de la superficie terrestre y a su vez la realización de un análisis para conocer el

comportamiento de la zona respecto a las vías de acceso, la influencia antrópica, los cauces de ríos presente, la morfología, el relieve, entre otros. Dicha recopilación se realizó por medio de centros certificados que logren tener una diversidad de imágenes para generar un estudio más diverso e integrado del área.

Una de las fuentes de aporte principales de imágenes satelitales fue el uso del programa *Google Earth* sirviendo como herramienta para identificar, reconocer e inspeccionar eficazmente los pozos y sitios de interés del área de estudio y permitir una mejor ubicación dentro del perímetro estudiado a través del GPS.

4.1.4. Diseño de las pruebas de bombeo

La ejecución de pruebas de bombeo requiere una correcta planeación para la obtención de los mejores resultados, la ubicación de los sitios de prueba, manejo y selección de equipos, duración de la prueba, caudales de bombeo, medición de niveles, aforo, tipo de bombas, y ciertas condiciones requeridas para realizarlas, como por ejemplo, que el pozo haya estado apagado al menos por 24 horas antes de iniciar la prueba; así como los de observación, para que presenten su nivel estático verdadero, además no deben existir pozos bombeando cerca del que se realizará la prueba.

Se trataron de ubicar los pozos que cumplieran con la mayoría de los requerimientos necesarios para poder realizar las pruebas, tratando de ubicarse a lo largo de todo el eje del acuífero para así obtener una mejor correlación de resultados, debido a que el tiempo es insuficiente para poder realizar la mayor cantidad de pruebas en toda la extensión del acuífero.

De acuerdo al funcionamiento de la bomba, se diseñaron pruebas de 12 horas de bombeo y 12 horas de recuperación, haciendo en total, pruebas de

bombeo de 24 horas. Dichas pruebas se realizaron mediante el uso de unos transductores de presión denominados *Diver* (ver Figura 4.10).

Primero se debe programar el equipo, por medio del software *Diver-Office* (*Schlumberger Water Services*) se crea un nuevo proyecto donde se agregan los datos una vez realizadas las pruebas de bombeo.

Para diseñar la prueba de bombeo, en el programa, en la pestaña preferencias → prueba de bombeo.



Fig. 4.2. Diseño de la prueba de bombeo en el software *Diver-Office*.

Se generará el cuadro de dialogo “Prueba de Bombeo” (Fig. 4.3), donde se añaden la cantidad de muestras que registrará el transductor de presión (*Diver*) por cada intervalo de segundos determinado, durante 12 horas de bombeo y 12 horas de recuperación de acuerdo al tipo de pozo donde se realizará la prueba.

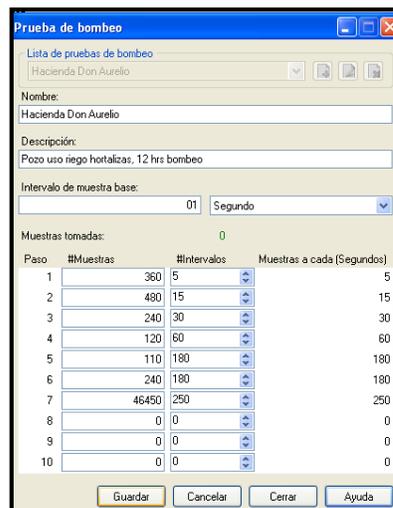


Fig. 4.3. Ajuste de la prueba de bombeo en el software *Diver-Office*.

Cada configuración se realiza para cada prueba de bombeo, una vez guardada la prueba, se conecta el *Diver* y se añade la configuración al mismo. Por último, se programa para que comience a registrar los datos al ingresarlo al pozo de acuerdo a la fecha y hora asignada.

La prueba se configuró para que registrara los primeros 30 minutos cada 5 segundos, las siguientes 2 horas cada 15 segundos, las próximas 2 horas cada 30 segundos, las siguientes 2 horas cada 60 segundos, y las 5 horas y 30 minutos restantes cada 180 segundos. Y para la prueba de recuperación, para 12 horas se midieron cada 180 segundos, y así se completó la configuración de 12 horas de bombeo y 12 horas de recuperación.

4.2. ETAPA II. CAMPO

Esta etapa se realizó aplicando los conocimientos y las herramientas ya aprendidos, para la elaboración de aforos, medición de niveles y de conductividad eléctrica, toma de muestras de suelo y pruebas de bombeo, en donde haciendo uso de los mapas geológicos, topográficos e imágenes satelitales se realizó un barrido total de la zona con el fin de poder corroborar datos existentes como la ubicación de los pozos, dentro del cual se determinó a través del GPS (*Global Positioning System*) para obtener datos de coordenadas en UTM y las cotas del terreno, con la finalidad de determinar la ubicación exacta de los pozos y sitios de interés para realizar las pruebas de bombeo y la toma de muestras de suelo para la determinación de la permeabilidad en el laboratorio.

Es importante resaltar que el área de estudio está cubierta por depósitos cuaternarios y en su mayoría se extienden a haciendas con fines agrícolas y ganaderas. Cabe destacar que la información de campo se logró obtener gracias a la colaboración de José Villareal, integrante del área operativa del INAMEH en la región del estado Lara, quien prestó su colaboración para ir a

cada uno de los lugares por la facilidad que presentaba al ya tener conocimiento de la ubicación de los pozos.

4.2.1. Inventario de pozos

En esta etapa se recorrió toda el área de estudio, para la identificación de los pozos existentes en la zona y obtener la información necesaria para localizar los que cumplieran con los requerimientos para realizar las pruebas de bombeo y encontrar los puntos óptimos para tomar las muestras de suelo y así poder clasificar dicho suelo, mediante ensayos de granulometría y límites de consistencia, que permitan dar una idea de la permeabilidad superficial del acuífero.

La descripción de campo constó en la ubicación de los pozos en el área, toma de fotografías y anotaciones necesarias para el llenado de las planillas de campo (Anexo A.1).

Para obtener las coordenadas y cotas de los pozos y puntos de interés se utilizó un GPS *Garmin nüvi 30*.

El listado de los pozos utilizados en este estudio se muestra en la Tabla 4.1, teniéndose un total de 28 pozos. El datum geodésico utilizado para las coordenadas UTM es REGVEN (WGS84), huso 19. En la Figura 5.1, se observan los pozos cartografiados.

Tabla 4.1. Inventario de pozos.

Pozo	Ubicación	Coordenadas UTM		Cota (msnm)
		E	N	
P1	Perarapa	477007	1132268	676
P2	Perarapa	478030	1132307	675
P3	El Milagro	480124	1134591	690
P4	El Milagro	479890	1134951	694
P5	Don Aurelio	482172	1135516	730
P6	Duaca	484067	1136129	746

P7	Duaca	484211	1135925	743
P8	Duaca	484882	1135798	775
P9	Duaca	483179	1136746	728
P10	Duaca	482994	1136842	735
P11	Duaca	483065	1136369	732
P12	Barro Negro	482457	1136484	734
P13	Barro Negro	482721	1136709	721
P14	Barro Negro	482311	1136372	738
P15	Duaca	483054	1136016	724
P16	Duaca	482377	1135875	718
P17	Duaca	481699	1135575	712
P18	Duaca	481864	1135927	715
P19	Duaca	481773	1136214	719
P20	Duaca	481130	1136080	714
P21	Duaca	481455	1135381	714
P22	Duaca	481327	1135628	714
P23	Perarapa	477489	1132539	678
P24	Perarapa	478269	1132341	680
P25	El Samán	479451	1134368	697
P26	El Eneal	479261	1134155	696
P27	Duaca	482045	1135185	720
P28	El Eneal	479091	1134499	683

4.2.2. Mediciones realizadas en campo

Aforo. Se realizaron mediciones de caudales a todos los pozos ubicados en la zona, en los que las condiciones lo permitían, se utilizó el método volumétrico y el método de la escuadra promediando ambos resultados para una mejor precisión.

El método volumétrico se realizó con un recipiente de volumen 108 L y un cronómetro marca Casio (Fig. 4.4.), y el cálculo del caudal se determinó de acuerdo a lo descrito en el capítulo 3.



Fig. 4.4. Equipo utilizado para realizar el método volumétrico

El método de la escuadra se realizó en los pozos que cumplían con las condiciones, como que la tubería estuviese a nivel, utilizando una escuadra graduada elaborada en madera (Fig. 4.5.) y el caudal se determinó de acuerdo al método de la trayectoria descrito en el capítulo 3.



Fig. 4.5. Escuadra utilizada para realizar el método de la trayectoria.

Niveles. Para medir los niveles estáticos y dinámicos, se utilizó una sonda eléctrica de medición, marca SEBBA (Fig. 4.6), donde al introducirla al pozo, el sistema eléctrico enciende una luz indicando el contacto con el agua y se obtiene la medida del nivel en metros.



Fig. 4.6. Sonda automática de medición

Conductividad Eléctrica. Para la medición de la conductividad eléctrica del agua se utilizó un conductivímetro, debidamente calibrado, marca WTW, modelo *LF 95* el cual registra valores de temperatura en °C y conductividad eléctrica en $\mu\text{siemens/cm}$. Se midieron las conductividades eléctricas de 11 pozos en total.



Fig. 4.7. Conductivímetro utilizado en campo.

4.2.3. Toma de muestras de suelo

Se tomaron muestras de suelo para posteriormente realizarle ensayos de granulometría y límites de consistencia en el laboratorio y para clasificar el tipo de suelo y obtener información de permeabilidad superficial del suelo del área de estudio que permitan una mejor interpretación y correlación con todos los demás datos obtenidos en la etapa de campo.

Las muestras de suelos se obtuvieron con ayuda de un barreno y se realizaron donde se encontrara más sencillo obtenerlas a partir de 1 metro de profundidad, ya que no se contaba con el equipo necesario para realizar calicatas.



Fig. 4.8. Toma de muestra del suelo.

Se tomaron 4 muestras de suelos a lo largo del eje principal del área de estudio, tratando de abarcar la mayor extensión posible del acuífero. Básicamente, se tomaron las muestras en el suelo cercano a los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo (Fig. 4.9).

Tabla 4.2. Ubicación de los puntos donde se tomaron las muestras de suelo.

Pto	Ubicación	Coordenadas UTM		Cota (msnm)
		E	N	
1	Duaca	482172	1135516	730
2	El Milagro	480119	1134588	694
3	El Milagro	479451	1134368	695
4	Perarapa	478080	1132307	696

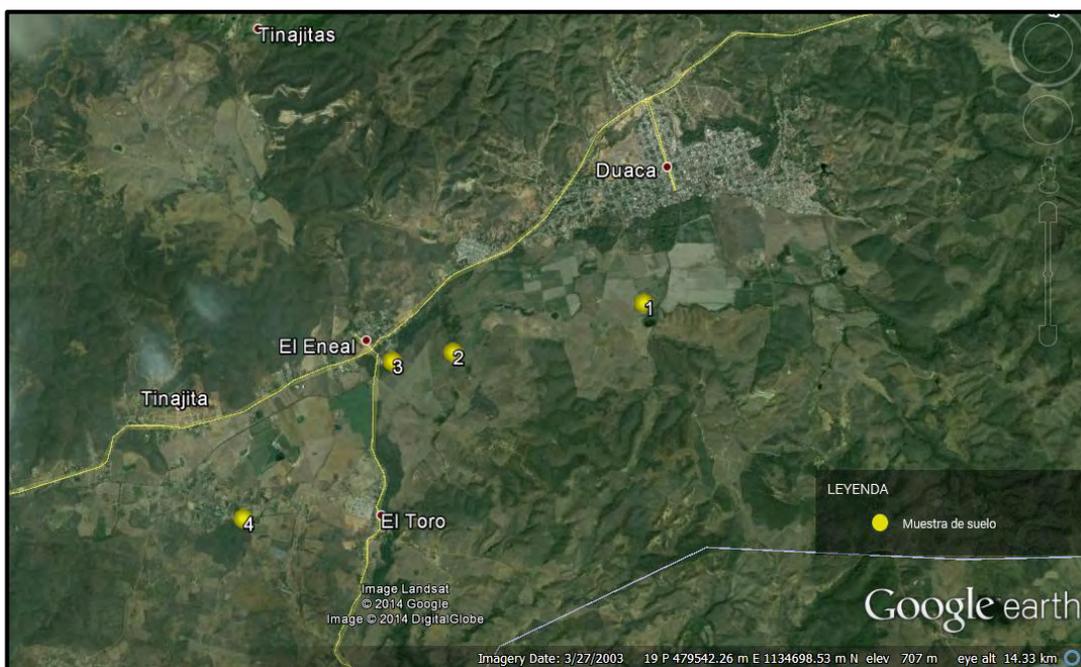


Fig. 4.9. Ubicación de los puntos de muestreo de suelo.

4.2.4. Desarrollo de las pruebas de bombeo.

Se realizaron 3 pruebas de bombeo para determinar las características hidráulicas del acuífero, con los pozos que cumplieron con las condiciones necesarias, ya que en algunos de ellos, los dueños no podían apagar la bomba o mantenerla prendida por mucho tiempo, porque afectaba su trabajo diario, debido a que la gran mayoría de los pozos eran de uso agrícola, mientras que en otros pozos no había manera de ingresar los dispositivos para realizar las pruebas.

Para realizar las pruebas de bombeo se utilizaron unos transductores de presión (*MicroDiver*) de *Schlumberger Water Services*, el cual es un instrumento herméticamente sellado de acero inoxidable, lo que lo hace insensible a la humedad, de gran precisión y de control automático para medir el agua subterránea y la temperatura con fecha y hora de registro de los datos, además cuenta con una batería de larga duración.

Los transductores de presión usados en las pruebas de bombeo fueron los siguientes modelos, DI605-50m y DI610-100m, los cuales tienen un diámetro de 18 mm y una longitud de 88 mm (Fig. 4.10). Consta de un sensor de presión diseñado para medir la presión del agua, de un sensor de temperatura, de memoria para almacenar las mediciones y de una batería. Las mediciones se almacenan en la memoria interna del *Diver*.

La prueba se realizaba ingresando, hasta cierta profundidad, el *Diver* en el pozo, que cumpliera con las condiciones anteriormente especificadas, con un hilo nylon previamente medido para sostener el dispositivo dentro del pozo.

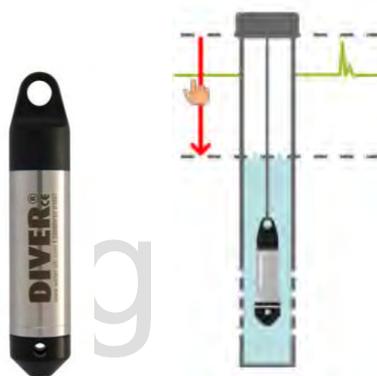


Fig. 4.10. Modelo *MicroDiver*, y esquema de medición en el pozo. (Tomado de <http://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/SP/m2-1111sdiver.pdf>)

Todos los *Divers* establecen la altura de una columna de agua, midiendo la presión del agua con el sensor de presión integrado. Mientras el *Diver* no está sumergido en el agua, mide la presión atmosférica como si fuera un barómetro. Un vez que se sumerge el *Diver*, esto se complementa con la medición de la presión del agua, mientras más alta sea la columna de agua, mayor será la presión medida. La altura de la columna de agua por encima del sensor de la presión del *Diver* se determina en función de la presión medida.

Para medir estas variaciones en la presión atmosférica, se instala un *Baro-Diver* en el exterior de cada pozo. En nuestro caso, solo contábamos con un *Baro-Diver* para 3 *MicroDiver*, por lo que no se podían realizar varias pruebas

a la vez si los pozos entre sí se encontraban demasiado lejos. La compensación barométrica para estas variaciones en la presión atmosférica se logra posteriormente utilizando el software *Diver-Office* de SWS. El modelo de *Baro-Diver* utilizado es DI500 (Fig. 4.11), el cual tiene un diámetro de 22 mm y una longitud de 90 mm, este dispositivo almacena alrededor de 24000 registros de marca de tiempo.

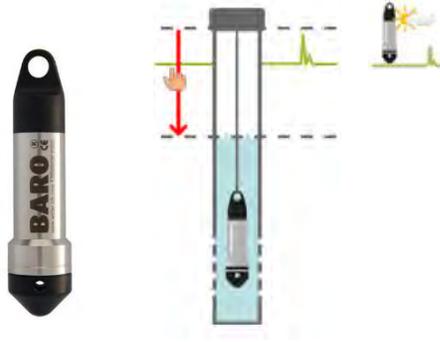


Fig. 4.11. Modelo *Baro-Diver*, y esquema de medición fuera del pozo. (Tomado de <http://www.eijkelkamp.com/files/media/Gebruiksaanwijzingen/SP/m2-1111sdiver.pdf>)

Las pruebas iniciaban unos minutos antes de que se encendiera el pozo para obtener datos precisos al momento de encendido, luego de transcurridas las 12 horas de bombeo, se apagaba el pozo por 12 horas y se comenzaba a registrar los datos de la recuperación.



Fig. 4.12. Ajuste del *Diver* para ingresarlo en el pozo.

Existieron algunas limitantes al momento de ingresar los *MicroDiver* al pozo y es que algunos de ellos no presentaban orificios que permitieran ubicar el dispositivo dentro del pozo (Fig. 4.13).



Fig. 4.13. Pozo sin orificios para poder ingresar el *MicroDiver*.

Como no se disponía de suficiente tiempo, ni de gran cantidad de *Divers* se trataron de seleccionar los pozos que abarcaran el eje principal del área de estudio tratando de incluir la zona media y los extremos del acuífero para tener posteriormente una mejor interpolación de los datos. (Fig. 4.14).

Tabla 4.3. Ubicación de los pozos donde se realizaron las pruebas de bombeo.

Ubicación	Pozo	Coordenadas UTM		Q (l/s)	Cota (msnm)
		E	N		
Duaca	P5	482172	1135516	6	730
El Milagro (Pozo de bombeo)	P4	482172	1135516	17	694
El Milagro (Pozo de observación)	P3	480119	1134588		690

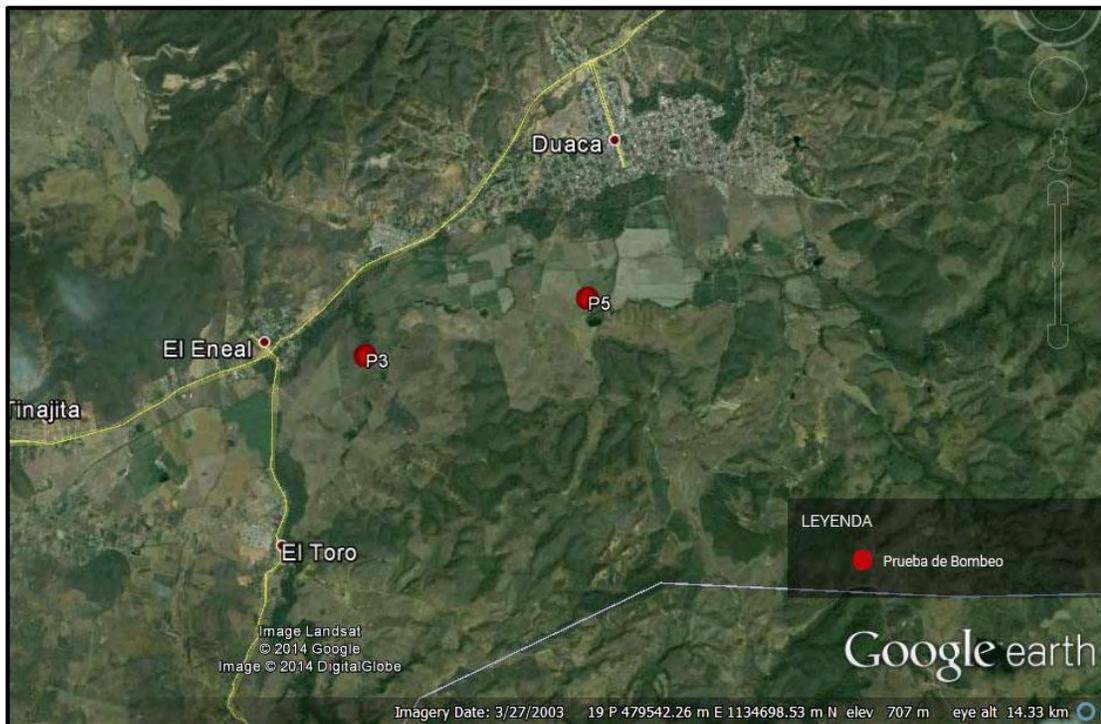


Fig. 4.14. Ubicación de pozos con pruebas de bombeo.

Las pruebas de bombeo son la herramienta más confiable para determinar las propiedades hidráulicas de un acuífero, por lo que se realizaron dos pruebas de bombeo de larga duración.

Las pruebas se realizaron los días 12 y 13 de Febrero del 2014. Se verificó que los pozos se mantuvieron apagados por 24 horas antes de empezar las pruebas, el cual se consideró tiempo suficiente para que se restableciera el nivel del agua a sus condiciones iniciales y obtener lecturas más precisas.

Los pozos elegidos para las pruebas de bombeo están representados en la Figura 4.14. El pozo 3 se había seleccionado para ser pozo de observación, ya que no contaba con una bomba, y el pozo de bombeo se encontraría a 400 m de este pozo. Por el contrario, el pozo 5 no contaba con pozo de observación cerca, por lo que se realizó la prueba en el pozo de bombeo.

Para el pozo 5, se programó un tiempo de duración de la etapa de bombeo de 720 minutos (12 horas), tiempo en el cual el pozo lograría el descenso máximo y el equilibrio, para inmediatamente detener la bomba y se empezó a tomar las lecturas de la etapa de recuperación, la cual duraría 720 minutos.

La prueba en el pozo 5 inició a las 7:00am el 12 de febrero de 2014 con un caudal constante de 6 l/s. La etapa de bombeo tuvo una duración 540 minutos (9 horas), menos tiempo de lo esperado, ya que la bomba se vio afectada por un fallo de 6 horas en la energía eléctrica. Un vez que el pozo se estabilizó, se paró la bomba e inmediatamente se empezaron a tomar las medidas de la etapa de recuperación. Esta etapa también tuvo una duración de 540 minutos con una total recuperación del nivel dinámico con respecto al nivel estático.

4.3. ETAPA III. LABORATORIO

Una vez obtenidas las muestras de suelo en campo, se realizaron ensayos de granulometría y límites de consistencia en el Laboratorio de Mecánica de Suelos y Pavimentos de la Universidad de Los Andes, permitiendo clasificar el tipo de suelo y así obtener información de permeabilidad superficial de las muestras.

4.3.1. Análisis por medio de tamizado de la fracción retenida en el Tamiz de 4.75 mm (n° 4) (ASTM D 422).

- Se separa la muestra retenida en el tamiz 4.75mm (N° 4) en una serie de fracciones usando los tamices de: 75 mm (3 in), 50,8 mm (2 in), 38,1 mm (1 1/2 in), 25,4 mm (1 in), 19 mm (3/4 in), 9,5mm (3/8 in), 4,75 mm (N° 4).
- El tamizado consiste en mover el tamiz o tamices de un lado a otro, recorriendo circunferencias; el tamizado continúa hasta cuando no pasa

más del uno por ciento de la masa retenida al tamizar durante 60 segundos.

- Se determina el peso de la muestra retenida en cada tamiz y se registra. La suma de los pesos retenidos de todos los tamices y el peso inicial de la muestra no debe diferir en más de 1%.

4.3.2. Análisis granulométrico de la fracción fina.

El análisis granulométrico del material que pasa el tamiz de 4,75 mm (N° 4) se hace por tamizado y/o sedimentación según las características de la muestra y la información requerida.

- Los materiales arenosos que contengan muy poco limo y arcilla, cuyos terrones en estado seco se desintegran con facilidad, se pueden tamizar en seco.
- Los materiales arcillosos y limosos cuyos terrones en estado seco no se desintegren con facilidad, se pueden realizar por vía húmeda.
- Si se requiere la curva granulométrica completa incluyendo la fracción menor que el tamiz de 0,074 mm (N° 200), la granulometría se realiza por el método del hidrómetro.
- La fracción de tamaño mayor que el tamiz de 0,074 mm (N° 200) se realiza por tamizado en seco, lavando la muestra previamente sobre el tamiz de 0,074 mm (N°200).

Procedimiento para el análisis granulométrico por lavado sobre el tamiz de 0,074 mm (N°200).

- Mediante cuarteo se separa 1000 g para suelos arenosos y 500 g para suelos arcillosos y limosos, pesándolo con balanza de apreciación de 0,01g.

- Se coloca la muestra en un recipiente apropiado, cubriéndola con agua y se deja en remojo hasta que todos los terrones se ablanden.
- Se lava la muestra sobre el tamiz de 0,074 mm (N° 200) con abundante agua, teniendo mucho cuidado de que no se pierda ninguna partícula de las retenidas en él.

4.3.3. Determinación del límite líquido (ASTM D 4318).

Se toma una muestra con una masa aproximada de 100g, de la porción completamente mezclada del material pasante del tamiz de 0,425 mm (N° 40) que se ha obtenido de acuerdo con la norma AASHTO T 87 (preparación de muestras secas de suelos perturbados para ensayos) o la norma AASHTO T 146 (preparación húmeda de muestras de suelos perturbados para ensayos).

Una mezcla de suelo (pasante del tamiz n° 40) y agua, se deposita en la Copa de Casagrande, con el ranurador se abre una abertura en la muestra contenida en la copa y se golpea consecutivamente contra la base de la máquina, haciendo girar la manivela, hasta que el surco que previamente se ha recortado, se cierre. Si el número de golpes para que se cierre el surco es 25, la humedad del suelo (razón peso de agua/peso de suelo seco) corresponde al límite líquido.

4.3.4. Determinación del límite plástico (ASTM D 4318).

Se requiere una cantidad de suelo con una masa aproximada de 20g del material que pasa el tamiz 0,425 mm, obtenido de acuerdo con la norma AASHTO T 87 (preparación de muestras seca de suelo perturbado y muestra de suelo agregado para ensayos) o la norma AASHTO T 146 (preparación de muestras húmedas de suelo perturbado para ensayos). Se coloca el suelo secado al ambiente en el plato de mezclado y se agrega agua destilada o

desmineralizada hasta que la masa se vuelva plástica y pueda formarse con facilidad una esfera con la masa de suelo.

Una mezcla de agua y suelo pasante por tamiz nº40, se amasa entre los dedos o entre el dedo índice y una superficie inerte (vidrio), hasta conseguir un cilindro de 3 mm de diámetro. Al llegar a este diámetro, se desarma el cilindro, y vuelve a amasarse hasta lograr nuevamente un cilindro de 3 mm. Esto se realiza consecutivamente hasta que no es posible obtener el cilindro de la dimensión deseada. Con ese contenido de humedad, el suelo se vuelve quebradizo (por pérdida de humedad). Se mide el contenido de humedad, el cual corresponde al límite plástico. Se recomienda realizar este procedimiento al menos 3 veces

4.4. ETAPA IV. OFICINA

Esta etapa corresponde al procesamiento, redacción, corrección de datos, construcción de mapas y demás aspectos que permitan elaborar de forma organizada el trabajo final de grado, para poder cumplir y concluir con todos los objetivos establecidos. Por lo tanto, en esta etapa se generaran conclusiones de los datos obtenidos, se dará solución a la problemática establecida al inicio de la investigación que permita cumplir con cada uno de los objetivos específicos planteados.

4.4.1. Obtención y compensación de datos obtenidos de las pruebas de bombeo.

Diver-Office 2012.1
Schlumberger Water Services

El *Diver-Office* es el programa que permite obtener los datos registrados por el *Diver* al momento de realizar las pruebas de bombeo. Una vez realizadas, los *Divers* almacenan en su memoria interna todos los datos registrados para cada prueba. Se descarga la información a la computadora y

se procesan los datos con el software (Fig. 4.15), seleccionando el icono *Diver*, en el programa.

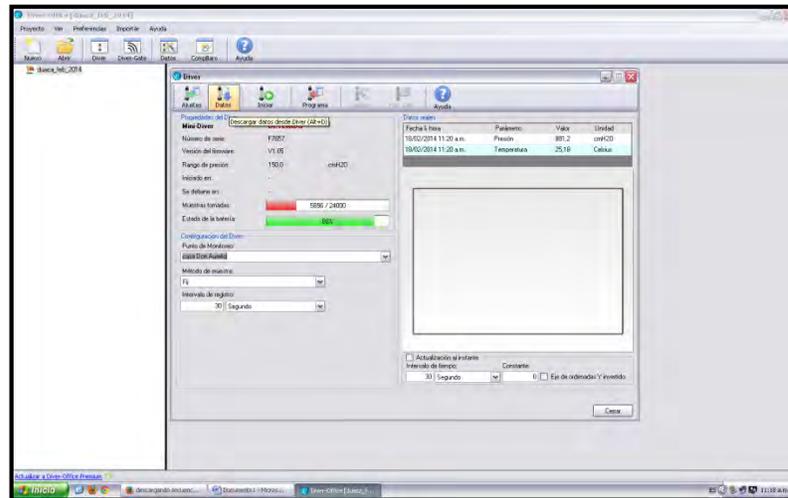


Fig.4.15. Descarga de datos de los *MicroDiver* al programa.

Se comprueban los datos obtenidos por el *Diver*, se procede a guardar la información en formato .csv (*comma-separated values*) que puede ser visualizado posteriormente con *Microsoft Excel*.

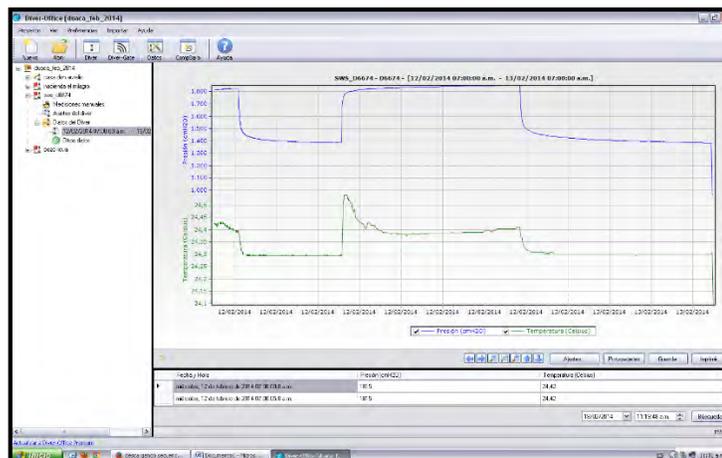


Fig. 4.16. Datos registrados por el *Diver* durante la prueba de bombeo.

Cabe resaltar que estos datos aún no han sido compensados, es decir, no se han restado los registros de la presión atmosférica obtenida por el baro. Para ello, una vez guardado los datos del *Baro-Diver*, se selecciona la pestaña

Datos y saldrá el cuadro de diálogo “Datos” donde se eligen los pozos con los que se hará la compensación barométrica y obtener solamente la presión en cmH_2O de la columna de agua por encima del *Diver*.

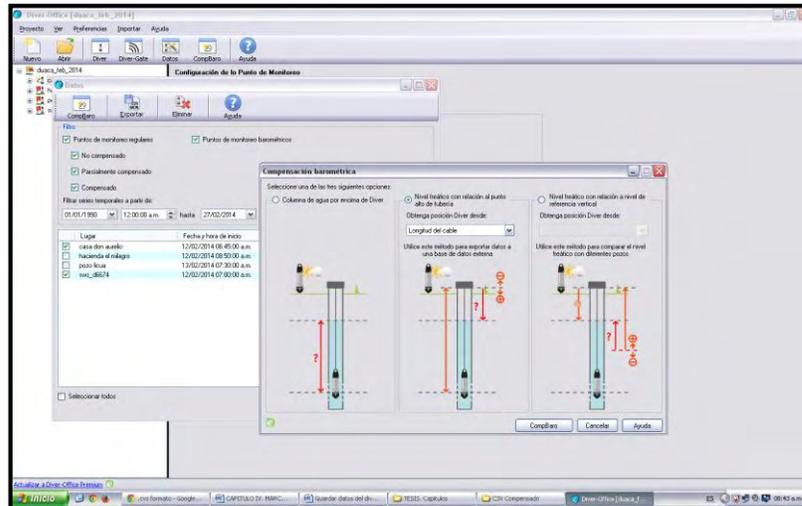


Fig.4.17. Compensación barométrica de los datos registrados.

Se guardan los datos compensados en formato .csv donde posteriormente podrán ser visualizados en *Microsoft Excel*. Los registros de las pruebas de bombeo se encuentran tabulados en el apartado B de los anexos.

4.4.2. Adquisición de los parámetros hidráulicos del acuífero

AquiferTest v.4.0
Waterloo Hydrogeologic Inc.

Este software almacena, analiza y reporta datos del bombeo que permite el posterior análisis de prácticamente cualquier condición del acuífero. Las capacidades analíticas que tiene el software se complementan con un conjunto de técnicas fáciles de usar de representación gráfica y elaboración de informes.

Se crea un nuevo proyecto y una vez guardados los datos del *Diver-Office* en formato .csv, se abren con *Microsoft Excel* y se copian los registros de fecha, tiempo y carga hidrostática en un archivo de bloc de notas para luego

ser importados desde la pestaña “*Water Levels*” luego del menú desplegable *File*, se selecciona *Import*, y se importan desde la herramienta *Data Logger File* del *AquiferTest* (Fig.4.18).

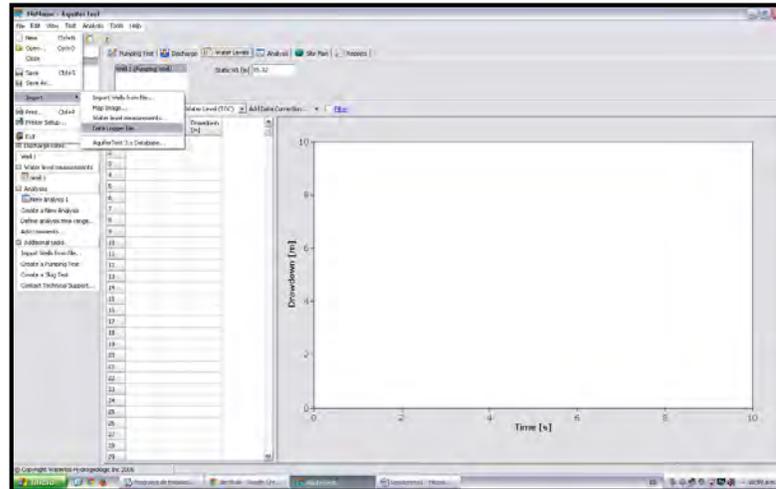


Fig. 4.18. Importando archivos al *AquiferTest*.

De acuerdo al tiempo de bombeo y a la carga hidráulica registrada por el *Diver* el programa determina el abatimiento con respecto al nivel estático medido en campo que uno le ingresa al programa. Éste ajusta los datos a una curva dependiendo del tipo de prueba realizada y se selecciona el método que mejor se ajusta a las condiciones del pozo arrojando así los parámetros hidráulicos del acuífero (Fig. 4.19).

El método mejor ajustado a los datos fue el Método de Hantush para la prueba de bombeo y el Método de recuperación de Theis para la interpretación de la prueba de recuperación.

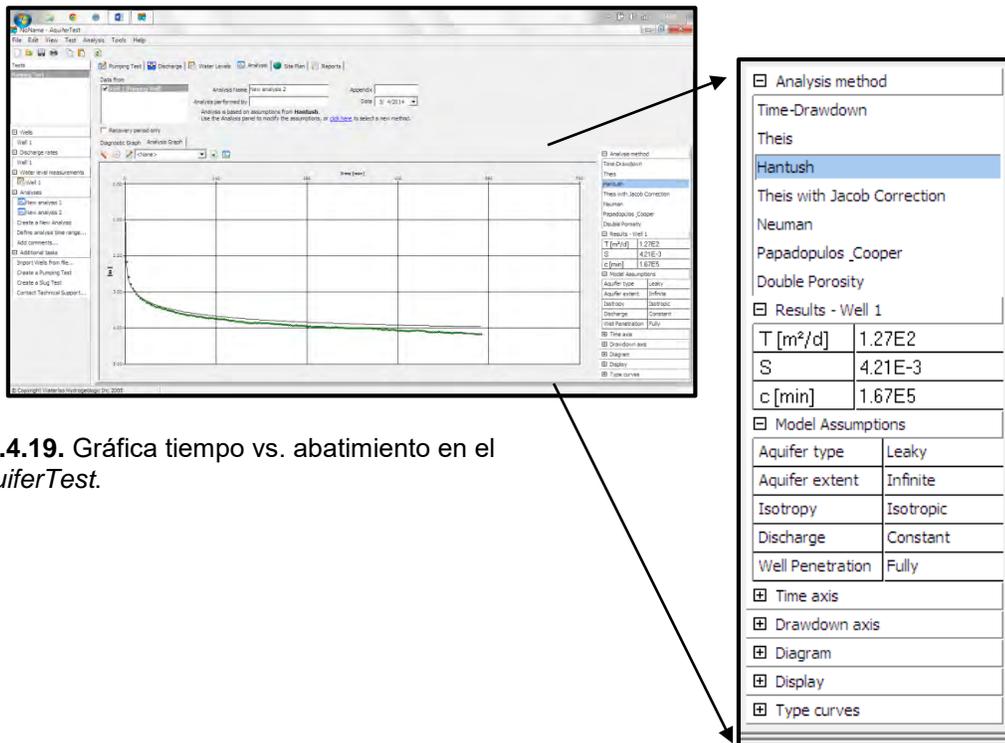


Fig.4.19. Gráfica tiempo vs. abatimiento en el *AquiferTest*.

Se realizaron 3 pruebas de bombeo, una de ellas se sale del área del acuífero, por lo que fue descartada, y dos que se ubican en la parte norte y central de la zona de estudio, las cuales son en el pozo 3 y el pozo 5.

Tabla 4.4. Parámetros de la prueba del pozo 3.

Ubicación	E 480119 N 1134588
Fecha	12 de Febrero de 2014
Duración	720 minutos.
Nivel Estático	30,1 metros
Distancia al pozo de bombeo	240 metros
Caudal	17 l/s
Tiempo de bombeo	340 minutos
Tiempo de Recuperación	380 minutos

Para la prueba del pozo 3, al momento de la interpretación de los resultados, la misma pudo ser influenciada por el bombeo de algún otro pozo cercano al pozo de observación, ya que en los gráficos arrojados por el

programa (Fig. 4.20), no se logra distinguir un abatimiento ni una recuperación clara, además la bomba era de tipo eléctrica, y por comentarios del operador del pozo, ocurrieron varios fallos en la energía eléctrica, por lo que se descartan los datos obtenidos de dicha prueba.

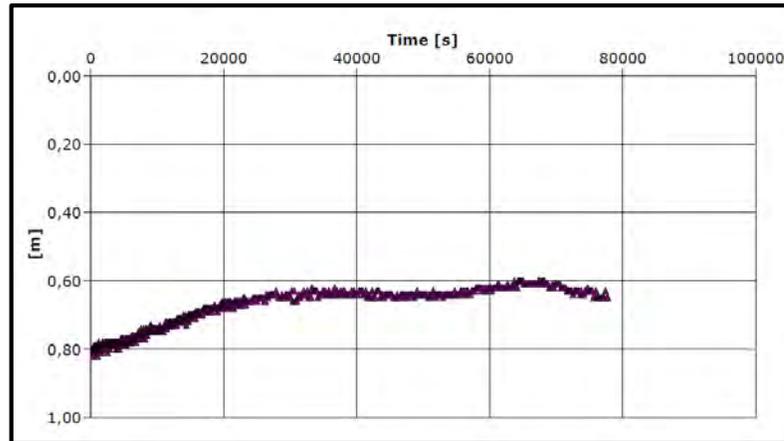


Fig.4.20. Gráfico de tiempo vs. abatimiento de la prueba de bombeo del pozo 3.

Tabla 4.5. Parámetros de la prueba del pozo 5.

Ubicación	E 482172 N 1135516
Fecha	13 de Febrero de 2014
Duración	1067 minutos.
Nivel Estático	20,5 metros
Caudal	6 l/s
Tiempo de bombeo	540 minutos
Tiempo de Recuperación	527 minutos

Para el pozo 5, se había establecido una duración de la prueba de 24 horas, pero por fallos en la energía eléctrica, se redujo la duración a 18 horas de acuerdo a las tablas arrojadas por el *AquiferTest* en donde se reconoce la duración total de la prueba de acuerdo a los tiempos de medición. Para dicho pozo no se contaba con un pozo de observación cercano, por lo que se realizó la prueba en el mismo pozo de bombeo, por lo tanto la prueba de bombeo no es factible para la determinación de algunos de los parámetros hidráulicos a estudiar, sin embargo, se realizó la interpretación de la prueba de recuperación

del pozo, una vez finalizó la prueba de bombeo y se apagó la bomba, con la finalidad de al menos tener una idea de la transmisividad que presenta el acuífero en ese pozo.

Los intervalos de tiempo para las lecturas durante la recuperación se establecieron como se muestra en la tabla 4.6. El tiempo total de bombeo (t) fue de 540 minutos y el tiempo de recuperación fue de 527 minutos, tiempo en el cual el pozo logró recuperar su nivel estático inicial.

Donde el tiempo se gráfica de la forma $t+t'/t'$ donde t es el tiempo total de bombeo y t' es el tiempo de recuperación.

Tabla 4.6. *Tiempos y abatimientos durante la recuperación de la prueba de bombeo del pozo 5.*

Abatimiento (m)	t' (min)	t+t'/t'
3,27	368	541,00
2,22	369	271,00
1,84	370	181,00
1,62	371	136,00
1,48	372	109,00
1,39	373	91,00
1,33	374	78,14
1,28	375	68,50
1,23	376	61,00
1,20	377	55,00
1,16	378	50,09
1,14	379	46,00
1,12	380	42,54
1,09	381	39,57
1,08	382	37,00
1,07	383	34,75
1,05	384	32,76
1,04	385	31,00
1,04	386	29,42

1,03	387	28,00
1,01	388	26,71
1,00	389	25,55
0,99	390	24,48
0,96	393	21,77
0,95	396	19,62
0,93	399	17,88
0,91	402	16,43
0,90	405	15,21
0,88	408	14,17
0,87	411	13,27
0,86	414	12,49
0,85	417	11,80
0,83	420	11,19
0,84	423	10,64
0,82	426	10,15
0,81	429	9,71
0,80	432	9,31
0,80	435	8,94
0,78	438	8,61

0,77	441	8,30
0,77	444	8,01
0,76	447	7,75
0,75	450	7,51
0,75	453	7,28
0,75	456	7,07
0,74	459	6,87
0,73	462	6,68
0,74	465	6,51
0,73	468	6,35
0,72	474	6,19
0,71	477	6,05
0,72	480	5,91
0,71	483	5,78
0,70	489	5,66
0,69	492	5,54
0,68	495	5,43
0,67	498	5,32
0,68	501	5,22
0,67	507	5,12
0,68	513	5,03
0,66	516	4,94
0,65	519	4,86
0,67	522	4,78
0,66	528	4,70
0,65	531	4,62
0,66	534	4,55
0,65	540	4,48
0,63	543	4,42
0,65	549	4,35
0,63	555	4,29
0,64	558	4,23
0,63	561	4,18
0,62	567	4,12
0,64	570	4,07
0,61	573	4,02
0,62	576	3,97
0,61	582	3,92

0,60	585	3,87
0,61	588	3,83
0,62	591	3,78
0,61	603	3,74
0,60	606	3,70
0,59	609	3,66
0,60	612	3,62
0,59	624	3,58
0,58	630	3,55
0,60	636	3,51
0,59	639	3,48
0,58	651	3,44
0,57	654	3,41
0,56	657	3,38
0,57	666	3,35
0,56	669	3,32
0,56	690	3,29
0,55	708	3,26
0,54	711	3,23
0,55	714	3,20
0,54	735	3,18
0,53	738	3,15
0,54	741	3,13
0,53	744	3,10
0,52	747	3,08
0,51	750	3,05
0,52	753	3,03
0,53	756	3,01
0,52	762	2,99
0,53	771	2,96
0,54	774	2,94
0,52	786	2,92
0,51	804	2,90
0,52	807	2,88
0,51	810	2,86
0,50	816	2,84
0,51	819	2,82
0,50	825	2,81

0,51	828	2,79
0,50	831	2,77
0,51	834	2,75
0,50	846	2,74
0,49	849	2,72
0,50	852	2,70
0,49	855	2,69

0,49	858	2,67
0,51	861	2,66
0,49	864	2,64
0,50	870	2,63
0,49	876	2,61
0,50	879	2,60
0,49	882	2,58

Para la realización de las gráficas en *Microsoft Excel*, de acuerdo a las tablas arrojadas por el *AquiferTest*, se verificó que los datos del nivel dinámico y descenso estuvieran en metros (m) y los del tiempo en minutos (min). Una vez que se tuvieron los datos en las unidades pertinentes se procedió a representar la recuperación en una gráfica.

La gráfica tiempo vs abatimiento para el pozo 5 se realizó utilizando sólo los datos que corresponden a la etapa de recuperación de la prueba de bombeo. El tiempo se representó en el eje de las abscisas en escala logarítmica y en el eje de las ordenadas los abatimientos o descensos en escala lineal (Fig. 4.21)

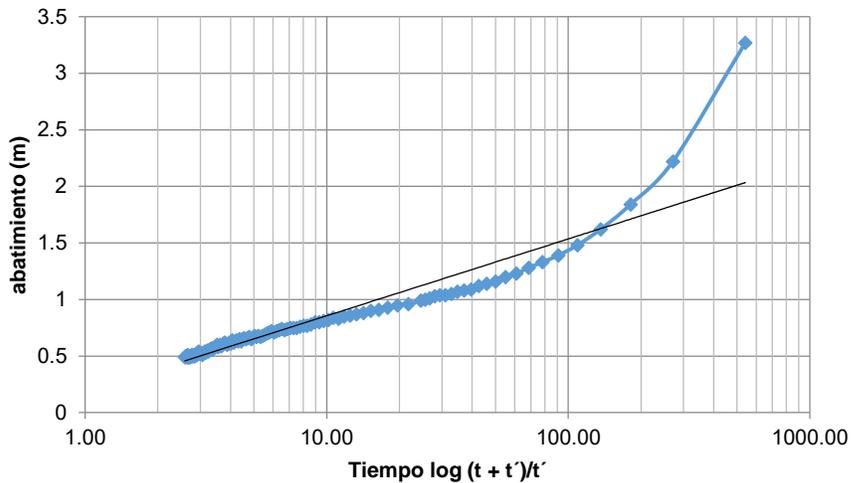


Fig. 4.21. Gráfico tiempo vs. abatimiento de la recuperación del pozo 5.

Como se indicó anteriormente, el método elegido para la interpretación de las pruebas de bombeo fue el método de recuperación de Theis. La resolución matemática de la ecuación de flujo lleva a la fórmula de THEIS y, para la mayoría de las situaciones, a la simplificación de Jacob – Cooper, que representada en papel semi-logarítmico es una recta.

$$s = 0,183 \frac{Q}{T} \log t + 0,183 \frac{Q}{T} \log t_0 \quad \text{Ecuación 4.1}$$

$$y = m \quad x \quad + \quad n$$

Una vez conocida la pendiente (m) de la recta, como el caudal Q se conoce, que es de 6 l/s, la transmisividad T se calcula así:

$$T = 0,183 \times \frac{Q}{m} \quad \text{Ecuación 4.2}$$

Donde, al determinar la pendiente de la recta de la Figura 4.21, da como resultado 0,76 m.

Llevando el caudal de l/s a $m^3/\text{día}$, reemplazando en la ecuación 4.2;

$$T = 0,183 \times \frac{518,4 \frac{m^3}{d}}{0,76m}$$

Dando $T = 124,82 \text{ m}^2/\text{día}$.

Donde; m es el descenso por ciclo logarítmico de tiempo, o en la ecuación general de la curva de tendencia es la pendiente.

De igual forma, el valor de transmisividad se asemeja al obtenido en el *AquiferTest*, dando una transmisividad de $113 \text{ m}^2/\text{día}$. La información arrojada por dicho programa para la prueba de bombeo del pozo 5 se puede observar en el apartado B.2 de los anexos.

Para el cálculo del coeficiente de almacenamiento S , es importante destacar que se determinó un valor de S que no es exacto, ya que no se contaba con un pozo de observación al momento de realizar la prueba, sin

embargo, se asumen los valores obtenidos en la literatura en zonas semejantes, operando matemáticamente con la expresión de Jacob – Cooper se llega a una expresión;

$$S = \frac{2,25 T t_0}{r^2} \quad \text{Ecuación 4.3}$$

Donde;

T: Transmisividad (m^2/d)

Q: Caudal (m^3/d)

S: Coeficiente de almacenamiento (adimensional)

r: es la distancia del pozo de observación al pozo de bombeo o el radio del pozo (m).

t_0 : es el tiempo, donde la curva intercepta el eje de las abscisas en días.

El valor obtenido al cortar la curva con el eje de las abscisas para obtener el t_0 es de 0,0268. Y el radio del pozo es de 6” que en metros son 0,1524. Al reemplazar en la fórmula 4.3 se tiene;

$$S = \frac{2,25 * \left(1,44 \times 10^{-3} \frac{m^2}{s}\right) * 0,0268 \text{ s}}{(0,1524)^2}$$

Dando $S = 3,75 \times 10^{-3}$.

Luego de haber obtenido el valor de transmisividad, se puede determinar el valor de la conductividad hidráulica del acuífero en ese punto, utilizando la ecuación:

$$T = k * m \quad \text{Ecuación 4.4}$$

Donde T es la transmisividad, k la conductividad hidráulica y m el espesor saturado del acuífero en ese punto. El valor del espesor saturado del acuífero en el pozo 5 es de $m = 33 \text{ m}$, dato que es tomado del mapa de espesores saturados que se explica más adelante en este capítulo. Se sustituyen los valores de “T” y “m” en la ecuación

4.4.3. Gradiente hidráulico

El valor espacial del gradiente hidráulico i se calcula de la forma:

$$i = \frac{\Delta h}{L} \quad \text{Ecuación 4.5}$$

Donde;

Δh : es la diferencia entre dos isolíneas en el mapa piezométrico

L : es la longitud entre esas dos isolíneas a escala.

Al obtener el gradiente hidráulico se puede determinar matemáticamente la dirección del flujo subterráneo del acuífero. Para ello, se realizó el cálculo de 3 gradientes hidráulicos a lo largo del acuífero. Uno en la zona norte, otro en la zona central, y uno en la parte sur (Ver Figura 4.22). Se utilizó el mapa piezométrico elaborado para el acuífero en estudio, el cual se explica más adelante en este capítulo, donde se establecen dos isolíneas con su valor h_2 y h_1 , y posteriormente se determina la distancia a escala entre ambas isolíneas. Esto se realizó para los tres puntos seleccionados, zona norte, central y sur.

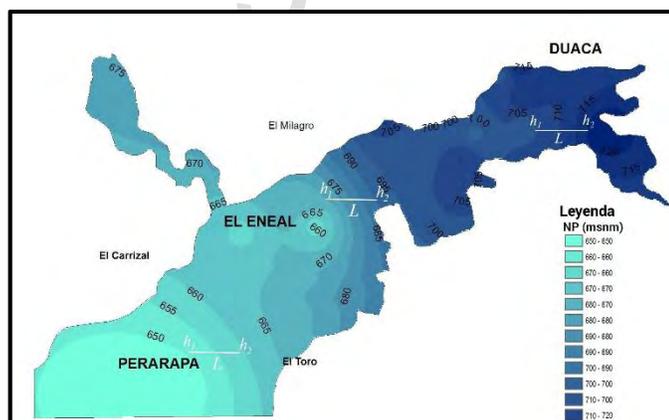


Fig. 4.22. Determinación del gradiente hidráulico en el área de estudio.

4.4.4. Determinación del balance hídrico

El conocimiento de la evaporación potencial de un lugar, del que se tienen registros de precipitación, permite establecer un balance hídrico anual. De esta

forma, es posible conocer la cantidad de agua almacenada por el suelo y la que se pierde por derrame superficial y profundo.

Como la evapotranspiración y la precipitación son dos elementos climáticos independientes, su marcha anual difícilmente coincide en un mismo punto de la tierra, por lo que en algunos lugares existen periodos en los cuales la necesidad de agua está ampliamente satisfecha por las lluvias y otros en los que se carece de las cantidades de agua requerida. De esta manera, habrá meses con agua suficiente y meses en que se registre exceso o deficiencia de agua en forma manifiesta. También pueden ocurrir casos extremos en que durante todo el año las precipitaciones sobrepasen las necesidades de agua o viceversa.

Para calcular el balance hídrico medio anual de la zona de estudio se consideraron los registros mensuales de precipitación desde el año 1990 al 2013, obtenidos de la estación pluviométrica Duaca, identificada con el serial 1268 con coordenadas Latitud 10° 16' 58" Longitud 69° 08' 49" y altitud de 750 msnm. Los datos de ETP fueron determinados de acuerdo a una fórmula establecida en el trabajo final de grado "Caracterización Climática del estado Lara" en el 2005, elaborado por Jaqueline Suárez, donde determinaron la ETP según la fórmula modificada de Penman – Monteith, recomendada por la FAO. Tomaron en cuenta cuatro estaciones climatológicas completadas que registran datos de precipitación, evaporación, temperatura, humedad relativa, viento, radiación solar e insolación. A partir de la correlación de los datos de ETP obtenidos por Penman y la evaporación de las estaciones patrones, obtuvieron una nueva ecuación ya regionalizada para todo el estado Lara:

$$ETP = 10,3 + 0,65 * \text{evap} \quad \text{Ecuación 4.6}$$

Coeficiente de correlación (R^2) = 0,85

Desviación Standard (D.s.) = 30 mm

Una vez obtenidos los datos de evapotranspiración potencial de la zona, se realiza el balance hídrico, en primer lugar se verifica si la ETP supera o no a la precipitación en el periodo considerado. Se calcula la variación de la reserva (Pp-ETP) restando los valores de precipitación menos la ETP. De acuerdo al resultado de la variación de la reserva se calcula el almacenamiento para cada vez. Si la Pp-ETP es negativa, el almacenamiento es cero.

El balance hídrico puede verificarse aplicando las siguientes fórmulas:

$$ETP + Ex = P + Def$$

$$\sum ETP - \sum ETR = \sum \text{Déficits}$$

En el cálculo de la Evapotranspiración Real, para cada mes se pueden presentar los siguientes casos:

$$\text{Si } P \geq ETP, \text{ entonces, } ETR = ETP$$

$$\text{Si } P < ETP, \text{ entonces, } ETR = P + |Alm|$$

En este caso, las precipitaciones son mayores que la evapotranspiración potencial, por lo que la ETR viene siendo la sumatoria de las precipitaciones y el almacenamiento.

Se determinó el tipo de clima según la clasificación climática de Thornthwaite, que se basa en el concepto de evapotranspiración potencial y en el balance de vapor de agua, y contiene cuatro criterios básicos: índice global de humedad, variación estacional de la humedad efectiva, índice de eficiencia térmica y concentración estival de la eficacia térmica. La evapotranspiración potencial (ETP) se determina a partir de la temperatura media mensual, corregida según la duración del día; el exceso o déficit se calcula a partir del balance de vapor de agua, considerando la humedad (Im), que junto con la ETP permite definir los tipos de clima.

$$Lm = (100 E - 60D) / ETP$$

Ecuación 4.7

Donde:

E: Exceso de humedad en el año

D: Déficit de humedad en el año.

ETP: Evapotranspiración potencial anual.

Al reemplazar los datos en la fórmula 4.7, se tiene;

$$L_m = (100 (0) - 60 (719,37) / 1475 = -29,19$$

Tabla 4.7. Clasificación climática según el índice de humedad.
(<http://es.scribd.com/doc/16567801/PRACTICA-5-CLASIFICACION-CLIMATICA-THORNTHWAITE>)

Tipo de Clima	Índice de Humedad
A Perhúmedo	> 100
B ₄ Muy Húmedo	80 - 100
B ₃ Húmedo	60 - 100
B ₂ Moderadamente Húmedo	40 - 60
B ₁ Ligeramente Húmedo	20 - 40
C ₂ Subhúmedo húmedo	0 - 20
C ₁ Subhúmedo seco	-33 - 0
D Semiárido o seco	-67 a -33
E Árido	-100 a -67

Recarga por Precipitación

Se determinó mediante la ecuación establecida por Custodio y Llamas en el 2001:

$$\text{Recarga por precipitación} = P - (\text{ETR} + \text{Esc}) \quad \text{Ecuación 4.8}$$

Donde:

P: Precipitación

ETR: Evapotranspiración real

Esc: Escorrentía

Para el acuífero en estudio, la infiltración o recarga está dada por la precipitación originada en la zona, menos la escorrentía y la

evapotranspiración. Los valores de precipitación y evapotranspiración real son los mismos usados para el balance hídrico.

Para determinar la escorrentía se utilizó la fórmula:

$$\text{Esc} = P * C_e \quad \text{Ecuación 4.9}$$

Donde

Esc: Escorrentía

P: Precipitación

Ce: Coeficiente de escorrentía (Tabla 3.4).

El coeficiente de escorrentía a su vez, depende de la cobertura vegetal, el tipo de suelo y la pendiente del terreno.

Las pendientes se obtuvieron a partir del mapa de pendientes realizado en *ArcGIS 9.3*, (Ver Fig. 5.2). Por otro lado, la cobertura vegetal y el tipo de suelo presente en cada zona y utilizado para este cálculo fue evaluada principalmente por medio de observaciones de campo.

4.4.5. Elaboración de mapas

4.4.5.1. Mapa base

Se utilizó el software *ArcGIS versión 9.3* como herramienta para representar cartográficamente los datos topográficos e hidrográficos del área de estudio. Las curvas de nivel se generaron con la ayuda de los programas *Google Earth*, *Global Mapper* y *AutoCAD*. Al generar el mapa base, se dibujan las capas de población, vías, ríos y drenajes principales y las curvas de nivel, para de esta manera simbolizar espacialmente la ubicación del área de estudio. Estas capas se construyen creando un nuevo *shapefile*, bien sea punto, línea o polígono, de acuerdo al tipo de capa que se esté construyendo y se dibuja con la ayuda de las fotografías obtenidas de *Google Earth*, del mapa geológico y del mapa topográfico del área de estudio.

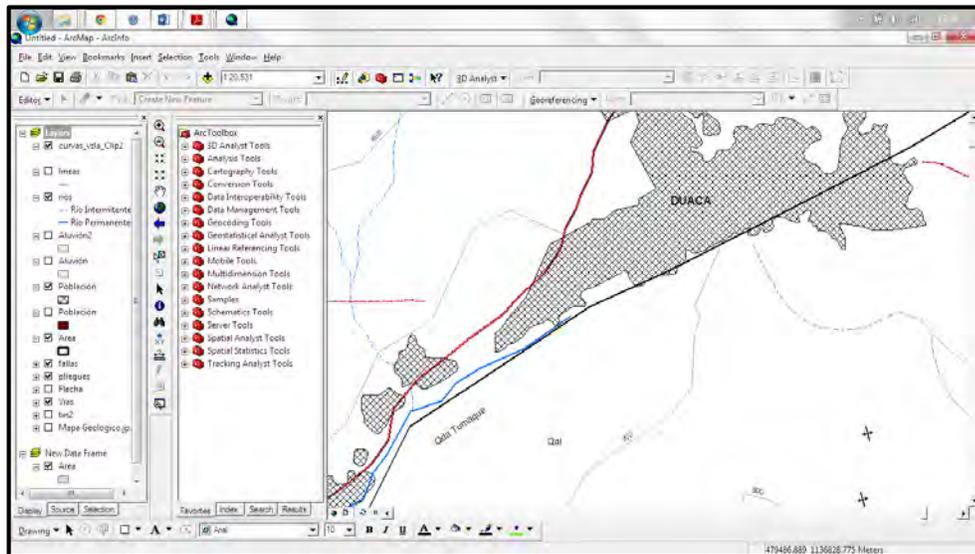


Fig. 4.23. Elaboración del mapa base del área de estudio en ArcGIS 9.3.

4.4.5.2. Mapa geológico

Se realizó con la ayuda del Sistema de Información Geográfica ArcGIS 9.3, donde se procedió a digitalizar los parámetros geológicos sobre el mapa base realizado anteriormente, pero añadiendo las capas de fallas, pliegues y formaciones geológicas, usando como referencia el mapa geológico estructural a escala 1:500.000 del año 1976, hoja NC-19-IV elaborado por el Ministerio de Minas e Hidrocarburos y además el Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela, como referencia para los rasgos estructurales, elaborado por FUNVISIS, ILP, INTEVEP y PDVSA a escala 1:2.000.000. Dentro de los rasgos geológicos agregados al mapa, se encuentran la Formación Mamey (Cretácico Inferior) y el aluvión cuaternario que cubre gran parte del área de estudio, utilizando los colores RGB correspondientes a los asignados por la Comisión Estratigráfica Internacional de acuerdo a la edad geológica de cada formación.

4.4.5.3. Mapa de pendientes

El mapa de pendientes se realizó en el software *ArcGIS 9.3* utilizando las herramientas *3D Analyst*, en la opción *Create/Modify Tin*, donde se genera un cuadro de dialogo y se seleccionan las capas necesarias para crear el *Tin*, en este caso, para el mapa de pendientes, se seleccionan las curvas de nivel y se elige el campo (Cota) para generarlo. Una vez creado el *Tin*, se elige la opción *Surface Analysis*, en la etiqueta *3D Analyst*, y se elige *Slope*, el cual determina las pendientes de acuerdo a las cotas de las curvas de nivel. Por último se reclasifican las clases para una mejor representación.

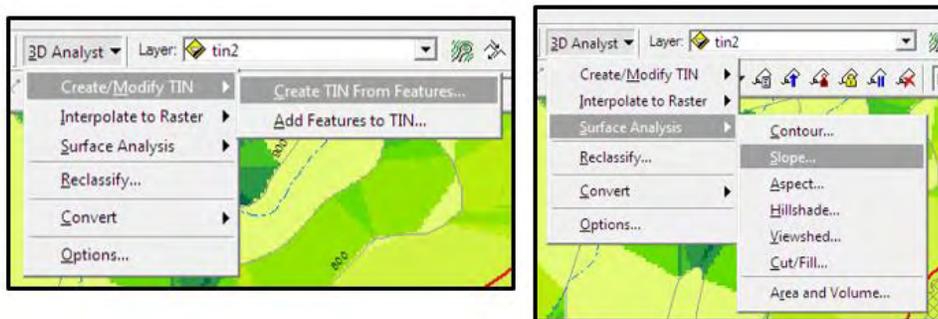


Fig. 4.24. Construcción del mapa de pendientes en *ArcGIS 9.3*.

4.4.5.4. Mapas con interpolación

Para la construcción de los mapas de caudales, conductividad eléctrica, transmisividad, piezometría y dirección del flujo preferencial, se procedió a utilizar el software *Surfer 11* y *ArcGIS 9.3*, con la intención de comparar ambas interpolaciones para obtener mejores resultados. En *ArcGIS* se utilizó el método de interpolación *Inverse Distance Weighted* y en *Surfer 11* se utilizó el método *Inverse Distance to a Power*, siendo uno de los métodos más apropiado para cuando no se tienen suficientes datos, éste permite al programa construir una “grid” o un mallado obteniendo la distribución de los valores de cada parámetro. A estos mapas se le agregaron los datos básicos,

importando las capas de ArcGIS, datos como curvas de nivel, hidrografía, vialidad y centros poblados del área de estudio (Ver Fig. 4.25 y Fig. 4.26)

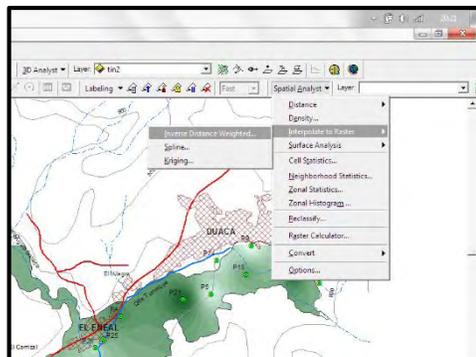


Fig. 4.25. Método de Interpolación en ArcGIS 9.3.

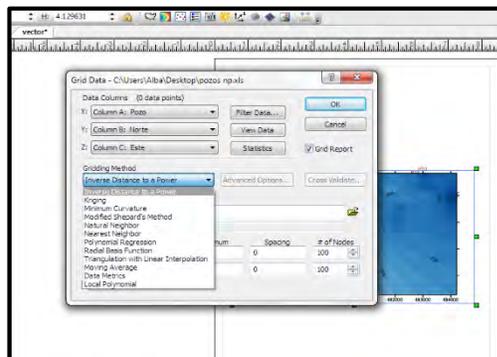


Fig. 4.26. Método de Interpolación en Surfer 11.

- Mapa de caudales: para la construcción de este mapa solo se contó con la información de los pozos que fueron aforados, siendo estos un total de 13 pozos, representados en la tabla 4.8. Se utilizó el mapa base de la ubicación de la zona para representar de una mejor manera la distribución de los caudales.

Tabla 4.8. Caudales medidos en la etapa de campo.

Pozo	Coordenadas UTM		Q (l/s)	Cota (msnm)
	E	N		
P1	477007	1132268	12	676
P2	478030	1132307	15	675
P4	479890	1134951	17,9	694
P5	482172	1135516	6	730
P6	484067	1136129	7,58	746
P7	484211	1135925	22,58	743
P8	484882	1135798	13	775
P9	483179	1136746	4,89	728
P14	482311	1136372	7	738
P15	483054	1136016	15	724
P21	481455	1135381	24	714
P25	479451	1134368	14	697
P26	479261	1134155	8	696

- Mapa de conductividades eléctricas: se interpolaron los datos de las conductividades que pudieron ser medidas en campo, siendo estos un total de 11 pozos, representados en la tabla 4.9. Al igual que como en el mapa de caudales se utilizó como mapa base el de la ubicación de la zona de estudio.

Tabla 4.9. Conductividades eléctricas medidas en el área de estudio.

Pozo	Coordenadas UTM		C.E. ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	Cota (msnm)
	E	N		
P1	477007	1132268	1195	676
P2	478030	1132307	1140	675
P4	479890	1134951	1060	694
P5	482172	1135516	1104	730
P6	484067	1136129	552	746
P9	483179	1136746	605	728
P12	482457	1136484	672	734
P14	482311	1136372	618	738
P15	483054	1136016	560	724
P25	479451	1134368	1202	697
P26	479261	1134155	1416	696

- Mapa piezométrico y de dirección de flujo preferencial: se importaron a Surfer 11 y ArcGIS 9.3 los valores medidos en campo de niveles estáticos a los que se les restó la cota para obtener los niveles piezométricos de los pozos (Tabla 4.10), siendo en total 19 pozos. Para las líneas de dirección preferencial de flujo se utilizaron los comandos ubicados en la pestaña *Map* y luego *1-Grid Vector Map*, dándoles una frecuencia de 12 y 9 para no sobrecargar el mapa.

Tabla 4.10. Datos de los niveles estáticos y piezométricos medidos en la etapa de campo.

Pozo	Coordenadas UTM		NE (m)	NP (msnm)	Cota (msnm)
	E	N			
P1	477007	1132268	30	646	676
P2	478030	1132307	29,8	645,2	675
P3	480124	1134591	30,93	659,07	690
P4	479890	1134951	25,05	668,95	694
P5	482172	1135516	21,5	708,8	730

P7	484211	1135925	18,56	724,44	743
P10	482994	1136842	17,67	717,33	735
P11	483065	1136369	18,75	713,25	732
P13	482721	1136709	19,45	701,55	721
P15	483054	1136016	23,7	700,3	724
P16	482377	1135875	21,39	696,61	718
P18	481864	1135927	14,56	700,44	715
P19	481773	1136214	25,4	693,6	719
P20	481130	1136080	4,35	709,65	714
P21	481455	1135381	15	699	714
P22	481327	1135628	14,73	699,27	714
P23	477489	1132539	29,8	648,2	678
P27	482045	1135185	13	707	720
P28	479091	1134499	23	660	683

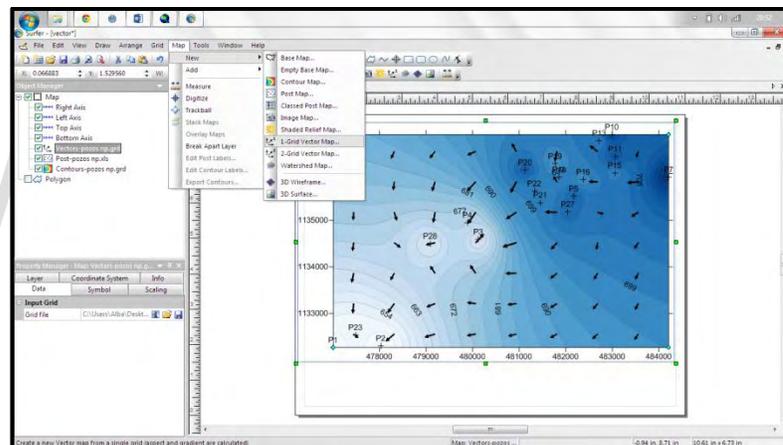


Fig. 4.27. Generación de las líneas de flujo en el mapa piezométrico.

- Mapa de espesores saturados: para construir el mapa de espesores saturados, se interpretó la litología obtenida de los sondeos eléctricos verticales realizados en el trabajo final de grado “Evaluación del recurso hídrico subterráneo en el eje Duaca, El Eneal, Perarapa, municipio Crespo, estado Lara”, elaborado por Marianggy Gómez en el 2013, donde se estudiaron los niveles estáticos de los pozos y las capas permeables e impermeables del acuífero, permitiendo así determinar los espesores saturados. Posteriormente, mediante los métodos de interpolación anteriormente descritos, se conocieron

los espesores saturados de los 28 pozos en estudio, para finalmente, agregarle las capas correspondientes a vías, población, hidrografía, entre otros, y terminar de construir el mapa. Los valores de los espesores saturados se encuentran representados en la siguiente tabla:

Tabla 4.11. Datos de los espesores saturados determinados para el área de estudio.

Pozo	N	E	Ubicación	Cota (msnm)	Espesor Saturado (m)
P1	1132268	477007	Perarapa	676	27
P2	1132307	478030	Perarapa	675	28
P3	1134591	480124	El Milagro	690	22
P4	1134951	479890	El Milagro	694	21
P5	1135516	482172	Duaca	730	33
P6	1136129	484067	Duaca	746	34
P7	1135925	484211	Duaca	743	35
P8	1135798	484882	Duaca	775	34
P9	1136746	483179	Duaca	728	33
P10	1136842	482994	Duaca	735	35
P11	1136369	483065	Duaca	732	33
P12	1136484	482457	Barro Negro	734	32
P13	1136709	482721	Barro Negro	721	35
P14	1136372	482311	Barro Negro	738	34
P15	1136016	483054	Duaca	724	31
P16	1135875	482377	Duaca	718	30
P17	1135575	481699	Duaca	712	34
P18	1135927	481864	Duaca	715	32
P19	1136214	481773	Duaca	719	33
P20	1136080	481130	Duaca	714	32
P21	1135381	481455	Duaca	714	30
P22	1135628	481327	Duaca	714	31
P23	1132539	477489	Perarapa	678	26
P24	1132341	478269	Perarapa	680	25
P25	1134368	479451	El Samán	697	22
P26	1134155	479261	El Eneal	696	23
P27	1135185	482045	Duaca	720	27
P28	1134499	479091	El Eneal	683	21

- Mapa de transmisividad: Para elaborar el mapa de transmisividad, se procedió a determinar las transmisividades en 13 pozos, aplicando el método de régimen permanente, utilizando el de Thiem para acuíferos confinados, la cual depende del abatimiento y del caudal del pozo, por medio de la fórmula;

$$T=0,366 * \frac{Q}{\Delta s} \quad \text{Ecuación 4.10}$$

Donde;

T: Transmisividad

Q: Caudal

Δs : Abatimiento

Se realizó esto, ya que con solo un dato de transmisividad de la prueba de bombeo realizada en el pozo 5 no era suficiente para generar un mapa que representara la transmisividad de todo el acuífero. Para ello, se seleccionaron los pozos que poseían niveles estáticos y dinámicos, algunos de los cuales fueron interpolados en el programa *Surfer 11* mediante el método “*Inverse Distance to a Power*”, el cual es el método que mejor se ajusta cuando no se tienen suficientes datos. Al abrir el *grid*, de acuerdo a la coordenada del pozo, se ubica el punto (Fig. 4.28) y se obtiene el valor de Z, que en este caso sería el valor del nivel dinámico en ese punto, determinado en la interpolación.

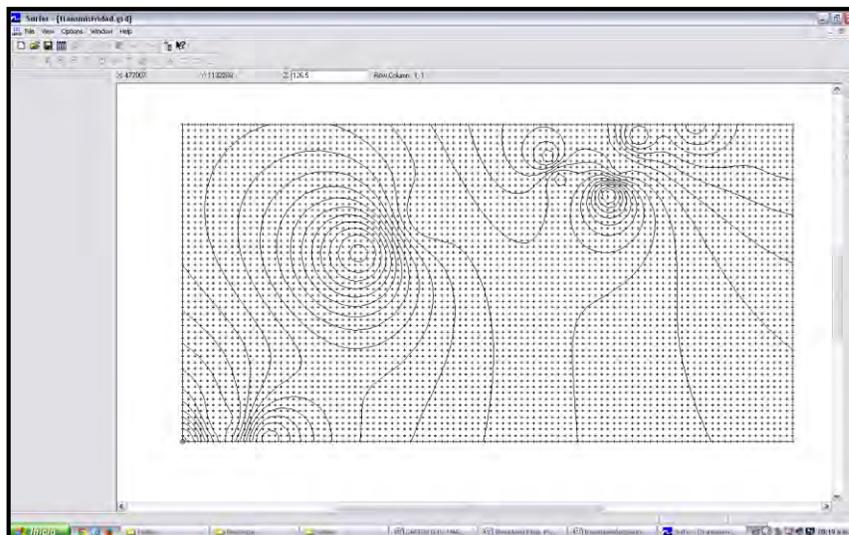


Fig. 4.28. Adquisición de los valores de niveles dinámicos generados de la interpolación.

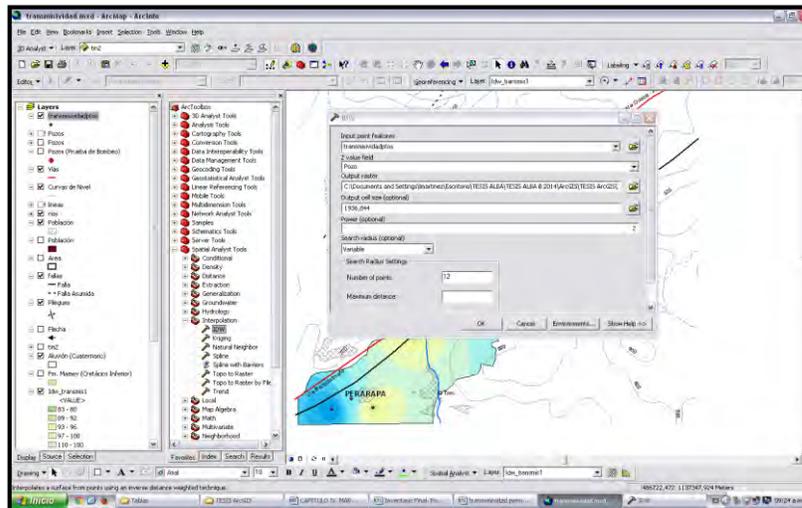


Fig. 4.29. Elaboración del mapa de transmisividades en ArcGIS 9.3.

Para construir el mapa de transmisividades, se interpolaron los datos de la tabla 4.12 en ArcGIS, para luego utilizar el método *Inverse Distance Weighted* (Fig. 4.29). Montándose sobre las capas generadas para los mapas anteriores, como lo son las curvas de nivel, vías, población, hidrografía, entre otros.

Tabla 4.12. Valores de transmisividades de los pozos en el área de estudio.

Pozo	Coordenadas UTM		T (m ² /d)	ND (m)	Abatimiento (m)
	E	N			
P1	477007	1132268	125,5	32,3	2,3
P2	478030	1132307	91	35	5,2
P4	479890	1134951	107,81	30,3	5,25
P5	482172	1135516	113,19	26,02	4,52
P7	484211	1135925	119,94	24,36	5,8
P15	483054	1136016	124,82	27,5	3,8
P16	482377	1135875	123,95	23,96	2,57
P18	481864	1135927	112,67	19,39	4,83
P21	481455	1135381	105,08	18,1	3,7
P22	481327	1135628	119,24	18,23	3,5
P23	477489	1132539	110,47	32,09	2,29
P27	482045	1135185	91,43	18,25	5,5
P28	479091	1134499	83,27	26,19	3,19

Los valores obtenidos se compararon con el valor de transmisividad conseguido de las pruebas de bombeo, sirviendo como un dato guía para dicha comparación, lo cual está dentro del rango, haciendo confiable las transmisividades calculadas mediante este método de régimen permanente.

4.4.5.5. Modelo digital del terreno

Dado que una superficie está formada por infinitos puntos, no será posible su modelización a menos que se haga una generalización y la información se convierta en un conjunto limitado de cotas, de modo que estos datos se estructuren de tal forma que sean fáciles de manejar y den una descripción realista del relieve.

Para la construcción del modelo digital del terreno, se construyeron curvas de nivel a cada 10 metros, con el uso de una imagen DEM del área de estudio, proporcionada por el INAMEH. En el programa ArcGIS, se importa dicha imagen y se procede a implementar la herramienta *3D Analyst*, se elige *Raster Surface*, y *Contour*.

Una vez abierto el cuadro de dialogo *Contour*, se selecciona la imagen y se le da en *Contour Interval*, el intervalo de curvas, en este caso 10 metros (Fig. 4.30).

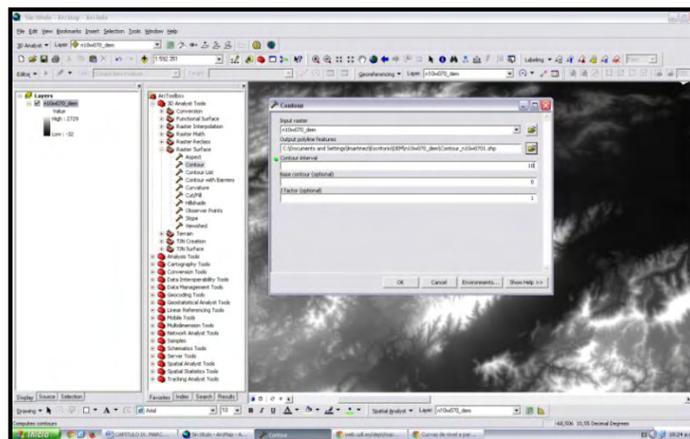


Fig. 4.30. Construcción de las curvas de nivel a cada 10 metros.

Posteriormente se utiliza la extensión *ArcScene*, perteneciente al programa *ArcGIS*, una vez allí, se importan las curvas de nivel generadas anteriormente y cualquier otra capa que sea necesaria, como los ríos, las vías y la población, para así tener una mejor visualización del modelo. Se selecciona la herramienta *3D Analyst*, se selecciona *Create/Modify Tin* y luego *Create Tin from Features*, una vez allí se eligen las curvas de nivel y se selecciona la cota para que genere el modelo 3D de la zona de estudio.

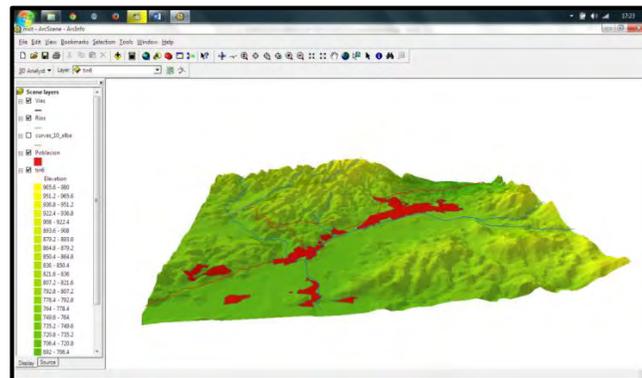


Fig. 4.31. Construcción del modelo digital del terreno en *ArcScene*.

4.4.6. Construcción del modelo hidrogeológico conceptual

Para generar el modelo hidrogeológico conceptual primordialmente se creó la base de datos en *Microsoft Excel*, donde se consideraron las secciones estratigráficas obtenidas del Trabajo Final de Grado “Evaluación del Recurso Hídrico Subterráneo en el Eje Duaca, El Eneal Perarapa, municipio Crespo, estado Lara” realizado por Marianggy Gómez en el 2013, de la Universidad de Los Andes. Con dichas secciones se contabilizaron el número de capas existentes, permeables e impermeables, determinadas por medio de correlación litológica, y así posteriormente desarrollar la base de datos que contiene: identificación del pozo, coordenadas Este y Norte, y la elevación de cada capa, definiéndose 3 capas en total, de acuerdo a la litología estudiada (Tabla C.1 de los anexos). Para determinar el espesor de la capa permeable

se tomaron en cuenta los niveles estáticos de cada pozo y se interpretó y correlacionó de acuerdo a la litología la definición de dicha capa permeable.

Tabla 4.13. Espesores de cada capa para el modelo conceptual.

Pozo	Coordenadas UTM		Unidad 1	Unidad 2	Unidad 3	Unidad 4
	Este	Norte				
P9	483179	1136746	734,00	719,00	692,00	682,00
P10	482994	1136842	735,00	722,00	706,00	693,00
P11	483065	1136369	732,00	724,00	707,00	671,00
P12	482457	1136484	725,00	716,00	696,00	657,00
P13	482721	1136709	721,00	706,00	696,00	668,00
P14	482311	1136372	722,00	715,00	694,00	657,00
P15	483054	1136016	724,00	718,00	699,00	668,00
P16	482377	1135875	718,00	710,00	699,00	671,00
P17	481699	1135575	709,00	703,00	686,00	667,00
P18	481864	1135927	715,00	710,00	698,00	661,00
P19	481773	1136214	719,00	699,00	693,00	676,00
P20	481130	1136080	714,00	705,50	690,00	659,00
P21	481455	1135381	714,00	708,00	692,00	674,00
P22	481327	1135628	714,00	709,00	693,00	672,00
P23	477489	1132539	678,00	666,00	630,00	620,00
P24	478269	1132341	676,00	667,50	643,00	620,00
P25	479475	1134657	706,00	700,00	691,00	655,00
P26	479261	1134155	686,00	680,00	670,00	644,00
P27	482045	1135185	720,00	715,00	701,00	670,00
P28	479091	1134499	683,00	674,00	664,00	638,00
P29	479881	1134958	704,00	694,00	664,00	639,00
P30	480119	1134588	694,00	686,00	672,00	647,00
P31	478020	1132290	658,00	648,00	614,00	608,00
P32	479451	1134368	701,00	694,00	683,00	656,00

Donde;

Unidad 1: Superficie, tope de la capa 1.

Unidad 2: Base de la capa 1 y tope de la capa 2.

Unidad 3: Base de la capa 2 y tope de la capa 3.

Unidad 4: Base de la capa 3.

4.4.6.1. Mapas de contorno y superficies 3D

Con la utilización del programa *Surfer11* fue posible la creación y visualización de los mapas de contorno y de las superficies en 3D de cada una de las bases y topes de las unidades estratigráficas que conforman el acuífero. Para la elaboración de los mismos fueron aplicadas las técnicas geoestadísticas necesarias para la obtención de variogramas experimentales y el posterior ajuste de algunos de los modelos de variogramas teóricos.

Obtención de variogramas

Para obtener los variogramas experimentales y teóricos ajustados, se utilizó el programa *Surfer 11*, con la ayuda de la herramienta “*Grid – New – Variogram*” que permite la visualización y el análisis estructural de la variable.

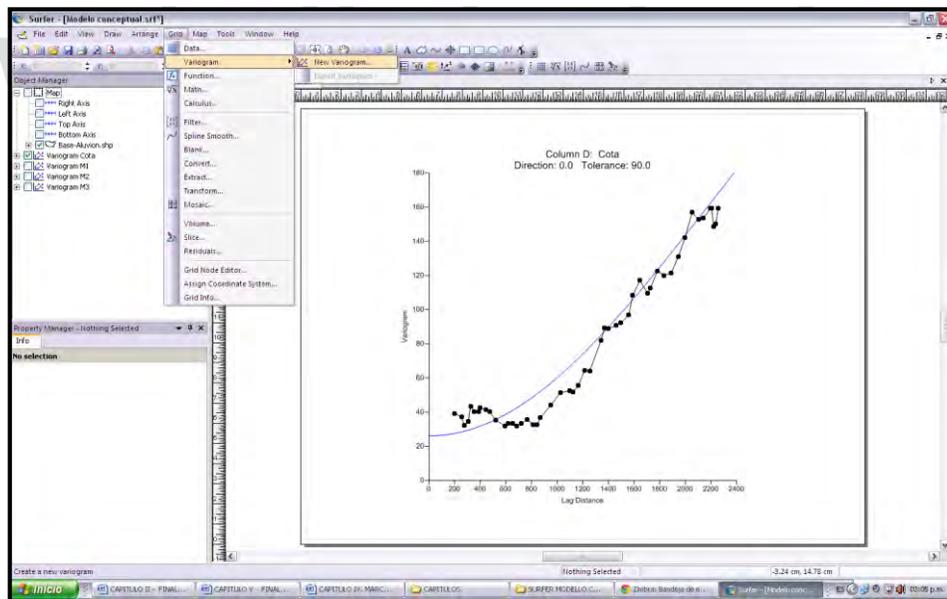


Fig. 4.32. Obtención de variogramas experimentales y teóricos.

Los variogramas experimentales y teóricos ajustados obtenidos para cada superficie que representa los topes y las bases de las unidades estratigráficas que conforman el acuífero se muestran en el apartado C.2 de los anexos.

Obtención de superficies 3D y mapas de contornos

Una vez establecidos los variogramas para cada capa, se procede a mapear. Cada una de estas superficies representa una variable regionalizada. Para cada una de las superficies se construye una malla o *grid* con los parámetros de X y, pero diferente Z para cada capa, la cual representa la variable de las cotas de las superficies.

Una vez establecidos los datos básicos de la malla para la superficie a mapear, se introducen los parámetros del variograma a través de la opción *Advances Options* ubicado en el cuadro de diálogo al momento de crear la *grid*, y en la pestaña *General* se selecciona *Get Variogram* (Ver Fig. 4.33). Teniendo asignados los datos que sirven como puntos de control, los parámetros de la malla y los parámetros del variograma, se realiza la interpolación. El programa genera un archivo de extensión (*.grd) que sirve posteriormente para la construcción del mapa de contornos y el mapa de superficies en 3D.

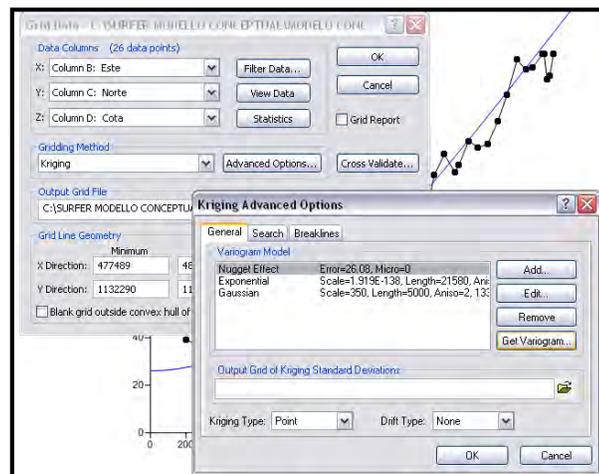


Fig. 4.33. Parámetros del variograma añadidos a la malla.

Una vez creada la *grid*, se procede a “blanquear” la malla para definir el mapa de contorno y la superficie 3D que abarque solamente al acuífero. Esto se realiza con la herramienta *grid-blank*. Al momento de hacer el “blanking” el

programa pide un archivo denominado *Golden Software Blanking* (*.bln), el cual es quien va a delimitar el borde del acuífero o el aluvión. Dicho archivo se obtiene importando la capa del aluvión y guardándolo con la extensión (*.bln).

Finalmente con las herramientas *Map – New – Contour Map* y *3D Surface* se termina de construir el modelo del acuífero.

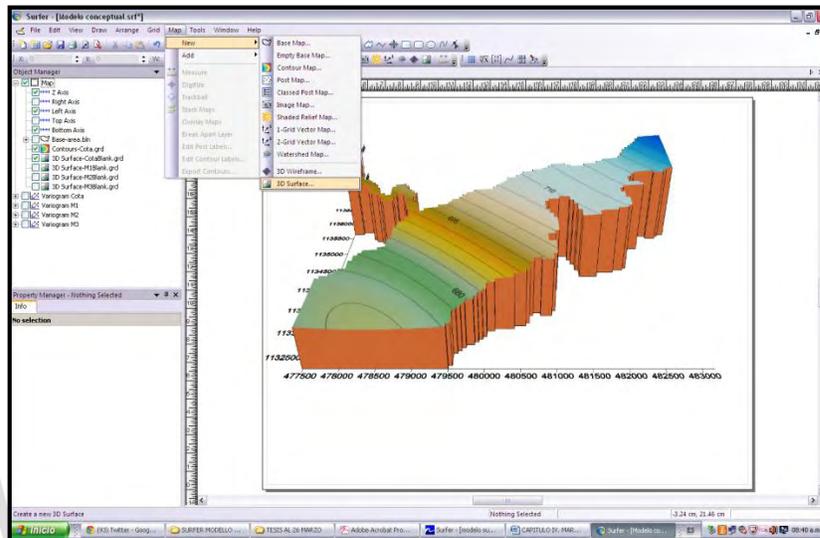


Fig. 4.34. Construcción del modelo conceptual.

Se le asignan los colores para cada capa, de acuerdo a su característica si es permeable o impermeable. Esto se realiza en la herramienta *Property Manager* de la capa, y se le asigna el color deseado para cada capa.

Visualización del modelo hidrogeológico conceptual en 3D

Una vez realizadas las superficies en 3D de cada una de las unidades estratigráficas que componen al acuífero, las mismas se superponen con la ayuda de la herramienta *Map – Overlay Maps*. Y así, se puede visualizar de una mejor manera la variación y definición de cada espesor de las capas que conforman al acuífero.

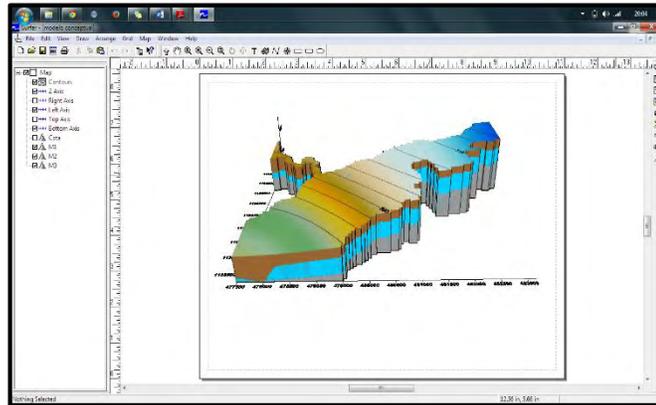


Fig. 4.35. Visualización de cada capa del modelo conceptual del acuífero.

4.4.6.2. Volumen de agua del acuífero

El volumen de agua que un acuífero puede almacenar, es dependiente de la porosidad del material de la formación y ésta, a su vez, depende de su volumen total. El cálculo del volumen entre dos capas nos permite estimar estas propiedades del acuífero.

En el programa *Surfer 11*, en la viñeta *Grid– Volume*, se selecciona el grid de la capa superior del acuífero, y luego se selecciona la grid de la capa inferior, entre ambas se calculará el volumen.

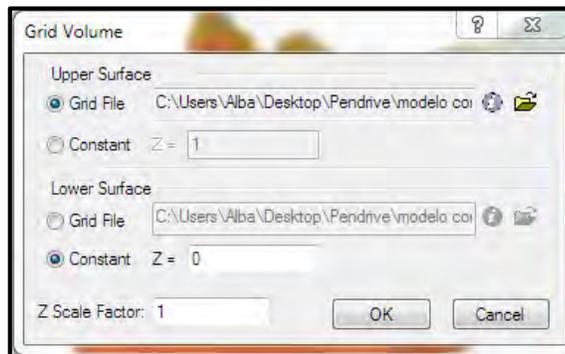


Fig. 4.36. Cálculo del volumen del acuífero.

Posteriormente, se toman los datos arrojados por el *Grid Volume Report*, en el cual se encontrará el valor neto del volumen existente entre las dos capas seleccionadas, en este caso, el volumen de la capa permeable del acuífero.



Fig. 4.37. Volumen entre las dos capas calculado por el programa.

El valor obtenido por el programa *Surfer 11*, es el volumen existente entre la capa superior e inferior del acuífero. Para determinar el volumen de agua, se multiplica dicho volumen por la porosidad efectiva de los materiales rocosos permeables que conforman el acuífero. Para ello, se definen los espesores permeables, considerando la altura del nivel freático en cada pozo, ubicados en las secciones estratigráficas utilizadas para definir las capas que conforman al acuífero (Anexo C.1).

De igual manera se determinó el volumen total del acuífero, calculando el valor de volumen entre la superficie del terreno y la superficie del estrato rocoso.

4.4.7. Zonificación de acuerdo al potencial hidráulico

Para realizar la zonificación de acuerdo al potencial hidráulico del área de estudio se construye a partir de los mapas adquiridos para los espesores saturados y las transmisividades del área de estudio. En donde se establecieron criterios para reclasificar los valores obtenidos de cada parámetro y así generar la zonificación del área para el aprovechamiento del acuífero. Los criterios establecidos dependen de los valores máximos y mínimos de cada parámetro.

Se tabularon rangos de calidad para cada parámetro, y se establecieron 3 clases, con base en los valores máximos y mínimos encontrados para el área de estudio, donde:

- 1: Bajo.
- 2: Regular.
- 3: Alto.

Al reclasificar los espesores saturados del acuífero se establecieron 3 nuevas clases; de acuerdo a los máximos y mínimos encontrados para el área de estudio. Donde los espesores menos profundos tienen menor valor y los más profundos presentan mayor valor, ya que mientras mayor es el espesor saturado mejor aprovechamiento.

Tabla 4.14. Reclasificación de los espesores saturados del área.

Espesor Saturado (m)	Reclasificación
20 – 25	1
25 – 30	2
30 - 35	3

Se reclasificaron los datos de transmisividad con respecto a los menores y mayores valores encontrados para el área de estudio, en los que se tiene los más pobres en 80 m²/día y los más altos en 127 m²/día.

Tabla 4.15. Reclasificación de los valores de transmisividad.

Transmisividad (m ² /día)	Reclasificación
80 – 100	1
100 – 115	2
115 – 130	3

Como se observa en la Figura 4.38, se reclasifican los mapas obtenidos para los espesores saturados y las transmisividades, mediante la opción *Reclassify* de la herramienta *Spatial Analyst*.

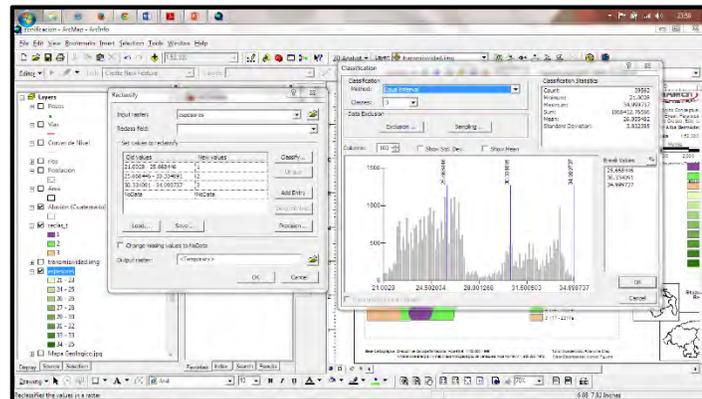


Fig. 4.38. Reclasificación de los parámetros en el programa ArcGIS.

En el programa ArcGIS 9.3, se representaron estos 2 mapas reclasificados, y se procedió a realizar un álgebra de mapas, que permite la obtención de nuevas capas de información a partir de otras previamente disponibles, mediante el cálculo de algoritmos.

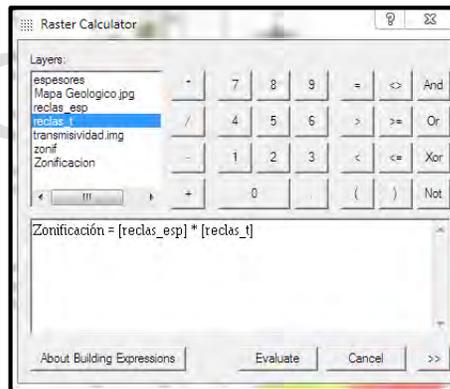


Fig. 4.39. Aplicación de la herramienta, *Raster Calculator* en el programa ArcGIS.

El programa analiza cada variable de las capas *raster* asignadas, en este caso, las capas *raster* reclasificadas de los espesores saturados y las transmisividades, que obedece al producto matricial de dichos mapas, utilizando la herramienta *Raster Calculator*, que posteriormente proporciona un resultado final donde se observa la generalización de las zonas de aprovechamiento del acuífero de acuerdo a su potencial hidráulico. Dichos mapas se multiplican ya que no se les está asignando un peso a los

parámetros. En la siguiente Figura se visualizan los mapas que intervienen en la obtención del mapa de zonificación para el área de estudio.

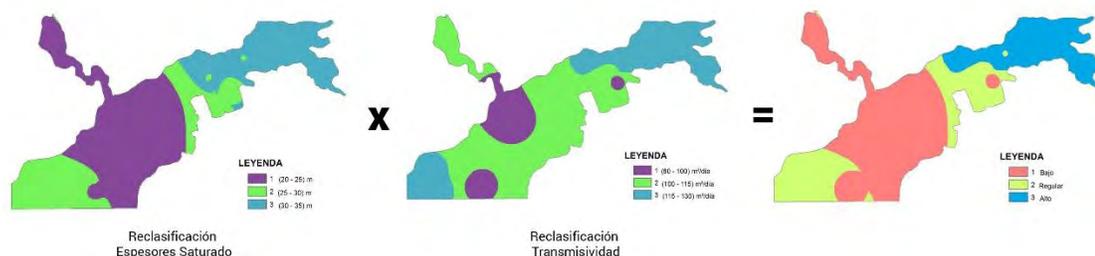


Fig. 4.40. Álgebra de mapas.

4.4.8. Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación

Con todos los datos disponibles, se procedió a realizar una evaluación de la vulnerabilidad que presenta el acuífero a la contaminación. La caracterización de la vulnerabilidad es una aproximación cualitativa y no cuantitativa, es decir, que tiene un componente subjetivo que afecta el resultado final. Por tanto, dependiendo del método que se utilice, los resultados para un mismo acuífero pueden ser diferentes y su validez es relativa. Así mismo, la selección del método a usar depende de la cantidad, calidad y disponibilidad de información.

Existen distintos métodos para evaluar la vulnerabilidad pero el más recomendado por las bibliografías es el método DRASTIC, el cual es un modelo empírico desarrollado por Aller *et al* (1987) para la *Environmental Protection Agency, EPA* (Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos). Es un método usado para evaluar cualitativamente la vulnerabilidad a la contaminación de un acuífero, además para la confección de mapas de vulnerabilidad. Se basa en la combinación de siete factores que se considera que incluyen los requerimientos básicos necesarios para evaluar la contaminación potencial de una región hidrológica.

Las variables consideradas en el acrónimo DRASTIC son:

D: *Depth to Water*. Profundidad del agua subterránea.

R: (Net) *Recharge*. Recarga Neta.

A: *Aquifer Media*. Litología del acuífero.

S: *Soil Media*. Tipo de suelo.

T: *Topography*. Topografía.

I: *Impact of the vadose zone*. Naturaleza de la zona no saturada.

C: (*Hydraulic*) *Conductivity*. Conductividad hidráulica del acuífero.

El método permite determinar un valor numérico por medio de un sistema de ranking, el cual contiene tres partes: peso, rangos y clasificaciones.

A continuación, se presenta una tabla con los pesos asignados a cada factor DRASTIC, que va del 1 al 5, donde el menos importante recibe un peso de 1.

Tabla 4.16. Pesos asignados a cada factor DRASTIC (Auge, 2004)

Factor		Peso
Profundidad del agua	D	5
Recarga Neta	R	4
Litología del acuífero	A	3
Tipo de suelo	S	2
Topografía	T	1
Litología de la zona no saturada	I	5
Conduc. Hidráulica del acuífero	C	3

Los rangos y las valoraciones a cada factor se lo subdivide en rangos o en tipos de medio característico con base en las condiciones físico-naturales en que se presenta el parámetro y al impacto relativo que esta condición juega en la sensibilidad natural del acuífero, por lo cual a cada rango se le asigna una valoración que va desde el 1 al 10.

Luego, la vulnerabilidad puede evaluarse a partir de la siguiente ecuación de la cual obtenemos el *Índice de Vulnerabilidad*;

$$\text{Índice de Vulnerabilidad} = (D_w * D_r) + (R_w * R_r) + (A_w * A_r) + (S_w * S_r) + (T_w * T_r) + (I_w * I_r) + (C_w * C_r)$$

Donde D_w , R_w , A_w , S_w , T_w , I_w y C_w corresponden a la ponderación de cada uno de los parámetros o factores señalados anteriormente.

D_r , R_r , A_r , S_r , T_r , I_r y C_r corresponden a la reclasificación o valoración interna de cada parámetro de acuerdo a la variabilidad de la propiedad.

Cuanto más alto es el índice DRASTIC mayor es la vulnerabilidad a la contaminación del acuífero. Los índices pueden variar entre 23 (mínima) y 230 (máxima), de los cuales se obtienen los siguientes rangos de vulnerabilidad.

Tabla 4.17. Rangos de variación del índice de vulnerabilidad intrínseca (Auge, 2004)

Grado Vulnerabilidad	Valor DRASTIC	Calificación
Muy Bajo	23 – 64	1
Bajo	64 – 105	2
Moderado	105 – 146	3
Alto	146 – 187	4
Muy Alto	187 - 230	5

Una vez obtenido el índice de vulnerabilidad es posible identificar las zonas que son más propensas a ser susceptibles a la contaminación del agua subterránea, en relación con otras áreas, y así realizar los mapas de vulnerabilidad.

El uso de los mapas de vulnerabilidad permite evaluar el grado de protección natural de un acuífero, respecto a la contaminación del agua subterránea en diferentes sectores del mismo ante la presencia de diversas actividades humanas.

Este índice proporciona solo una herramienta de evaluación relativa y el método no está diseñado para proveer respuestas absolutas. Sin embargo,

resulta sumamente útil cuando se desean realizar comparaciones, siendo de extrema importancia en la toma de decisiones.

4.4.8.1. Factores que determinan el índice de vulnerabilidad

1. Profundidad del agua subterránea (D_r)

De acuerdo a los valores de los niveles estáticos medidos en campo, se pudo establecer una interpolación de dichos niveles del área de estudio, mediante la extensión *Spatial Analyst* del *ArcGIS 9.3*, generando un mapa que represente la distribución de los niveles en el área de estudio.

Tabla 4.18. Niveles estáticos del área de estudio.

Pozo	N	E	Nivel Estático (m)
P1	1132268	477007	30
P2	1132307	478030	29.8
P3	1134591	480124	30.93
P4	1134951	479890	25.05
P5	1135516	482172	21.5
P6	1135925	484211	18.56
P7	1136842	482994	17.67
P8	1136369	483065	18.75
P9	1136709	482721	19.45
P10	1136016	483054	23.7
P11	1135875	482377	21.39
P12	1135927	481864	14.56
P13	1136214	481773	25.4
P14	1136080	481130	14.35
P15	1135381	481455	15
P16	1135628	481327	14.73
P17	1132539	477489	29.8
P18	1135185	482045	13
P19	1134499	479091	23

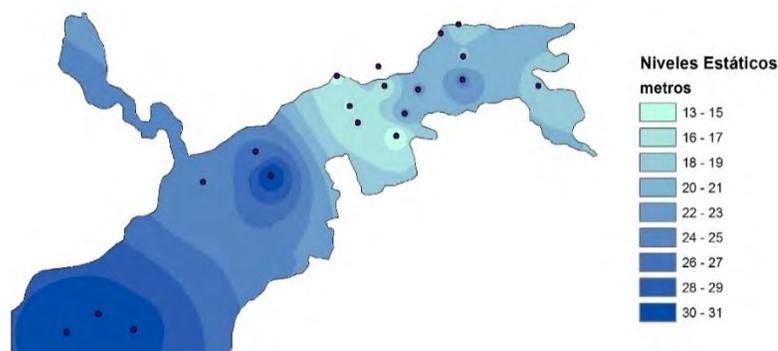


Fig. 4.41. Distribución de los niveles estáticos

Una vez obtenido el mapa se realizó una reclasificación del mismo para poder visualizarlo de acuerdo a los rangos establecidos por DRASTIC para este parámetros (Tabla 4.19) y darle su valoración.

Tabla 4.19. Valoración para el parámetro, profundidad del agua D_r (Auge, 2004).

Prof. Del Nivel de Agua	D_r
0 - 1,5	10
1,5 - 4,6	9
4,6 - 9,1	7
9,1 - 15,2	5
15,2 - 22,9	3
22,9 - 30,5	2
> 30,5	1

La extensión *Spatial Analyst*, en *Reclassify* permite darle un peso o un valor a las propiedades de un *raster* de acuerdo a un criterio dado. La reclasificación es espacialmente útil en la construcción de estos mapas de vulnerabilidad de acuíferos en la que los atributos de cada uno de los mapas utilizados en DRASTIC se deben reclasificar de acuerdo a tablas de factores de ponderación dados (Villegas, 2011).

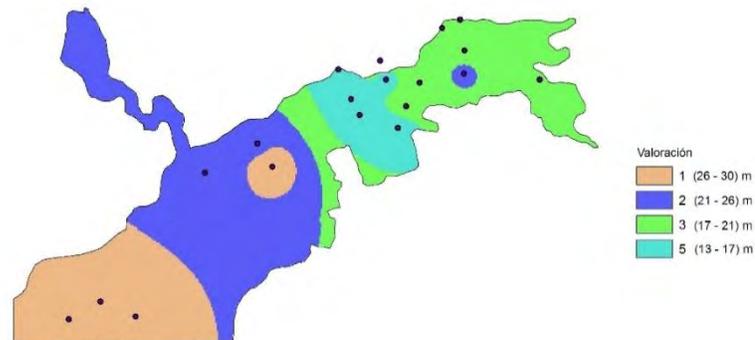


Fig. 4.42. Reclasificación de los niveles estáticos (Parámetro Dr).

El mapa muestra que en general se representan niveles lejanos a la superficie, lo que indica un bajo grado de exposición del acuífero ante eventuales derrames superficiales de contaminantes.

2. Recarga neta (R_r)

Para estimar la recarga neta, se utilizaron los datos del balance hídrico realizado para el área de estudio, de los cuales se utilizaron los datos de precipitación, evapotranspiración y escorrentía para determinar la recarga. A pesar que del balance da una infiltración prácticamente nula, por la falta de datos más precisos que permitan determinar una recarga más exacta, se generó un mapa, con una valoración de 1 con una recarga que va de 0 a 50 mm de acuerdo a la tabla 4.20.

Tabla 4.20. Valoración para el parámetro, recarga (Auge, 2004).

Recarga (mm)	Rr
0 – 50	1
50 – 103	3
103 – 178	6
178 – 254	8
> 254	9

3. Litología del acuífero (A_r)

De acuerdo a la litología del área de estudio se tiene que el acuífero está conformado principalmente de gravas y arenas. Dado que no representa valor numérico, se realizó la valoración de la litología de acuerdo a la (Tabla 4.21). Con ello se obtuvo el mapa de valoración de la litología del acuífero.

Tabla 4.21. Valoración para el parámetro, litología del acuífero (Auge, 2004)

Litología del Acuífero	Valoración A_r	A_r
Lutita masiva	1 a 3	2
Metamórfica/Ígnea	2 a 5	3
Metamórfica/Ígnea meteorizada	3 a 5	4
Till glacial	4 a 6	5
Secuencias de arenisca, caliza y lutitas	5 a 9	6
Arenisca masiva	4 a 9	6
Caliza masiva	4 a 9	6
Arena o Grava	4 a 9	8
Basaltos	2 a 10	9
Caliza kárstica	9 a 10	10

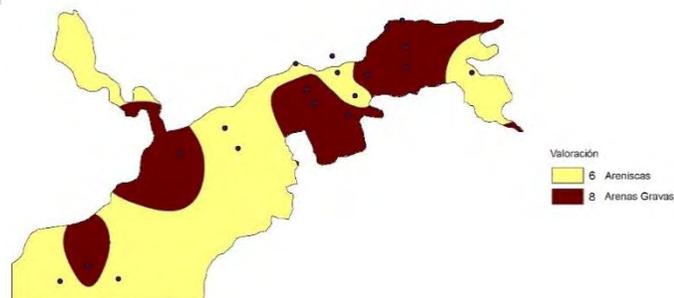


Fig. 4.43. Reclasificación de parámetro Litología del Acuífero (A_r)

4. Tipo de suelo (S_r)

A partir de la información obtenida del mapa que representa la distribución del tipo de suelo en el área de estudio (Fig. 2.4), se realizó la reclasificación de los valores de acuerdo a la (Tabla 4.22). Así se obtuvo un nuevo mapa de valoración de la cubierta edáfica bajo la superficie del terreno.

Tabla 4.22. Valoración para el parámetro, cubierta edáfica bajo la superficie del terreno (Auge, 2004)

Tipo de Suelo	Sr
Delgado o ausente	10
Grava	10
Arena	9
Agregado arcilloso o compactado	7
Arenisca margosa	6
Marga	5
Limo margoso	4
Arcilla margosa	3
Estiércol-cieno	2
Arcilla no compactada y no agregada	1

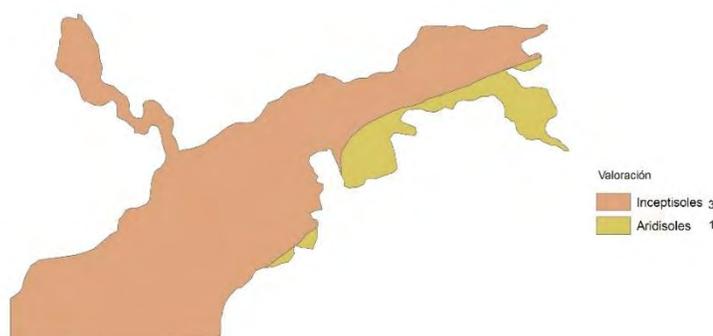


Fig. 4.44. Reclasificación del parámetro Sr. Tipo de Suelo

5. Topografía (Tr)

Del mapa de pendientes se reclasificaron los valores, permitiendo adquirir el nuevo mapa de valoración de la pendiente del terreno de acuerdo a la tabla 4.23.

Tabla 4.23. Valores para el parámetro, Topografía (Auge, 2004)

Pendiente del Terreno (%)	Tr
0 – 2	10
2 – 6	9
6 – 12	5
12 – 18	3
> 18	1

La Figura representa la nueva valoración asignada de acuerdo al método DRASTIC

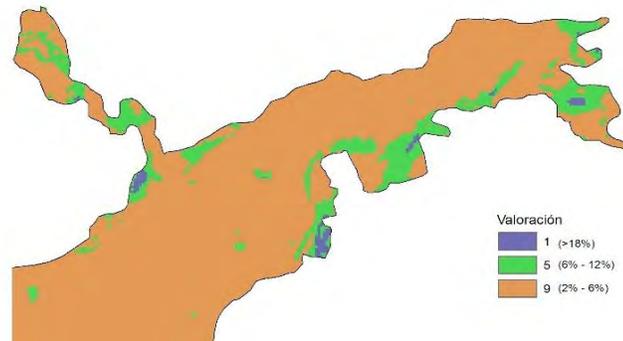


Fig. 4.45. Reclasificación de las pendientes del área de estudio. (Parámetro Tr).

6. Litología de la zona no saturada (I_r)

Para poder efectuar la elaboración del mapa de impacto de la zona vadosa o no saturada, fue analizado en función de la litología presente en la capa superior al material del acuífero, asumiendo de acuerdo al modelo hidrogeológico, como arenas arcillosas y arcillas, asignándole un valor de 3, de acuerdo a la tabla 4.24.

Tabla 4.24. Tipo de material de la zona no saturada (Auge, 2004)

Litología Zona no Saturada	Valoración I_r	I_r
Capa Confinante	1	1
Cieno-arcilla	2 – 6	3
Lutita	2 – 5	3
Caliza	2 – 7	6
Arenisca	4 – 8	6
Secuencias de arenisca, caliza y Lutita	4 – 8	6
Arena o grava con contenido de cieno (limo) y arcilla significativo	4 – 8	6
Metamórfica/Ígnea	2 – 8	4
Grava y Arena	6 – 9	8
Basalto	2 – 10	9
Caliza kárstica	8 - 10	10

7. Conductividad hidráulica del acuífero (C_r)

Este factor se obtiene del cociente entre la transmisividad y el espesor saturado del acuífero. Y al igual que en los casos anteriores, se realiza la reclasificación de los valores de conductividad hidráulica horizontal de acuerdo a la tabla 4.25. Los valores obtenidos para la conductividad se muestran tabulados en la siguiente tabla;

Tabla 4.25. Valores de conductividades hidráulicas calculadas.

Pozo	N	E	T (m ² /día)	Espesor Sat. (m)	Conduct. Hidráulica (m/día)
P1	1132268	477007	126.5	27	4,69
P2	1132307	478030	91	28	3,25
P4	1134951	479890	107.81	21	5,13
P5	1135516	482172	113.19	33	3,43
P7	1135925	484211	119.94	35	3,43
P15	1136016	483054	124.82	31	4,03
P16	1135875	482377	123.95	30	4,13
P18	1135927	481864	112.67	33	3,41
P21	1135381	481455	105.08	30	3,50
P22	1135628	481327	119.24	31	3,85
P23	1132539	477489	110.47	26	4,25
P27	1135185	482045	91.43	27	3,39
P28	1134499	479091	83.27	21	3,97

De acuerdo al mapa que representa la distribución de la conductividad hidráulica en el área de estudio, se reclasifican sus valores de acuerdo a los tabulados por el método DRASTIC.

Tabla 4.26. Valoración del parámetro, conductividad hidráulica del acuífero (Auge, 2004).

Conductividad Hidráulica (m/día)	Tr
0,04 – 4,08	1
4,08 – 12,22	2
12,22 – 28,55	3
28,55 – 40,75	6
40,75 – 81,49	8
> 81,49	10

La nueva valoración se observa en la Figura 4.46.



Fig. 4.46. Reclasificación de la conductividad hidráulica. (Parámetro Cr).

Mapa de Vulnerabilidad

Se obtuvo de la suma de cada uno de los mapas reclasificados obtenidos multiplicados por el peso de cada parámetro dentro del modelo. Para obtener este mapa se realizó el álgebra de mapas. Se ejecuta el comando *Raster Calculator* del programa *ArcGIS*, aplicando la fórmula para el índice de vulnerabilidad anteriormente descrita, generando así el mapa de índice de vulnerabilidad.

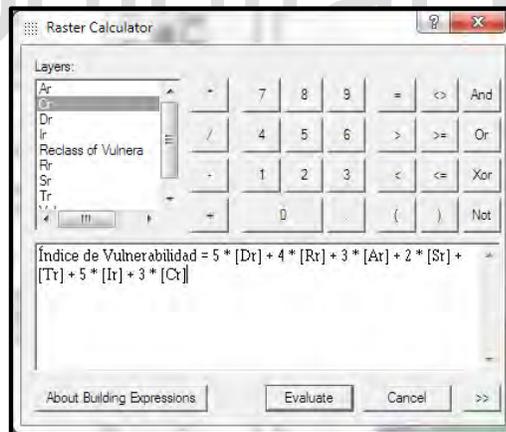


Fig. 4.47. *Raster Calculator* en *ArcGIS* para determinar el índice de vulnerabilidad

Una vez obtenido el mapa de índice de vulnerabilidad, con un rango de variación de 52 a 88, se reclasificó dicho mapa de acuerdo a los rangos de la tabla 4.15, y así obtener el mapa que muestra la distribución espacial de la vulnerabilidad que presenta el acuífero a la contaminación, siendo esta de muy baja a moderada, de acuerdo al método DRASTIC.

www.bdigital.ula.ve **CAPITULO V**
PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE
RESULTADOS

5.1. ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN DE LOS RESULTADOS

5.1.1. Ubicación de pozos e hidrografía

La Figura 5.1 muestra la ubicación de los pozos que se encuentran dentro del área de estudio. Como se observa, existen un total de 28 pozos, ubicados a lo largo del aluvión, en la parte central y suroeste de la zona.

La densidad hidrográfica en el área es escasa, está caracterizada por las quebradas Agua Salada y Tumaque, que provienen desde el noreste y el este del área de estudio. La quebrada Agua Salada desciende de áreas montañosas ubicadas a una cota que varía entre los 800 y 900 msnm y su curso fluye en dirección suroeste desembocando en la población de El Eneal, por otro lado, la quebrada Tumaque proviene del este, haciendo un cambio brusco hacia la población de Duaca comportándose paralelamente a la carretera, es probable que esté siendo influenciada por la falla que atraviesa diagonalmente el área de estudio. Todos los cursos de agua tienen un comportamiento de tipo intermitente en época seca, además es consecuencia directa de la escasa precipitación en la zona, como se observó anteriormente en el balance hídrico. El patrón de drenaje se comporta de tipo dendrítico, estando afectado por un control estructural predominante en el área, evidenciado por los cambios bruscos de dirección de flujo de los drenajes a lo largo de su recorrido.

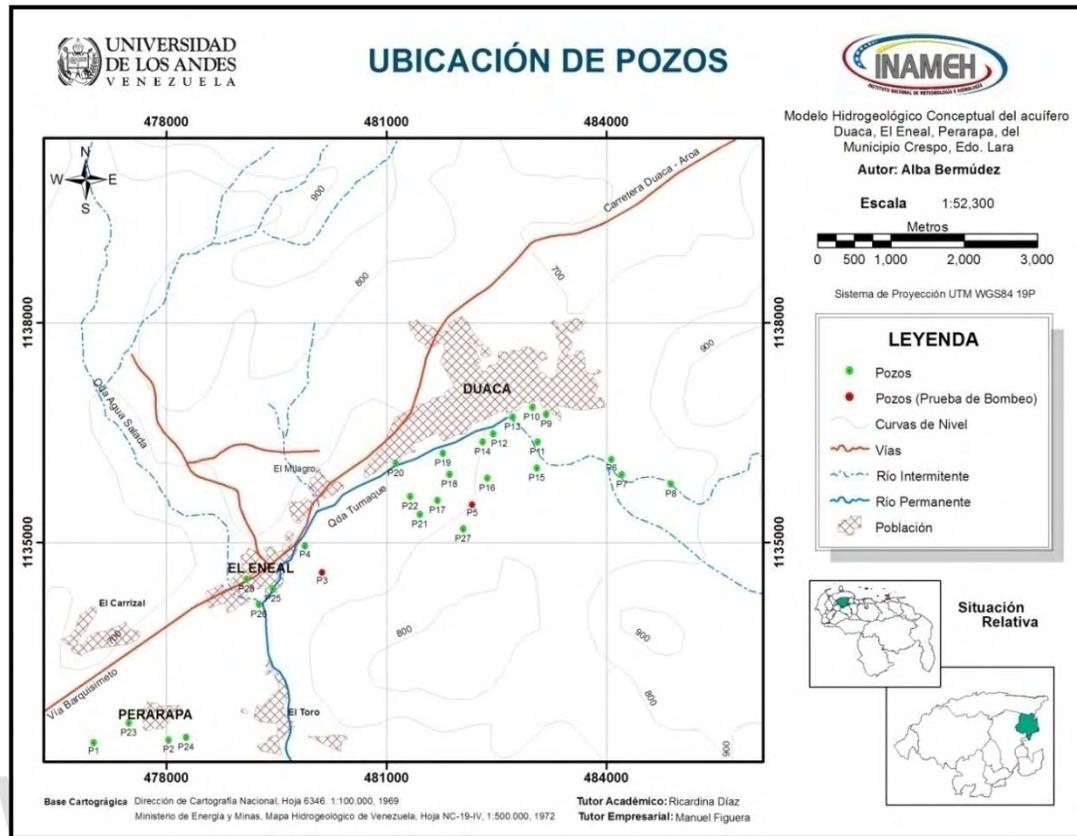


Fig. 5.1. Ubicación de pozos (Fuente propia, 2014).

5.1.2. Pendientes del área de estudio

Las zonas de menor pendiente se encuentran en la parte central del área, hacia el pie de monte, donde está emplazada la población, formando una especie de valle rodeado por pequeñas colinas con pocas pendientes. Dicho valle presenta una pendiente bastante baja y uniforme, conformado por sedimentos aluviales, provenientes, en parte, de las zonas más elevadas. En ocasiones el relieve atenuado se ve interrumpido por colinas de poca altura formadas por rocas de tipo metamórfico.

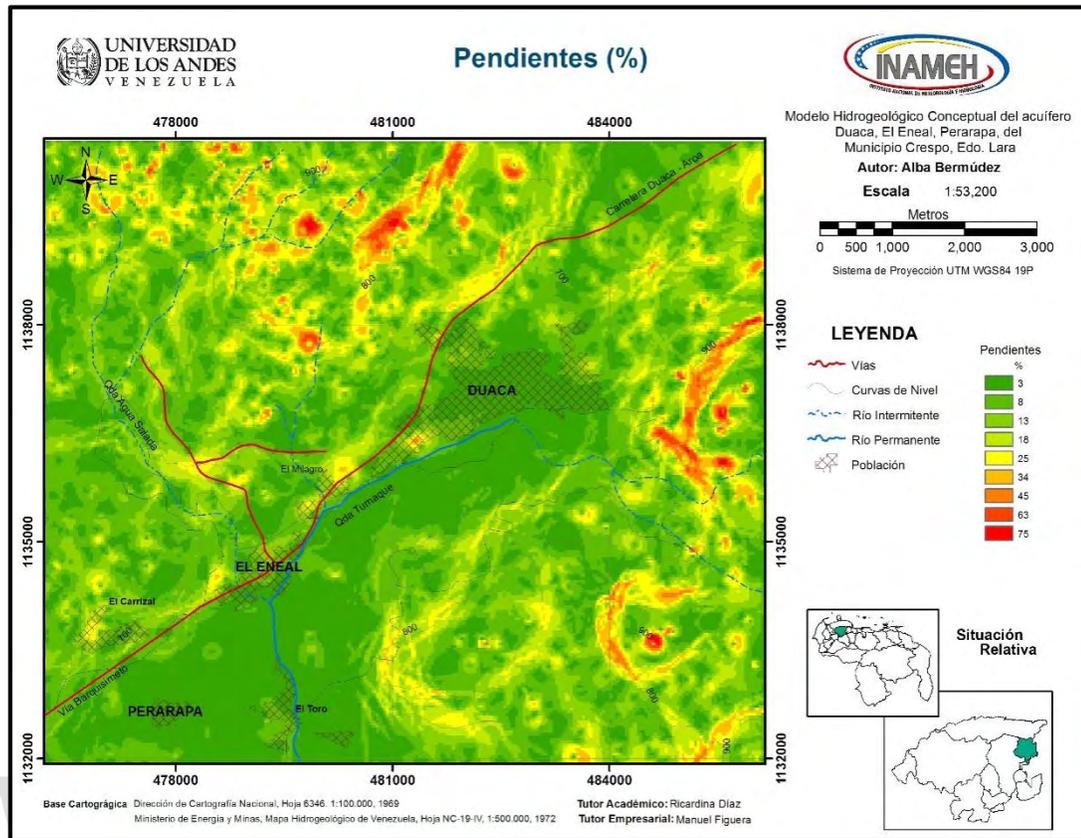


Fig. 5.2. Pendientes del área de estudio (Fuente propia, 2014)

5.1.3. Geología Local y Estructural

Mediante la observación en campo y la recopilación bibliográfica. La geología del área de estudio está caracterizada por la Formación Mamey, perteneciente al Cretácico Inferior y corresponde al basamento del acuífero. Según Bellizzia y Rodríguez (1967) dicha formación está constituida principalmente por esquistos cuarzo sericíticos, metaconglomerados intercalados con esquistos, conglomerados calcáreos arcósicos, calizas arenáceas conglomeráticas arcósicas y filitas negras grafitosas, con un espesor estimado de 1400 metros. Aflora en la quebrada Mamey, afluente de la quebrada Tumaque, al este de Duaca.

Sobre la Formación Mamey están depositados sedimentos del cuaternario reciente que conforman al aluvión, compuesto esencialmente por gravas y arenas que constituyen a la unidad permeable del acuífero. (Ver Fig. 5.3).

Desde el punto de vista estructural, se debe observar una falla ubicada diagonalmente (NE – SW) a lo largo del mapa. Según el Mapa de Fallas Cuaternarias de Venezuela, elaborado por FUNVISIS, ILP, INTEVEP y PDVSA, dicha falla es de rumbo sinistral, pudiendo ser producto de los ajustes estructurales entre el Sistema de Fallas Oca – Ancón ubicada hacia la parte norte de Duaca y la Falla de Boconó ubicada hacia el Sur (Ver Fig. 2.8). Dicha falla afecta en gran medida al área de estudio, se puede observar como este elemento estructural ocasiona que la quebrada Tumaque se alinee a lo largo de esta zona de debilidad.

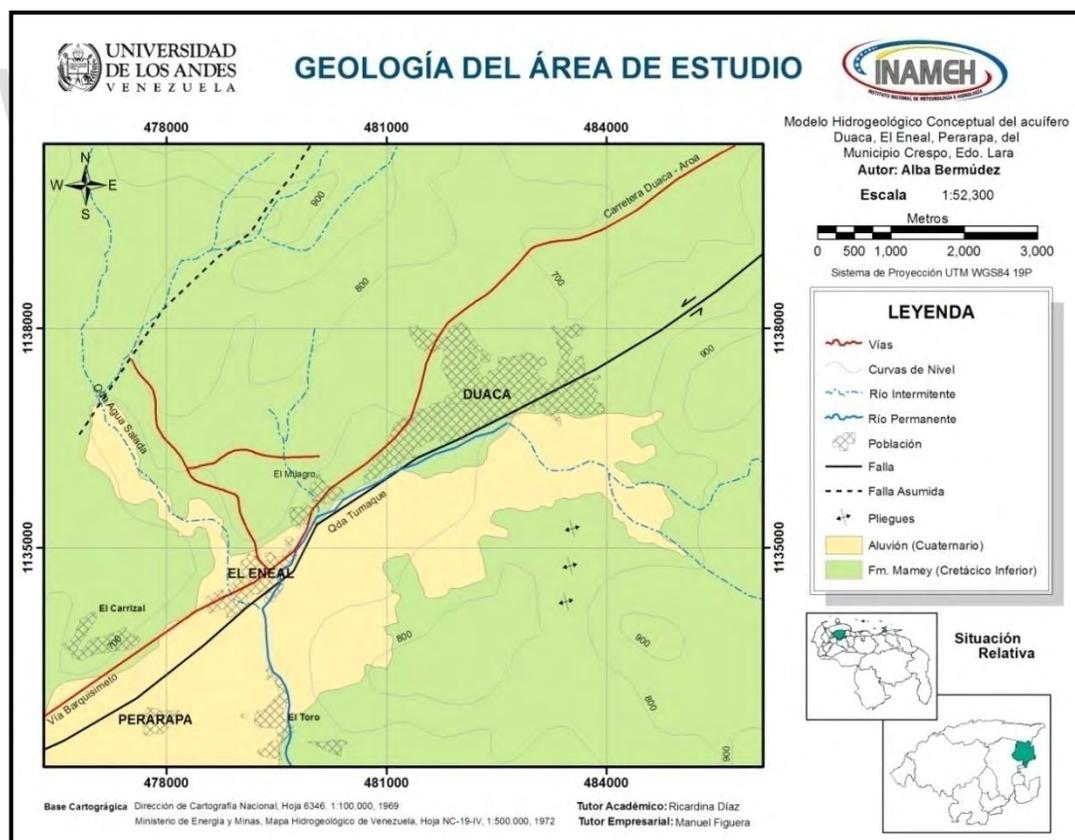


Fig. 5.3. Geología del área de estudio (Fuente propia, 2014).

5.1.4. Unidades hidrogeológicas

Las unidades hidrogeológicas dependen del tipo de roca, de los sedimentos y de su capacidad de acumulación como reservorio de las aguas subterráneas. De acuerdo a las características geomorfológicas y estructurales, las áreas con mayores potencialidades para la acumulación de las aguas subterráneas están sobre sedimentos cuaternarios o, a su vez, en la unidad no consolidada. Sus propiedades hidrogeológicas permiten almacenar agua subterránea en los sedimentos clásticos que conforman a la unidad no consolidada (Aluvión), mientras que en la unidad consolidada representada por esquistos, la acumulación del agua subterránea es debida a las fracturas o diaclasas que se encuentren presentes en estas rocas, en donde el agua percola a través de estas grietas.

Se constituyen dos unidades hidrogeológicas, establecidas de acuerdo a sus características litológicas. Una unidad conformada por rocas clásticas no consolidadas que conforman al aluvión, con permeabilidades generalmente altas que dependen de las características de los sedimentos. Y otra unidad hidrogeológica conformada por rocas metamórficas, representada por la Formación Mamey, son litologías con permeabilidades usualmente bajas y su almacenamiento de agua es nulo y solo podría ocurrir flujo de agua a través de fracturas o diaclasas presentes en la roca.

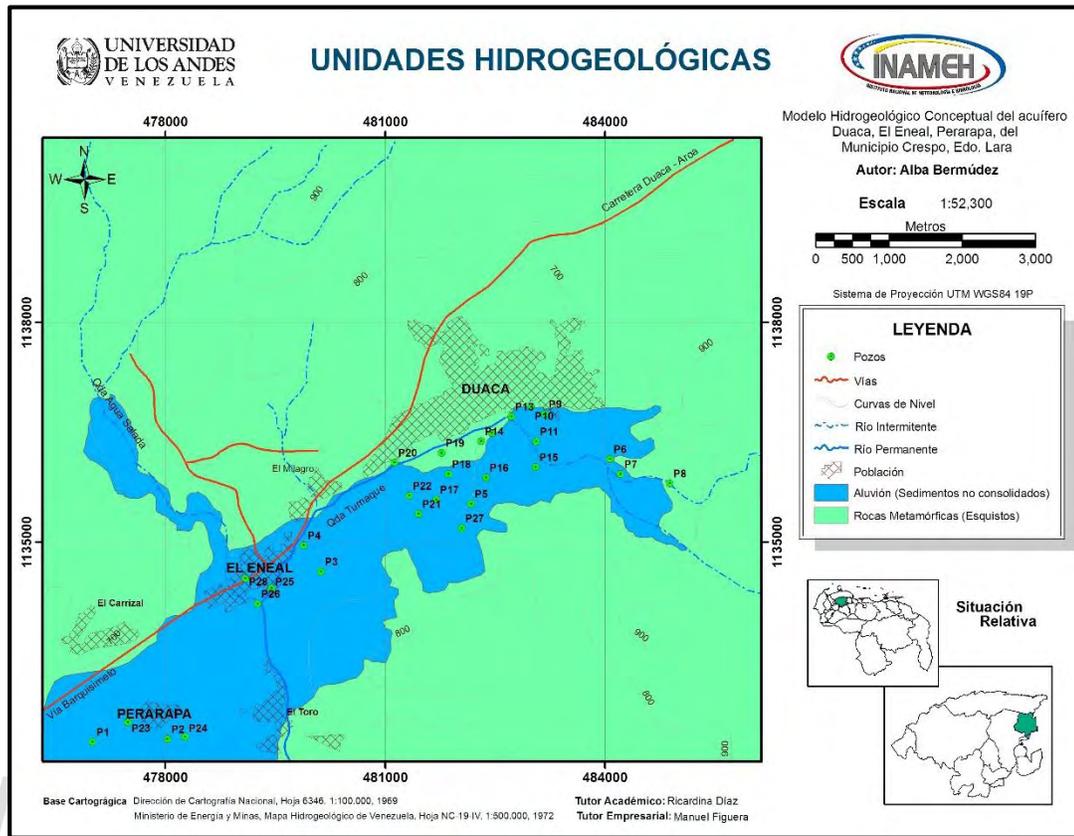


Fig. 5.4. Unidades hidrogeológicas (Fuente propia, 2014).

5.1.5. Piezometría y dirección de flujo preferencial

Los niveles piezométricos medidos permitieron obtener la morfología piezométrica del área de estudio y las líneas de dirección de flujo preferencial, donde de acuerdo a la Figura 5.5 se observa que las zonas con tonos oscuros representan la cercanía de la capa de agua a la superficie, ubicándose en mayor proporción al noreste del área hacia la población de Duaca, identificándose las mayores alturas de la zona entre los 700 msnm. La distancia entre las curvas piezométricas expresan el gradiente hidráulico, las curvas muy próximas entre sí señalan un fuerte gradiente que puede ser consecuencia de baja permeabilidad de la roca, o de alto caudal, esto puede ser observado en la Figura 5.5 hacia la población de El Eneal. Por el contrario, hacia Perarapa, la altura piezométrica es baja y la separación entre las

isopiezas es considerable, indicando esto un bajo gradiente hidráulico. La red de flujo permite indicar la dirección de movimiento del agua subterránea, la zona de irrigación donde los vectores de dirección de flujo convergen a la quebrada Agua Salada, donde al acuífero cede agua, significa que el acuífero es afluyente del río en esa zona.

El gradiente hidráulico en la parte norte del aluvión es de 0,025, mientras que en la parte central, es de 0,042, lo cual queda ejemplificado al tener las curvas equipotenciales muy cerradas en esa zona central, y en la parte más sur del aluvión se tiene 0,017. De manera general, la dirección preferencial del flujo subterráneo presenta una dirección de noreste a suroeste, caracterizado esto porque las mayores alturas piezométricas se ubican en la población de Duaca, al noreste del área.

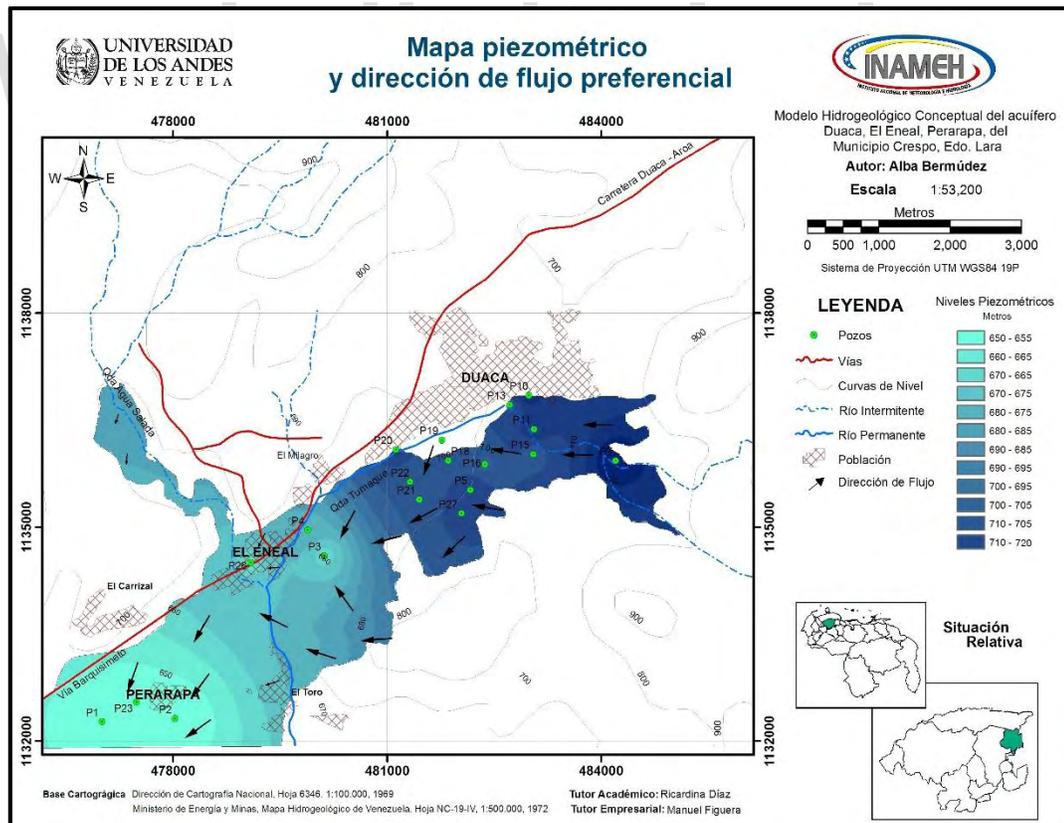


Fig. 5.5. Piezometría y líneas de dirección de flujo preferencial (Fuente propia, 2014).

5.1.6. Caudales

El mapa de caudales representa la distribución espacial de la cantidad o volumen de agua que se extrae del acuífero a través de los pozos. Los valores de caudales dependen tanto de las características del acuífero como de las características y condiciones del pozo y de la bomba. Los caudales menores fueron encontrados hacia la población de Duaca, los cuales variaban desde los 4 y 9 l/s y los caudales máximos fueron encontrados en la población de Eneal y Perarapa, representados por los pozos 4 y 21, donde los gastos de extracción varían entre los 20 y 24 l/s.

Para realizar una comparación más eficaz en la extracción de agua de los pozos es necesario conocer las características de la bomba, ya que en una zona puede existir un mejor potencial hidráulico aunque este no depende necesariamente de las condiciones del acuífero, también dependerá de las características y condiciones de los pozos y la potencia de la bomba. Por otro lado, el bombeo de la mayoría de los pozos es usado para riego, el resto de los pozos es usado para fines de abastecimiento mediante camiones cisterna para satisfacer la demanda de agua de la población.

Sin embargo, también hay que tomar en cuenta que existen una serie de pozos de HIDROLARA que permanecen constantemente encendidos.

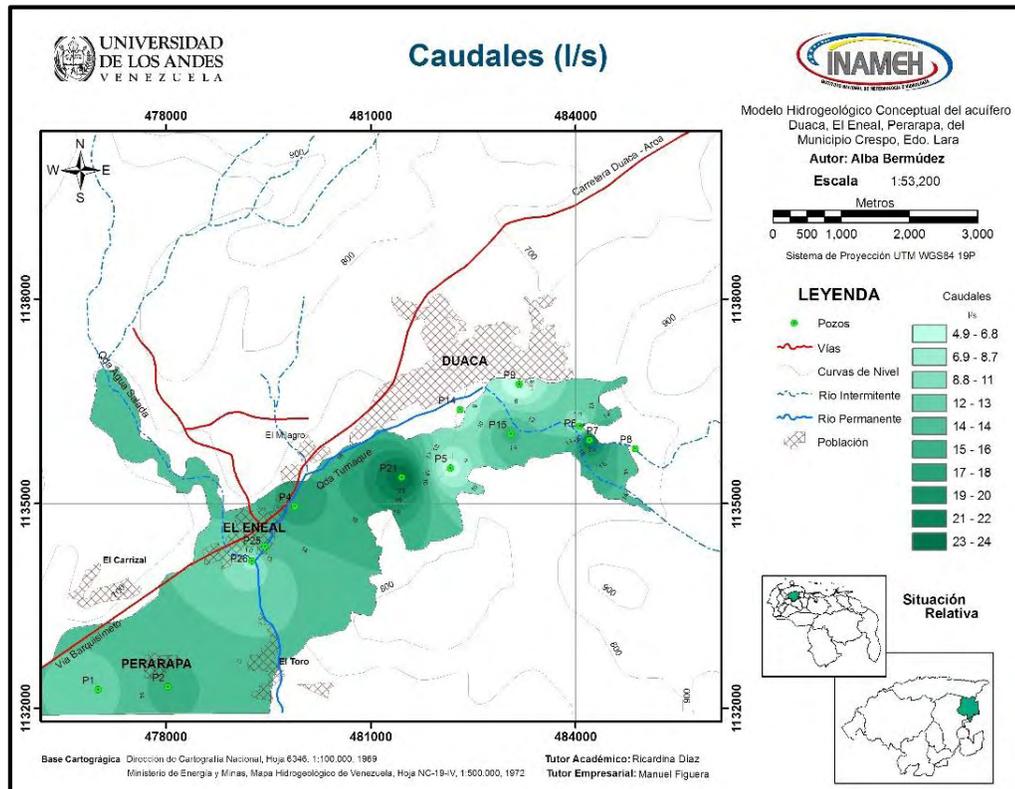


Fig. 5.6. Gastos de extracción del área de estudio (Fuente propia, 2014).

5.1.7. Conductividades eléctricas

La conductividad eléctrica permite tener una idea del comportamiento general de la capacidad que tiene el agua de transmitir electricidad, analizando la cantidad de sales que se encuentran disueltas en ella.

Se tienen valores de conductividad de 11 pozos, los cuales se encuentran bien distribuidos a lo largo de toda el área de estudio permitiendo generar el mapa de conductividades eléctricas, teniendo valores que van desde 550 hasta 1400 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Estos valores van aumentando progresivamente desde la población de Duaca arrojando los menores valores de conductividad, hasta El Eneal y Perarapa donde dichos valores se incrementan. Que existan mayores valores hacia la zona de El Eneal, podría indicar que está siendo influenciada por la quebrada Agua Salada que presenta mayores concentraciones

minerales que la quebrada Tumaque. De igual manera, de acuerdo a las normas establecidas para la clasificación y el control de calidad de los cuerpos de agua y vertidos o efluentes líquidos del año 1995 (Decreto 883) establece un valor máximo de 1500 mg/L, por lo que los valores de concentración salina presentes en el área de estudio son aptos para el consumo humano.

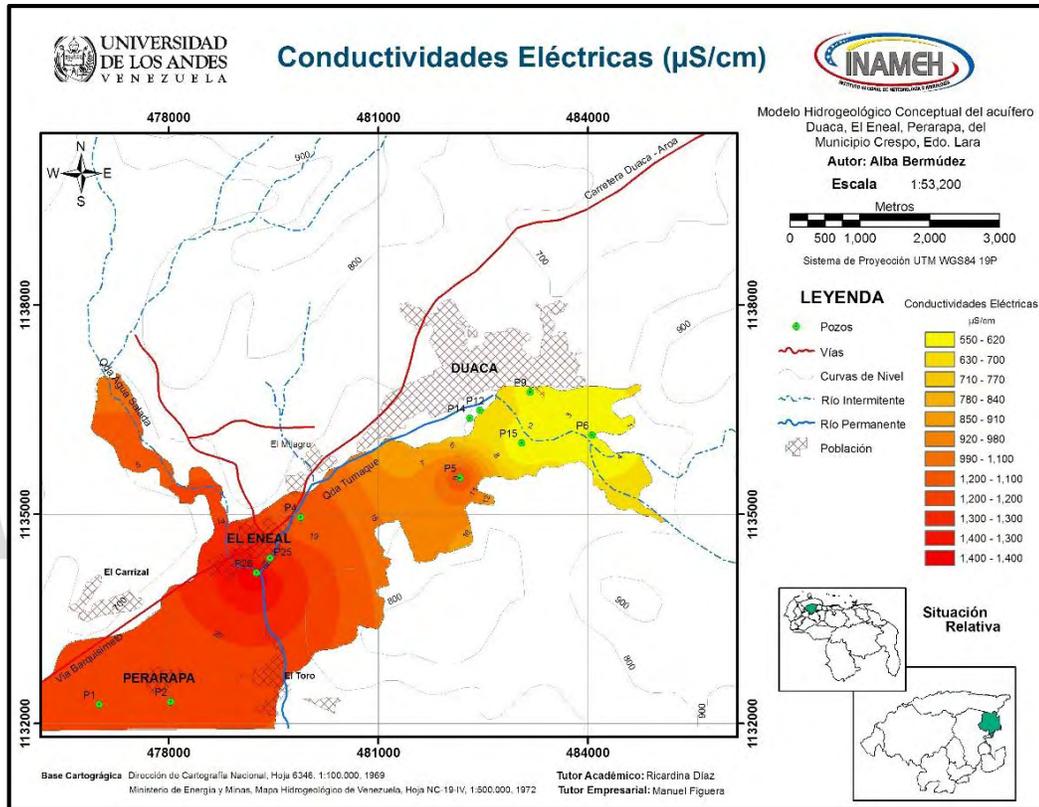


Fig. 5.7. Conductividades eléctricas del área de estudio (Fuente propia, 2014).

5.2. CARACTERÍSTICAS HIDRÁULICAS DEL ACUÍFERO

Para la evaluación hidráulica del acuífero, solamente se presentaron las condiciones para las pruebas de bombeo en 3 pozos, donde uno de ellos se ubica en la parte más septentrional de la zona de estudio en los límites del acuífero en estudio, por lo que se descartaron los datos de esa prueba. De las dos pruebas restantes, una estuvo alterada por algún otro pozo de bombeo cercano al pozo de observación, por lo que se descarta esa prueba, quedando

solamente la interpretación de una prueba de bombeo del pozo 5 en la hacienda Don Aurelio.

5.2.1. Coeficiente de almacenamiento

De acuerdo a los datos arrojados por las pruebas de bombeo del pozo 5, se adquirieron los valores de coeficiente de almacenamiento obtenidos a través del programa *AquiferTest* dando como resultado ser de $7,53 \times 10^{-4}$ y la interpretación manual dio como resultado $3,75 \times 10^{-3}$ para el acuífero en estudio. Cabe resaltar que dicha prueba se realizó en el pozo de bombeo, por lo que al momento de determinar el coeficiente de almacenamiento, se utilizó el radio del pozo en lugar de la distancia al pozo de observación como variable en la fórmula.

En el gráfico 4.21, se puede apreciar que la recta corta con el eje de las ordenadas, dicha recta presenta una anomalía de no pasar por el origen de coordenadas. Por ello, los valores de los parámetros que se obtengan se ajustarán más a la realidad cuanto más se acerque al origen de coordenadas el punto de corte de la recta con los ejes. Dicho desplazamiento tiene un significado, que según Villanueva e Iglesias (1984), cuando la recta corta al eje de ordenadas, indica que los niveles no se han recuperado cuando ha transcurrido un tiempo suficientemente largo desde que se detuvo el bombeo.

A pesar que el método de Cooper – Jacob es utilizado para determinar los parámetros hidráulicos en acuíferos confinados, Keith, *et al.* (2006), documentan que realizaron 625 pruebas de bombeo en acuíferos confinados y semi-confinados de los cuales se conocían las transmisividades calculadas por el método de Moench.

Estos autores reportan que el método de Cooper – Jacob no muestra desventaja para calcular las transmisividades en acuíferos semiconfinados con respecto a otros métodos utilizados para este tipo de acuíferos, y que se

obtuvieron mejores estimaciones en las transmisividades con valores mayores a 250 m²/d en acuíferos semiconfinados

El valor arrojado por la prueba del pozo 5 (Hacienda Don Aurelio), coincide con la interpretación litológica del área de estudio, donde el acuífero se caracteriza por ser de tipo semi-confinado, ya que de acuerdo a los valores tabulados por distintos autores (Fig. 3.4), el coeficiente de almacenamiento obtenido corresponde a ser característico de este tipo de acuífero.

5.2.2. Transmisividad y Conductividad Hidráulica

La cuantificación de la transmisividad de un acuífero es importante porque permite conocer el radio de influencia entre pozo y pozo y además pronosticar descensos del comportamiento del acuífero. Así mismo, es un parámetro que ayuda a obtener la cuantificación del potencial subterráneo.

Para determinar los parámetros de transmisividad y conductividad hidráulica se utilizó una prueba de bombeo en el pozo 5, donde se midieron las disminuciones (abatimientos) de los niveles de agua cada cierto tiempo, producidos por efecto del bombeo y una prueba de recuperación, donde se miden los aumentos (recuperaciones) de los niveles del agua cada cierto tiempo, luego de haber bombeado el acuífero por un tiempo determinado. Y el método utilizado para la recuperación fue el Método de recuperación de Theis, ajustado a las fórmulas de Jacob - Cooper.

El programa grafica los valores de tiempo y abatimiento en un sistema logarítmico. De acuerdo los valores arrojados por el programa, la transmisividad obtenida en el pozo 5 es de 113 m²/día, ubicado en la finca Don Aurelio en Duaca (Fig. 5.7), y el valor obtenido de transmisividad de acuerdo a la interpretación manual fue de 124,82 m²/día.

En la parte sur del acuífero no se definen rangos de transmisividad debido a que fue imposible realizar las pruebas de bombeo hacia esas zonas, pero si se tienen evidencias de acuerdo a los espesores encontrados, la geología y los caudales de producción, por lo tanto se considera que posiblemente estos rangos estén entre $100 < T > 500 \text{ m}^2/\text{día}$. Se determinaron valores de transmisividades para los pozos que tuviese niveles dinámicos y estáticos y así poder calcular el abatimiento. Y como se explicó en la metodología, se determinaron las transmisividades de acuerdo a la fórmula de Thiem en régimen permanente.

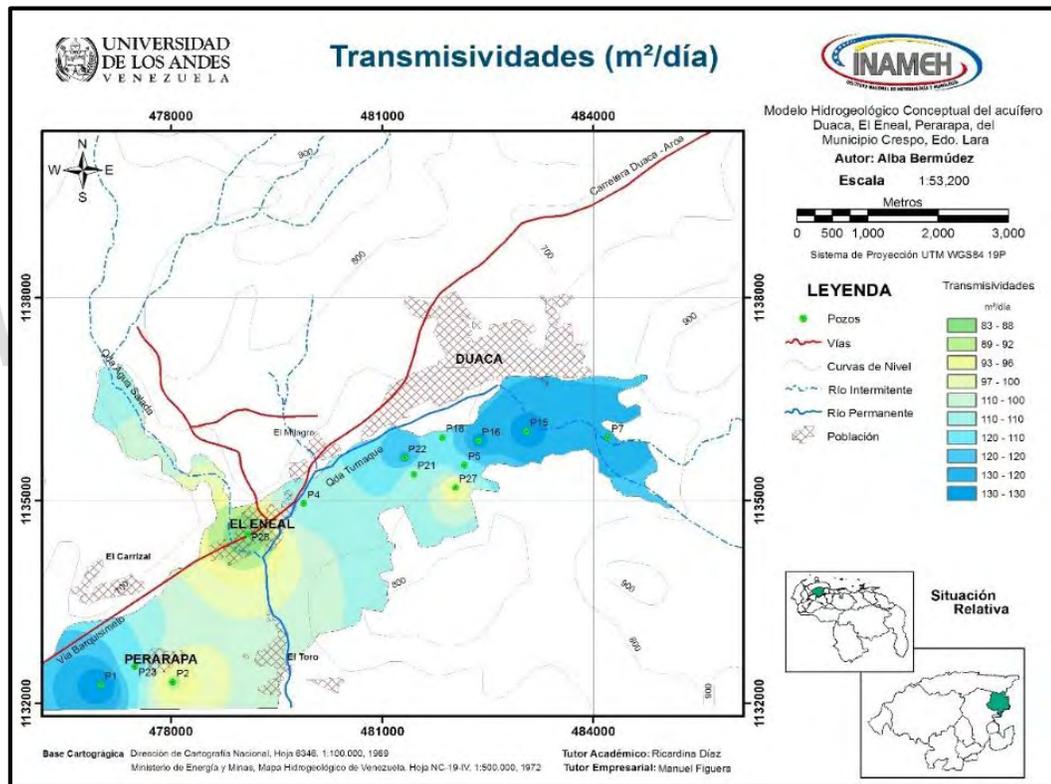


Fig. 5.8. Transmisividades del área de estudio (Fuente propia, 2014).

En el mapa se puede observar que existe una buena distribución de los valores de transmisividad, teniéndose los valores mínimos ($83 - 90 \text{ m}^2/\text{día}$) hacia la parte central del área de estudio lo que indica que en dicha zona, la capacidad de transmisión del agua es mala, a diferencia del área restante

donde los valores de transmisividad oscilan entre los 100 y 130 m²/día por lo tanto su rendimiento es mejor.

Los resultados permiten afirmar que la transmisividad y la conductividad hidráulica del acuífero en el punto de localización del pozo 5, ubicado en la zona central del área de estudio son de 113 m²/día y de 3,42 m/día respectivamente.

Estos valores de conductividad hidráulica están referidos a k horizontal, la k vertical se estima 10 veces menos, es decir 0,342 m/día.

Con base en la tabla 3.2, donde se clasifican los materiales rocosos por su conductividad, el valor de conductividad hidráulica de 3,42 m/día permite calificar al acuífero como pobre a regular, lo que indica que los materiales que conforman al acuífero permiten que el agua se mueva con poca facilidad a través de él.

5.3. BALANCE HÍDRICO

De acuerdo al balance hídrico se pudo observar que a escala mensual no se puede apreciar un almacenamiento de agua por lluvia al acuífero, debido a que los valores de evapotranspiración mensuales son mucho mayores que las precipitaciones, por lo que pareciera que toda el agua que precipita se evapotranspira, cosa que es incorrecta. Se tendría que realizar un balance a menor escala, preferiblemente diario, de la zona, para determinar, por épocas de lluvia, el almacenamiento o la recarga neta que pueda tener el acuífero.

Este balance sirvió para determinar el tipo de clima del área de estudio, que de acuerdo al cálculo explicado en el marco metodológico, da como resultado que el área de estudio presenta un clima de subhúmedo a seco según la clasificación de Thornthwaite.

Tabla 5.1. Balance hídrico del área de estudio.

Meses	Temp (°C)	Pp (mm)	ETP (mm)	Pp – ETP (mm)	Almc	ETR (mm)	DEF (mm)	EXC	Esc (mm)	Inf
Enero	21,25	5,63	120,8	-115,17	0	5,63	-115,17	0	2,67	0
Febrero	21,4	6,3	129,7	-123,4	0	6,3	-123,4	0	2,99	0
Marzo	22,02	16,25	152,3	-136,05	0	16,25	-136,05	0	7,72	0
Abril	23,37	57,4	134,7	-77,3	0	57,4	-77,3	0	27,27	0
Mayo	23	82,8	127	-44,2	0	82,8	-44,2	0	39,33	0
Junio	23,2	106,2	118,1	-11,9	0	106,2	-11,9	0	50,45	0
Julio	22,6	98,1	118,1	-20	0	98,1	-20	0	46,60	0
Agosto	22,5	120,75	125,3	-4,55	0	120,75	-4,55	0	57,36	0
Septiembre	23,5	86,1	123,9	-37,8	0	86,1	-37,8	0	40,90	0
Octubre	23,1	96,7	115,7	-19	0	96,7	-19	0	45,93	0
Noviembre	22,8	53,6	105,6	-52	0	53,6	-52	0	25,46	0
Diciembre	22,1	25,8	103,8	-78	0	25,8	-78	0	12,26	0
Totales		755,63	1475		0	755,63	-719,37	0	358,92	0

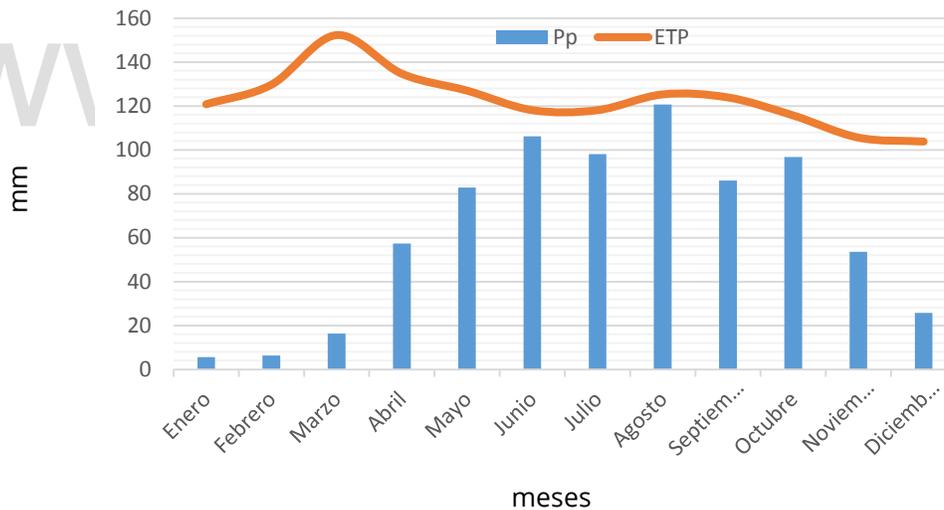


Fig. 5.9. Gráfico precipitación vs evapotranspiración potencial (Fuente propia, 2014).

5.3.1. Recarga por precipitación

La recarga está representada por la cantidad de agua que se infiltra al acuífero por lluvias y por flujos subterráneos, cada uno de los cuales es calculado mediante la ecuación 4.8. Donde, como se indicó anteriormente, la escorrentía depende de varios factores, como lo son la pendiente del terreno,

el tipo de cobertura vegetal y el tipo de suelo, el cual se determinó de acuerdo a la ecuación 4.9.

A partir del mapa de pendientes (Fig. 5.2), se obtuvieron dos pendientes; una prácticamente despreciable, para las zonas bajas, de aproximadamente 0,3% y otra para las zonas medias de 40% aproximadamente.

El tipo de cobertura vegetal observada en la zona es de cultivos en las áreas con pendientes bajas y despreciables, y para las zonas de pendientes media la vegetación predominante es de pastos y vegetación ligera.

El tipo de suelo, en las zonas con pendientes bajas y despreciables, se notan en su mayor parte semipermeable, y para las zonas de pendientes medias el suelo es impermeable.

De acuerdo a la tabla 3.4, se obtuvo un coeficiente de escorrentía de 0,475 en promedio, determinado de acuerdo a las condiciones y características anteriormente descritas.

Los resultados son mostrados en la tabla 5.1.

Los valores obtenidos de infiltración, indican que puede existir una infiltración por precipitación, sin embargo, esta recarga es muy pequeña debido a que en el área de estudio, la evapotranspiración es mayor que la precipitación. Esto coincide con el clima subhúmedo a seco de la zona donde las lluvias son escasas.

De igual forma, es importante resaltar que para determinar un balance hídrico del suelo se requieren mayores datos como lo son el tipo de suelo, la humedad, retornos de riego, entre otros, por lo que dicho balance hídrico no está completo.

5.4. Espesor saturado del acuífero

Se representan en un mapa los espesores de las capas permeables compuestas por gravas y arenas presentes en el área de estudio, los cuales son capaces de almacenar cierto volumen de agua en el acuífero, así como la distribución de esas para lograr definir un modelo hidrogeológico y observar los parámetros que influyen en su comportamiento.

Se puede observar que los mayores espesores se ubican hacia la población de Duaca y Perarapa, y encontrándose los menores espesores en la población de El Eneal, lo que coincide con los mayores caudales de extracción hacia esa zona y las menores permeabilidades.

Dicho mapa de espesores saturados, permitirá más adelante establecer una zonificación de acuerdo al potencial hidráulico del acuífero, junto con otros parámetros importantes para establecer dicha zonificación.

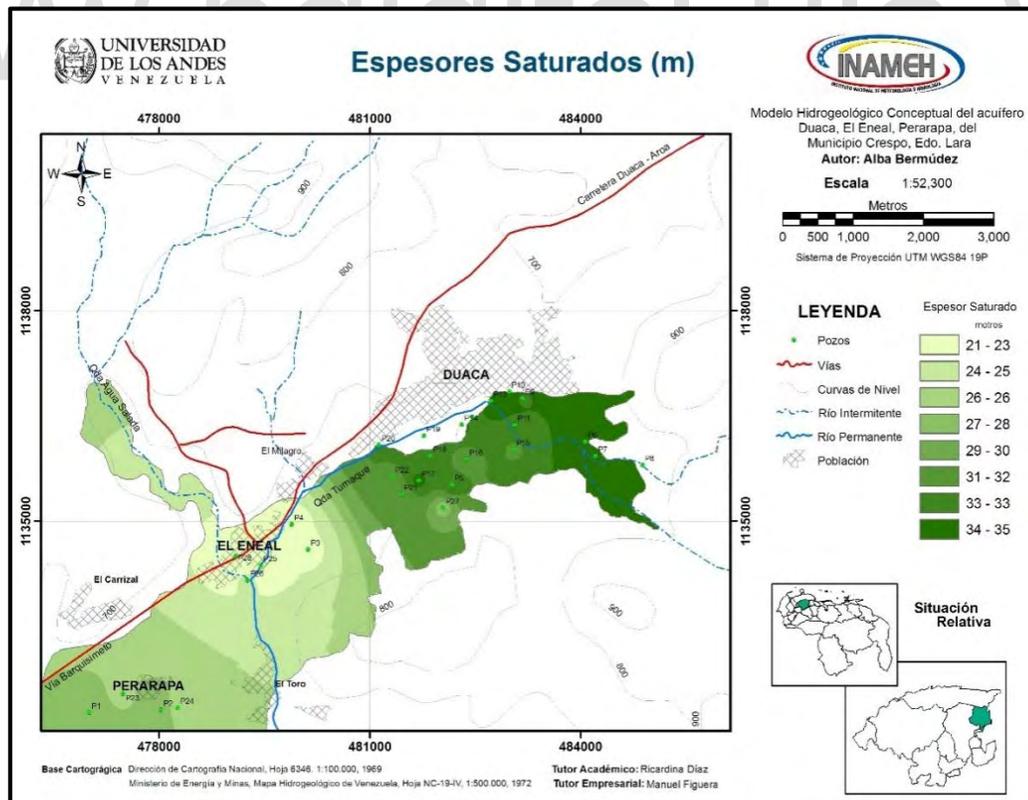


Fig. 5.10. Espesores saturados del acuífero (Fuente propia, 2014).

5.5. Análisis e interpretación de las muestras de suelo

De los ensayos granulométricos y de límites de consistencia de las muestras de suelo, se tiene que para la muestra recolectada en el sector Perarapa, exhibe más de un 93% de su peso en finos, seguido de las arenas que representan casi un 7% y por último, el ejemplar no presentan partículas tamaño grava. Según la Carta de Plasticidad, el suelo se denomina como una arcilla inorgánica de alta plasticidad y baja compresibilidad (CL).

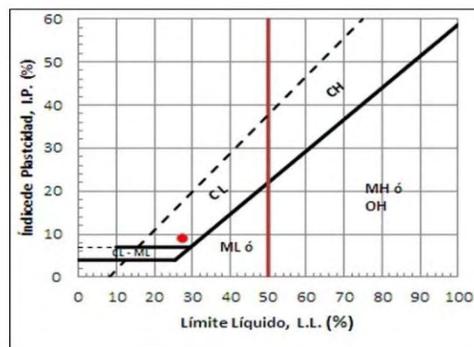
En la evaluación de la muestra de suelo perteneciente al sector El Milagro, se observa un indudable dominio por parte de los finos, con un porcentaje en peso que supera el 90%, luego con un porcentaje en peso de arenas mayor a un 8%, por lo que la proporción de gravas es prácticamente despreciable, pues no llega a alcanzar valores del 2%. Según la carta de plasticidad de Casagrande, se cataloga como una arcilla inorgánica de alta plasticidad y compresibilidad (CH).

El espécimen de suelo recolectado en el sector Don Aurelio, presenta un porcentaje dominado por los finos, con más de un 63% en peso; asimismo, exhibe más de un 36% en peso de partículas tamaño arena; por lo tanto, la proporción de gravas es completamente nula e inexistente. El límite líquido e índice de plasticidad obtenidos, encasillan al suelo final como una arcilla inorgánica de alta plasticidad y baja compresibilidad (CL), dentro de la gráfica de Casagrande.

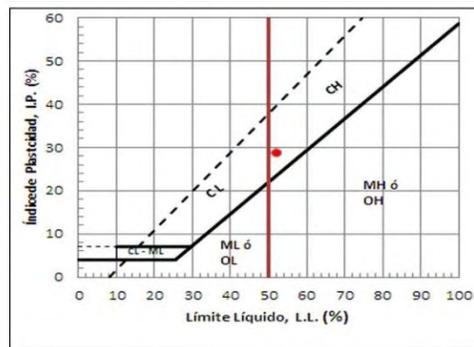
Se observa claramente que las muestras de Perarapa y Don Aurelio tienen propiedades similares debido a su análoga clasificación, no obstante el ejemplar del sector Don Aurelio exhibe un poco más de partículas tamaño arena, pero que igualmente no son dominantes dentro de su ordenamiento granulométrico. Todo esto indica que la litología superficial se hace constante a lo largo de todo el aluvión.

Según Casteletti L. (1996), la clasificación de los suelos exhibe de manera referencial los valores de algunas propiedades de los diferentes tipos de suelos, sin pretender jamás la sustitución de los correspondientes ensayos para su determinación real; pudiéndose establecer que la permeabilidad (k) de los materiales resultantes es menor a 10^{-6} cm/seg presentando condiciones de impermeabilidad.

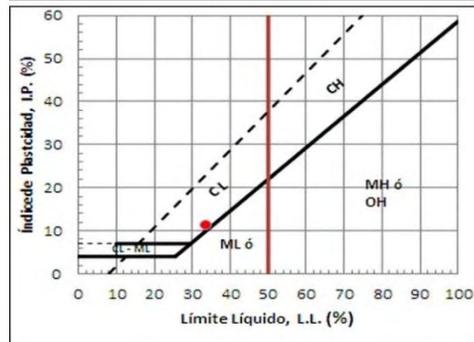
La Figura 5.11, presenta un resumen de las características encontradas en las muestras de suelo, en cuanto al porcentaje de finos y de gruesos, y sus respectivos límites líquidos y plásticos.



Muestra: Don Aurelio
Finos: 63%
Gruesos: 36%
LL: 27.89% LP: 19.03% IP: 8.86%
Clasificación de Suelo: **CL**
Arcilla inorgánica de alta plasticidad y baja compresibilidad.



Muestra: El Milagro
Finos: 91%
Gruesos: 8%
LL: 52.40% LP: 23.88% IP: 28.52%
Clasificación de Suelo: **CH**
Arcilla inorgánica de alta plasticidad y compresibilidad.



Muestra: Perarapa
Finos: 93%
Gruesos: 7%
LL: 33.78% LP: 22.56% IP: 11.22%
Clasificación de Suelo: **CL**
Arcilla inorgánica de alta plasticidad y baja compresibilidad

Fig. 5.11. Resumen de las características granulométricas de las muestras de suelo.

Las tablas y gráficos obtenidos para la interpretación de los ensayos realizados a las muestras de suelo se presentan en el apartado D de los anexos.

5.6. MODELO HIDROGEOLÓGICO CONCEPTUAL

El modelo construido nos indica que el acuífero en el área de estudio está constituido por tres capas. La primera capa está representada por material aluvial, compuesto principalmente por arcillas y limos, con pequeños espesores que oscilan entre los 5 y 15 metros, donde el menor espesor se consigue hacia la zona central del acuífero en la población de El Eneal. Esta capa, debido al tipo de litología, actúa como un material semipermeable, cuyas propiedades impiden que el agua percole fácilmente en el subsuelo. La segunda capa está representada por arenas y gravas, con grandes espesores que oscilan entre los 20 y 40 metros. Dicha capa conforma la zona permeable del acuífero, cuyas propiedades permiten que el agua fluya y se almacene con facilidad. La tercera capa está representada por esquistos considerada el basamento del acuífero. Se puede decir que se comporta de manera impermeable, pues los esquistos son rocas metamórficas cuya porosidad primaria es prácticamente nula y el poco flujo de agua que pueda existir sería debido a fracturas o grietas que estén presentes en la roca.

Para el análisis del proceso de recarga, es importante conocer dos aspectos primordiales, como lo son la infiltración y la dirección de flujo.

Según el mapa de líneas de dirección de flujo, las zonas de recarga del acuífero provienen del noreste al suroeste, aunque de manera general, provienen de las áreas con mayor altitud a los laterales del acuífero.

Según el análisis de las muestras de suelo tomadas, se pudo observar que a lo largo de todo el aluvión se tiene, en su parte más superficial, una litología conformada por arcillas que presentan condiciones de impermeabilidad. Para

que exista una recarga directa por lluvia, el agua tiene que vencer los factores que afectan la capacidad de infiltración, como lo son la entrada superficial, la transmisión a través del suelo, la capacidad de almacenamiento del suelo, las características del medio permeable y las características del fluido, al interpretar que la capa más superficial del aluvión está constituida por arcillas prácticamente impermeables, es difícil que el acuífero se recargue por la infiltración directa de las precipitaciones sobre el aluvión. Sin embargo, la zona de piedemonte en los alrededores del acuífero representado por la Formación Mamey, actúan como área de recarga lateral por flujo subterráneo por medio de las fracturas o grietas de las rocas en esa zona, ya que se estima que hacia esa zona la lluvia es mayor, disminuyendo la ETP, aumentando la escorrentía superficial y la infiltración por las fallas y fracturas. No obstante, es importante realizar un estudio más detallado de las precipitaciones y evapotranspiraciones hacia esas zonas. La recarga del acuífero viene dada mediante precipitación, a pesar que al momento del cálculo del balance no determine el almacenamiento de agua del acuífero ya que la evapotranspiración es mayor que la ETP en la mayoría de los meses, sin embargo, el balance está limitado a datos proporcionados mensualmente, dado que sí en épocas de lluvia, cuya duración es de aproximadamente 5 meses, la infiltración del suelo, permitirá la recarga de agua al acuífero.

Según lo anteriormente expuesto, se puede decir que el acuífero es de tipo semiconfinado, tanto por el análisis de sus características litológicas, como por sus propiedades hidráulicas, habiendo dado como resultado un coeficiente de almacenamiento de $7,53 \times 10^{-4}$, ubicándose este en los rangos establecidos por diversos autores para acuíferos semiconfinados.

Los límites y el patrón de flujo están estrechamente controlados por el dominio estructural y las formaciones geológicas recientes. Es un acuífero complejo, desarrollado sobre las acumulaciones cuaternarias y sobre la

Formación Mamey, considerada de permeabilidad escasa o prácticamente impermeable por estar conformada de rocas metamórfica.

El acuífero se constituye de un medio hidrogeológico poroso y semi-permeable en superficie, en la que predominan materiales aluviales que han rellenado una leve depresión al centro del área de estudio, se intercalan materiales finos y gruesos indistintamente en el subsuelo.

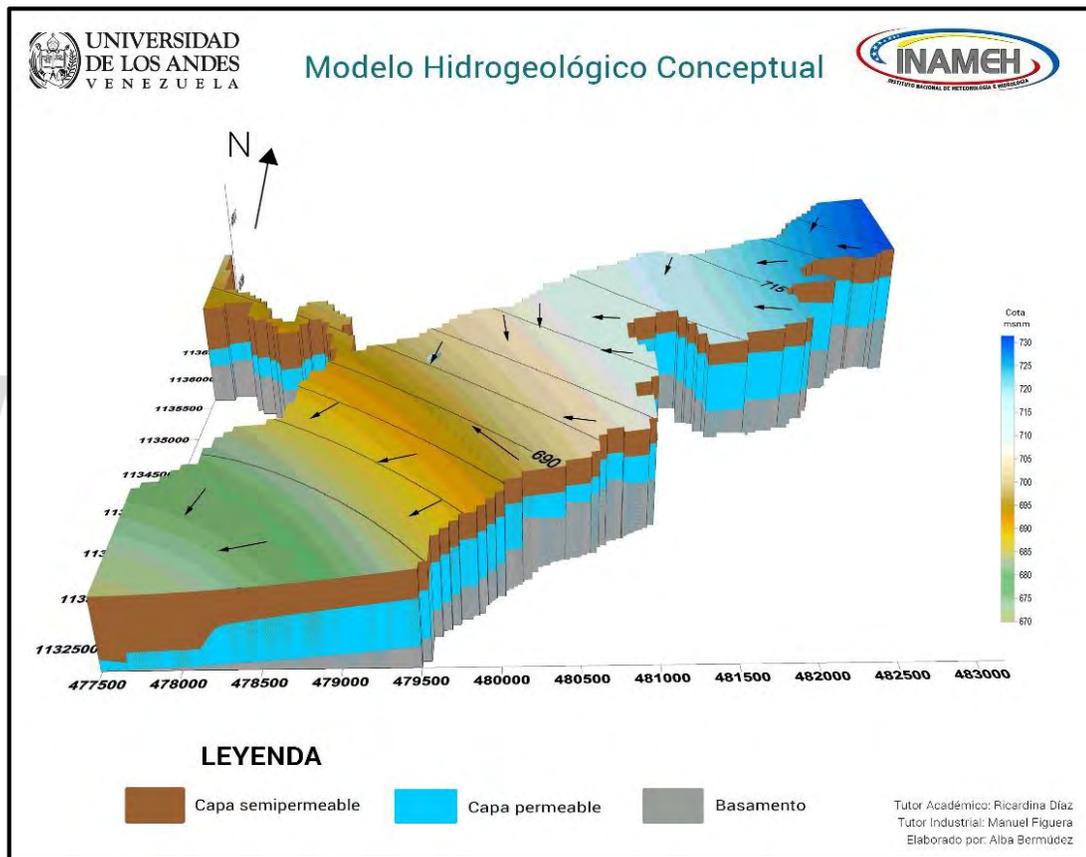


Fig. 5.12. Modelo hidrogeológico conceptual.

5.6.1. Volumen de agua del acuífero

De acuerdo al modelo tridimensional del acuífero, se puede determinar el volumen total de agua libre almacenada en el mismo. Esta puede ser extraída por medio de pozos, sin embargo, dicha extracción debe evitar que el acuífero

experimente una reducción de la reserva permanente y no agotar el recurso explotando al acuífero.

El volumen de roca permeable saturada determinado por el software *Surfer 11*, se calculó con base en el *grid* obtenido para el espesor de la capa permeable saturada. De esta manera, el volumen de agua es calculado al multiplicar el volumen de roca permeable saturada por la porosidad efectiva de los materiales rocosos permeables del acuífero.

Distintos autores han establecido valores de porosidad total y efectiva para diversos materiales rocosos, en función de las experiencias obtenidas en sus investigaciones. Por esta razón y para fines prácticos se utilizaron los valores propuestos por dichos autores, donde se determinó que el valor de porosidad efectiva media correspondiente al tipo de materiales permeables que se encuentran en el área de estudio (gravas y arenas) es del orden del 20%, como lo indica la tabla 3.1.

La porosidad efectiva está íntimamente relacionada con la conductividad hidráulica y es la magnitud que se utiliza en el cálculo de volumen de agua del acuífero. El cálculo efectuado por el valor de porosidad efectiva seleccionado es el siguiente:

Volumen de agua = Volumen de roca permeable x Porosidad efectiva

$$\text{Volumen de agua} = 50.245.894,16271 \text{ m}^3 \times 20\%$$

$$\text{Volumen de agua} = 10.049.178,82 \text{ m}^3$$

Por otro lado, se calculó el volumen total del acuífero, entre la superficie del terreno y la superficie del sustrato rocoso, para tener un patrón de comparación.

$$\text{Volumen total del acuífero} = 143.173.085,365 \text{ m}^3$$

Haciendo la comparación del volumen de agua y el volumen total del acuífero se tiene:

Tabla 5.2. Comparación entre el Volumen total del acuífero, el volumen de roca permeable saturada y el volumen de agua.

	Volumen (m ³)	Porcentaje
Volumen total del acuífero	143.173.085,365	100%
Volumen de roca permeable	50.245.894,16271	35% del Vol. total del acuífero
Volumen de agua	10.049.178,82	20% del Vol. de roca permeable saturada 7% del Vol. total del acuífero

5.6.2. Volumen de agua extraíble del acuífero

Tomando en cuenta la interpretación y el análisis de estudios anteriores realizados en la zona, los niveles estáticos se mantienen constantes con el pasar del tiempo, se tienen registros de dichos niveles desde 1990, los cuales no han variado en su mayoría, con el pasar de los años, manteniéndose en rangos entre los 15 y 30 metros de profundidad.

Los caudales medidos en los pozos dan una sumatoria total de 166,95 l/s, que genera un caudal de producción anual de 5.264.760 m³/año, sin tomar en cuenta los pozos que no fueron inventariados y asumiendo que esos caudales se mantengan constantes a lo largo de todo el año. Claramente, ese valor de caudal de producción anual de los pozos inventariados da un 52,38% del valor total de volumen de agua del acuífero, y tomando en cuenta que no ocurra recarga al acuífero en todo el año. El valor entra dentro del rango que establece que no se está sobre explotando el acuífero y que se mantiene estable, sin embargo, la utilización total las reservas supondría una sobre explotación del acuífero y cuya restauración (su devolución de los niveles freáticos a su estado natural) requeriría de un largo periodo sin extracciones del recurso hídrico.

5.7. VULNERABILIDAD DEL ACUÍFERO A LA CONTAMINACIÓN

El índice de vulnerabilidad según el método DRASTIC en el área de estudio se encontró entre 52 y 88. La vulnerabilidad a la contaminación obtenida mediante este índice se presentó de baja a moderada en gran parte hacia la población de Duaca, en sectores donde los niveles estáticos se encuentran más cercanos a la superficie y las zonas menos propensas a que el acuífero se vea contaminado es hacia la población de Perarapa donde los niveles estáticos encontrados son más profundos.

Una vulnerabilidad moderada se caracteriza por materiales moderadamente finos que dificultan el ingreso del contaminante al acuífero, suelos de textura media a fina y mediana compactación. Estas características permiten una moderada capacidad de atenuación al transporte de contaminantes con relación a la zona de más vulnerabilidad. Una vulnerabilidad baja se caracteriza por la presencia de materiales compactados de baja permeabilidad, suelos finos. Estas características califican al área como la de mayor capacidad de atenuación al transporte de contaminantes.

Analizando el mapa reclasificado de la vulnerabilidad (Figura 5.13), se observa que la zona de vulnerabilidad baja se encuentra hacia la población de Perarapa, eso se debe a la baja valoración dada a los parámetros de la profundidad del agua, la topografía y el tipo de suelo.

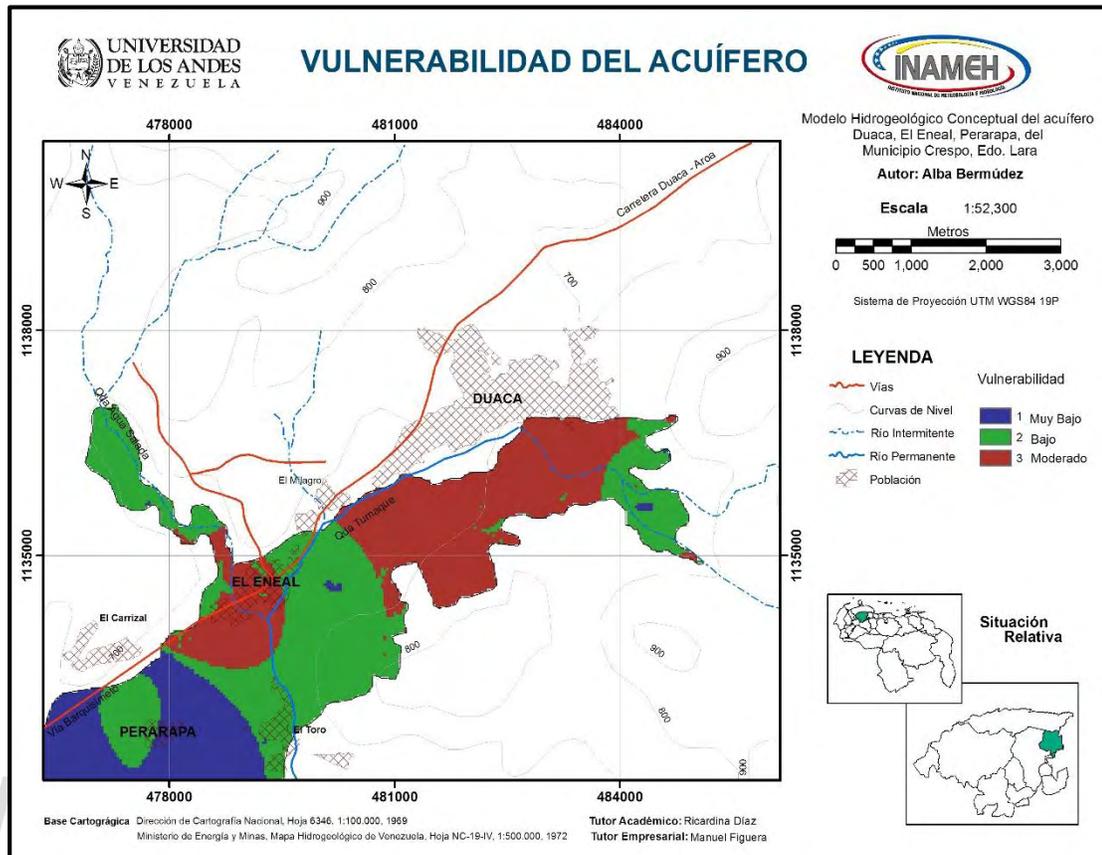


Fig. 5.13. Vulnerabilidad del acuífero a la contaminación.

5.8. ZONIFICACIÓN DE ACUERDO AL POTENCIAL HIDRÁULICO DEL ACUÍFERO.

De acuerdo a los parámetros hidráulicos obtenidos, se puede realizar una zonificación del acuífero generando bases de aprovechamiento del mismo. La transmisividad cualitativa en el acuífero va de regular a buena, lo cual permite establecer una idea de que el agua que se extrae proviene de los materiales granulares y de una marcada heterogeneidad en el acuífero.

Como se observa en la Figura 5.14, se tienen 3 zonas de aprovechamiento del acuífero, donde 1 es el menor valor y 3 el mayor. La zona que representa la mejor opción para la perforación de pozos nuevos es en la población de Duaca y para la parte suroeste del acuífero en la población de Perarapa,

debido a que en esta zona se tiene un mayor espesor del acuífero, junto con unas mayores transmisividades. Siempre cuidando que no haya interferencia entre pozos, manteniendo una apropiada densidad de los pozos. Se establecieron 3 zonas de aprovechamiento del acuífero, representadas en la Figura 5.14.

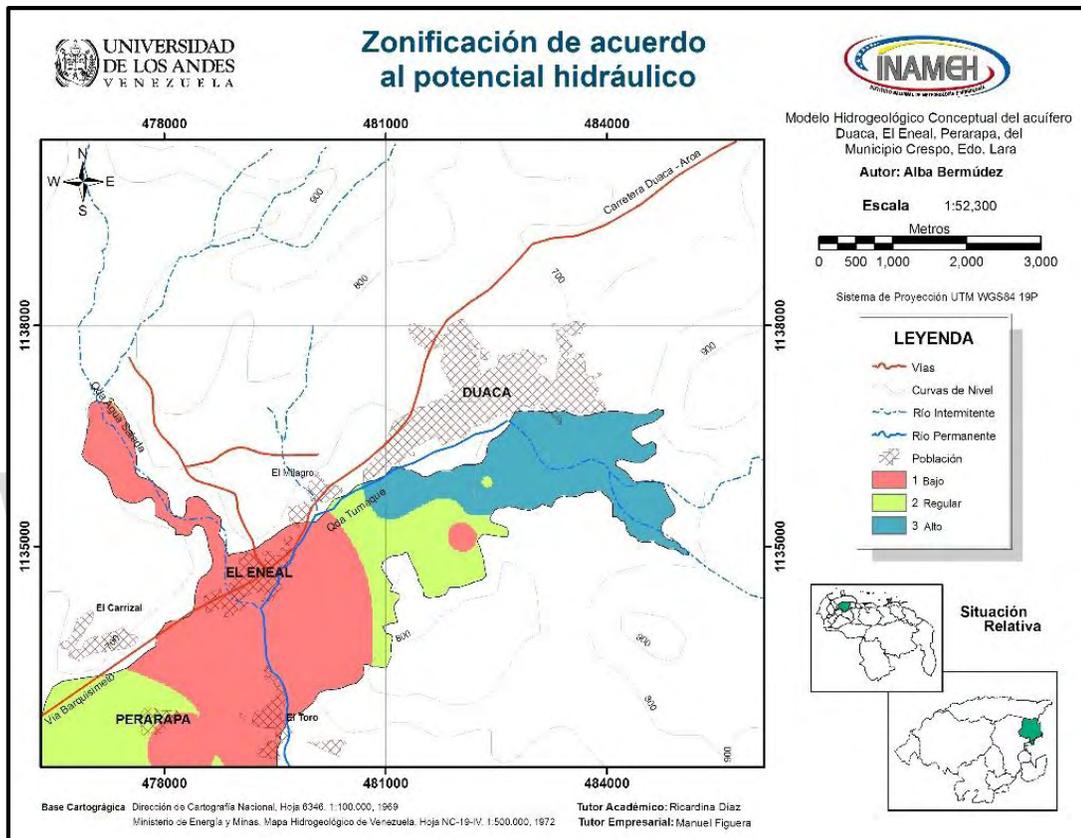


Fig. 5.14. Zonificación del acuífero de acuerdo a su potencial hidráulico.

Así mismo, haciendo una comparación entre las zonas más vulnerables a la contaminación y las zonas de mayor aprovechamiento del acuífero, se tiene que a pesar de que las áreas más aprovechables se encuentren hacia la población de Duaca, su vulnerabilidad a que agentes contaminantes afecten al acuífero es moderada por lo que hay que tener cierto cuidado con el mantenimiento y seguimiento de esas zonas donde el acuífero se presente de mejor calidad que en el resto del acuífero, sin embargo el acuífero en toda su

extensión, de manera general, es óptimo para su uso y aprovechamiento permitiendo así abastecer todas las necesidades de la creciente población pero teniendo en cuenta un control sistematizado de los caudales de extracción de los pozos con respecto a la recarga neta del acuífero para evitar el posible agotamiento del acuífero. Para esto último se necesita un monitoreo continuo, mediante el diseño de una red de pozos de observación que actúe como indicador de las fluctuaciones de niveles, caudales y calidad de las aguas del acuífero.

www.bdigital.ula.ve

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- A partir del procesamiento y análisis de la información litológica, se determinó que la unidad hidrogeológica donde está emplazado el acuífero pertenecen a depósitos sedimentarios del Cuaternario. En términos generales, el reservorio está conformado por una alternancia de capas de gravas, arenas, limos y arcillas, en proporciones variables, que conforman la parte permeable y otra litología caracterizada por rocas tales como esquistos y pizarras que forman la base impermeable del acuífero.
- Se hizo una simplificación del sistema acuífero considerando sólo tres tipos de estratos; permeables, semipermeables e impermeables, tomando en cuenta los tipos de materiales que conforman cada una de las capas.
- Para determinar las propiedades hidráulicas del acuífero, se realizaron interpretaciones de datos obtenidos de las pruebas de bombeo que arrojaron algunos valores puntuales de transmisividad y coeficiente de almacenamiento, así como se pudo estimar los valores de conductividad hidráulica horizontal de acuerdo al tipo de material.
- A través del análisis de las pruebas de bombeo del pozo 5 localizado en la hacienda Don Aurelio, se determinó que la transmisividad del acuífero en dicho lugar es de 124 m²/día, mientras que la conductividad hidráulica es de 3,27 m/día. Aunque no es adecuado tomar decisiones con base en el análisis de una sola prueba de bombeo, los resultados obtenidos permiten clasificar al acuífero como de bajo rendimiento a regular.
- El modelo conceptual desarrollado del acuífero, corresponde a un reservorio conformado por 3 capas, desde el tope (superficie del terreno) hacia la base (sustrato rocoso). Con base en las características litológicas, la primera capa se clasifica como semipermeable, conformada por arcillas y limos, comportándose como acuitardo, mientras que la segunda capa, es

la unidad permeable del acuífero, conformada principalmente de arenas y gravas, y por último la tercera capa corresponde al basamento (Fm. Mamey) y se clasifica de tipo impermeable.

- De acuerdo al mapa piezométrico, se pudo establecer que las isolíneas decrecen hacia la población de Perarapa, lo que indica que la dirección de flujo preferencial va desde el noreste hacia el suroeste, desde las vertientes del valle dentro del cual se encuentra emplazado el acuífero, coincidiendo con el sentido de la pendiente del terreno. Se puede observar que no existen procesos de formación de conos de abatimiento, por lo cual el acuífero no está siendo sobreexplotado.
- Estudiando las muestras de suelo tomadas a lo largo de todo el aluvión, a una profundidad de 1 metro, se clasificaron como arcillas inorgánicas de alta plasticidad y baja compresibilidad indicando condiciones de impermeabilidad, por lo que la infiltración directa por precipitación es limitada. Con esto, se puede interpretar que la recarga del acuífero es mediante flujo subterráneo lateral.
- En relación a las características de la capa superficial del acuífero y al valor de coeficiente de almacenamiento determinado, se puede clasificar al acuífero como del tipo semiconfinado.
- Según el balance hídrico se puede apreciar que, debido a que la evapotranspiración es mayor que la precipitación, no se refleja un almacenamiento de agua por lluvia al acuífero, cosa que es incorrecta, porque significaría que el acuífero no recarga. Por otro lado, se requieren otras variables importantes para conocer dicha recarga.
- A través de la confección del mapa de vulnerabilidad, por medio del método DRASTIC, se lograron visualizar y distinguir las zonas con distintos grados de vulnerabilidad a la contaminación que puede presentar el acuífero. Se

puede establecer que los resultados obtenidos de la modelación son cualitativamente aceptables, sin embargo se evidencia escasez de información y un grado de confiabilidad relativamente bajo en algunos datos, particularmente en lo que refiere a datos de recarga.

- A pesar de que no existe una única metodología recomendable para la evaluación de la vulnerabilidad de los acuíferos a la contaminación, debido a que se pueden obtener diferentes resultados para un mismo acuífero, los sistemas GIS ofrecen herramientas que permiten almacenar gran cantidad de información y procesarla rápidamente. La zona de estudio presenta vulnerabilidades que van de muy bajas a moderadas, considerándose valores aceptables para el acuífero.
- Las zonas más vulnerables están caracterizadas por presentar los niveles estáticos menos profundos, lo que significa una cercanía de la capa freática a la superficie del terreno, ya que cualquier contaminante que se infiltre, tendrá mayor facilidad para alcanzar al acuífero.
- Se establecieron 3 zonas de aprovechamiento del acuífero de acuerdo a su potencial hidráulico, teniendo rangos que van de altas potencialidades a bajas potencialidades. La población de Duaca es el área donde se presentan las mejores condiciones, ya que se encuentran los mayores espesores saturados y las mayores transmisividades.
- A pesar de que la población de Duaca presenta las mejores zonas de aprovechamiento, es importante destacar que es allí donde se consiguen las áreas más vulnerables a la contaminación, por lo que se debe tener un control y un monitoreo de la producción y extracción del recurso hídrico en esa zona.

RECOMENDACIONES

- Es necesaria la actualización de la información referente a los pozos de abastecimiento, tipo de aprovechamiento, ubicación, características y uso del agua extraída.
- Realizar de manera sistemática la toma de lecturas piezométricas mensuales en épocas de lluvia, para tener una mejor comprensión de la evolución piezométrica en la zona y contar con información actual para la realización de balances de aguas subterráneas y determinar la recarga neta del acuífero. Desarrollar un monitoreo sistemático todo el año no solo en épocas de lluvia.
- A pesar de los costos implícitos, es recomendable realizar una red de pozos de monitoreo cerca de los principales centros de producción donde se puedan realizar pruebas de bombeo que permitan determinar con mayor precisión los parámetros hidráulicos.
- Llevar a cabo un estudio hidrogeoquímico para relacionar la calidad del agua con el uso que se le da al recurso, debido a que se cuenta con pocos estudios en la zona, y es de gran importancia conocer la calidad físico-química del agua y más aún cuando es de consumo humano para la población.
- Debido a la fuerte demanda de agua en la zona, es necesario evaluar la disponibilidad futura del recurso hídrico subterráneo y establecer planes de protección en las zonas de recarga y en las zonas de captura de pozos, para así garantizar la calidad y potabilidad del agua, por lo que se recomienda realizar la evaluación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación utilizando una metodología diferente para efectuar una comparación de resultados.

- Integración de la información para elaborar un modelo numérico de flujo subterráneo que permitirá la gestión y buen uso del acuífero.
- La importancia de la descripción de los programas de monitoreo ayuda a mejorar la planeación, desarrollo, protección y manejo de las aguas subterráneas, anticipando o controlando la contaminación y los problemas de degradación de la misma.
- Por último, se recomienda realizar un estudio a profundidad del balance hídrico del área, que permita obtener un valor más preciso sobre la recarga neta del acuífero, y de esta manera compararla con el volumen de agua extraído. Esta recarga puede ser determinada mediante el uso de trazadores.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Aller, L., Benett, T., Lehr, J. y Petty R.J. (1987). “*A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings*”. U.S. EPA, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Office of Research and Development.

ASTM D 4318. (2008). “Determinación del Límite Plástico”. Universidad Técnica Particular de Loja, Unidad de Ingeniería Civil, Geología y Minas, Loja, Ecuador.

Audemard, F. et al (1998). “Estudio de neotectónica y geología de fallas activas del triángulo de fallas de Boconó, Oca – Acón y Valera”. Informe Final. FUNVISIS. Caracas, Venezuela.

Auge, M. (2004). “Vulnerabilidad de acuíferos, Conceptos y Métodos”. Universidad de Buenos Aires, La Plata.

Barboza, M., Dura, P. y Tapia, J. (2010). “Taller 1. Polvorines, Acuífero, Ventilación”. Universidad de Antofagasta, Chile.

Bello, M. y Pino, M. (2000). “Medición de presión y caudal”. Instituto de Investigaciones agropecuarias. Comisión Nacional de Riego, Chile.

Bellizzia, A. y Rodríguez, D. (1966 – 1967). “Guía de excursión a la región de Duaca – Barquisimeto – Bobare”. Boletín de Geología, volumen III, número 16, Editorial Sucre. Caracas, Venezuela.

Blyth, F. y Freitas, M. (2000). “Geología para ingenieros”. Compañía Editorial Continental. Séptima reimpresión. México.

Braja, D. (2001). “Principios de Ingeniería de Cimentaciones”. México D.F., México: International Thomson Editors.

- Bushman, J. R.** (1959). “*Geology of the Barquisimeto Area. A summary report*”. Boletín informativo de la Asociación Venezolana de Geología y Minas. Caracas, Venezuela.
- Castany, G.** (1975). “*Prospección y Explotación de Aguas Subterráneas*”. Ediciones Omega, Barcelona.
- Casteletti, J. I.** (1996). “*Nociones de Mecánica de Suelos*”. Universidad de Los Andes, Facultad de Ingeniería, Mérida, Venezuela
- Chiodi, V.** (2014). “*Análisis de vulnerabilidad ambiental del acuífero de la laguna de Llancanelo, en el área del bloque de concesión Llancanelo*”. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Clarke, R y King, J.** (2004). “*The water atlas*”. New Press, Nueva York, Estados Unidos.
- Conde, E. Narváez, C. y Sanz, J.** (2000). “*Evaluación potencial del acuífero ubicado entre las poblaciones Duaca – El Eneal del Municipio Crespo, estado Lara, con fines de abastecimiento urbano*”. Universidad Católica Lisandro Alvarado. Barquisimeto.
- Custodio, E. y Llamas, M.** (1996). “*Hidrología Subterránea*”. Ediciones Omega S.A. Barcelona, España.
- Decarli, F.** (2009). “*Aguas Subterráneas en Venezuela*”. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología.
- Dugarte, J.** (2012). “*Propuestas para solucionar la problemática del agua en la población de Duaca – El Eneal*”. Municipio Crespo, estado Lara.

- Durán, D. y Lobo, C.** (2004). "Evaluación hidrogeológica de las reservas de Agua Subterránea del acuífero de los Llanos de Calabozo, estado Guárico, con el apoyo de técnicas nucleares". Universidad de Los Andes.
- Duque, M.** (2011). "Caracterización de los sedimentos en Duaca, Tamaca, Carora, Quíbor y El Tocuyo, estado Lara, aplicando el método ReMi". Universidad Simón Bolívar, Caracas, Venezuela.
- Figuera, M.** (2005). "Estudio geográfico para el aprovechamiento con fines de riego del sistema de acuíferos del río Táchira, en la región San Antonio Ureña", estado Táchira. Universidad Central de Venezuela, Caracas.
- Freeze, R.A. y Cherry, J. A.,** (1980). "*Groundwater*". Prentice Hall, Inc., New Jersey.
- García, A.** (2012). "Caracterización hidrogeológica de un sector del acuífero del Valle de Iguala, Guerrero". Universidad Nacional Autónoma de México", México D.F.
- García, M. y Arellano, F.** (2012). "Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Nimboyores, Guanacaste, Costa Rica". Sistema de estudios de posgrados, Universidad de Costa Rica, San José.
- Gómez, M.** (2013). "Evaluación del recurso hídrico subterráneo en el Eje Duaca, El Eneal, Perarapa, Municipio Crespo, estado Lara". Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- González De J., C.; Iturralde De A, J. y Picar, X.,** (1980). "Geología de Venezuela y sus Cuencas Petrolíferas". Ediciones FONINVES, Tomos I y II. Caracas, Venezuela.
- González de V., L., Ferrer, M., Ortuño, L., Oteo C.** (2002). "Ingeniería Geológica". Editorial Pearson Prentice Hall. Madrid, España.

- Instituto Geográfico Venezolano Simón Bolívar, IGVS** (2010). Acuíferos en vías de agotamiento. Caracas, Venezuela.
- Instituto Técnico Geominero de España.** (1992). “Área nº 1: Hidrología Básica Aplicada del II Master en Tecnología Hidrogeológica”. Tomo nº 2. Madrid
- Johnson, S.** (1975). “El agua subterránea y los pozos”. *Wheelabrator Clean Water Inc.* Primera Edición.
- Juárez Badillo, E., & Rico Rodríguez, A.** (2005). “Mecánica de Suelos. Fundamentos de la Mecánica de suelos (Vol. I)”. México: Limusa.
- Keith, H., Willis, W. y Robert, S.** (2006). “*Interpretation of Transmissivity estimates from single-well pumping aquifer tests; Groundwater*”. Nota Técnica, Universidad de Montana, Missoula.
- Kruseman, G. y De Ridder, N.** (1975). “Análisis y Evaluación de los Datos de Ensayos de Bombeo”. Boletín No. 11 del *International Institute for Land Reclamation and Improvement Wageningen*. Primera edición en español. Holanda
- Landaeta, Y.** (2009). “Análisis de la disponibilidad del recurso hídrico con fines de aprovechamiento urbano en el eje Duaca-el Eneal, municipio Crespo, estado Lara”. Instituto Universitario de Tecnología Antonio José de Sucre, Barquisimeto, Venezuela.
- Lambe, T. W., y Whitman, R. V.** (2006). “Mecánica de Suelos”. México: Limusa.
- Léxico Estratigráfico de Venezuela** (1997). Tercera Edición, Caracas, Venezuela.

Martínez, L. y Zerpa, G. (2010). "Evaluación hidrogeológica de las reservas de agua subterránea del acuífero del Valle de Quíbor, estado Lara". INAMEH. Caracas, Venezuela.

Mejías, J., Jégat, H., Mora L. y Linares, M. (2010). "Modelo hidrogeológico conceptual para la evaluación del acuífero de la planicie aluvial del río Motatán (Venezuela)". Revista Geográfica Venezolana, Vol. 52.

Ministerio de Minas e Hidrocarburos (1976). "Mapa geológico e hidrogeológico de Venezuela". Dirección de Geología, División de Hidrogeología, Caracas, Venezuela, Hoja NC IV Maracaibo.

Mora, J. (2006). "Evaluación del acuífero comprendido entre los ríos Masparro y Boconó en el estado Barinas". Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.

Pérez, A y Rodríguez, T. (2005). "Evaluación de la disponibilidad del recurso de agua subterránea en la población de Duaca, estado Lara". Universidad de los Andes, Mérida, Venezuela.

Pérez, J. (1976). "Fundamentos del Ciclo Hidrológico" Universidad Central de Venezuela. Caracas.

Quiñonez, E. y Dal Pozzo, F. (2008). "Distribución espacial del riesgo de degradación de los suelos por erosión hídrica en el estado Lara, Venezuela". Universidad de Los Andes. Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial, CIDIAT – ULA. Instituto de Geografía y Conservación de Recursos Naturales, IGCRN – ULA. Mérida.

- Renz, O. y Short, K.C.** (1955). "Guía de la excursión C-8. Andes nororientales. Barquisimeto, estado Lara". III Congreso Geológico Venezolano, Ministerio de Minas e Hidrocarburos. Caracas, Venezuela.
- Rebollo, L.** (2000). "Balance hídrico de un sistema acuífero". Departamento de Geología. Universidad de Alcalá. Madrid, España.
- Rojas, H.** (2011). "Creación de un modelo conceptual hidrogeológico", grupo de estudios de aguas subterráneas, Universidad Nacional de Colombia, Palmar, Colombia.
- Rojas, M.** (2003). "Modelo Hidrogeológico del acuífero de la cuenca baja del río Motatán, estado Trujillo". Universidad de Los Andes. Mérida, Venezuela.
- Sánchez, K.** (2007). "Disponibilidad de agua subterránea en la cuenca de la quebrada La Virgen, Los Teques, estado Miranda". Universidad de Los Andes, Mérida, Venezuela.
- Sánchez, J.** (2013). "Hidrogeología: Conceptos Fundamentales". Departamento de Geología. Universidad de Salamanca. España.
- Sanders, L.** (1998). "*A manual of field hydrogeology*". Prentice-Hall.
- Suárez, J.** (2005). "Caracterización climática del estado Lara". Departamento de Hidrología y Meteorología, Dirección estatal Ambiental Lara. Venezuela.
- Sowers, G. B., y Sowers, G. F.** (1972). "Introducción a la Mecánica de Suelos y Cimentaciones". México, D. F. , México : Limusa-Wiley.
- Shagam, R.** (1972). "Evolución tectónica de los andes venezolanos". IV Congreso Geológico Venezolano. Caracas, Venezuela.

- Theis, C.** (1935). “*The relation between the lowering of the piezometric surface and the rate and duration of discharge of a well using groundwater storage*”. *Transacciones de la Unión Americana de Geofísica., Revista. Estados Unidos.*
- Urbanis, F.** (2006). “Mapa geológico de Venezuela”. Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) y la Escuela de Geología, Minas y Geofísica de la Universidad Central de Venezuela (UCV). Caracas, Venezuela.
- Villanueva, M. e Iglesias, A.** (1989). “Pozos y Acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo”. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid.

www.bdigital.ula.ve

REFERENCIAS ELECTRÓNICAS

Arias, M. (2002). "Taller, Protección de acuíferos frente a la contaminación: Caracterización y evaluación". Revisado el 25 de abril de 2014. <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/marioa.html>

Bear, J. (1979). "*Hydraulics of Groundwater*". Revisado el 20 de febrero de 2014. http://books.google.co.ve/books/about/Hydraulics_of_groundwater.html?id=N-pOAAAAMAAJ&redir_esc=y

Comerma, J.A. (1971). "La 7ª Aproximación y los Suelos Venezolanos". Revisado el 20 de Mayo de 2014. http://sian.inia.gob.ve/repositorio/revistas_ci/Agronomia%20Tropical/at2105/arti/comerma_j.htm

Construmática. (2008). "Construpedia". Revisado el 2 de Junio de 2013, de Ensayo de Suelos: <http://www.construmatica.com/construpedia/Archivo-Euroado-quinfoto82.jpg>

Fonseca, F. (2013). "Aplicación de algebra de mapas en la elaboración de un mapa de susceptibilidad de acuíferos por el método DRASTIC, usando ArcGIS 10.1". Revisado el 16 de Mayo de 2014. <http://fnsck.blogspot.com/2013/04/aplicacion-del-algebra-de-mapas-en-la.html>

García, M. y Arellano, F. (2012). "Modelo hidrogeológico conceptual del acuífero Nimboyes, Costa Rica". Revisado el 6 de marzo de 2014. http://www.scielo.sa.cr/scielo.php?pid=S02560242012000200008&script=sci_arttext

Gomez, K., Jaramillo, D., y Monsalve, S. (2010). "Mecanica de Suelos, ensayos". Revisado el 2 de Junio de 2013, de Estudio de Suelos del Parque-

Biblioteca Doce de Octubre: <http://geonajar.com/ingenieria/MECANICA%20DE%20SUELOS.htm>

Instituto Geológico y Minero de España (2001). “Redes de Flujo y Piezometría”. Revisado el 5 de Marzo de 2014. http://www.igme.es/internet/zonas_humedas/laguna/medio_fisico/ev_piezo_lib99/pdf/lib99/in_05.html

León A., y Quintana, G. (2008). “Propuesta de aprovechamiento sustentable del recurso hídrico, Municipio Juan Antonio Sotillo, estado Anzoátegui”. Revisado del 20 de marzo de 2014. http://www.lmmeteoven.org/archivos/tesis_gabriela.html

Lohman, S. H. (1975) “*Ground-Water Hydraulics*”. Revisado el 20 de febrero de 2014. <http://pubs.usgs.gov/pp/0708/report>

Montes, J. (2008). “Recursos Hidrogeológicos”. Revisado el 7 de marzo de 2014. http://jugimo.blogspot.com/2008/09/1-recursos-hidrogeolgicos_23.html

Universidad de Sonora (2004). “Hidroestratigrafía del acuífero del Valle del Río Yaqui, Sonora”. Revisado el 10 de marzo de 2014. <http://tesis.uson.mx/digital/tesis/docs/18919/Capitulo4.pdf>

Vegas, F. y Álvarez, C. (2010). “Estimación de las propiedades hidráulicas del acuífero superficial en cuencas húmedas de montaña”. Revisado el 28 de mayo. <http://www.zonanosaturada.com/zns11/publications/p275>

Villegas, Y. (2011). “Determinación de la vulnerabilidad de un acuífero a través del método DRASTIC utilizando ArcGIS 9.3”. (www.aguaysig.com).

ANEXOS

www.bdigital.ula.ve

ANEXO A.

A.1. Planilla de Inventario de Aguas Subterráneas utilizada por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGÍA E HIDROLOGÍA									
GERENCIA DE REDES HIDROMETEOROLÓGICAS									
COORDINACIÓN DE HIDROLOGÍA SUBTERRÁNEA									
PLANILLA DE INVENTARIO DE AGUAS SUBTERRÁNEAS									
A) DATOS DE UBICACIÓN:				HOJA CARTOGRÁFICA		COORDENADAS		HOJA	GPS
IDENTIFICACIÓN	FECHA DE INVENTARIO	1 : 5.000		GEOG. LAT:	00° 00' 00"	LONG:	00° 00' 00"		
		1 : 25.000		U.T.M. N:		E:			
ESTADO	LUGAR O SITIO			B) DATOS DE CONSTRUCCIÓN:					
PROPIETARIO O USUARIO				ELEVACIÓN: _____ m. (CARTA)					
				TEMPERATURA: _____ °C					
CROQUIS DE UBICACIÓN				FECHA DE CONSTRUCCIÓN: _____ COMPAÑÍA: _____ DIRECCIÓN: _____ TELÉFONO O FAX _____ N° ORIGINAL: _____ N° MODIFICADO: _____ FECHA: ____ / ____ / ____ PROFUNDIDAD DEL POZO: _____ m. PERFORADA: _____ m. DIÁMETRO: _____" ENTUBADA: _____ m. DIÁMETRO: _____" C) DATOS COMPLEMENTARIOS: PERTENECE A LA RED: SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> TIENE PLACA DE IDENTIFICACIÓN: SI <input type="checkbox"/> NO <input type="checkbox"/> N°: _____ ESTADO ACTUAL DEL POZO: ACTIVO <input type="checkbox"/> DERRUMBADO <input type="checkbox"/> TIEMPO SIN FUNCIONAR: _____ MOTIVO: _____ USO DEL AGUA: DOMESTICO: _____ URBANO: _____ COMERCIAL: _____ AGRICOLA: _____					
				N					
				D) DATOS DE MEDICIÓN:					
		N I V E L E S							
		ESTÁTICO	DINÁMICO	CAUDAL l/s	FECHA				
INFORMACIÓN DE CAMPO		m.	m.						
INFORMACIÓN VERBAL		m.	m.						
UBICACIÓN DE LOS FILTROS									
1		2		3					
DESDE	HASTA	DESDE	HASTA	DESDE	HASTA	DESDE	HASTA	DESDE	HASTA

ANEXO B. Pruebas de Bombeo

B.1. Valores de nivel dinámico, tiempo y abatimiento del pozo 5 obtenidos del *AquiferTest*.

 Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica Estado Mérida UNIVERSIDAD DE LOS ANDES		Pumping Test - Water Level Data		Page 1 of 5
		Project: Don Aurelio		
		Number: 7		
		Client: ULA - INAMEH		
Location: Duaca, Mpio. Crespo, Edo. Lara		Pumping Test: Pumping Test 1		Pumping well: Don Aurelio Recup. 9h
Test conducted by: Alba Bermúdez		Test date: 10/03/2014		Discharge: variable, average rate 2.4906 [l/s]
Observation well: Don Aurelio Recup. 9h		Static water level [m]: 20,50		Radial distance to PW [m]: -
	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]	
1	19200	25,65	5,15	
2	19260	25,64	5,14	
3	19320	25,62	5,12	
4	19380	25,63	5,13	
5	19440	25,64	5,14	
6	19500	25,64	5,14	
7	19560	25,62	5,12	
8	19620	25,62	5,12	
9	19680	25,62	5,12	
10	19740	25,62	5,12	
11	19800	25,63	5,13	
12	19860	25,62	5,12	
13	19920	25,63	5,13	
14	19980	25,63	5,13	
15	20040	25,63	5,13	
16	20100	25,63	5,13	
17	20160	25,62	5,12	
18	20220	25,63	5,13	
19	20280	25,63	5,13	
20	20340	25,63	5,13	
21	20400	25,62	5,12	
22	20460	25,62	5,12	
23	20520	25,61	5,11	
24	20580	25,61	5,11	
25	20640	25,61	5,11	
26	20700	25,61	5,11	
27	20760	25,61	5,11	
28	20820	25,61	5,11	
29	20880	25,61	5,11	
30	20940	25,61	5,11	
31	21000	25,62	5,12	
32	21060	25,63	5,13	
33	21120	25,63	5,13	
34	21180	25,63	5,13	
35	21240	25,63	5,13	
36	21300	25,63	5,13	
37	21360	25,62	5,12	
38	21420	25,62	5,12	
39	21480	25,62	5,12	
40	21540	25,61	5,11	
41	21600	25,61	5,11	
42	21660	25,61	5,11	
43	21720	25,61	5,11	
44	21780	25,60	5,10	
45	21840	25,60	5,10	
46	21900	25,62	5,12	
47	21960	25,61	5,11	

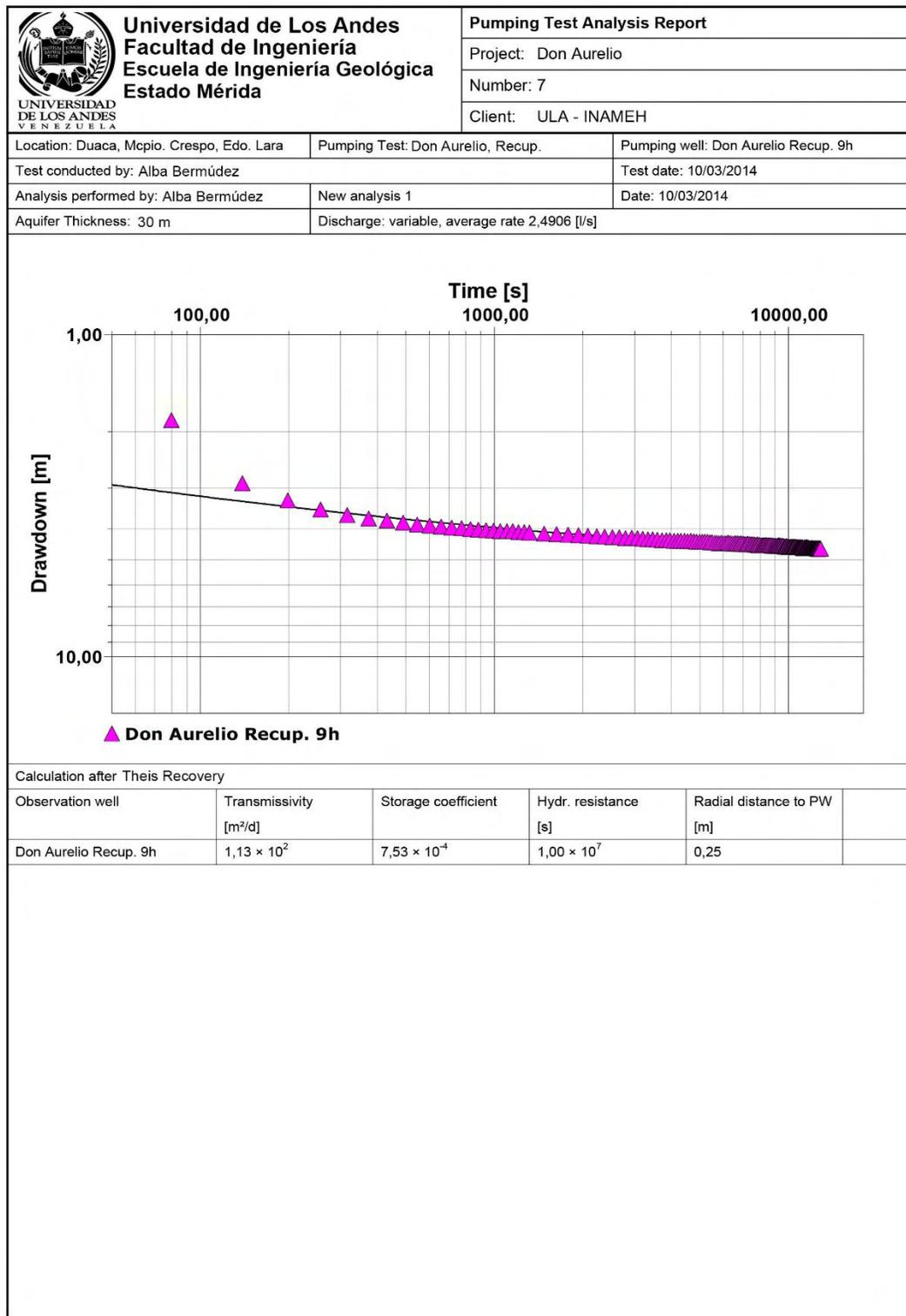
 Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica Estado Mérida UNIVERSIDAD DE LOS ANDES		Pumping Test - Water Level Data Page 2 of 5	
		Project: Don Aurelio	
		Number: 7	
		Client: ULA - INAMEH	
	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
48	22020	25.60	5.10
49	22080	23.77	3.27
50	22140	22.72	2.22
51	22200	22.34	1.84
52	22260	22.12	1.62
53	22320	21.98	1.48
54	22380	21.89	1.39
55	22440	21.83	1.33
56	22500	21.78	1.28
57	22560	21.73	1.23
58	22620	21.70	1.20
59	22680	21.66	1.16
60	22740	21.64	1.14
61	22800	21.62	1.12
62	22860	21.59	1.09
63	22920	21.58	1.08
64	22980	21.57	1.07
65	23040	21.55	1.05
66	23100	21.54	1.04
67	23160	21.54	1.04
68	23220	21.53	1.03
69	23280	21.51	1.01
70	23340	21.50	1.00
71	23400	21.49	0.99
72	23580	21.46	0.96
73	23760	21.45	0.95
74	23940	21.43	0.93
75	24120	21.41	0.91
76	24300	21.40	0.90
77	24480	21.38	0.88
78	24660	21.37	0.87
79	24840	21.36	0.86
80	25020	21.35	0.85
81	25200	21.33	0.83
82	25380	21.34	0.84
83	25560	21.32	0.82
84	25740	21.31	0.81
85	25920	21.30	0.80
86	26100	21.30	0.80
87	26280	21.28	0.78
88	26460	21.27	0.77
89	26640	21.27	0.77
90	26820	21.26	0.76
91	27000	21.25	0.75
92	27180	21.25	0.75
93	27360	21.25	0.75
94	27540	21.24	0.74
95	27720	21.23	0.73
96	27900	21.24	0.74
97	28080	21.23	0.73
98	28260	21.22	0.72
99	28440	21.22	0.72

 Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica Estado Mérida UNIVERSIDAD DE LOS ANDES		Pumping Test - Water Level Data Page 3 of 5	
		Project: Don Aurelio	
		Number: 7	
		Client: ULA - INAMEH	
	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
100	28620	21,21	0,71
101	28800	21,22	0,72
102	28980	21,21	0,71
103	29160	21,20	0,70
104	29340	21,20	0,70
105	29520	21,19	0,69
106	29700	21,18	0,68
107	29880	21,17	0,67
108	30060	21,18	0,68
109	30240	21,17	0,67
110	30420	21,17	0,67
111	30600	21,18	0,68
112	30780	21,18	0,68
113	30960	21,16	0,66
114	31140	21,15	0,65
115	31320	21,17	0,67
116	31500	21,16	0,66
117	31680	21,16	0,66
118	31860	21,15	0,65
119	32040	21,16	0,66
120	32220	21,15	0,65
121	32400	21,15	0,65
122	32580	21,13	0,63
123	32760	21,15	0,65
124	32940	21,15	0,65
125	33120	21,13	0,63
126	33300	21,13	0,63
127	33480	21,14	0,64
128	33660	21,13	0,63
129	33840	21,12	0,62
130	34020	21,12	0,62
131	34200	21,14	0,64
132	34380	21,11	0,61
133	34560	21,12	0,62
134	34740	21,11	0,61
135	34920	21,11	0,61
136	35100	21,10	0,60
137	35280	21,11	0,61
138	35460	21,12	0,62
139	35640	21,11	0,61
140	35820	21,10	0,60
141	36000	21,10	0,60
142	36180	21,11	0,61
143	36360	21,10	0,60
144	36540	21,09	0,59
145	36720	21,10	0,60
146	36900	21,09	0,59
147	37080	21,09	0,59
148	37260	21,09	0,59
149	37440	21,09	0,59
150	37620	21,08	0,58
151	37800	21,08	0,58

 Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica Estado Mérida UNIVERSIDAD DE LOS ANDES		Pumping Test - Water Level Data Page 4 of 5	
		Project: Don Aurelio	
		Number: 7	
		Client: ULA - INAMEH	
	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
152	37980	21,10	0,60
153	38160	21,10	0,60
154	38340	21,09	0,59
155	38520	21,08	0,58
156	38700	21,08	0,58
157	38880	21,08	0,58
158	39060	21,08	0,58
159	39240	21,07	0,57
160	39420	21,06	0,56
161	39600	21,07	0,57
162	39780	21,07	0,57
163	39960	21,07	0,57
164	40140	21,06	0,56
165	40320	21,06	0,56
166	40500	21,06	0,56
167	40680	21,06	0,56
168	40860	21,06	0,56
169	41040	21,06	0,56
170	41220	21,06	0,56
171	41400	21,06	0,56
172	41580	21,05	0,55
173	41760	21,05	0,55
174	41940	21,05	0,55
175	42120	21,05	0,55
176	42300	21,05	0,55
177	42480	21,05	0,55
178	42660	21,04	0,54
179	42840	21,05	0,55
180	43020	21,04	0,54
181	43200	21,04	0,54
182	43380	21,04	0,54
183	43560	21,04	0,54
184	43740	21,04	0,54
185	43920	21,04	0,54
186	44100	21,04	0,54
187	44280	21,03	0,53
188	44460	21,04	0,54
189	44640	21,03	0,53
190	44820	21,02	0,52
191	45000	21,01	0,51
192	45180	21,02	0,52
193	45360	21,03	0,53
194	45540	21,02	0,52
195	45720	21,02	0,52
196	45900	21,03	0,53
197	46080	21,03	0,53
198	46260	21,03	0,53
199	46440	21,04	0,54
200	46620	21,02	0,52
201	46800	21,02	0,52
202	46980	21,02	0,52
203	47160	21,02	0,52

 Universidad de Los Andes Facultad de Ingeniería Escuela de Ingeniería Geológica Estado Mérida UNIVERSIDAD DE LOS ANDES		Pumping Test - Water Level Data Page 5 of 5	
		Project: Don Aurelio	
		Number: 7	
		Client: ULA - INAMEH	
	Time [s]	Water Level [m]	Drawdown [m]
204	47340	21,01	0,51
205	47520	21,01	0,51
206	47700	21,01	0,51
207	47880	21,01	0,51
208	48060	21,01	0,51
209	48240	21,01	0,51
210	48420	21,02	0,52
211	48600	21,01	0,51
212	48780	21,00	0,50
213	48960	21,00	0,50
214	49140	21,01	0,51
215	49320	21,00	0,50
216	49500	21,00	0,50
217	49680	21,01	0,51
218	49860	21,00	0,50
219	50040	21,01	0,51
220	50220	21,00	0,50
221	50400	21,00	0,50
222	50580	21,00	0,50
223	50760	21,00	0,50
224	50940	20,99	0,49
225	51120	21,00	0,50
226	51300	20,99	0,49
227	51480	20,99	0,49
228	51660	21,01	0,51
229	51840	20,99	0,49
230	52020	21,00	0,50
231	52200	21,00	0,50
232	52380	20,99	0,49
233	52560	20,99	0,49
234	52740	21,00	0,50
235	52920	20,99	0,49

B.2. Gráfico Prueba de Recuperación, tiempo vs abatimiento para el pozo 5 arrojado por el *AquiferTest*.



ANEXO C. Modelo Conceptual

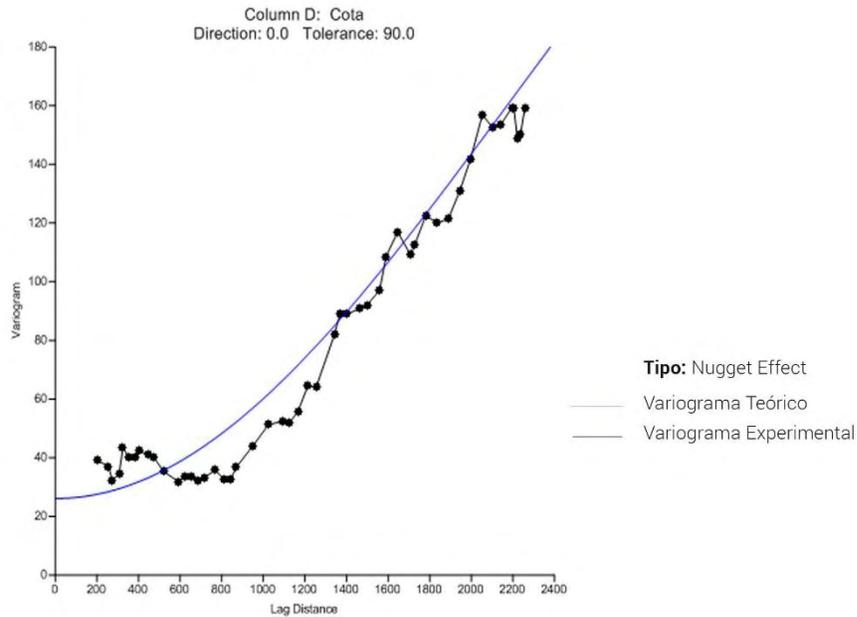
C.1. Litología usada para construir el modelo hidrogeológico conceptual.

Pozo	Tope (m)	Base (m)	Litología	ESTE	NORTE	COTA (msnm)
P4	0	0.9	Capa Vegetal	483179	1136746	734
	0.9	15	Arcilla			
	15	42	Gravas Arenosas			
	42	52	Esquistos Pizarrosos			
P5	0	0.7	Capa Vegetal	482994	1136842	735
	0.7	13	Arcilla			
	13	29	Gravas Arenosas			
	29	42	Esquistos Pizarrosos			
P6	0	0.5	Capa Vegetal	483065	1136369	732
	0.5	8	Arcilla			
	8	25	Gravas Arenosas			
	25	35	Arcilla Limosa			
	35	61	Gravas Arenosas			
P7	0	0.9	Capa Vegetal	482457	1136484	725
	0.9	9	Arcilla			
	9	29	Gravas Arenosas			
	29	36	Arcilla Limosas			
	36	62	Gravas Arenosas			
	62	68	Esquistos Pizarrosos			
P8	0	0.8	Capa Vegetal	482721	1136709	721
	0.9	15	Arcilla			
	15	25	Gravas Arenosas			
	25	30	Arcilla Limosa			
	30	43	Gravas Arenosas			
	43	53	Esquistos			
P9	0	0.6	Capa Vegetal	482651	1136606	728
	0.6	8	Arcilla			
	8	29	Gravas Arenosas			
	29	34	Arcilla Limosas			
	34	62	Gravas Arenosas			
	62	67	Esquistos Pizarrosos			
P10 (Vacío)	0	0.81	Capa Vegetal	482311	1136372	722
	0.81	7	Arcilla			
	7	28	Gravas Arenosas			
	28	32	Arcilla Limosas			
	32	66	Gravas Arenosas			
	66	72	Esquistos Pizarrosos			
P11	0	0.9	Capa Vegetal	483054	1136016	724

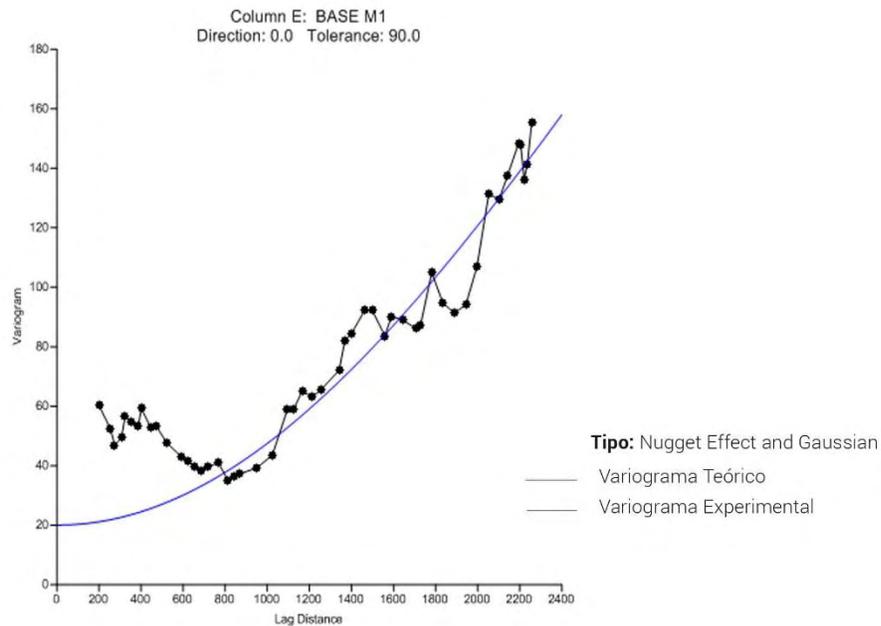
	0.9	6	Arcilla			
	6	17	Grava Arenas			
	17	28	Arcilla Limosa			
	28	56	Grava Arenosa			
P12	0	0.7	Capa Vegetal	482377	1135875	718
	0.7	8	Arcilla			
	8	15	Grava Arenas			
	15	26	Arcilla			
P13	26	47	Grava Arena	481699	1135575	709
	0	0.9	Capa Vegetal			
	0.9	5.8	Arcilla			
	5.8	23	Arcilla Limosa			
P14	23	42	Grava Arena	482066	1135715	718
	0	0.9	Capa Vegetal			
	0.9	5	Arcilla			
	5	15	Grava Arena			
P15	15	32	Arcilla	481864	1135927	715
	32	65	Grava Arena			
	0	0.7	Capa Vegetal			
	0.7	5	Arcilla			
P16	5	13	Grava Arenosa	481773	1136214	719
	13	27	Arcilla			
	27	53	Grava Arenosa			
	0	0.6	Capa Vegetal			
P17	0.6	20	Arcilla	481130	1136080	714
	20	43	Grava Arenosa			
	0	0.9	Capa Vegetal			
	0.9	8.5	Arcilla Limosa			
P18	8.5	24	Grava Arenosa	481455	1135381	714
	24	55	Arcilla Limosa			
	0	0.8	Capa Vegetal			
	0.8	6	Arcilla			
P19	6	22	Arcilla Limosa	481327	1135628	714
	22	39	Grava Arena			
	0	0.6	Capa Vegetal			
	0.6	5	Arcilla			
P20	5	21	Arcilla Limosa	479881	1134958	704
	21	42	Grava Arena			
	0	0.92	Capa Vegetal			
	0.92	10	Arcilla			
P21	10	40	Arena Grava	480119	1134588	694
	40	65	Arcilla Arenosa			
	65	75	Esquistos Pizarrosos			
P21	0	0.75	Capa Vegetal	480119	1134588	694
	0.75	8	Arcilla			

	8	18	Grava Arenosa			
	18	47	Arcilla Arenosa			
	47	55	Esquistos Pizarrosos			
P22	0	0.8	Capa Vegetal	478020	1132290	658
	0.8	10	Arcilla			
	10	44	Grava Arenosa			
	44	50	Esquistos Pizarrosos			
P23	0	0.73	Capa Vegetal	477489	1132539	678
	0.73	12	Arcilla			
	12	48	Grava Arena			
	48	60	Esquistos Pizarrosos			
P24	0	0.8	Capa Vegetal	478269	1132341	676
	0.8	8.5	Arcilla			
	8.5	33	Grava Arenosa			
	33	50	Arcilla Limosas			
	50	56	Esquistos			
P25	0	0.9	Capa Vegetal	479475	1134657	706
	0.9	6	Arcilla			
	6	15	Grava Arenosa			
	15	27	Arcilla Arenosa			
	27	54	Esquistos Pizarrosos			
P26	0	0.9	Capa Vegetal	479451	1134368	701
	0.9	7	Arcilla			
	7	13	Grava Arenosa			
	13	34	Arcilla Arenosa			
	34	45	Esquisto Pizarroso			
P27	0	0.7	Capa Vegetal	479261	1134155	686
	0.7	6	Arcilla			
	6	12	Grava Arenosa			
	12	31	Arcilla Arenosa			
	31	42	Esquisto Pizarroso			
P28	0	0.81	Capa Vegetal	482045	1135185	720
	0.81	5	Arcilla			
	5	15	Grava Arenosa			
	15	27	Arcilla			
	27	53	Grava Arenosa			
P29	0	0.9	Capa Vegetal	479091	1134499	683
	0.9	9	Arcilla			
	9	15	Grava Arena			
	15	42	Arcilla Arenosa			
	42	55	Esquistos Pizarrosos			

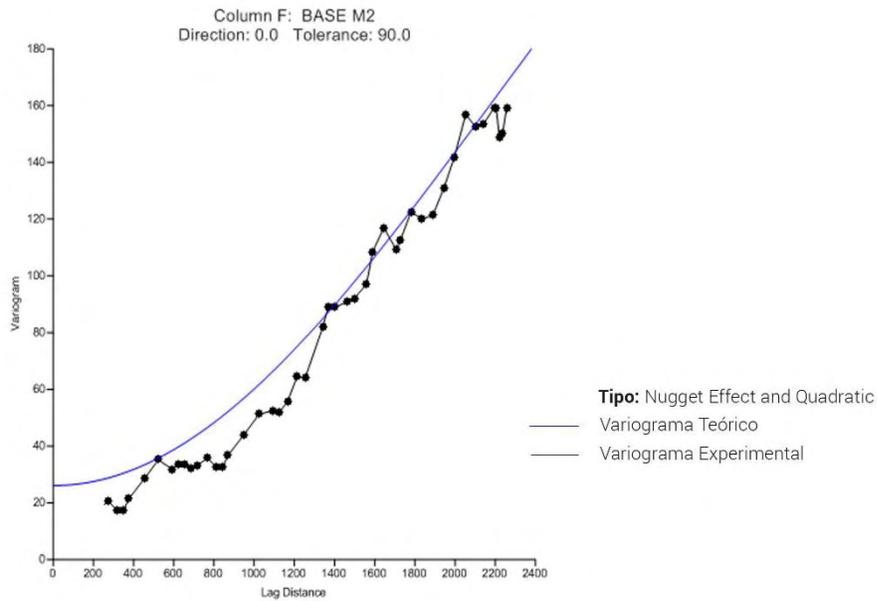
C.2. Variograma obtenido de la superficie del terreno (Unidad 1).



C.2. Variograma obtenido para la Unidad 2.



C.3. Variograma obtenido para la Unidad 3.



C.4. Variograma obtenido para la Unidad 4.

