

GB656.2
M33R8

**DEFINICIÓN DEL RADIO DE INTERFERENCIA COMO CRITERIO HIDROGEOLÓGICO
PARA LA GESTIÓN DEL ACUÍFERO DE QUÍBOR**

Por:

DARIELA RUIZ CALDERÓN

Trabajo de grado para optar al título de Magister Scientiae en Desarrollo de los Recursos Aguas y
Tierras mención Planificación y Desarrollo de Recursos Hidráulicos

www.bdigital.ula.ve

CENTRO INTERAMERICANO DE DESARROLLO
E INVESTIGACIÓN AMBIENTAL Y TERRITORIAL
UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
MÉRIDA – VENEZUELA
Mayo, 2014

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY - NC - SA 3.0 VE)

DEDICATORIA

A José Vicente, amado esposo y fiel compañero de todos mis sueños, mi vida y batallas, por ayudarme a derrotar algunos de mis miedos y sacar de mí la valentía para seguir siempre hacia adelante.

A mis futuras generaciones, porque muchos de mis éxitos van en gran medida encaminados a poder ser un orgullo para ustedes y que me consideren su mentora.

A la felicidad por ser uno de los mayores motores en mi camino por la Tierra.

www.bdigital.ula.ve

AGRADECIMIENTOS

A la energía creadora de todo cuando somos capaces de experimentar, Dios, por colocar este reto en mi camino para ayudar a mi espíritu a crecer, a mi mente a pensar y a mi corazón a sentir.

A José Vicente por su amor, con el que logra convertir cada instante en felicidad y prosperidad. Y por ser la persona que mas me motiva a aprender cada día, sus exigencias y reflexiones son el alimento para mi intelecto. Gracias por ese hermoso equilibrio entre lo racional y lo emocional.

A mi mamá, mis hermanas, cuñados, sobrinos, papá, tíos, suegros y amiga entrañables (Waiki, More y Au) por preguntar siempre cómo va el postgrado y motivarme con sus anécdotas a persistir en la culminación de esta meta.

A mis compañeros del postgrado sobre todo a Mariana y Hanzer, además de colegas amigos muy valiosos.

A la Profesora Ángela por su incuantificable paciencia y por la disposición que ha tenido de corregir con lupa todos mis capítulos y llevarlos de palabras desordenadas a ideas con cuerpo. Por incentivar-me a mejorar con cada corrección.

A los profesores Luis Mora y Hervé Jegat por ser mis tutores y regalarme un poco de su extenso conocimiento.

Al CIDIAT y todo su personal por prestar siempre una atención amable y amistosa. Por abrirme las puertas del postgrado de Planificación.

Al CEP y al CDCHT por su apoyo económico en las distintas actividades y momentos de este postgrado.

ÍNDICE

DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTOS.....	vii
LISTA DE TABLAS	xxiii
LISTA DE FIGURAS.....	xxiii
LISTA DE ECUACIONES	xxiii
RESUMEN.....	xxiii
INTRODUCCIÓN.....	xxv
CAPITULO 1.....	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Justificación:.....	2
1.3. Alcance y limitaciones:.....	2
1.4. Objetivos:.....	3
1.4.1. Objetivo general:	3
1.4.2. Objetivos específicos:.....	3
CAPITULO 2.....	5
MARCO TEÓRICO	5
2.1 Bases teóricas:.....	5
2.1.1 Acuíferos:	5
2.1.1.1 Tipos de acuíferos:	6
2.1.2 Interferencia de los pozos:.....	12
2.1.3 Radio de interferencia:.....	14
2.1.4 Parámetros hidráulicos de un acuífero:.....	17
2.1.4.1. Permeabilidad o conductividad hidráulica:	18
2.1.4.2. Transmisividad hidráulica:	18
2.1.4.4. Capacidad específica:	20
2.1.4.5. Determinación de la constante c de la ecuación 3.6:	21
2.1.4.6. Coeficiente de almacenamiento:.....	22
2.1.5. Análisis geoestadístico empleado en la investigación:.....	24
2.1.5.1. Geoestadística:.....	24
2.1.5.2. Variable regionalizada:	26

2.1.5.3. Regionalización de las variables:.....	26
2.1.6. Bombas:.....	39
2.1.7. Curva característica de una bomba:.....	39
2.2. Revisión de los estudios realizados en el Valle de Quíbor en relación al aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero de Quíbor:	43
2.2.1. El Valle de Quíbor:	43
2.2.2. Estudios relacionados al radio de interferencia entre pozos:	54
2.2.2.1. Estudios relacionados en Latinoamérica:	54
2.2.2.2. Estudios relacionados en el Valle de Quíbor:	63
CAPITULO 3	65
METODOLOGÍA.....	65
3.1. Etapa I: Recopilación y evaluación de información existente:.....	65
3.2. Etapa II: Reconocimiento en campo:.....	66
3.3 Etapa III: Actividades de oficina:.....	66
DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.....	67
4.1 Ubicación espacial:	67
4.2. Aspectos Físico-Naturales:.....	67
4.2.1. Fisiografía:	67
4.2.2. Climatología:	70
4.2.2.1. Precipitación:	71
4.2.2.2. Evaporación:.....	73
4.2.2.3. Temperatura:	74
4.2.2.4. Vientos:.....	74
4.2.3. Hidrografía:	74
4.2.4. Rasgos geológicos:.....	78
4.2.4.1 Cretácico:	80
a. Formación Villanueva (KTvn):.....	80
b. Formación Barquisimeto (Kb):.....	82
c. Formación Mamey (Km):.....	82
4.2.4.2. Terciario:	83
a. Formación Matatere (Tpema):.....	83
b. Formación Morán (Tpemo):.....	84
c. Formación El Pegón (Tmpp):	84

4.2.4.3. Cuaternario:.....	85
a. Cuaternario (Qal):.....	85
4.2.5. Hidrogeología:	86
CAPITULO 5.....	91
CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO.....	91
5.1. Inventario de pozos:	91
5.2. Determinación de los parámetros hidráulicos de acuífero:.....	92
5.2.1. Información básica:.....	92
5.2.2. Parámetros hidráulicos del acuífero:.....	93
5.2.2.1. Abatimiento (s):	93
5.2.2.2. Capacidad específica (CE):	94
5.2.2.3. Transmisividad (T):.....	95
5.2.2.4. Espesor saturado (b):	95
5.2.2.5. Conductividad hidráulica (K):.....	96
5.2.2.6. Coeficiente de almacenamiento (S):.....	96
5.3. Mapeado de los parámetros hidráulicos de acuífero:.....	99
5.3.1. Comprobación de hipótesis de normalidad:	99
5.3.2. Tratamiento geoestadístico de las variables:	101
5.3.2.1. Variograma:.....	101
5.3.2.3. Ajuste de un modelo teórico	104
5.3.3. Modelado espacial de las variables	105
a. Transmisividad:	107
b. Caudal y coeficiente de almacenamiento:	110
CAPITULO 6.....	115
DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE RADIO DE INTERFERENCIA.....	115
6.1. Gráfico Abatimiento permisible (s) vs. Radio de interferencia (r):.....	120
6.2. Calculo de los mapas de radio de interferencia (r) para distintas datas de coeficiente de almacenamiento (S):.....	133
CAPITULO 7.....	139
EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA VARIABLE RADIO DE INTERFERENCIA.....	139
7.1. Determinación del criterio económico:	139
7.2. Definición de la curva del sistema bomba – pozo:	141
7.3. Definición de la curva sintética de la bomba:	145

7.4. Determinación de los puntos de funcionamiento (Pf_1 , Pf_2):	153
7.5. Determinación de la potencia de bombeo:	156
7.6. Determinación de la variación de la potencia de bombeo asociada a la interferencia entre pozos vecinos:	158
7.7. Determinación de los costos asociados a las variaciones de potencia en la bomba.	162
CONCLUSIONES	165
RECOMENDACIONES	169
TRABAJOS CONSULTADOS	171
ANEXOS A	177
MAPAS GENERADOS	177
ANEXOS B	195
DATOS	195
ANEXOS C	217
PROGRAMAS UTILIZADOS	217
ANEXOS D	221
DATOS DE CAUDAL INTRODUCIDOS EN VARIOWON 2.1	221
ANEXO F	229
CURVAS SINTÉTICAS DE LA BOMBA	229

LISTA DE TABLAS

2.1. Clasificación de los tipos de acuífero según su coeficiente de almacenamiento.	23
2.2. Ejemplo de organización de información necesaria para el archivo de entrada del Prevar2D.	34
2.3. Variación de los radios de interferencia para tiempos de bombeo distintos.....	55
2.4. Propuestas de los tiempos de bombeo-recuperación para el acuífero de Morroa.	56
4.1. Características de los afluentes más representativos del Valle de Quíbor.	75
4.2. Tabla 4.2. Descripción de las subcuencas de la Cuenca de Quíbor.....	76
4.3. Resumen de ubicación de las Formaciones geológicas en el entorno de la región de Quíbor.	86
5.1: ejemplo de cálculo del abatimiento para el pozo LA6070029A.....	94
5.2: ejemplo de cálculo de la CE para el pozo LA6070029A.....	94
5.3: ejemplo de cálculo de la T estimada para el pozo LA6070029A.	95
5.4: ejemplo de cálculo de b para el pozo LA6070029A.....	96
5.5: ejemplo de cálculo de K para el pozo LA6070029A.....	96
5.6: ejemplo de ubicación de los parámetros necesarios para el cálculo de S. Dentro del ítem Tipo de Capa, i=impermeable, p=permeable.	97
5.7. Ejemplo de cálculo del coeficiente de almacenamiento para un pozo.	98
5.8. Directrices para la construcción del archivo de datos para el Ajuste V.3.	99
5.9. Ejemplo de archivo de datos para la variable caudal en el programa Ajuste V.3.....	100
5.10. Resumen de la prueba de ajuste a una distribución normal.	100
5.11. Ejemplo de los resultados del programa Ajuste V 3 para la variable caudal (Q).	101
5.12. Directrices para la construcción del archivo de datos para el Variowin 2.1.....	101
5.13. Valores empleados en el cálculo de los variogramas de superficie de la variable caudal. Data 1: pozos operativos durante los últimos 5 años. Data 2: caudal de pozos históricos.	103
6.1. Valores asignados a los parámetros requeridos en el cálculo del radio de interferencia.	116
6.2. Valores y colores asignados a los intervalos de radio de interferencia en el Valle de Quíbor.	117
6.3. Dimensiones originales de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quíbor.	124

6.4. Dimensiones con espaciamiento modificado de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quíbor.....	125
6.5. Dimensiones y espaciamiento modificado de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quíbor con espaciamiento 25x25.....	125
6.6. Resultados de las medias de radio de interferencia para las distintas zonas y abatimientos permisibles.....	130
6.7. Datos de pruebas de pozos de S.....	133
6.8. S calculado para los pozos existentes dentro del modelo en Modflow del Valle de Quíbor	133
6.9. Valores asignados a los parámetros requeridos en el cálculo del radio de interferencia.	135
6.10. Valor medio del radio de interferencia para distintas data de Coeficiente de Almacenamiento (S).....	136
7.1 Puntos de diseño con los que se construyeron las curvas sintéticas para las bombas en cada sector del Valle de Quíbor.	150
7.2 Ecuaciones de la curvas sintéticas de las bombas para cada una de las zonas del Valle de Quíbor.	150
B1. Parámetros hidráulicos evaluados para cada uno de los pozos seleccionados.....	195
B2: Pozos con información de caudal Campañas de 2005-2009	198
B3. Coeficiente de almacenamiento St para cada pozo analizado dentro del acuífero de Quíbor. Los pozos sombreados en verde corresponden a aquellos que se les determinó el coeficiente de almacenamiento por otra metodología en la campaña de 2011.....	200
C1. Ejemplo de organización de información necesaria para el archivo de entrada del Prevar2D.....	218
D 1 Variable caudal - Q	221
D 2. Variable permeabilidad - k	222
D 3. Variable espesor saturado - b	223
D 4. Variable coeficiente de almacenamiento - S	224

LISTA DE FIGURAS

2.1. Formaciones geológicas y su relación con el agua subterránea	6
2.2. Tipos de acuíferos según su textura	8
2.3. Simplificación de acuífero libre.....	9
2.4. Simplificación de acuífero confinado	10
2.5. Simplificación de acuífero semiconfinado.....	12
2.6. Cono de abatimiento de un pozo – sw: abatimiento en el pozo, s: abatimiento a una distancia r del pozo.....	13
2.7. Representación longitudinal (izquierda) y en planta (derecha) del radio de interferencia	14
2.8. Radio de interferencia entre pozos.....	14
2.9. Forma idealizada del cono de abatimiento en acuíferos libres y confinados.	15
2.10. Esquema de conceptualización del radio de interferencia entre pozos vecinos cuando el abatimiento en el pozo B (s) es nulo. Modificado de: (Arellano, 2008).....	16
2.11. Esquema de conceptualización del radio de interferencia entre pozos vecinos cuando el abatimiento permisible en el pozo B (s) es distinto de cero.....	17
2.12. Relación lineal entre Capacidad Específica (CE) y Transmisividad (T)	22
2.13. Diagrama explicativo del concepto de coeficiente de almacenamiento.	23
2.14. Diagrama de selección de d1 y d2 para la determinación de Si en el conjunto de pozos evaluados dentro del acuífero de Quíbor.	24
2.15. Procedimiento de transformación de datos puntuales de una variable en una expresión de su comportamiento en todo un yacimiento	25
2.16. Pasos a seguir para la regionalización de las variables de un acuífero.	26
2.17. Zona de tolerancia para la búsqueda de datos en la construcción del semivariograma de una variable regionalizada	27
2.18. Semivariogramas en distintas direcciones – Herramienta para la evaluación de la anisotropía.....	29
2.19: Diagrama de nube o Rosa – Definición de un comportamiento anisótropo de la variable. Los ejes principal y secundario indican direcciones de mayor anisotropía	29
2.20. Elementos que definen a un semivariograma	30
2.21. Modelos teóricos empleados comúnmente en los semivariogramas.....	32

2.22. Módulos de operación contenidos en Variowin 2.1. Imagen superior: Modulo Prevar 2D. Imagen inferior Izquierda: Modulo de Variogram modeling. Imagen inferior derecha: Modulo Vario 2D.	33
2.23. Graficas modelo de distribución normal y curtosis positiva y negativa.....	36
2.24. Relación gráfica del test de Smirnov-Kolmogorov.....	36
2.25. Ejemplo de gráfico P – P.....	38
2.26. Partes de una bomba de agua	40
2.28. Ejemplo de curva característica de una bomba para velocidades variables.....	40
2.29. Ejemplo de curvas características en EPANET	41
2.30. Zonificación del Valle de Quíbor.....	45
2.31. Mapa de zonificación del acuífero central de Quíbor.	53
2.32 Mapa de zonificación del acuífero de Morroa en función de sus radios de interferencia para distintos tiempos de bombeo.....	56
2.33. Delimitación de la Ciudad de Esperanza y perímetros de protección para t=100 días: t=1año; t=5años.....	59
2.34. Zona de protección sanitaria obtenida mediante diferentes variantes del método analítico (norma cubana y modificaciones de Monteagudo) y modelado numérico.....	63
4.1. Ubicación relativa del Valle de Quíbor.....	68
4.2: Encuentro de los sistemas Andino, Coriano (Lara-Falcón) y Cordillera de la Costa para formar la depresión tectónica de Quíbor.....	69
4.3. Ubicación del surco de Barquisimeto.....	69
4.4. Alineación del Valle de Quíbor con la Cordillera de los Andes y el trazado principal del sistema de falla de Boconó	70
4.5. Unidades fisiográficas presentes en Quíbor. Al frente la zona 1: Valle de Quíbor. Al Fondo la zona 2: Colinas.....	71
4.6. Comportamiento de la precipitación media mensual en la Estación Quíbor. Periodo 1945-1986.....	72
4.7. Interferencia de los fenómenos Niño y Niña en la distribución de la precipitación en el Valle de Quíbor	72
4.8. Comportamiento de la evaporación media mensual en la Estación Quíbor. Periodo 1.975-1.985.....	73
4.9. Comportamiento de la temperatura media mensual en la Estación Quíbor. Periodo 1.972-1.986.....	74

4.10. Ubicación de la Cuenca del Río Yacambú respecto del Valle de Quíbor.....	75
4.11. Red hidrográfica del Valle de Quíbor. División de la cuenca de Quíbor.	76
4.12. Unidades estructurales Sur – Caribe.....	79
4.13. Mapa geológico estructural de la región de Quíbor.	80
4.14. Columna cronoestratigráfica. Las Formaciones que componen al Valle de Quíbor se encuentran dentro de los periodos más recientes del Fanerozóico (Cretácico superior y Paleógeno Eoceno).	81
4.15. Mapa hidrogeológico del Valle de Quíbor, 1987.....	88
5.1. Diagrama de selección de d_1 y d_2 para la determinación de S_i en el conjunto de pozos evaluados dentro del acuífero de Quíbor.	98
5.2. Variograma superficial para la variable caudal (Q).....	103
5.3. Variograma direccional para la data 1 - variable caudal (Q).....	103
5.4 Ajuste a modelo teórico para los últimos 5 años - variable caudal (Q).	105
5.5. Entrada de datos en Surfer 9 para el modelado de la variable Q.	106
5.6. Entrada de valores de los modelos del variograma para Q.	106
5.7. Mapa en Surfer 9.0 - variable Q.	107
5.8. Mapa contorno del Valle de Quíbor.....	108
5.9. Cuadro de dialogo de la función Math de Surfer 9.0, para el cálculo del mapa de transmisividad (T).	109
5.10. a. Mapa de Espesor saturado (b). a. Mapa de permeabilidad (K). c. Mapa de transmisividad (T). Surfer 9.0.....	109
5.11. Programa GridConvert empleado en la transformación de las coordenadas de los distintos mapas de .gid a .asc.....	110
5.12. Ejemplo de transformación de coordenadas de los distintos mapas de .asc a .shp con el uso de ArcGis 10.0.....	111
5.13. Mapas resultantes para a. Caudal (Q), b. Transmisividad (T), c. Coeficiente de almacenamiento (S).....	112
6.1. Esquema de ubicación de los parámetros necesarios para el cálculo del radio de interferencia en el acuífero	116
6.2. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible de: a: $s= 0m$, b: $s= 0.01m$, c: $s= 0.1m$ y d: $s= 1m$	119
6.3. Análisis de la ubicación de pozos vecinos para el pozo X si se toma en consideración escenarios distintos de abatimiento permisible de: a: $s= 0m$, b: $s= 0.1m$	120

6.4. Mapa de espesores saturados y zona 1.....	122
6.5. Mapa de espesores saturados y zona 2.....	123
6.6. A. Modelo digital del Terreno, B. Modelo de tope de Roca.....	124
6.7. a. Modelo digital tope de Roca 25x25, b. Modelo del Terreno 25x25.....	126
6.8. Mapa de niveles estáticos históricos, la curva externa en rojo corresponde a la cota 600m.....	127
6.9. Mapa de espesores saturados y zona 3.....	128
6.10. Tabla de atributos de la capa Zona_Union Mapa de espesores saturados y zona 3..	129
6.11. Ventana para la reclasificación del raster Zona_Union.....	129
6.12. Zonificación del Valle para la construcción de la Tabla R.I vs. s. Zona 1: Verde, Zona 2: Amarillo, Zona 3: Marrón.....	130
6.13. Ventana de ejemplo de cálculo de la media del radio de interferencia para la zona 1 y abatimiento permisible 1m. en unión.....	130
6.14. Radio de interferencia en relación a cada abatimiento permisible entre 0 y 10m para: a. Zona 1, b. Zona 2, c. Zona 3.....	132
6.15. Radio de interferencia en relación a cada abatimiento permisible A. Data histórica, B. Data calculada.....	137
7.1. Diagrama de funcionamiento del sistema pozo y bomba.....	140
7.2. Curva general para el sistema bomba - pozo.....	142
7.3: Diagrama de altura para la bomba dentro de un pozo.....	142
7.4. Elementos de la función de descenso lineal.....	142
7.5. Curva simplificada del sistema bomba – pozo.....	144
7.6: Curvas características de tres bombas hidráulicas. a. bomba radial centrífuga. b. bomba helicocentrífuga. c. bomba de hélice.....	145
7.7 Curva sintética para la bomba.....	146
7.8 Zonas de Valle de Quibor y caudales medios de explotación asociados a cada zona..	151
7.9 Esquema para la definición de la altura de diseño para las bombas.....	151
7.10 Zonas de Valle de Quibor y alturas de diseño medias asociados a cada zona.....	152
7.11 Curva de bomba para la zona 1.....	152
7.12 Determinación de los puntos de funcionamientos para las condiciones con y sin interferencia de pozo vecino.....	153

7.13: Variación en la potencia de bombeo para situación con y sin interferencia de pozo vecino.....	158
7.14: Potencia en el Valle de Quíbor. a. con interferencia de pozo vecino b. sin interferencia de pozo vecino.....	162
A 1. Variable caudal - Q. Surfer 9.0	177
A 2. Variable permeabilidad - k. Surfer 9.0.....	178
A 3. Variable espesor saturado - b. Surfer 9.0	179
A 4. Variable coeficiente de almacenamiento - S. Surfer 9.0.....	180
A.5. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0m.....	176
A 6. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0.01m.	182
A 7. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0.1m.	183
A 8. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 1m.	184
A 9. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor y constante2 =0.01m.	185
A 10. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor con interferencia de 0.01m y constante2 =0.01m.	186
A 11. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor y constante2 =0.1m.	187
A 12. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor con interferencia de 0.1m y constante2 =0.1m.	188
A 13. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor y constante2 =1m.	189
A 14. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor con interferencia de 1m y constante2 =1m.	190
A 15. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor y constante2 =2m.	191
A 16. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor con interferencia de 2m y constante2 =2m.	192
A 17. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor y constante2 =3m.	193
A 18. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quíbor con interferencia de 3m y constante2 =3m.	194
C1. Pantalla de entrada y salida de datos del programa Acui-Quíbor. (2000)	217
C2. Módulos de operación contenidos en Variowin 2.1.....	219
E 1. Variable caudal - Q.....	225
E 2. Variable permeabilidad - K.	226
E 3. Variable espesor saturado - b.....	226

E 4. Variable caudal - Q.	227
E 5. Variable permeabilidad - K.	227
E 6. Variable espesor saturado - b.	228
E 7. Variable coeficiente de almacenamiento - S.	228
F 1. Curva sintética de la bomba para la Zona 1 del Valle de Quíbor.	229
F 2. Curva sintética de la bomba para la Zona 2 del Valle de Quíbor.	229
F 3. Curva sintética de la bomba para la Zona 3 del Valle de Quíbor.	230

www.bdigital.ula.ve

LISTA DE ECUACIONES

2.1	15
2.2	17
2.3	19
2.4	19
2.5	20
2.6	20
2.7	21
2.8	21
2.9	21
2.10	23
2.11	37
2.12	42
2.13	42
2.15	57
2.16	57
2.17	60
2.18	60
2.19	61
2.20	61
2.21	61
2.22	61
2.23	61
2.24	62
5.1	94
2.5 (Bis)	94
2.6 (Bis)	95
2.4 (Bis)	96
2.3 (Bis)	96

2.11 (Bis).....	97
2.2 (Bis)	115
7.1.....	140
7.2.....	141
7.3.....	143
7.4.....	143
7.5.....	146
7.6.....	147
7.7.....	147
7.5 (Bis)	147
7.6.....	147
7.7.....	148
7.8.....	148
7.9.....	149
7.10.....	154
7.11.....	155
7.12.....	156
7.1 (Bis)	156
7.12 (Bis).....	156
7.13.....	157
7.14.....	158
7.5 (Bis)	159
7.13.....	159
7.15.....	159

RESUMEN

El Valle de Quíbor, estado Lara, es un valle intramontano con acuíferos confinados, semi-confinados y libres. Esta región, agrícola emplea como fuente de abastecimiento el agua del acuífero de Quíbor, estudiado desde 1959.

En esta investigación se propone una zonificación del Valle en función de la capacidad de extracción sustentable de agua subterránea, considerando el radio de interferencia entre pozos, variable con la que se pretende establecer estrategias para el manejo de las explotaciones recientes y el otorgamiento de futuras concesiones.

La metodología aplicada incluyó el análisis de 210 pruebas de bombeo y 50 pozos de un modelo digital del Valle. Se empleó la fórmula propuesta por Jacob (1946) para la determinación del radio de interferencia y se consideró la susceptibilidad de explotación del recurso agua en cada zona del Valle para proponer su zonificación. Se aplicó el modelo de Boostran y Ridder (1981) para calcular el coeficiente de almacenamiento. Se realizaron gráficos que relacionan el radio de interferencia con el abatimiento permisible en el pozo vecino.

La información generada permitió dilucidar que los mayores radios de interferencia se encuentran en los sectores que están sometidos a mayores presiones de uso (zona central, este y sureste). Para una situación ideal (admitir un abatimiento inducido nulo), los radios resultantes albergan áreas tan grandes (promedio 5,7km) que se considera un criterio inaplicable en la realidad del acuífero. Por su parte, se observó que el modelo de Boostran y Ridder (1981) se adapta bastante bien el comportamiento hidrogeológico del Valle.

Palabras clave: Quíbor, acuífero confinado, interferencia de pozos, coeficiente de almacenamiento, abatimiento en el pozo vecino, modelo de Boostran y Ridder, modelo de Jacob.

INTRODUCCIÓN

El agua tiene un carácter protagónico en la historia de la Tierra y las civilizaciones. Tal es su importancia que los hombres, inicialmente nómadas, cambiaron su forma de vida de modo que en una misma área pudieran encontrar los recursos para cubrir sus necesidades diarias, así, preferían radicarse en espacios que contaran con buenos suelos para el cultivo, disponibilidad de materiales para la construcción de viviendas, cercanía a otras civilizaciones, climas favorables y agua suficiente para sostener su modo de vida, sus cultivos, la cría de animales y sus necesidades domésticas, higiénicas, religiosas y de recreación. En este sentido las civilizaciones mostraron afinidad por asentarse en valles cercanos a grandes cuerpos de agua o en zonas próximas al mar.

En lo que respecta a Venezuela, existen muchos casos en los que la ocupación de territorios se ha dado gracias a sus virtudes naturales, disponibilidad de recursos, cercanía a zonas de comercio, entre otras. Uno de estos ejemplos es el Valle de Quíbor, en el estado Lara, donde existen reseñas de su ocupación y aprovechamiento por grupos indígenas cientos de años antes de que estas tierras fueran colonizadas y explotadas agroeconómicamente por los españoles hacia mediados del siglo XVI (Cañizalez, 1996).

Los aspectos que hacen más atractivo al Valle comienzan con la fertilidad de sus suelos, el clima tropical y su posición geográfica relativa, factores que hacen factible el cultivo y la comercialización de una amplia gama de productos y la cría de animales con propósitos comerciales y de consumo interno.

Por otra parte, su fisiografía es igualmente llamativa, al tratarse de una planicie rodeada por un cinturón orográfico de altura media y topografía abrupta que funge como origen de los sedimentos que conforman la geología de la planicie, barrera protectora y zona de producción y drenaje del agua que fluye, se infiltra y se almacena en el Valle conformando una red hidrográfica que superficialmente está integrada por tres grandes quebradas encargadas de drenar el Valle de Sur a Norte, mientras que subterráneamente conforman el acuífero de Quíbor y el de Palo Negro (Alvarado, 1989).

Sin embargo, cómo factor antagónico se encuentran las bajas precipitaciones anuales de carácter estacional y torrencial, factores que tradicionalmente han demarcado la forma como

se relacionan las personas y se llevan a cabo las actividades en el Valle, llegando a limitar su potencial agropecuario, doméstico e industrial. Y promoviendo el aprovechamiento de fuentes alternativas de agua, de las cuales la más importante es la subterránea.

A pesar de que el Valle resulta idóneo para el desarrollo de múltiples actividades, la más emblemática es la agropecuaria, la cual extiende sus fronteras a todo el país, cubriendo la producción y distribución de un alto porcentaje de las frutas y verduras que son consumidas dentro del territorio nacional (para 2.011 se produjo un 60% de la cebolla, 50% del tomate, cilantro y pimentón y 40% del maíz blanco del país) (Contreras, 2011).

En vista de la importancia nacional que tienen las actividades del Valle de Quíbor y de las altas demandas hídricas que implica la producción agropecuaria, los conflictos por el uso del agua son frecuentes, así como la búsqueda de nuevas alternativas de obtención y manejo del recurso. En este sentido, en 1959 se da inicio a las actividades de aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo por parte de los propios agricultores de la zona norte del Valle (Canelón, 2.004), este tipo de iniciativas fueron creciendo y pasando de manos personales, a grupos organizados de agricultores y a instituciones regionales, hasta el momento actual, en el que la administración del recurso hídrico subterráneo es jurisdicción del Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor (SHYQ) y el Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA), el cual rige sus actividades según las directrices planteadas en la reforma parcial hecha en 1996 de la ley Municipal de 1984 (Canelón, 2004).

A partir de 1961 se inician en manos del Ministerio de Obras Públicas (MOP), estudios formales a nivel regional sobre la hidrogeología del Valle de Quíbor (Alvarado, 1.989), posteriormente surgen numerosas investigaciones en lo que respecta a la planificación de la explotación, conducción, almacenamiento y uso adecuado del agua, así como la caracterización de los acuíferos y la declaración en 1.982, del Valle de Quíbor como Zona de Aprovechamiento Agrícola, mediante el Decreto Presidencial nº 1.592, cuyo planteamiento más relevante es limitar la superficie agrícola aprovechable a 43.395 ha, de las cuales 24.500 ha se definen como área potencialmente regable (Canelón, 2.004, pág. 39).

Dentro de este orden de ideas, en 2.011 fueron contratados por el SHYQ los proyectos *“Actualización del estudio sobre criterios y parámetros para el aprovechamiento del agua subterránea en el Valle de Quíbor. Contrato nº 604 – 2.011”* y *“Caracterización de las áreas de recarga, dinámica hidrogeológica y determinación de los radios de interferencia en el*

acuifero del Valle de Quíbor, municipio Jiménez – estado Lara Contrato nº 605 – 2.011”, que fueron desarrollados por el Centro Interamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) y de donde surgen las investigaciones hechas en el presente trabajo, respecto al radio de interferencia, y sus aplicaciones en la planificación de las actividades de explotación del recurso hídrico en el Valle de Quíbor, temática que se encuentra enmarcada dentro de la línea de investigación del CIDIAT referida a la Protección y Recuperación de los Recursos Naturales Renovables.

En el marco de ejecución de este proyecto se contempla analizar las pruebas de bombeo y recuperación hechas históricamente en el universo de pozos ubicados en diversas regiones del Valle, y extraer de ellas la información hidrológica para el cálculo y regionalización de la variable radio de interferencia, objetivo que puede ser usado como un complemento de los elementos tradicionalmente empleados por el MPPA y el SHYQ en la gestión del acuifero de Quíbor.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 1

1.1. Planteamiento del problema

El carácter escaso, estacional y torrencial de las precipitaciones en la cuenca de Quíbor ha traído consigo consecuencias tanto negativas, como la restricción en el aprovechamiento económico del área potencialmente regable (de las 24.500 ha establecidas según gaceta oficial, solo se aprovechan 5.000 ha), como positivas, dentro de las cuales resalta la estimulación de la creatividad y disposición de los productores para desarrollar y aplicar técnicas más eficientes de riego, con las cuales se logre aprovechar al máximo hasta las menores concentraciones de agua y así ampliar un poco el área bajo cultivo.

En este sentido, los pobladores del Valle se han preocupado por cubrir las demandas agua exigidas por sus cultivos y familias, estableciendo zonas de siembra bajo riego, construyendo represas para sortear las épocas de sequía, tratando y reutilizando agua residual en el riego de pastos, aprovechando el agua que fluye del túnel de trasvase del proyecto Yacambú – Quíbor e iniciando en 1.959 el aprovechamiento del recurso hídrico subterráneo, decisión estratégica que significó un auge inmenso con el que se logró incrementar rápidamente la superficie bajo riego.

De este modo, con el pasar de los años, el número de perforaciones fue aumentando de forma voraz y poco planificada (para 1.975 había en explotación 40 pozos – 0,13 pozos/km², mientras que para 2.009 había 98 pozos operativos - 0,31 pozos/km², arrojando un aumento en la densidad de pozos de 145% en 24 años), trayendo consigo el riesgo de sobreexplotación del acuífero.

En este sentido, el problema con la extracción y uso del recurso hídrico en el Valle de Quíbor tienen una componente importante en lo que respecta a la planificación y en ese sentido se han desarrollado investigaciones que plantean distintas medidas de control, algunas de las cuales se han llevado con éxito, sin embargo es relevante seguir en la búsqueda de variables de fácil aplicación para la gestión y control de las actividades de explotación y uso del recurso hídrico en el Valle.

1.2. Justificación:

En función de controlar el balance hídrico dentro del acuífero, se han propuesto alternativas que abarcan el problema desde distintas perspectivas, de este modo se han ideado procedimientos para realizar la recarga artificial del acuífero, acciones para el control y seguimiento de las actividades de explotación, oferta de fuentes alternativas, regulaciones en las condiciones de operación de los comité de riego, entre otras acciones que combinadas correctamente estribarán en conservación (tiempo/espacio) del recurso hídrico.

En este orden de ideas, el criterio de radio de interferencia se plantea como una herramienta de gestión que permita determinar la distancia óptima que debe existir entre pozos vecinos para que la interferencia del abatimiento de un pozo sobre el otro, sea tal, que ambos puedan desempeñarse adecuadamente en forma simultánea. Valorando la pertinencia que tiene la definición de este parámetro, sobre todo en acuíferos tan importantes e intensamente explotados como el de Quíbor, varios investigadores (Aguilera y Padilla, 1.963; Carvajal, 1.980; Aguasuelos Ingeniería, 1.989, Alvarado, 1.989, entre otros) han incursionado en su determinación, encontrándose con limitaciones que los han llevado a recomendar mejorar la definición del criterio teniendo como base datos confiables de pruebas de pozo y de parámetros hidráulicos del acuífero.

1.3. Alcance y limitaciones:

Para evitar el agotamiento progresivo del acuífero de Quíbor, resulta imperativa la definición y aplicación de un plan integral para el manejo y control del uso, la exploración y explotación de aguas subterráneas en el Valle. En este sentido, el primer paso a ejecutar es la evaluación de la situación actual de los recursos subterráneos, los cambios que han experimentado respecto de situaciones anteriormente reportadas y las consecuencias positivas y negativas de esos cambios. De este modo se puede discriminar entre actividades que son favorables y desfavorables para el equilibrio entre la relación acuífero y productividad agrícola.

En dicho sentido, la presente investigación hace una revisión de los documentos en los que se modela la situación del acuífero en distintos momentos de su historia, así como de los trabajos previos que existen en la definición del radio de interferencia y plantea hacer uso de

una data filtrada de los parámetro hidrogeológicos del acuífero, así como de pruebas de bombeo realizadas en años recientes en el Valle de Quíbor, para mejorar la precisión en el cálculo del radio de interferencia, en función de presentar los resultados en forma de mapas, en los que se divida al Valle de Quíbor en zonas donde se presentan las mayores o menores interferencias entre pozos para abatimiento admisibles definidos como operativos.

El alcance último de esta investigación es proponer alternativas en el manejo del recurso de agua subterránea a partir de la definición de la variable radio de interferencia.

Las limitaciones de esta investigación están en la cantidad de datos disponibles, pues a pesar de que existen pruebas de bombeo recientes y de buena calidad, resultan ser pocas para abarcar toda la extensión del Valle con buena precisión.

1.4. Objetivos:

1.4.1. Objetivo general:

- Proponer una zonificación espacial del Valle de Quíbor en función de la capacidad de extracción sustentable de agua subterránea, tomando en cuenta el criterio de radio de interferencia entre pozos.

1.4.2. Objetivos específicos:

- Evaluar la variable radio de interferencia a partir de la ecuación de Jacob (1946), discretizando por zonas al Valle de Quíbor.
- Comparar los resultados obtenidos de la variable radio de interferencia calculados con el coeficiente del almacenamiento proveniente de pruebas de bombeo y calculado con la ecuación de Boostran y Ridder (1981).
- Evaluar los costos de producción bajo escenarios de interferencia de pozos, utilizando como indicador la potencia de bombeo, con la variable altura de la bomba.
- Establecer estrategias para el manejo de las explotaciones recientes y el otorgamiento de concesiones para explotaciones futuras.

CAPITULO 2

MARCO TEÓRICO

En este capítulo se recopilará toda la información teórica básica y fundamental para el análisis del fenómeno de interferencia de pozos, la determinación, cuantificación y el análisis de los parámetros necesarios para su evaluación, el manejo estadístico de los datos y las herramientas empleadas para su presentación, se hará también un acercamiento a las bases teóricas que fundamentan el análisis económico de los impactos que tendrán las reformas en la variable radio de interferencia sobre los aprovechamientos de agua en el Valle. Así mismo, se hará una reseña de los trabajos más emblemáticos desarrollados en materia de hidrogeología dentro del Valle de Quíbor desde los inicios del aprovechamiento del agua subterránea como recurso fundamental en el desempeño de las tareas económicas, sociales y domésticas del sector, resumidos en función de identificar la manera como se han venido modificando las condiciones hidrogeológicas y de aprovechamiento del acuífero con el paso del tiempo. Por otra parte se hará referencia a trabajos previos realizados en el entorno Latinoamericano y Nacional respecto al estudio del radio de interferencia, por ser el tema objeto central de esta investigación.

2.1 Bases teóricas:

2.1.1 Acuíferos:

Los acuíferos deben ser entendidos como *Formaciones Geológicas* subterráneas porosas y permeables, susceptibles de almacenar y transmitir el agua. De este modo existe una amplia gama de combinaciones de materiales y condiciones estructurales e hidráulicas que definen cada tipo de acuífero (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002).

Desde el punto de vista hidrogeológico las *Formaciones* pueden ser divididas de acuerdo con su capacidad para almacenar, drenar y transmitir el agua, en este sentido, se encuentran cuatro grupos principales que se describen en la Figura 2.1.

Adicionalmente, los acuíferos representan *Sistemas Hidráulicos* cuyo dominio más importante es el subsuelo, sin embargo sus conexiones con la superficie son muy importantes y variadas, de este modo, el *Sistema* puede recargarse en forma natural o

artificial gracias a la infiltración desde superficie (agua de lluvia, agua de riego, cuerpos de agua superficial como lagos, río, lagunas y mares) o subterráneamente a través de estratos permeables que conectan a un acuífero con otro. Mientras que la descarga también puede ser natural o artificial mediante bombeo, pozos artesanales, canales o en forma de manantiales, ríos y aguas termales. Un sistema acuífero se mantendrá saludable siempre que el **balance hídrico= recarga-descarga** se mantenga positivo, de lo contrario comenzarán problemas de sobreexplotación, agotamiento del agua disponible, hundimientos, entre otros.

Formación	Capacidad para almacenar	Rangos de permeabilidad (m/día)	Rangos de porosidad (%)	Capacidad para transmitir	Materiales característicos
Acuífero	Alta	1 - 1000	10 - 30	Alta	Sedimentarias: Gravás, Arenas, Calizas
Acuitardo	Alta	0.1 - 0.001	20 - 40	Baja	Limos, Arenas limosas, Arenas Arcillosas
Acuicludo	Alta	$10^{-4} - 10^{-7}$	> 40	Nula	Limos
Auífugo	Nula	< 10^{-6}	< 0.1	Nula	Igneas y metamórficas: Granitos, Gneises, mármoles

Tomado y modificado de: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

Figura 2.1. Formaciones geológicas y su relación con el agua subterránea.

2.1.1.1 Tipos de acuíferos:

En vista de que los acuíferos representan las *Formaciones* más útiles para el almacenamiento, drenaje y transmisión del agua, su utilidad es muy amplia sobre todo en lo que respectar al abastecimiento urbano, industrial, en la agricultura y la ganadería, es relevante caracterizarlos desde los más variados enfoques.

a. Desde el punto de vista textural, los acuíferos están compuestos por una matriz y un relleno, en este sentido, existen fundamentalmente tres tipos de acuíferos, sin embargo en la naturaleza pueden darse combinaciones muy complejas de las opciones presentadas a continuación:

Acuíferos porosos:

Los acuíferos porosos están representados por una matriz granular que permite el almacenamiento y tránsito del agua dentro de los espacios intergranulares (Figura 3.2 – 1). Dentro de los materiales que conforman este tipo de Formaciones se encuentran todos aquellos de origen detrítico y de tamaño de grano mayor o igual al tamaño arena, tales como las gravas y arenas arcosas. Adicionalmente el material de relleno de estos acuíferos puede ser grueso, fino o muy fino (Figura 2.2 – 2,3,4), entre más fino sea el material menos poroso será y más dificultad tendrá el agua de atravesarlo, lo cual tendrá repercusiones directas sobre la transmisividad del acuífero.

Este tipo de acuíferos suelen ser bastante homogéneos a escalas de trabajo generalmente pequeñas. Y sus radios de interferencia son amplios.

Acuíferos Cársticos o fisurados:

Este tipo de acuíferos está conformado por materiales consolidados que han sufrido una de las siguientes transformaciones, la primera se refiere a fracturas por acción mecánica (Figura 2.2 – 5) y la segunda es carstificación (Figura 2.2 – 6), el cual es un fenómeno de disolución que experimentan materiales solubles al estar en contacto con aguas de formación capaces de degradar su estructura.

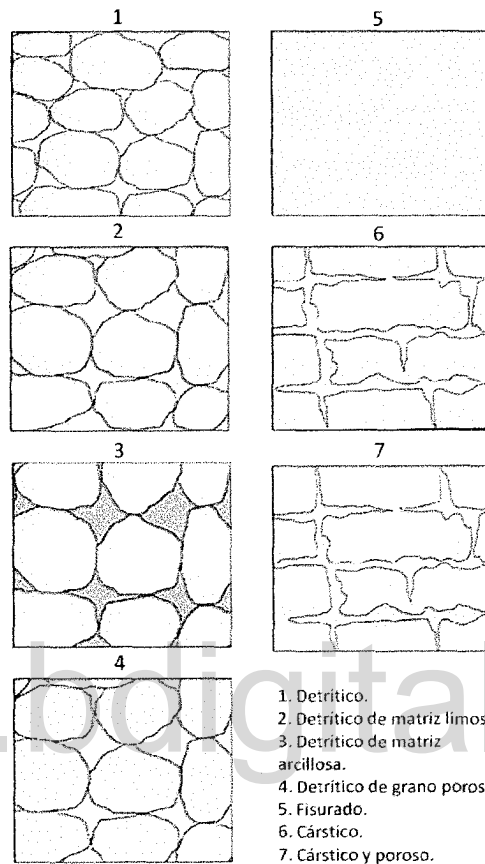
Los materiales que tradicionalmente conforman este tipo de acuíferos son de origen ígneo o metamórfico cuando nos referimos al procesos de fracturamiento (granito, basalto, esquistos, entre otros) y sedimentario químico en el caso de procesos de disolución (caliza, dolomía, entre otras).

Este tipo de acuíferos son bastante homogéneos a escalas de trabajo amplias. Y sus radios de interferencia suelen ser más cortos que en el caso de los acuíferos porosos porque son capaces de drenar más rápidamente el agua que almacenan.

Acuíferos Cársticos y porosos:

Este tipo de acuíferos surgen de una combinación entre materiales porosos con calcáreos (Figura 2.2 – 7), de este modo, en ellos suelen almacenarse grandes cantidades de agua que generalmente fluye con lentitud ante el bombeo y sus radios de interferencia suelen ser

más cortos que en el caso de acuíferos cársticos. Por otra parte, estos materiales suelen ser poco homogéneos y ocupar extensiones relativamente más cortas que los otros dos tipos.



1. Detritico.
2. Detritico de matriz limosa.
3. Detritico de matriz arcillosa.
4. Detritico de grano poroso.
5. Fisurado.
6. Cárstico.
7. Cárstico y poroso.

Tomado de: (González de Vallejo, Ferrer, Ortuño, & Oteo, 2002)

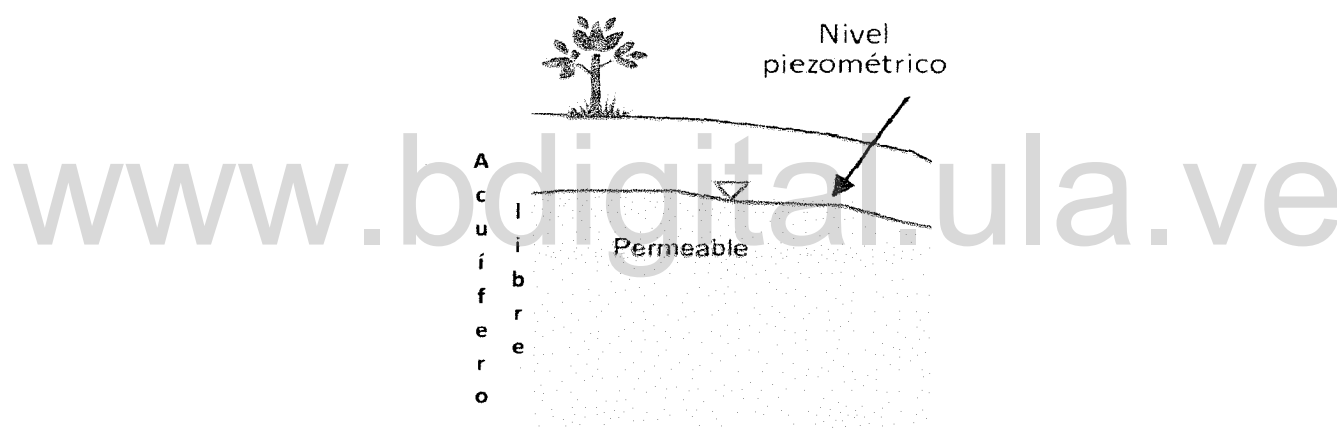
Figura 2.2. Tipos de acuíferos según su textura.

b. Desde el punto de vista hidráulico y estructural, los acuíferos pueden comportarse obedeciendo las siguientes directrices que tienen que ver con la forma como se comporta el agua en ellos confinada:

Acuíferos Libres:

Un acuífero es *libre* si sobre él no existe una capa que lo confine, es decir, que no haga aumentar la presión hidrostática de los fluidos que contiene, los cuales se encuentran a presión atmosférica. Adicionalmente, en los acuíferos libres, el nivel freático se ubica por

debajo del tope de la formación (Figura 2.3), solo en casos especiales se ubica por encima, en esos momentos el agua subterránea aflora en superficie, generalmente en forma de manantial. Por debajo del nivel freático, el agua contenida en estos acuíferos está sometida exclusivamente a la presión hidrostática (que genera el material que se encuentra por encima y que aumenta con la profundidad) más la presión atmosférica. Por tanto, cuando los espesores saturados son grandes, el agua que está a mayores profundidades se encontrará sometida a una presión significativamente mayor que la presión atmosférica. En contraposición, por encima del nivel freático, el agua se encuentra en lo que se denomina la zona vadosa, donde la presión es menor a la atmosférica debido al efecto de la tensión superficial del material poroso, entre mayores sean los espacios porosos la presión va a tender a igualarse a la presión atmosférica.



Tomado de: (Miliarium, s/a)

Figura 2.3. Simplificación de acuífero libre.

La recarga en este tipo de acuíferos procede directamente de la superficie, desde donde infiltra sin mayores obstáculos que los que impone el material permeable de la superficie.

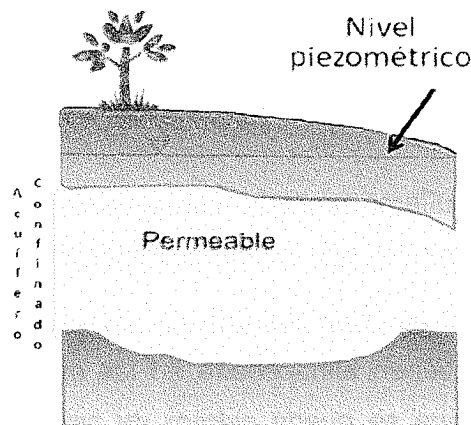
Al bombear un acuífero libre el agua es liberada por desaturación, es decir, de ellos solo puede extraerse el agua que tienen almacenada en los espacios intergranulares, es este sentido el volumen de agua que se puede extraer de este tipo de acuíferos es alto en relación con los otros tipos de acuífero.

c. Por otra parte, los conos de abatimiento que se producen gracias al bombeo suelen ser alargados en el pozo y con poca proyección horizontal, es decir, con radios de interferencia cortos.

Acuíferos confinados:

Los acuíferos confinados son aquellos en los cuales la capa permeable está completamente saturada de agua y se encuentra limitada superior, inferiormente y/o lateralmente por estratos de permeabilidad muy baja a nula (Figura 2.4). El efecto de la capa confinante superior es de sobrecarga, comprimiendo los materiales sólidos y aumentando la presión de agua almacenada a valores muy por encima de la presión atmosférica (presión de confinamiento= presión atmosférica + presión hidrostática + presión litostática de la capa impermeable y del resto del sustrato suprayacente).

Sin embargo aunque los estratos permanezcan confinados por grandes extensiones, es habitual que en algún momento, afloren en superficie, convirtiéndose localmente en acuíferos libres y es así como un acuífero confinado puede recargarse, generalmente del agua que precipita y se infiltra desde la superficie del terreno, a este modelo de recarga se le denomina recarga alóctona por no provenir de estratos inmediatamente adyacentes como en el caso de los acuíferos libres.



Tomado y modificado de: (Miliarium, s/a)

Figura 2.4. Simplificación de acuífero confinado.

El nivel piezométrico en este tipo de acuíferos es una superficie ideal que resulta de unir todos los niveles estáticos (siempre que no exista bombeo) y niveles dinámicos (cuando el bombeo comienza) en distintos lugares y momentos del acuífero. El nivel estático se encuentra ubicado por encima del tope de la capa saturada.

Al someterse a bombeo el agua que fluye del acuífero lo hace por efecto de la descompresión del agua intersticial, al intentar igualarse la presión atmosférica con la hidrostática. Al descomprimir mediante bombeo, puede obtenerse un volumen considerable de agua sin que se produzca un vaciado de los espacios porosos de la Formación, en este sentido, cuando se bombea un acuífero confinado se produce una disminución de la presión hidrostática proporcional al aumento de la presión litostática (disminuye el volumen de agua contenida en los poros pero disminuye también el tamaño de los poros, aumentando la presión intergranular), de forma que la presión de confinamiento se mantiene constante durante un tiempo. Si la explotación del acuífero continúa en el tiempo, puede inducirse el descenso de nivel piezométrico por debajo del tope del acuífero confinado. En ese caso el acuífero pierde confinamiento localmente y se convierte localmente en un acuífero libre.

Los conos de abatimiento en este tipo de acuíferos suelen ser de menor altura que en los libres, mientras que su radio de interferencia tiende a ser más alargado.

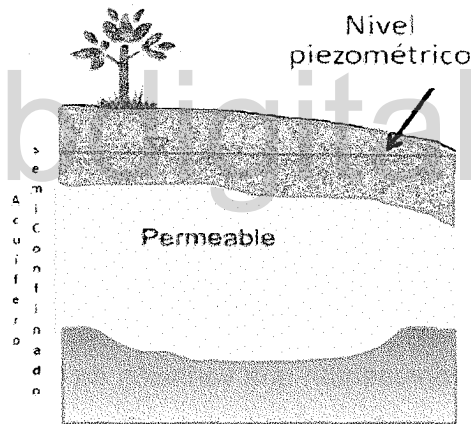
Acuíferos semiconfinados:

Los acuíferos *semiconfinados* representan una variación de los acuíferos confinados, en los que el estrato permeable se encuentra rodeado por estratos semipermeables (Figura 2.5) o en otro caso el estrato superior es semipermeable y el inferior impermeable. Por lo tanto la recarga de ese tipo de acuíferos suele ser autóctona desde las capas inmediatamente superiores, esta recarga suele ser muy lenta.

En lo que respecta al nivel estático, se encuentra por encima del tope de la Formación permeable y la presión a la que están sometidos todos los fluidos es mayor a la presión atmosférica, siguiendo la misma fórmula que para los acuíferos confinados.

Cuando se someten a bombeo, la cantidad de agua que circula a través de la capa permeable, es directamente proporcional a la diferencia de cargas entre el nivel estático y dinámico e inversamente proporcional a la resistencia hidráulica del mismo estrato.

En este sistema solo una parte del volumen bombeado procede del acuífero, el resto, es aportado por el estrato adyacente a la capa semiconfinada o estrato permeable, por lo que el abatimiento de los niveles piezométricos es menor que en el caso del acuífero confinado. Como la aportación vertical aumenta con el tiempo, el abatimiento de los niveles piezométricos va decreciendo hasta que la aportación vertical equilibra el caudal de extracción, momento en que los niveles piezométricos se estabilizan y se establecen los límites máximos del Radio de interferencia, este último suele ser de una longitud intermedia entre los que se producen en acuíferos libres y confinados.



Tomado y modificado de: (Miliarium, s/a)

Figura 2.5. Simplificación de acuífero semiconfinado.

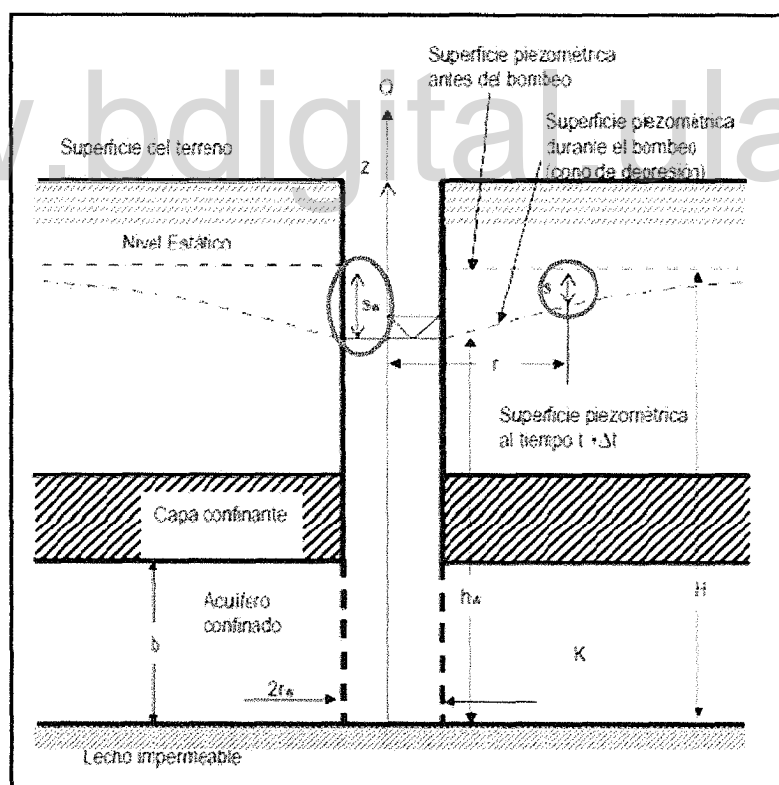
2.1.2 Interferencia de los pozos:

Bajo condiciones de extracción de agua en un pozo, la carga hidráulica inicial en cualquier punto del acuífero cambia, el nivel estático disminuye produciéndose un gradiente hidráulico entre la formación y el pozo; estas variaciones originan un movimiento radial y simétrico desde todas las direcciones de la formación hacia el pozo y de este modo se forma lo que se denomina cono de abatimiento, cuya curva representada en un plano vertical, se denomina

curva de abatimiento. El mayor abatimiento se produce dentro del pozo y a medida que la distancia aumenta, el abatimiento disminuye (Figura 2.6).

La forma, el alcance y la profundidad del cono de abatimiento dependerán de las condiciones de operación del pozo (caudal y tiempo de bombeo) y de las condiciones hidrogeológicas (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) propias del acuífero. De modo que a medida que el caudal y/o el tiempo de extracción aumentan el gradiente hidráulico es mayor. Adicional a eso, si la transmisividad de las capas permeables es mayor, menor será el abatimiento. Reacción contraria se presenta con el aumento del coeficiente de almacenamiento.

El efecto del abatimiento de un pozo puede llegar a afectar el desempeño de pozos cercanos, pues se produce lo que se denomina interferencia, un fenómeno mediante el cual la eficiencia de un sistema se ve afectada por la presencia de un fenómeno ajeno que se encuentra en posición cercana.



Tomado de: (Garzon, 1999)

Figura 2.6. Cono de abatimiento de un pozo – s_w : abatimiento en el pozo, s : abatimiento a una distancia r del pozo.

En este sentido, si el cono de abatimiento de un pozo A (Figura 2.7) llegara a irrumpir en la frontera del cono de abatimiento de un pozo B, se estaría produciendo una comunicación entre el flujo hacia ambos pozos, afectando la posición del nivel estático del pozo B, provocando una disminución en la eficiencia de extracción tanto en B como en A.

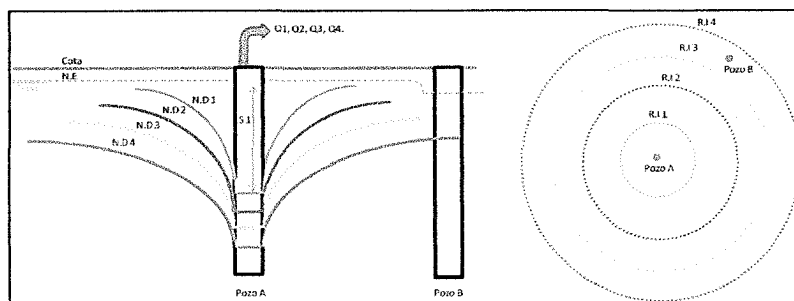


Figura 2.7. Representación longitudinal (izquierda) y en planta (derecha) del radio de interferencia.

2.1.3 Radio de interferencia:

Es un parámetro cuya definición surge en función de determinar la distancia mínima (radio permisible) necesaria que debe haber entre pozos vecinos para que la explotación de uno de ellos no afecte el desempeño de los demás (Figura 2.8). Es un criterio que debe emplearse conjuntamente con criterios técnicos de construcción y diseño de pozos, para la gestión de las aguas subterráneas.

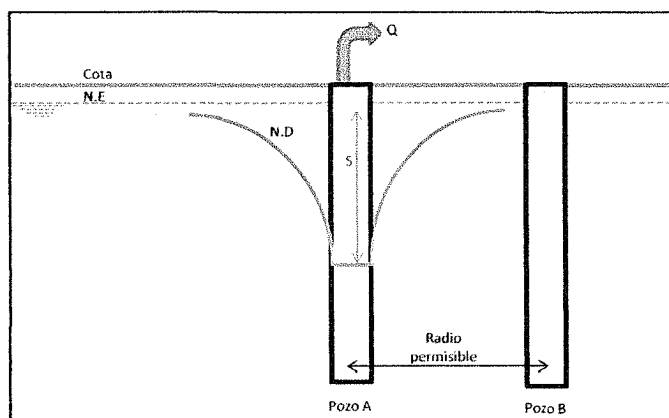


Figura 2.8. Radio de interferencia entre pozos.

Los acuíferos libres tienen un cono de depresión y un radio de interferencia mucho menor que los acuíferos confinados, por esta razón los pozos que captan agua de acuíferos confinados presentan mayores interferencias que sus homólogos en acuíferos libres (Figura 2.9).

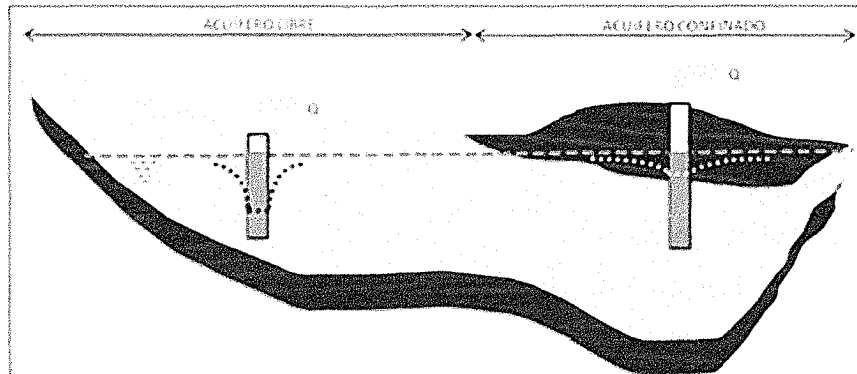


Figura 2.9. Forma idealizada del cono de abatimiento en acuíferos libres y confinados.

La ecuación 2.1 propuesta por Cooper y Jacob (1946), conocida como ecuación de Jacob, expresa la definición del concepto de radio de interferencia si se considera un abatimiento (s) nulo (Figura 2.10), es decir, la distancia a partir de la cual el pozo deja de producir interferencia. Por lo tanto, representa la forma de definir el caso más favorable que se puede presentar.

El valor del radio de interferencia viene dado por la ecuación de Jacob:

$$r = 1.5 \sqrt{\frac{T * t}{S}}$$

Ec. 2.1

Donde:

r = radio de interferencia (m)

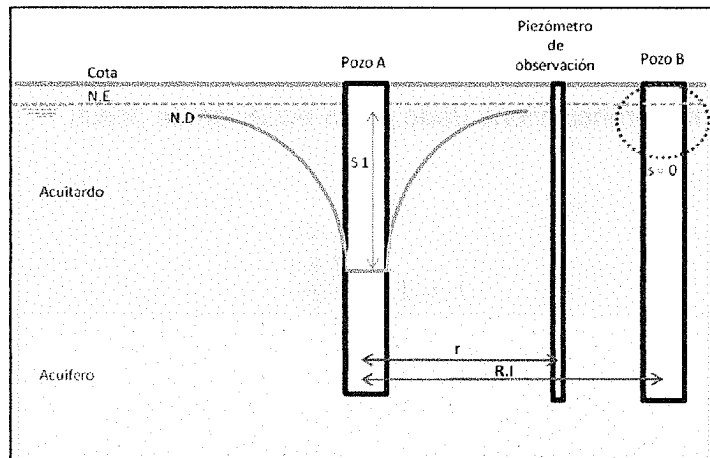
T = transmisividad (m²/día)

t = tiempo de bombeo continuo del pozo (días)

S = coeficiente de almacenamiento (adimensional)

Las condiciones tomadas en cuenta en la definición de la fórmula fueron:

- Acuífero confinado.
- Acuífero homogéneo e isotrópico.
- Acuífero horizontal y de espesor constante.
- Caudal constante.
- Ausencia de goteo.
- Acuífero de extensión infinita.
- El diámetro del pozo es infinitesimalmente pequeño, es decir, que no existe almacenamiento en el pozo.
- El pozo penetra todo el acuífero.
- Antes del bombeo la carga piezométrica en el acuífero es la misma en cada punto del acuífero.
- La descarga del pozo es obtenida exclusivamente del almacenamiento del acuífero.
- El almacenamiento en el acuífero es proporcional a la carga hidráulica.



Modificado de: (Arellano, 2008)

Figura 2.10. Esquema de conceptualización del radio de interferencia entre pozos vecinos cuando el abatimiento en el pozo B (s) es nulo.

En función de ajustarse más a la realidad, y evaluar situaciones diferentes al caso más favorable, Jacob (1946) propone la ecuación 2.2, considerando un abatimiento distinto a cero y tomando en cuenta la existencia del caudal de bombeo (Figura 2.11).

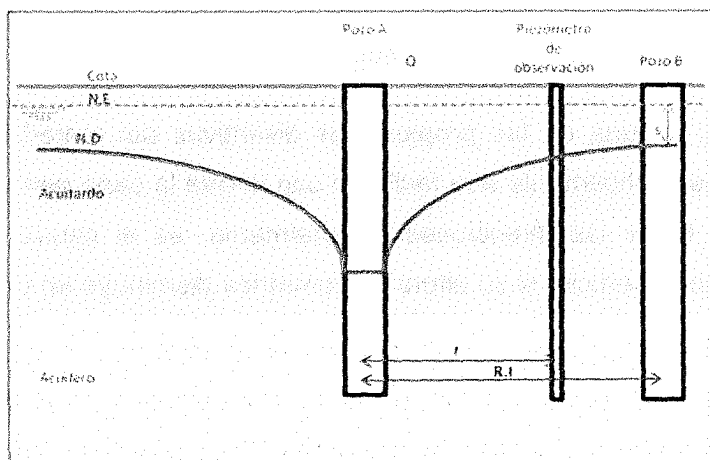


Figura 2.11. Esquema de conceptualización del radio de interferencia entre pozos vecinos cuando el abatimiento permisible en el pozo B (s) es distinto de cero.

www.bdigital.ula.ve

$$r = \sqrt{\frac{2.25 * t * T}{4 * \pi * T * s} * \frac{Q}{S}}$$

Ec. 2.2

Donde:

s = abatimiento en el pozo vecino (m)

Q = caudal de bombeo (m³/día)

2.1.4 Parámetros hidráulicos de un acuífero:

Los parámetros hidráulicos comprenden un conjunto de medidas que pueden obtenerse de un acuífero y que logran definirlo. Dentro de esta investigación se propuso emplear las formulaciones planteadas por Theis, 1935 para pozos que funcionen bajo régimen no permanente, con la finalidad de tomar las condiciones más críticas de los parámetros del

acuífero. En este sentido se asume que dentro de un pozo operado a caudal constante, el flujo no llega a estabilizarse (ni en el espacio ni en el tiempo) aun existiendo ingresos en el acuífero y que la zona de interferencia del pozo se propaga indefinidamente y con velocidades ascendentes. Así pues, los parámetros a calcular son los siguientes:

a. Permeabilidad o conductividad hidráulica:

La permeabilidad (K) es una de las propiedades distintivas del material que conforma al acuífero. Se refiere específicamente a la facilidad con la que la capa permeable es capaz de transmitir el agua en todas las direcciones. Formalmente, es el caudal que transmite un acuífero por unidad de superficie, si su altura piezométrica disminuye en una unidad.

La permeabilidad viene interferenciada por el tamaño de poro que tenga el material que lo conforme y por la calidad de las conexiones entre los espacios porosos. Si la capa está constituida por poros grandes pero mal interconectados, K será bajo, mientras que si tiene poros pequeños pero bien interconectados, K será mayor y tendrá un valor aun más grande si los poros son grandes y están bien interconectados.

Adicionalmente, K se ve afectado en menor medida por la viscosidad y el peso específico del fluido, estas dos magnitudes dependen de la temperatura y por lo tanto, en aguas subterráneas, donde las temperaturas son estables, la interferencia de estos parámetros es mínima y se desprecia.

b. Transmisividad hidráulica:

La transmisividad (T) es la capacidad que tiene la capa permeable de un acuífero para poder transmitir el fluido a través de ella por una unidad de espesor saturado; en este sentido, el concepto de T depende muy estrechamente de K como el parámetro que describe al material que conforma al estrato aprovechable. La transmisividad en un parámetro constante en el caso de acuíferos confinados debido a que en ellos el parámetro b es siempre el mismo. La transmisividad puede expresarse como:

$$T = K * b$$

Ec. 2.3

Donde:

T = transmisividad (m²/día)

K= conductividad hidráulica (m/día)

b = espesor saturado del acuífero (m)

Por lo tanto, la transmisividad se define como la cantidad de agua que circula a través de una sección vertical de 1m de anchura y de altura igual al espesor saturado del acuífero, afectado por un gradiente hidráulico cuyo valor es igual a 1.

c. Espesor saturado:

El espesor saturado (b) es la porción saturada de agua con la que cuenta el acuífero, la cual se puede determinar como la distancia entre la base del acuífero y el nivel freático en el caso de acuíferos libres o el nivel piezométrico en el caso de acuíferos confinados.

$$b = PR - NE$$

Ec. 2.4

Donde:

b = espesor saturado (m)

PR = profundidad de la base del acuífero (m)

NE = profundidad del nivel freático o piezométrico (m)

d. Capacidad específica:

La capacidad específica (CE) expresa la relación existente entre el caudal (Q) que se extrae de un pozo y el abatimiento (s) consecuente que se produce (Ec. 2.5). Este parámetro es un elemento importante a la hora de definir la eficiencia de un pozo en el caso de acuíferos libres, entre menor sea la CE menor será la eficiencia de un pozo, puesto que para que se logren valores altos de CE el abatimiento correspondiente a un caudal grande, debe ser pequeño, de este modo se logrará una capacidad específica alta y por lo tanto una eficiencia alta.

$$CE = \frac{Q}{s}$$

Ec. 2.5

Donde:

CE = capacidad específica (m²/día)

Q = caudal de bombeo (m³/día)

s = abatimiento en el punto de observación (m)

La capacidad específica también puede relacionarse con la transmisividad a través de la Ec. 2.6, dicha relación dependerá de las condiciones propias de cada acuífero.

$$T = CE * c$$

Ec. 2.6

Donde

T = transmisividad (m²/día)

CE = capacidad específica (m²/día)

c = constante dependiente de los parámetros hidráulicos del acuífero (adimensional)

e. Determinación de la constante c de la ecuación 3.6:

La relación entre la capacidad específica y la transmisividad de un pozo nace de la ecuación de Thiem, 1906 (Ec. 2.7), que permite obtener el descenso en cualquier punto del cono de abatimiento.

$$s = \frac{Q}{2 * \Pi * T} * \ln\left(\frac{R}{r}\right)$$

Ec.2.7

Donde:

s, Q, T han sido definidos anteriormente.

R = radio de interferencia del abatimiento (m)

r = distancia del eje del pozo al punto de observación (m)

Despejando T de la ecuación 2.7, se tiene:

$$T = \left(\frac{\ln\left(\frac{R}{r}\right)}{2 * \Pi} \right) * \frac{Q}{s}$$

Ec. 2.8

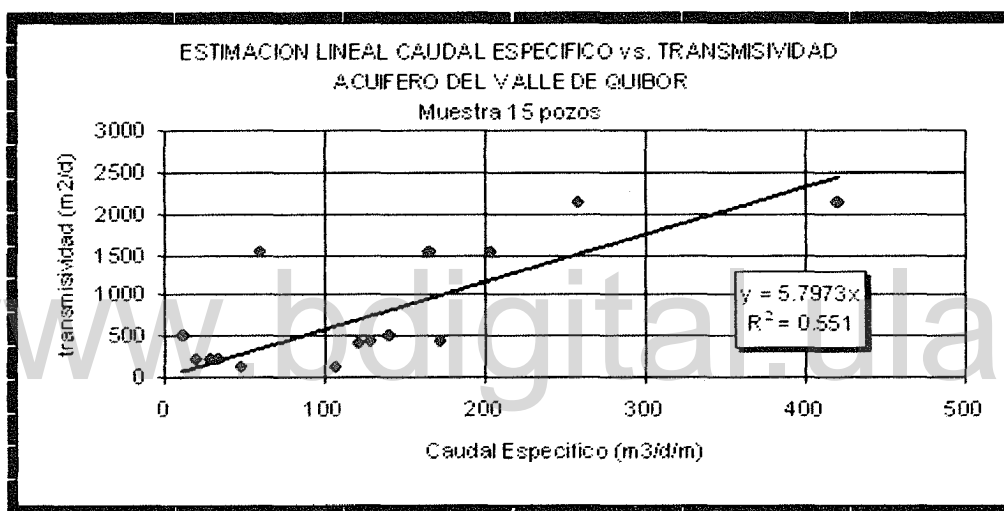
Si en la ecuación 2.8 se asumen R y r constantes, entonces el término $\ln R/r / 2*\Pi$, se puede reemplazar por una constante más sencilla como lo es "c".

$$T = c * \frac{Q}{s}$$

Ec. 2.9

Adicionalmente, si se toma en cuenta que la ecuación 2.5 define a la relación Q/s como CE, entonces también se podrá sustituir esta expresión en la ecuación 2.9, resultando la ecuación 2.6.

Por consiguiente, si la relación anteriormente explicada se mantiene, es posible concluir que existe una buena correlación entre las transmisividades de un pozo (T) y su capacidad específica (CE), relación que puede ser evaluada mediante un análisis de regresión lineal para determinar el valor de la constante "c". En (APROSELA, 2000) se determino el valor del coeficiente $c = 5.7973$ para los pozos ubicados en el valle de Quíbor (Figura 2.12)



Tomado de: (APROSELA, 2000)

Figura 2.12. Relación lineal entre Capacidad Específica (CE) y Transmisividad (T).

f. Coeficiente de almacenamiento:

El coeficiente de almacenamiento (S) es un parámetro adimensional que representa la cantidad de agua que, al descender 1m el nivel piezométrico en un pozo, puede ser liberada por el material poroso contenido en un prisma vertical de base 1m² y espesor correspondiente al espesor saturado del acuífero (Figura 2.13).

Se emplea comúnmente para definir el tipo de acuífero con el que se está trabajando, tomando en cuenta que acuíferos libres tendrán un coeficiente de almacenamiento más alto que acuíferos confinados, como se observa en la Tabla 2.1.

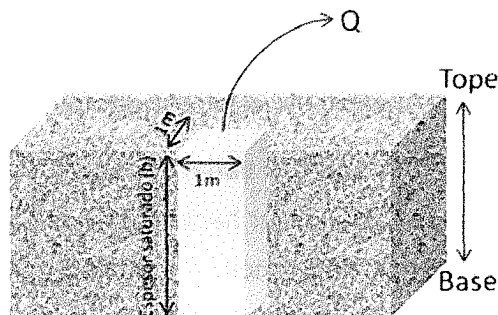


Figura 2.13. Diagrama explicativo del concepto de coeficiente de almacenamiento.

Tabla 2.1. Clasificación de los tipos de acuífero según su coeficiente de almacenamiento.

Tipo de Acuífero	Orden de S
Libre	$1 \times 10^{-2} - 1 \times 10^{-1}$
Semiconfinado	$1 \times 10^{-3} - 1 \times 10^{-2}$
Confinado	$1 \times 10^{-5} - 1 \times 10^{-3}$

Boonstra y Ridder, 1981, proponen la siguiente ecuación empírica para la determinación de S, tomando en cuenta el espesor de cada una de las capas que conforman un acuífero multicapas (Figura 2.14).

$$S_i = 1.8 \times 10^{-6} * (d1 - d2) + 8.6 \times 10^{-4} * (d1^{0.3} - d2^{0.3})$$

$$St = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$St = S1 + S2 + S3 + \dots + Sn$$

Ec. 2.10

Donde

S_i = coeficiente de almacenamiento para cada grupo de estratos evaluados (adimensional)

S_1 = coeficiente de almacenamiento para todo el pozo (adimensional)

d_1 = profundidad de la base del estrato impermeable

d_2 = profundidad del estrato permeable

2.1.5. Análisis geoestadístico empleado en la investigación:

El manejo estadístico de datos de las distintas variables en un acuífero ayuda a entender su comportamiento, es por ello que se debe iniciar haciendo un análisis conceptual del acuífero y de las variables que lo caracterizan, definiendo, en el caso de las variable, la distribución estadística a la cual se asocian, regionalizando variables puntuales a todo el acuífero y asegurando que ésta regionalización sea lo más cercana a la realidad. En ese sentido, el esquema a seguir en esta investigación es el que se muestra en la Figura 2.15 y que se ampliará en los párrafos que siguen, una vez definidos algunos términos básicos:

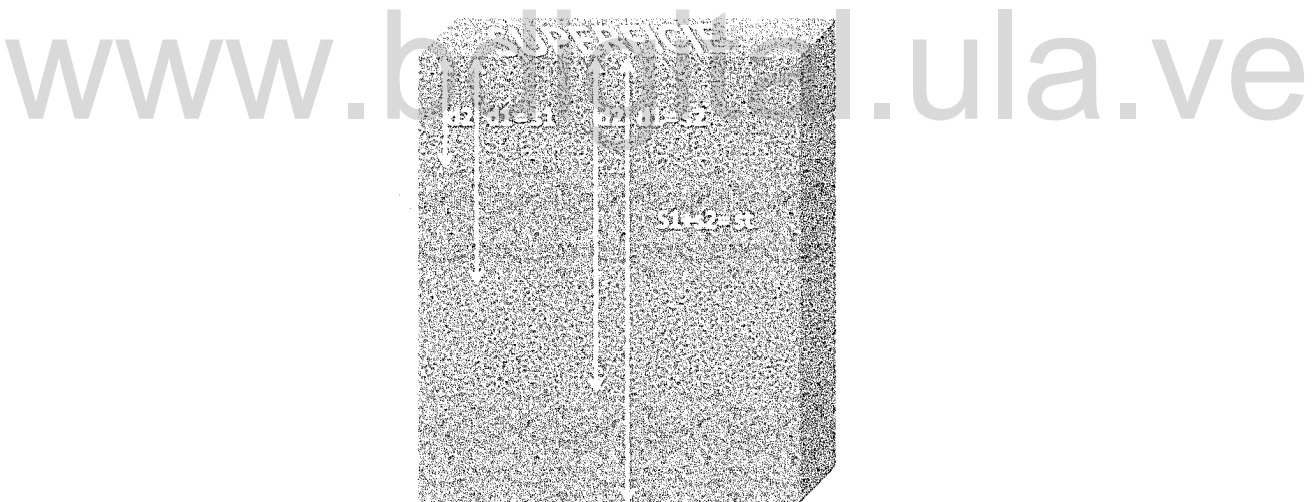
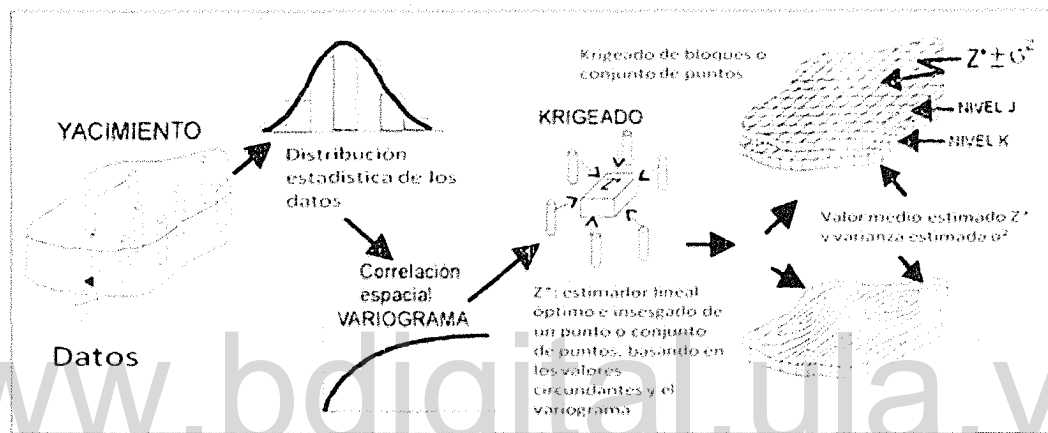


Figura 2.14. Diagrama de selección de d_1 y d_2 para la determinación de S_1 en el conjunto de pozos evaluados dentro del acuífero de Quíbor.

a. Geoestadística:

En el estudio de los recursos hídricos, así como en otras disciplinas, es frecuente encontrar problemas que requieren la toma y tratamiento de datos que representen la realidad del área

bajo investigación o yacimiento. En los mejores casos es posible obtener registros puntuales (testigos de sondeos) que por sí solos no pueden dar respuesta al comportamiento global de la variable a estimar en toda la extensión del acuífero. En función de solventar esta deficiencia, surge la *Geoestadística*, una rama de la estadística aplicada a la caracterización espacial de variables naturales, con el objetivo de tener una perspectiva integral y mejorada de la distribución de sus propiedades a partir de muestreos puntuales realizados en un área de interés.



Tomado de: (Samper Clavete & Carrera Ramírez, 1990)

Figura 2.15. Procedimiento de transformación de datos puntuales de una variable en una expresión de su comportamiento en todo un yacimiento.

En línea general, el propósito es estimar la función de distribución local de una variable espacial aleatoria con el fin de obtener mapas que faciliten la interpretación de las variables hidrogeológicas.

La *Geoestadística* es una técnica adecuada para representar situaciones en las que la variabilidad espacial afecta los resultados finales, pues se hace mano de los principios estadísticos para discriminar si una aproximación es o no de buena calidad. Además, permite obtener la estimación del fenómeno natural a partir de un conjunto de mediciones reales incluyendo la incertidumbre asociada. Este último hecho es importante cuando se requiere conocer el grado de certeza de un resultado, como por ejemplo, al estimar intervalos de confianza.

b. Variable regionalizada:

Una *Variable Regionalizada* es aquella variable aleatoria cuyo valor en un punto puede correlacionarse con el valor de la misma variable en un punto cercano, de modo que es autocorrelacionable. Toda variable de este tipo está formada por una componente estructural que es la que marca su relación con otros puntos en el espacio y una componente aleatoria, responsable de aquello que no se puede estimar salvo que se haga una medida exenta de error en el punto que se está infiriendo.

Las variables con las que se trabaja en hidrogeología son de este tipo y el interés que presentan es el de la posibilidad de ser representadas en un entorno amplio con buenos resultados.

c. Regionalización de las variables:

Para lograr hacer una buena regionalización de las variables a analizar, se plantea debe seguir la secuencia de pasos descritos en la Figura 2.16:

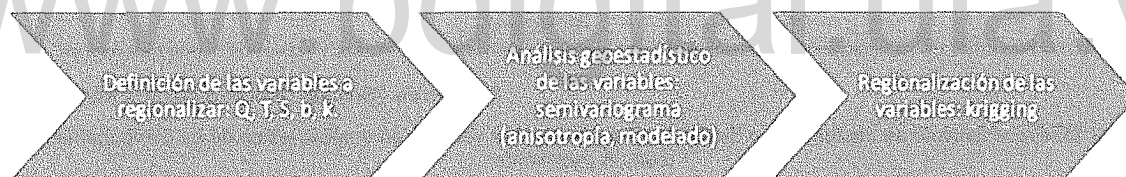


Figura 2.16. Pasos a seguir para la regionalización de las variables de un acuífero.

Semivariograma:

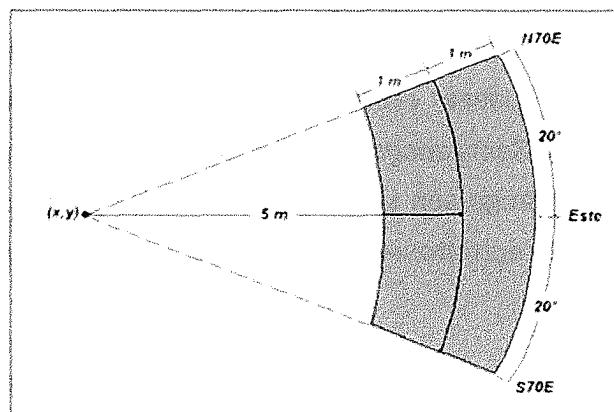
El primer paso que se debe dar en el análisis de las variables a regionalizar es hacer su análisis estadístico, el cual se inicia con la construcción de su variograma. Que no es más que calcular su semivarianza.

La magnitud de la semivarianza entre dos puntos depende de la distancia (h) que haya entre ellos, semivarianzas menores estarán asociadas a distancias menores y lo contrario para distancias mayores.

Cuando una variable es medida a intervalos regulares dentro de un trayecto, se puede calcular el valor del semivariograma para valores enteros de distancia "h", pero cuando se trata de las variables implicadas en las ciencias de la Tierra, la toma de muestra a intervalos regulares es casi imposible, no porque falte disposición de parte del personal de campo, si no que a veces es técnicamente muy complicado.

De este modo, el primer problema que se tiene cuando se trata de construir el semivariograma es que para cualquier valor de "h" escogido se tendrán muy pocos datos que estén separados exactamente por una distancia "h". De hecho, este problema ocurre igualmente cuando se trata de definir la dirección de construcción del semivariograma (θ), la cual se refiere a la dirección de mayor continuidad de los datos evaluados.

En función de que esta es la realidad con la que se debe tratar, se ha diseñado una solución práctica que consiste en aceptar cualquier par de datos cuya separación y dirección es más o menos cercana a una distancia "h" en una dirección " θ ", esta acepción se denomina valor de *Tolerancia*. De este modo, en la Figura 2.17 se muestra un ejemplo en el que el punto de inicio es el X, Y y su varianza se comparará con la de todos aquellos puntos que se encuentren dentro del área sombreada o área de *Tolerancia*, la cual se demarcó al definir una distancia $h=5m$, un incremento $h'=1m$ y una dirección $\theta=20^\circ$.



Tomado de: (Applied geostatistic, 1986 en Unal,N/A)

Figura 2.17. Zona de tolerancia para la búsqueda de datos en la construcción del semivariograma de una variable regionalizada.

Para definir el *Incremento* “h” más adecuado, se debe considerar que mientras más pequeño es el incremento, se tendrá la posibilidad de contar con una mejor definición del variograma, tomando en cuenta simultáneamente que la cantidad de datos sea lo suficientemente amplia para encontrar bastantes puntos en incrementos pequeños. Adicionalmente hay que prever que el número de incrementos estará limitado por la extensión del área bajo estudio.

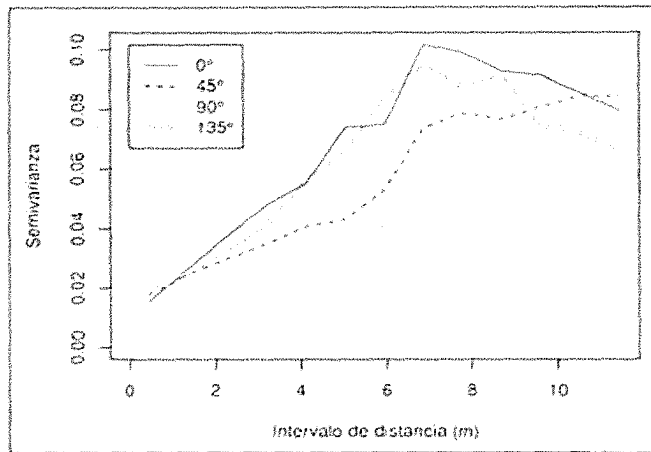
Obtener un buen modelo de *Semivariograma* va a depender de un trabajo iterativo en el que se intenta mover concienzudamente el *Incremento* y la *Tolerancia* hasta lograr una curva suave que describa adecuadamente la dispersión de la variable respecto de la distancia entre puntos en una dirección de interés.

Anisotropía:

Los datos de cualquier variable pueden tener una variabilidad espacial restringida a una sola dirección en el plano X, Y o en distintas direcciones del mismo, a este fenómeno de dispersión de la variable se le denomina anisotropía. Estudiar la presencia de anisotropías es necesario para definir correctamente cual es la dirección ideal en la que se debe calcular el semivariograma. De lo contrario, se evaluarán condiciones de varianza de los datos que no son las más representativas del fenómeno. En este sentido la determinación del *Semivariograma* y la *Anisotropía* van siempre de la mano.

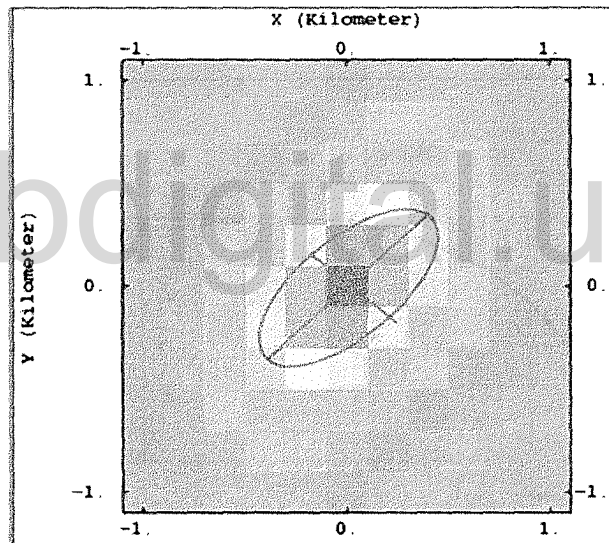
Para definir la existencia de anisotropía es importante tener suficientes datos en todas las direcciones en las que se desea probar la dependencia espacial de la variable. Posteriormente, se hacen los *Semivariograma* para distintas direcciones del plano XY, se evalúa si el efecto pepita y el rango son similares en todas las direcciones (Figura 2.18), de serlo se concluye que no existe anisotropía y se emplea el semivariograma omnidireccional.

Otra alternativa es la evaluación del diagrama de nube o rosa (Figura 2.19). Variables con comportamientos isotrópicos mostrarán una imagen circular, mientras que la anisotropía arrojará como resultado una imagen elíptica con el eje principal ubicado en la dirección de mayor anisotropía.



Tomado de: (Gallardo, 2006)

Figura 2.18. Semivariogramas en distintas direcciones – Herramienta para la evaluación de la anisotropía.



Tomado de: (Unal, N/A)

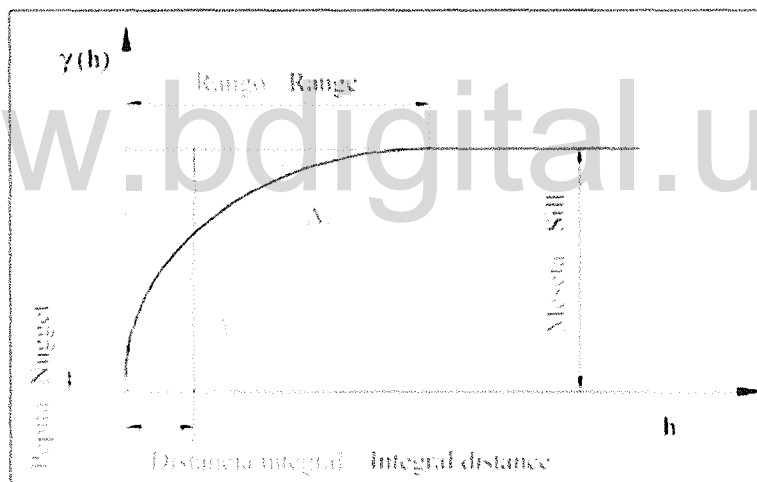
Figura 2.19: Diagrama de nube o Rosa – Definición de un comportamiento anisótropo de la variable. Los ejes principal y secundario indican direcciones de mayor anisotropía.

Cuando se ha observado la existencia de anisotropía el paso siguiente identificar si es de naturaleza geométrica o zonal, para cada caso existen procedimientos de corrección con la finalidad de que sean transformadas a una situación de isotropía.

Partes del semivariograma:

Luego de que se han definido las condiciones para la construcción del semivariograma: incremento, tolerancia y dirección de continuidad, se procede a su construcción, para ello es importante conocer los parámetros básicos que deben ser identificados y que caracterizan al variograma como son: **la meseta o sill, el efecto pepita o nugget y el rango o range** (Figura 2.20).

La **meseta** es el valor máximo que alcanza el *Semivariograma*, o dicho de otra manera, representa el punto en el que la variable deja de verse afectada por la distancia. En este sentido, el modelo esférico es el único que tiene una meseta real, mientras que los modelos exponencial y Gaussiano la alcanzan asintóticamente, este fenómeno dificulta su definición y el modelo lineal no tiene meseta.



Tomado de: (Garzon, 1999)

Figura 2.20. Elementos que definen a un semivariograma.

Teóricamente, la meseta coincide con el valor de la varianza y por tanto un buen estimador para definir la meseta es saber cuál es la varianza experimental de los datos que se están analizando.

Valor de la meseta \approx valor de la varianza de la variable.

El **rango** es la distancia en vertical a la que se alcanza la meseta e indica la zona de interferencia de un punto sobre los otros, es decir, para una distancia superior al rango, la autocorrelación es nula, por lo tanto, puede suponerse que los valores son estadísticamente independientes. Tiene un significado importante ya que informa de la zona de interferencia o continuidad del fenómeno bajo estudio.

Valor del rango \approx valor máximo de la autocorrelación

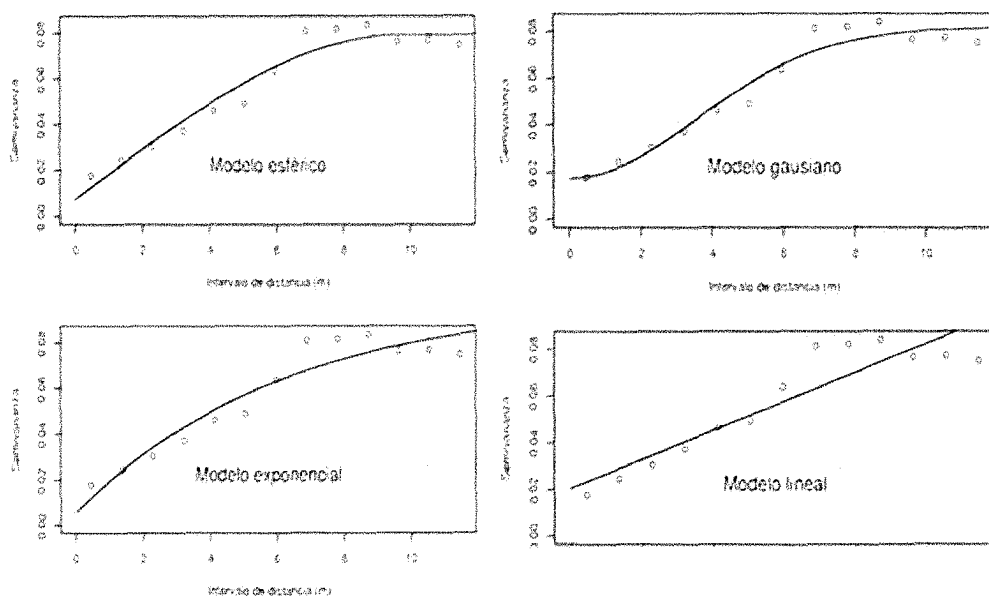
El **efecto pepita** es una discontinuidad o salto en el origen que presentan las variables. Corresponde a la ausencia de correlación espacial entre dos variables muy próximas. En ella también vienen reflejados los errores de medida.

Modelos de semivariogramas teóricos admisibles:

Existen diferentes *Modelos de Semivariogramas Teóricos Admisibles o Autorizados*, que son los que definen la forma de la curva resultante en la Figura 2.20, entre ellos: Modelo de efecto de pepita puro, esférico, exponencial y Gaussiano (Figura 2.21). Estos modelos están definidos en base a dos características importantes: el comportamiento del variograma en el origen (lineal, parabólico y con efecto de pepita) y la presencia o ausencia de meseta.

En algunas ocasiones el ajuste puede consistir en la suma de dos o más modelos, llamados anidados, que también constituye un modelo autorizado.

Dentro de los modelos existen algunos que se ajustan más a ciertas tendencias de los datos, tal es el caso del modelo Gaussiano, el cual otorga una fuerte correlación entre puntos próximos en el espacio. Mientras que el modelo esférico y exponencial, en general, se aproximan más al comportamiento real de fenómenos continuos.



Tomado de: (Gallardo, 2006)

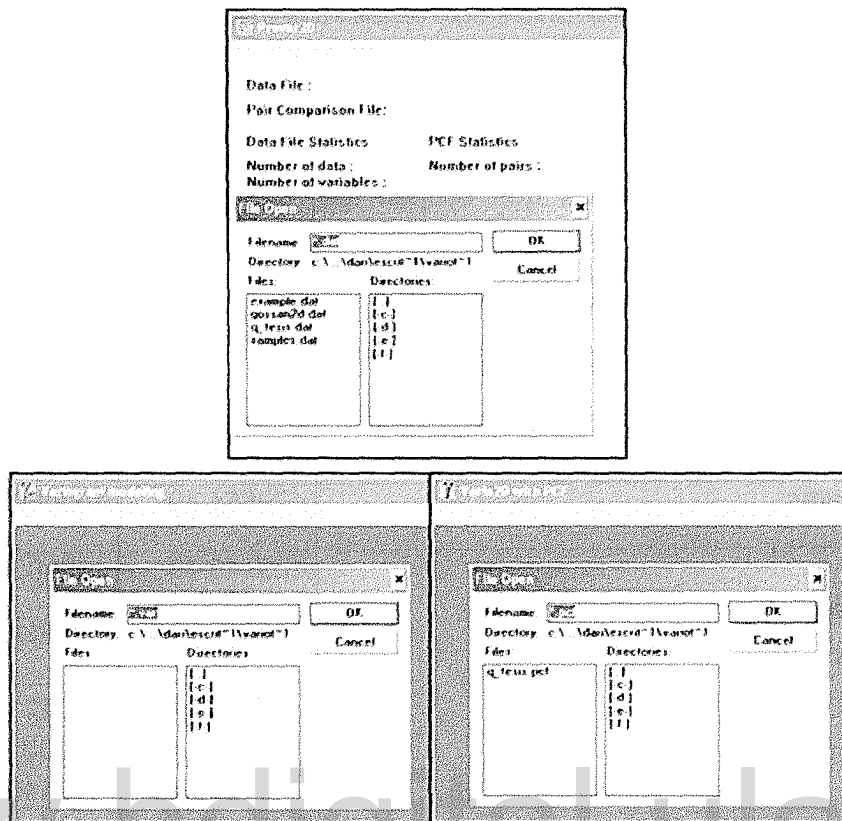
Figura 2.21. Modelos teóricos empleados comúnmente en los semivariogramas.

Modelado de semivariogramas:

Todos los procedimientos anteriormente descritos, son llevados a la práctica a través de un paquete diseñado para el modelado de semivariogramas, a pesar de que existen varios paquetes disponibles, se optó por emplear Variowin versión 2.1, programa elaborado en 1994 por Yvan Pannatier del Instituto de Mineralogía y Petrografía de la Universidad de Lausanne, Suiza.

El programa se seleccionó debido a que es de distribución gratuita y está destinado al modelado experimental de variogramas de superficie, direccionales y de nube en 2D, brindando la posibilidad de modelar anisotropías zonales. El software Variowin cuenta con 3 módulos de operación (Figura 2.22):

Prevar2D: trabaja con un archivo *.dat*, que exige un formato específico para la introducción de la data (Tabla 2.2). El objetivo de éste módulo es formar los pares de datos en un archivo con extensión *.pcf*, que se empleará en los futuros análisis que hace el programa.



Tomado de: Variowin 2.1 (1994)

Figura 2.22. Módulos de operación contenidos en Variowin 2.1. Imagen superior: Módulo Prevar 2D. Imagen inferior Izquierda: Módulo de Vario2D. Imagen inferior derecha: Módulo Vario 2D.

Vario2D with PCF: opera con el archivo *.pcf* creado en el módulo anterior. En este módulo hay varias pestañas que permiten cambiar los límites de la data, seleccionar el tipo de variografía (directa o cruzada), el estimador con el que se quiere trabajar (semivariograma, semivariograma estándar, covarianza, correlograma) y por último permite calcular el variograma direccional, de superficie o de nube en caso de haber seleccionado el semivariograma como estimador.

Para el cálculo de variograma debe ingresar el nombre de la variable a modelar (x,y,z), el de número de espaciamentos en cada eje (lags), la distancia entre lags, el ángulo de orientación del variograma y la tolerancia angular para el cálculo.

Tabla 2.2. Ejemplo de organización de información necesaria para el archivo de entrada del Prevar2D.

Línea	Parámetro	Ejemplo		
1	"Nombre de la variable y/o comentarios"	k 2008-2009		
2	Número de columnas que ocupan los datos	3		
3	Nombre de los datos de la columna 1	x		
4	Nombre de los datos de la columna 2	y		
5	Nombre de los datos de la columna 3	K		
7.....n	Datos	429854.49	1099899.72	49.35
		429746.49	1099853.72	13.95
		433828.49	1104077.74	1.22
		434464.47	1102217.72	49.03
		434681.48	1099011.73	23.53
		431330.48	1101460.71	74.24

Model: emplea el variograma obtenido en el módulo anterior con el fin de posibilitar su ajuste a un modelo teórico (único o compuesto), lo cual se logra manipulando el rango, sill, efecto pepita, para uno o varios modelos dependiendo de las exigencias que plantee el variograma experimental. Permite obtener ayuda acerca de cuál es el mejor modelo, para ello, se puede presionar el botón "Best fit found".

Krigging:

Luego de tener las variables estadísticamente preparadas, se procede a extrapolar su información a toda la extensión del acuífero, procedimiento que es posible a través de métodos de interpolación, de los cuales el más conocido y aplicado en geoestadística es el método de kriging o krigeado.

La técnica de interpolación kriging se basa en la premisa de que para datos que siguen una distribución normal, la variación espacial entre puntos cercanos es baja, lo cual permite correlacionarlos espacialmente. Mientras que datos muy distantes entre sí no presentaran una buena correlación. Este método forma parte de los estimadores *Lineales Insesgados*: *Lineal* porque sus estimaciones son combinaciones lineales ponderadas de los datos existentes. *Insesgado*, porque procura que la media de los errores sea nula. Es óptimo, porque los errores de estimación tienen una variancia de estimación mínima.

Para realizar una interpolación por el método de kriging es necesario que se cumplan dos supuestos:

- a. **Normalidad:** "la mayoría de los métodos geoestadísticos solo son óptimos si la variable a modelar (Z) sigue una distribución normal. Esto quiere decir que cualquier conjunto $Z = \{Z(x_1), Z(x_2), \dots, Z(x_n)\}$ sigue una distribución multinormal. Esta hipótesis es muy difícil de comprobar, aun disponiendo de un número de datos muy elevado. Por ello suele sustituirse por una hipótesis, mucho menos restrictiva, de que en cada punto x , la variable $Z(x)$ sigue una distribución normal" (Samper Clavete & Carrera Ramírez, 1990). Esta hipótesis se comprueba o rechaza a partir de mecanismos clásico como lo son: prueba de residuos estandarizados $i= 1^n$, contrastes o gráficos de normalidad. "Si de estas pruebas se concluye que la variable Z puede ser aceptada como normal, el problema se simplifica. De lo contrario se deberá proceder haciendo una trasformación de variables" (Samper Clavete & Carrera Ramírez, 1990)

Test de normalidad:

Contrastes:

- *Asimetría y kurtosis:* se hace uso del histograma y se observa el valor de la asimetría o sesgo, de modo que si existe normalidad, la asimetría tienen a aproximarse a cero, es decir, los valores se distribuirán como en una campana de Gauss. Al observar el

valor de la curtosis, este debe ser lo más próximo posible a tres, si el valor es mayor, la curva es bien puntiaguda, y si es menor la curva es bien achatada (Figura 2.23).

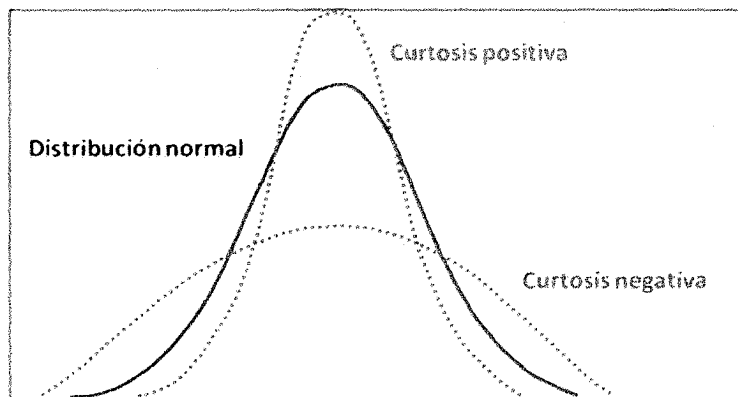
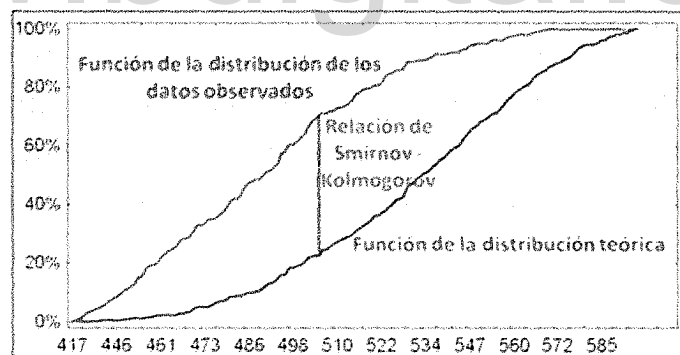


Figura 2.23. Graficas modelo de distribución normal y curtosis positiva y negativa.

- *Smirnov-Kolmogorov*: esta prueba tiene sus bases en la idea de comparar la función de la distribución acumulada de los datos observados con la de una distribución normal (teórica), midiendo la máxima distancia entre ambas curvas (Figura 2.24).



Tomado de: (statsoft,s/a)

Figura 2.24. Relación gráfica del test de Smirnov-Kolmogorov.

La prueba se inicia formulando una hipótesis nula (H_0) que indica que los datos de la muestra se ajustan a la distribución esperada, es decir, a la distribución normal. Se establece también una hipótesis alternativa (H_a), que indica lo contrario de la hipótesis nula.

Para aprobar o rechazar la hipótesis H_0 se utiliza un nivel de confianza alto, generalmente 95% y nivel de significancia (α) bajo, generalmente 5%. Bajo esta concepción, el valor real de la muestra se compara con el valor esperado de esa muestra para una distribución normal, si esta diferencia es suficientemente baja, se acepta la hipótesis nula, es decir, se acepta que los valores de la muestra se ajustan a una distribución normal.

- *Chi Cuadrado*: es una prueba de ajuste que funciona tal y como la prueba anterior, es decir, se refiere a la comprobación de la hipótesis nula, la diferencia es que la prueba Chi – Cuadrado es para datos agrupados y la comparación de datos observados y esperados no se hace mediante una resta directa si no siguiendo la siguiente formulación:

$$\chi^2 = \frac{(\text{Observado} - \text{Esperado})^2}{\text{Esperado}}$$

Ec. 2.11

Si, $\chi^2 < \chi^2_{m-p-1, \alpha}$, no se puede rechazar la hipótesis, es decir, se puede decir que los datos observados se ajustan a la distribución normal.

Donde:

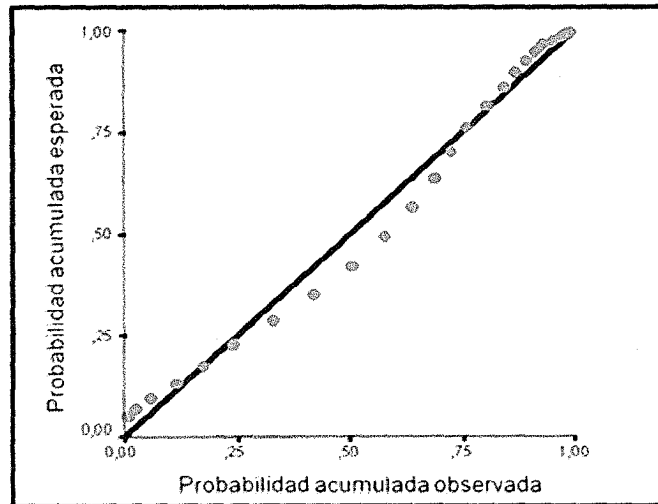
m = número de intervalos de clase

p = número de parámetros de distribución

α = nivel de significancia

Gráficos:

- *Gráfico P-P*: para este gráfico se representa en el eje de las abscisas la probabilidad real acumulada para cada valor de la muestra, y en el eje de las ordenadas, la probabilidad acumulada que le correspondería a ese valor si se tratase de una distribución normal. De ese modo el conjunto de valores de la muestra exhibirá una distribución normal si se aproximan lo suficiente a la recta resultante, como se muestra en la Figura 2.25.



Tomado de: (Gallardo, 2006)

Figura 2.25. Ejemplo de gráfico P – P.

- Gráfico Q-Q: un gráfico Q-Q es un gráfico como el P-P pero con los datos normalizados. Se comparan con una distribución normal $N(0,1)$. Del mismo modo que con el gráfico de probabilidades, en este gráfico, la muestra tendrá un comportamiento más cercano a la distribución normal entre mas se acerquen los datos a la recta resultante.

b. Estacionariedad (necesaria si se utiliza Kriging ordinario): la estacionariedad indica que al menos la varianza debe ser igual en las diferentes zonas del área de estudio. En este sentido, la falta de estacionariedad puede deberse bien a:

- *La existencia de anomalías en el espacio:* en este caso, lo más conveniente es dividir el espacio muestral de acuerdo a las diferentes poblaciones que se observen. Se realizan semivariogramas e interpolaciones para cada una de las poblaciones, para después unir todos los resultados en un único mapa. Otra aproximación al problema es restringir el radio de búsqueda de vecinos que ayuden a interpolar la zona no muestreada. Esta aproximación se basa en que en la mayoría de los casos la estacionariedad es “global” y no “local”, con lo que restringir el uso de vecinos a distancias convenientemente cortas puede llevar a estimaciones robustas de la variable en el espacio muestral.

- *La existencia de una tendencia o gradiente espacial cuya dimensión es mayor que el área de estudio:* este tipo de estacionariedad puede ser eliminado al realizar el semivariograma solo con los residuales. Por otro lado si se conoce la naturaleza de la tendencia, esta puede eliminarse directamente de la muestra total antes de procesarla.

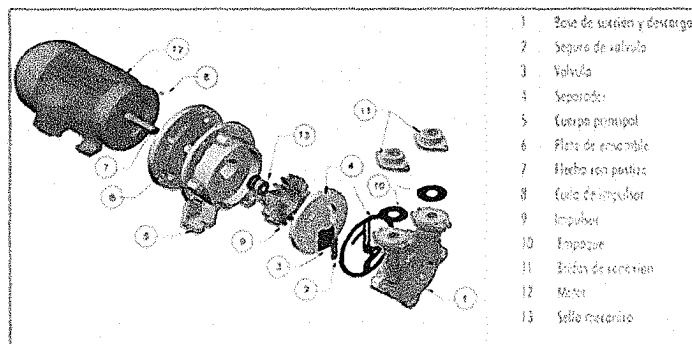
Al final del proceso, el kriging da como resultado un mapa de valores que en algunas ocasiones presenta la limitante de que la representación gráfica tiende a ser mucho más suave que la realidad, en estos casos se recurre a herramientas como la simulación para ajustar los resultados al comportamiento real de la variable.

2.1.6. Bombas:

Las bombas pueden ser definidas de forma muy general como dispositivos que se encargan de suministrarle energía a un fluido para que este se desplace desde un estado de presión estática a otro de mayor presión. En general, las bombas están compuestas por un elemento rotatorio denominado impulsor, el cual se encuentra dentro de una carcasa llamada voluta (Figura 2.26). El proceso de bombeo se inicia cuando la energía es transmitida como energía mecánica a través de un eje de la bomba, para posteriormente convertirse en energía hidráulica. El fluido entra axialmente a través del ojo del impulsor, pasando por los canales de éste, en ese momento la energía suministrada al agua es cinética y proviene del movimiento rotacional de los alabes que se encuentran en el impulsor, posteriormente el fluido es descargado en la voluta, donde la energía cinética adquirida se convierte en presión estática.

2.1.7. Curva característica de una bomba:

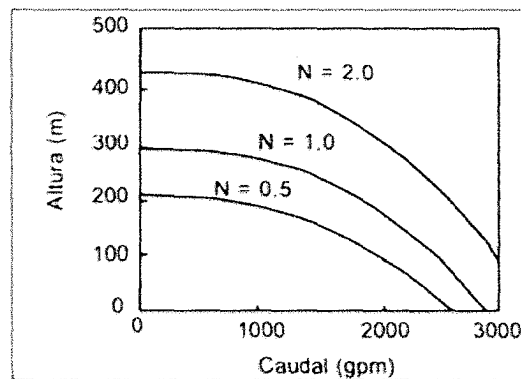
La curva característica de una bomba representa el rango dentro del que una bomba se encuentra óptimamente diseñada para funcionar, además de permitir al usuarios predecir lo que ocurrirá con el sistema bomba al variar el caudal manejado, por lo que resulta una herramienta de análisis y comprensión del funcionamiento del equipo.



Tomado de: (Bombas de vacío y deshidratación S.A de C.V)

Figura 2.26. Partes de una bomba de agua.

Así pues, la curva de funcionamiento de una bomba (Figura 2.27) representa la relación entre la altura (H) comunicada al fluido, el caudal de paso (Q), a su velocidad nominal de giro (N). La altura (H) se define como la energía comunicada al fluido por unidad de peso, o bien, la diferencia de presión entre la salida y la entrada de la bomba, y se representa gráficamente sobre el eje de las ordenadas en pies o metros. El caudal de entrega (Q) se representa gráficamente sobre el eje de las abscisas en las unidades de caudal seleccionadas. (Rossman & Martínez A, 2001).

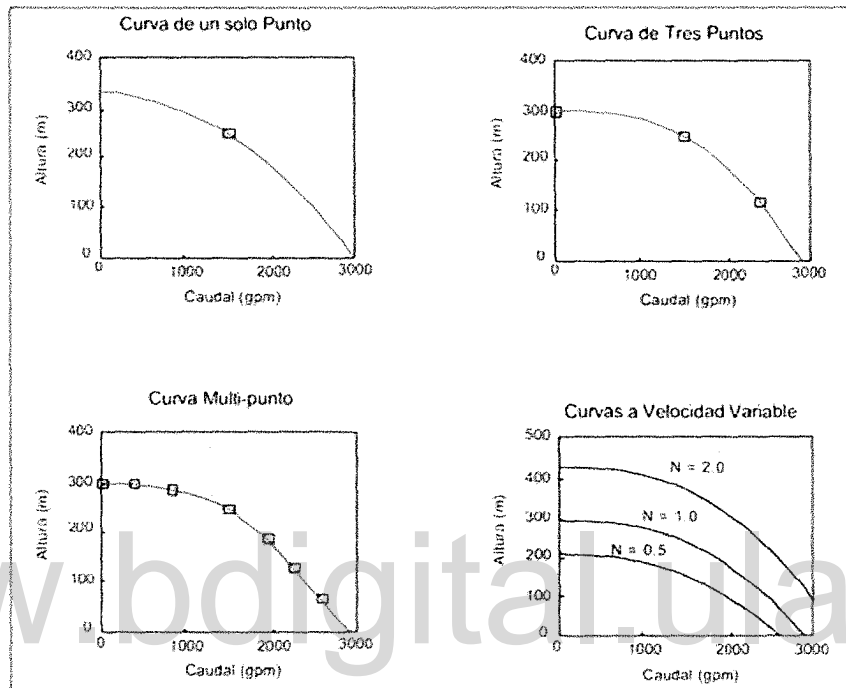


Tomado de: (Rossman & Martínez A, 2001)

Figura 2.27. Ejemplo de curva característica de una bomba para velocidades variables.

Para que la curva característica sea válida, la altura debe disminuir al aumentar el caudal. Para bombas comerciales, los fabricantes entregan las curvas junto con cada producto, sin embargo, para diseños preliminares se pueden construir curvas de bomba sintéticas cuyo

ajuste dependerá del número de puntos con los que se desee trabajar, en EPANET se ajustan 4 modelos de curva, entre los cuales el más sencillo es el de un solo punto, por ser el que menos información precisa (Figura 2.28).



Tomado de: (Rossman & Martinez A, 2001)

Figura 2.28. Ejemplo de curvas características en EPANET.

Dentro de EPANET, las curvas sintéticas pueden ser determinadas según las siguientes directrices:

- Curvas de un solo punto: “una curva de un solo punto queda definida por una única relación altura-caudal, que normalmente representará el punto de funcionamiento deseado o nominal de la bomba. EPANET añade dos puntos más a la curva, uno a caudal nulo cuya altura supone que es un 13% de la altura nominal, y otro a altura cero, cuyo caudal correspondiente asume que es el doble del caudal nominal. De este modo la curva es tratada finalmente como una curva de tres puntos.” (Grupo IDMH-UPV, 2001)

- Curva de tres puntos: “cuando la curva de una bomba se define mediante tres puntos, estos se interpretan como: un punto de funcionamiento a caudal bajo (altura a caudal nulo o caudal mínimo), n punto de funcionamiento a caudal máximo (caudal y altura máximos). EPANET intentará ajustar sobre los tres puntos una curva continua del tipo que se describe a continuación.” (Grupo IDMH-UPV , 2001)

$$h_g = a - b * Q^c$$

Ec. 2.12

Donde:

h_g = altura de impulsión de la bomba.

a,b,c= constantes de curva de ajuste.

Q= caudal de impulsión de la bomba.

- Curvas Multipunto: “La curva de una bomba se interpreta como una curva multipunto si el número de pares de valores altura-caudal proporcionados es dos, cuatro o más de cuatro. EPANET completará en este caso la curva de la bomba uniendo los puntos proporcionados mediante tramos rectos.

Para bombas de velocidad variable, la curva de la bomba se modifica a medida que cambia la velocidad. Las relaciones de caudales (Q) y de alturas (H) entre dos puntos semejantes, para dos velocidades de giro cualesquiera N_1 y N_2 , se admite que guardan las relaciones de las ecuaciones 2.13 y 2.14” (Grupo IDMH-UPV , 2001)

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2}$$

Ec. 2.13

Donde:

Q_i = caudales relacionados

N_i = velocidades escogidas.

$$\frac{H_1}{H_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2$$

Ec. 2.14

Donde:

H_i =altura correspondientes a los caudales relacionados.

2.2. Revisión de los estudios realizados en el Valle de Quíbor en relación al aprovechamiento de los recursos hídricos del acuífero de Quíbor:

En este particular se hará un bosquejo de las investigaciones realizadas en el Valle de Quíbor en materia hidrogeológica. Seguidamente se hará un recorrido por los trabajos efectuado en Latinoamérica en relación a la determinación y utilidad que ha tenido el parámetro radio de interferencia en sectores donde el aprovechamiento de agua subterránea es importante. Finalmente se hará un nuevo acercamiento al Valle de Quíbor, pero esta vez dirigiendo la mirada a los avances que se han planteado, se han logrado o han fracasado al momento de determinar el radio de interferencia.

2.2.1. El Valle de Quíbor:

Son muchas las investigaciones que se han hecho en el Valle de Quíbor en función de evaluar los recursos hídricos que pueden ser y son explotados, así como de las propuestas de manejo equilibrado de dichos recursos. A continuación se presentan algunos de los más relevantes estudios realizados desde el punto de vista hidrogeológico, con la finalidad de evaluar las variaciones en las características del recurso hídrico subterráneo en el tiempo y espacio.

a. En 1982, Carrasco hace una simulación del acuífero con base en el Modelo de Pinder (1975), el cual puede ser utilizado para analizar el flujo bidimensional en acuíferos que simultáneamente tengan comportamientos confinados, semiconfinados o libres, simulando la respuesta del acuífero al bombeo de uno o varios pozos a tasa constante. El modelo aplica a acuíferos irregulares, heterogéneos y anisótropos, recibiendo recarga de una capa semiconfinante o de un río o lago. Adicionalmente, en el trabajo se muestra una estimación de la escorrentía a través del método de García (1976) y se define que a pesar de que la estimación de la recarga por superficie fue poco confiable debido a la carencia de de datos (ausencia de aforo a la salida de las quebradas), se comprobó que el acuífero recibe poca recarga por escorrentía.

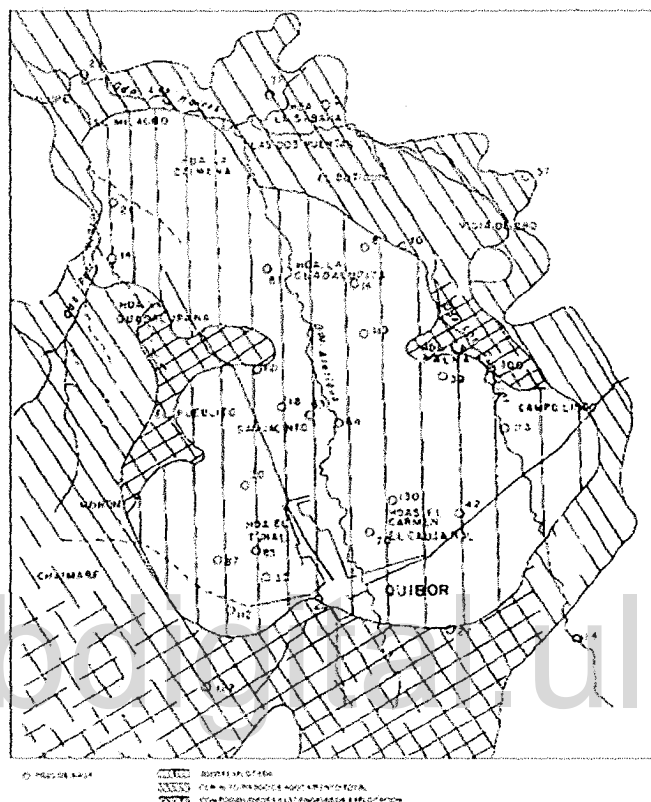
Luego de caracterizar el acuífero, el autor propone estrategias de explotación del agua subterránea en el Valle de Quíbor, con el objetivo de promover un aprovechamiento del recurso bajo el criterio de rendimiento seguro, es decir, haciendo uso exclusivo de las reservas reguladoras, evitando explotar las reservas permanentes y de este modo garantizar la preservación de los recursos del acuífero en el tiempo.

En este sentido, plantea dos estrategias que consideran económicamente factible, 1. Que el agua extraída de los pozos sea distribuía a través de un canal excavado o tubería hasta el sistema de riego, pues si se emplea en forma directa para el riego resulta antieconómico. Adicionalmente, recomienda una distancia menor a 500m entre pozo – canal o pozo - tubería. 2. Considera llevar a cabo una extracción que sea cuatro veces menor que la recarga. Finalmente, elige como opción más factible, emplear un ramal secundario con tubería. Adicionalmente, plantea que la distancia mínima entre pozos en servicio (radio de interferencia) sea menor o igual a 400m, tomando en cuenta las recomendaciones hechas dentro del trabajo de Aguilera y Padilla (1963).

b. Según la investigación hecha por **Alvarado en 1989**, son definidas dentro del Valle de Quíbor, tres áreas sobre las cuales se deben llevar a cabo distintas técnicas de manejo y control de la explotación: zona a: área sobreexplotada, zona b: área con alto riesgo de explotación, zona c: área con posibilidades restringidas de explotación (Figura 2.29). Los criterios tomados en cuenta para establecer esta zonificación tienen que ver con el análisis del régimen y el balance hídrico del recurso subterráneo. Con respecto a cada zona, el autor expone un conjunto de medidas orientadas a un aprovechamiento controlado del recurso agua para los diversos propósitos, sin que ello contribuya con el agotamiento definitivo del acuífero.

Desde el punto de vista hidrológico, dentro de la mencionada investigación se hace una correlación entre la precipitación registrada para el periodo 1.950-1.986 entre la estación Quíbor y el resto de las estaciones consideradas en el estudio, llegando a la conclusión de que el fenómeno de precipitaciones debe estar altamente interferenciado por la topografía, pues zonas con cota similar tienen también precipitaciones similares, para el caso de las

zonas bajas del valle la precipitación media es de 503mm, mientras que para las zonas más elevadas la precipitación resulta casi el doble (900mm).



Tomado de: (Alvarado, 1.989)

Figura 2.29. Zonificación del Valle de Quibor.

Al hacer un análisis de los eventos hidrológicos, Alvarado determina que la precipitación se distribuye con poca uniformidad de año a año y de un mes a otro, siendo mayor el coeficiente de variación para los meses de sequía (diciembre-marzo), pues un solo evento torrencial puede hacer que se registren valores de precipitación similares a los de un mes húmedo. Estos casos a pesar de no ser representativos del comportamiento climático de un mes, son muy frecuentes en el Valle, lo cual es un indicativo de la torrencialidad de las precipitaciones.

Este mismo patrón se presenta de un año a otro. El autor hace un análisis de la data disponible para los años 1945-1986 (41 años) y observa que 10 de estos años pueden considerarse por fuera de la media, 5 de ellos como años muy húmedos y los 5 restantes como años muy secos, sin embargo no siguen ningún patrón regular, lo que los hace difíciles de predecir. Este comportamiento hace que la dependencia para el riego o consumo humano de los recursos hídricos superficiales sea muy arriesgada. Adicionalmente, concluye que la ocurrencia de periodos secos prolongados puede ser la casusa de graves problemas económicos, con interferencia local y nacional.

Por otro lado, con una data de 10 años (1975-1985) explica que la evapotranspiración es un fenómeno más constante a nivel anual mientras que a nivel mensual tiene una distribución bimodal con dos máximos, el primero de enero-marzo y el segundo de julio-septiembre y dos mínimos que ocurren en abril-junio y en octubre-diciembre. En las estaciones con menor altitud se observan los mayores valores de evaporación, en relación con las estaciones ubicadas a mayores elevaciones.

Desde el punto de vista hidrogeológico, hace una descripción de las formaciones presentes en el Valle, su composición, origen y relación dentro de un contexto caótico donde la complejidad tectónica y la gravedad han sido la principal causa de la disposición de las rocas y sedimentos que conforman las capas permeables e impermeables del surco de Barquisimeto, lugar en el que se aloja el Valle.

Las zonas que rodean a la planicie del Valle son en su mayoría flysch del Cretácico y Terciario, mientras que las que conforman el Valle como tal, zona en la cual se desarrolla el acuífero de Quibor, son de origen fluvio-lacustre y pertenecen al Cuaternario, con predominio de sedimentos finos del tipo arcilla y limos con intercalaciones de espesor variable de arena, gravas y peñones que conforman los cuerpos con potencial de almacenar y transmitir el flujo de agua.

En general, la disposición de los sedimentos en el subsuelo es lenticular e interdigitada con cambios de espesor y facies bruscos en corta distancia, fenómeno particularmente visible en la zona Sur del Valle, donde los depósitos son producto de conos de deyección. Adicionalmente, describe que los procesos tectónicos en el Valle han promovido el fraccionamiento de los conos de deyección y su superposición, contribuyendo a una distribución irregular de las capas acuíferas.

Define dos unidades litológicas acuíferas, la primera de ellas consiste en materiales con porosidad intergranular con importancia hidrogeológica de pequeña a grande, que constituyen los cuerpos de donde se extraen las mayores cantidades de agua. Mientras que la segunda, corresponde a materiales con porosidad por disolución del material calcáreo o fracturamiento, con cualidades hidrogeológicas de medianas a pequeñas y profundidades mucho mayores que la primera unidad, destacando su cualidad para recarga profunda del acuífero.

Como resultado de un análisis de medio poroso hasta una profundidad de 100m, determina que el acuífero comienza a unos 60cm de la superficie, con una capa delgada de sedimentos tipo arcilla y limos, hacia el sur, el relleno fluvio-lacustre está constituido por facies arenosas, con condiciones apropiadas para la infiltración. Hacia el sector norte (hacia la parte de arriba del alto geológico denominado Los Cerritos) la distribución de medio poroso es pobre e irregular, con rápidas variaciones longitudinales. En general, para todo el Valle resultan valores de porosidad de 34% para las capas permeables y 66% para las capas impermeables.

Otra de las conclusiones que se exponen en esta investigación se refiere al desequilibrio que tiene el balance hídrico en el Valle de Quíbor (relación entre recarga y descarga), producto de la explotación intensiva que se hace evidente en la disminución de los niveles de agua en las capas acuíferas. Para los niveles reportados entre 1961 y 1963 (Aguilera y Padilla, 1963), el descenso medio anual es de 1 a 2m en las zonas adyacentes a la Quebrada Las Guardias, mientras que el resto del Valle el valor es ligeramente menor. Los valores presentados en esta investigación revelan que en el Norte, entre los años de 1963-1987 los niveles descendieron a 53m y en el Sur disminuyeron entre 50 y 90m. Como consecuencia de este fenómeno, la transmisividad ha disminuido también, presentando una media de 1150 m²/día.

En este estudio también se evaluaron pruebas de bombeo hechas por otras empresas. Las pruebas tuvieron una duración de 24 horas a caudal constante y con pozos de observación. Como resultado, se elaboraron mapas de abatimiento vs. tiempo y abatimiento vs. distancia.

Para finalizar, Alvarado plantea la determinación del radio de interferencia como un parámetro de interés práctico para propietarios de pozos y organismos encargados de la administración de los recursos de agua subterránea. Propone la fórmula de no equilibrio de

Theis modificada por Jacob, para la determinación del parámetro y la emplea para comparar la calidad de los resultados de los parámetros de transmisividad y coeficiente de almacenamiento mostrados en los trabajos de Aguilera y Padilla, Carbajal y Aguasuelos ingeniería, encontrando rangos muy amplios para los 3 autores, que van desde 593m hasta 19361m. En función de esta disparidad, propone que para obtener resultados representativos del radio de interferencia se debe determinar con exactitud el tipo de acuífero que se analiza, analizar todas las características hidrogeológicas de la región y tener certeza de que las pruebas de bombeo, a partir de las cuales se están definiendo la transmisividad y el coeficiente de almacenamiento, fueron hechas perfectamente.

Una consecuencia importante de esta investigación, es que muchas de las recomendaciones hechas, han sido tomadas en cuenta o por lo menos solventadas en el Valle de Quíbor. En este sentido, se han desarrollado estudios detallados de la salinización de los suelos en el Valle, modelos para establecer con buena precisión el tope de roca y el espesor del relleno fluvio-lacustre, proyectos de factibilidad de recarga artificial del acuífero, entre otros.

c. Torres, 1993 en su tesis hace una evaluación completa de los recursos de agua subterránea en el Valle de Quíbor con énfasis en los parámetros de calidad para el agua de riego.

Evalúa un total de 59 pozos distribuidos en la totalidad del Valle, los resultados revelan que la concentración salina varía entre 0,86 dS/m al suroeste y 5,46 dS/m al noroeste del Valle, al oeste las concentraciones varían entre 1,06 y 1,76 dS/m. Elige las clasificaciones de la USDA (1954), FAO (1987) y Pla y Dappo (1974), concluyendo que 4 de las 59 muestras analizadas se comportan como bicarbonatadas cálcicas, confirmando así el deterioro del acuífero sobre todo en el área que encierra el centro del acuífero, el resto de las muestras tienen un comportamiento sulfatado cálcico. Estos resultados califican al agua para riego como de baja peligro en cuanto al sodio y alto peligro de salinidad.

En lo que se refiere a los parámetros hidrológicos del acuífero se apoya en los resultados más relevantes expuestos en investigaciones previas que coteja con los resultados del modelado que hace del acuífero según el Modelo GW7, de este modo, señala que los valores de transmisividad ($50 - 3000 \text{ m}^2/\text{día}$) y almacenamiento ($1 \times 10^{-2} - 9 \times 10^{-2}$), definen el

comportamiento del acuífero como libre al Norte y Centro de la cuenca, mientras que hacia el Sur es confinado.

Con base en los resultados del modelo que él propuso y calibro para el Valle en los periodos 1992-1997 y 1997-2000, propone seis políticas de explotación a seguir, tomando en cuenta la conservación de las reservas permanentes del acuífero, la disminución del tamaño de los conos de depresión (para evitar la interferencia de un pozo sobre otro) y la recuperación de los niveles freáticos.

En cuanto a los mecanismos de recarga natural del acuífero, el autor los define como ineficientes, debido a la acción combinada de varios factores: 1. La ocurrencia simultanea de precipitaciones bajas y torrenciales y alta tasa evapotranspirativa, que no permite la concentración de grandes cantidades de agua sobre el suelo. 2. La cualidad poco permeable de los suelos dificulta la percolación vertical, lo cual restringe la recarga al flujo subsuperficial procedente de los cauces de los ríos que transitan a través del Valle. Adicionalmente, menciona estudios en los que se han evaluado cuantitativamente las reservas y la recarga natural del acuífero, junto con otros estudios que plantean zonas factibles para la recarga artificial, dentro de las que se destacan al Norte la quebrada Baragua y al Sur la quebrada Atarigua.

Respecto del descenso de los niveles en el acuífero hace una comparación entre los obtenidos por Alvarado en 1986 y 1987 (aproximadamente 0,5m) y los de su investigación en 1992 (hasta 18,8m), observando que las mayores disminuciones de nivel son experimentadas en el Centro del acuífero y en menor medida hacia el sector Sureste, evidencia que junto con otras investigaciones hacen que se defina al acuífero de Quibor como un cuerpo bajo sobreexplotación.

Como alternativas de remediación de la situación de sobreexplotación, menciona la posibilidad de zonificar el Valle en función de definir lugares donde se permitan o restrinjan, según el caso, la concesión de nuevas explotaciones. Por otra parte apoya la opción de efectuar el transvase del embalse del río Yacambú y de la cuenca del Tocuyo hacia en Valle de Quíbor, alternativa no solo es útil para apalea la situación de sobreexplotación, sino también para promover el desarrollo agrícola de la región y disminuir los procesos de salinización asociados.

d. **García y Dugarte, en 1995**, hacen un resumen del uso que se le da al agua en el Valle de Quibor, exponen una sencilla pero concreta descripción y cuantificación de la disponibilidad del recurso hídrico, entre los que destaca el escurrimiento superficial, el agua subterránea y las fuentes menores de agua (aguas residuales, agua de drenaje del túnel de trasvase, sistema de Riego San José de Quibor y aguas de drenaje de la planta de tratamiento) que en su totalidad representan 102,34 MM³.

Adicionalmente, contrasta en forma de balance hídrico, la oferta con la demanda y las pérdidas que presenta cada una de las fuentes del recurso, concluyendo que las pérdidas de agua por evaporación representan un 47% del agua disponible en todas las fuentes, la disponibilidad de agua bruta destinada a cubrir las necesidades evapotranspirativas de los cultivos se sitúa en 44,3%, las condiciones de semiarides del Valle determinan la imposibilidad de realizar actividades de tipo agrícola sin el uso de riego integral que cubras las altas demandas evapotranspirativas de los cultivos.

A su vez hacen una descripción la forma cómo se han adaptado los métodos de riego más ampliamente conocidos en el mundo (cantero y serpentín para cultivos de raíz superficial, surcos largos para caña de azúcar y melgas largas para pastos) a las condiciones propias del Valle, que incluyen suelos erosionables con elevado contenido de limo, baja velocidad de infiltración y presencia significativa de sales tanto en agua como en suelo.

Al hacer un análisis de los sistemas de riego empleados, destacan que su eficiencia depende de dos procedimientos: 1. aplicación del agua 2. distribución del agua, en el primer caso depende de las condiciones naturales del predio, de las habilidades y destrezas del regador, tanto en el acondicionamiento del suelo para el riego como en el manejo del agua. Mientras que en el segundo caso, depende de un apropiado acondicionamiento del terreno que permita disminuir las diferencias en el tirante de agua entre distintos puntos del área regada. En cualquiera de los casos, es optimista en las capacidades que se tienen para mejorar si se efectúa un diseño apropiado y más tecnificado de los sistemas de riego y si se aplican técnicas más eficientes de manejo del agua en el predio.

e. En el año **2000 el CIDIAT** desarrolla junto con **APROSELA** un proyecto en el que se determinó la recarga del acuífero del Valle de Quibor para el período 1964 – 2001 utilizando el modelo de simulación paramétrica SIHIM (Duque, 1981), determinando que la extracción a

través de los pozos es superior a la recarga media estimada. Los valores de históricos de transmisividad para el acuífero de Quíbor se sitúan entre 50 y 3000 m²/d con un promedio de 960 m²/d. Otro de los productos importantes de esta investigación fue la construcción de un modelo digital para el terreno como herramienta para homogeneizar la información altimétrica de los pozos y para establecer la comparación de la evolución histórica de los niveles del acuífero. Así mismo, se establece la dirección de flujo preferencial del agua subterránea de las periferias del Valle hacia el centro y según la morfología de los niveles se concluye que la posibilidad es mínima de que salgan el agua del acuífero por otra vía que no sea la de la extracción directa mediante los pozos productores

f. En **2004, Uzcátegui** desarrolló una investigación en la que evaluó los impactos de recuperación del acuífero del Valle de Quíbor en el corto (18 meses) y mediano plazo (10 años), al realizar una recarga artificial; evaluando propuestas de inyección de agua en capas profundas y superficiales.

Empleó el programa MODFLOW 3.0 para modelar a través del método de diferencias finitas el comportamiento del acuífero, para ello evaluó datos previos del modelo de superficie y modelo del basamento rocoso o base del acuífero y le integró información de conductividad eléctrica, almacenamiento, zonas de flujo nulo y zonas de recarga natural por aportes subterráneos de las quebradas Las Guardias y Atarigua, así como zonas de recarga artificial.

Propuso una recarga artificial de aproximadamente 30L/s/pozo, a través de 30 pozos verticales distribuidos en el predio del portal de salida del sistema de Riego Yacambú-Quíbor (sur oeste del Valle), así como en las adyacencias de la quebrada Las Guardias. Expresando que la dificultad de efectividad de este procedimiento es directamente proporcional a la permeabilidad del acuífero y el tiempo de colmatación de los pozos, variables que fueron estudiadas en trabajos previos en los que se generó una relación estadística entre ambas variables (Custodio y Llamas, 2001), además de esto el estudio sugiere tomar en cuenta la calidad de agua a inyectar, para evitar que se modifiquen las condiciones de calidad propias del recurso del acuífero.

Dentro de los resultados obtenidos se destacan que las mejores posibilidades para la recarga artificial al corto y mediano plazo, se tienen al recargar capas profundas en pozos ubicados en las adyacencias de la quebrada Las Guardias y a la salida del túnel de trasvase

del sistema de riego Yacambú-Quíbor. Sin embargo, destaca que la recarga superficial o a niveles muy poco profundos es irrelevante pues no incrementa los niveles del acuífero.

g. En 2011 el CIDIAT desarrolló una nueva investigación dentro del Valle de Quíbor, junto con el apoyo logístico de la Asociación de Productores y Servicios Agrícolas del Estado Lara – Aprosela y la empresa Sistema Hidráulico Yacambú Quíbor – SHYQCA.

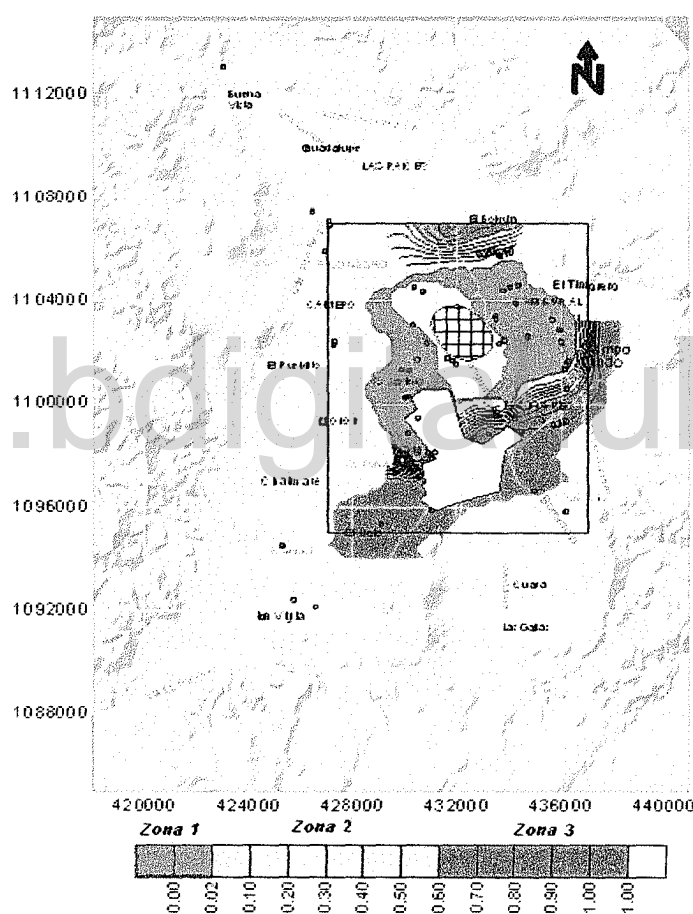
El trabajo fue denominado *Estudio sobre criterios y parámetros para el aprovechamiento del agua subterránea en el Valle de Quíbor* y consistió en definir los criterios y parámetros que se pudieran considerar útiles para el mejor aprovechamiento del agua subterránea en el Valle de Quíbor. Para ello comenzaron por hacer un modelo digital del terreno mediante el que se pudieran determinar la cota de un punto cualquiera dentro del Valle de Quíbor, así mismo, fue creado un mapa del lecho rocoso, que junto con un mapa de niveles de agua dentro del acuífero, permitiera establecer los espesores saturados en distintos sectores del Valle. Otro alcance importante fue la delimitación para el momento, y respectiva zonificación del acuífero central de Quíbor, el más grande y de mayor importancia en la región (Figura 2.29).

Seguidamente, recopilaron y analizaron la información existente y otra proveniente de levantamientos de campo en la zona, con la finalidad de hacer determinaciones fiables de los parámetros hidrológicos del acuífero (caudal, conductividad eléctrica, coeficiente de almacenamiento y transmisividad). Para la etapa de campo se hicieron pruebas de bombeo en 61 pozos.

Una de las contribuciones más importantes de esta investigación fue la determinación de la recarga promedio obtenida mediante el modelo de simulación paramétrica, para distintos periodos de cálculo, definiéndose como valor de referencia $22,5 \text{ MM}^3$ para los próximos 10 años y en función de este valor y de los valores de explotación del acuífero, se concluye que la tendencia de disminución de niveles en el acuífero es de $1,1 \text{ m/año}$ y que el mayor impacto en el descenso de niveles será causado por un aumento de la producción de los pozos para la zona 1 (sector delimitado en rojo en la Figura 2.30).

Dentro de las recomendaciones para el manejo adecuado de los recursos hídricos del Valle, presentaron las bases para establecer los gastos máximos a extraer.

h. . En el año 2012 el CIDIAT elabora otro estudio para el Sistema Hidráulico Yacambú – Quíbor en el que realiza la caracterización de las áreas de recarga y dinámica hidrogeológica del acuífero del valle de Quíbor, proponiendo 6 escenarios para la inyección de agua en los pozos a un caudal de 25 L/s por pozo en baterías de 4 pozos. Considerando especialmente factibles 2 de estos escenarios, donde la recarga se prolonga más temporalmente de los cuales considera especialmente factibles.



Tomado de: (CIDIAT, 2011)

Figura 2.30. Mapa de zonificación del acuífero central de Quíbor.

Así mismo, observa que la recarga puntual (en las zonas escogidas a partir de la información de sondeos eléctricos verticales) de grandes volúmenes de agua durante periodos

prolongados de tiempo no solo provoca una recuperación del nivel general del acuífero si no que también genera una sobre elevación del nivel local del acuífero en la zona de inyección respecto al nivel general del acuífero.

2.2.2. Estudios relacionados al radio de interferencia entre pozos:

En cuanto a la determinación del criterio radio de interferencia entre pozos dentro de un acuífero, son numerosos los estudios que se han realizado a nivel mundial, el objetivo de estas investigaciones se ha centrado en la planificación de la ubicación de nuevos pozos de agua, la definición del perímetro de protección sanitario de acuíferos, la determinación de los caudales a extraer en pozos ya constituidos y el enriquecimiento de la data histórica de los acuíferos.

2.2.2.1. Estudios relacionados en Latinoamérica:

a. En Colombia en el **2003 Pacheco y Villegas** dentro de su tesis de pregrado, hacen uso de la fórmula propuesta por Jacob (1946), para determinar los radio de interferencia de 17 pozos sometidos a bombeo (Tabla 2.3) en el acuífero de Morroa, concluyendo que para coeficientes de almacenamiento del orden de 10^{-4} los radios de interferencia tendían a extenderse por kilómetros, lo que implica que se superpongan las áreas de interferencia de cada uno de esos pozos, originando mayor abatimiento para la explotación de un determinado caudal, disminuyendo la eficiencia del pozo y generando efectos que se hacen más críticos a medida que los pozos se encuentran más cercanos.

La consecuencia se traduce en aumentos progresivos de los costos de operación de los pozos debido a la necesidad de bajar equipos de bombeo a profundidades mayores, originando el cambio de los equipos anteriores por unos de mayor potencia hidráulica y menor diámetro. Estos factores traen como producto final la sobreexplotación del Acuífero de Morroa, fenómeno que ya se está viendo al comparar los niveles estáticos de 2003 con los que había hacia 20 años atrás, mostrando una disminución de hasta 30m.

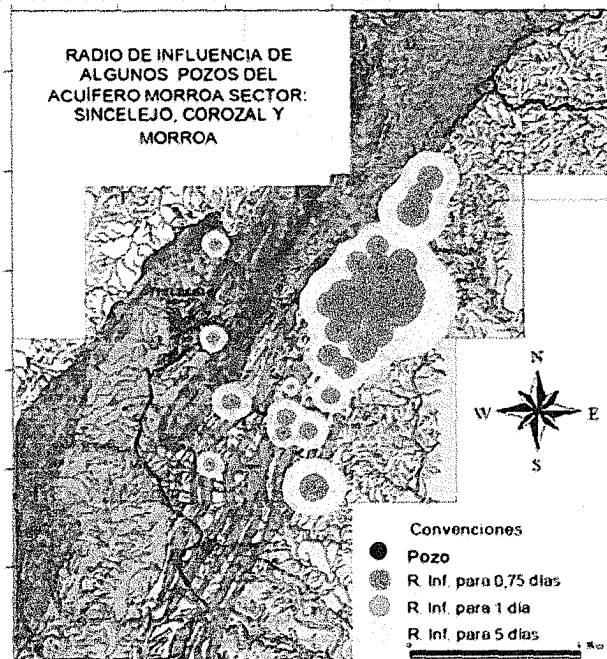
Tabla 2.3. Variación de los radios de interferencia para tiempos de bombeo distintos.

POZO	T (m ² /día)	S	RADIO DE INFLUENCIA (m)				
			0,75 días	1 día	5 días	10 días	100 días
44-IV-C-PP-08	117	1,05E-04	1371	1583	3541	5007	15834
44-IV-C-PP-11	11	1,10E-04	411	474	1061	1500	4743
44-IV-D-PP-16	319	1,10E-04	2212	2554	5712	8078	25544
44-IV-D-PP-19	23.1	1,68E-04	482	556	1244	1759	5562
44-IV-D-PP-24	462	1,40E-04	2360	2725	6093	8617	27249
44-IV-D-PP-30	77.8	1,50E-04	936	1080	2416	3416	10803
44-IV-D-PP-26	111	1,60E-04	1082	1249	2794	3951	12494
44-IV-D-PP-34	269	1,81E-04	1584	1829	4089	5783	18286
44-IV-D-PP-18	215	1,81E-04	1416	1635	3656	5170	16348
44-IV-D-PP-36	113	1,35E-04	1188	1372	3069	4340	13723
44-IV-D-PP-39	79.9	6,73E-04	448	517	1156	1634	5168
52-II-A-PP-01	10,5	1,50E-04	344	397	887	1255	3969
52-II-A-PP-08	2	4,78E-04	84	97	217	307	970
52-II-A-PP-09	4,3	1,50E-04	220	254	568	803	2540
52-II-A-PP-13	33,9	1,50E-04	618	713	1595	2255	7131
52-II-A-PP-15	77	1,10E-04	1087	1255	2806	3969	12550
52-II-A-PP-19	10,5	1,50E-04	344	397	887	1255	3969

Tomado de: (Pachecho Ruiz & Villegas Yépez, 2003)

Adicionalmente, hacen un análisis del comportamiento de los radio de interferencia tomando en consideración tiempos de bombeo distintos tal como se ve en la Tabla 2.3. En función de los resultados obtenidos modelaron el mapa de la Figura 2.31 y hacen referencia espacial a la extensa mancha amarilla que se extiende por la zona del Corozal, donde definen una interferencia crítica de pozos y la creación de una barrera hidráulica hacia el sur del sector.

Recomiendan prohibir nuevas perforaciones en el sector Corozal, disminuir los tiempos de bombeo con el que actualmente se explotan los pozos y establecer un régimen de bombeo-recuperación de 18 horas de bombeo continuo seguido por 6 horas de recuperación como se muestra en la Tabla 2.4.



Tomado de: (Pachecho Ruiz & Villegas Yépez, 2003)

Figura 2.31. Mapa de zonificación del acuífero de Morroa en función de sus radios de interferencia para distintos tiempos de bombeo.

Tabla 2.4. Propuestas de los tiempos de bombeo-recuperación para el acuífero de Morroa.

Tiempo de bombeo (días)	Tiempo de recuperación (días)	Bombeo (horas)	Recuperación (horas)
0.75	0.25	18	6
1	0.33	24	8
2	0.50	48	12
5	1.00	120	24

Tomado de: (Pachecho Ruiz & Villegas Yépez, 2003)

b. **En junio de 2002 el Ministerio de Ambiente, Energía y Telecomunicaciones de Costa Rica** firma un acuerdo mediante el cual se compromete a garantizar la sostenibilidad del agua, entendiéndolo como un proceso en el que se promueve el manejo y desarrollo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico resultante sin comprometer la sustentabilidad de

los ecosistemas vitales.

El acuerdo estipula como obligación el cálculo del radio de interferencia en todos y cada uno de los acuíferos explotables y brinda las directrices para su definición:

Para la determinación del radio de interferencia entre pozos y cuerpo de agua se deberán utilizar la siguiente metodología:

- **Acuíferos libres:** utilizar la ecuación de flujo de Jacob.

$$R. I = 1.5 \sqrt{\frac{T * t}{S}}$$

Ec. 2.15

Donde:

T= transmisividad (m²/día)

t= tiempo de bombeo (día)

S= coeficiente del almacenamiento

- **Acuíferos confinados:** para estos casos se recomienda aplicar los siguientes pasos: i) definir la red de flujo (modelo conceptual), ii) calcular la zona de captura del pozo ($Q=T*i*L$) y iii) calcular el descenso del pozo de bombeo a partir de la siguiente fórmula:

$$\Delta s = \frac{2.3 * Q}{4 * \pi * T} * \log \frac{2.25 T * t}{r^2 * S}$$

Ec. 2.16

Donde:

Δs = abatimiento (m)

r= radio del pozo a perforar

Q= futuro caudal de bombeo (m³/s)

Para el caso de acuíferos confinados se aceptará la interferencia con otro pozo siempre que no supere un 25% del abatimiento del pozo de bombeo.

- **Acuíferos semiconfinados:** se deberá calcular la interferencia con los acuíferos superiores Hantush (6).

c. *En Abril de 2002, Tujchneider, Paris, Elía y Pérez* presentaron una investigación orientada a la protección de pozos de abastecimiento urbano, empleando un enfoque económico y social del aprovechamiento del recurso hídrico en numerosas localidades de la provincia de Santa Fé en Argentina.

Los autores mencionan que, “La ciudad de Esperanza, uno de los puntos centrales de esta investigación, se abastece con agua subterránea desde que en 1930 la dirección de Obras Sanitarias de la Nación construyó una red de distribución alimentada por tres pozos profundos que producían alrededor de 4320m³/día. Actualmente se contabilizan 18 perforaciones (sector este) de las cuales solo 8 se encuentran en funcionamiento como consecuencia de problemas vinculados al aumento de la cantidad de cloruros y/o nitratos.

Por su parte en el sector oeste existen 15 perforaciones de las cuales solo operan 12”.

Los autores han hecho uso del de radio de interferencia como herramienta para la definición del perímetro de protección de pozos, como un primer avance en la definición de zonas y estrategias de protección aplicables a los sectores desde donde proviene la fuente de abastecimiento de agua más importante de la provincia.

Dentro de su metodología emplearon el programa computacional RESSQC (EPA, 1991), pues este les permitió calcular los perímetros de protección de pozos de bombeo e inyección bajo la premisa de que exista interferencia entre pozos y que se trate de acuíferos homogéneos de gran extensión, operados en régimen permanente y flujo uniforme.

En la Figura 2.32 se presenta el resultado de la delimitación, la cual mostró que muchas de las zonas de interferencia de los pozos se encuentran en sectores donde la actividad industrial es importantes y/o existe una infraestructura sanitaria deficiente, factores que podrían estar ocasionando en el presente o en el futuro una contaminación del acuífero, sin embargo al analizar la implementación de los perímetros de protección, sobre todo el relacionado a un tiempo de bombeo de 100 días (t=100 días), plantea retos casi imposibles

de lograr, pues resultaría en la reubicación de enormes emplazamientos industriales y económicos, traduciéndose en un fuerte impacto social, económico y político. Sin embargo, aun efectuando los cambios, no sería posible dimensionar la aparición de deterioros en la calidad del agua por acciones presentes y/o pasadas.

d. **Expósito, J.et al.** publican en el **2004** su estudio sobre la delimitación de zonas de protección sanitaria en Cuba, aplicado al acuífero Margarita. Dentro de esta investigación mencionan que la heterogeneidad de los acuíferos es una característica común en los sistemas subterráneos cubanos, por lo cual se hace evidente la necesidad de examinar los métodos de delimitación de las zonas de protección sanitaria y la certidumbre de sus resultados a la luz del empleo de métodos más sofisticados como lo es la modelación numérica. En este sentido, se evalúan las metodologías propuestas por la USEPA (1993) que incluyen 6 métodos en orden ascendente en cuanto a complejidad y costos: 1. radio fijo arbitrario, 2) radio fijo calculado, 3) catálogo de formas simples, 4) métodos analíticos, 5) mapeo hidrogeológico y 6) modelos numéricos de flujo y transporte.



Tomado de: (Expósito Castillo, Garfias Solis, Franco Plata, & Velázquez Velázquez, 2004)

Figura 2.32. Delimitación de la Ciudad de Esperanza y perímetros de protección para $t=100$ días; $t=1$ año; $t=5$ años.

Dentro del estudio en cuestión se seleccionaron: el método de modelación numérica a través de VisualModflow y el método analítico siguiendo las consideraciones básicas de la legislación cubana. En el primer caso los cálculos se inician con la determinación del radio de interferencia a través de la fórmula:

$$Ro = 1.5 \sqrt{\frac{K * h * t}{n}}$$

Ec. 2.17

Donde:

K = conductividad hidráulica ponderada 3.17m/d.

h = espesor del acuífero 92m.

t = tiempo de estabilización del radio de interferencia 0.25d.

n = porosidad efectiva del medio, la cual es debida a las fisuras en el material calcáreo.

Posteriormente se determinó la velocidad real del agua subterránea en la zona de interferencia del pozo (V_{ri}), el tiempo que tarda una partícula de contaminante en atravesar la zona del radio de interferencia (T_r), el tiempo de tránsito del flujo natural (T_n), la distancia a proteger en la zona que se encuentra por fuera del radio de interferencia (D_n), las distancias aguas arriba (D_{ps}) y aguas abajo (X_o) de las zonas de protección sanitaria.

$$V_{ri} = \frac{K}{I_c * n}$$

Ec. 2.18

Donde:

V_{ri} = velocidad real del agua subterránea en la zona de interferencia del pozo.

K = conductividad hidráulica.

I_c = gradiente crítico del agua subterránea en la zona de interferencia.

n = porosidad efectiva del medio.

$$Tr = \frac{Ro}{Vri}$$

Ec. 2.19

Donde:

Tr= tiempo que tarda una partícula de contaminante en atravesar la zona del radio de interferencia.

Ro= radio de interferencia

$$Tn = t - Tr$$

Ec. 2.20

Donde:

t= tiempo de bombeo.

$$Dn = Tr * Vri$$

Ec. 2.21

Donde:

Dn= distancia a proteger en la zona que se encuentra por fuera del radio de interferencia.

$$Dps = Dn + Ro$$

Ec. 2.22

Donde:

Dps= distancias aguas arriba.

$$Xo = \frac{Q}{2 * \pi * K * h * l}$$

Ec. 2.23

Donde:

Xo= distancia del perímetro aguas abajo del pozo.

Q= caudal de bombeo

En el caso de la aplicación del método analítico, estiman es complicado definir las variables radio de interferencia (Ro), el tiempo de estabilización del radio (t) y el gradiente crítico (Ic).

Por lo que plantean emplear la siguiente fórmula:

$$Dps = \sqrt{\frac{Q}{\pi * h * n} * T + rp + \frac{K * I}{n} * T}$$

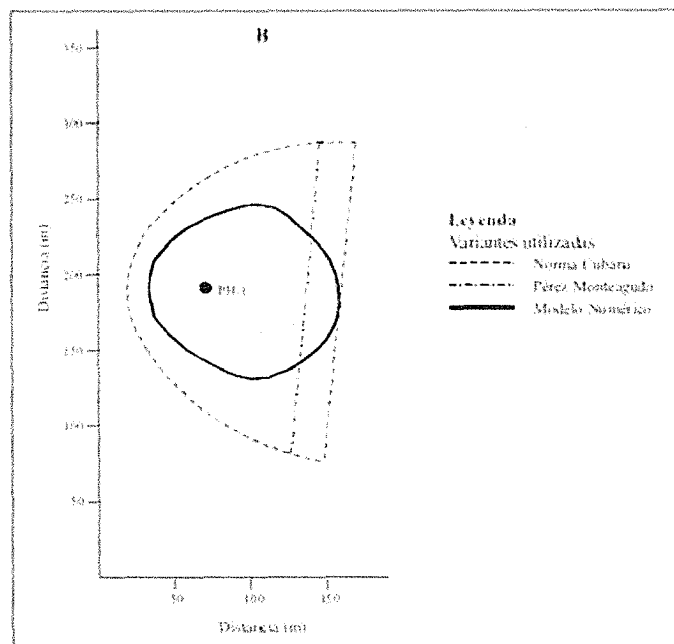
Ec. 2.24

Donde:

rp= radio del pozo.

Los resultados obtenidos al modelar se presentan en la Figura 2.33:

En este sentido los autores concluyen que el método analítico no permite correcta protección aguas arriba de los pozos y plantean que las modificaciones hechas a través de la modelación con Visual ModFlow mejoran en más de un 30% los resultados, lo cual justifica su aplicación para el acuífero Margarita, así como la ejecución de modelos similares para otros acuíferos de la isla.



Tomado de: (Expósito Castillo, Garfias Solis, Franco Plata, & Velázquez Velázquez, 2004)

Figura 2.33. Zona de protección sanitaria obtenida mediante diferentes variantes del método analítico (norma cubana y modificaciones de Montecagudo) y modelado numérico.

2.2.2.2. Estudios relacionados en el Valle de Quíbor:

Por su parte, en el Valle de Quíbor se tiene registro de algunos trabajos en los que se ha determinado la variable en cuestión. **Pérez en 1988**, propone un modelo matemático para el acuífero, con fines de explotación y/o recuperación, dentro de la metodología empleada para conocer los parámetros hidrológicos del acuífero, utiliza la fórmula de Theis para acuíferos confinados en régimen no permanente, la cual fue chequeada con la aproximación de Jacob. Para los casos en los que la formulación de Theis indicó la presencia de un acuífero libre, los resultados fueron afectados por la corrección de Jacob y así interpretar adecuadamente las pruebas y obtener los parámetros para el acuífero libre. En este sentido, el autor define que el Centro del acuífero se comporta como confinado, mientras que hacia el Norte es libre.

En su etapa de campo realizó 11 pruebas de bombeo con pozos de observación y calculó el radio de interferencia solo para 1 de ellas haciendo uso de la fórmula de Jacob para abatimiento cero con diferentes tiempos de bombeo. Los resultados reportan radios de interferencia entre pozos que van desde los 73m para un tiempo de 0,5 días, hasta 1039,39 para 100 días.

De las estimaciones concluye, que la ecuación empleada resulta muy general y no debe ser empleada con fines de estimaciones reales de los radios de interferencia, menos aun en acuíferos confinados, esto debido a que dentro de la formula se asumen muchas condiciones que no se ajustan a la realidad del caso: un acuífero libre en régimen permanente, extensión infinita de la capa freática, sin recargas y con penetración total del pozo, condiciones muy utópicas. Adicionalmente, recomienda incluir en los cálculos los aportes debidos a las recargas y la superposición de efectos en pozos cercanos.

En 1989, Alvarado justifica la definición del radio de interferencia admitiendo que es de gran utilidad para los propietarios de los pozos y organismos encargados de la administración de los recursos de agua subterránea, en vista de que los ayuda a determinar cuán lejos del pozo se extiende el cono de depresión. En su trabajo aplica la formulación hecha por Theis y modificada por Jacob, la misma que fue empleada en el trabajo de **Pérez y otros como Aguilera y Padilla, 1963; Carbajal, 1980 y Aguasuelos Ingeniería, 1982.**

Sin embargo, los resultados obtenidos en los trabajos anteriormente mencionados son muy diversos, van desde 1074m-19361m (Aguilera y Padilla, tiempo de bombeo: 40 horas. Escogiéndose un radio de referencia de 400m), 593m-2880m (Carbajal, tiempo de bombeo: 24horas. Escogiéndose un radio de referencia de 600m para el norte del Valle y 2900m para el centro) hasta 498m-815m (Aguasuelos Ingeniería, tiempo de bombeo: 30 horas y 17 horas respectivamente). Esta amplia variabilidad es analizada por Alvarado quien indica que el solo uso de esta metodología es muy impreciso para la definición de un criterio tan importante y recomienda que en función de mejorarlo, se debe ser más estricto en la definición de los tipos de acuíferos presentes, tener pruebas de bombeo de confiabilidad comprobada y estimaciones de las recargas que puedan existir.

Finalmente, toma 593m como valor referencial de radio de interferencia, en función de lo cual define un espaciamiento entre pozos de 1200m y propone que en este sentido, en el norte del Valle deben existir 20 pozos y hacia el centro 12 pozos, condición que ya había sido superada para el momento del estudio.

CAPITULO 3

METODOLOGÍA

En este capítulo se describen las etapas que se recorrieron para cumplir con el objetivo principal de la investigación, el cual consiste en establecer alternativas de zonificación del Valle de Quíbor en función del criterio radio de interferencia. En este sentido el proceso de la investigación incluyó tres etapas, recopilación y evaluación de información existente, un reconocimiento en campo del área bajo estudio y modelado de la información en oficina.

3.1. Etapa I: Recopilación y evaluación de información existente:

Esta etapa integro un conjunto de tareas que representaron el punto de inicio de la investigación y continuaron durante todo su periodo de duración, permitiendo examinar el estado del arte de los proyectos con los que se cuenta en el Valle de Quíbor (tomando en consideración enfoques relacionados al área de los recursos hidráulicos y áreas sociales), identificando sus alcances, limitaciones, recomendaciones, realismo, utilidad, pertinencia y vigencia. Adicionalmente, la revisión permitió conocer la fisiografía, geomorfología, geología y otros aspectos físicos del Valle de Quíbor antes de la etapa de campo. Finalmente, se llevó a cabo un estudio de los conceptos relacionados con la determinación del Radio de interferencia. Las fuentes consultadas para la realización de este trabajo incluyeron:

- **Fuentes bibliográficas y hemerográficas:**
 - Biblioteca del Centro Iberoamericano de Desarrollo e Investigación Ambiental y Territorial (CIDIAT) de la Universidad de Los Andes (B.I.A.C.I).
 - Proyectos realizados en el marco de las actividades del Sistema Hidráulico Yacambú Quíbor (SHYQ).
 - Bibliotecas personales de: Prof. Hervé Jegat y Prof. Luis Mora.
- **Fuentes electrónicas:**
 - Publicaciones electrónicas no periódicas de la Universidad de Los Andes, Universidad de Oriente, Universidad Centroccidental "Lisandro Alvarado".

- Publicaciones electrónicas periódicas de prensa nacional y regional.
 - **Fuentes cartográficas:**
- Modelo digital del terreno y modelo del tope de roca elaborados dentro del marco de APROSELA (2.000), cuya base cartográfica correspondió a las cartas provenientes del Instituto Cartográfico de Venezuela, Simón Bolívar:

Hoja: Escala: 1:10000
- Divisoria de cuenca, red hidrográfica y modelo hidrogeológico realizados y/o modificados dentro de las aportaciones del proyecto CIDIAT (2.011) relacionado con la determinación de la caracterización de las áreas de recarga.

3.2. Etapa II: Reconocimiento en campo:

Dentro de esta etapa se llevaron a cabo actividades de reconocimiento del Valle de Quíbor, su ubicación relativa a Venezuela y al estado Lara, su relación con las actividades y costumbres de Barquisimeto, capital del estado Lara, identificación de las geoformas características y sus procesos de génesis y evolución, ubicación de las zonas productivas e identificación de los pozos, reconocimiento de las fuentes alternas de agua empleadas en el Valle (quebradas e infiltración del túnel de trasvase).

3.3 Etapa III: Actividades de oficina:

Esta etapa integró las actividades de inventario y filtrado de pozos, determinación de los parámetros hidráulicos del acuífero, cuantificación del parámetro Radio de interferencia, tratamiento estadístico y regionalización de las variables calculadas, presentación de la información en forma de mapas, construcción de gráficos que permitan relacionar el Radio de interferencia y el abatimiento permisible en el pozo vecino, determinación de los efectos que tendría en términos económicos, tomar en consideración los instrumentos generados dentro de ésta investigación como herramienta auxiliar en la planificación de la explotación del agua subterránea en el Valle, diseño de alternativas de gestión del recurso hidráulico en función de los resultados y alcances del proyecto y finalmente, la elaboración de la memoria descriptiva de esta investigación.

CAPITULO 4

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO.

En este apartado incursionamos en la descripción de los aspectos fundamentales que caracterizan al Valle de Quíbor, comenzando por hacer referencia a su ubicación espacial en el territorio venezolano, seguido por una descripción de los aspectos físico naturales más resaltantes, fisiografía, climatología, hidrografía y por supuesto los rasgos geológicos y las características hidrogeológicas que condicionan la acumulación y movilidad del recurso hídrico. Todo lo anterior explicado según un enfoque práctico y simplificado en función de mantenernos dentro de los límites de la investigación, ello no quiere decir que el Valle de Quíbor carezca de información, pues se trata del entorno hidrogeológico que cuenta con mayores y más detallados estudios en la geografía nacional.

4.1 Ubicación espacial:

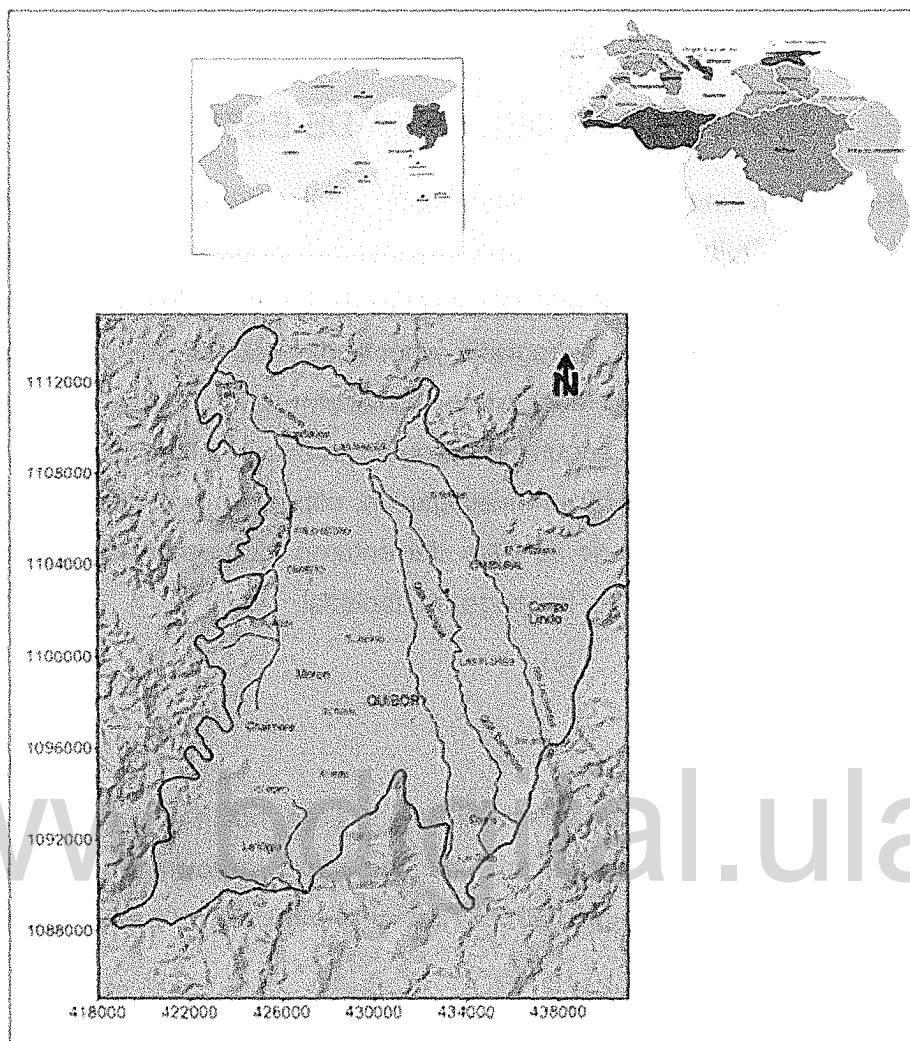
El Valle de Quíbor, se encuentra ubicado en el Estado Lara, hacia el suroeste de la ciudad capital de Barquisimeto, se extiende en una superficie aproximada de 31.400 Ha. Geográficamente está limitado entre 418577,58 y 443401,58 al este, 1088186,46 y 1114515,87 al norte (Figura 4.1).

En lo que respecta al área de la cuenca del acuífero, ésta se extiende por 973 km² de Valle intramontano, que pertenece a la región de confluencia de los sistemas Andino, Coriano y Cordillera de la Costa. Este Valle está rodeado por cerros altos y abruptos.

4.2. Aspectos Físico-Naturales:

4.2.1. Fisiografía:

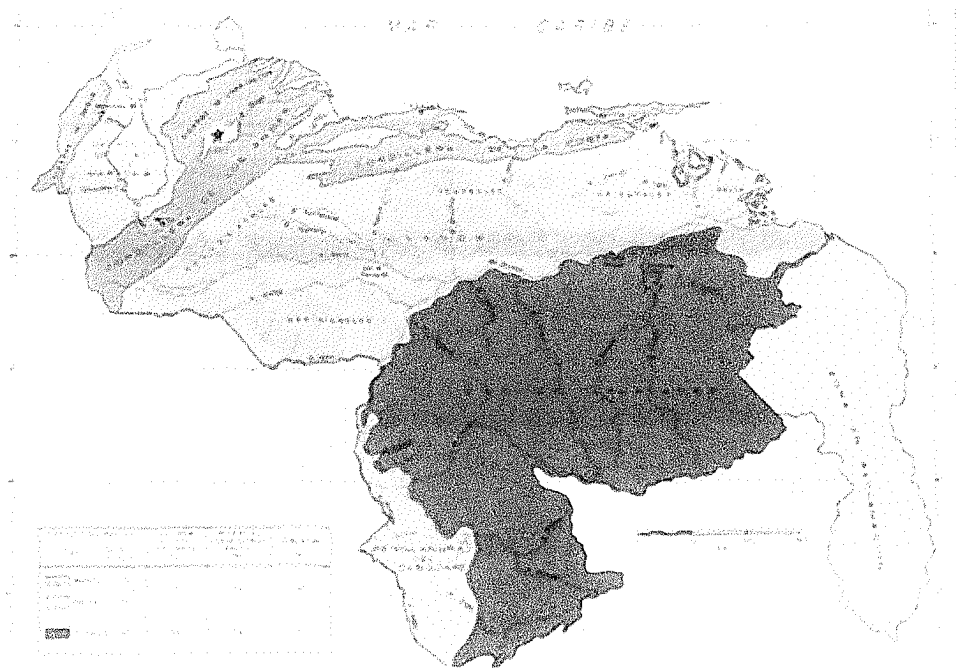
En el área de estudio se han identificado diversas geoformas cuyo modelado es el resultado de la acción dinámica de factores tectónicos, orogénicos, litológicos y por procesos erosivos y depositacionales.



Tomado y modificado de: (CIDIAT, 2012)

Figura 4.1. Ubicación relativa del Valle de Quibor.

En función de lo anteriormente expuesto, varios autores, entre ellos Alvarado, 1989, Torres, 1992, APROSELA, 2011, CIDIAT-SHYQ (2004) y otros, han llegado a definir la región de Quibor como un valle intramontano, mientras que otras teorías se inclinan a denominarlo una depresión tectónica, cuyo origen se remonta al Cretácico, momento en que inicia la confluencia tectónica de los Sistemas Andino, Coriano y Cordillera de la Costa (Figura 4.2), formando el conocido Surco de Barquisimeto (Figura 4.3), geoforma comprendida entre Carora, El Tocuyo, Barquisimeto y Sanare, y responsable del modelado del Valle de Quibor.



Tomado de: (Zinck, 1980)

Figura 4.2: Encuentro de los sistemas Andino, Coriano (Lara-Falcón) y Cordillera de la Costa para formar la depresión tectónica de Quibor.

www.bdigital.ula.ve

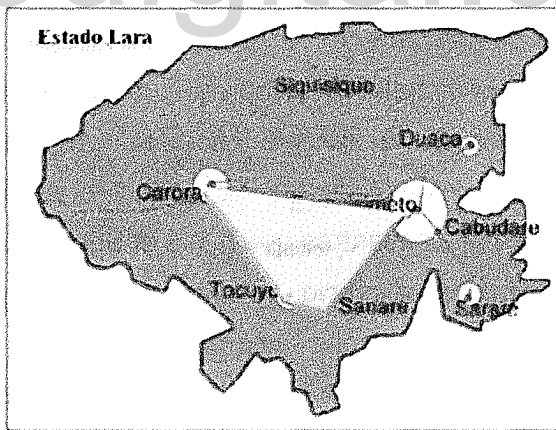
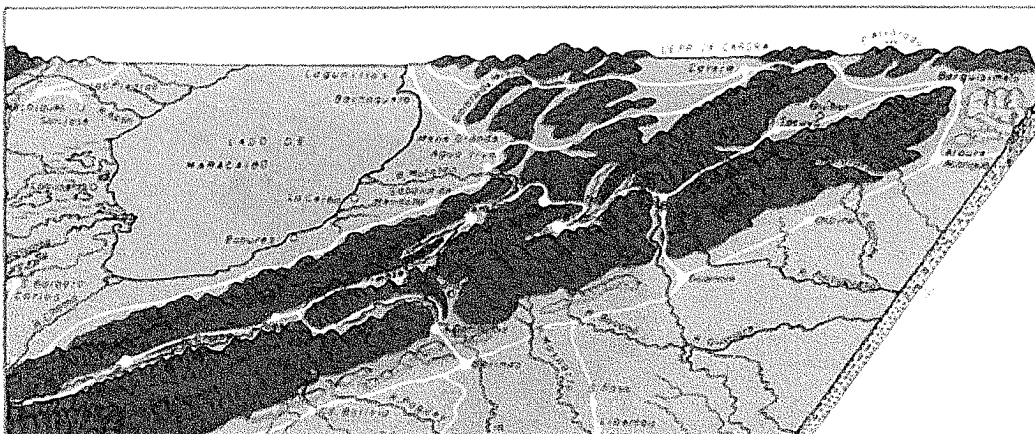


Figura 4.3. Ubicación del surco de Barquisimeto.

Al igual que muchos de los Valles que componen la fisiografía de Venezuela, el Valle de Quíbor se dispone paralelamente a la dirección general de la masa montañosa (Zinck, 1980),

es decir, aproximadamente en sentido Noreste-Suroeste relacionado mayormente con el trazado del sistema de fallas de Boconó (Figura 4.4).



Tomado de: (Zinck, 1980) pp83

Figura 4.4. Alineación del Valle de Quíbor con la Cordillera de los Andes y el trazado principal del sistema de falla de Boconó.

En la región de Quíbor en particular, se desarrollan dos zonas fisiográficamente bien diferenciadas (Figura 4.5), la primera de ellas denominada el Valle de Quíbor, consiste en un planicie de explayamiento ligeramente inclinada hacia el suroeste-noreste de origen fluvio-lacustre de poca elevación, entre 600 y 800 msnm, con pendientes suaves entre 0,26% y 1,57%. La segunda, bordea completamente al Valle y se compone de colinas redondeadas de poca elevación (900 a 1600msnm) y pendientes abrupta entre 15 y 65% ambas características son el resultado de la litología aflorante, en este sentido, en el sector Occidental, donde predominan intercalaciones de lutitas y areniscas, se observan las elevaciones y pendientes más bajas, mientras que hacia el Sur y Oriente, donde predominan intercalaciones de lutita y caliza, las elevaciones son mayores al igual que las pendientes. Adicionalmente, hacia el centro del Valle emerge una colina de baja altitud (30m), denominada Los Cerritos, que constituye un alto geológico representado por una capa de permeabilidad restringida.

4.2.2. Climatología:

Las bajas precipitaciones, las sequías prolongadas y la alta evaporación a la que es sometido todo el Valle de Quíbor, trae como consecuencia que su dinámica se englobe en

dentro de lo que se conoce como ecosistema de Bosque Seco Tropical y Bosque Muy Seco Tropical, citados anteriormente por (Alvarado, 1989), (Torres, 1993), entre otros autores.

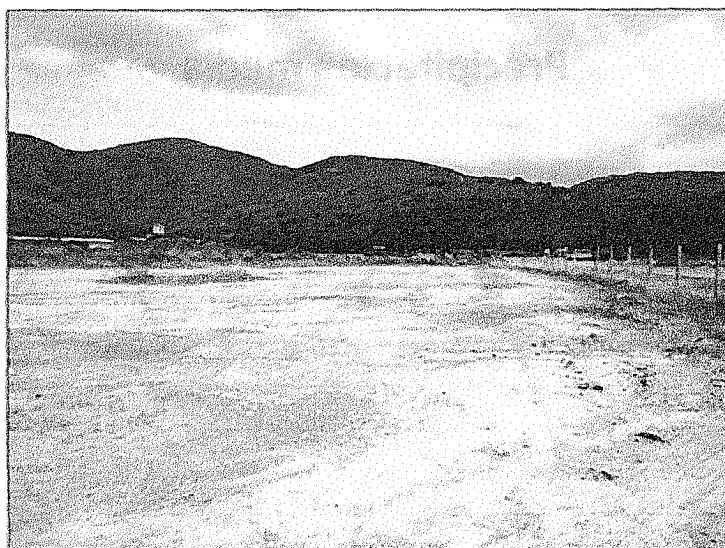


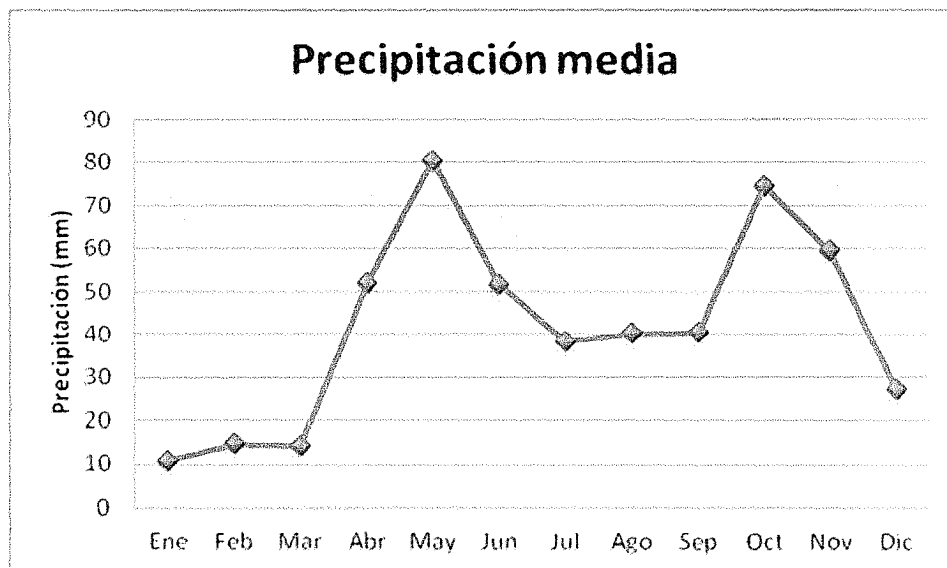
Figura 4.5. Unidades fisiográficas presentes en Quíbor. Al frente la zona 1: Valle de Quíbor. Al Fondo la zona 2: Colinas.

En la región de Quíbor existen alrededor de 10 estaciones climatológicas, sin embargo Alvarado, 1.989 demostró a través de un análisis estadísticos, que la estación más representativa de la zona es la Estación Quíbor, instalada en 1945 y encargada de registrar valores de precipitación, evaporación, temperatura, humedad relativa viento y radiación.

a. Precipitación: este importante parámetro ocurre con una media anual de 500mm. Se presenta con un patrón mensual y anual heterogéneo, siendo mayor para los meses de baja precipitación, en los cuales las lluvias son en general torrenciales, llegando un solo evento a acumular la precipitación correspondiente a todo un mes. Adicionalmente, la distribución del fenómeno de precipitación es bimodal, con máximos en Abril - Mayo y Octubre - Noviembre y mínimos bastante prolongados, entre Marzo - Diciembre y Julio - Septiembre (Figura 4.6).

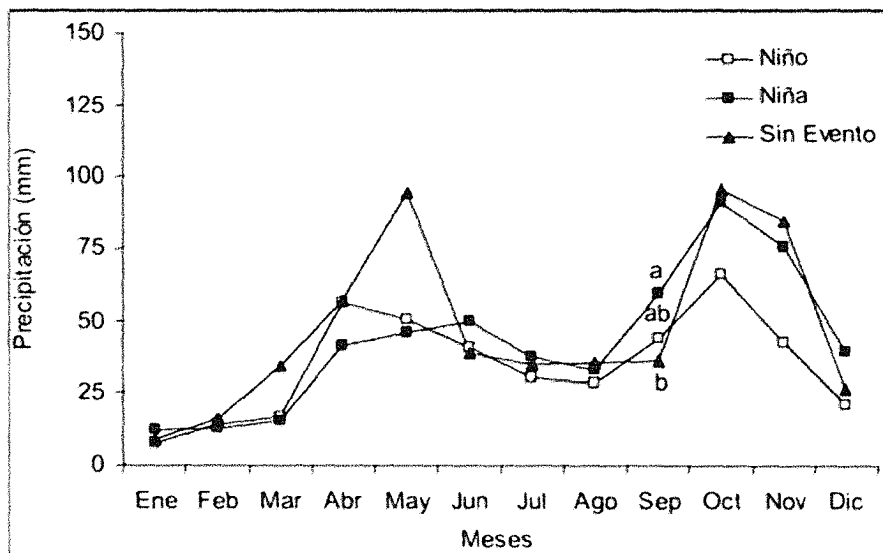
Adicionalmente, Tirado y Pierre, 2007, estudiaron la interferencia que tiene los fenómenos globales del Niño y la Niña sobre la cantidad y distribución de la precipitación en el Valle de Quíbor, mostrando que a pesar de que la distribución se mantiene, cuando el Niño se

presenta las sequias son mayores mientras que el efecto de la Niña no es claramente perceptible (Figura 4.7).



Valores tomados de (Alvarado, 1989)

Figura 4.6. Comportamiento de la precipitación media mensual en la Estación Quibor. Periodo 1945-1986.

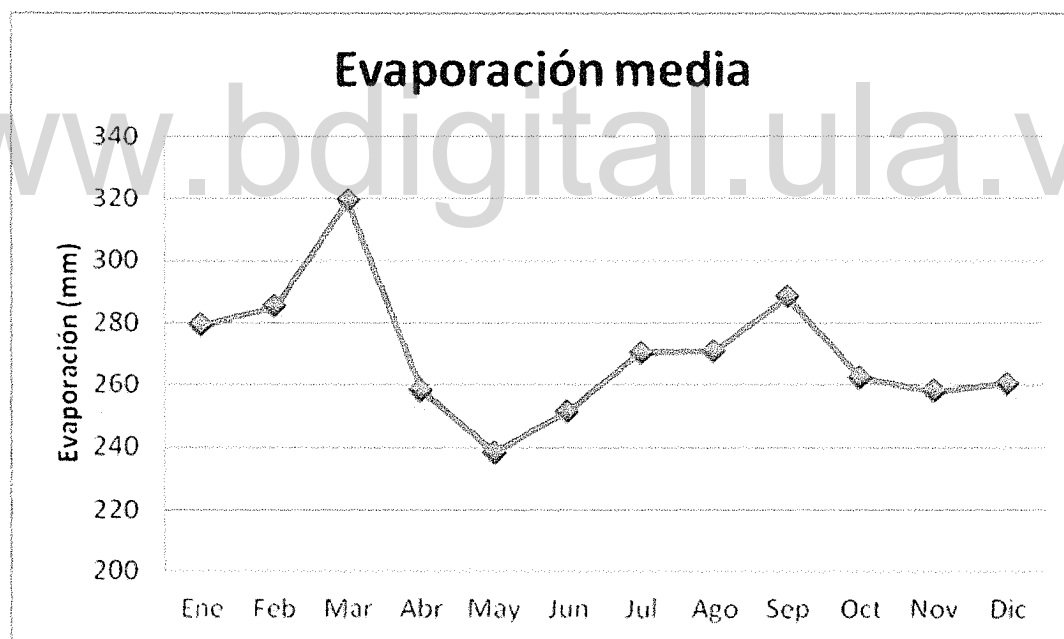


Tomado de: (Pierre & Tirado, 2007)

Figura 4.7. Interferencia de los fenómenos Niño y Niña en la distribución de la precipitación en el Valle de Quibor.

b. **Evaporación:** este parámetro tiene una interferencia muy importante sobre el clima del Valle al tener una media anual considerablemente de 3300mm. Se presenta con patrón anual y mensual homogéneo, en el que el principal factor de control es la precipitación. Su distribución mensual es bimodal, con máximos en Enero – Marzo, Julio – Septiembre y mínimos en Abril – Junio, Octubre – Diciembre (Figura 4.8), es decir, un comportamiento opuesto a la precipitación, lo cual es completamente normal, debido a que en los meses más húmedos la insolación es menor y por ende se limitan los efectos de la evaporación.

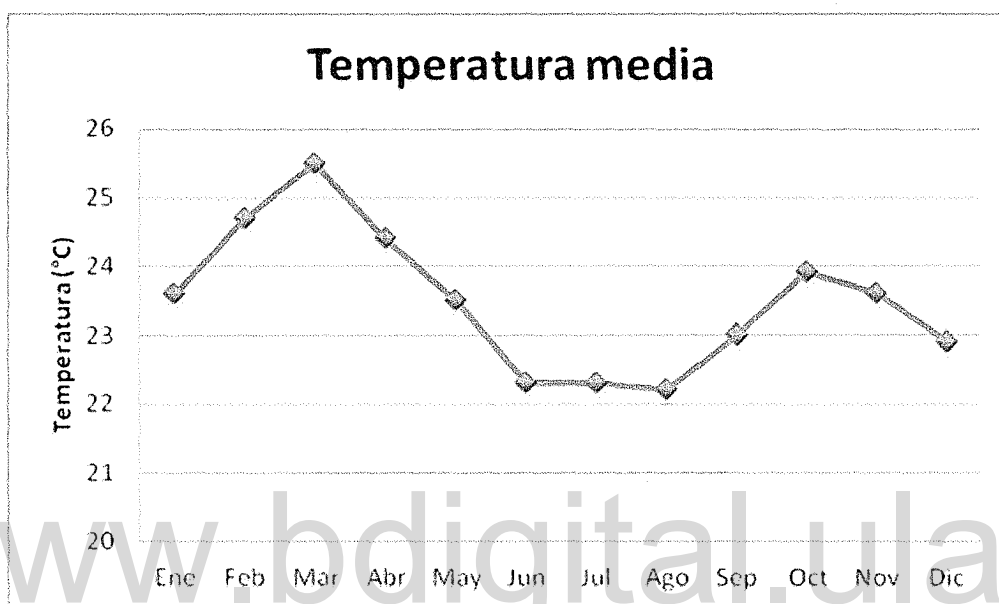
Sin embargo, la evapotranspiración real media anual varía entre 900 y 500mm, parámetro que se coteja con la precipitación para establecer una medida a grandes rasgos del balance hídrico en el Valle, en este sentido, para el periodo 1975 – 1985 se estimó que existía un exceso de agua de precipitación de 0,4% del volumen total precipitado en el periodo.



Valores tomados de (Alvarado, 1.989)

Figura 4.8. Comportamiento de la evaporación media mensual en la Estación Quíbor. Periodo 1.975-1.985.

c. **Temperatura:** la temperatura exhibe una media anual de 25°C con sus mayores valores entre los meses de Octubre a Abril, que corresponden con los meses de mayor evaporación y precipitaciones bajas, en contraposición las temperaturas mínimas se experimentan entre los meses de Mayo y Septiembre (Figura 4.9).



Valores tomados de (Alvarado, 1.989)

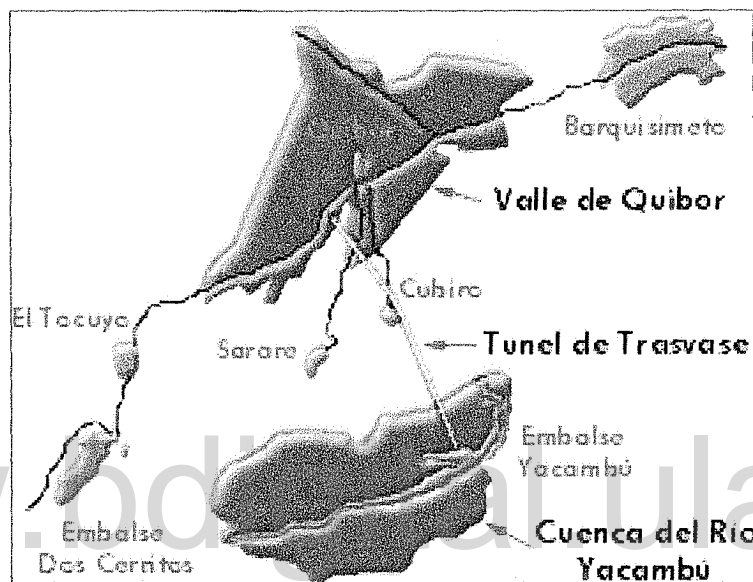
Figura 4.9. Comportamiento de la temperatura media mensual en la Estación Quíbor. Periodo 1.972-1.986.

d. **Vientos:** la ocurrencia de éste fenómeno aunado a la ubicación del Valle de Quíbor (Figura 4.4), ocasiona que los vientos de dirección dominante Sur – Norte, cargados de humedad, la descarguen al encontrarse con la barrera orográfica inmediatamente anterior a Quíbor, denominada cuenca del río Yacambú (Figura 4.10), ocasionando que la nubes lleguen descargadas al Valle de Quíbor.

4.2.3. Hidrografía:

Hidrográficamente, está integrado por tres grandes quebradas paralelas entre sí, que drenan el Valle de Sur a Norte desembocando en la quebrada Las Raíces (Tabla 4.1), afluente del río Tocuyo que a su vez forma parte de la cuenca del Mar Caribe (Aprosela, 2000). En la

Figura 4.11 se pueden observar los tres drenes principales en línea azul delgada de trazado continuo y el dren principal (Qdra, Las Raíces) en línea azul gruesa de trazado continuo. De este a oeste primero se encuentra la Quebrada Las Guardias, seguidamente la Quebrada Atarigua y finalmente la Quebrada Palo Negro. En la Tabla 4.1 se describen las características más importantes de los afluentes que conforman el Valle.



Tomado de: (hispavista, yacambu galeon, s/a)

Figura 4.10. Ubicación de la Cuenca del Río Yacambú respecto del Valle de Quibor.

Tabla 4.1. Características de los afluentes más representativos del Valle de Quibor.

Quebrada	Lugar de nacimiento	Carácter de la escorrentía
Las Guardias	Zona montañosa Sector: SURESTE	Permanente en su tramo montañoso, estacional en la planicie del Valle
Atarigua	Zona montañosa Sector: SUR	Permanente en su tramo montañoso, estacional en la planicie del Valle
Palo Negro	Zona montañosa Sector: OESTE	Estacional siempre

Adicionalmente, existen quebradas de menor tamaño como lo son la Botucal y Baragua, ambas ubicadas en el sector suroeste del Valle aledañas a la población de la Vigía, éstas Quebradas son de régimen estrictamente estacional, siendo mayores los periodos en los que se encuentran completamente secas. Por otra parte, la Quebrada Barrancos, ubicada entre la Atarigua y Las Guardias, es de régimen estacional, y desaparece en el Valle antes de drenar sus aguas a la Quebrada las Raíces.

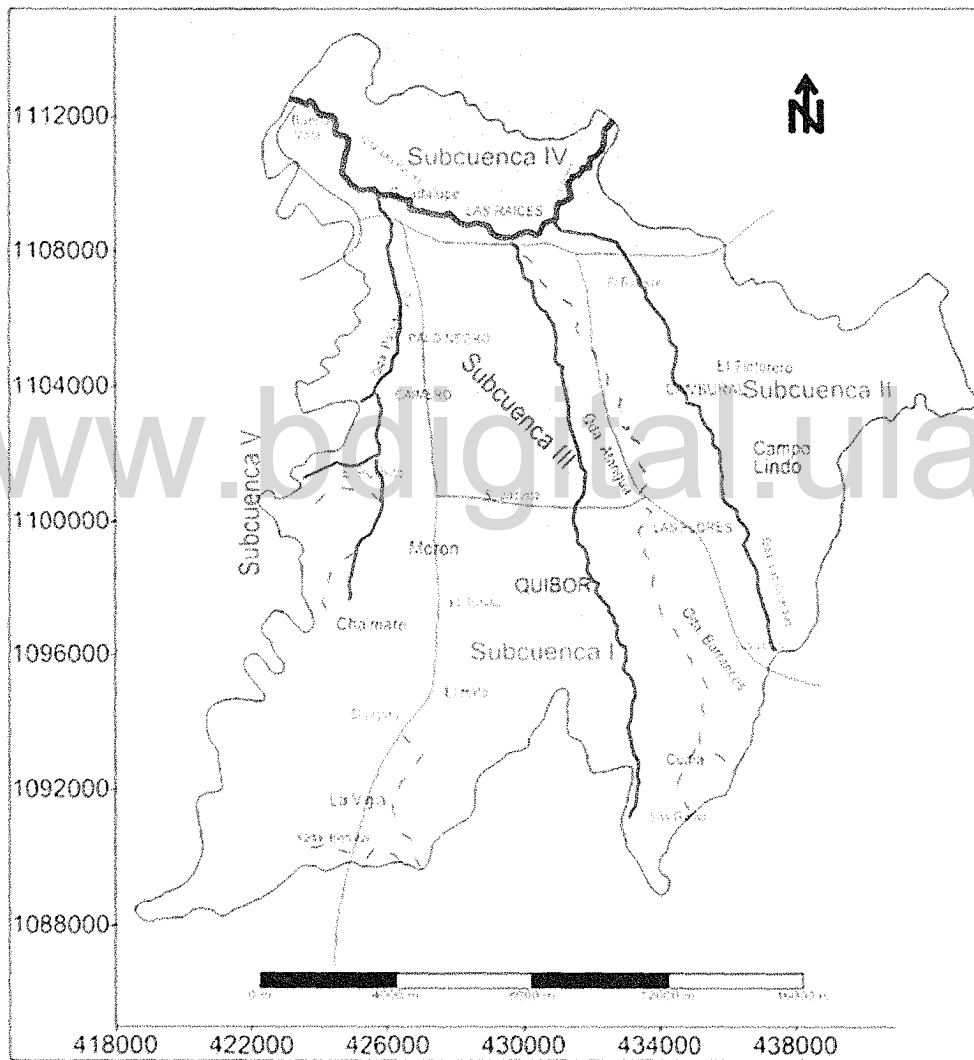


Figura 4.11. Red hidrográfica del Valle de Quibor. División de la cuenca de Quibor.

Por otro lado, el Valle de Quíbor corresponde hidrográficamente a la cuenca de Quíbor, dividida tradicionalmente en cinco subcuencas geohidrográficas (Tabla 4.2), es decir, en función de sus características hidrológicas (divisorias de aguas) y geológicas (morfología del tope de roca en el subsuelo y el régimen de extracción – movimiento del agua subterránea) más distintivas (Torres, 1993).

Tabla 4.2. Descripción de las subcuencas de la Cuenca de Quíbor

Cuenca	Subcuenca	Área (km ²)		Ubicación	Características
		Zona montañosa	Valle		
Barquisimeto - Quíbor	Quíbor	136	140	Alrededores de Quíbor. Hidrográficamente integra las Quebradas Atarigua, Barrancos y Botucal.	La extensión del acuífero en esta zona ocupa unos 20 km ² con un espesor promedio de 20m, según datos geofísicos y de perforaciones.
	Las Guardias	104	284	Zona ESTE de Quíbor. Hidrográficamente corresponde a la Quebrada Las Guardias.	Perforaciones profundas han identificado dos capas permeables, una superior seca y una inferior saturada correspondiente al Acuífero de Quíbor, de 20 km ² de extensión y un espesor medio de 15m.
	Palo Negro	0	35	Zona NOROESTE de Quíbor. Hidrográficamente corresponde el curso inferior de la Quebrada Atarigua.	La extensión del acuífero en esta zona ocupa unos 15 km ² con un espesor reducido.

Tabla 4.2. Descripción de las subcuena de la Cuenca de Quíbor

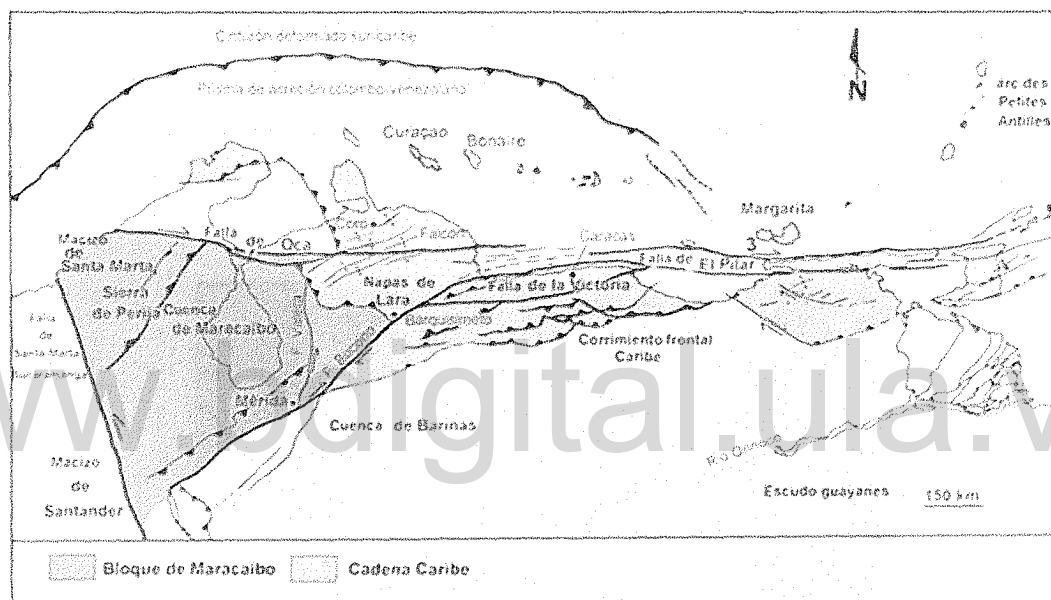
Cuenca	Subcuena	Área (km ²)		Ubicación	Características
		Zona montañosa	Valle		
	Las Raíces	145	10	Zona NORTE de Quíbor. Hidrográficamente integra las Quebradas Baragua y Las Raíces.	La extensión del acuífero en esta zona ocupa unos 7 km ² con un espesor promedio de 8m.
	San José	60	50	Zona OESTE de Quíbor. Hidrográficamente corresponde a la Quebrada San José.	La extensión del acuífero en esta zona ocupa unos 10 km ² con un espesor promedio de 5m.

4.2.4. Rasgos geológicos:

En la región de Quíbor la conformación geológica es el complejo resultado de los procesos tectónicos, orogénicos y sedimentológicos formadores del surco de Barquisimeto, es por este motivo que las formaciones muestran poca continuidad lateral y vertical. Se observan materiales del Cretácico y Terciario que conforman el fondo del Valle y la totalidad de la zona montañosa, mientras que los materiales del Paleoceno y Pleistoceno se encuentran en forma de relleno fluvio – lacustre en el Valle de Quíbor, a excepción de las rocas aflorantes en Los Cerritos, que corresponden al Cretácico.

Para ser más estrictos en la definición de la geología regional de Quíbor, hay que remontarse a la historia estructural de la zona norte de Venezuela, que comprende la colisión entre las placas Caribe y América del Sur materializada por la existencia de grandes fallas transcurrentes dextrales (Falla de Oca, El Pilar y Boconó) que controlan gran parte de la tectónica del país, así como de la región de Quíbor (Figura 4.12).

La región de Quíbor se encuentra ubicada en una estructura denominada napa de Lara, la cual surge de la colisión en arco del Caribe con el continente iniciada en el Cretácico (con continuidad hasta la actualidad), fenómeno mediante el cual un bloque alóctono proveniente del Caribe es emplazado sobre el continente y modificado gracias a los movimientos tangenciales acaecidos entre la placa del Caribe y la Suramericana que se extiende del Cretácico superior al Eoceno, afectada también por la compresión andina, de orientación Noroeste-Sureste.



Tomado de: (Aprosla, 2000)

Figura. 4.12. Unidades estructurales Sur – Caribe.

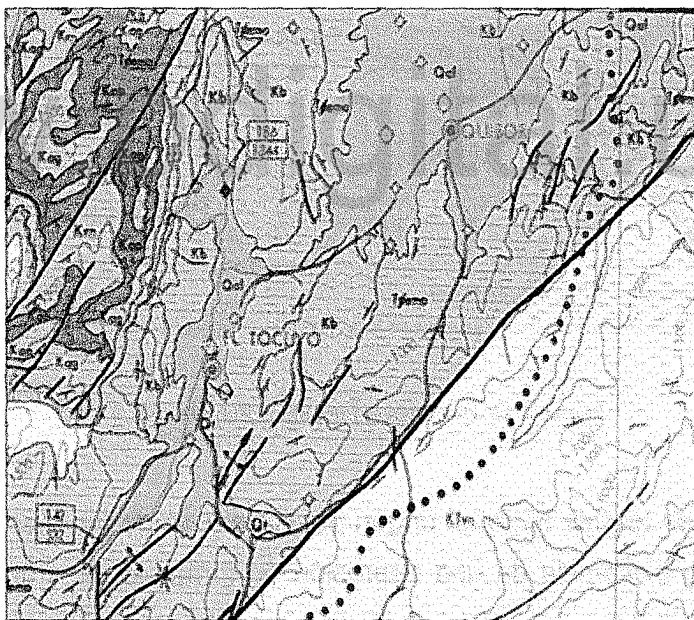
A pesar de las variadas teorías sobre el origen del Valle, una de las más aceptadas plantea para el Pleistoceno la existencia de una depresión en forma de lago que ocupaba el área actual del Valle de Quíbor, este lago de fondo irregular se relleno a medida que fue evolucionando y como resultado en la actualidad exhibe lentes de arena y grava con intercalaciones de capas de arcilla y predominancia de material fino, que ocupan espesores de entre 0 y 120m en la parte norte, con un espesor saturado entre 0 y 97m. En la parte sur, el espesor de esos sedimentos varía entre 0 y 230m, oscilando el espesor saturado entre 0 y 110m.

En el ámbito local, la geología de la región de Quíbor (Figura 4.13) está conformada por las Formaciones descritas a continuación y organizadas en relación con su edad geológica desde las más antiguas hasta las más recientes (Figura 4.14), tal como se observa en la Tabla 4.3.

4.2.4.1 Cretácico:

a. Formación Villanueva (KTvn):

Fue definida por E. Von der Osten y D. Zozaya, 1957 (Lexico Estratigráfico de Venezuela). Le fue asignada una edad en un rango bastante amplio que va desde el Cretácico superior al Paleógeno, sin embargo, estudios recientes han reducido la edad al Campaniense superior-Maastrichtiense (Cretácico superior), en función del contenido fósil conformado por foraminíferos de distintas especies.



Tomado de USGS-UCV, 2006 en CIDIAT, 2012

Figura 4.13. Mapa geológico estructural de la región de Quíbor.

La secuencia litológica se presenta como espesores grandes de lutitas silíceas grises y negras con algunas areniscas y calizas intercaladas que no han sido objeto de estudios más

profundos debido a los impedimentos que fija la geología estructural en las zonas de afloramiento, donde se observan plegamientos y fallamientos intensos.

Debido a la imposibilidad de establecer el tope y la base de la Formación y por la escases de afloramientos continuos, su espesor no ha sido definido, sin embargo, se observan secciones hasta con 1000 m de espesor.

En la región de Quíbor la Formación Villanueva aflora en la zona montañosa hacia el sector sureste, en contacto de falla con la Formación Morán.

ERA SISTEMA	SERIE	PISO		
FANEROZOICO MESOZOICO	IV°	HOLOCENO (Actual)		
		PLEISTOCENO CALABRIENSE		
	NEOGENO	PLIOCENO	PLACENZENSE	
			ZANCLAYENSE	
		MESSINIENSE		
		TORTONENSE		
		MIOCENO	SERRAVALLIENSE	
	PALEOGENO	OLIGOCENO	LANGIENSE	
			BURDIGALIENSE	
		EOCENO	ACQUITANENSE	
			CHATTIENSE	
		PALEOCENO	RUPELIENSE	
			PIRABONIENSE	
		CRETACICO	SUPERIOR	BARTONIENSE
				LUTECIENSE
				YPRESIENSE
			INFERIOR	THANETIENSE
	DANIENSE			
	MADRIDENSE			MAASTRICHTIENSE
				CAMPAIENSE
				SANTONIENSE
	JURASICO			Malm
			TURONIENSE	
			Dogger	CENOMANIENSE
				ALBIENSE
		Lias	APTIENSE	
			BARRIEMIENSE	
	HAUTERIVIENSE			
VALANGIENSE				
		BERGASIENSE		
		TITONICO PORTLAND		
		NOUVELEMIENSE		
		OXFORDIENSE		
		CALLOVIENSE		
		BATHONIENSE		
		BAJOIENSE		
		AALeniENSE		
		TOARCIENSE		
		FLEHRSBACHIENSE		
		SINEMURIENSE		
		HETTANCIENSE		

Tomado de: Universidad Complutense de Madrid, tabla realizada en 1.994 y actualizada en 1999.

Figura 4.14. Columna cronoestratigráfica. Las Formaciones que componen al Valle de Quíbor se encuentran dentro de los periodos más recientes del Fanerozoico (Cretácico superior y Paleógeno Eoceno)

b. Formación Barquisimeto (Kb):

Fue definida originalmente por Bushman, 1965 (Lexico Estratigráfico de Venezuela). Le fue asignada una edad Cretácico Superior (Cenomaniense-Maastrichtiense) con base a hallazgos fósiles de distintas especies.

Litológicamente está compuesta por lutitas, limolitas, margas compactadas, ftanitas y calizas, de color gris oscuro a negro en estado fresco y tonos muy claros de gris al meteorizarse. Las capas de calizas son muy discontinuas, y son más desarrolladas en la parte inferior de la Formación. Los porfidoblastos de pumpellyita y el carácter filítico de algunas capas indican un leve metamorfismo. En algunas áreas las unidades calcáreas constituyen una impresionante sección de calizas y luego casi desaparecen a distancia relativamente corta, debido a abruptos cambios laterales de facies a margas.

Las complicaciones estructurales de esta Formación han impedido definir el espesor exacto de la misma aunque hay buenos afloramientos en la zona montañosa noreste y este así como hacia la zona suroeste y sur de la región de Quíbor. Mientras que dentro del Valle se observan afloramientos en el sector Los Cerritos.

En cuanto al origen de la Formación, Coronel y Renz (1960) al igual que Bellizia & Rodríguez (1967), en CIDIAT 2012, consideran que representa una acumulación heterogénea de materiales alóctono, embebidas en el flysch del Terciario inferior. Producto del deslizamiento de bloques por gravedad (dinámica que se observa incluso en la actualidad), este modelo explicaría relaciones estratigráficas caóticas que se observan para esta Formación en todo el estado Lara. En este sentido, se observan relaciones caóticas entre la Formación Barquisimeto y sus vecinas, Formaciones Mamey, Morán y Matatere.

c. Formación Mamey (Km):

Fue definida por Bellizia en 1.968 (Lexico Estratigráfico de Venezuela). Es de edad Cretácico inferior (inferida por el contenido fósil de amonites, pelecípodos y corales) y de origen metamórfico de facies baja. Se compone de esquistos cuarzo-micáceo-sericíticos, metaconglomerados, meta areniscas, calizas laminadas y filitas, el grado de metamorfismo y el

porcentaje de rocas calcáreas disminuyen hacia la parte superior de la formación, donde las rocas arenáceas y lutitas filíticas son dominantes.

Afloramientos de estas rocas se encuentran hacia el norte de la región de Quíbor, en contacto de falla con la Formación Barquisimeto. A pesar de no tener definida una sección tipo, el espesor estimado de la Formación es de 1400 m según datos reportados por Bellizzia y Rodríguez (1968).

4.2.4.2. Terciario:

a. Formación Matatere (Tpema):

Fue definida por A. Bellizzia y D. Rodríguez G., 1966 (Lexico Estratigráfico de Venezuela). Su edad fue asignada en forma amplia al Paleoceno-Eoceno (Paleógeno) con base en hallazgos microfósiles y microfósiles de foraminíferos.

Litológicamente está compuesta por una gruesa secuencia de turbiditas, compuesta por una intercalación de lutitas y areniscas, las areniscas suelen presentarse como impuras líticas e impuras feldespáticas con varios horizontes de areniscas conglomeráticas y líticas, los fragmentos líticos corresponden a caliza, filita, esquisto, cuarcita, lutita y en menor proporción rocas volcánicas y gneises. La matriz que sustenta todos los fragmentos es arcillosa y algunas veces arcillosa calcárea. El escogimiento de los granos es pobre y su morfología es angular, lo cual es indicativo de dinámicas de sedimentación precipitadas semejantes a la de los flysch, se ha comprobado que los bloques deslizados de ésta Formación provienen de la Formación Barquisimeto y del Cretácico inferior, ambos supradycientes. Por su parte, las lutitas son generalmente limolíticas y arenáceas de color negro en estado fresco y verde en estado meteorizado, su foliación es en forma de punta de lápiz.

En esta Formación, la presencia de grandes espesores de turbidita evidencia una historia en la que los fenómenos de deslizamientos submarinos era intensa, facilitada en parte por la tectónica y la mecánica de transporte del alóctono (napas de Lara) que constituyen una parte importante en la génesis del surco de Barquisimeto.

Afloramientos de la Formación Matatere en la región de Quíbor, se encuentran en la zona montañosa de la parte oeste del Valle y hacia la parte noreste.

b. Formación Morán (Tpemo):

Fue descrita por Von Der Osten y D. Zozaya, 1957 (Lexico Estratigráfico de Venezuela). Su edad se corresponde con el Eoceno – Paleoceno (Paleógeno), con base en el rico contenido fósil de foraminífero e icnofósiles.

Litológicamente está compuesta por secuencia de lutitas, areniscas y calizas. Dentro de la Formación se diferencian dos Miembros, uno inferior rico en lutitas denominado Lutitas del Tocuyo y uno superior más rico en arenisca llamado Areniscas de Botucal.

El Miembro Lutitas del Tocuyo, inicia en la base con lutitas grises, que cambian de tonalidad hacia la parte superior (lutitas negras, marrón-verdoso, marrón y rojizo), finalmente, en el tope son de color rojo vino tinto, amarillo, negro y gris verdoso. En el medio y parte superior de la sección, se observan capas delgadas de limolitas con vetas de cuarzo y arenitas líticas.

El Miembro Areniscas de Botucal consiste en ortocuarcitas de color blanco a crema, que pasan a amarillo o marrón rojizo por meteorización. El tamaño de los granos varía de fino a grueso llegando a conglomerados de grano fino. Los granos son subangulares a subredondeados. Intercaladas con las areniscas, se encuentran lutitas talcosas de colores gris claro, violeta o negro, con tubos de gusanos. Las calizas de la parte superior del Miembro Lutitas de El Tocuyo tienen color gris, beige y negro, en general, son fosilíferas.

Afloramientos de la Formación Morán se encuentran en la zona montañosa del sur del Valle.

c. Formación El Pegón (Tmpp):

Fue descrita por J. R. Bushman, 1965 (Léxico estratigráfico de Venezuela). Su edad fue asignada al Mioceno – Plioceno (Neógeno) en función de muestras de ostrácodos mal preservados y unos pocos foraminíferos encontrados en la Formación y algunas muestras de dientes encontradas en materiales correlacionables que tienen esta misma edad.

Litológicamente consiste en gravas pobremente consolidadas y mal escogidas, con cantos de grande diámetro, compuestos por fragmentos de cuarzo, esquistos cuarzo-sericíticos y calizas. El endurecimiento de las gravas se debe a cemento calcáreo. En el área Quíbor-Sanare, las gravas son de color blanco, marrón y marrón amarillento, con peñones y guijarros de cuarzo blanco, ftanita y arenisca, las cuales se presentan en capas gruesas o lenticulares. Interstratificadas con las gravas, se observan capas gruesas y lentes de arenas arcillosas, friables, de color blanco a marrón claro y arcillas de color gris claro a gris azulado, con tintes de marrón.

Afloramientos de la Formación El Pegón en la región de Quíbor se encuentran en contacto discordante sobre la Formación Morán hacia el extremo sur del Valle.

4.2.4.3. Cuaternario:

a. Cuaternario (Qal):

Se refiere a sedimentos de origen reciente que descansan en contacto discordante sobre las rocas de las Formaciones Barquisimeto, Morán y Matatere. Constituyen el relleno fluvio-lacustre del Valle de Quíbor y son el producto de la erosión y meteorización de las rocas expuestas de la zona montañosa que circula al Valle. La litología de los materiales anteriormente descritos se refiere a arcillas y limos con intercalación de arenas, gravas y peñones, que dispuestos en forma de lentes interdigitados, conforman los acuíferos potenciales de la zona, a pesar de su poca continuidad lateral y espesor. Particularmente en la parte sur del Valle los depósitos cuaternarios corresponden a una sedimentación de conos de deyección o piedemonte. Las arenas varían de tamaño fino a grueso, siendo en general bien gradadas con morfología subangulares y pocas veces redondeados, de cuarzo, ftanita, caliza y lutita. Las gravas son bien gradadas, de fragmentos subangulares y aplanados de areniscas, lutitas y ftanitas (Aguilera y Padilla, 1963 en CIDIAT, 2011).

El relleno fluvio-lacustre del Valle de Quíbor tiene un espesor máximo de aproximadamente 200 – 230m. Estos espesores se encuentran en la parte central del Valle, formando una zona angosta, de aproximadamente 1000m de ancho y alargada en dirección noreste – suroeste.

Tabla 4.3. Resumen de ubicación de las Formaciones geológicas en el entorno de la región de Quíbor.

Afloramientos en la región de Quíbor			
<i>Sistema</i>	<i>Formación</i>	<i>Ubicación</i>	<i>Contacto</i>
CRETÁCICO	Villanueva	Zona montañosa Sector: SURESTE	Morán
	Barquisimeto	Zona montañosa Sector: NORESTE Y SUR	Mamey, Morán y Matatere
	Mamey	Zona montañosa Sector: NORTE	Barquisimeto
TERCIARIO	Matatere	Zona montañosa Sector: OSTE Y NORESTE	Barquisimeto
	Morán	Zona montañosa Sector: SURESTE	Villanueva
	Pegón	Zona montañosa Sector: SUR	Morán
CUATERNARIO	Cuaternario	Valle de Quíbor	Barquisimeto, Morán y Matatere

4.2.5. Hidrogeología:

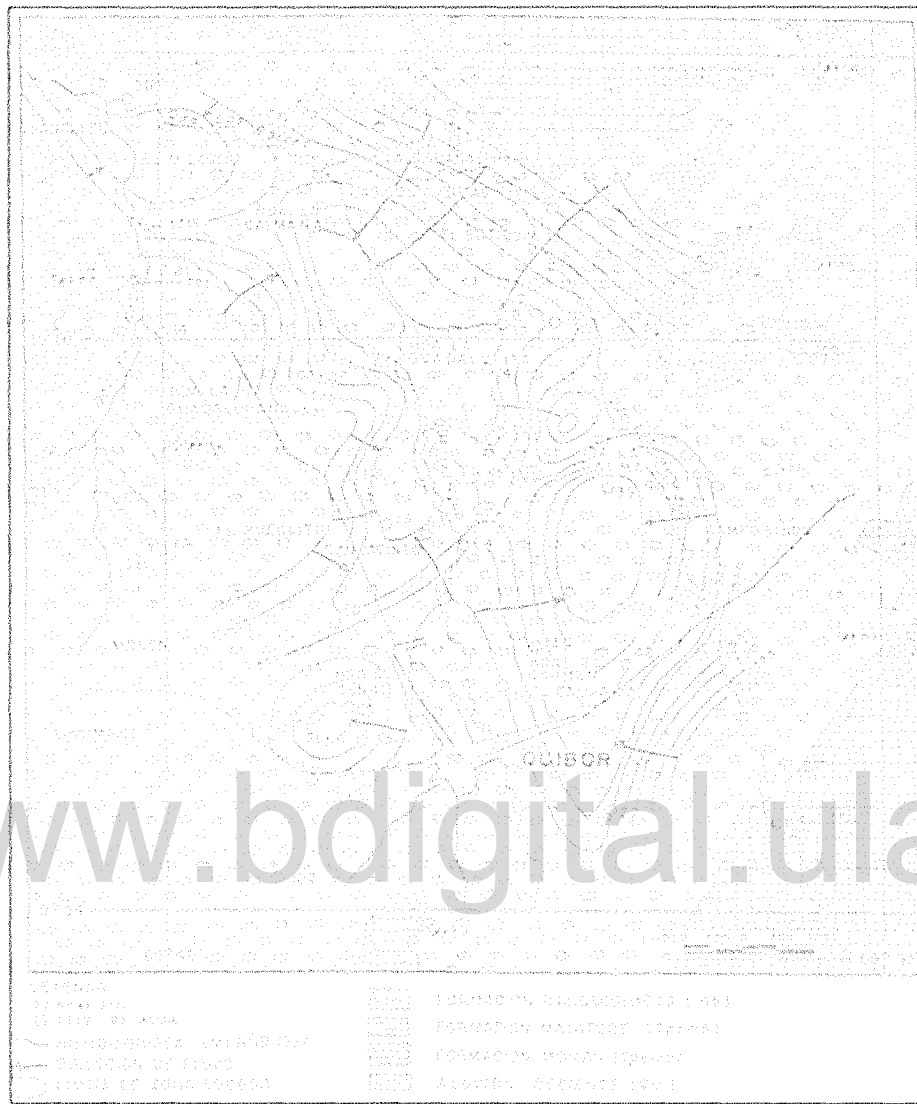
El flujo subterráneo en el Valle de Quíbor ocurre en materiales granulares de Cuaternario, integrados por lentes de arena y grava con intercalaciones de arcilla pertenecientes al relleno fluvio-lacustre, mientras que el basamento hidrogeológico y los límites laterales del Valle lo constituyen las rocas del Cretácico y del Terciario, como se describió en la sección anterior y se muestra en la Figura 4.15. Según lo descrito por Alvarado, 1989, el espesor del relleno fluvio-lacustre en el sector Norte (sector ubicado por encima del alto geológico de Los Cerritos) varía de 0 a 120 m con un espesor saturado que alcanza los 97 m. En el sector Sur (sector ubicado por debajo del alto geológico de Los Cerritos) el espesor de los sedimentos varía de 0 a 230 m y espesor máximo saturado de 110 m.

En 1963 el máximo descenso registrado fue de 53m en el norte y de 95m en el sur. La profundidad del nivel estático registrada en 1987 en el sector norte fluctúa entre 20 y 86m, en el sur entre 81 y 135m (CDIAT, 2012). A la fecha, la profundidad del nivel presenta variaciones que fluctúan de los 17m a los 158m de profundidad para todo el Valle. El comportamiento de las isolíneas de flujo del agua subterránea expresa una tendencia de movimiento que va desde los bordes del acuífero hacia su interior, manifestando la presencia de un cono de abatimiento en la parte central derivado de la intensiva explotación que ha ido experimentando el agua subterránea enfocada en la parte central del Valle.

Dependiendo de su comportamiento hidrogeológico, en la región de Quíbor, pueden diferenciarse dos unidades litológicas: 1.- Una unidad litológica con porosidad Intergranular e importancia hidrogeológica relativa, grande a pequeña (acuífero central) y 2.- una unidad litológica con porosidad por fracturamiento, disolución o efecto mixto e importancia hidrogeológica relativa, mediana a pequeña (zona sureste y norte) (Alvarado, 1989 en (CDIAT, 2012)).

a. Unidad litológica con porosidad intergranular: importancia relativa grande a pequeña. Está representada por las gravas, arenas, areniscas y la alternancia rítmica de lutitas y areniscas pertenecientes al relleno fluvio-lacustre del Cuaternario, también incluye algunas partes de la zona montañosa mas cercana a la planicie y representada por las Formaciones Villanueva, Morán, El Pegón y Matatere. Dentro de esta unidad se pueden diferenciar tres tipos:

- **Unidad litológica compuesta por sedimentos poco o no consolidados:** comprende a las gravas y arenas del relleno fluvio-lacustre del Valle de Quíbor. Conforman pequeños cuerpos acuíferos generalmente son discontinuos y locales, de rendimiento alto a bajo.
- **Unidad litológica constituida por sedimentos consolidados:** comprende las capas de areniscas y gravas del borde y la base en el sector sur del Valle. A esta categoría pertenecen las Formaciones Villanueva, Morán y El Pegón. Con frecuencia estos tipos de acuíferos son locales y de bajo rendimiento.



Tomado de: Alvarado, 1989 en APROSELA, 2000

Figura 4.15. Mapa hidrogeológico del Valle de Quíbor, 1987

- **Unidad litológica representada por una alternancia rítmica de capas de lutitas y areniscas consolidadas:** a esta unidad corresponde la Formación Matatere. Este tipo de acuífero es muy local y de bajo rendimiento, con poca importancia hidrogeológica. Se encuentran ubicada en el borde y la base del sector oeste del Valle.

b. Unidad litológica con porosidad por fracturamiento, disolución o efecto mixto: comprende las rocas metamórficas del borde y la base del relleno fluvio-lacustre. Las calizas que se encuentran en las Formaciones Mamey y Barquisimeto son las unidades más importantes de esta categoría, ya que existe la posibilidad de que estas rocas presenten estructuras karstificadas, que pueden favorecer la constitución de acuíferos cavernosos. Probablemente, estos acuíferos tienen mayor importancia en profundidad al comunicarse y servir de fuente de recarga de los acuíferos intergranulares del relleno fluvio-lacustre.

Importancia del agua dentro de las actividades del Valle de Quíbor:

En función de cubrir las demandas agua para cultivar, desde de la Colonia se establecen zonas de siembra bajo riego, tanto así que en el año 1750 se construyó la primera represa en la que se almacenaba agua suficiente para proveer de un riego constante y eficiente a las siembras de trigo que tenían los españoles en el Valle (Canelón, 2004). Posteriormente, en 1973 es puesta en marcha la presa Dos Cerritos, con fines de abastecimiento domestico de la ciudad vecina de Barquisimeto, pero que a su vez cuenta con una aducción a través de la que se logra abastecer a un grupo de agricultores que se dedican a la producción de semillas en el Valle de Quíbor. Otro aprovechamiento alternativo de agua que se lleva a cabo dentro del Valle, es el empleo de lagunas artificiales para captar y tratar las aguas negras de Quíbor para usarlas en el riego de pastos y forraje. Así mismo, el agua que fluye por las paredes de la excavación de uno de los extremos del túnel de trasvase de la represa Yacambú-Quíbor, es captada y empleada con fines de riego, además de la extracción por pozos del agua subterránea del acuífero de Quíbor.

Como se puede apreciar, a pesar de que la oferta es variada, muchas veces no es constante ni suficiente, sobre todo en época de sequía, esta situación impulsa a un gran número de agricultores a hacer un aprovechamiento combinado de las fuentes de agua disponibles en su entorno próximo. Un caso común, resulta de sistemas de riego que en temporada de invierno son servidos por fuentes de agua superficial y cuando comienza la temporada de verano, son alimentados por agua subterránea que cada agricultor extrae de pozos ubicados dentro de su propiedad.

www.bdigital.ula.ve

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY - NC - SA 3.0 VE)

CAPITULO 5

CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO

En este capítulo se cuantificaran todas las variables necesarias para lograr caracterizar el acuífero del Valle de Quíbor tomando en consideración las necesidades del objetivo final de esta investigación, la determinación del parámetro radio de interferencia. Así describiremos la forma en la que se realizó el inventario de pozos, y las estrategias empleadas para la cuantificación de los parámetros hidráulicos de los pozos, deteniéndonos en los retos particulares que se presentaron con cada variable

5.1. Inventario de pozos:

Como primer paso para caracterizar el acuífero y la definición de la interferencia que puede ejercer la explotación de un pozo sobre sus vecinos, fue esencial analizar la data existente en cada pozo operativo del acuífero. En este sentido se seleccionaron los datos reportados por el Ministerio Popular Para el Ambiente (MPPA) y APROSELA según pruebas de bombeo realizadas entre los años 2008, 2009 y 2011.

La información fue filtrada minuciosamente tomando en consideración los siguientes aspectos:

1. En caso de existir pozos de nomenclatura repetida, se comparó la información que cada uno poseía, de ser diferente se integró en uno solo de los pozos.
2. Los pozos que no contenían información fueron eliminados.
3. Se observaron pozos que a pesar de tener el mismo nombre en diversas campañas, su ubicación espacial era diferente, en este caso se seleccionó como ubicación correcta aquella que más se repetía en las diversas campañas.
4. Se presentó el caso en el que para coordenadas iguales había pozos con nomenclatura distinta, para corregir esta anomalía se procedió del mismo modo que con el caso anterior.

5. Al plotear los pozos, algunos de ellos se encontraban ubicados fuera de los límites de la divisoria del Valle, esos pozos fueron borrados de la data por no ser representativos de la dinámica hidrológica del Valle.

En este sentido, se compararon y filtraron 210 pozos, de los cuales quedaron 42 pozos que contaban con datos de *nivel estático (NE)*, *nivel dinámico (ND)*, *caudal (Q)* y *ubicación espacial* con referencia al datum La Canoa, posteriormente reprojectado al datum REGVEN. Adicionalmente, se verificó que el nombre de cada pozo correspondiese con la codificación empleada por el MPPA (Anexo B-Tabla B1).

En lo que respecta a la variable *coeficiente de almacenamiento (S)*, los datos más confiables se presentan en el modelo actualizado para el Valle de Quíbor realizado con MODFLOW (Jegat, H. *et al.*, 2.012). En dicha simulación se utilizaron 50 pozos.

5.2. Determinación de los parámetros hidráulicos de acuífero:

5.2.1. Información básica:

a) Para la obtención de la información necesaria dentro de este apartado, se evaluaron las pruebas de bombeo de los 42 pozos anteriormente filtrados y se empleó el programa Acui-Quíbor (Mora, 2011) para localizar en cada pozo los valores de las variables *profundidad de roca (PR)* y *profundidad de agua (PA)*, alguna veces empleado como sustituto del *nivel estático (NE)*, que corresponden a la ubicación de estrato impermeable del acuífero en cada pozo y el tope del espesor saturado de cada pozo respectivamente.

- La profundidad del estrato impermeable se determinó al introducir las coordenadas de cada pozo en el programa AcuiQuíbor.
- El nivel estático en muchos de los pozos surgió directamente de las pruebas de bombeo, en otros casos donde no existían pruebas de bombeo, el nivel estático fue importado del valor de profundidad de agua de Acui-Quíbor. Sin embargo, en vista de que se analizaron varias campañas de pruebas de bombeo, el nivel dinámico usado en los cálculos del espesor saturado fue un promedio de los datos de cada campaña conjuntamente con los de Acui-Quíbor.

b) Se organizaron los datos recolectados para los 42 pozos en estudio y se elaboró una base de datos con la siguiente información:

Coordenadas N y E

Caudal medio (Q)

Profundidad de roca (PR)

Profundidad de agua (PA)

Nivel estático (NE)

Nivel dinámico (ND).

c) Utilizando las formulaciones descritas en el capítulo de marco teórico, se hizo uso de la información del punto anterior en función de determinar el valor de los parámetros hidráulicos del acuífero, a saber:

Abatimiento en el pozo (s)

Espesor saturado (b)

Capacidad específica (CE)

Transmisividad estimada (Tes)

Permeabilidad (K_{es}).

5.2.2. Parámetros hidráulicos del acuífero:

a. Abatimiento (s):

Para definir el abatimiento que experimenta el nivel del agua del acuífero en cada pozo al iniciarse el proceso de extracción, se restó el nivel dinámico (ND) del agua luego de un tiempo de estabilización, menos el nivel estático (NE) que tenía el agua antes de comenzar el bombeo (Ec. 5.1). En la Tabla 5.1 se muestra un ejemplo de este cálculo para el pozo LA6070029A.

$$s = ND - NE$$

Ec. 5.1

Tabla 5.1: ejemplo de cálculo del abatimiento para el pozo LA6070029A.

Pozo	Pruebas de bombeo		Abatimiento en el pozo (m)
	NE (m)	ND (m)	S = ND-NE
LA6070029A	108.00	115.00	7.00

b. Capacidad específica (CE):

Para determinar la capacidad específica se requirió conocer el abatimiento (s) del nivel del agua y el caudal (Q) de operación de cada pozo y posteriormente se aplicó la ecuación 2.5 (definida en el capítulo II). En la Tabla 5.2 se muestra un ejemplo de este cálculo para el pozo LA6070029A.

$$CE = \frac{Q}{s}$$

Ec. 2.5 (Bis)

Tabla 5.2: ejemplo de cálculo de la CE para el pozo LA6070029A.

Pozo	Abatimiento en el pozo (m)	Prueba de bombeo	CE (m ² /día)
	S = ND-NE	Qmed(m ³ /d)	CE=Qmed/S
LA6070029A	7.00	2384.64	340.66

c. Transmisividad (T):

Para el cálculo de la transmisividad fue necesario aplicar la ecuación 3.6 (definida en el capítulo II), requiriendo el valor previamente determinado de CE y el de la constante c, esta última calculada para el acuífero de Quíbor en estudios anteriores. En la Tabla 5.3 se muestra un ejemplo de este cálculo para el pozo LA6070029A.

$$T = CE * c$$

Ec. 2.6 (Bis)

Tabla 5.3: ejemplo de cálculo de la T estimada para el pozo LA6070029A.

Pozo	CE (m ² /día)	c	T (m ² /día)
	CE=Qmed/S		T=CE*5.7973
LA6070029A	340.66	5.7973	10975.14

d. Espesor saturado (b):

Para calcular del espesor saturado de la formación en cada pozo, fue preciso conocer:

- La profundidad a la cual se encuentra el nivel impermeable que limita al acuífero en su parte inferior o profundidad de roca (PR).
- El nivel estático (NE) del agua en cada pozo.

Al restar estos dos parámetros, como lo indica la ecuación 2.4 (definida en el capítulo 2), se obtiene el espesor saturado del acuífero en cada punto de observación. Hay que destacar que este espesor resultante se trata de un valor referencial, pues no toma en cuenta dentro de su determinación la existencia de intercalaciones de arcilla (lentes impermeables) que ocurren con frecuencia dentro de los estratos permeables en el acuífero de Quíbor, sin embargo se hace el cálculo del espesor saturado siguiendo estas directrices a fin de simplificar el problema. En la Tabla 5.4 se muestra un ejemplo de este cálculo para el pozo LA6070029A.

$$b = PR - NE$$

Ec. 2.4 (Bis)

Tabla 5.4: ejemplo de cálculo de b para el pozo LA6070029A.

Pozo	Acui-Quibor	Prueba de bombeo/Acui-Quibor	Espesor Saturado (m)
	Prof. Roca*(m)	NE (m)	b = PR-NE
LA6070029A	167.00	108.00	59.00

e. Conductividad hidráulica (K):

Este parámetro se determinó a través de la ecuación 2.3 (definida en el capítulo II), considerando que se conocía el espesor saturado (b) y la transmisividad estimada (T). En la Tabla 5.5 se muestra un ejemplo de este cálculo para el pozo LA6070029A.

$$T = K * b$$

$$K = \frac{T}{b}$$

Ec. 2.3 (Bis)

Tabla 5.5: ejemplo de cálculo de K para el pozo LA6070029A.

Pozo	Espesor Saturado (m)	T (m ² /día)	K (m/día)
	b = PR-NE	T=CE*5.7973	K=T/b
LA6070029A	41.52	2048.98	49.35

f. Coeficiente de almacenamiento (S):

Para la determinación de este parámetro se hizo uso de la ecuación 2.11 (definida en el capítulo II).

$$S_i = 1.8 \times 10^{-6} * (d_1 - d_2) + 8.6 \times 10^{-4} * (d_1^{0.3} - d_2^{0.3})$$

$$S_t = \sum_{i=1}^n S_i$$

$$S_t = S_1 + S_2 + S_3 + \dots + S_n$$

Ec.2.11 (Bis)

En este sentido, se elaboró una hoja de cálculo que contuviera la información de espesor de cada capa, de cada uno de los 50 pozos analizados y su clasificación como capa permeable o impermeable, tal como se muestra en la Tabla 5.6.

Los valores de espesor de cada capa y de permeabilidad se obtuvieron del modelo del acuífero obtenido vía simulación con el programa MODFLOW (Jegat, H. *et al.*, 2.012)

Tabla 5.6: ejemplo de ubicación de los parámetros necesarios para el cálculo de S. Dentro del ítem Tipo de Capa, i=impermeable, p=permeable.

capa	Pozo	Este	Norte	Cota terreno	
	LA6070030A	429746.49	1099853.72	662.41	
	Cota superior (m)	Cota inferior (m)	Espesor de capa (m)	K (m/día) MODFLOW	Tipo de capa
1	662.41	660.30	2.11	5.00E-07	i
2	660.30	643.86	16.44	2.00E-04	p

La determinación de la permeabilidad (K) de cada capa se hizo a través de la permeabilidad (K), tomando como criterio, que estratos con $K < 10^{-7}$ se refieren de capas con baja permeabilidad (impermeable), mientras que estratos con $K > 10^{-2}$ se refieren a capas con mayor permeabilidad (permeable).

El acuífero de Quibor es un acuífero multicapas, en el cual se exhiben doce estratos, algunos de los cuales son permeables y otros impermeables. En los pozos evaluados con MODFLOW la secuencia general que se observa es del tipo de la expuesta en la Figura 5.1, es decir, una capa permeable rodeada por dos capas impermeables.

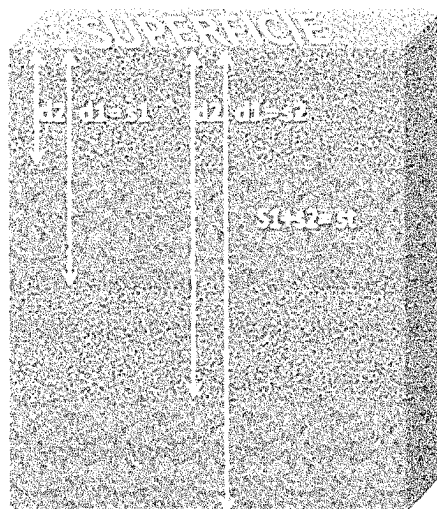


Figura 5.1. Diagrama de selección de d_1 y d_2 para la determinación de S_i en el conjunto de pozos evaluados dentro del acuífero de Quíbor.

En función de ello se resolvió hacer el cálculo del coeficiente de almacenamiento (S_i) para cada pozo, tomando en consideración el criterio expuesto en el modelo de la Figura 5.1. En la Tabla 5.7 se muestra un ejemplo de cálculo, los resultados completos se muestran en la Tabla B4 de los anexos.

Tabla 5.7. Ejemplo de cálculo del coeficiente de almacenamiento para un pozo.

Pozo		Este		Norte					
RAtr1		432938,20		1088834,00					
Capa	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^{0,3}	D2 ^{0,3}	D1 ^{0,3} -D2 ^{0,3}	Si	St	Tipo de acuífero
1	9,191	5,650	3,541	1,94540	1,68118	0,26422	0,00023	8,06E-04	Confinado
2	17,605	12,808	4,797	2,36424	2,14904	0,21520	0,00019		
3	25,349	23,430	1,919	2,63747	2,57592	0,06156	0,00006		
4	31,159	27,592	3,567	2,80592	2,70542	0,10050	0,00009		
5	45,463	34,726	10,737	3,14266	2,89865	0,24401	0,00023		

5.3. Mapeado de los parámetros hidráulicos de acuífero:

En función de extrapolar los parámetros hidráulicos de los pozos analizados a todo el acuífero del Valle de Quíbor, se realizó un análisis estadístico de las variables a mapear. El mapeo propiamente dicho se hizo empleando métodos geoestadísticos. Las técnicas de mapeo usando kriging se fundamentan en el cumplimiento de ciertas suposiciones la primera de las cuales es que las variables deben seguir una distribución normal. Una vez realizada dicha comprobación se procedió a caracterizar espacialmente las diferentes variables mediante el ajuste del semivariograma a las mismas.

5.3.1. Comprobación de hipótesis de normalidad:

Las variables Q , b , K y S son las que se emplean como base para el cálculo de los parámetros hidrológicos del acuífero, en este sentido, fue necesario comprobar el ajuste de sus datos a una distribución.

El procedimiento que se siguió incluyó la aplicación del test de Smirnov – Kolmogorov, mediante el programa Ajuste V.3 (Duque, s/a), el cual exigió la preparación de los datos en un archivo de extensión *.dat* según el formato que se muestra en la Tabla 5.8.

En la Tabla 5.9 se muestra un ejemplo del empleo del programa Ajuste V 3 para los datos de caudal (Q):

Tabla 5.8. Directrices para la construcción del archivo de datos para el Ajuste V.3.

Línea	Parámetro
1	Número de series a evaluar
2	Nombre de la variable y/o comentarios
3	Número de datos
4.....n	Datos

Tabla 5.9. Ejemplo de archivo de datos para la variable caudal en el programa Ajuste V.3.

1	
Q (m3/dia)	
33	
1671.84	
859.68	
1814.4	
4051.3	
669.6	D
2854.66	
1002.24	
1097.28	
3889.73	A
2260.22	
1646.78	
1196.64	
1120.61	T
473.47	
1781.57	
794.88	
3434.4	O
255.74	
3041.28	
3726.43	
1054.08	
54.43	S
189.22	
1021.25	
139.1	
165.89	
54.43	
368.06	
108.86	
295.49	
383.62	
400.9	
679.97	

Número de series a evaluar

Nombres de la variable y/o comentarios

El criterio de aceptación o rechazo de la prueba correspondió a un nivel de significancia α igual al 5%. Bajo esta premisa, la hipótesis nula no pudo ser rechazada para ninguna de las variables evaluadas, de modo que se concluyó que los datos de las variables Q, b, K y S, se ajustan a una distribución normal, tal como se muestra en la Tabla 5.10 y en el ejemplo de la Tabla 5.11 correspondiente a los resultados arrojados por el programa para la variable caudal (Q).

Tabla 5.10 Resumen de la prueba de ajuste a una distribución normal.

Test de smirnov kolmogorov			
Distribución normal			
Para un nivel de significancia del 5 %			
Variable	$\Delta (81;0,05)$ Obtenido	$\Delta (81;0,05)$ Crítico	Hipótesis de normalidad
K	0,2135	0,230	Aceptada
b	0,1074	0,264	Aceptada
S	0,1759	0,190	Aceptada
Q	0,1417	0,264	Aceptada

Tabla 5.11 Ejemplo de los resultado del programa Ajuste V 3 para la variable caudal (Q).

SERIE No. 1 Q							
DISTRIBUCIÓN	MEDIA	DESV. EST.	C. ASIMET.	C. VAR.	DELT. MAX.	E. CUAD.	TEST
S. K.							
NORMAL	1289.64	1212.855	1.0848	0.9405	0.1776	456.6061	ACCEPT
L-NORMAL	2.87	0.527	-0.5463	0.1837	0.0984	436.9743	ACCEPT
GUMBEL	1289.64	1212.855	1.0848	0.9405	0.1088	300.1182	ACCEPT
L-GUMBEL	2.87	0.527	-0.5463	0.1837	0.1651	1455.217	ACCEPT
PEARSON 3	1289.64	1212.855	1.0848	0.9405	0.1059	309.0734	ACCEPT
L-PEARSON 3	2.87	0.527	-0.5463	0.1837	0.0818	252.1642	ACCEPT

5.3.2. Tratamiento geoestadístico de las variables:

a. Variograma:

El modelado de los variogramas de las variables Q , b , K y S , se hizo mediante los programas *Prevard 2D*, *Vario2DP* y *Model* del *Variowin 2.1* (Pannatier & Universidad de Lausanne, 1994)

Para comenzar, se preparó la data en un archivo de extensión *.dat* siguiendo los criterios expuestos en la Tabla 5.12, ver ejemplo en el apéndice c1.

Seguidamente, se ejecutó el programa *Prevard 2D* con el objetivo de que se generaran los pares de valores con los que el programa trabajó para construir los variogramas en el *Vario2DP*. En el ambiente *Vario2DP*, se graficaron variogramas de superficie con la finalidad de evaluar las direcciones del espacio muestral en las que la varianza resultó menor. Estas direcciones fueron tomadas en cuenta para la consecuente construcción de los variogramas direccionales de cada variable.

Tabla 5.12. Direcctrices para la construcción del archivo de datos para el *Variowin 2.1*.

Línea	Parámetro
1	"Nombre de la variable y/o comentarios"
2	Número de columnas que ocupan los datos
3	Nombre de los datos de la columna 1
4	Nombre de los datos de la columna 2

Tabla 5.12. Directrices para la construcción del archivo de datos para el Variowin 2.1.

Línea	Parámetro
5	Nombre de los datos de la columna 3
6	Nombre de los datos de la columna n
7.....n	Datos

Finalmente, en el *Model*, se ajustaron los variogramas resultantes a los modelos teóricos disponibles en el programa y se extrajeron en cada caso los valores de efecto pepita, rango y meseta, los cuales son los parámetros necesarios para el modelado espacial empleando Kriging.

Modelado de las variables:

El modelado de las variables Q , b , K y S se hizo con las herramientas disponibles en el programa Variowin 2.1. A continuación se hace mención a la metodología a seguir con la variable Q , que fue la más compleja de modelar, sin embargo para el resto de las variables se siguió el mismo procedimiento.

Inicialmente se elaboraron 2 archivos con datos de caudal:

Archivo 1: contenía una data filtrada de los pozos operativos durante los últimos 5 años (2007-2012). Este archivo fue con el que se decidió trabajar en esta investigación por tener una data que representa mucho mejor el comportamiento de la variable Q para el Valle.

Archivo 2: contenía los datos históricos de caudal de los 42 pozos relacionados (Apéndice B).

A continuación se realizaron para ambos archivos los respectivos variogramas de superficie (Figura 5.2), seguidos de los variogramas direccionales (Figura 5.3). Para estos últimos se tomando como direcciones preferenciales las que se indican en la Tabla 5.13 y que coinciden con las direcciones de mayor continuidad observadas en los semivariogramas de superficie. Finalmente se ajustó un modelo teórico al variograma resultante del archivo 1 (Figura 5.4).

Tabla 5.13. Valores empleados en el cálculo de los variogramas de superficie de la variable caudal. Data 1: pozos operativos durante los últimos 5 años. Data 2: caudal de pozos históricos

Data	Espaciamiento de los intervalos	Número de intervalos	Resultados
1	1500	5	Dirección 30° NE
2	1700	8	Dirección 30° NE Dirección 45° NO

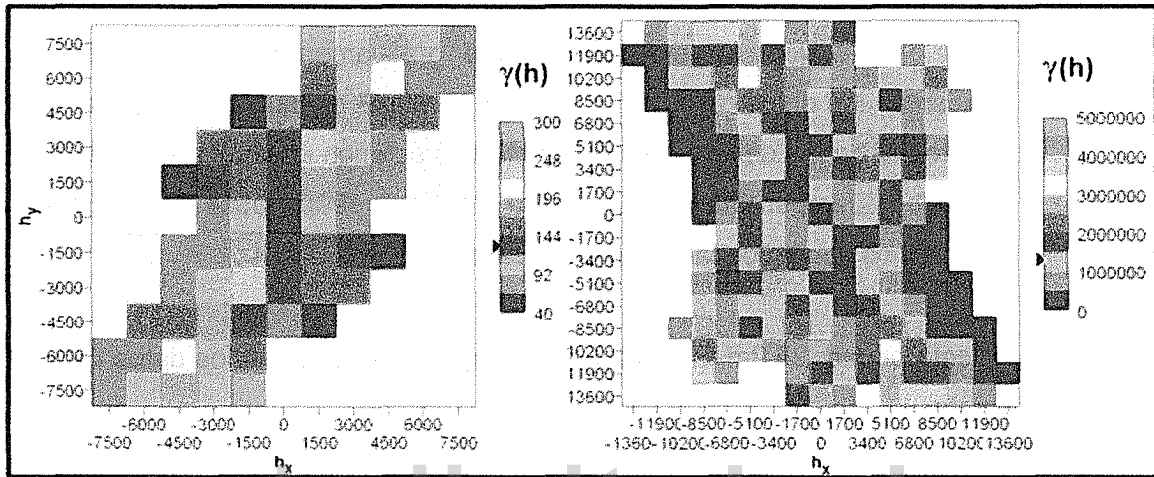


Figura 5.2. Variograma superficial para la variable caudal (Q). Izquierda: Resultados para la data 1. Derecha: resultados para la data 2.

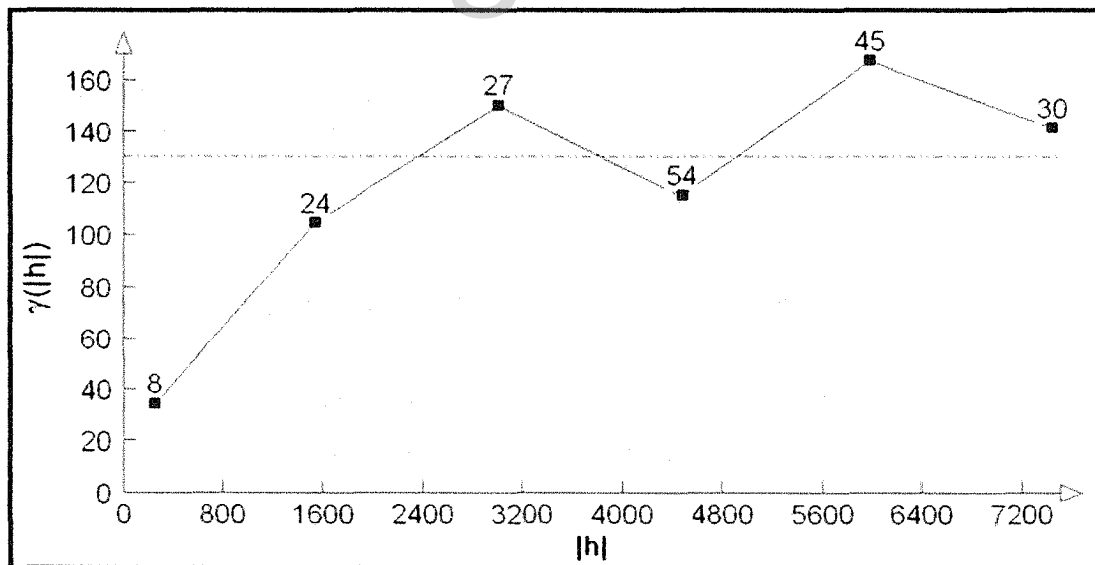


Figura 5.3. Variograma direccional para la data 1 - variable caudal (Q)

b. Ajuste de un modelo teórico

Haciendo uso del programa Variowin 2.1 se abrieron los variogramas direccionales u omnidireccionales de cada variable (Q , b , K y S) y se seleccionó el modelo que brindara el mejor ajuste al comportamiento de la curva, tomando en consideración las directrices definidas en el capítulo III – Marco Teórico. Así pues, en la Figura 5.4 se muestra el resultado del modelo para la variable Q .

- **Modelo seleccionado:** esférico. Debido gráficamente a la linealidad que presentan los datos cerca del origen y que fue el modelo que mejor se ajustó a la forma de los datos. Además, el modelo esférico es ideal para este tipo de variables (Samper Clavete & Carrera Ramírez, 1990), pues es indicativo de fenómenos continuos tal como es el caudal.
- **Efecto pepita:** 25,2m En vista del salto que experimentan los datos cerca del origen
- **Meseta:** 104m Debido a que es en un punto cercano a este valor donde la varianza de los datos parece mayor.
- **Rango:** 2671m Corresponde a la distancia vertical correspondiente al valor de la meseta, es decir, para distancias mayores a los 2671m no se espera que haya correlación entre los valores de Q .

De hecho, como se puede apreciar en la Figura 5.4 procedente del programa Variowin, una vez ajustado y aceptado el modelo, se muestran los parámetros correspondientes a dicho ajuste, e incluso el programa ofrece la posibilidad de visualizar cual fue el mejor ajuste logrado, de modo que el operador pueda decidir que ajuste prefiere.

Los archivos resultantes fueron introducidos posteriormente en el programa Sufer 9.0 para el modelado espacial de cada variable según se describe en el punto siguiente.

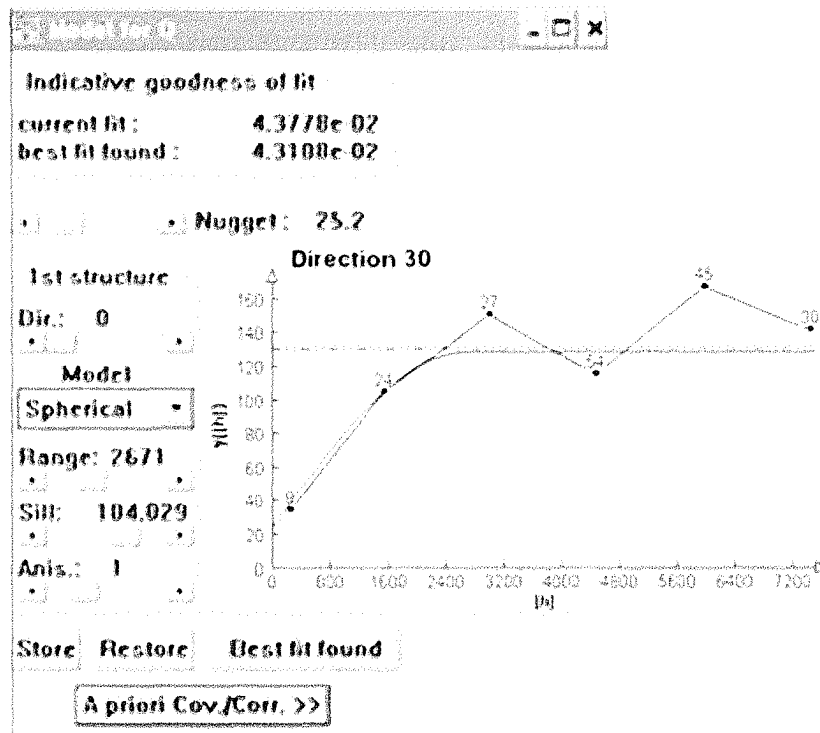


Figura 5.4 Ajuste a modelo teórico para los últimos 5 años - variable caudal (Q).

www.bdigital.ula.ve

5.3.3. Modelado espacial de las variables

Haciendo uso del método de interpolación Kriging dentro del programa Surfer versión 9.0 se modelaron las variables Q, K, b y S, tomando en cuenta para cada una de ellas los resultados del análisis geoestadístico previo. En la Figura 5.5 se muestra un ejemplo de la entrada de datos para una de las variables modeladas (Q).

Seguidamente en la pestaña de opciones avanzadas se introdujeron manualmente los valores de modelado resultante de los variogramas, en la Figura 5.6 se muestra un ejemplo de la entrada de los valores correspondientes a la variable caudal (Q).

Finalmente, se da aceptar a los dos cuadros de dialogo descritos anteriormente y el programa ofrece una imagen del mapa resultante (Figura 5.7).

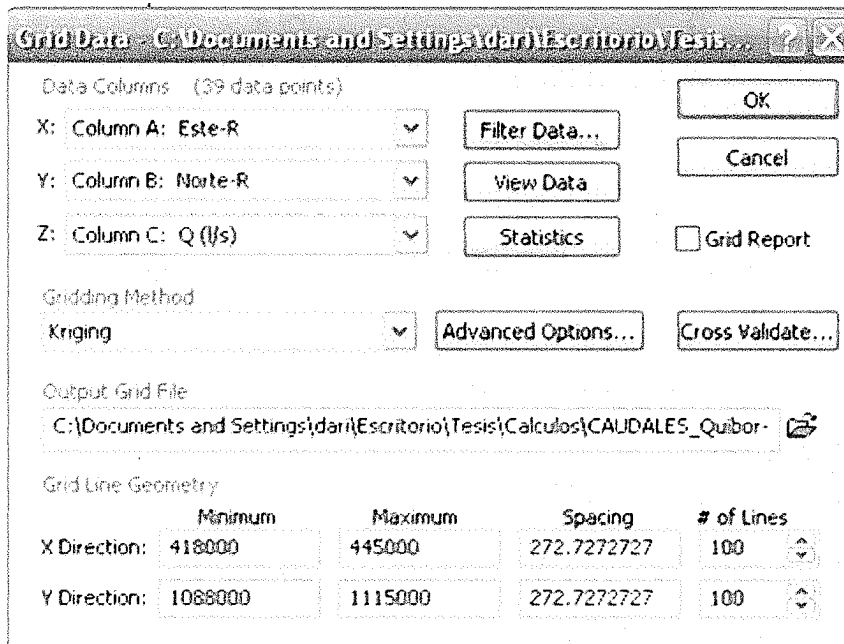


Figura 5.5. Entrada de datos en Surfer 9 para el modelado de la variable Q.

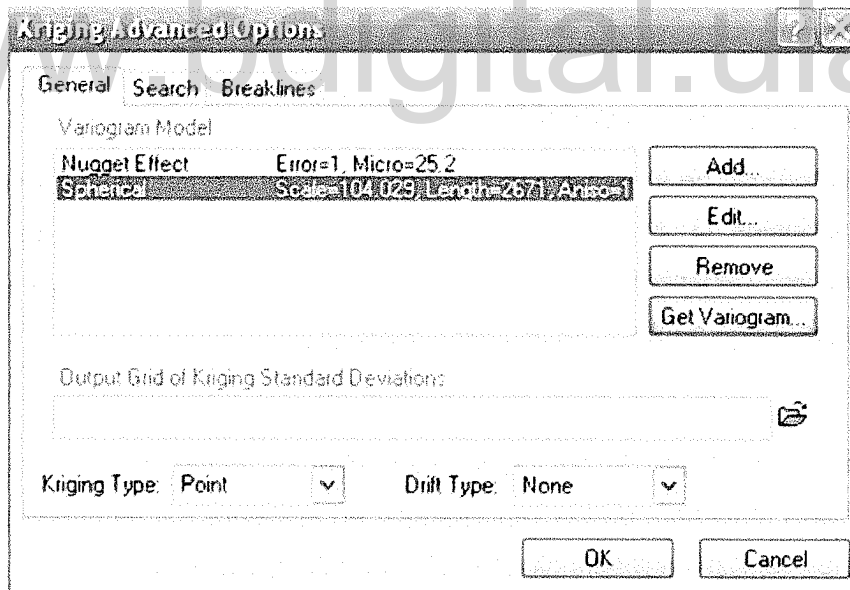


Figura 5.6. Entrada de valores de los modelos del variograma para Q.

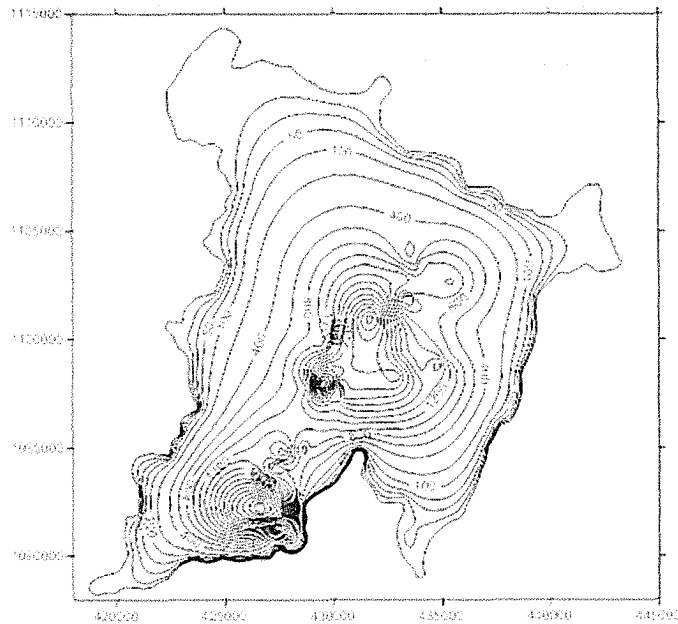


Figura 5.7. Mapa en Surfer 9.0 - variable Q.

El modelado de cada variable presentó retos particulares que se describen a continuación:

a. Transmisividad:

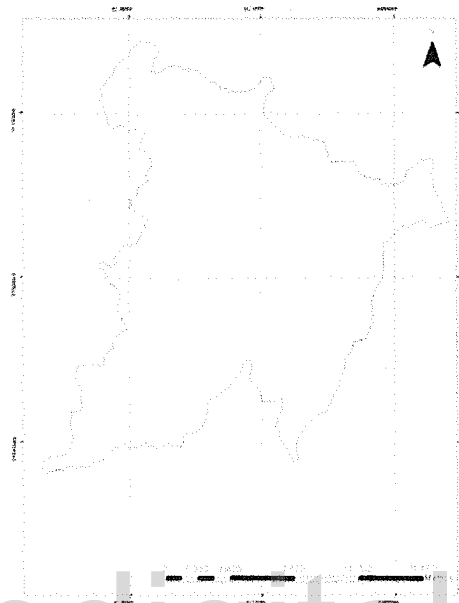
En lo que respecta a la construcción del mapa de transmisividad (T) se requirió seguir un conjunto de pasos que ayudaron a hacer una representación de la variable que se ajustara adecuadamente a la realidad del acuífero, en la que los bordes del acuífero tienen una transmisividad nula debido al carácter impermeable de ésta zona.

Tomando en consideración la ecuación 2.3 (Bis)

$$T = K \cdot b$$

Paso 1: se definió que en el acuífero las capas saturadas van disminuyendo su espesor a medida que éstas se van acercando a los bordes del acuífero hasta hacerse nulas al iniciarse las zonas de relieve montañoso que bordean al Valle. En este sentido, era necesario conocer las coordenadas de todos los puntos que conformaban el borde del acuífero, para ello, se empleó el mapa generado en el estudio de APROSELA, 2000, el cual

se encontraba en formato *shp* y contenía las coordenadas N y E de todos los puntos que delinearían el contorno del Valle de Quíbor (Figura 5.8).



Tomado y modificado de: (APROSELA, 2000).

Figura 5.8. Mapa contorno del Valle de Quíbor.

Paso 2: A los puntos que representaban el borde del Valle se les asignó un valor de espesor saturado (*b*) igual a 0m. Con estos nuevos valores fue enriquecida la data con la que posteriormente se graficó el mapa de espesores saturados (*b*) haciendo uso del programa Surfer 9.0 (Figura anexo B3).

Paso 3: Dentro del Surfer 9.0, haciendo uso de la función *math* de la pestaña *grid* (Figura 5.9), se multiplicaron los mapas de permeabilidad (*K*) (Figura 5.10.c) y el de espesor saturado (*b*) (Figura 5.10.b). De ese modo se obtuvo el mapa de transmisividad (*T*) para toda la extensión de acuífero (Figura 5.10.c).

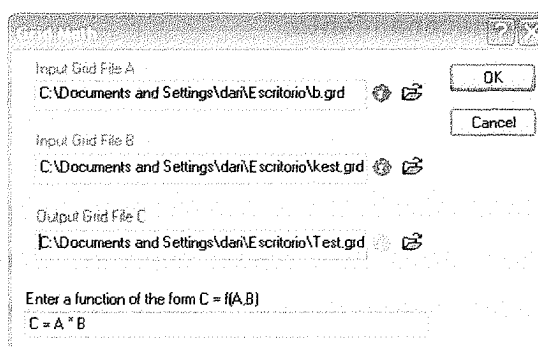


Figura 5.9. Cuadro de diálogo de la función Math de Surfer 9.0, para el cálculo del mapa de transmisividad (T).

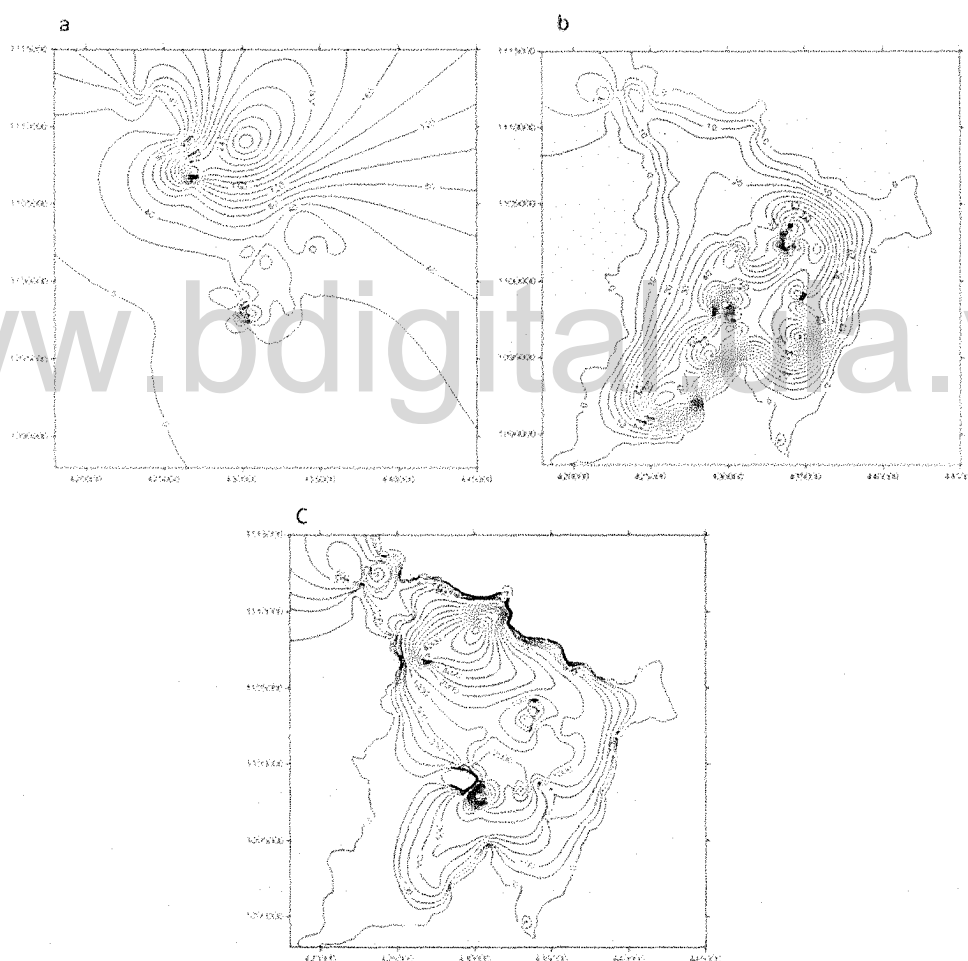


Figura 5.10. a. Mapa de Espesor saturado (b). a. Mapa de permeabilidad (K). c. Mapa de transmisividad (T). Surfer 9.0.

b. Caudal y coeficiente de almacenamiento:

En lo que respecta a las variables Q y S, se graficaron en Surfer 9.0 sin ningún tratamiento adicional.

Los mapas resultantes de las variable T, Q y S, que representan los parámetro básicos para el cálculo del radio de interferencia (RI), fueron operados algebraicamente dentro del programa en ArcGis 10.0, para lo que se requirió convertirlos de formato *grd* (Procedente de Surfer 9.0) a *asc* (Formato que pudo ser leído directamente por el Arcgis10.0), haciendo uso del transformador llamado GridConvert (Figura 5.11).

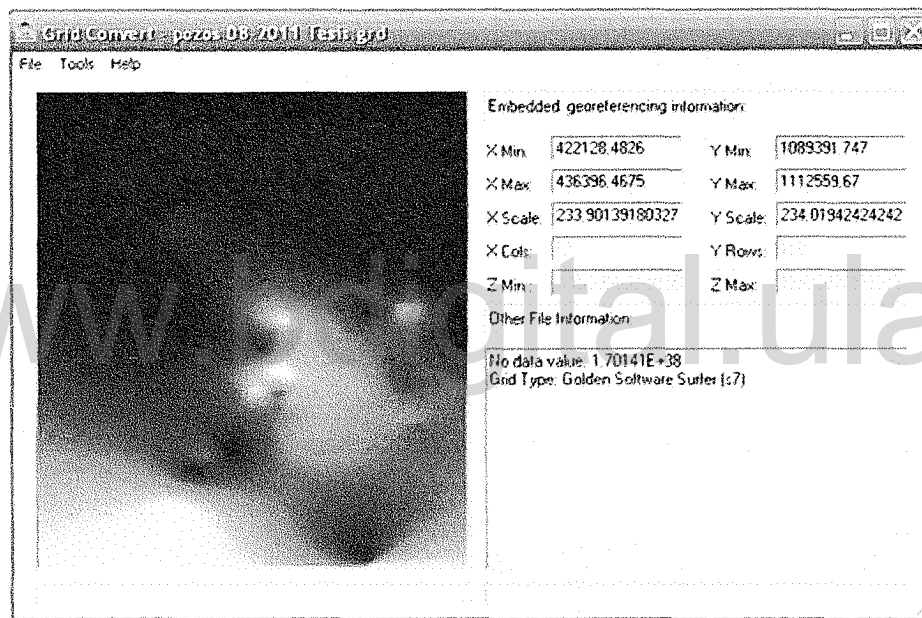


Figura 5.11. Programa GridConvert empleado en la transformación de las coordenadas de los distintos mapas de *.grid* a *.asc*.

Finalmente, dentro del ArcGis 10.0 se abrieron todas la imágenes digitales en formato *asc* y se fueron seleccionando una a una para ser exportadas en formato *raster* (Figura5.12). Las imágenes resultantes fueron reclasificadas dentro del Arcgis 10.0 para obtener los mapas que servirían posteriormente como información base en cálculos de nuevas variables (Figura 5.13).

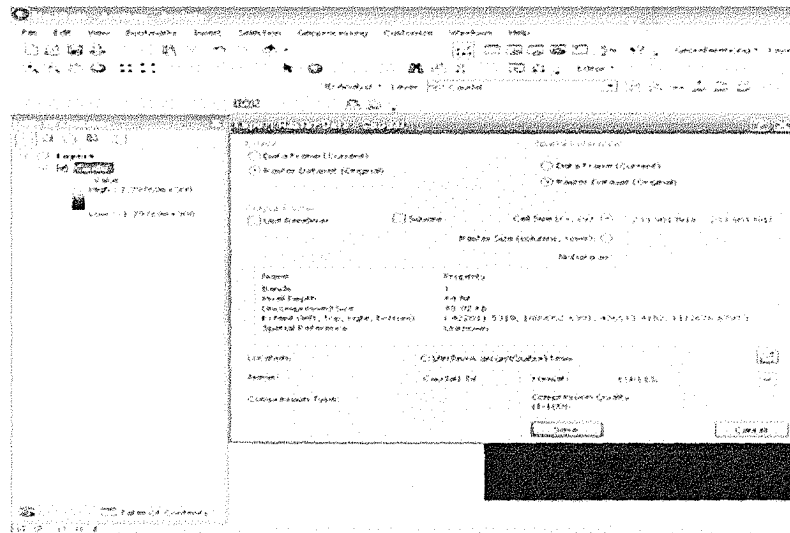
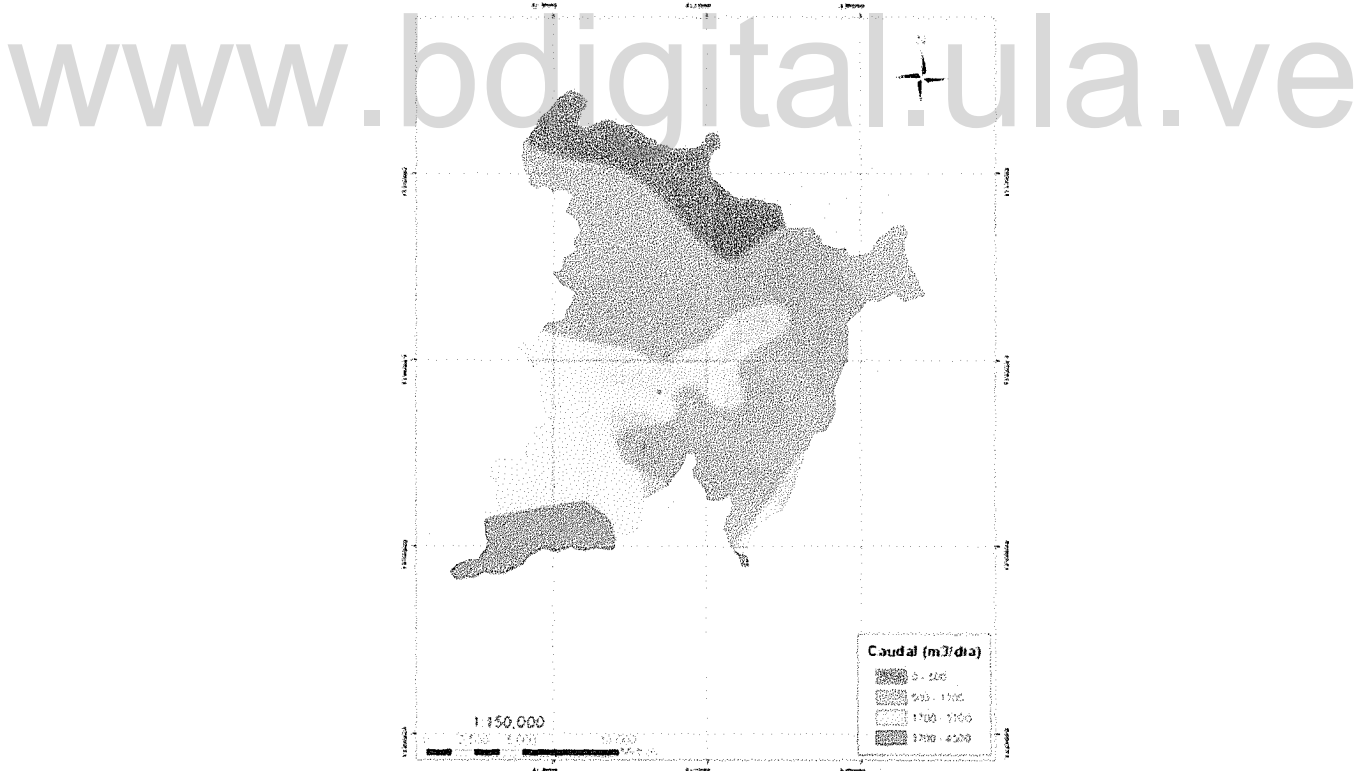
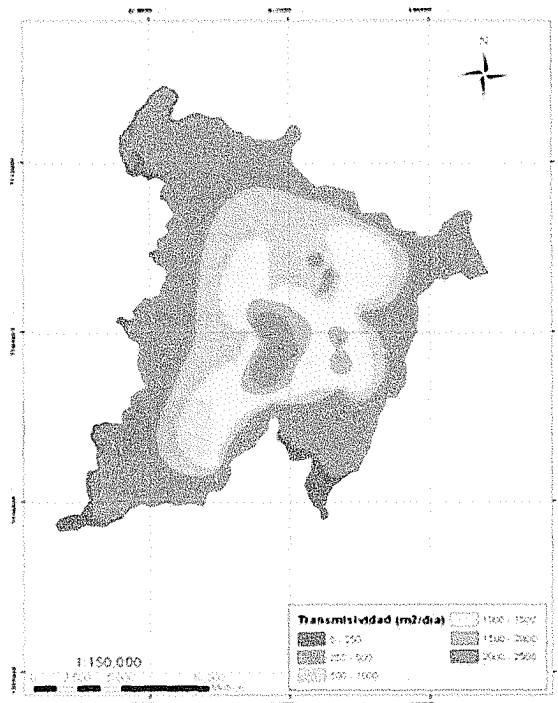


Figura 5.12. Ejemplo de transformación de coordenadas de los distintos mapas de .asc a .shp con el uso de ArcGis 10.0.

a.



b.



c.

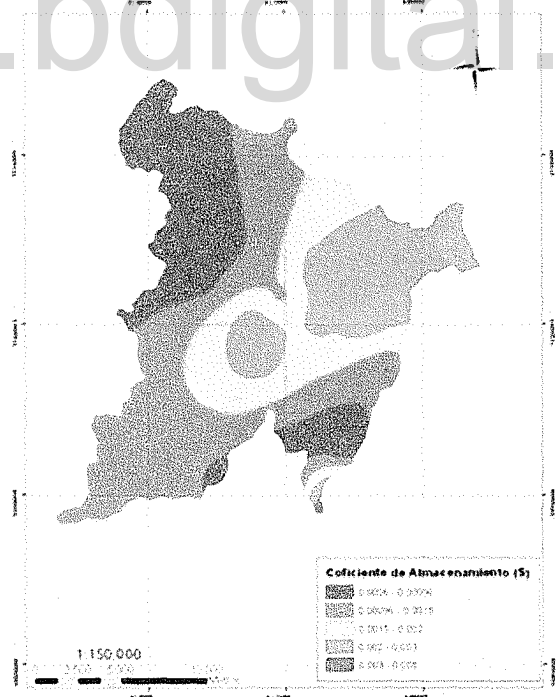


Figura 5.13. Mapas resultantes para a. Caudal (Q), b. Transmisividad (T), c. Coeficiente de almacenamiento (S).

Los mapas resultantes de la Figura 5.13, son una de las primeras aportaciones de esta investigación, representando el comportamiento del acuífero del Valle de Quibor para el periodo comprendido entre los años 2008-2011 y constituyen los mapas base empleados en el cálculo de las zonas de radio de interferencia.

En este sentido, el régimen de extracción de agua subterránea que se observa en el siguiente mapa de caudales (Figura 5.13 a.) pone en evidencia que los mayores aprovechamientos se encuentran en el sector central ($1700-3700\text{m}^3/\text{día}$) y sur ($1700-4500\text{m}^3/\text{día}$) del Valle. El primero se corresponde con una zona donde las transmisividades y los espesores saturados de material tienen valores altos. Mientras que el sector sur a pesar de contar con espesores saturados menores, tiene buena permeabilidad, lo que se traduce en una buena transmisividad y por lo tanto en una buena tasa de flujo.

Sin embargo, hacia las zonas norte ($0-1700\text{m}^3/\text{día}$) y este ($500-1700\text{m}^3/\text{día}$) los caudales son mucho menores, esto es posible que se deba en primer lugar a que los espesores saturados son muy delgados (menores a 5m) y en segundo lugar, a que la mayor parte de los pozos son superficiales, llegando a alimentarse durante todo el año y en forma preferencial de la escasa escorrentía superficial (norte Quebrada Las Raíces y al este Quebrada Las Guadías y Atarigua).

Por su parte el comportamiento de la variable transmisividad en el Valle (Figura 5.13 b.) describe que el flujo tiene mejores facultades de movimiento en la zona central del acuífero, esta facultad va disminuyendo en forma concéntrica hacia los bodes del acuífero, donde los espesores de material granular saturado son menores.

La transmisividad en el centro del Valle presenta valores entre 1000 y $2500\text{m}^2/\text{día}$, que tienen relación directa con la presencia de la mejor combinación de buena permeabilidad de arenas ($30-42\text{m}/\text{día}$) y buenos espesores saturados, con valores que van desde los 30-50m.

www.bdigital.ula.ve

CAPITULO 6

DETERMINACIÓN DE LA VARIABLE RADIO DE INTERFERENCIA

A continuación se describen los pasos seguidos y las decisiones que se tomaron en torno a la definición de los parámetros involucrados en el cálculo de radio de interferencia. En este sentido se aplicó la ecuación de Jacob (1946) para acuíferos confinados (Ec. 2.2 Bis) para determinar el valor de radio de interferencia (r) en cada uno de los pozos analizados dentro del acuífero de Quíbor. Se decidió tipificar al acuífero como confinado a pesar de que se sabe que en muchas zonas su comportamiento es semiconfinado y libre, este criterio se tomo para simplificar los cálculos. Así pues, se establecieron los criterios para la definición de dichos parámetros y se le asignaron valores a cada uno de los parámetros que la integran fórmula de radio de interferencia (Tabla 6.1).

$$r = \sqrt{\frac{2.25 * t * T}{\frac{2 * \pi * T * s}{Q} * S}}$$

Ec. 2.2 (Bis)

Los criterios empleados para la definición de los parámetros involucrados en la ecuación fueron:

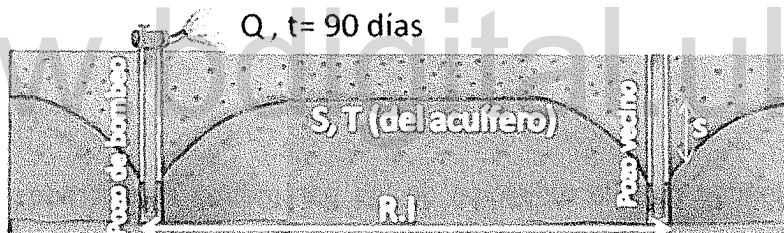
- a. **Abatimiento:** se definieron abatimientos permisibles en el pozo vecino que van desde 0m hasta 10m. El primer valor representa una condición muy favorable para el acuífero, en la que la afectación entre pozos vecinos resulta nula. El resto de los valores representan distintas condiciones de afectación, desde una leve, representada por un abatimiento de 0.001m, 0.1m y 1m, hasta afectaciones severas representadas por abatimientos entre 2m y 10m.
- b. **Tiempo de bombeo:** un pozo puede operar en forma continua hasta un máximo de 90 días, momento en el cual tendrá que ser detenido bien sea porque el pozo o la bomba van a exigir la ejecución de operaciones de mantenimiento. En este sentido, resultó un criterio práctico definir la constante tiempo de bombeo en 90 días.

- c. **Transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento:** para integrar estas variables en el cálculo se hizo uso de los mapas generados para cada una de ellas (en el capítulo IV se explicó la metodología aplicada para tal fin), con el objetivo de obtener como resultado un radio de interferencia regionalizado para todo el Valle de Quíbor y no para pozos puntuales.

Tabla 6.1: valores asignados a los parámetros requeridos en el cálculo del radio de interferencia.

Parámetro	Valor
Abatimiento admisible en pozo vecino (s)	0m, 0.01m, 0.1m, 1m, 2m, 3m,....., 10m
Tiempo de bombeo continuo (t)	90 días
Transmisividad (T)	Mapa de T – ver capítulo 4
Caudal (Q)	Mapa de Q – ver capítulo 4
Coficiente de almacenamiento (S)	Mapa de S – ver capítulo 4

En la Figura 6.1 se muestra un esquema en el que se puede observar la ubicación de cada parámetro de la fórmula en relación con los pozos y el acuífero.



Tomado y modificado de: (Cabrera, 2009)

Figura 6.1. Esquema de ubicación de los parámetros necesarios para el cálculo del radio de interferencia en el acuífero.

Luego de definir la ubicación de los datos necesarios, se abrieron las imágenes de transmisividad (T), caudal (Q) y coeficiente de almacenamiento (S) en el programa ArcGIS 10.0 y con ayuda del *álgebra de mapas*, se hizo el cálculo de la ecuación 2.2 en 13 oportunidades, asumiendo que los parámetros tiempo de bombeo, transmisividad, caudal y coeficiente de almacenamiento eran constantes y solo el abatimiento permisible se comportaba como una variable con un dominio de 13 valores (0m, 0.01m, 0.1m, 1m, 2m, 3m, 4m, 5m, 6m, 7m, 8m, 9m, 10m) de ahí que se obtuvieran 13 resultados de radio de interferencia en formato de imágenes.

A fin de conceptualizar el problema, las imágenes de radio de interferencia generadas (o mapas resultantes), fueron presentadas dividiendo al Valle de Quíbor en intervalos de radio de interferencia (Tabla 6.2), los cuales representan las regiones del Valle (Tabla 6.2) en las que se encuentran pozos cuya actividad ejerce una interferencia cuantificada sobre sus vecinos de la misma región, la interferencia a la que se hace mención está representada por la variable abatimiento permisible en el pozo vecino (s).

Tabla 6.2: valores y colores asignados a los intervalos de radio de interferencia en el Valle de Quíbor.

Intervalos de radio de interferencia (m)	Regiones
0-1500	Verde oscuro
1500-3000	Verde medio
3000-5000	Verde claro
5000-8000	Amarillo
8000-14000	Anaranjado
14000-16000	Rojo

En la Figura 6.2 se muestran los mapas resultantes para un abatimiento permisible de 0m, 0.01m, 0.1m y 1m. Como se puede apreciar, a medida que el abatimiento permisible es mayor, en el Valle de Quíbor se aprecia una menor cantidad de regiones, cerrándose en torno a los intervalos más cortos, representados por los colores verdes (Figura 6.2 c).

De este comportamiento se deduce que a medida que el abatimiento que se permite en el pozo vecino es mayor, los pozos vecinos pueden ubicarse a distancias menores (por ejemplo entre 0-1500m). Mientras que si se es restrictivo en la aplicación de la variable radio de interferencia, se permitirán abatimientos menores (por ejemplo 0.1m), lo cual hará que los pozos deban ubicarse tomando en consideración espaciamientos mayores.

Así pues, a modo de ejemplo, se puede evaluar un pozo denominado X, ubicado en las coordenadas 1.105.000 N, 430.000 E. Si lo analizamos en el caso en el que se permite un abatimiento de 0m (Figura 6.3 a), sus pozos vecinos deberán estar ubicados dentro de un radio comprendido entre los 8000 – 14000m. Sin embargo, si se es más flexible con el abatimiento permisible, definiéndolo en 0.1m, los vecinos del pozo X (Figura 6.3 b) deberán ubicarse dentro de un radio comprendido entre los 5000 – 8000m, en decir, en un intervalo de distancia menor que en el caso anterior.

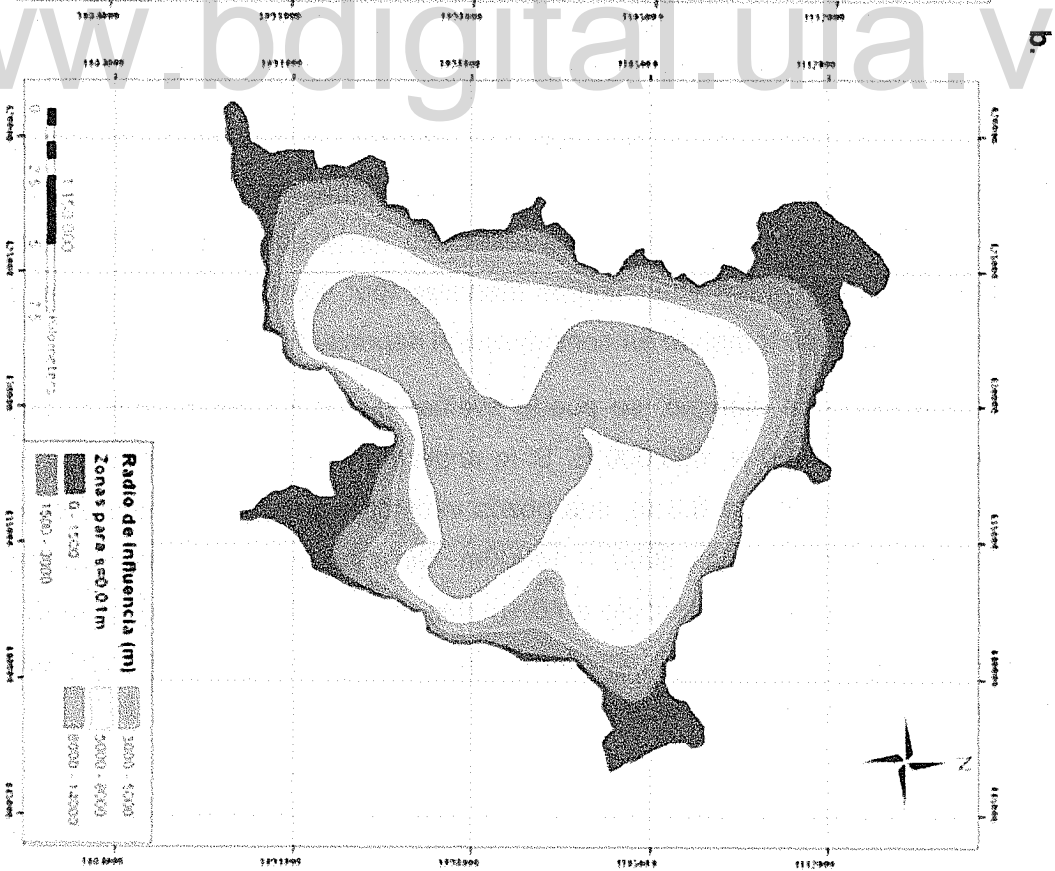
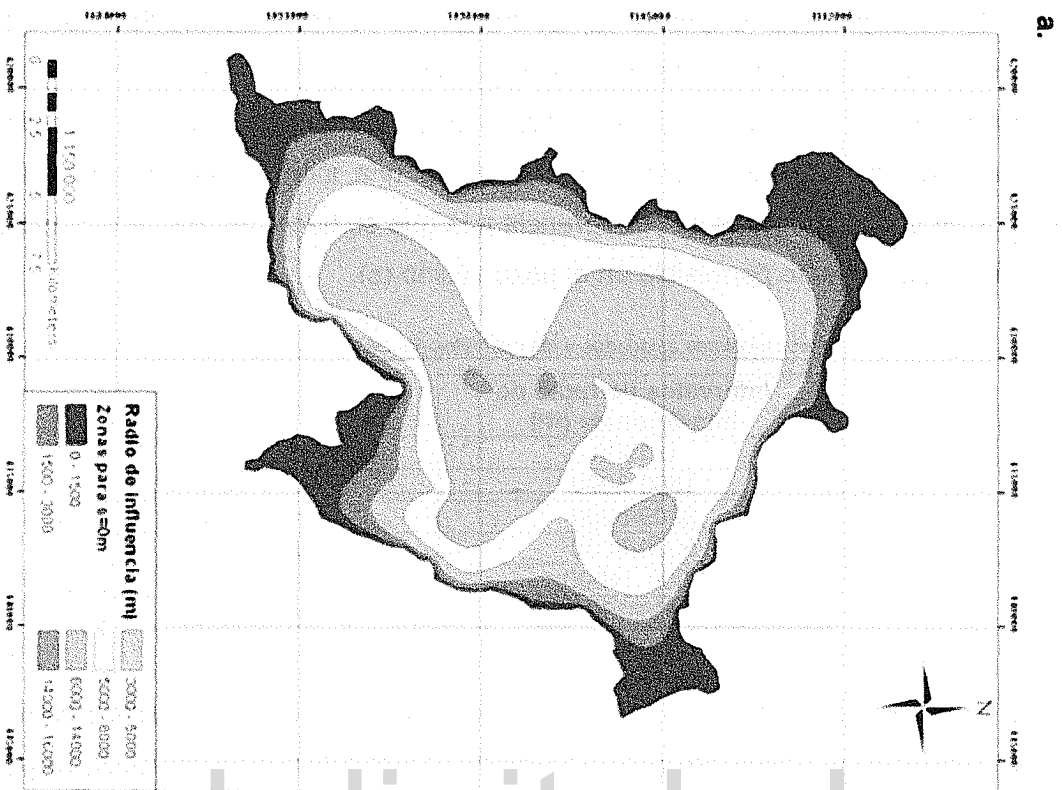


Figura 6.2. a. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible de: a: $s=0m$, b: $s=0.01m$.

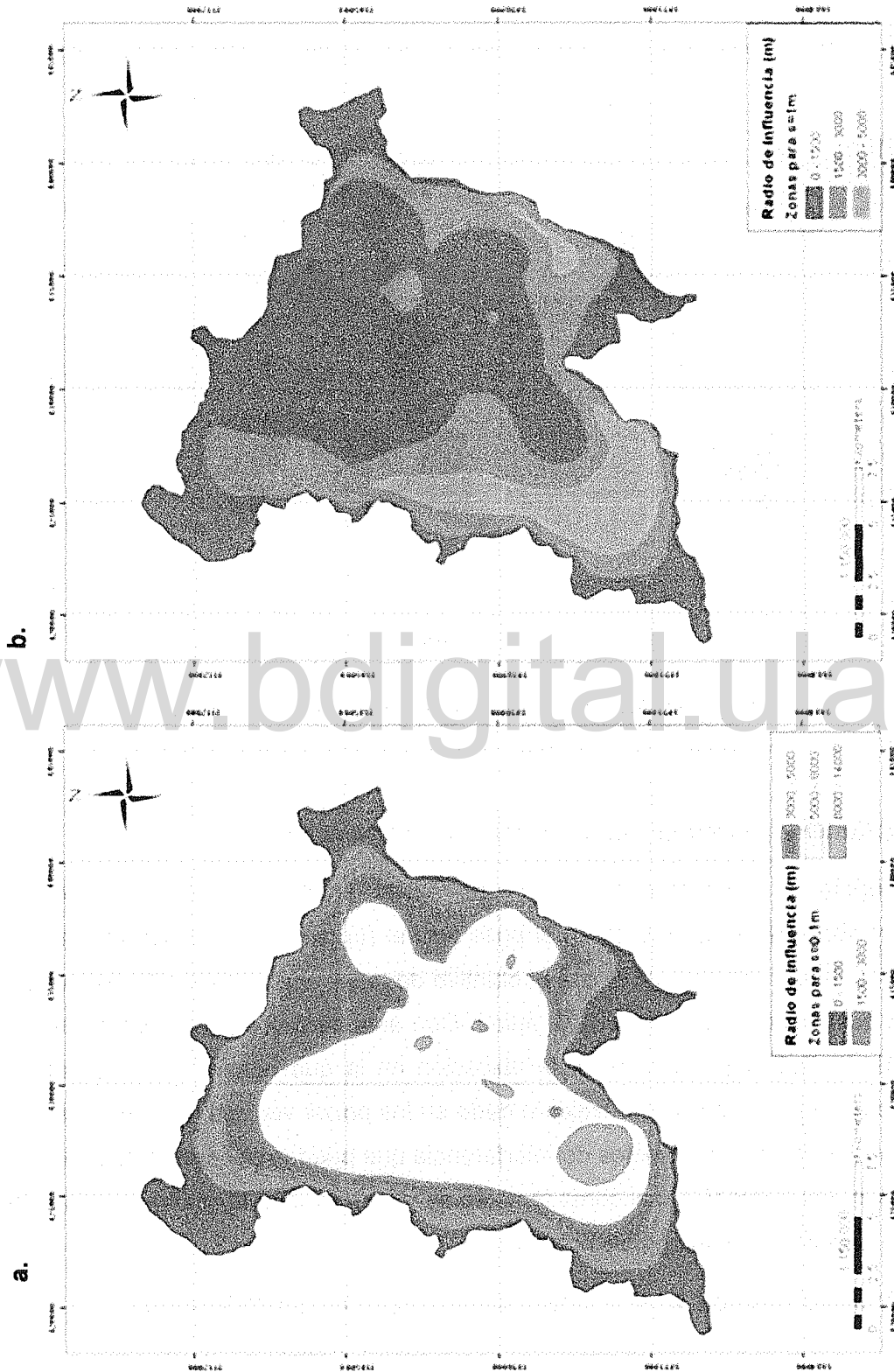


Figura 6.2 b. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible de: a: $s = 0.1m$ y b: $s = 1m$.

a.

b.

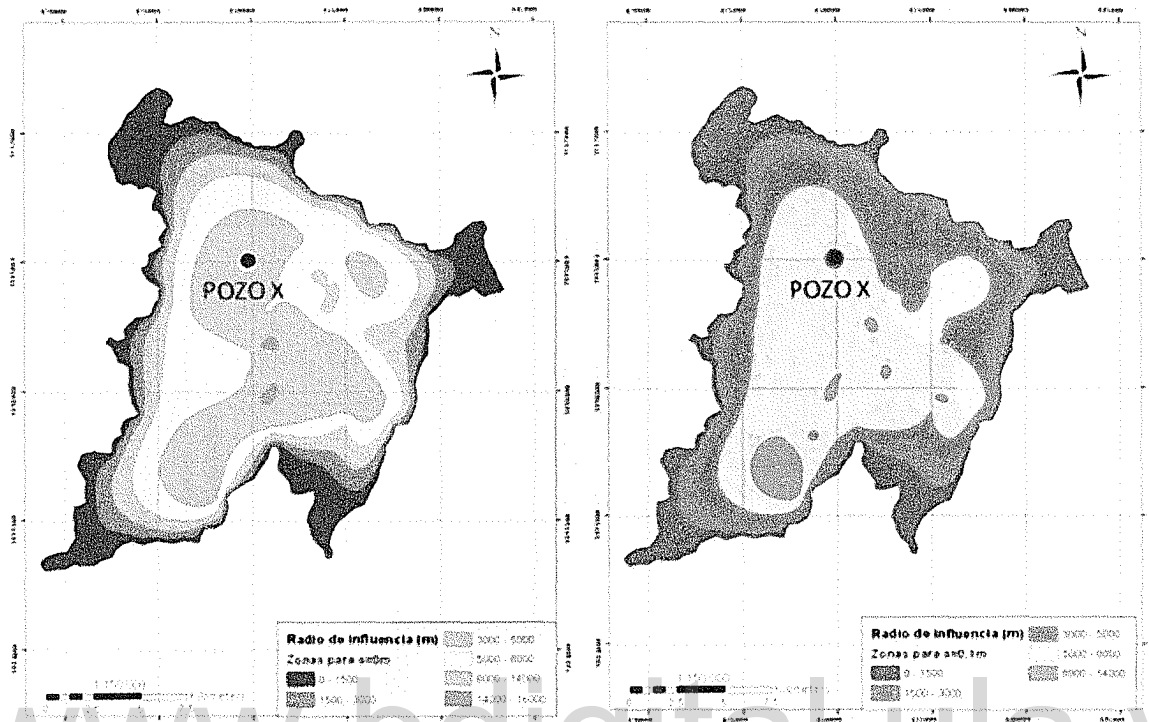


Figura 6.3. Análisis de la ubicación de pozos vecinos para el pozo X si se toma en consideración escenarios distintos de abatimiento permisible de: a: $s = 0m$, b: $s = 0.1m$.

6.1. Gráfico Abatimiento permisible (s) vs. Radio de interferencia (r):

Tomando en cuenta la dependencia directa que existe entre las variables radio de interferencia (r) y abatimiento permisible en el pozo vecino (s), se integraron los valores de ambos parámetros dentro de un gráfico, con el objetivo de tener una herramienta de gestión para el acuífero que fuera de uso sencillo y rápido. Con esta herramienta, los gestores del agua en el Valle de Quíbor podrán definir la ubicación en la que deberán permitirse un nuevo pozo si se plantea admitir un abatimiento dado en los pozos vecinos circundantes. De este modo se podrán predecir los efectos de interferencia que pueden generar la apertura de nuevos pozos sobre los existentes, así como también se puede evaluar la situación actual de interferencia que experimentan los pozos operativos.

Para la construcción del gráfico s vs. R se llevó a cabo el siguiente procedimiento:

1. Se planteó dividir el Valle de Quíbor en tres zonas para cada una de las cuales se presentará un gráfico s vs. R. La zonificación se efectuó tomando en cuenta la presión de uso a la que está sometida el recurso hídrico subterráneo en el Valle y los espesores medios de la capa acuífera. El procedimiento a seguir fue el siguiente:

- a. **Zona 1 - Explotación alta:** corresponde al acuífero central, se trata de una zona ubicada hacia el centro del Valle, ahí se encuentran los mayores espesores saturados de la capa acuífera (30 - 97m) y muchas de las grandes explotaciones del recurso hídrico subterráneo (Figura 6.4), el cual está directamente relacionado con las mayores presiones de uso. En este sector es donde se encuentra la población de Quíbor, urbe que alberga la mayor parte de las actividades consuntivas del recurso agua del Valle. El mapa que contiene a esta zona fue tomado del trabajo realizado por CIDIAT, 2012 (Figura 6.4).
- b. **Zona 2 - Explotación media:** se refiere al sector delimitado entre el acuífero central y el máximo nivel estático histórico registrado para el agua dentro del acuífero de Quíbor (600 m). En esta zona los espesores saturados (0 – 30m) y la densidad de pozos en explotación son menores que los referidos en la zona 1 (Figura 6.5).

El mapa de esta zona (Figura 6.5) fue elaborado buscando una manera de extraer de las imágenes existentes, un mapa que contuviera la curva de máximo nivel estático histórico (600m).

Así pues el primer paso a seguir fue determinar el espesor del acuífero en todo el Valle, para lo cual se emplearon las imágenes raster de modelo digital de Terreno (incluye la topografía del terreno del Valle de Quíbor) y modelo digital de Roca (muestra la topografía subterránea que tiene la capa impermeable que limita al acuífero en lo parte inferior), elaborados por Aprosela, 2000. Estos dos modelos fueron sumados para obtener un nuevo modelo llamado Niveles (que contiene la información de los niveles estáticos históricos del agua en el Valle de Quíbor)

El segundo paso a seguir fue extraer del modelo Niveles la superficie de nivel 600m y exportarla a un nuevo archivo denominado Zona 2.

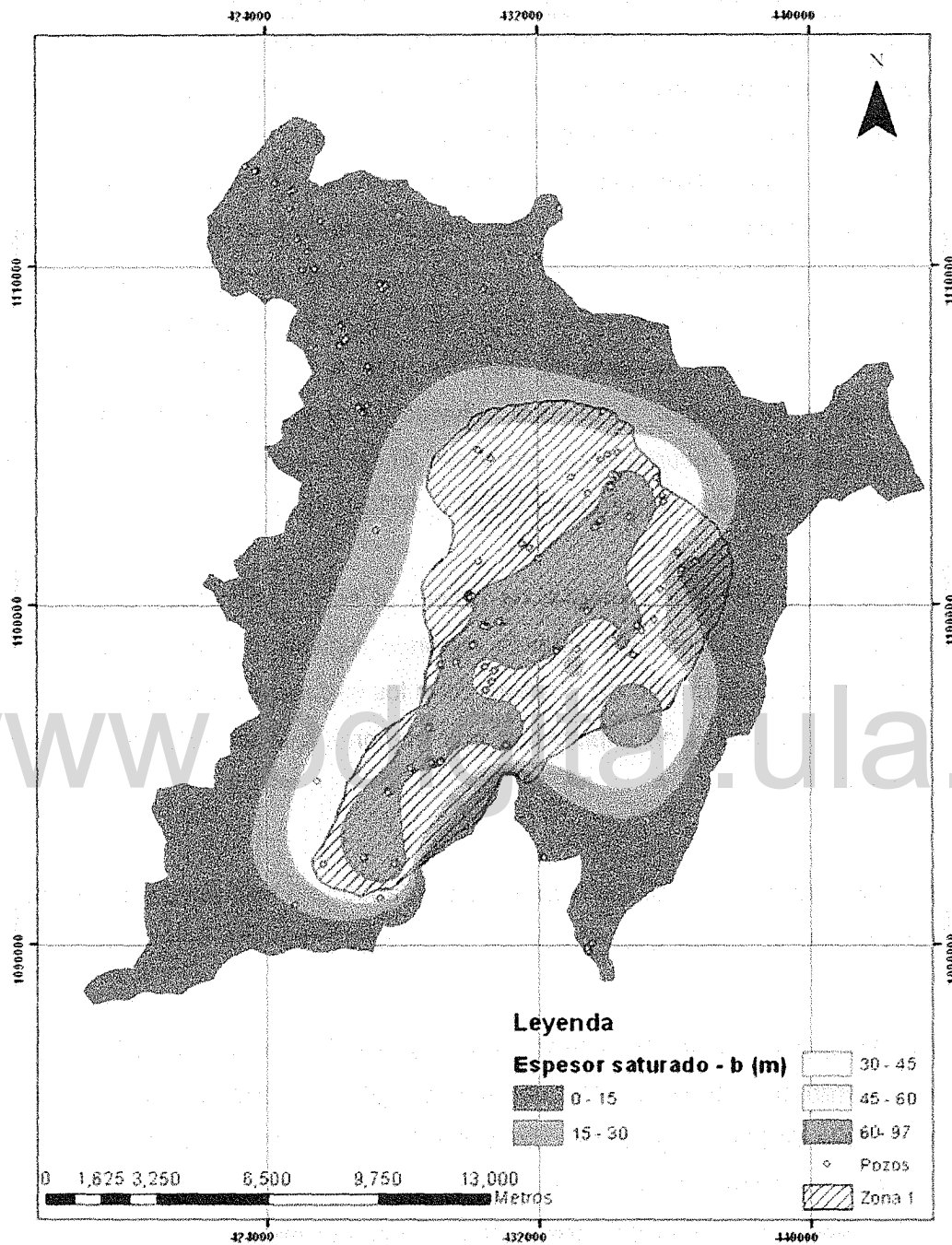


Figura 6.4. Mapa de espesores saturados y zona 1.

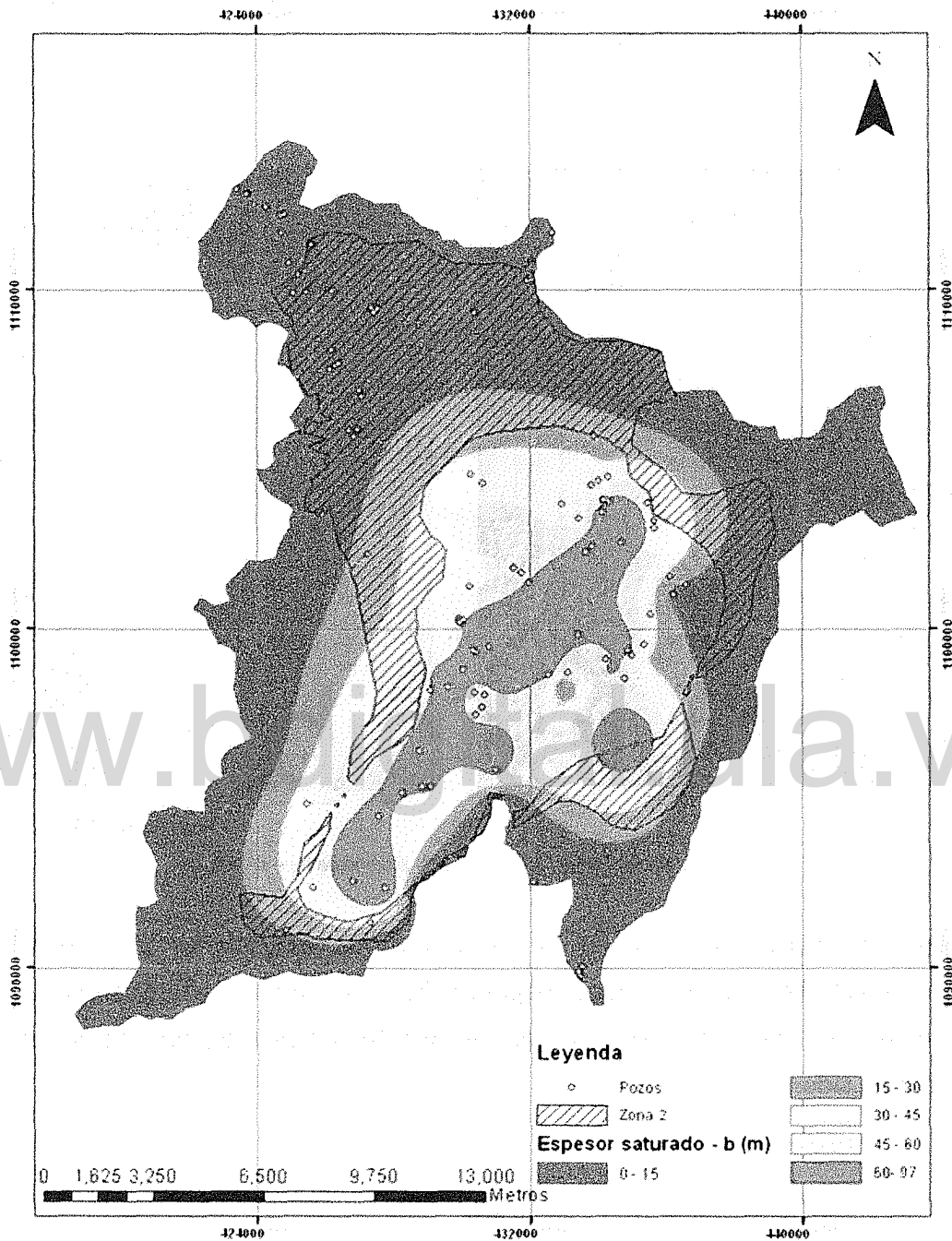


Figura 6.5. Mapa de espesores saturados y zona 2.

El procedimiento seguido para la integración de los modelos digitales de Terreno y Roca se describe a continuación:

- Se abrieron en Surfer 9.0 las imágenes raster correspondientes a los modelos de Terreno y tope de Roca (Figura 6.6).

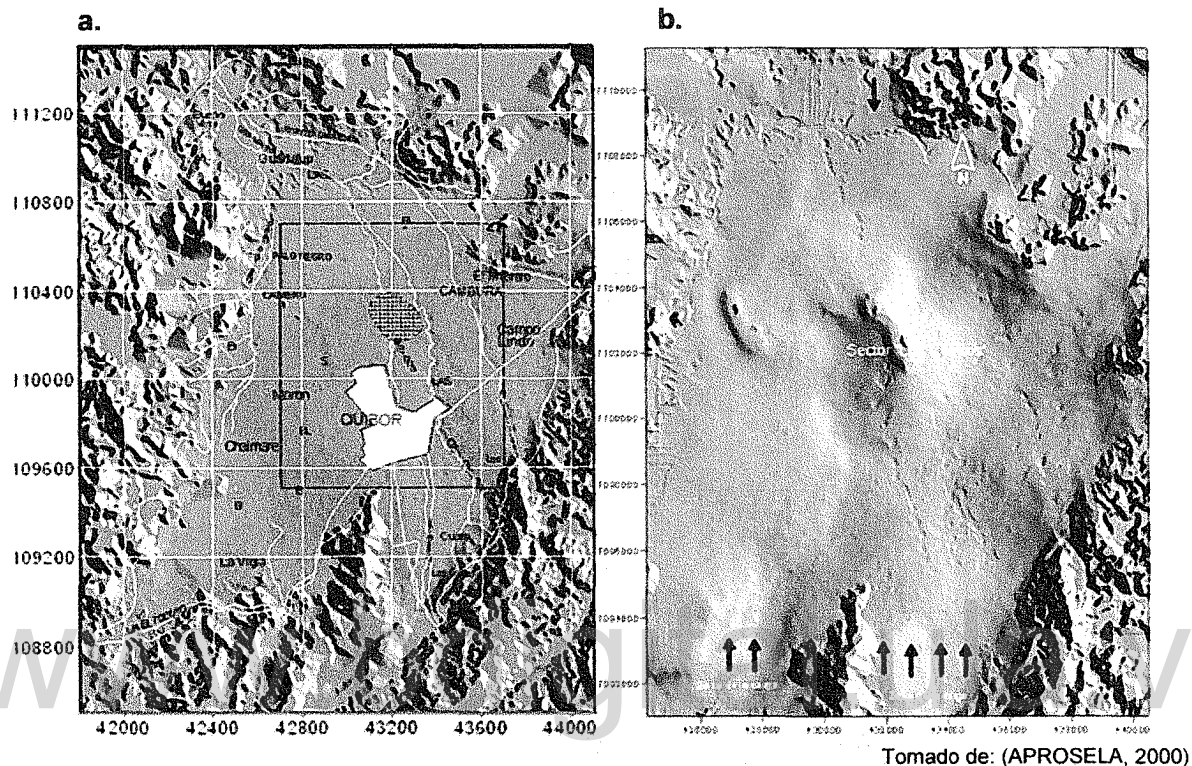


Figura 6.6. A. Modelo digital del Terreno, B. Modelo de tope de Roca.

- Como se puede apreciar en la Tabla 6.3 las extensiones y el número de filas/columnas son diferentes en ambas imágenes (Terreno y Roca), esta discrepancia debió solventarse antes de comenzar a operar algebraicamente ambas imágenes, de lo contrario el resultado habría sido errado.

Tabla 6.3. Dimensiones originales de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quibor.

Dimensión	Roca	Terreno
X mín.	424.000	418.000
Y mín.	414.000	414.000
X máx.	1.091.000	1.085.000
Y máx.	1.111.100	1.115.000
Espaciamiento entre filas y columnas (X/Y)	100/100	25/25

El procedimiento para obtener imágenes con igual espaciamento X,Y se inició disminuyendo el espaciamento de los nodos de la malla Roca, con la finalidad de trabajar con mallas de mayor resolución o dicho de otro modo, mallas con menor espaciamento entre nodo y nodo. Así pues, se seleccionó la malla de Roca y con la herramienta *Spline Smooth* de la pestaña *Grid* se insertó en 2 oportunidades un nodo entre todas las filas y entre todas las columnas, de este modo la malla resultante tuvo un espaciamento de 25 líneas en X y Y. A la malla resultante se le dio el nombre de Roca 25x25 (Tabla 6.4).

Tabla 6.4. Dimensiones con espaciamento modificado de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quibor.

Dimensión	Roca	Terreno
X mín.	424.000	418.000
Y mín.	414.000	414.000
X máx.	1.091.000	1.085.000
Y máx.	1.111.100	1.115.000
Espaciamento entre filas y columnas (X/Y)	25/25	25/25

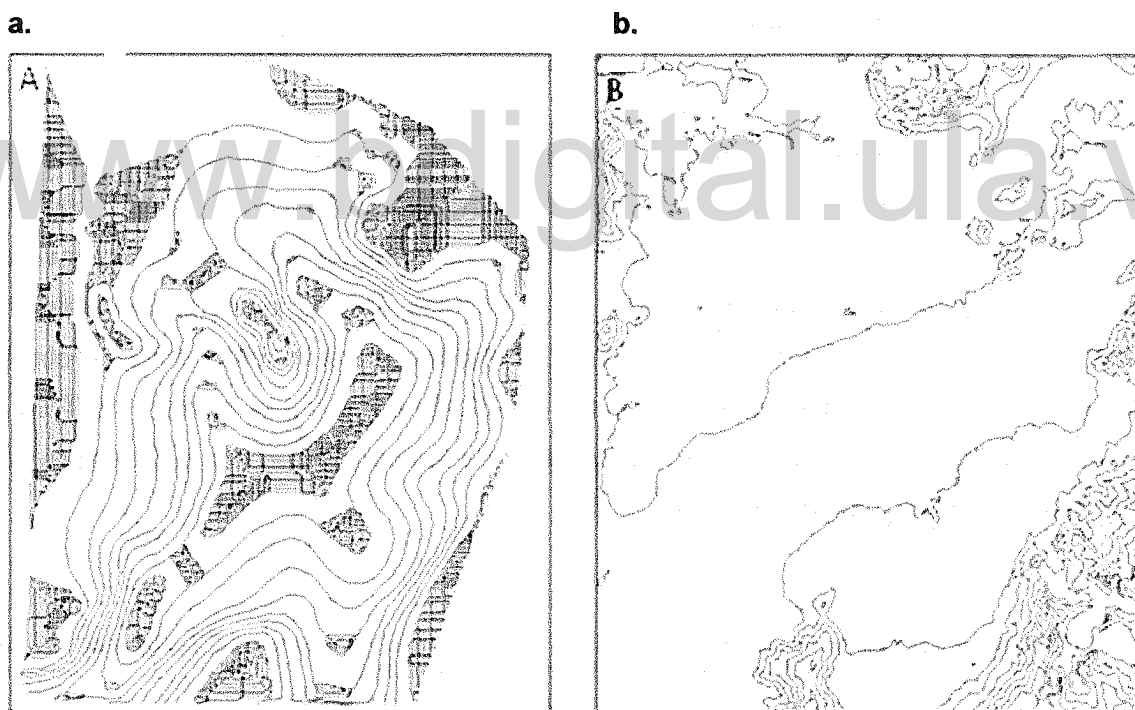
Ahora ambas mallas poseen el mismo espaciamento X,Y, pero extensiones distintas (Tabla 6.4), para solventar este problema se planteó extender las dimensiones de la malla más pequeña (malla Terreno) para no perder información, así pues se seleccionó la imagen del modelo Terreno y con la herramienta *Extract* de la pestaña *Grid* se ajustaron manualmente los valores de X (mínimo y máximo) y Y (mínimo y máximo) para hacerlos coincidir con los que tenía la malla original de Roca. A la malla resultante se le dio el nombre de Terreno 25x25. Finalmente las dimensiones y espaciamento de las mallas con las que se harán los cálculos posteriores se muestran en la Tabla 6.5.

Tabla 6.5. Dimensiones y espaciamento modificado de las mallas de modelo digital del Terreno y modelo digital de Tope de roca del acuífero de Quibor con espaciamento 25x25.

Dimensión	Roca	Terreno
X mín.	418.000	418.000
Y mín.	414.000	414.000
X máx.	1.085.000	1.085.000
Y máx.	1.115.000	1.115.000
Espaciamento (X/Y)	25/25	25/25

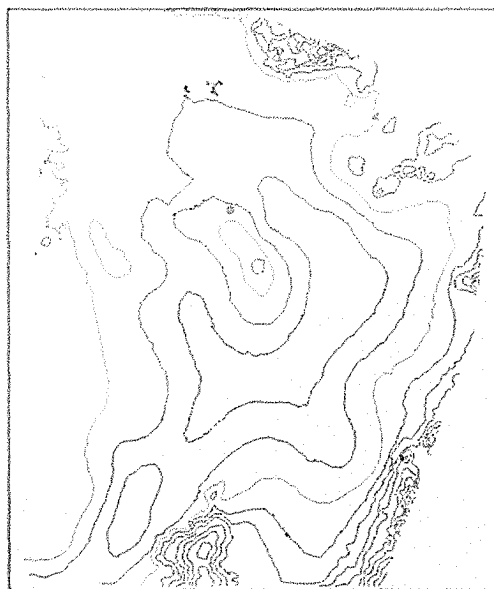
- Seguidamente, las mallas resultantes de Terreno (25x25) y Roca (25x25) (Figura 6.7), fueron multiplicadas algebraicamente empleando la herramienta *Math* de la pestaña *Grid* del programa Surfer 9.0. La imagen resultante fue denominada Niveles (Figura 6.8) y la información que contiene es la de la posición histórica registrada para los niveles estáticos del agua dentro del acuífero de Quíbor.

- Como se indicó inicialmente la zona 2 se encuentra ubicada entre la zona 1 y la superficie de nivel estático máxima histórica registrada en el acuífero de Quíbor, en ese sentido Alvarado, 1989 define este nivel máximo como la curva de 600m de profundidad. En consecuencia, dentro del programa Surfer 9.0 se seleccionó la malla Niveles, se abrió la pestaña de propiedades y en la sección *Levels* se resaltó en color rojo la curva de nivel 600m (Figura 6.8) y se exportó a un nuevo archivo denominado Zona 2.



Tomado y modificado de: (APROSELA, 2000)

Figura 6.7. a. Modelo digital tope de Roca 25x25, b. Modelo del Terreno 25x25.



Tomado y modificado de: (APROSELA, 2000)

Figura 6.8. Mapa de niveles estáticos históricos, la curva externa en rojo corresponde a la cota 600m.

- c. **Zona 3 - Explotación baja:** se refiere al sector ubicado entre la zona 2 y la divisoria del Valle (Figura 6.9). En este sector la densidad de pozos operativos es baja, el recurso explotado proviene en su mayor parte de aljibes, que son alimentados por flujos subsuperficiales. Sin embargo existen algunos pozos desde los que se extrae agua de los espesores saturados del acuífero de Quíbor, que vale destacar, resultan bastante pequeños (0 – 15m).

Con la finalidad de individualizar la zona 3 (Figura 6.9), se planteó extraer del mapa de divisoria del Valle a las regiones ocupadas por las zonas 1 y 2. Para lo cual se trabajó con las capas zona 1, zona 2 y divisoria dentro del programa Arcgis 10.0 siguiendo el procedimiento descrito a continuación:

- Se abrieron las imágenes de la zona 1, zona 2 y la divisoria del Valle. Haciendo uso de la herramienta *union* del *Arc Toolbox* se unieron las 3 capas para generar una nueva imagen denominada *Zona_Union*.
- En la Tabla de atributos de *Zona_Union* se creó un nuevo campo denominado *id*, dentro del cual se le asignaron valores referenciales a cada una de las zonas como se muestra en la Figura 6.10.

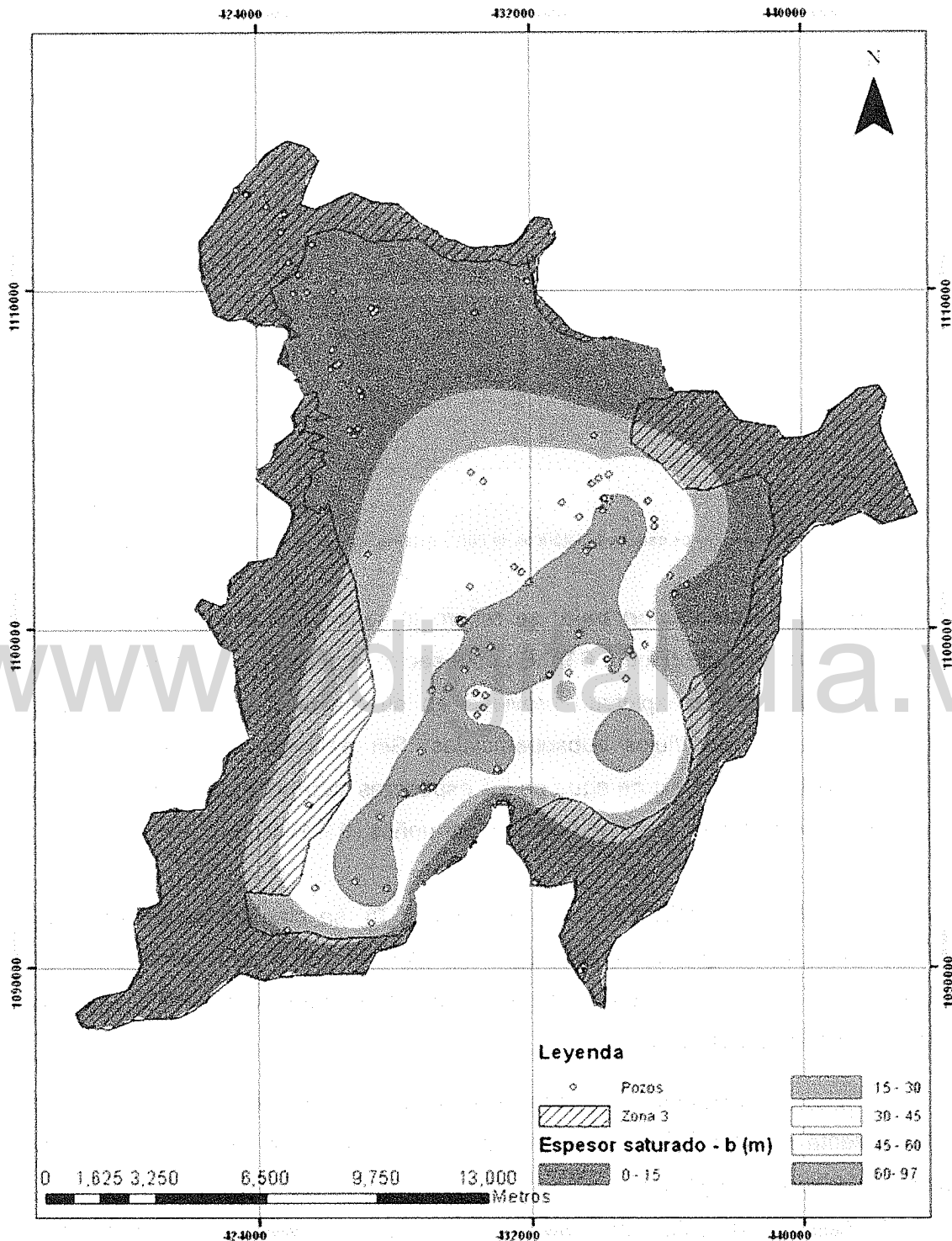


Figura 6.9. Mapa de espesores saturados y zona 3.

Zona_Union						
Shape *	RECNUM	Id	Perimeter	Area	Hectares	
Polygon		3	0	0	0	
Polygon	0	2	0	0	0	
Polygon	0	1	44.21753	90.70494	9070.49475	

Figura 6.10. Tabla de atributos de la capa Zona_Union Mapa de espesores saturados y zona 3.

- Con ayuda de la herramienta *Polygon to Raster* del menú *Conversion Tools* del *Arc Toll Box*, se creó una imagen raster de la capa Zona_Union.
- Haciendo uso de la herramienta *Reclassify* del del *Arc Toll Box*, se reclasificaron los viejos valores del raster Zona_Union, con la finalidad de separar la zona 3 del resto de la imagen (Figura 6.11)

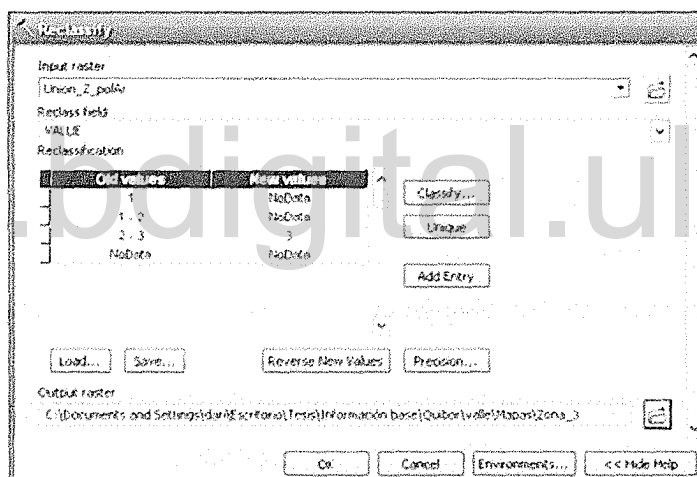


Figura 6.11. Ventana para la reclasificación del raster Zona_Union.

2. Luego de obtener las 3 zonas bien diferenciadas gráficamente (Figura 6.12), se procedió a determinar el valor medio del radio de interferencia en casa zona para abatimientos permisibles que van desde los 0 m hasta los 10m (Tabla 6.6).

Para lograr este objetivo se empleó la herramienta *Zonal Statistic* del *Spatial Analyst Tools* tal como se observa en la ventana de la Figura 6.13.

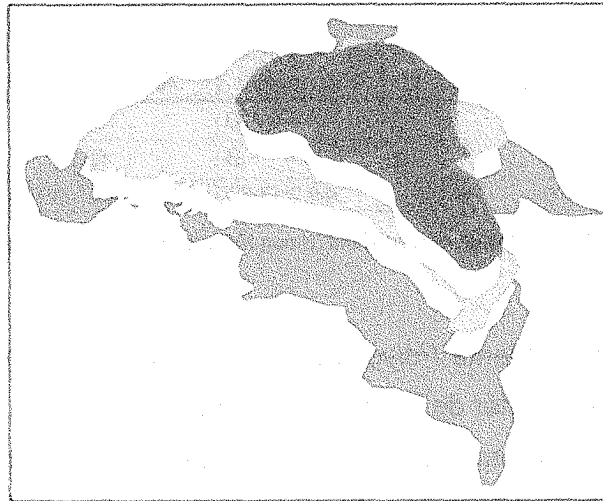


Figura 6.12. Zonificación del Valle para la construcción de la Tabla r vs. s. Zona 1: Verde, Zona 2: Amarillo, Zona 3: Marrón

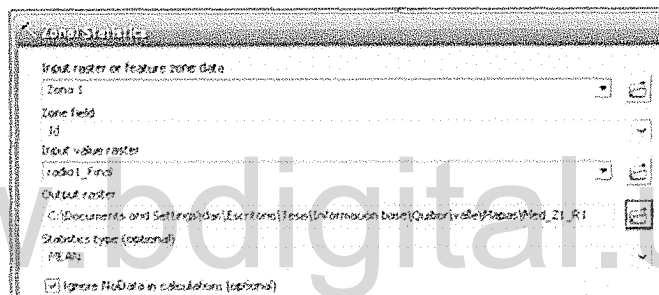


Figura 6.13. Ventana de ejemplo de cálculo de la media del radio de interferencia para la zona 1 y abatimiento permisible 1m.

En la Tabla 6.6 se presentan todas las medias de radio de interferencia para cada zona considerando los abatimientos permisibles antes mencionados.

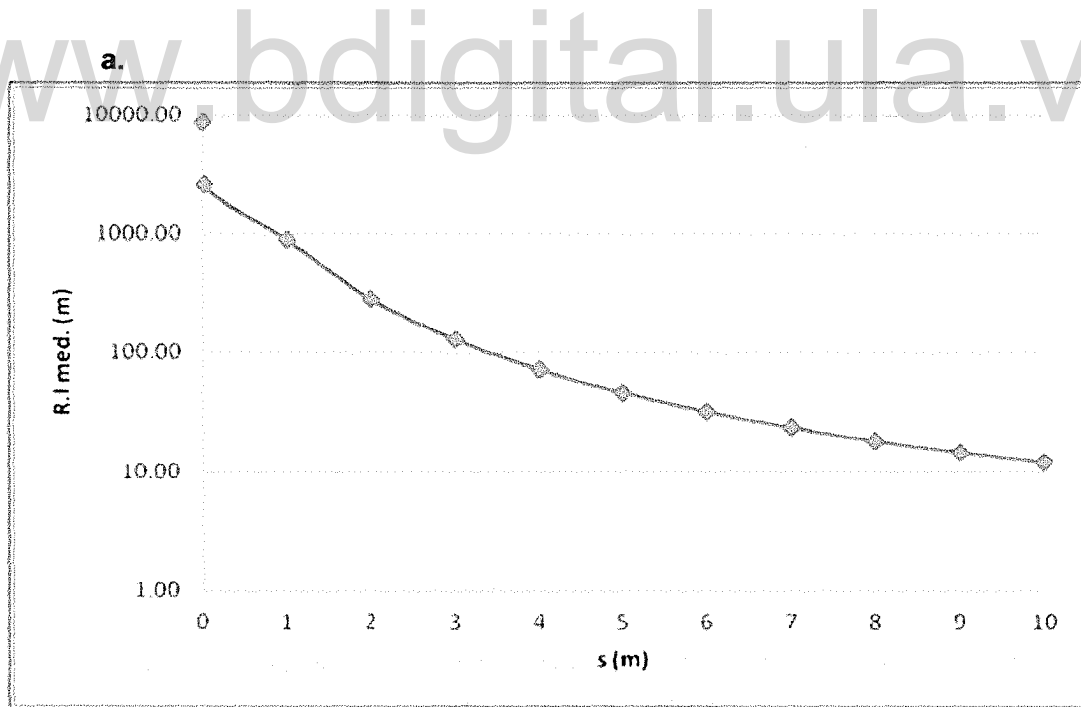
Tabla 6.6: Resultados de las medias de radio de interferencia para las distintas zonas y abatimientos permisibles.

s (m)	r med. (m)		
	Zona1	Zona 2	Zona 3
0	8623.74	6000.85	2817.57
0.001	8627.64	6011.83	2875.48
0.01	2607.64	4888.02	6379.92
1	885.50	1384.40	1624.00
2	278.58	674.16	1181.62

Tabla 6.6: Resultados de las medias de radio de interferencia para las distintas zonas y abatimientos permisibles.

s (m)	r med. (m)		
	Zona1	Zona 2	Zona 3
3	129.29	415.47	937.26
4	72.75	287.14	783.35
5	46.24	212.24	677.52
6	32.04	163.86	599.52
7	23.66	130.45	540.06
8	18.32	106.25	492.25
9	14.70	88.13	452.92
10	12.12	74.20	419.85

3. Finalmente, para cumplir con el objetivo de generar una herramienta de gestión para el agua subterránea del Valle de Quíbor que tomara en cuenta la variable radio de interferencia, se graficaron los resultados de la Tabla 6.6 para cada zona (Figura 6.14).



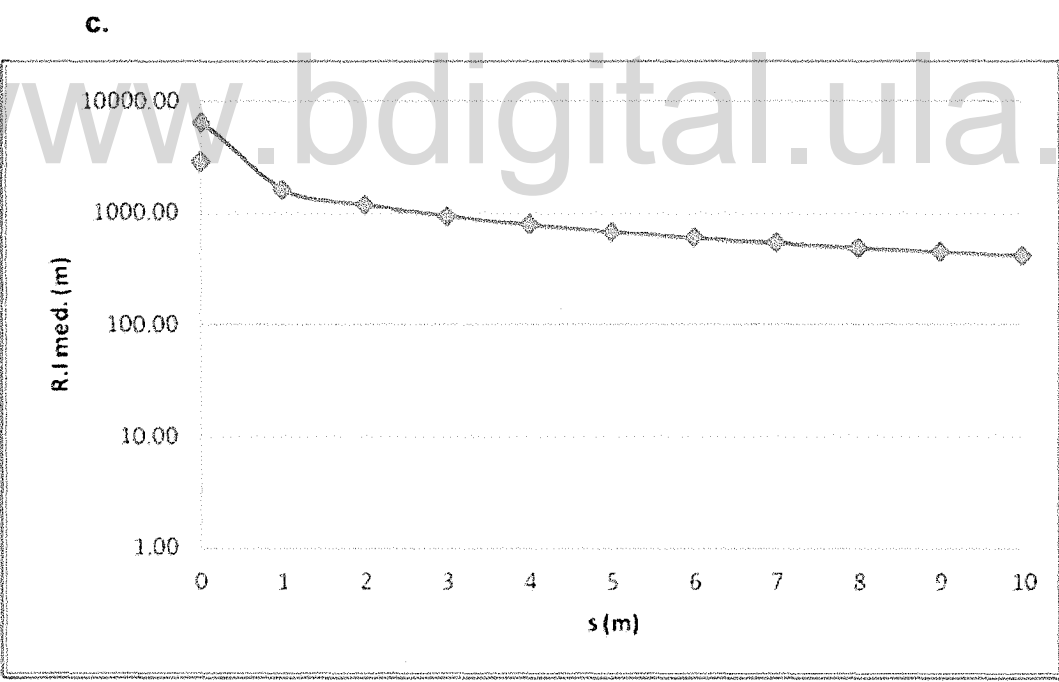
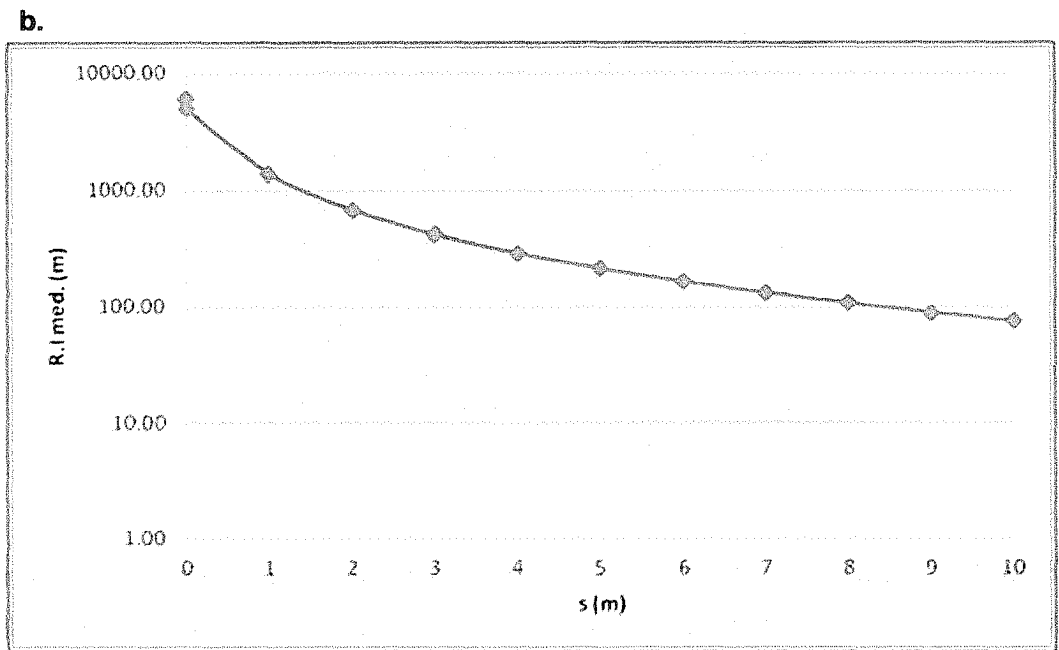


Figura 6.14. Radio de interferencia en relación a cada abatimiento permisible entre 0 y 10m para:
a. Zona 1, b. Zona 2, c. Zona 3.

6.2. Calculo de los mapas de radio de interferencia (r) para distintas datas de coeficiente de almacenamiento (S):

En vista de que se contaba con datos de S procedentes de pruebas de bombeo y otro conjunto de datos de S calculados dentro de esta investigación a través de la ecuación de Boostran y Ridder (1981), se propuso elaborar mapas de radio de interferencia para ambos conjuntos de datos y compararlos con la finalidad de observar la sensibilidad de la fórmula con respecto de ésta variable.

Así pues, se tiene que un conjunto de datos llamado de pruebas de bombeo (Tabla 6.7), procedente de CIDIAT, 2012, aunque poco extenso, se trata de valores medidos en campo.

Tabla 6.7. Datos de pruebas de pozos de S.

Pozo	Este	Norte	Método	T(m ² /d)	Sb	Tipo de acuífero
LA6070030A	429746.49	1099853.72	Cooper-Jacob	625.9	2.658 x 10 ⁻⁶	Confinado
LA6070139A	432942.481	1098347.72	Theis	1252.8	1.589 x 10 ⁻⁶	Confinado
LA6070181A	433263.472	1102941.71	Theis	311.7	6.351 x 10 ⁻⁴	Confinado
LA6071007A	425445.512	1092027.73	Theis	39.27	1.167 x 10 ⁻⁵	Confinado

Tomado y modificado de: (CIDIAT, 2012)

Así mismo, en la Tabla 6.8 se presenta el conjuntos de datos calculados en este trabajo según la fórmula de Boonstra y Ridder (1981), tomando como información base aquella modelada dentro de Modflow para que acuífero del Valle de Quibor.

Tabla 6.8. S calculado para los pozos existentes dentro del modelo en Modflow del Valle de Quibor

Pozo	Este	Norte	St	Tipo de acuífero
RAtr1	432938.20	1088834.00	8.06E-04	Confinado
RAtr1(2)	433192.40	1088830.00	1.14E-03	SemiConfinado
RAtr1(3)	433438.80	1088871.00	1.11E-03	SemiConfinado
RAtr1(4)	433726.30	1088830.00	7.30E-04	Confinado
RLG3(3)	437203.70	1096509.00	1.05E-03	SemiConfinado
RLG3(4)	437439.00	1096757.00	1.01E-03	SemiConfinado
RLG3(5)	437901.70	1097302.00	9.20E-04	Confinado
1 b	430065.00	1100264.00	2.19E-03	SemiConfinado
2 b	429957.00	1100218.00	2.19E-03	SemiConfinado
3 b	435471.00	1103775.00	2.23E-03	SemiConfinado
4 b	435658.00	1103237.00	2.30E-03	SemiConfinado

Tabla 6.8. S calculado para los pozos existentes dentro del modelo en Modflow del Valle de Quibor

Pozo	Este	Norte	St	Tipo de acuífero
5 b	436607.00	1103237.00	2.21E-03	SemiConfinado
6 b	436232.00	1101321.00	2.71E-03	SemiConfinado
7 b	436127.00	1101563.00	3.00E-03	SemiConfinado
8 b	432551.00	1098637.00	1.78E-03	SemiConfinado
9 b	433153.00	1098712.00	1.78E-03	SemiConfinado
10 b	433428.00	1099838.00	1.91E-03	SemiConfinado
11 b	430608.00	1097722.00	2.19E-03	SemiConfinado
12 b	430700.00	1098065.00	2.11E-03	SemiConfinado
13 b	430405.00	1098157.00	2.11E-03	SemiConfinado
14 b	430080.00	1098801.00	2.21E-03	SemiConfinado
15 b	429584.00	1098292.00	2.09E-03	SemiConfinado
16 b	429103.00	1095368.00	1.55E-03	SemiConfinado
17 b	431023.00	1095872.00	1.53E-03	SemiConfinado
18 b	435656.00	1092392.00	6.66E-04	Confinado
19 b	431541.00	1101825.00	1.35E-03	SemiConfinado
20 b	431753.00	1101690.00	1.24E-03	SemiConfinado
21 b	433446.00	1103423.00	2.02E-03	SemiConfinado
22 b	433810.00	1102479.00	2.30E-03	SemiConfinado
23 b	433663.00	1102289.00	2.02E-03	SemiConfinado
24 b	434892.00	1099376.00	1.82E-03	SemiConfinado
25 b	435034.00	1099237.00	1.83E-03	SemiConfinado
26 b	434258.00	1099101.00	1.86E-03	SemiConfinado
27 b	434675.00	1102582.00	1.94E-03	SemiConfinado
28 b	434326.00	1103784.00	2.17E-03	SemiConfinado
29 b	434283.00	1103849.00	2.13E-03	SemiConfinado
30 b	434177.00	1103840.00	2.23E-03	SemiConfinado
31 b	434155.00	1103837.00	2.23E-03	SemiConfinado
32 b	433839.00	1104301.00	2.02E-03	SemiConfinado
33 b	434039.00	1104442.00	1.91E-03	SemiConfinado
34 b	434345.00	1104544.00	2.01E-03	SemiConfinado
35 b	433898.00	1105710.00	1.56E-03	SemiConfinado
36 b	435678.00	1103029.00	2.49E-03	SemiConfinado
49 b	434936.00	1096636.00	1.26E-03	SemiConfinado
54 b	432123.00	1092560.00	6.92E-04	Confinado
55 b	427286.00	1102334.00	7.47E-04	Confinado
56 b	430426.00	1099352.00	2.13E-03	SemiConfinado

Tabla 6.8. S calculado para los pozos existentes dentro del modelo en Modflow del Valle de Quibor

Pozo	Este	Norte	St	Tipo de acuífero
57 b	430374.00	1099375.00	2.13E-03	SemiConfinado
59 b	435567.00	1100470.00	2.70E-03	SemiConfinado
60 b	430274.00	1104602.00	1.00E-03	SemiConfinado

Ambos conjuntos de datos fueron introducidos en la ecuación 3.2, presentada al inicio de este capítulo y empleando los valores descrito en la Tabla 6.9 para cada uno de los parámetros implicados en la ecuación.

Tabla 6.9. Valores asignados a los parámetros requeridos en el cálculo del radio de interferencia.

Parámetro	Valor
Abatimiento admisible en pozo vecino (s)	0m, 0.01m, 0.1m, 1m, 2m y10m
Tiempo de bombeo continuo (t)	90 días
Transmisividad (T)	Mapa de T – ver capítulo 4
Caudal (Q)	Mapa de Q – ver capítulo 4
Coefficiente de almacenamiento (S)	Mapa de S – ver capítulo 4

Finalmente los resultados de la aplicar la fórmula fueron modelados empleando las potencialidades de Arcgis 10.0. En la Figura 6.15 se muestran un conjunto de mapas A, correspondientes a los radios de interferencia resultantes de emplear el coeficiente de almacenamiento (S) de las datos de pruebas de pozos (Tabla 6.7), mientras que el conjunto de mapas B, se corresponde con los datos calculados en este trabajo (Tabla 6.8)

Solo se compararon los mapas para abatimiento 0.01m, 0.1m, 0m y 1m (Figura 6.14), pues para abatimientos mayores los mapas tendían a ser todos iguales, dominados por radios de interferencia bajos (0-1500m).

En la Tabla 6.10 se presentan los valores medios que muestra el radio de interferencia en el caso de trabajar con la data que se ha denominado histórica y la data calculada, es apreciable que la diferencia entre ambos resultados varía un poco más a medida que el abatimiento permisible es mayor, e incluso, la diferencia que comienza siendo positiva a

favor de la data histórica, rápidamente cambia, haciéndose positiva a favor de la data calculada, sin embargo, las diferencias son bajas, no llegando a superar el 5%.

Tabla 6.10. Valor medio del radio de interferencia para distintas data de Coeficiente de Almacenamiento (S)

<i>s (m)</i>	<i>r para S</i>		<i>Diferencia entre r de pozos y calculado</i>	
	<i>Histórica</i>	<i>Calculada</i>	<i>m</i>	<i>%</i>
0	5,605.53	5,599.01	6.52	0.12
0.01	5,458.53	5,454.14	4.39	0.08
0.1	4,364.59	4,383.50	-18.91	0.43
1	1,294.38	1,335.33	-40.95	3.07

www.bdigital.ula.ve

www.bdigital.ula.ve

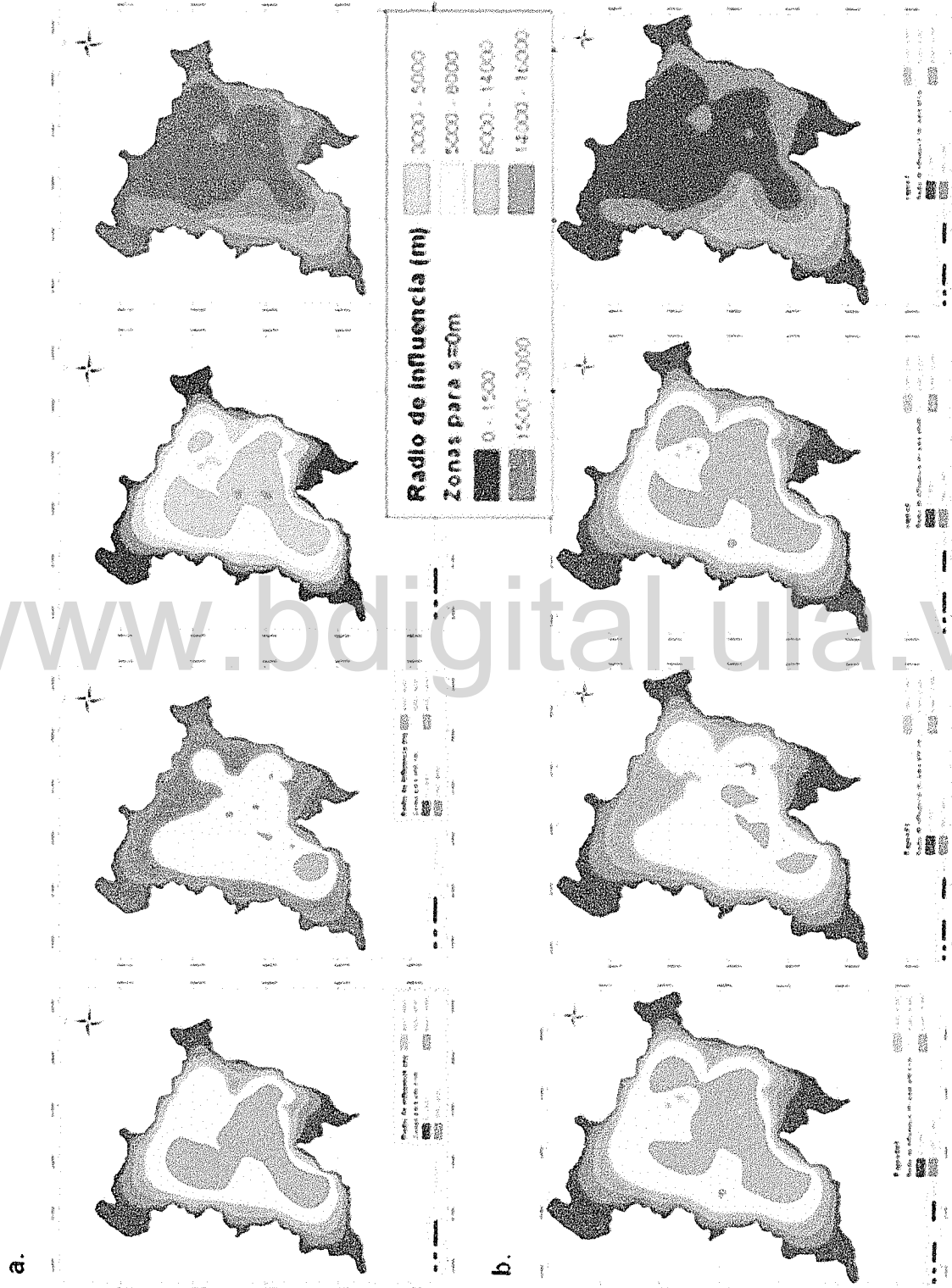


Figura 6.15. Radio de interferencia en relación a cada abatimiento permisible A. Datos de pruebas de bombeo, B. Datos calculados.

www.bdigital.ula.ve

Atribución - No Comercial - Compartir Igual 3.0 Venezuela
(CC BY - NC - SA 3.0 VE)

CAPITULO 7

EVALUACIÓN ECONÓMICA DE LA VARIABLE RADIO DE INTERFERENCIA.

En este capítulo se pretende evaluar un parámetro que permita valorar la forma en la que varían los costos de aprovechamiento del agua en distintas zonas del Valle si se aplican o no medidas para regular las extracciones del recurso tomando en consideración los escenarios de radio de interferencia previamente planteados.

7.1. Determinación del criterio económico:

El primer paso en la evaluación económica fue seleccionar el indicador más acertado, con el que se pudiera determinar la factibilidad de emplear el radio de interferencia como herramienta en la gestión del acuífero de Quíbor.

El indicador debía tener las siguientes características: ser sencillo de determinar, comprensible y fácil de interpretar, que sus resultados pudiesen valorarse en el corto plazo, que pudiese aplicarse a todas las zonas del Valle, que permitiera hacer comparaciones de la situación en el pasado y en el presente. En este sentido, se decidió evaluar la potencia de bombeo como un indicador relacionado a las actividades de operación de los pozos en el Valle, actividades que son llevadas a cabo con mucha frecuencia (diariamente) y por todos los usuarios directos de los pozos, de este modo, se considera un indicador que está presente en la cotidianidad, es fácil de determinar con la información que se tiene de campo, es sencillo de interpretar y sus resultados podrían ser evaluados en el corto plazo y comparados en el tiempo (pasado, presente y futuro).

Teóricamente, entre mayor sea el abatimiento aceptable en el pozo vecino (s), se necesitará una bomba de mayor potencia para poder continuar extrayendo del pozo el caudal que se extraía cuando la interferencia no existía. Un aumento en la potencia de la bomba implicará un aumento de los costos de energía eléctrica o combustible y también en el mantenimiento o reemplazo de la bomba. En este sentido, a fin de asignarle un valor económico a estas variaciones de potencia, se comenzará definiendo que la potencia de la bomba (P_b) depende

directamente de las variables: caudal a explotar (Q) y altura de impulsión del fluido (H), tal como indica la ecuación 7.1.

$$P_b \text{ (hp)} = \frac{Q * \gamma * H}{76 * e}$$

Ec. 7.1

Donde:

P_b= potencia de bombeo (hp)

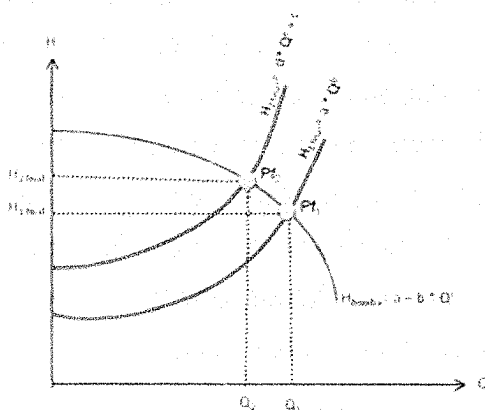
Q= caudal a explotar (L/s).

γ = peso específico del fluido (kg/m³)

H = altura de impulsión del fluido (m).

e= eficiencia del sistema (0.55-0.75)

Así pues, la determinación de un cambio de potencia (ΔP_f) se podría hacer comparando los puntos de funcionamiento en el sistema bomba-pozo para una situación sin interferencia de pozo vecino y otra con interferencia (Figura 7.1).



Legenda:

- Curva de la bomba
- Curva del sistema para H₂
- Curva del sistema para H₁
- Curva del sistema para H₀
- P₂ = punto de funcionamiento situación sin interferencia de pozo vecino
- P₁ = punto de funcionamiento situación con interferencia de pozo vecino

Figura 7.1. Diagrama de funcionamiento del sistema pozo y bomba.

En ese caso, será necesario interceptar las curvas del sistema pozo con la curva sintética de la bomba, así se obtendrán los puntos de funcionamiento para cada condición de interferencia (Pf_1 , Pf_2), posteriormente se restarán las coordenadas de cada punto para obtener la variación de potencia (Δ_{pb}) que se experimenta entre las condiciones con y sin interferencia.

Teniendo cuantificadas las variaciones de potencia (Δ_{pb}) entre las 2 condiciones antes mencionadas, se procede a la asignación de los costos (Ec. 7.2), tomando como referencia en el precio internacional y nacional de la energía eléctrica para bombas eléctricas y también calculándolo en relación al costo internacional del Diesel en el caso de bombas que trabajen a base de combustible.

$$\Delta_{\text{costo Pb}} = \Delta_{pb} * \begin{cases} \text{USD}\phi/\text{Kwh} \\ \text{Bs}\phi/\text{Kwh} \end{cases}$$

Ec. 7.2

Donde:

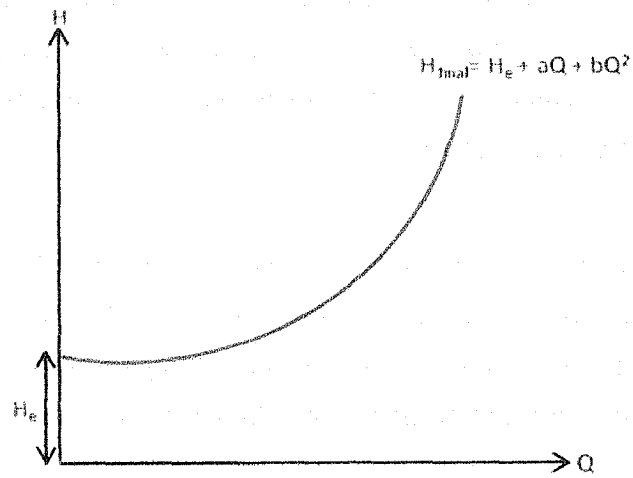
$\Delta_{\text{costo Pb}}$ = variación de costos asociada al aumento de potencia.

Δ_{pb} = variación de la potencia de la bomba.

7.2. Definición de la curva del sistema bomba – pozo:

Para definir las curvas del sistema bomba – pozo, se partió de una curva general (Figura 7.2) que consta de 3 parámetros:

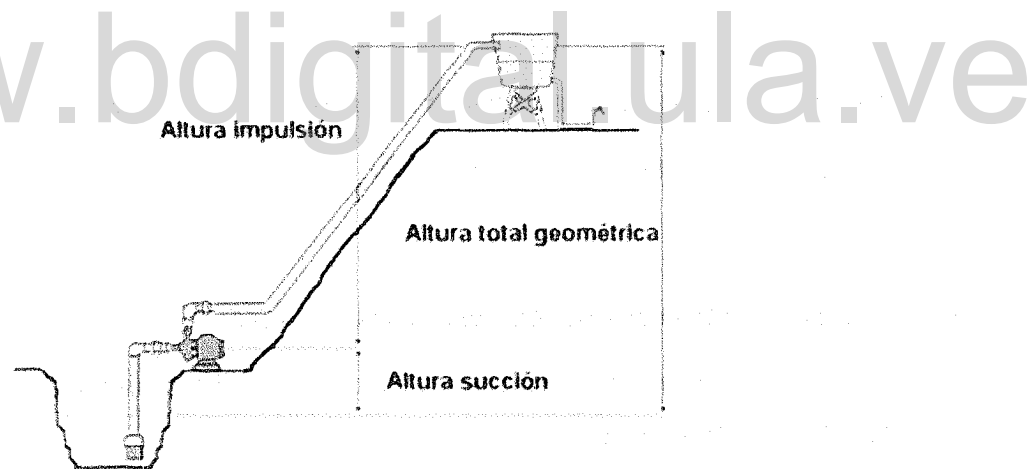
Altura estática (H_e): se refiere a la altura inicial que debe vencer la bomba para que el agua comience su ascenso a través del pozo, comprende la distancia entre el espacio de ingreso del agua al pozo y el lugar de almacenamiento del agua, también se conoce como altura geométrica (Figura 7.3).



Leyenda:

— Curva general del sistema bomba-pozo
 H_e = altura inicial a vencer por la bomba

Figura 7.2. Curva general para el sistema bomba - pozo.



Tomado de: (Bombas2, Benoit.cl)

Figura 7.3: Diagrama de altura para la bomba dentro de un pozo.

Coeficiente a: se trata de una función integrada por dos elementos (Figura 7.4), el primero se refiere a los descensos lineales en el pozo representados en función del tiempo ($f(t)$) y cuya determinación va a depender de las propiedades del acuífero, si es confinado (Ec. 7.3) o si es semiconfinado (Ec. 7.4).

$$a = \begin{cases} f(t) = -\frac{1}{4 * \pi * T} * w(\mu) \\ f(t) = -\frac{1}{4 * \pi * T} * w(\mu; r/B) \end{cases}$$

Efecto Skin

Figura 7.4 Elementos de la función de descenso lineal.

$$f(t) = -\frac{1}{4 * \pi * T} * w(\mu)$$

Ec. 7.3

Donde:

f(t)= función de descenso lineal

T= transmisividad

w(μ)=función de pozo para acuíferos confinados

$$f(t) = -\frac{1}{4 * \pi * T} * w(\mu; r/B)$$

Ec. 7.4

Donde:

f(t)= función de descenso lineal

T= transmisividad

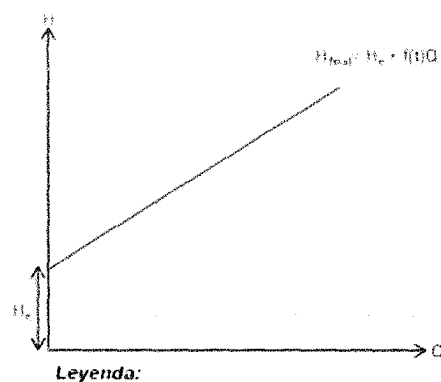
w(r/B)=función de pozo para acuíferos semiconfinados

Mientras que el segundo elemento, el efecto piel o skin está relacionado con una reducción en permeabilidad del estrato productor de agua en las zonas próximas al pozo, es decir, se trata de una superficie o cilindro de permeabilidad reducida alrededor del pozo que puede generarse durante las operaciones de perforación, terminación o producción y puede ser el

resultado de hinchamiento de partículas de grano fino, precipitación de sustancias químicas de la formación o desarrollo bacteriano. El factor skin se trata de una variable adimensional compuesta por la sumatoria de todos los efectos que generan caídas adicionales de presión en el sistema bomba/pozo (Larrea, Peña, & Bolivar).

Coeficiente b: integra todas las pérdidas no lineales o singulares experimentadas en la tubería y en el pozo, más específicamente se trata de aquella pérdida de carga que se experimenta por la presencia de cualquier obstáculo colocado de manera intencional en la tubería o en el pozo y que supongan una mayor o menor obstrucción al paso del flujo en su trayecto, tales elementos podrían ser codos, válvulas, cambios de sección, entre otros. Estas pérdidas normalmente son pequeñas en comparación a las lineales, salvo de que se trate de válvulas muy cerradas, lo que implica una obstrucción grande (E.T.S Ingenieros Industriales Universidad de Oviedo, 2004).

Con la finalidad de simplificar la ecuación general del sistema bomba - pozo (Figura 7.2), a efectos prácticos se considerarán nulos el efecto skin y el coeficiente b, los cuales, vale destacar que en la realidad nunca son nulos. Como resultado se tiene una curva del sistema que es lineal tal como se muestra en la Figura 7.5.

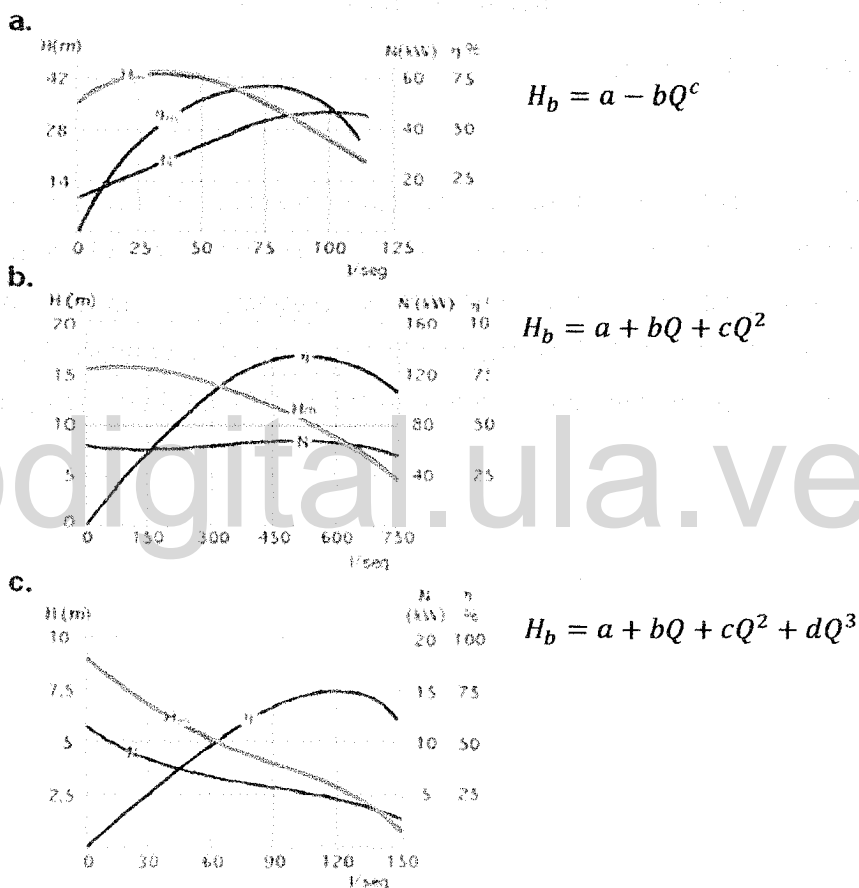


Leyenda:
Curva simplificada del sistema bomba - pozo
 H_0 = altura inicial a vencer por la bomba

Figura 7.5. Curva simplificada del sistema bomba – pozo.

7.3. Definición de la curva sintética de la bomba:

En la Figura 7.6 se muestran tres curvas características de bombas hidráulicas, las cuales se pueden diferenciar por el mecanismo que emplean para impulsar el fluido, y el hecho que tienen en común es que pueden ser representadas por una función polinómica que será compleja (Figura 7.6 c.) o sencilla (Figura 7.6 a.). En el caso del Valle de Quibor, suelen emplearse bombas del tipo centrífuga como la que se muestra en la Figura 7.6 a.



Tomado de: (riegos, 2007)

Figura 7.6: Curvas características de tres bombas hidráulicas. a. bomba radial centrífuga. b. bomba helicocentrífuga. c. bomba de hélice.

Por su parte, en esta investigación se decidió trabajar a fines prácticos con una curva de la forma que se muestra en la ecuación 7.5, la cual se desarrolló partiendo de las bases teóricas propuestas dentro del programa EPANET 2.

$$H_b = a - bQ^c$$

Ec. 7.5

Donde:

H_b = altura de impulsión de la bomba para cualquier punto sobre la curva.

a, b, c = coeficientes de modelación de la bomba.

Q = caudal de impulsión.

Para la construcción de curvas características de bombas EPANET 2 propone varias metodologías, dentro de las cuales se consideró apropiado seguir el procedimiento descrito previamente en el capítulo II de esta investigación, el cual parte del hecho de que se conoce el valor del punto de funcionamiento sobre la curva a desarrollar y a partir de él se deduce la ecuación de toda la curva. En este sentido EPANET 2 considera que (Figura 7.7):

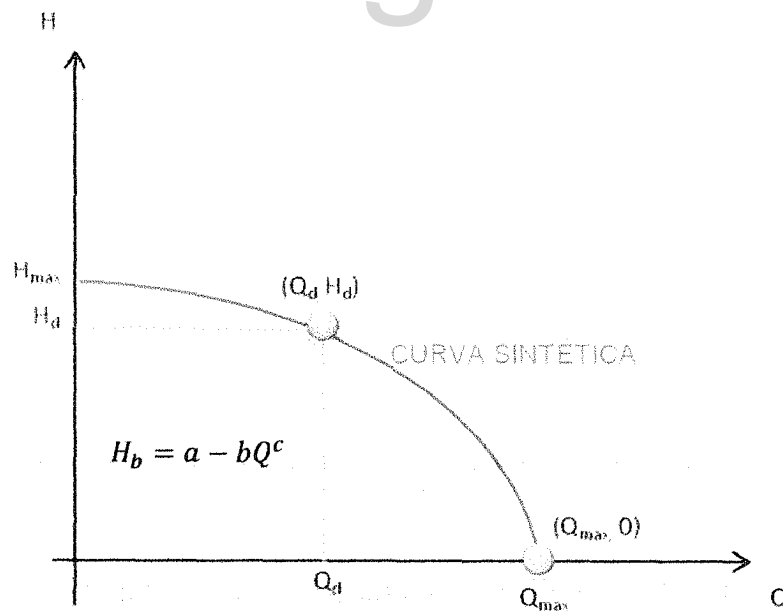


Figura 7.7 Curva sintética para la bomba.

$$H_{max} = 1.33 * H_d$$

Ec. 7.6

Donde:

H_{max} = altura de impulsión máxima lograda por la bomba.

1.33 = coeficiente (EPANET)

H_d = altura correspondiente al punto de funcionamiento o altura de diseño.

$$Q_{max} = 2 * Q_d$$

Ec. 7.7

Donde:

Q_{max} = caudal máximo de impulsión.

2 = coeficiente (EPANET)

Q_d = caudal correspondiente al punto de funcionamiento o caudal de diseño.

$$H_{bomba} = a - b * Q^c$$

Ec. 7.5 (bis)

Luego de definir las formulas a emplear y esquematizar el problema (Figura 7.7), se determinó el valor de los coeficientes a, b y c siguiendo los procedimientos que se describen a continuación:

- Coeficiente a:

Se definió como el corte de la curva de la bomba con el eje de las ordenadas, de este modo, "a" se considera un valor conocido:

$$a = H_{max}$$

Ec. 7.6

- Coeficiente b:

Se sustituyó en la ecuación 7.5 el valor de un punto conocido, en este caso, se empleó el punto de coordenadas ($Q_{max}, 0$):

$$H_{bomba} = a - b * Q^c$$

$$0 = a - b * Q_{max}^c$$

Donde:

$$a = H_{max}$$

$$Q_{max} = 2 * Q_d$$

$$H_{max} - b * (2 * Q_d)^c = 0$$

$$H_{max} = 1.33 * H_d$$

$$1.33 * H_d - b * (2 * Q_d)^c = 0$$

Ec. 7.7

Se sustituyó en la ecuación 7.5 el valor de otro punto conocido, en este caso, se empleó el punto de coordenadas (Q_d, H_d):

$$H_{bomba} = a - b * Q^c$$

$$H_d = a - b * Q_d^c$$

Donde:

$$a = H_{max}$$

$$H_{max} - b * Q_d^c = H_d$$

$$H_{max} = 1.33 * H_d$$

$$(1.33 * H_d) - b * Q_d^c = H_d$$

$$0.33 * H_d - b * Q_d^c = 0$$

Ec. 7.8

De este modo, se tiene un sistema de 2 ecuaciones con 2 incógnitas:

$$\text{Ecuaciones} \begin{cases} 1.33 * H_d - b * (2 * Q_d)^c = 0 \\ 0.33 * H_d - b * Q_d^c = 0 \end{cases}$$

Incógnitas: b,c

Resolviendo el sistema de ecuaciones se encontraron los valores de los coeficientes b, c:

$$c = 2$$

$$b = \frac{0.33 * H_d}{Q_d^2}$$

De este modo, la curva sintética resultante cuenta con la siguiente ecuación:

$$H_{bomba} = H_{max} - \frac{0.33 * H_d}{Q_d^2} * Q^2$$

Ec. 7.9

Para el caso específico del Valle de Quíbor se diseñaron en EPANET 2 unas curvas características para las bombas que teóricamente se desean emplea. Para ello se consideró que la variable caudal (Q) sería una constante para cada una de las tres zonas en las que ha sido dividido previamente el Valle de Quíbor. En la Figura 7.8 se muestra la zonificación del Valle y los caudales respectivos.

Con el caudal de cada zona y una altura de diseño (H_d), se construyeron las curvas sintéticas para bombas a emplear teóricamente en cada sector, siguiendo la metodología que se detalla a continuación:

- Se definieron los puntos de operación o diseño de la bomba (Tabla 7.1), tomando en consideración:

Tabla 7.1 Puntos de diseño con los que se construyeron las curvas sintéticas para las bombas en cada sector del Valle de Quibor.

Zona	Punto de diseño	
	Qd(L/s)	Hd(m)
1	26	147
2	23	76
3	35	97

Caudales: se establecieron caudales de diseño que pudieran ser aplicados a las realidades de cada una de las zonas.

Alturas: se consideró como la sumatoria de la altura de impulsión y la altura de bombeo (Figura 7.9), tomando en cuenta el nivel dinámico del agua en el acuífero (nivel estático + abatimiento), la altura de impulsión inicial (3m), las pérdidas por conducción (30%) y un almacenamiento en un tanque en superficie con una elevación constante de 4m (altura de descarga). En la Figura 7.10 se muestra el mapa de alturas de diseño medias para cada zona del Valle.

- En el editor de curva del programa EPANET 2, se introdujeron los valores de los puntos de diseño para cada zona (Tabla 7.1) y el programa generó una curva sintética para cada uno de los sectores (Figura 7.11), a través de la metodología de un solo punto descrita en el capítulo III. En la tabla 7.2 se muestran las ecuaciones de todas las curvas teóricas definidas para el Valle.

Tabla 7.2 Ecuaciones de la curvas sintéticas de las bombas para cada una de las zonas del Valle de Quibor.

Zona	Ecuación de la bomba	
	Hb	Qb
1	$195.00 - 0.07249 * Q^2$	$(195.00 - Hb / 0.07249)^{1/2}$
2	$101.33 - 0.04789 * Q^2$	$(101.33 - Hb / 0.04789)^{1/2}$
3	$129.33 - 0.0264 * Q^2$	$(129.33 - Hb / 0.0264)^{1/2}$

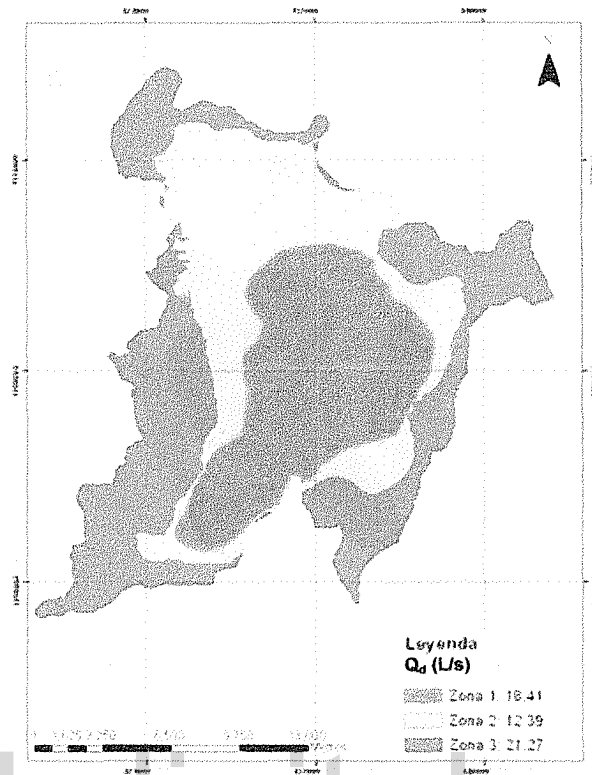
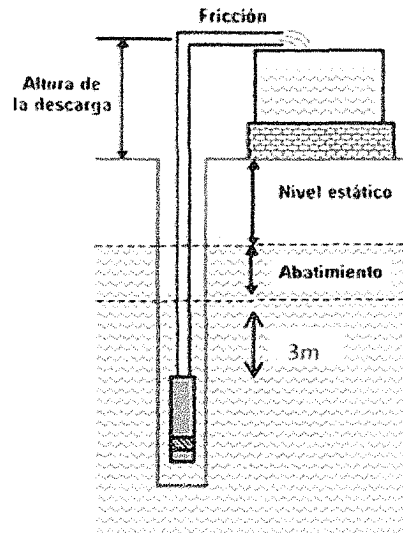


Figura 7.8 Zonas de Valle de Quibor y caudales de diseño asociados a cada zona.



Tomado de: (Enviroment, s/a)

Figura 7.9 Esquema para la definición de la altura de diseño para las bombas.

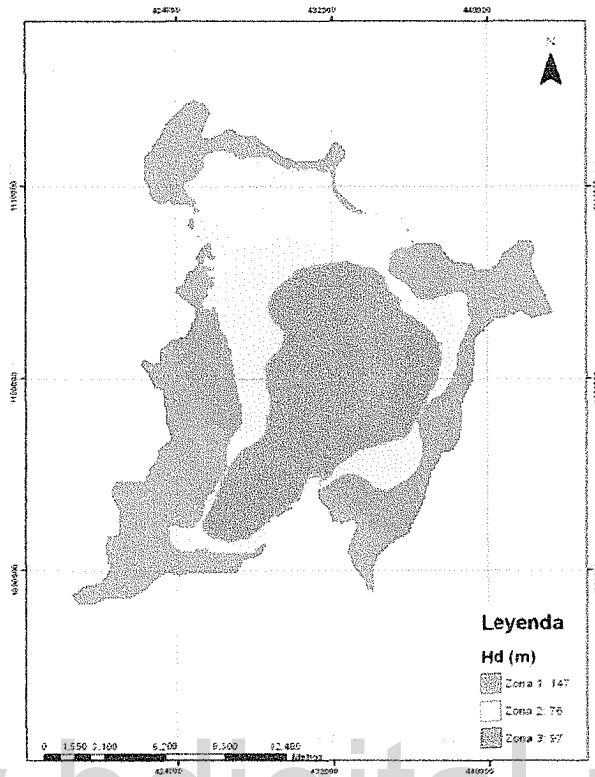


Figura 7.10 Zonas de Valle de Quíbor y alturas de diseño medias asociados a cada zona.

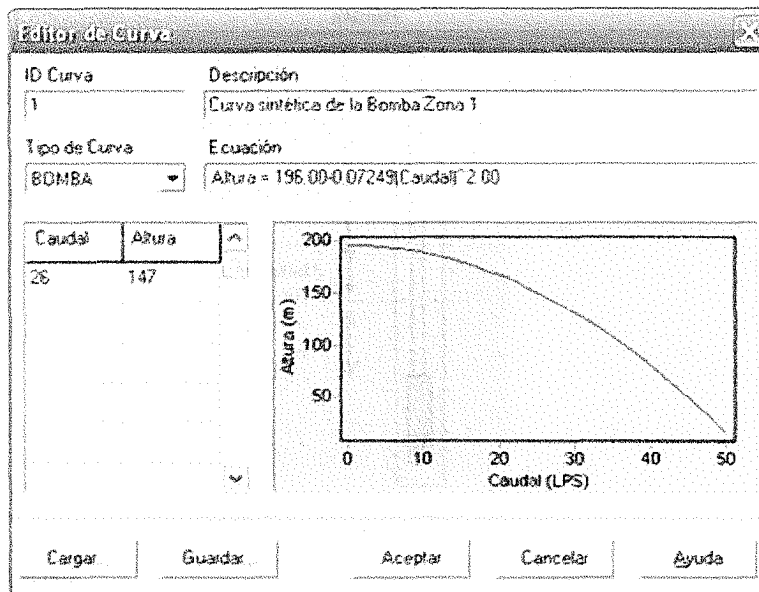


Figura 7.11 Curva de bomba para la zona 1

7.4. Determinación de los puntos de funcionamiento (Pf_1 , Pf_2):

Como se dijo anteriormente, determinar los puntos de funcionamiento para los escenarios en los que existe (Pf_2) y no existe interferencia (Pf_1), es uno de los pasos más importantes para poder cuantificar el cambio de potencia experimentado por las bombas al cambiar las condiciones de interferencia. De este modo, se interceptan la curva del sistema y la de la bomba (Figura 7.12).

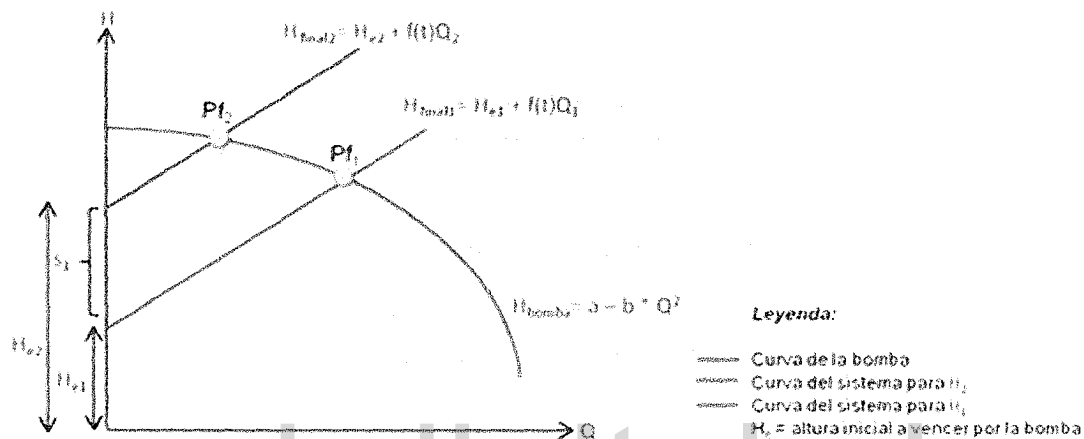


Figura 7.12 Determinación de los puntos de funcionamiento para las condiciones con y sin interferencia de pozo vecino.

Los puntos de funcionamiento se encuentran cuando la altura final (H_{final}) y la altura de la bomba (H_b) coincidan en un mismo punto, su determinación numérica se encuentra como sigue:

Resolviendo la ecuación cuadrática se tiene:

$$c_1 = H_e - a$$

$$Q = \frac{-b_1 \pm \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}$$

Opción 1:

$$Q = \frac{-b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}$$

$$2a_1Q = -b_1 + \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}$$

$$(2a_1Q + b_1)^2 = \left(\sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}\right)^2$$

$$4(a_1Q)^2 + 4a_1Qb_1 + b_1^2 = b_1^2 - 4a_1c_1$$

$$4(a_1Q)^2 + 4a_1Qb_1 = -4a_1c_1$$

$$4a_1(a_1Q^2 + Qb_1) = -4a_1c_1$$

$$a_1Q^2 + Qb_1 = -c_1$$

Sustituyendo los valores de $a_1 = b$, $b_1 = f(t)$ y $c_1 = H_e - a$

$$bQ^2 + Qf(t) = -H_e + a$$

$$Q^2 = \frac{-H_e + a - Qf(t)}{b}$$

Ec. 7.10

Opción 2:

$$Q = \frac{-b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}}{2a_1}$$

$$2a_1Q = -b_1 - \sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}$$

$$(2a_1Q + b_1)^2 = \left(-\sqrt{b_1^2 - 4a_1c_1}\right)^2$$

$$4(a_1Q)^2 + 4a_1Qb_1 + b_1^2 = b_1^2 - 4a_1c_1$$

$$4(a_1Q)^2 + 4a_1Qb_1 = -4a_1c_1$$

$$4a_1Q(a_1Q + b_1) = -4a_1c_1$$

$$Q(a_1Q + b_1) = -c_1$$

$$Q = -\frac{c_1}{a_1Q + b_1}$$

www.bdigital.ula.ve

Ec. 7.11

En vista de que no se pueden tener valores negativos para el caudal, esta opción queda descartada y se empleará para los cálculos sucesivos la ecuación 7.10

Sustituyendo la ecuación 7.10 en la ecuación de la bomba (Ec. 7.9) se encontrará el punto de funcionamiento (Figura 7.11) tal como se indica a continuación:

$$H_{bomba} = H_{max} - \frac{1.33 * H_d}{(2 * Q_d)^2} * Q^2$$

Donde:

$$a = H_{max}$$

$$b = \frac{0.33 * H_d}{Q_d^2} * Q^2$$

$$c = 2$$

$$H_{bomba} = a - b * Q^2$$

Donde:

$$Q^2 = \frac{-H_e + a - Qf(t)}{b}$$

Al sustituir, se tiene:

$$H_{bomba} = a - b * \left(\frac{-H_e + a - Qf(t)}{b} \right)$$

$$H_{bomba} = a + H_e - a + Qf(t)$$

$$P_f = H_{bomba} = H_e + Qf(t)$$

Ec. 7.12

7.5. Determinación de la potencia de bombeo:

Para determinar la potencia de bombeo (P_b) en los puntos de funcionamiento (P_f) de la bomba (Figura 7.13), se definió la ecuación 7.13 de manera simplificada, expresándola en función solo de la variable altura (H), el procedimiento seguido se explica a continuación:

Se partió de la ecuación general de potencia de la bomba (Ec. 7.1 bis)

$$P_b \text{ (hp)} = \frac{Q * \gamma * H}{76 * e}$$

Ec. 7.1 Bis

Los puntos de funcionamiento son espacios en los que la ecuación de la bomba y del sistema se igualan (Figura 7.2), por lo tanto, la variable H de la ecuación 7.1 bis, puede despejarse tanto de la ecuación de la bomba como del sistema, sin embargo, resulta más sencillo hacerlo de la ecuación de la bomba (Ec. 7.12), de este modo, la ecuación de potencia de bombeo resultante es la siguiente:

$$H_{bomba} = H_e + Qf(t)$$

Ec. 7.12 Bis

Sustituyendo H en P_b :

$$P_b(\text{hp}) = \frac{Q * \gamma * (H_e + Qf(t))}{76 * e}$$

Si se considera:

a. Una eficiencia de la bomba de 70%:

$$\text{Constante1} = 76 * e$$

$$\text{Constante1 (hp)} = 76 * 0.7$$

$$\text{Constante1 (hp)} = 53.2$$

b. El peso específico del agua:

$$\gamma = 1 \text{ kg/m}^3 \text{ para } T = 20^\circ\text{C}$$

c. La función de descenso lineal se establecerá en función de $t=90$ días, tiempo definido por un criterio práctico de mantenimiento (cap. VI). Por lo tanto, se verá como una constante que va a tener un valor particular dependiendo del sitio en el que se encuentre el pozo dentro del acuífero:

$$f(t) = \text{constante2}$$

$$f(t) = s = \frac{Q}{4 * \pi * T} * \text{Ln} \left(\frac{2.25 * T * 90}{r^2 * S} \right)$$

Resulta:

$$P_b = \frac{Q * (H_e + Q C t t e_2)}{53.2}$$

$$P_b = \frac{Q * H_e + Q^2 C t t e_2}{53.2}$$

Ec. 7.13

7.6. Determinación de la variación de la potencia de bombeo asociada a la interferencia entre pozos vecinos:

Como se hizo referencia anteriormente, al existir una interferencia entre pozos vecinos (s_i), se espera que se produzca una variación en la potencia de bombeo (ΔP_b) que puede calcularse como la diferencia entre la potencia antes (P_b) y después (P_{bs}) de encender el pozo vecino (Figura 7.13).

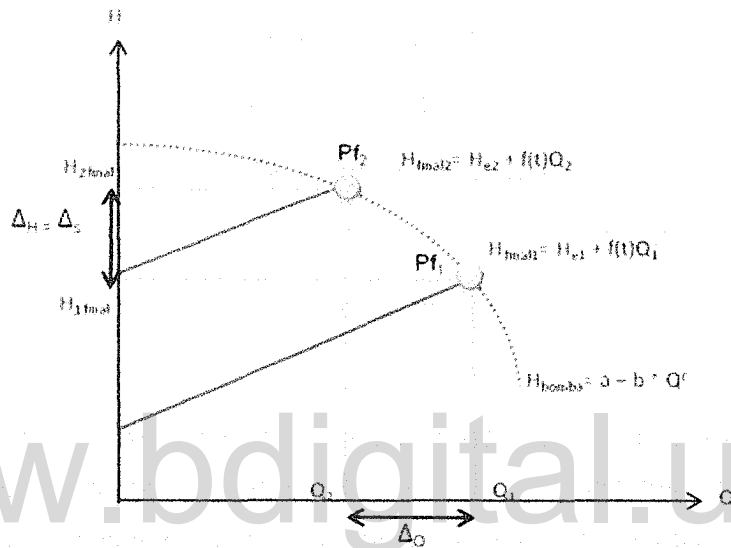


Figura 7.13: Variación en la potencia de bombeo para situación con y sin interferencia de pozo vecino.

La ecuación 7.13 muestra la potencia en función de la altura en un pozo cualquiera "a". Cuando se enciende el pozo vecino "b", la altura inicial (H_e) en la bomba del pozo "a" se incrementa un valor Δ_s (Figura 7.11), correspondiente al abatimiento inducido por pozo "b", así pues, la ecuación de potencia en este escenario sería la siguiente:

$$P_{b_s} = \frac{Q * (H_e + \Delta_s) + Q^2 Ctte_2}{53.2}$$

Ec. 7.14

Como se desean expresar la potencia (P_b) en función de la altura (H). El caudal (Q) se despejará de la ecuación 7.5 Bis:

$$H_{bomba} = a - b * Q^2$$

$$Q^2 = \frac{a - H_b}{b}$$

$$Q = \sqrt{\frac{a - H_b}{b}}$$

Ec. 7.5 Bis

Resultando:

$$P_b = \frac{Q * H_e + Q^2 C_{tte_2}}{53.2}$$

$$P_b = \frac{1}{53.2} * \left[H_e * \left(\sqrt{\frac{a - H_b}{b}} \right) + C_{tte_2} * \left(\frac{a - H_b}{b} \right) \right]$$

Ec. 7.13

Donde:

H_e = altura estática (m)

a, b= constantes provenientes de las curvas de la bomba para cada zona

H_b = altura de bombeo (m)

Por su parte, la variación de potencia corresponderá a la resta de la ecuación en un escenario de interferencia (Ec. 7.14) y sin interferencia (Ec. 7.13), resultando de la siguiente forma:

$$\Delta_p = P_b - P_{b_s}$$

Ec. 7.15

Para la determinación de las variaciones de potencia de bombeo (ΔP_b) en el acuífero de Quíbor, se definieron los valores de cada uno de los parámetros que conforman a las ecuaciones 7.13 y 7.14:

- Altura inicial (H_e):

Se estableció como la superficie de nivel dinámico para todo el Valle.

- Constante 2:

Se partió del hecho expuesto anteriormente en el que la constante 2 está definida por la ecuación que se presenta a continuación:

$$f(t) = \text{constante2}$$
$$f(t) = s = \frac{Q}{4 * \pi * T} * \text{Ln} \left(\frac{2.25 * T * 90}{r^2 * S} \right)$$

En tal sentido, se estableció trabajar con valores de abatimiento ($s=f(t)$) de 0.01m, 0.1m, 1m, 2m y 3m.

Finalmente se aplicó la ecuación 7.13 y 7.14 para las tres zonas en las que fue dividido el Valle, en la Figura 7.14 se muestra un ejemplo de los mapas resultantes.

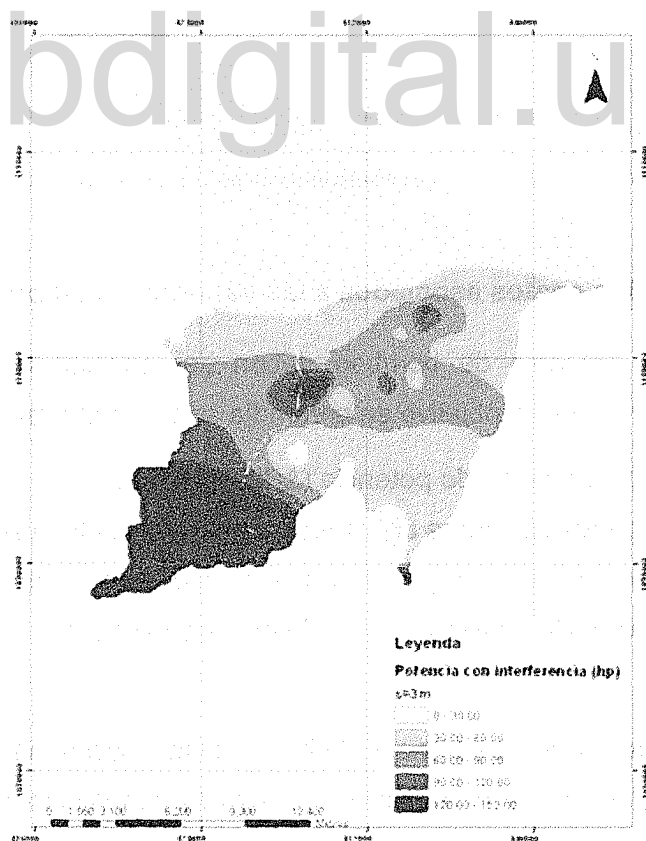
Como se puede apreciar en la Figura 7.14, las potencias de bombeo son similares tanto si existe o no una interferencia por pozo vecino, por lo que la potencia de bombeo evaluada desde la óptica que se le dio en esta investigación, no resultó el mejor indicador para cuantificar los efectos de una interferencia por pozo vecino.

Por otra parte, las potencias de bombeo para la situación con interferencia indican que para que dicha perturbación ocurra dentro de un pozo, el vecino debe ser bombeado con las potencias que se muestran en la Figura 7.14 a., en este sentido, hacia la zona norte y este del Valle, se tendrá que bombear con potencias bajas para lograr una interferencia de 3m (para el caso específico de la interferencia evaluada en la Figura 7.14a). Si se toma en cuenta que en el trabajo APROSELA, 2000 (capítulo 7 – formulación del plan de manejo) se

demostró que en todo el Valle la potencia instalada rebasa en todos los casos a la potencia requerida, la potencia con la que se bombea actualmente podría beneficiar el fenómeno de interferencia entre pozos. El cual no se refleja en una disminución drástica de los niveles dinámicos pero se podrían manifestar en una disminución de los caudales, efecto que tendría repercusiones más severas en la economía de los productores agropecuarios del Valle.

La Figura 7.14 muestra que para extraer el recurso hídrico en el Valle, se necesitan potencias bajas en la zona nortes y este, potencias medias en la zona central y potencias mayores hacia el suroeste. Este comportamiento revela que las zonas más sensibles a la explotación son aquellas en las que se necesite menos energía para extraer el recurso, es decir, la zona norte y este del Valle. Conducta que se repite para todos los casos de interferencia en los que se evaluó la potencia de bombeo (anexos A 9 – A 18).

a.



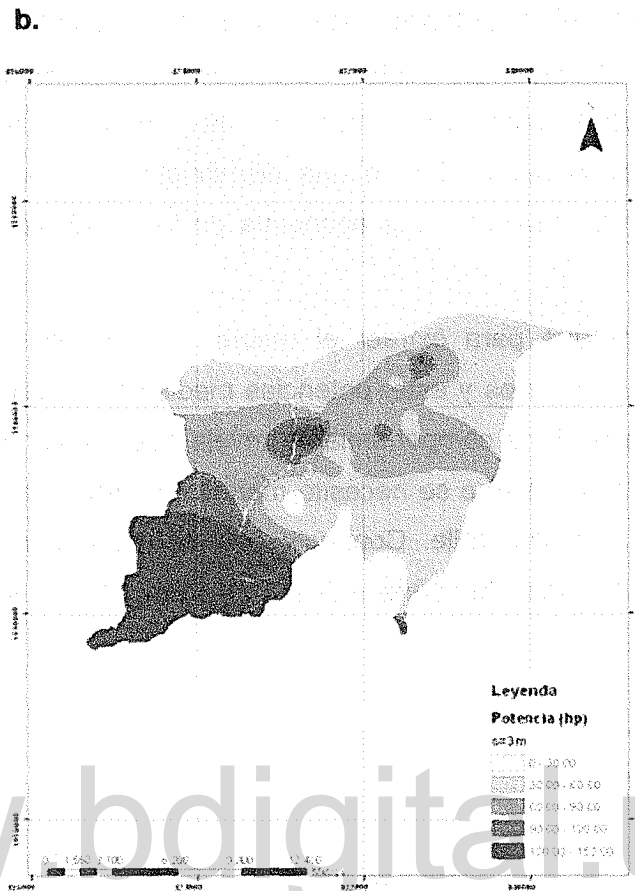


Figura 7.14: Potencia en el Valle de Quíbor. a. con interferencia de pozo vecino b. sin interferencia de pozo vecino.

7.7. Determinación de los costos asociados a las variaciones de potencia en la bomba.

Las variaciones en la potencia de bombeo deben ser expresadas como una función económica, para cumplir con este objetivo se pretendía seguir la siguiente metodología:

1. Convertir los valores de variación de potencia (ΔP_b) de las bombas de cada zona del Valle de Quíbor de unidades de fuerza (Hp) a unidades de energía eléctrica (Kw) y de combustible (L Diesel) con la finalidad de poder asignarles un costo a la energía adicional consumida por la bomba en cada escenario de aumento de interferencia en el pozo.

2. Transformaron la variaciones de potencia (ΔP_b) en costos para el productor agropecuario, en este sentido, para ello, aplicar la ecuación 7.2 a cada uno de los mapas de cambio de

potencia, tomando un valor referencial a precio internacional de la energía eléctrica para América de 11USD\$/Kwh (CONCAMIN, 2010) y el precio subsidiado de la energía eléctrica en Venezuela, de 13Bs¢/Kwh (Hernández, 2012). Así mismo, evaluar los costos en Diesel a precio internacional, tomando como referencia los datos del Banco Mundial (Banco Mundial, 2012) para Venezuela, que indican un precio de 0.1USD \$/L.

Sin embargo, en todos los mapas de potencia con y sin interferencia, generados dentro de esta investigación se pudo observar que las variaciones de potencia no eran significativas (Figura 7.15), fluctuando entre 0.1 – 5 hp, motivo por el cual se consideró no se llevó a cabo la determinación de los costos en función de la potencia de bombeo.

www.bdigital.ula.ve

El presente documento es una traducción de un artículo publicado en la revista "Revista de la Asociación de Bibliotecarios de la Universidad de los Andes" (Revista de la Asociación de Bibliotecarios de la Universidad de los Andes, vol. 1, no. 1, 1998, pp. 1-10). El artículo original fue escrito por el Dr. Juan Carlos Rodríguez Cordero, quien es el autor de este trabajo. El presente documento es una traducción de un artículo publicado en la revista "Revista de la Asociación de Bibliotecarios de la Universidad de los Andes" (Revista de la Asociación de Bibliotecarios de la Universidad de los Andes, vol. 1, no. 1, 1998, pp. 1-10). El artículo original fue escrito por el Dr. Juan Carlos Rodríguez Cordero, quien es el autor de este trabajo.

www.bdigital.ula.ve

CONCLUSIONES

- El parámetro de radio de interferencia se definió como una variable de útil aplicación dentro del acuífero de Quíbor, a través del uso de la ecuación propuesta por Jacob (1946) para acuíferos confinados, a pesar de que el acuífero de Quíbor no se comporte de este modo en toda su extensión, pues hay zonas en las que se sabe que muestra un comportamiento semiconfinado y en otras libre.

- Dentro de la formulación de Jacob (1946), el parámetro más complejo de especificar fue el coeficiente de almacenamiento, pues se contaba con datos provenientes de pruebas de pozos y otros datos simulados a través de la aplicación de la ecuación de Boostran y Ridder (1981), sin embargo, los resultados de radio de interferencia para ambas datas fueron muy similares, con lo que se puede concluir que la fórmula de Boostran y Ridder (1981) se ajusta bastante bien al comportamiento hidrogeológico del acuífero de Quíbor.

- Al observar la zonificación resultante del Valle de Quíbor en función del radio de interferencia, se aprecia que los mayores radios de interferencia se encuentran en los sectores que están sometidos a mayores presiones de uso, tal es el caso de las zonas central, este y sur-este del Valle. En contraparte, en las periferias del Valle, es donde el fenómeno de interferencia se presenta con menor fuerza, comportamiento que puede atribuirse a que las condiciones hidrogeológicas de subsuelo y condiciones de operación de los pozos ubicados en el mencionado sector, son mejores que en los predios anteriormente señalados.

- Evaluando los resultados de radios de interferencia obtenidos, se puede mencionar que en una situación en la que el abatimiento inducido es nulo ($s=0$), los radios resultantes albergan áreas tan grandes (r máximo=16000m con promedio de 5700m) que se puede considerar un criterio completamente inaplicable a la realidad del acuífero. Por otro lado, para abatimientos admisibles de 1cm, los valores de los radios de interferencia disminuyen un poco, pero siguen siendo muy altos (r máximo 14000m con promedio de 5500m). Si se

admiten interferencias de 10cm en el pozo, la magnitud del radio de interferencia tiene un máximo de 10000m con una media de 4300m. Finalmente si se acepta un abatimiento de 1m en el pozo, el radio de interferencia muestra una longitud máxima de 5000m con una media de 1340m. Estos resultados permiten inferir que resulta conveniente restringir las concesiones de apertura de nuevos pozos a zonas en las que el radio entre pozos sea significativamente extenso como para tener la menor interferencia posible en las actividades de operación de los pozos vecinos, esto es en promedio 4km. Valor correspondiente a un abatimiento medio 10cm, que se podría llegar a considerar una interferencia leve. Sin embargo, este criterio deja por fuera de reglamentación a los pozos que se encuentran actualmente en operación, pues en su mayoría los pozos vecinos en el Valle de Quíbor se separan entre sí por distancias menores a 1km.

- Adicional a la zonificación del Valle de Quíbor en función del radio de interferencia, también fue dividido convenientemente en tres zonas en función de la presión de uso a la que está sometida el recurso hídrico subterráneo en el Valle y los espesores medios de la capa acuífera. Dicha sectorización permitió tener organizado al Valle, para que fuese sencillo aplicar cualquier herramienta de gestión del agua en la región.

- Como herramienta de gestión de la explotación del agua en el acuífero de Quíbor, se diseñaron gráficos de abatimiento permisibles (interferencia permisible en el pozo) vs. radio de interferencia para cada una de las tres zonas en las que fue dividido el Valle. De este modo el organismo encargado de la asignación de nuevas explotaciones, puede contar con un instrumento de uso sencillo que le permita, conocer la interferencia media probable a la que estará sometido un pozo vecino si uno nuevo se ubica dentro de un radio conocido entre 1m y 10km.

- En lo que respecta a la evaluación de los costos de producción bajo escenarios de interferencia de pozos, en un principio se planteó valorar la potencia de bombeo, de forma tal que solo dependiera de la variable altura, pues se consideró un elemento que se afectaba directamente al existir un aumento en el abatimiento en el pozo. Como resultado se obtuvieron mapas de potencia de bombeo con y sin interferencia de pozo vecino, ambos mapas resultaron muy similares, por lo tanto la variación de potencia enfocada desde la

variable altura, no era el indicador más eficiente para cuantificar económicamente el impacto de la interferencia. Sin embargo, queda como incógnita obligada para futuras investigaciones, evaluar la manera en que afecta la interferencia de pozo vecino directamente a la variable caudal y cuantificar económicamente sus efectos.

- El hecho de que existan zonas del Valle donde las potencias de bombeo necesarias son bajas (sector norte, este y sureste), lo que quiere decir es que si se bombea a sobre potencia, como se hace en toda la extensión del Valle (APROSELA, 2000), la altura de extracción no se afecta en gran medida, pero se puede afectar el caudal, consecuencia que tendría repercusiones más severas en la economía de los productores agropecuarios del Valle.

- Haber logrado la zonificación del Valle en función de potencia de bombeo y su relación con la interferencia de pozos vecinos, modifica la concepción original que se tenía de ser permisivos con la asignaciones de concesiones para la explotación en ciertos sectores del Valle, dentro de los que están incluidos los sector norte, este y sureste, categorizados dentro de este trabajo como sectores vulnerables a los efectos de interferencia de pozo.

www.bdigital.ula.ve

RECOMENDACIONES

- Aplicar la metodología de valoración de costos de los cambios de potencia en una bomba sintética, a las bombas de uso frecuente en el Valle de Quíbor. De este modo, se podrán evaluar las condiciones de variación de costos para cada pozo en producción en los distintos escenarios de abatimiento permisible.
- Ampliar el análisis de interferencia de pozo vecino a las variaciones que este fenómeno ocasiona en el caudal a extraer y cuantificar en términos económicos el impacto de dicho efecto.
- Se recomienda proponer una zonificación en superficie del Valle de Quíbor en función de la capacidad para la extracción de agua subterránea en un régimen de manejo sustentable del recurso, tomando en cuenta el criterio de radio de interferencia entre pozos.
- En nuevas investigaciones se plantea ampliar la cantidad de pozos a incluir dentro de la determinación del parámetro radio de interferencia, pues se considera que entre mayor sea la cantidad de pozos analizados, se disminuirán los errores propios de la regionalización de la información.
- El enriquecimiento de la data en el acuífero de Quíbor es lo que llevará a contar con herramientas e indicadores cada día más prácticos y confiables para el control de las explotaciones del recurso subterráneo. Así se podrán seguir de cerca las modificaciones que sufre el acuífero en función de alargar al máximo su vida útil y garantizando que su explotación no vaya en detrimento de la estabilidad de los terrenos del Valle de Quíbor ni del desarrollo de sus actividades agropecuarias, que son tan útiles en el sustento de la demanda de alimentos a nivel nacional. En este sentido es imperativo seguir llevando a cabo campañas de ubicación de pozos operativos y no operativos, aforos, seguimiento de las variaciones de los niveles estáticos, pruebas de bombeo simples y con pozos de observación, entre otras prácticas de rutina.

- Se plantea que se enriquezca la data de coeficiente de almacenamiento con valores procedentes directamente de los análisis de la pruebas de bombeo, esto permitirá hacer nuevas determinaciones del radio de interferencia que se ajusten con mas certeza a la realidad del acuífero.

- Incluir las herramientas de gestión presentadas en este trabajo como parte de los instrumentos de uso cotidiano de los entes encargados de la planificación y gestión del acuífero de Quíbor, a saber Comisión Técnica de Suelos y Aguas (COTESAGUAS), Ministerio del Poder Popular para el Ambiente (MPPA), Sistema Hidráulico Yacambú Quíbor (SHYQ) y Asociación de Productores y Servicios del Estado Lara (APROSELA).

www.bdigital.ula.ve

TRABAJOS CITADOS

1. Aguilera L, y Padilla D. (1963). *Estudio del agua subterránea en el Valle de Quíbor, Distrito Jiménez del Estado Lara*, Ministerio de Obras Públicas. División de Geotecnia. Caracas – Venezuela.
2. Alvarado, J. (1989). *Estudios del Sistema Hidrogeológico del Valle de Quíbor*. Caracas: Ministerio del Ambiente y de los Recursos Naturales Renovables.
3. Arellano, M. M. (10 de Noviembre de 2008). *Universidad Politécnica de Cartagena*. Recuperado el marzo de 2013, de Prácticas de hidrología subterránea e hidrogeología: http://www.upct.es/~minaees/practica2_explicacion.pdf
4. Banco Mundial. (2012). *datos.bancomundial.org/indicador*. Recuperado el 28 de Marzo de 2014, de [bancomundial.org](http://datos.bancomundial.org): <http://datos.bancomundial.org/indicador/EP.PMP.DESL.CD>
5. Bombas de vacío y deshidratación S.A de C.V. (s.f.). *Bombas de vacío*. Recuperado el 18 de Noviembre de 2013, de Bombas de vacío : http://www.bombasdevacio.com.mx/desgloce_partes.html
6. Bombas2. (s.f.). *Benoit.cl*. Recuperado el 22 de Febrero de 2014, de [Benoit.cl](http://www.benoit.cl): <http://www.benoit.cl/Bombas2.htm>
7. Cabrera, J. A. (Agosto de 2009). *Monografías*. Recuperado el 24 de marzo de 2012, de *Monografías*: <http://www.monografias.com/trabajos75/hidraulica-captaciones-agua-subterranea/hidraulica-captaciones-agua-subterranea4.shtml>
8. Carrasco R, (1982), *Estrategia de explotación del agua subterránea en el Valle de Quíbor, Estado Lara*, Tesis M, Sc, Mérida: CIDIAT, Mérida- Venezuela.
9. CIDIAT-APROSELA (2000), *Definición de criterios y parámetros para el manejo del agua subterránea en el Valle de Quíbor*, Mérida- Venezuela.
10. CIDIAT-SHYQ (2004), *Actualización de la información hidrogeológica del acuífero del Valle de Quíbor, Modelo Geológico*, Mérida- Venezuela
11. CIDIAT. (2012). *Caracterización de las áreas de recarga, dinámica hidrogeológica y determinación de los radios de interferencia en el acuífero del Valle de Quíbor, municipio Jiménez – estado Lara*. Mérida - Venezuela: CIDIAT.

12. Comité Interfiliar de Estratigrafía y Nomenclatura. (2011). *PDVSA-INTEVEP Léxico III*. Recuperado el 2012 de marzo de 12, de Código estratigráfico de las cuencas de Venezuela: <http://www.pdv.com/lexico/lexicoh.htm>
13. CONCAMIN. (octubre de 2010). *mxladino*. Recuperado el 18 de noviembre de 2013, de mxladino: <http://mxladino.files.wordpress.com/2010/12/tarifas-elc3a9ctricas-en-el-mundo.pdf>
14. Curso de hidráulica y riegos. (2007). *OpenCoursesWareUniversidad de Sevilla*. Recuperado el 8 de 11 de 2013, de OpenCoursesWareUniversidad de Sevilla: OpenCoursesWareUniversidad de Sevilla
15. Donado L, (1999), *Capítulo 8, Hidráulica de pozos*, Recuperado el 16 de junio de 2012 de: http://www.docentes.unal.edu.co/lddonadog/docs/Presentations/Donado_1999b.pdf
16. Dugarte, J., & García, Y. (1995). El uso del agua en el Valle de Quibor, Resumen. V *Congreso venezolano de ingeniería agrícola hacia la agricultura del siglo XXI*, (pág. 22). Maracaibo .
17. Duque, R. (s/a), *Patente nº Ajuste*. Venezuela.
18. E.T.S Ingenieros Industriales Universidad de Oviedo. (octubre de 2004). <https://www.u-cursos.cl/ingenieria>. Recuperado el 20 de marzo de 2014, de https://www.u-cursos.cl/ingenieria:file:///C:/Documents%20and%20Settings/dari/Mis%20documentos/Downloads/perdida_de_carga.pdf
19. Enviornment, I. f. (s.f.). *New Mexico State University*. Recuperado el 25 de Ferbrero de 2014, de International Renewable Energy at NMSU: http://solar.nmsu.edu/wp_guide/hidraulica.html
20. Expósito Castillo, J. L., Garfías Solis, J. M., Franco Plata, R., & Velázquez Velázquez, A. (2004). Delimitación de zonas de protección sanitaria: consideraciones sobre la exactitud de los métodos utilizados en Cuba en el ejemplo del acuífero Margarita. *Minería y Geología* , 15-27.
21. Garzon, L. D. (1999). Hidráulica de pozos. En L. D. Garzon.

22. González de Vallejo, L. I., Ferrer, M., Ortuño, L., & Oteo, C. (2002). *Ingeniería Geológica*. Madrid: Pearson educación.
23. Grupo IDMH-UPV . (2001). *EPANET 2 - Manual del usuario en español*. Ohio: EPA.
24. Hernández, N. (mayo de 2012). <http://analitica.com/>. Recuperado el marzo de 20 de 2014, de <http://analitica.com/>: <http://analitica.com/va/economia/opinion/9164398.pdf>
25. Huguet, J. M. (7 de Julio de 2005). *Universidad Politécnica Católica de Perú*. Recuperado el 15 de Agosto de 2013, de Hidrogeología:tipos de acuíferos: <http://blog.pucp.edu.pe/media/3815/20110520-Tipos%20de%20acuiferos.pdf>
26. Jegat, H., Mora, L., Hernández, N., Alvarado, C., Massiah, D., & Terán, P. (2012). Evaluación de la recarga artificial del acuífero del Valle de Quíbor. *XI Congreso Latinoamericano de Hidrogeología* (pág. 168). Cartagena de Indias - Colombia: Memorias de congreso.
27. Larrea, M., Peña, D., & Bolivar, M. (s.f.). *Escuela Superior Politécnica del Litoral*. Recuperado el 10 de marzo de 2014, de DSpace: <http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16110/1/An%C3%A1lisis%20del%20Factor%20de%20Da%C3%B1o%20y%20Evaluaci%C3%B3n%20de%20los%20Tratamientos%20de%20Acidificaci%C3%B3n%20Realizado%20en%20el%20Campus%20AXY%20del%20Distrito%20Amaz%C3%B3nico.pdf>
28. Lesser y Asociados S.A de C.V. (1998). *Sistema Estatal del Información del Agua - SEIA*. Recuperado el enero de 2013, de Estudio Hidrológico y Matemático del Acuífero Silao-Romita: <http://seia.guanajuato.gob.mx/panel/document/phpver.php?Id=2889>
29. Miliarium. (s.f.). Recuperado el 8 de 8 de 2013, de <http://www.miliarium.com/proyectos/nitratos/diccionario/diccionario.asp>
30. Ministerio Del Ambiente, E. y. (12 de Junio de 2012). Acuerdo 60-2012. San José, Costa Rica: Ministerio Del Mambiente, Energía y Telecomunicaciones.
31. Mora, L. E. (2011). Datos de caudal para los últimos 5 años. Mérida- Venezuela.

32. Pachecho Ruiz, D. A., & Villegas Yépez, P. P. (2003). *Caracterización hidráulica del acuífero de Morroa utilizando pruebas de bombeo*. Sincelejo: Universidad de Sucre Facultad de Ingeniería .
33. Pannatier, Y. 1993. *MS - Windows programs for exploratory variography and variograms modeling in 2D*. International Workshop on Statistics of Spatial Processes. Theory and Applications. Bari. Italia.
34. Pierre, F., & Tirado, M. (2007). Interferencia del ENOS sobre la precipitación en la cuenca del río Yacambú y la depresión de Quíbor, Estado Lara, Venezuela. *Biagro* , 41-52 Riegos, H. y. (2007). <http://ocwus.us.es/>. Recuperado el 20 de marzo de 2014, de Cursos abiertos de la universidad de Sevilla: http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%207.%20Bombas/tutorial_07.htm
35. Rossman, L. A., & Martinez A, F. (. (30 de marzo de 2001). *epanet.info*. Recuperado el 10 de agosto de 2013, de epanet.info: http://epanet.info/wp-content/uploads/2012/10/epanet2_manual.pdf
36. Samper Clavete, F. J., & Carrera Ramírez, J. (1990). *Geoestadística Aplicaciones a la hidrogeología subterránea* . Barcelona: Centro Internacional de Métodos Numéricos en Ingeniería Universidad Politécnica de Catalunya.
37. SHYQ. (1995). *El uso del agua en el Valle de Quíbor. Sistema Hidráulico Yacambú-Quíbor*. Barquisimeto-Venezuela.
38. Torres, G. A. (1993). *Evaluación de los recursos de agua subterránea en el Valle de Quíbor, Estado Lara. Tesis M Sc*. Mérida: CIDIAT.
39. Tujchneider, O., Paris, M., D'Elía, M., & Pérez, M. (Abril de 2002). *Hidrored*. Recuperado el 30 de Julio de 2013, de Hidrogeología urbana: protección de pozos de abastecimiento en la gestión de los recursos hídricos subterráneos: <http://tierra.rediris.es/hidrored/ponencias/Ofelia1.html>
40. Uzcátegui, M. (2004). *Evaluación del Impacto de una Recarga Artificial sobre el Acuífero del Valle de Quíbor*. Tesis M. Sc. CIDIAT. Mérida- Venezuela.
41. Zinck, A. (1980). *Valles de Venezuela*. Caracas Venezuela: Lagoven.

ANEXOS A

MAPAS GENERADOS

Variables hidrológicas

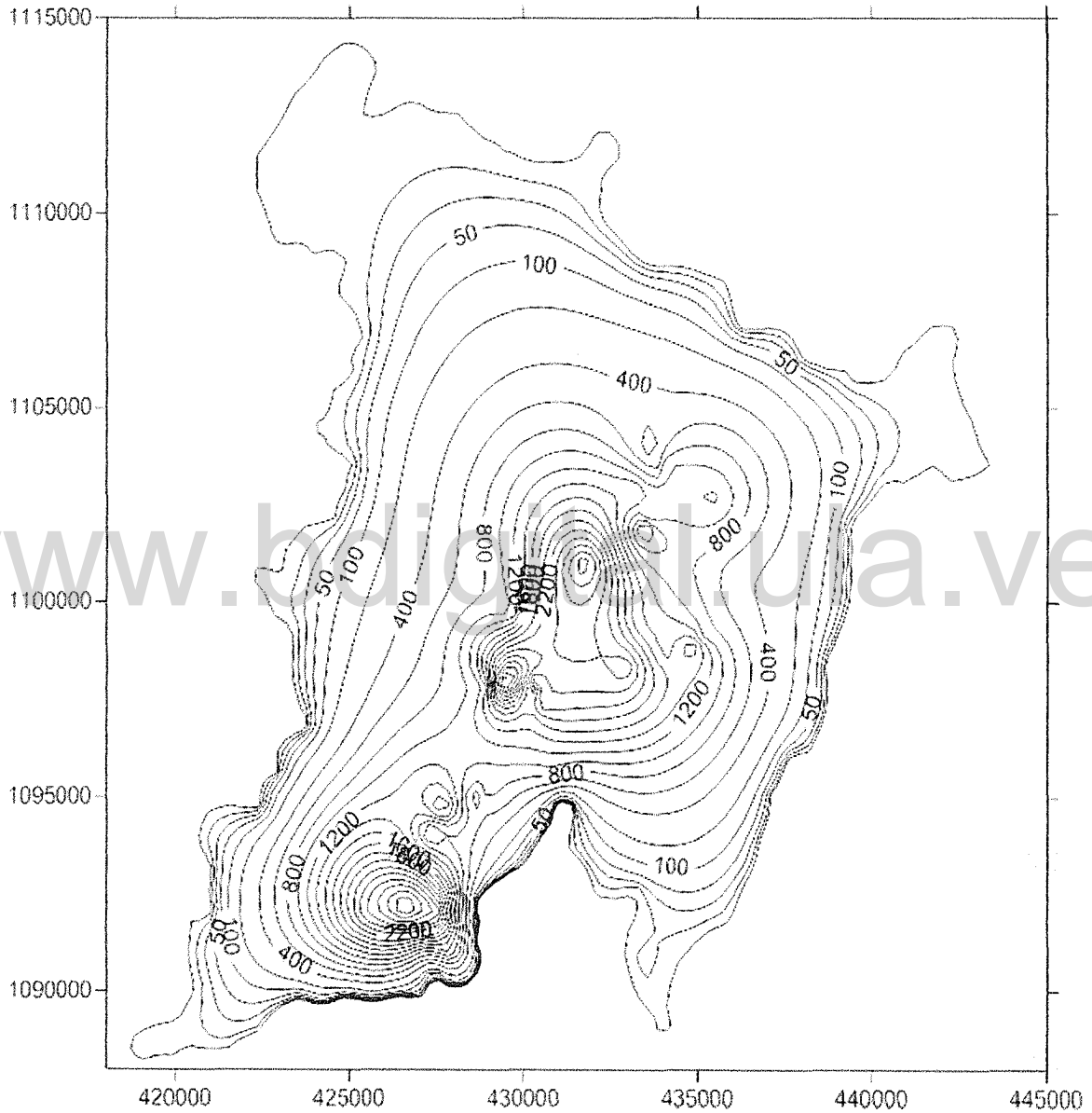


Figura A 1. Variable caudal - Q. Surfer 9.0

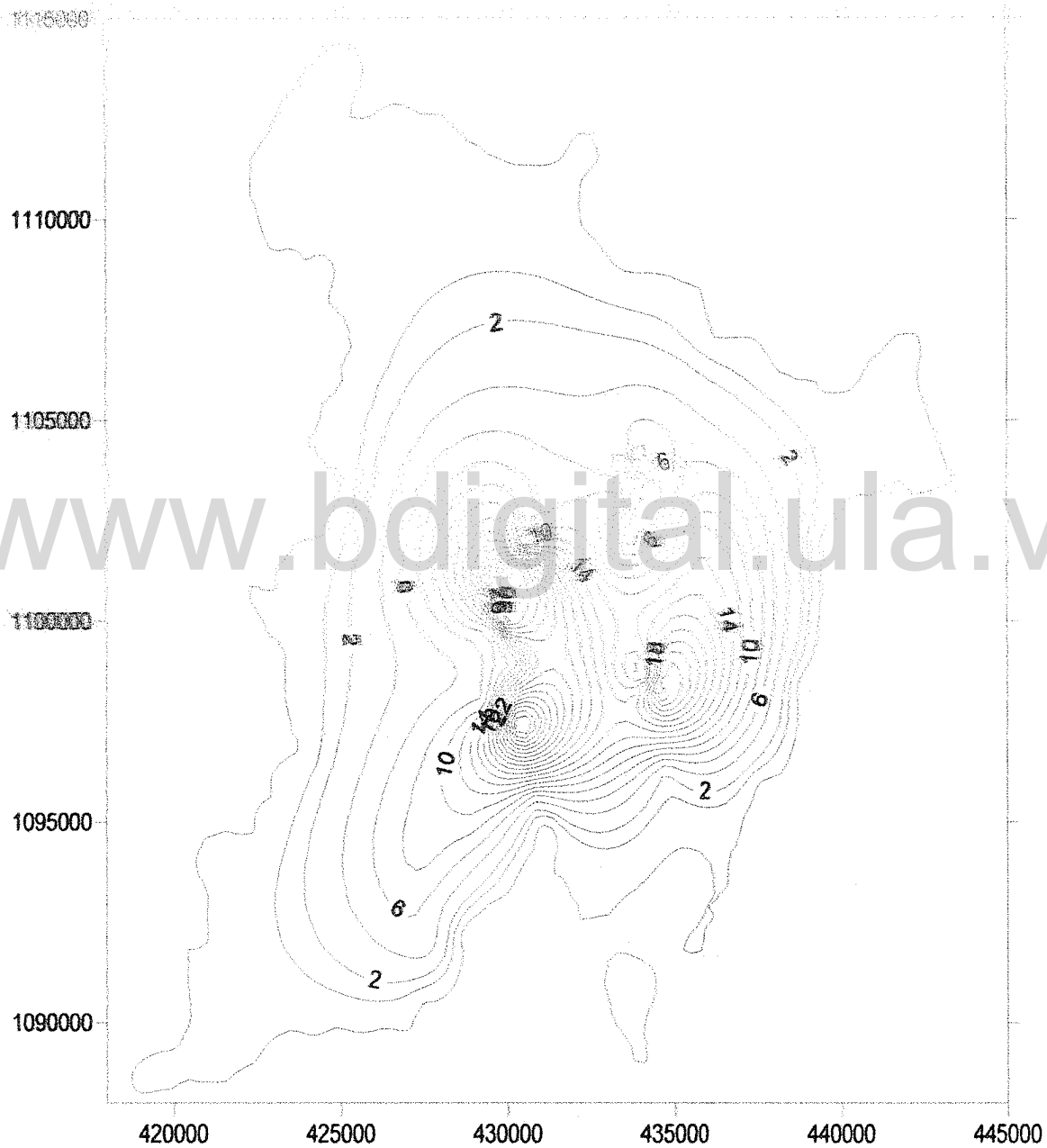


Figura A 2. Variable permeabilidad - k. Surfer 9.0

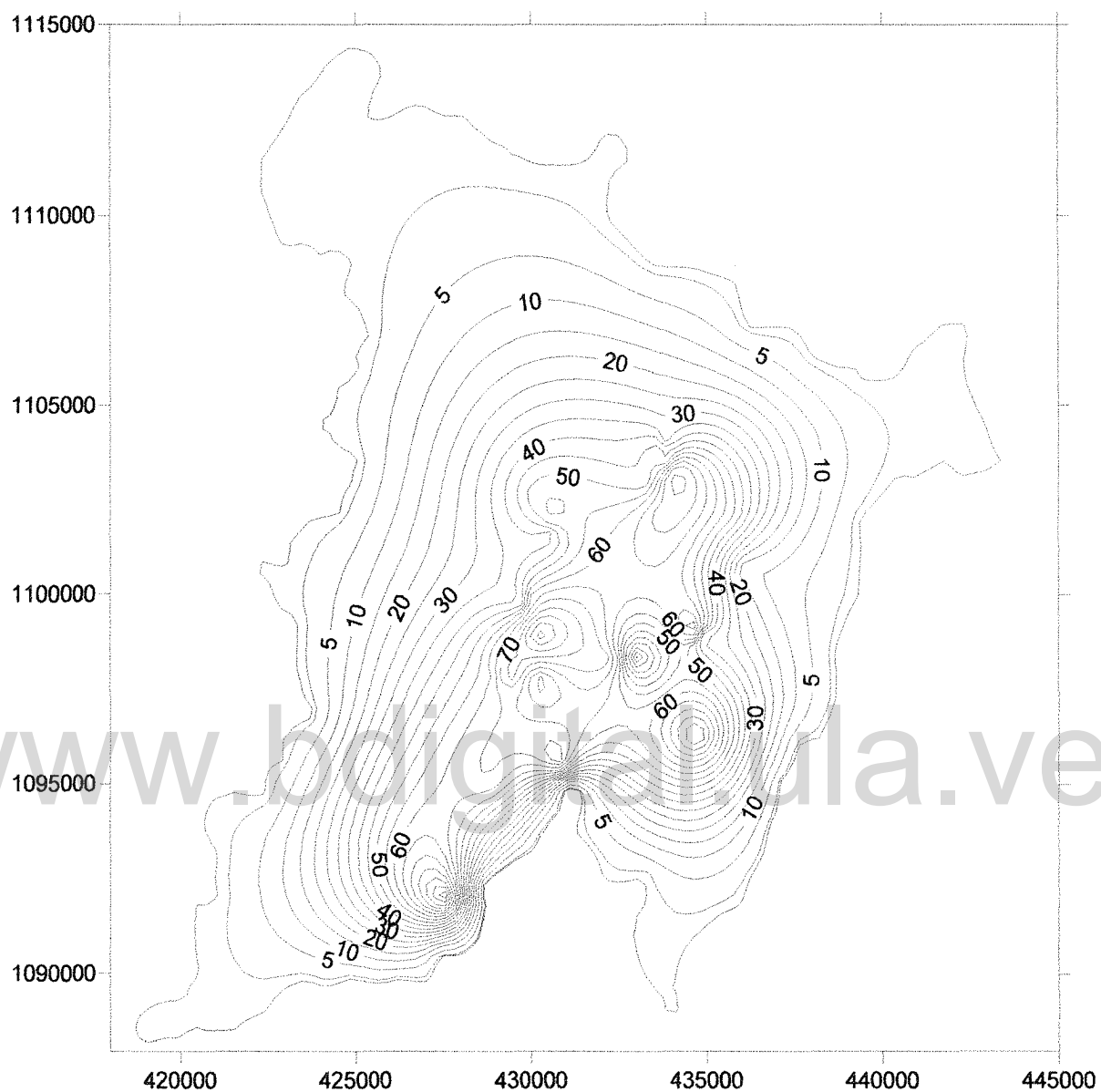


Figura A 3. Variable espesor saturado - b. Surfer 9.0

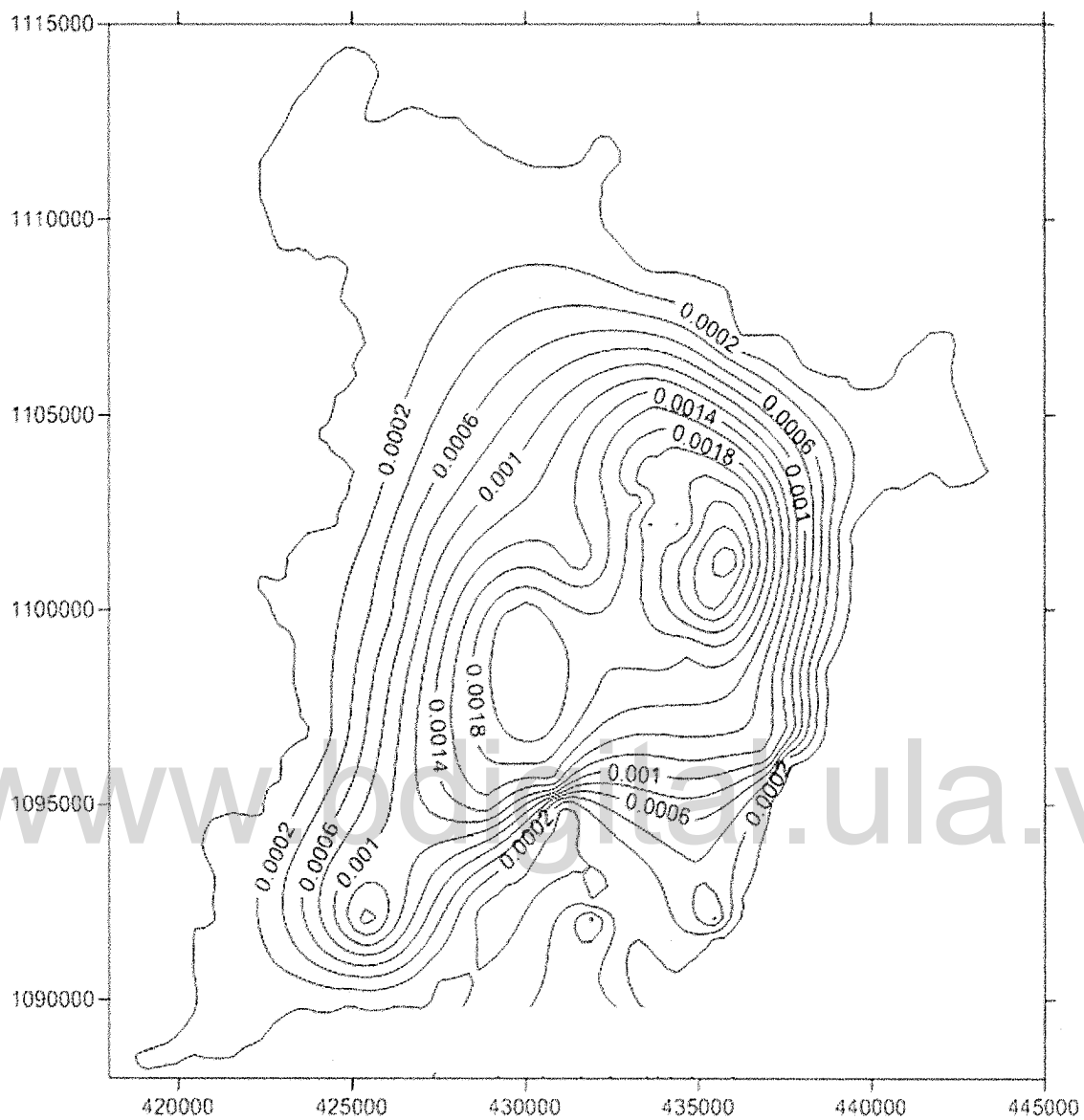


Figura A 4. Variable coeficiente de almacenamiento - S. Surfer 9.0

Radio de interferencia

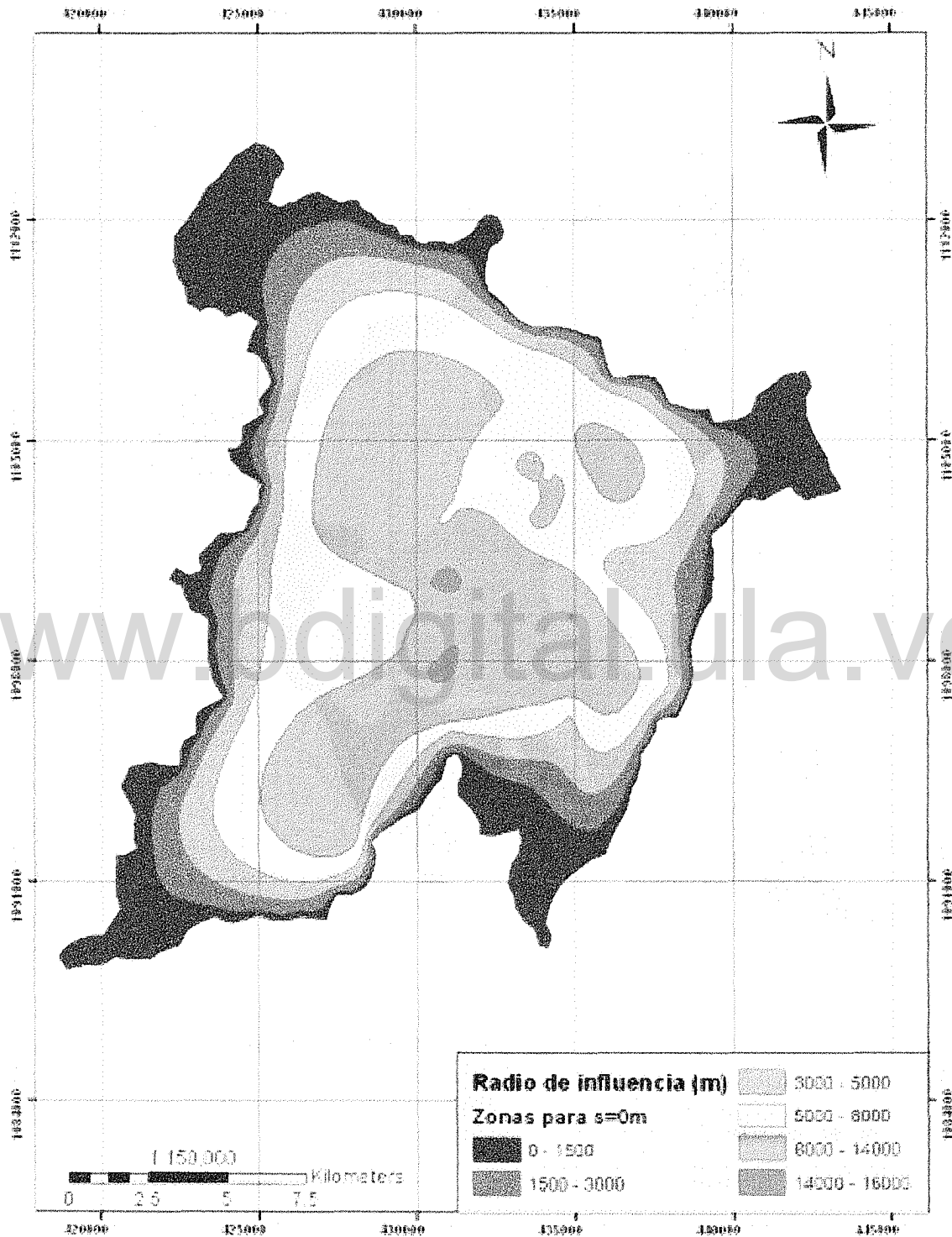


Figura A 5. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0m.

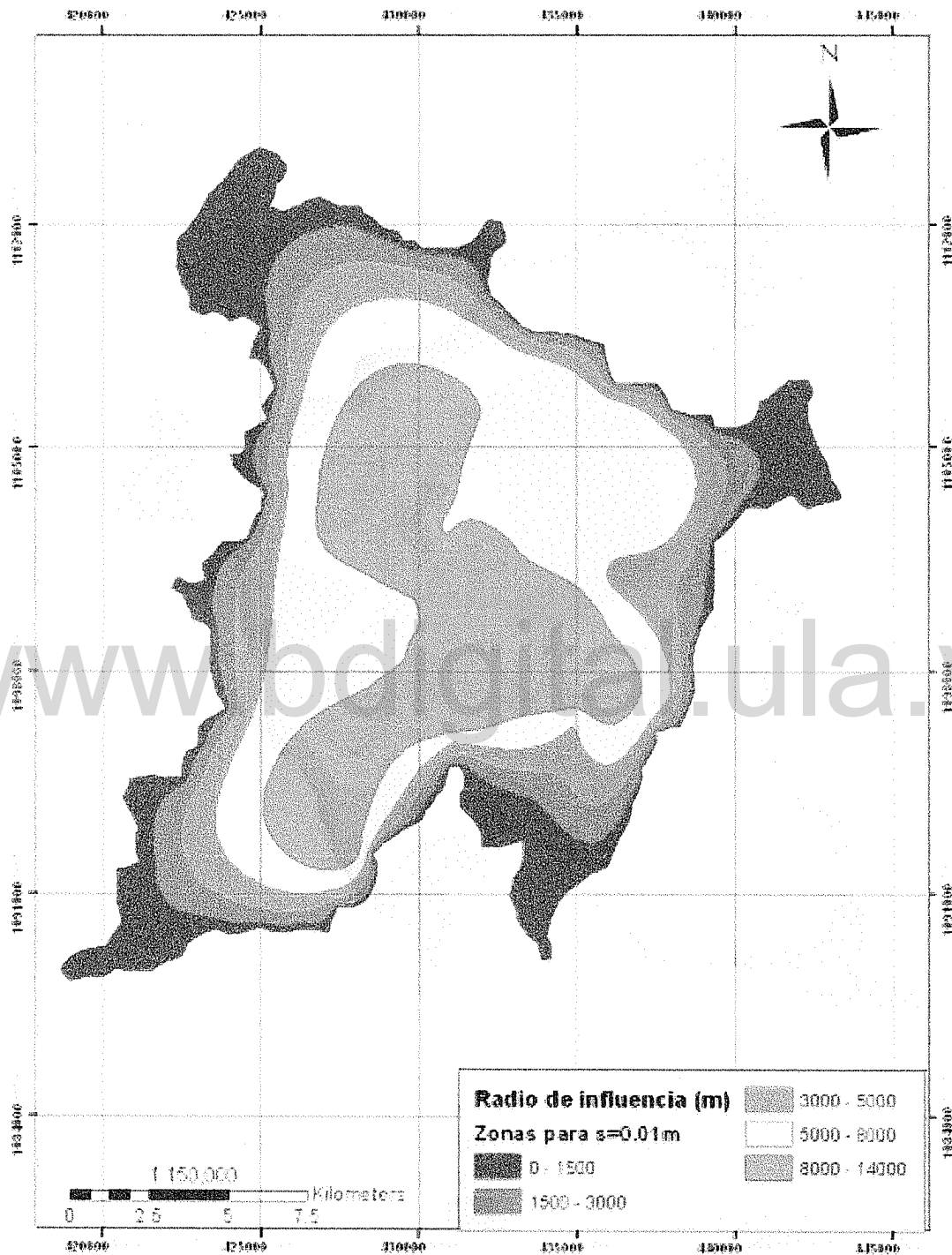


Figura A 6. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0.01m.

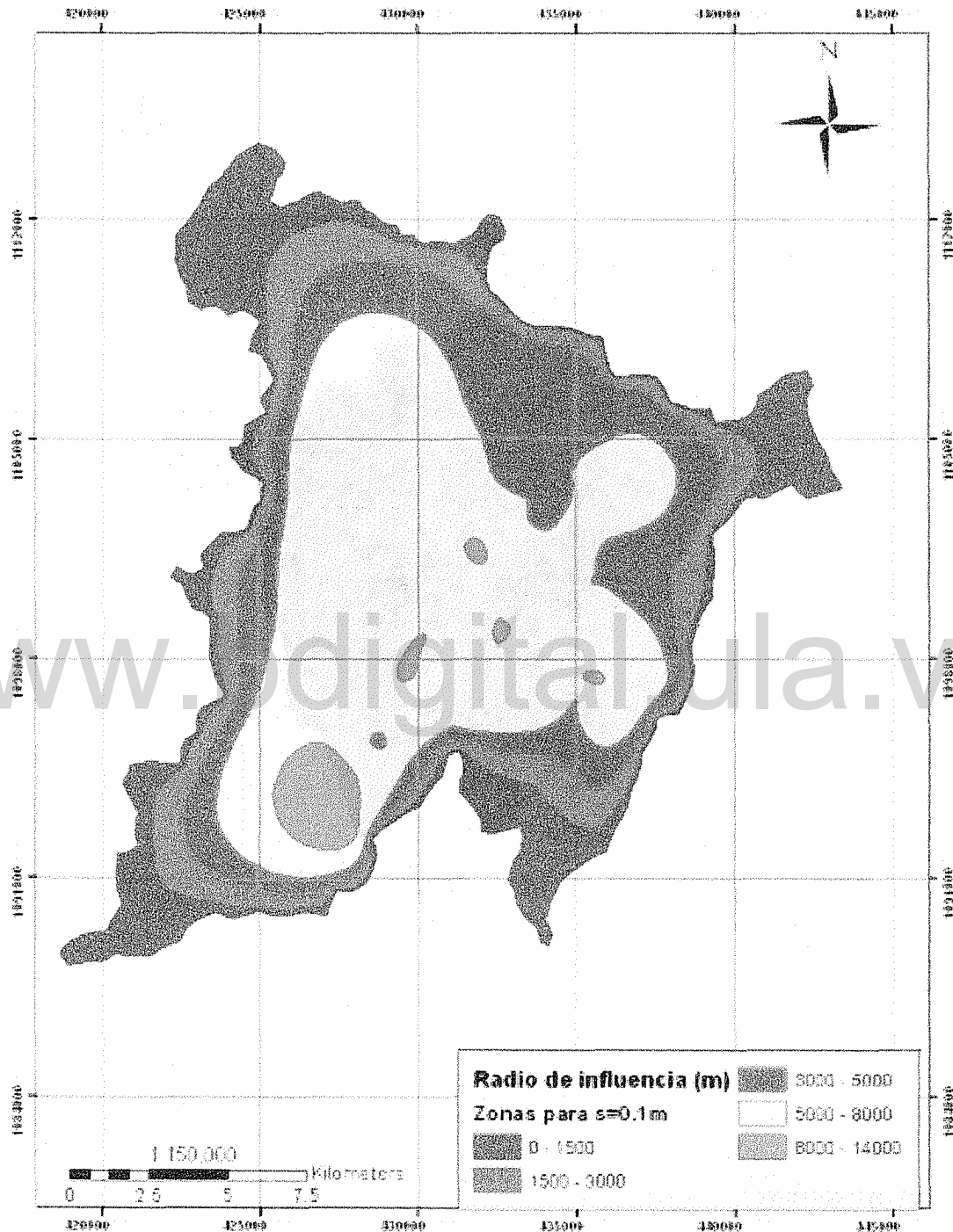


Figura A 7. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 0.1m.

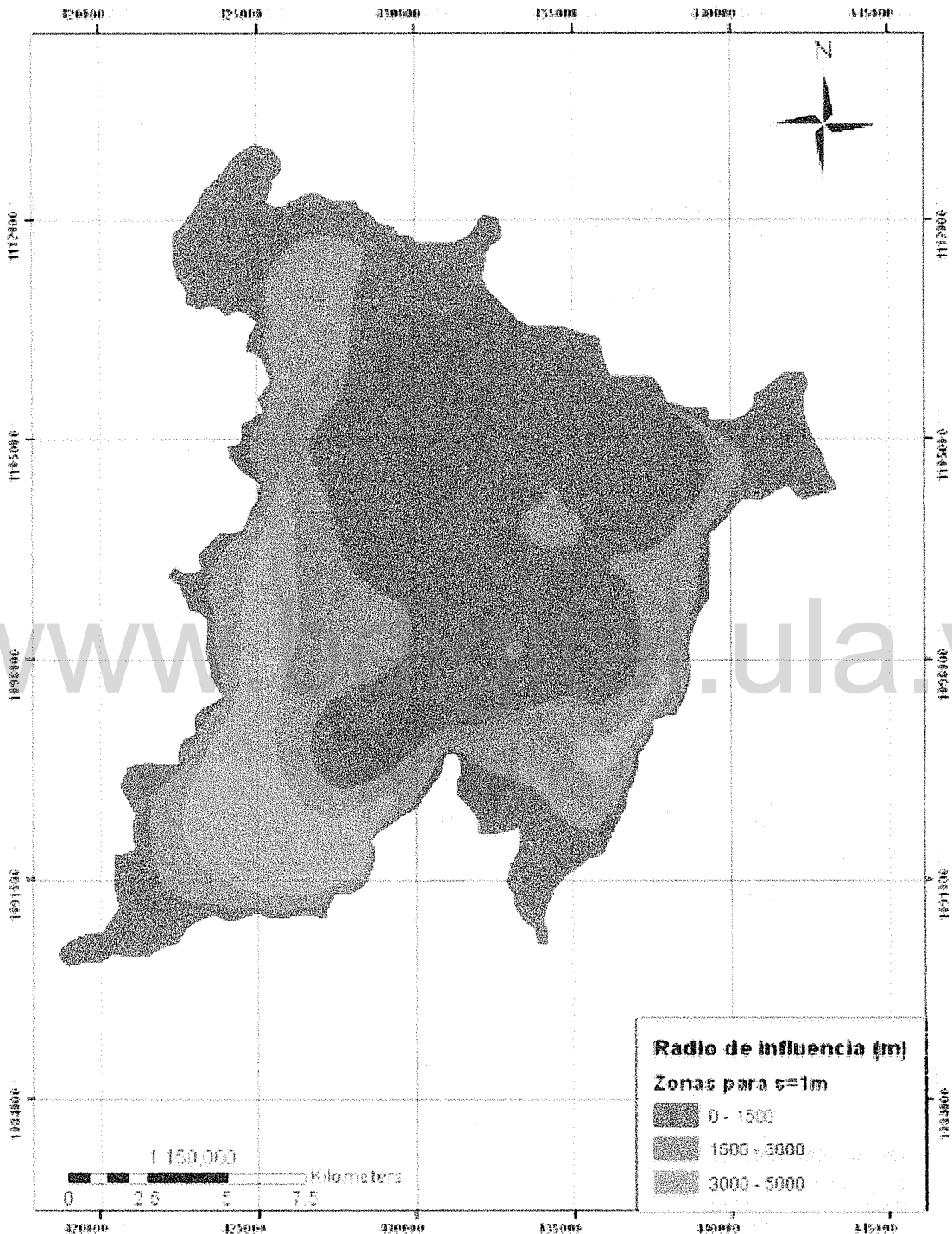


Figura A 8. Mapa de radio de interferencia para un abatimiento permisible 1m.

Potencias de bombeo.

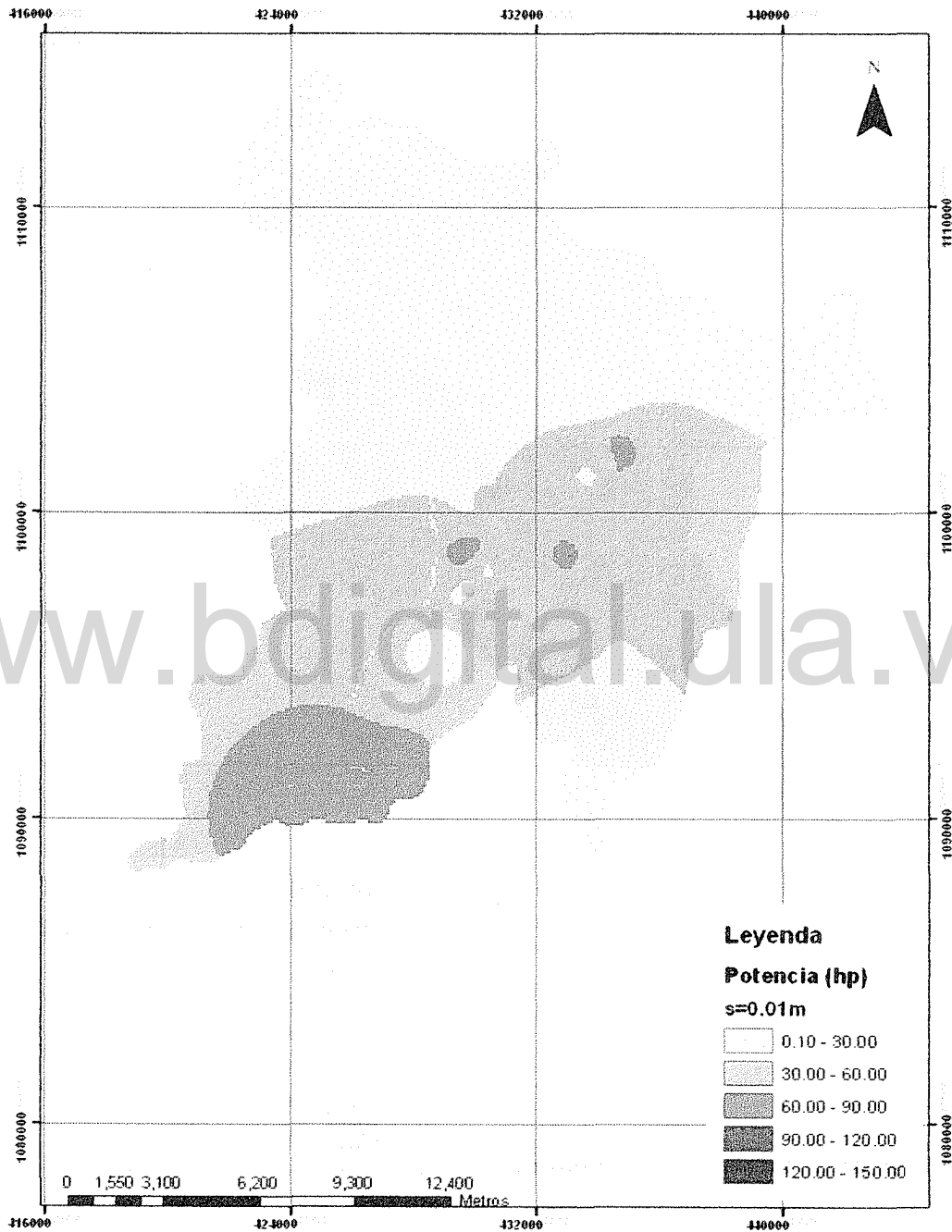


Figura A 9. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor y constante $s=0.01m$.

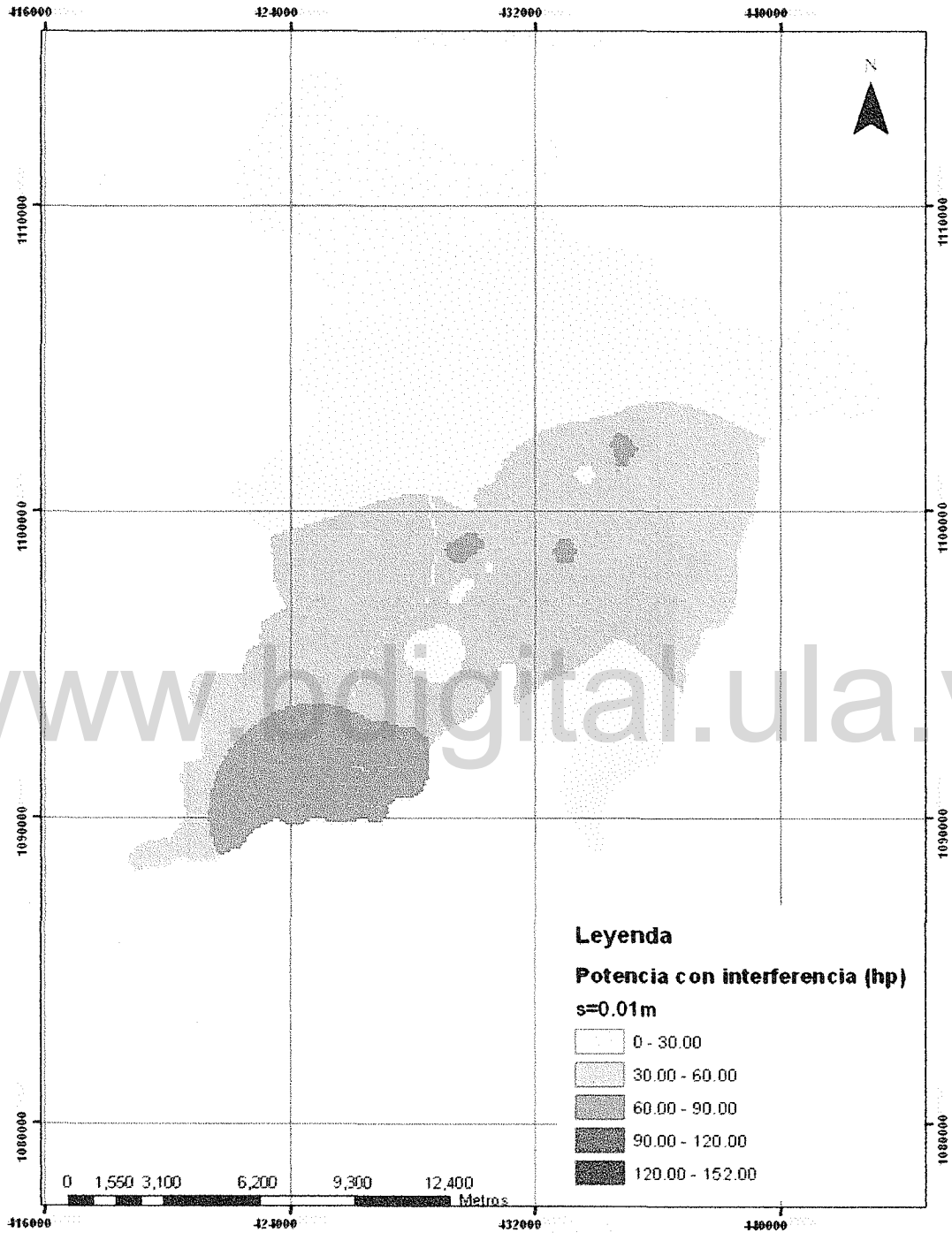


Figura A 10. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor con interferencia de 0.01m y constante $s=0.01m$.

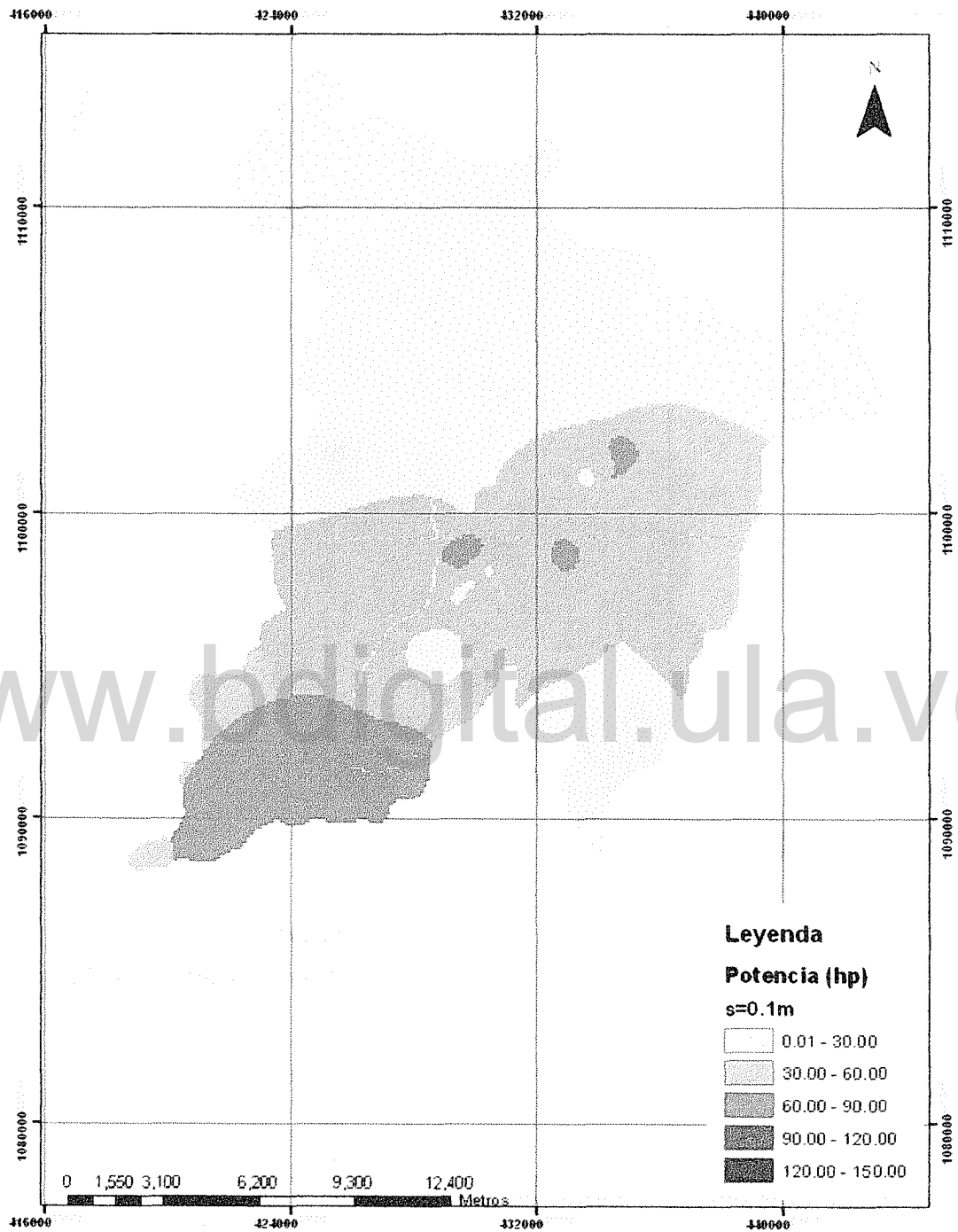


Figura A 11. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor y constante $s=0.1m$.

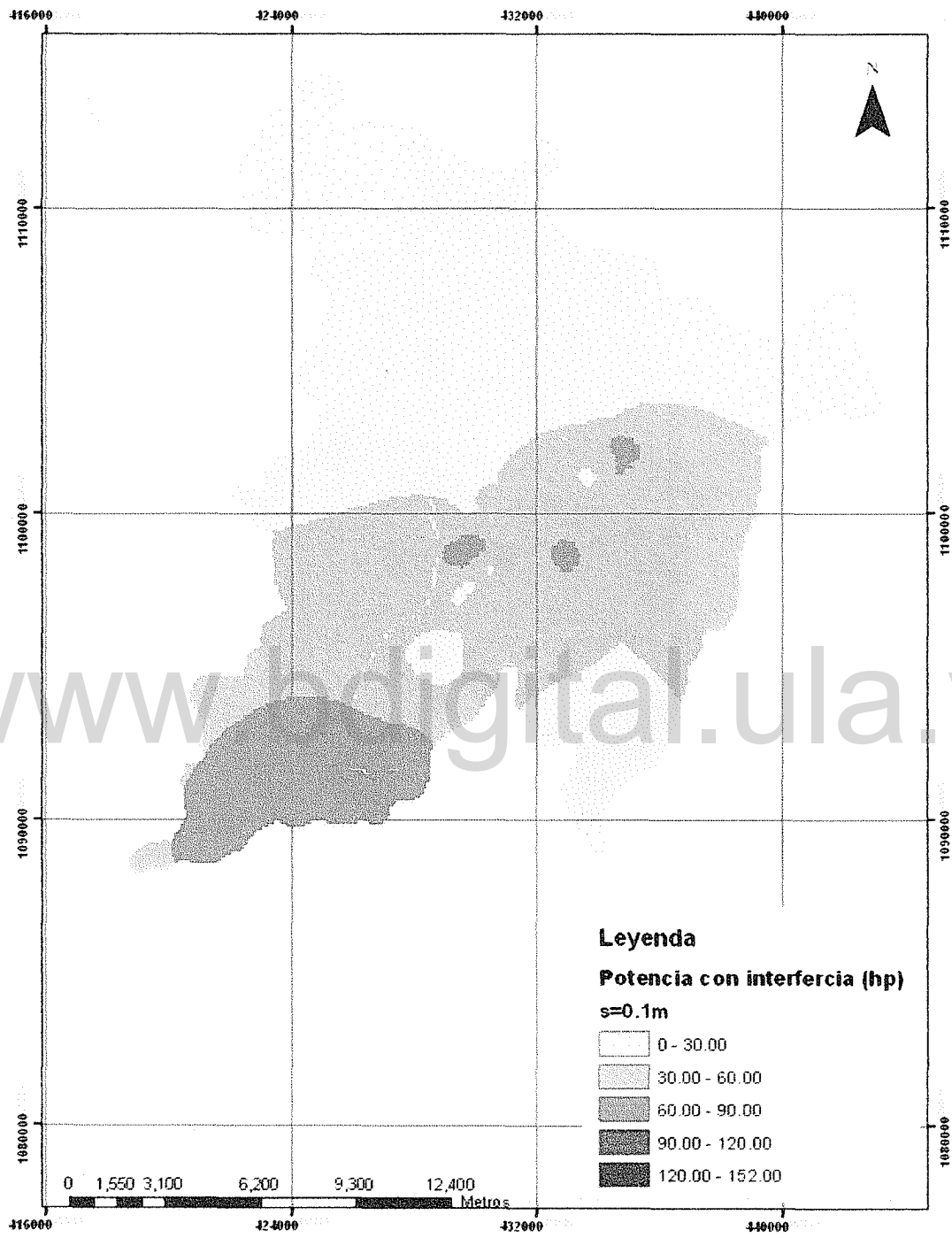


Figura A 12. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor con interferencia de 0.1m y constante2 = 0.1m.

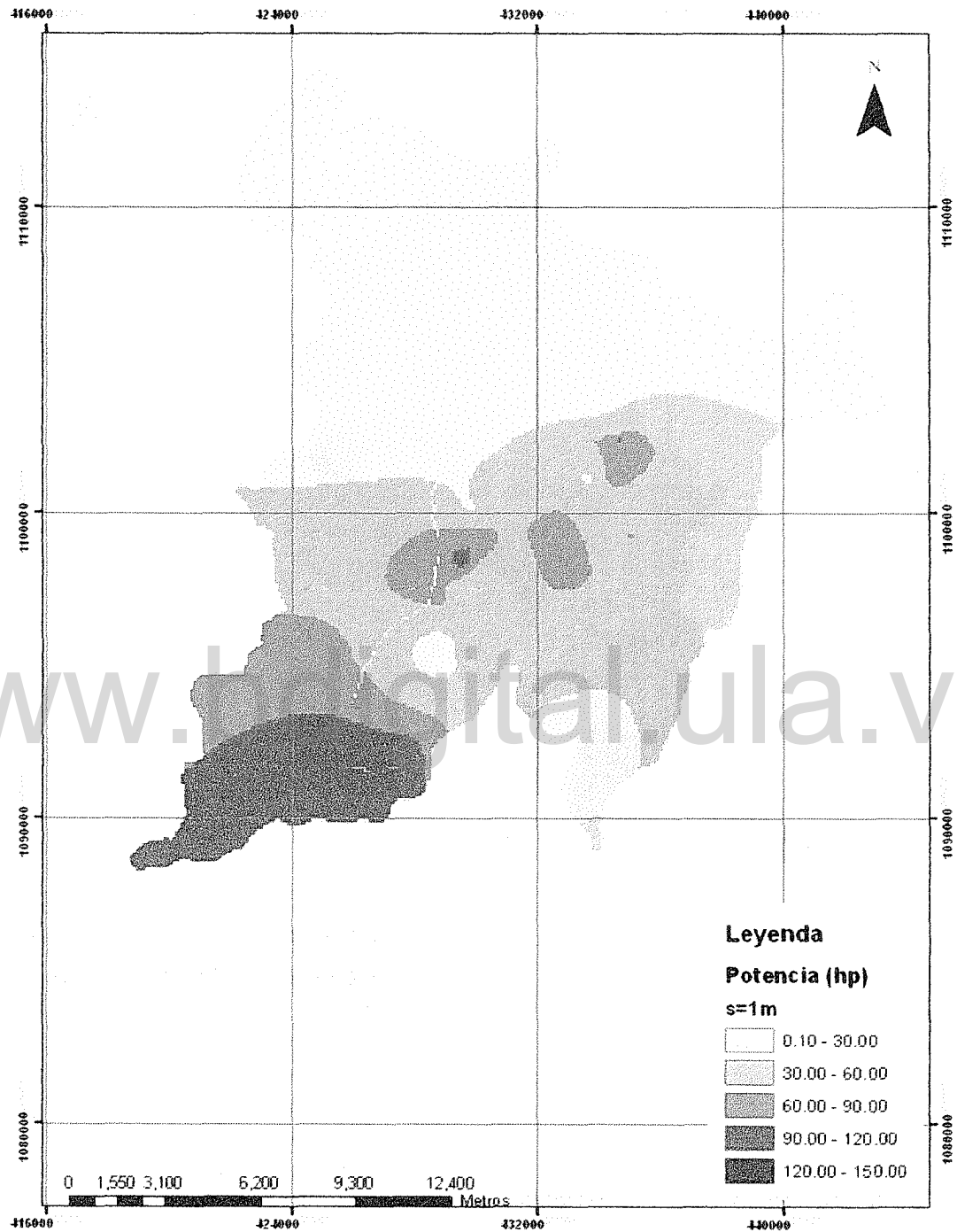


Figura A 13. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor y constante2 =1m.

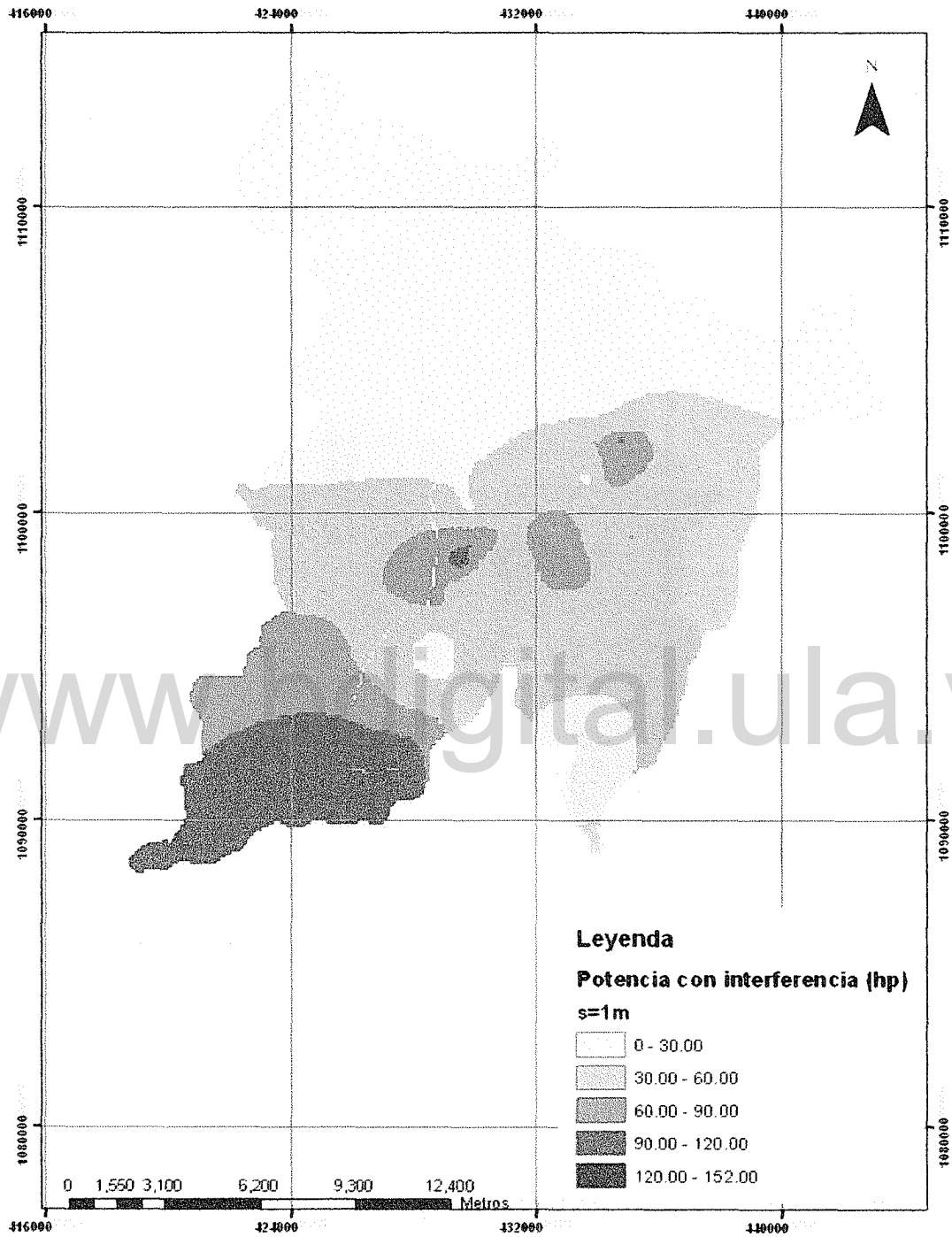


Figura A 14. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor con interferencia de 1m y constante2 =1m.

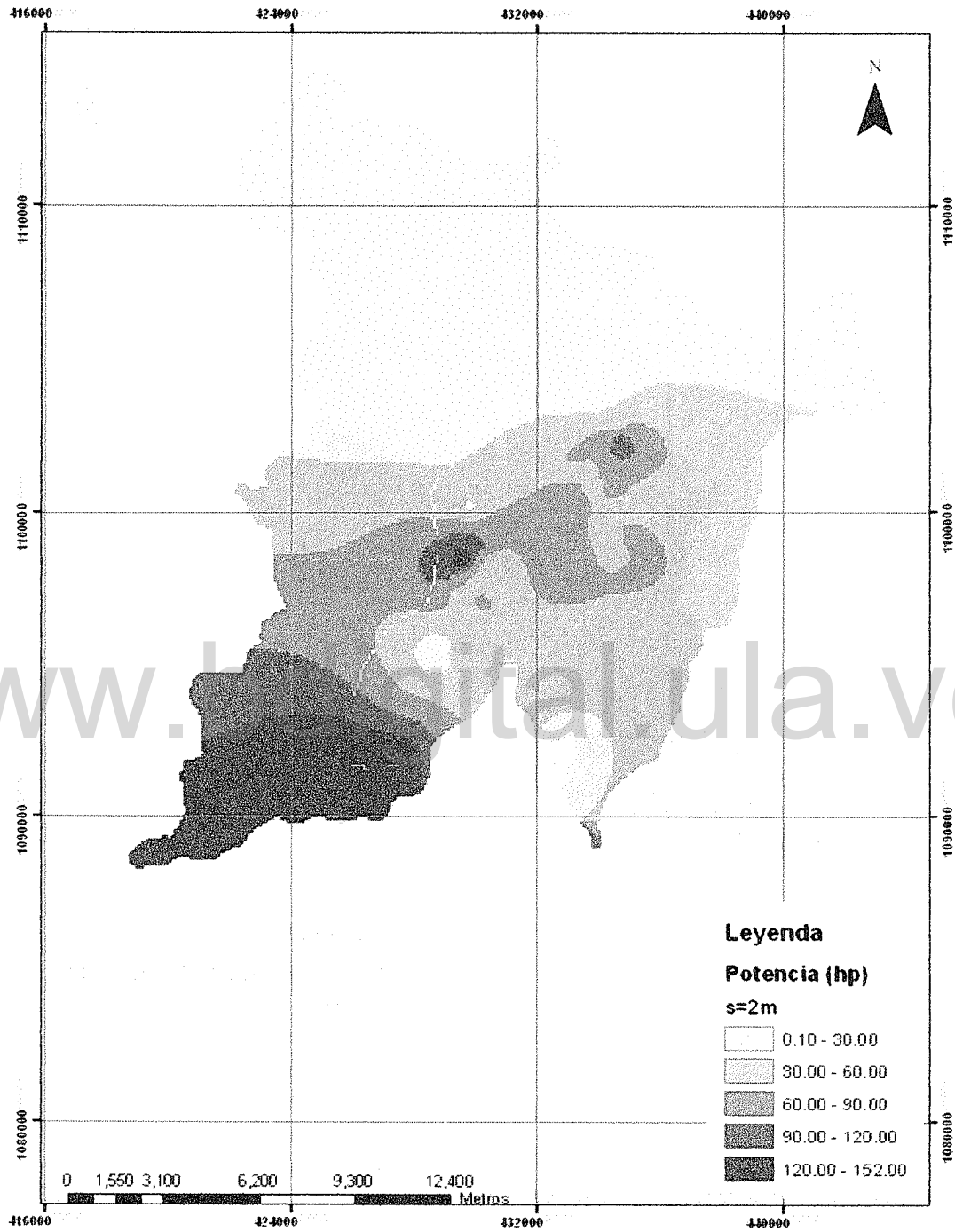


Figura A 15. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor y constante $s=2m$.

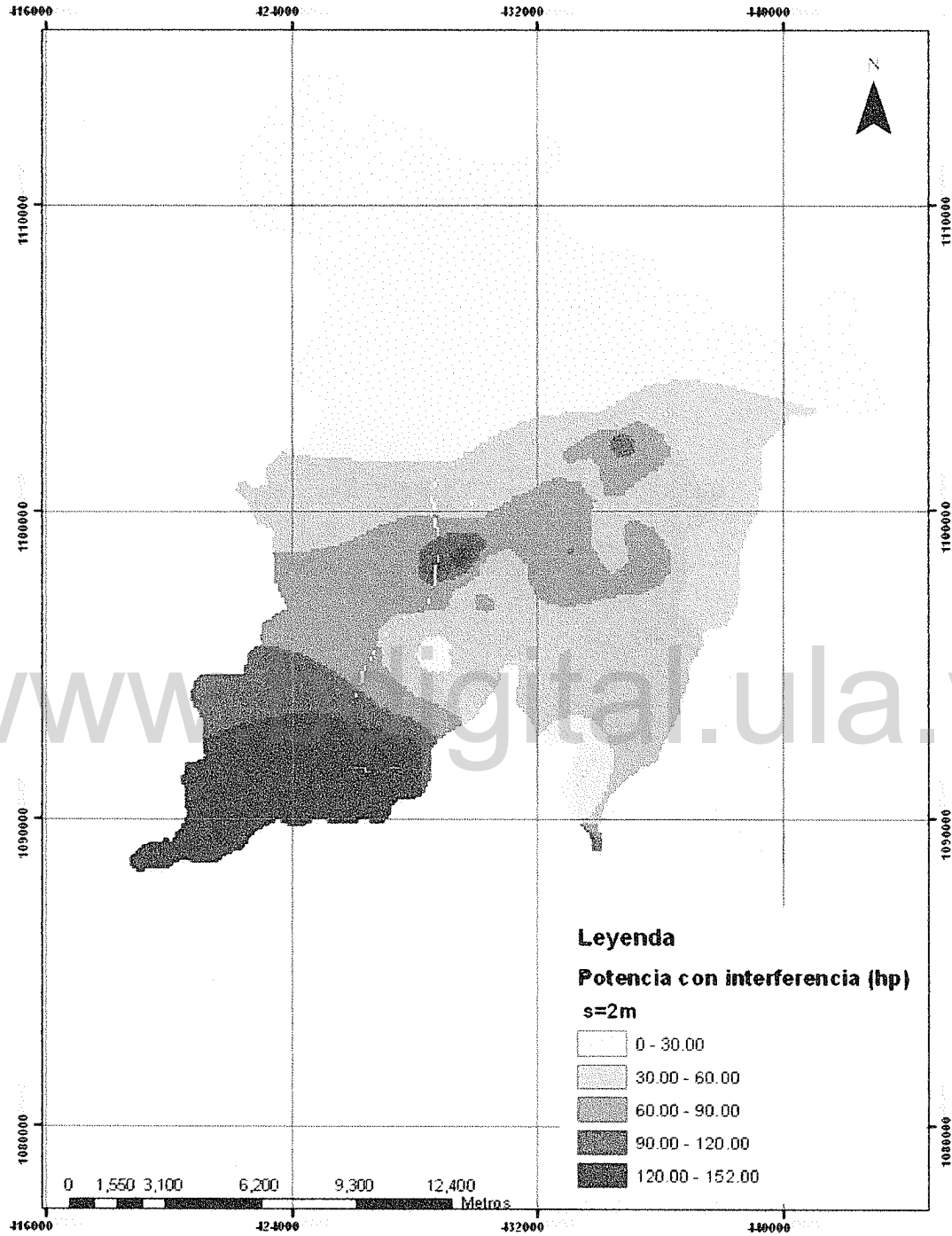


Figura A 16. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor con interferencia de 2m y constante $s=2m$.

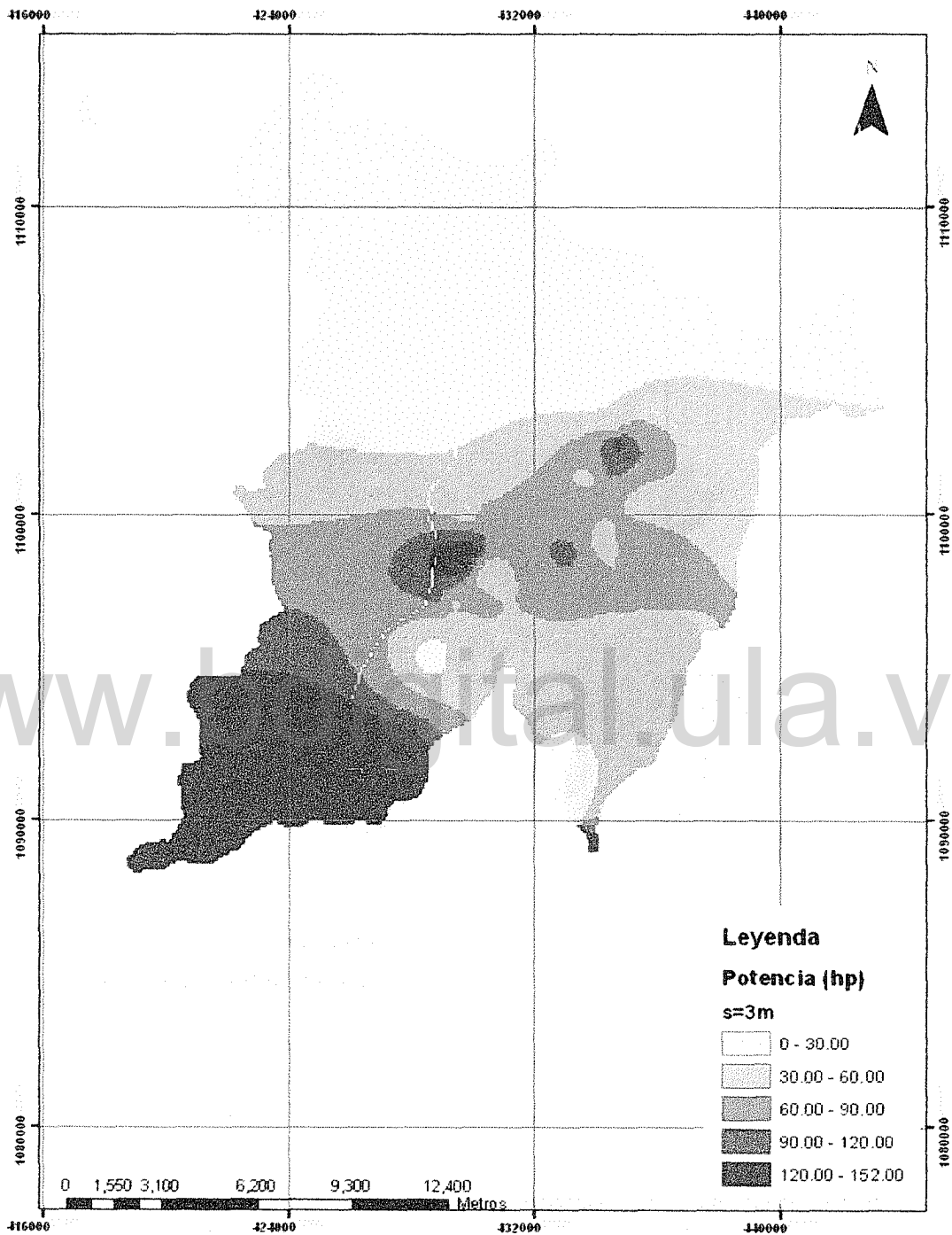


Figura A 17. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor y constante2 =3m.

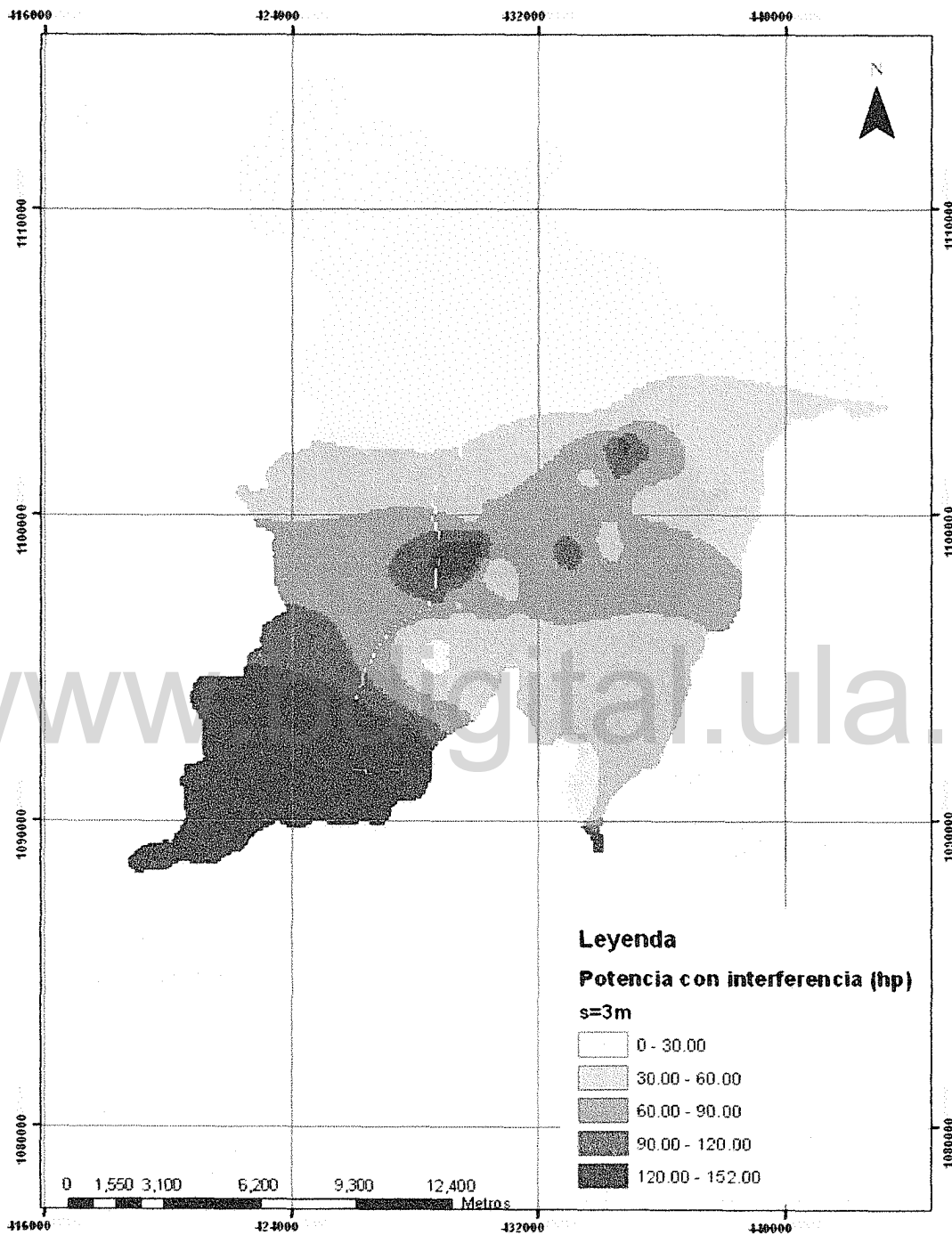


Figura A 18. Mapa de potencia de bombeo para el Valle de Quibor con interferencia de 3m y constante $\approx 3m$.

ANEXOS B

DATOS

Tabla B1. Parámetros hidráulicos evaluados para cada uno de los pozos seleccionados.

Pozos	Niveles (m)		Coordenadas - Regven		Prof. de roca correg.*	Abat. en pozo (m)	Espesor Sat. (m)	Caudal		Cap. específica	Transm. estimada (m ² /día)	Perm. estimada (m/día)	Fecha de prueba
	Estático (NE)	Dinámico (ND)	Este	Norte	PR	S = ND-NE	b = PR-NE	Q (L/s)	Q (m ³ /día)	CE (m ² /día)	CE*5.7973	T/b	
LA6070018A	101.00	122.00	430523.4812	1101585.711	138.00	21.00	37.00	40.40	3490.56	166.22	963.51	26.04	2008
LA6070043A	121.00	125.00	434681.4753	1099011.725	200.00	4.00	79.00	16.20	1399.68	349.92	2028.48	25.68	2008
LA6070074A	90.00	125.00	434115.4688	1103419.713	163.00	35.00	73.00	11.70	1010.88	28.88	167.54	2.30	2008
LA6070075A	100.00	125.00	434072.4688	1103484.713	162.00	25.00	62.00	13.30	1149.12	45.96	266.68	4.30	2008
LA6070137A	117.00	137.00	428876.4921	1097866.718	176.00	20.00	59.00	20.00	1728.00	86.40	500.89	8.49	2008
LA6070160A	135.00	140.00	434581.4771	1098165.727	187.00	5.00	52.00	16.00	1382.40	276.48	1602.95	30.83	2008
LA6070161A	90.00	125.00	433930.4698	1103125.714	166.00	35.00	76.00	8.00	691.20	19.75	114.21	1.50	2008
LA6070163A	81.16	117.00	427367.5028	1094114.724	144.00	35.85	62.85	60.00	5184.00	144.62	812.20	12.92	2008
LA6070029A	108.00	115.00	429854.4865	1099899.715	167.00	7.00	59.00	27.60	2384.64	340.66	1975.14	33.48	2008
LA6070030A	100.00	102.00	429746.5296	1099853.774	162.00	2.00	62.00	22.00	1900.80	950.40	918.29	14.81	2008
LA6070036A	109.00	130.00	433828.4923	1104077.744	142.00	21.00	33.00	13.30	1149.12	54.72	317.11	9.61	2008
LA6070118A	45.00	85.00	427057.4894	1101849.704	125.00	40.00	80.00	5.00	432.00	10.80	62.61	0.78	2008
LA6070121A	91.00	106.00	430119.4803	1102609.708	145.00	15.00	54.00	21.00	1814.40	120.96	701.47	12.99	2008
LA6070135A	90.00	159.00	434719.4802	1096289.732	179.00	69.00	89.00	24.20	2090.88	30.30	175.66	1.97	2008
LA6070136A	105.00	163.00	430812.49	1095507.73	179.00	58.00	74.00	27.60	2384.64	41.11	238.27	3.22	2008

Tabla B1. Parámetros hidráulicos evaluados para cada uno de los pozos seleccionados.

Pozos	Niveles (m)		Coordenadas - Regven		Prof. de roca correg.*	Abat. en pozo (m)	Espesor Sat. (m)	Caudal		Cap. específica	Transm. estimada (m ² /día)	Perm. estimada (m/día)	Fecha de prueba
	Estático (NE)	Dinámico (ND)	Este	Norte	PR	S = ND-NE	b = PR-NE	Q (L/s)	Q (m ³ /día)	CE (m ² /día)	CE*5.7973	T/b	
LA6070138A	95.00	137.00	429373.4907	1097927.718	176.00	42.00	81.00	60.00	5184.00	123.43	715.39	8.83	2008
LA6070140A	129.00	139.00	432340.4826	1098272.723	200.00	10.00	71.00	30.00	2592.00	259.20	1502.66	21.16	2008
LA6070141A	104.00	121.00	430214.4824	1101346.711	142.00	17.00	38.00	40.00	3456.00	203.29	1178.59	31.02	2008
LA6070142A	86.00	120.00	430565.4803	1102014.71	142.00	34.00	56.00	24.00	2073.60	60.99	353.64	6.31	2008
LA6070147A	90.00	117.00	430215.4867	1098987.717	185.00	27.00	95.00	61.00	5270.40	195.20	1131.63	11.91	2008
LA6070148A	60.00	124.00	433452.4732	1101924.716	163.00	64.00	103.00	6.00	518.40	8.10	46.96	0.46	2008
LA6070149A	55.00	124.00	433599.4725	1102114.716	128.00	69.00	73.00	20.00	1728.00	25.04	144.93	1.99	2008
LA6070150A	105.00	134.00	433628.4691	1103936.711	154.00	29.00	49.00	4.00	345.60	11.92	68.99	1.41	2008
LA6070155A	135.00	140.00	435784.4671	1102055.72	185.00	5.00	50.00	7.00	604.80	120.96	701.47	14.03	2008
LA6070156A	139.39	157.00	434047.4774	1098736.725	200.00	17.61	60.61	24.00	2073.60	117.75	445.23	7.35	2008
LA6070030A	110.00	114.00	429762.000	1099853.000	146.00	4.00	36.00	11.51	994.46	248.62	1441.30	40.04	2011
LA6070139A	144.00	146.00	432942.4809	1098347.724	161.00	2.00	17.00	20.81	1797.98	898.99	5211.73	306.57	2011
LA6070181A	113.65	146.00	433263.4723	1102941.713	161.00	32.35	47.35	12.00	1036.80	32.05	193.89	4.09	2011
LA6071007A	62.00	146.00	425445.5116	1092027.726	161.00	84.00	99.00	20.73	1791.07	21.32	123.61	1.25	2011
LA6070063A	116.00	123.00	431330.4794	1101460.713	138.00	7.00	22.00	22.88	1976.83	282.40	1637.18	74.42	2011
LA6070143A	144.04	149.76	430397.4892	1097357.722	198.42	5.72	54.38	26.59	2297.38	401.64	2328.42	42.82	2008
LA6070177A	158.00	170.14	434823.4752	1098872.726	190.20	12.14	32.20	20.58	1778.11	146.47	849.11	26.37	2008
LA6070178A	149.20	158.60	436021.469	1100676.724	159.91	9.40	10.71	3.12	269.57	28.68	166.25	15.52	2008
LA6070122A	112.24	121.80	428892.4973	1095003.725	176.10	9.56	63.86	11.60	1002.24	104.84	607.77	9.52	2008

Tabla B1. Parámetros hidráulicos evaluados para cada uno de los pozos seleccionados.

Pozos	Niveles (m)		Coordenadas - Regven		Prof. de roca correg.*	Abat. en pozo (m)	Espesor Sat. (m)	Caudal		Cap. específica	Transm. estimada (m ² /día)	Perm. estimada (m/día)	Fecha de prueba
	Estático (NE)	Dinámico (ND)	Este	Norte	PR	S = ND-NE	b = PR-NE	Q (L/s)	Q (m ³ /día)	CE (m ² /día)	CE*5.7973	T/b	
LA6070145A	136.72	140.62	430194.4889	1097792.72	188.74	3.90	52.02	13.85	1196.64	306.83	1778.79	34.19	2008
LA6170083A	16.72	18.12	437986.450	1109056.71	33.62	1.40	16.90	4.26	368.06	262.90	1524.13	90.19	2008
LA6070156A	148.78	167.04	434258.000	1099101.000	200.07	18.26	51.29	18.29	1580.26	86.54	501.71	9.78	2008
LA6070163A	82.31	89.74	427578.000	1094479.000	144.22	7.43	61.91	4.76	411.26	55.35	320.89	5.18	2008
LA6070181A	112.70	134.92	433474.000	1103306.000	149.64	22.22	36.94	16.55	1429.92	64.35	373.07	10.10	2008
LA6070171A	115.04	123.92	433944.4692	1103472.713	160.10	8.88	45.06	5.48	473.47	53.32	309.11	6.86	2008
LA6070180A	114.92	125.02	433972.4691	1103480.713	160.07	10.10	45.15	9.20	794.88	78.70	456.25	10.11	2008
LA6070183A	81.22	116.48	427563.5068	1092011.731	178.84	35.26	97.62	39.75	3434.40	97.40	564.67	5.78	2008

Tabla B2: Pozos con información de caudal Campañas de 2005-2009

Pozos	Este-Reg	Norte-Reg	Caudal (l/s)	Q (m3/día)
LA6070182A	427145.16	1091007.03	9.89	854.50
LA6070183A	427563.51	1092011.73	34.47	2977.78
LA6070199A	427903.51	1091000.73	14.18	1225.15
LA6071007A	425445.51	1092027.73	32.09	2772.66
LA6071037A	426614.51	1092198.73	43.09	3722.63
LA6070122A	428911.14	1095009.03	10.02	865.64
LA6070163A	427367.50	1094114.72	4.51	389.66
LA6070195A	428630.50	1095008.73	4.32	373.39
LA6070210	427673.50	1094704.72	22.38	1933.63
LA6070029A	429854.49	1099899.72	18.19	1571.79
LA6070030A	429746.53	1099853.77	9.78	845.08
LA6070034A	430508.13	1097706.04	24.57	2122.85
LA6070137A	428895.13	1097872.03	13.95	1205.28
LA6070138A	429373.49	1097927.72	43.49	3757.10
LA6070143A	430436.10	1097369.74	24.66	2130.97
LA6070144A	430243.13	1097133.04	16.99	1467.85
LA6070145A	430194.49	1097792.72	13.55	1170.81
LA6070207	429913.49	1098097.72	35.21	3042.43
LA6070170A	430043.48	1100928.71	16.05	1386.29
LA6070036A	433828.47	1104077.71	4.76	410.98
LA6070065A	431754.38	1101013.82	37.50	3240.00
LA6070090B	433282.10	1102947.05	14.38	1242.43
LA6070111A	435177.47	1099191.73	10.92	943.49

Tabla B2: Pozos con información de caudal Campañas de 2005-2009

Pozos	Este-Reg	Norte-Reg	Caudal (l/s)	Q (m3/día)
LA6070130A	433236.12	1099479.05	17.05	1473.12
LA6070139A	432942.48	1098347.72	30.05	2596.18
LA6070140A	432340.48	1098272.72	27.29	2357.42
LA6070148A	433452.47	1101924.72	2.05	177.12
LA6070149A	433618.11	1102120.05	12.71	1098.14
LA6070150A	433628.47	1103936.71	3.16	273.02
LA6070150A	433628.47	1103936.71	3.64	314.50
LA6070156A	434047.48	1098736.72	14.73	1272.89
LA6070171A	433963.10	1103478.05	5.98	516.93
LA6070177A	434842.12	1098878.06	20.64	1783.30
LA6070180A	433991.10	1103486.05	12.10	1045.44
LA6070181A	433263.47	1102941.71	16.72	1444.95
LA6170010A	433687.47	1105345.71	5.00	432.00
LA6070154A	435467.47	1102664.72	14.58	1259.71
LA6070178A	436021.47	1100676.72	5.34	461.72
LA6070136A	430851.12	1095519.74	9.76	843.26

Tomado de: Mora, L,s/a.

Tabla B 3. Coeficiente de almacenamiento St para cada pozo analizado dentro del acuífero de Quíbor. Los pozos sombreados en verde corresponden a aquellos que se les determinó el coeficiente de almacenamiento por otra metodología en la campaña de 2011.

Pozo	Este-Reg	Norte-Reg	St	Tipo de acuífero	Fuente
RAttr1	432727.7	1088469.75	0.00080572	Confinado	Modflow
RAttr1(2)	432981.899	1088465.75	0.00113863	SemiConfinado	Modflow
RAttr1(3)	433228.341	1088506.81	0.00110716	SemiConfinado	Modflow
RAttr1(4)	433515.801	1088465.75	0.00073005	Confinado	Modflow
RLG3(3)	436993.177	1096144.74	0.00104627	SemiConfinado	Modflow
RLG3(4)	437228.498	1096392.77	0.00101027	SemiConfinado	Modflow
RLG3(5)	437691.172	1096937.74	0.00091983	Confinado	Modflow
1 b	429854.486	1099899.71	0.0021856	SemiConfinado	Modflow
2 b	429746.486	1099853.71	0.0021856	SemiConfinado	Modflow
3 b	435260.466	1103410.72	0.00223369	SemiConfinado	Modflow
4 b	435447.467	1102872.72	0.00229895	SemiConfinado	Modflow
5 b	436396.464	1102872.72	0.00220506	SemiConfinado	Modflow
6 b	436021.469	1100956.72	0.00271274	SemiConfinado	Modflow
7 b	435916.468	1101198.72	0.00299728	SemiConfinado	Modflow
8 b	432340.483	1098272.72	0.00177879	SemiConfinado	Modflow
9 b	432942.481	1098347.72	0.00177848	SemiConfinado	Modflow
10 b	433217.478	1099473.72	0.00191265	SemiConfinado	Modflow
11 b	430397.489	1097357.72	0.00218648	SemiConfinado	Modflow
12 b	430489.488	1097700.72	0.00211386	SemiConfinado	Modflow
13 b	430194.489	1097792.72	0.00211263	SemiConfinado	Modflow
14 b	429869.489	1098436.72	0.00221451	SemiConfinado	Modflow
15 b	429373.491	1097927.72	0.00209076	SemiConfinado	Modflow

Tabla B 3. Coeficiente de almacenamiento St para cada pozo analizado dentro del acuífero de Quibor. Los pozos sombreados en verde corresponden a aquellos que se les determinó el coeficiente de almacenamiento por otra metodología en la campaña de 2011.

Pozo	Este-Reg	Norte-Reg	St	Tipo de acuífero	Fuente
16 b	428892.497	1095003.72	0.00155405	SemiConfinado	Modflow
17 b	430812.492	1095507.73	0.00153454	SemiConfinado	Modflow
18 b	435445.486	1092027.74	0.0006655	Confinado	Modflow
19 b	431330.479	1101460.71	0.00134866	SemiConfinado	Modflow
20 b	431542.479	1101325.71	0.00123537	SemiConfinado	Modflow
21 b	433235.472	1103058.71	0.0020169	SemiConfinado	Modflow
22 b	433599.473	1102114.72	0.00229552	SemiConfinado	Modflow
23 b	433452.473	1101924.72	0.00201821	SemiConfinado	Modflow
24 b	434681.475	1099011.73	0.0018214	SemiConfinado	Modflow
25 b	434823.475	1098872.73	0.00182685	SemiConfinado	Modflow
26 b	434047.477	1098736.72	0.00186318	SemiConfinado	Modflow
27 b	434464.47	1102217.72	0.00193886	SemiConfinado	Modflow
28 b	434115.469	1103419.71	0.00216816	SemiConfinado	Modflow
29 b	434072.469	1103484.71	0.00212776	SemiConfinado	Modflow
30 b	433966.469	1103475.71	0.00223271	SemiConfinado	Modflow
31 b	433944.469	1103472.71	0.00223271	SemiConfinado	Modflow
32 b	433628.469	1103936.71	0.00202453	SemiConfinado	Modflow
33 b	433828.468	1104077.71	0.00190973	SemiConfinado	Modflow
34 b	434134.467	1104179.71	0.00201425	SemiConfinado	Modflow
35 b	433687.467	1105345.71	0.00155562	SemiConfinado	Modflow
36 b	435467.467	1102664.72	0.00249315	SemiConfinado	Modflow
49 b	434725.48	1096271.73	0.00126255	SemiConfinado	Modflow

Tabla B 3. Coeficiente de almacenamiento St para cada pozo analizado dentro del acuífero de Quibor. Los pozos sombreados en verde corresponden a aquellos que se les determinó el coeficiente de almacenamiento por otra metodología en la campaña de 2011.

Pozo	Este-Reg	Norte-Reg	St	Tipo de acuífero	Fuente
54 b	431912.495	1092195.74	0.00069175	Confinado	Modflow
55 b	427075.489	1101969.7	0.00074699	Confinado	Modflow
56 b	430215.487	1098987.72	0.00212914	SemiConfinado	Modflow
57 b	430163.487	1099010.72	0.0021345	SemiConfinado	Modflow
59 b	435356.472	1100105.72	0.00269811	SemiConfinado	Modflow
60 b	430063.478	1104237.7	0.0010035	SemiConfinado	Modflow
LA6070030A	429746.49	1099853.72	0.0019326	SemiConfinado	Aprosela, 2011
LA6070139A	432942.481	1098347.72	0.00137689	SemiConfinado	Aprosela, 2012
LA6071007A	425445.512	1092027.73	0.00152519	SemiConfinado	Aprosela, 2013
LA6070090B	433263.472	1102941.71	0.00163326	SemiConfinado	Aprosela, 2014
617129	426030.051	1099853.72	0.00055243	Confinado	Torres, Guillermo 1992

Tabla B 4. Datos de espesor saturado con delimitación en los bordes del Valle. Solo se incluyó una muestra de los bordes del valle, en digital esta la tabla completa.

Pozos	Este-Reg	Norte-Reg	Espesor Saturado (m) PR-NE
LA6070018A	430523.481	1101585.71	37
LA6070043A	434681.475	1099011.73	79
LA6070074A	434115.469	1103419.71	73
LA6070075A	434072.469	1103484.71	62.5
LA6070137A	428876.492	1097866.72	59
LA6070160A	434581.477	1098165.73	52
LA6070161A	433930.47	1103125.71	76
LA6070163A	427367.503	1094114.72	63
LA6070029A	429854.487	1099899.72	59
LA6070036A	433828.492	1104077.74	33
LA6070121A	430119.48	1102609.71	54
LA6070135A	434719.48	1096289.73	89
LA6070136A	430812.492	1095507.73	74
LA6070138A	429373.491	1097927.72	81
LA6070140A	432340.483	1098272.72	71
LA6070141A	430214.482	1101346.71	38
LA6070142A	430565.48	1102014.71	56
LA6070147A	430215.487	1098987.72	95
LA6070149A	433599.473	1102114.72	73
LA6070150A	433628.469	1103936.71	49

Tabla B 4. Datos de espesor saturado con delimitación en los bordes del Valle. Solo se incluyó una muestra de los bordes del valle, en digital esta la tabla completa.

Pozos	Este-Reg	Norte-Reg	Espesor Saturado (m) PR-NE
LA6070155A	435784.467	1102055.72	50
LA6070030A	429746.53	1099853.77	36
LA6070139A	432942.481	1098347.72	17
LA6070181A	433263.472	1102941.71	46
LA6070143A	430397.489	1097357.72	54.38
LA6070177A	434823.475	1098872.73	32.2
LA6070178A	436021.469	1100676.72	10.71
LA6070122A	428892.497	1095003.72	63.86
LA6070145A	430194.489	1097792.72	52.02
LA6070156A	434047.477	1098736.72	51.29
LA6070171A	433944.469	1103472.71	45.06
LA6070180A	433972.469	1103480.71	45.15
LA6070183A	427563.507	1092011.73	97.62
Porción del contorno del Valle	418915.626	1088201.77	0
	418621	1088616	0
	420083	1089273	0
	420576	1090112	0
	420400	1091459	0
	420416	1091868	0
	421124	1092037	0

Tabla B 4. Datos de espesor saturado con delimitación en los bordes del Valle. Solo se incluyó una muestra de los bordes del valle, en digital esta la tabla completa.

Pozos	Este-Reg	Norte-Reg	Espesor Saturado (m) PR-NE
	421084	1093058	0
	420730	1093726	0
	420612	1094007	0
	420824	1094611	0
	421564	1094788	0
	422102	1094675	0
	422501	1094646	0
	421903	1095472	0
	421807	1095828	0
	422132	1096069	0
	422663	1095496	0
	422999	1095635	0
	422604	1096272	0
	422342	1096768	0

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
RAtr1	432938.2	1088834	1	9.191	5.65	3.541	1.945399634	1.68118124	0.264218397	0.000233602	0.00080572	Confinado	
			2	17.605	12.808	4.797	2.364235906	2.14903949	0.215196418	0.000193704			
			3	25.349	23.43	1.919	2.637474379	2.57591594	0.061558438	5.63945E-05			
			4	31.159	27.592	3.567	2.805918506	2.70542161	0.100496898	9.28479E-05			
			5	45.463	34.726	10.737	3.142660212	2.89865433	0.24400588	0.000229172			
RAtr1(2)	433192.4	1088830	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	0.00113863	SemiConfinado
			1	29.408	18.809	10.599	2.757653188	2.41162464	0.346028551	0.000316663			
			2	54.339	40.006	14.333	3.315381369	3.02438823	0.290993139	0.000276053			
			3	77.443	71.803	5.64	3.687182641	3.6044813	0.082701339	8.12752E-05			
			4	94.739	84.11	10.629	3.917045704	3.77967354	0.137372168	0.000137272			
RAtr1(3)	433438.8	1088871	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	0.00110716	SemiConfinado
			1	28.606	18.805	9.801	2.734872853	2.41147077	0.323402087	0.000295768			
			2	39.89	38.952	0.938	3.021754732	3.00026025	0.02149448	2.01737E-05			
			3	71.775	54.459	17.316	3.604059568	3.31757614	0.286483429	0.000277545			
			4	84.314	77.507	6.807	3.782421365	3.68809652	0.094324846	9.3372E-05			
RAtr1(4)	433726.3	1088830	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	0.00073005	Confinado
			1	21.146	13.444	7.702	2.497862157	2.18051235	0.317349805	0.000286784			
			2	39.397	28.847	10.55	3.010502178	2.7417648	0.268737379	0.000250104			
			3	56.266	52.082	4.184	3.350223746	3.2734544	0.076769343	7.35528E-05			
			4	68.886	61.26	7.626	3.559912227	3.4367908	0.123121422	0.000119611			
RLG3(3)	437203.7	1096509	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	0.00104627	SemiConfinado
			1	23.146	14.815	8.331	2.566508959	2.24496977	0.321539192	0.00029152			
			2	42.847	31.478	11.369	3.087280756	2.81450574	0.272775012	0.000255051			
			3	61.221	56.664	4.557	3.436134269	3.3573156	0.078818667	7.59867E-05			
			4	74.781	66.513	8.268	3.648693479	3.52267	0.126023478	0.000123263			
RLG3(4)	437439	1096757	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	0.00101027	SemiConfinado
			1	20.24	12.81	7.43	2.465262403	2.14914016	0.316122247	0.000285239			
				2	37.79	27.79	10	2.973124307	2.71123127	0.261893042	0.000243228		

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
RLG3(5)	437901.7	1097302	3	54	49.95	4.05	3.309162757	3.2326646	0.076498155	7.30784E-05			
			4	66.15	58.73	7.42	3.516891374	3.39357929	0.123312089	0.000119404			
			5	95.16	73.58	21.58	3.922259558	3.6310141	0.291245461	0.000289315			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	14.64	9.17	5.47	2.236981142	1.94406509	0.292916056	0.000261754			
2	27.58	20.12	7.46	2.705068571	2.46086842	0.244200152	0.00022344						
3	39.52	36.53	2.99	3.013318797	2.94303144	0.070287357	6.58291E-05	0.00091983	Confinado				
4	48.47	43	5.47	3.20362671	3.09058389	0.113042819	0.000107063						
5	70.11	53.95	16.16	3.578771665	3.30824325	0.270528418	0.000261742						
1 b	430065	1100264	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	16.04	2.68	13.36	2.299118252	1.34412741	0.95499084	0.00084534			
			2	38.12	27.45	10.67	2.980889434	2.70123709	0.279652341	0.000259707			
			3	55.52	39.12	16.4	3.336835807	3.00413644	0.332699364	0.000315641	0.0021856	SemiConfinado	
			4	72.35	69.02	3.33	3.612697185	3.56198828	0.050708902	4.96037E-05			
5	163.4	95.28	68.12	4.612916737	3.92374273	0.689174002	0.000715306						
2 b	429957	1100218	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	16.04	2.68	13.36	2.299118252	1.34412741	0.95499084	0.00084534			
			2	38.12	27.45	10.67	2.980889434	2.70123709	0.279652341	0.000259707			
			3	55.52	39.12	16.4	3.336835807	3.00413644	0.332699364	0.000315641	0.0021856	SemiConfinado	
			4	72.35	69.02	3.33	3.612697185	3.56198828	0.050708902	4.96037E-05			
5	163.4	95.28	68.12	4.612916737	3.92374273	0.689174002	0.000715306						
3 b	435471	1103775	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	16.02	5.11	10.91	2.298257857	1.63127158	0.666986277	0.000593246			
			2	39.1	21.22	17.88	3.003675604	2.50048132	0.503194288	0.000464931			
			3	57.71	40.65	17.06	3.375789222	3.03891229	0.336876936	0.000320422	0.00223369	SemiConfinado	
			4	90.64	73.67	16.97	3.865413589	3.63234592	0.23306767	0.000230984			
5	155.42	96.71	58.71	4.544143854	3.94131744	0.602826415	0.000624109						
4 b	435658	1103237	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	17.07	5.27	11.8	2.342448526	1.64642967	0.696018853	0.000619816			
			2	40.92	23.09	17.83	3.044953659	2.56464454	0.480309122	0.00044516			
			3	58.02	42.12	15.9	3.381219129	3.07147163	0.309747496	0.000295003	0.00229895	SemiConfinado	
			4	94.851	76.79	18.061	3.918434343	3.67782788	0.240606467	0.000239431			

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero
5 b	436607	1103237	5	168.28	100.16	68.12	4.653821814	3.98298155	0.670840264	0.000699539		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	12.06	1.59	10.47	2.110591537	1.14926224	0.961329298	0.000845589		
			2	36.49	19.59	16.9	2.942064292	2.44123918	0.500825116	0.00046113		
			3	56.87	37.59	19.28	3.360972573	2.96839504	0.39257753	0.000372321	0.00220506	SemiConfinado
			4	87.14	74.16	12.98	3.820016745	3.63957704	0.180439708	0.000178542		
6 b	436232	1101321	5	124.91	94.59	30.32	4.255779934	3.91519653	0.340583399	0.000347478		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	14.42	1.55	12.87	2.226842894	1.14051108	1.086331812	0.000957411		
			2	41.21	34.53	6.68	3.05141154	2.89373644	0.157675099	0.000147625		
			3	72.31	42.24	30.07	3.612097865	3.07409421	0.538003656	0.000516809	0.00271274	SemiConfinado
			4	100.25	83.02	17.23	3.9840549	3.76491191	0.219142995	0.000219477		
7 b	436127	1101563	5	202.1	109.97	92.13	4.9166568	4.09621051	0.82044629	0.000871418		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	13.84	0.52	13.32	2.199585393	0.82186598	1.377719415	0.001208815		
			2	40.48	32.68	7.8	3.035094035	2.84632583	0.188768202	0.000176381		
			3	70.14	41.48	28.66	3.579231002	3.05739552	0.521835486	0.000500367	0.00299728	SemiConfinado
			4	99.34	82.2	17.14	3.973170907	3.75371716	0.219453751	0.000219582		
8 b	432551	1098637	5	203.08	108.85	94.23	4.92379708	4.08365016	0.840146917	0.00089214		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	44.43	21.66	22.77	3.121065579	2.5159241	0.605141476	0.000561408		
			2	68.75	55.56	13.19	3.557802294	3.33755684	0.22024545	0.000213153		
			3	92.94	69.75	23.19	3.894581535	3.57324886	0.321332677	0.000318088	0.00177879	SemiConfinado
			4	127.15	114.93	12.22	4.27853323	4.15078293	0.1277503	0.000131861		
9 b	433153	1098712	5	203.58	141.05	62.53	4.927430791	4.41379265	0.51363814	0.000554283		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	43.86	21.93	21.93	3.108999042	2.52529192	0.58370712	0.000541462		
			2	67.75	56.47	11.28	3.542197644	3.35386314	0.188334506	0.000182272		
			3	89.32	68.75	20.57	3.848439064	3.55780229	0.29063677	0.000286974	0.00177848	SemiConfinado
			4	123.1	113.43	9.67	4.2371849	4.13445605	0.10272885	0.000105753		
10 b	433428	1099838	5	204.44	131.05	73.39	4.933666187	4.31748769	0.616178501	0.000662016		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero		
11 b	430608	1097722							0.3					
			1	25.97	10.06	15.91	2.656694306	1.99884627	0.657848035	0.000594387				
			2	48.86	36.84	12.02	3.211338151	2.95050182	0.260836334	0.000245955				
			3	70.21	49.94	20.27	3.580302254	3.23247044	0.347831819	0.000335621	0.00191265			SemiConfinado
			4	102.63	92.15	10.48	4.01219746	3.88462054	0.127576923	0.00012858				
			5	171.68	110.55	61.13	4.681832924	4.10267981	0.579153115	0.000608106				
11 b	430608	1097722	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St			
			1	41.54	10.41	31.13	3.058721584	2.01945983	1.039261754	0.000949799				
			2	65.79	51.55	14.24	3.51113854	3.26338716	0.247751377	0.000238698				
			3	95.48	66.47	29.01	3.926211792	3.52198664	0.404225157	0.000399852	0.00218648			SemiConfinado
			4	121.32	107.29	14.03	4.218710467	4.06600374	0.152706729	0.000156582				
			5	190.62	141.72	48.9	4.831150197	4.42007199	0.411078203	0.000441547				
12 b	430700	1098065	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St			
			1	43.75	13.28	30.47	3.106657793	2.17249819	0.934159607	0.000858223				
			2	67	52.64	14.36	3.530388021	3.2839366	0.246451419	0.000237796				
			3	96.95	68	28.95	3.944249181	3.54611384	0.398135339	0.000394506	0.00211386			SemiConfinado
			4	124.63	110.51	14.12	4.252915741	4.10223441	0.150681326	0.000155002				
			5	200.52	147.33	53.19	4.905093709	4.47185133	0.43324238	0.00046833				
13 b	430405	1098157	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St			
			1	38.67	9.71	28.96	2.993727396	1.97772439	1.016003008	0.000925891				
			2	62.09	47.24	14.85	3.450694391	3.17901785	0.27167654	0.000260372				
			3	91.55	63.09	28.46	3.877015208	3.46727396	0.409741246	0.000403605	0.00211263			SemiConfinado
			4	118.7	104.68	14.02	4.19116941	4.03607394	0.155095467	0.000158618				
			5	177.54	138.31	39.23	4.72921289	4.38789346	0.341319428	0.000364149				
14 b	430080	1098801	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St			
			1	30.63	5	25.63	2.791541567	1.6206566	1.17088497	0.001053095				
			2	51.44	38.06	13.38	3.261296527	2.9794811	0.281815425	0.000266445				
			3	80.43	52.43	28	3.72928368	3.28000086	0.449282822	0.000436783	0.00221451			SemiConfinado
			4	104.22	94.46	9.76	4.03074497	3.9135815	0.11716347	0.000118329				
			5	152.93	119.29	33.64	4.5221796	4.19740825	0.324771353	0.000339855				
15 b	429584	1098292	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St			
1	27.63	4.37	23.26	2.706538851	1.55648318	1.150055673	0.001030916	0.00209076			SemiConfinado			

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero
16 b	429103	1095368	2	51.29	37.64	13.65	3.25844061	2.96957901	0.288861603	0.000272991		
			3	73.14	52.46	20.68	3.624486503	3.28056378	0.343922721	0.000332998		
			4	89.52	79.51	10.01	3.851022199	3.71643487	0.134587331	0.000133763		
			5	128.08	99.53	28.55	4.287897504	3.97544914	0.312448369	0.000320096		
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
17 b	431023	1095872	1	27.94	20.02	7.92	2.71561326	2.45719273	0.258420528	0.000236498		
			2	48.23	40.82	7.41	3.198859597	3.04271938	0.15614022	0.000147619		
			3	77.63	49.23	28.4	3.689851396	3.21861441	0.47123699	0.000456384	0.00155405	SemiConfinado
			4	94.23	88.2	6.03	3.910720314	3.83389819	0.076822128	7.6921E-05		
			5	162.81	101.29	61.52	4.607913553	3.9964094	0.611504157	0.00063663		
18 b	435656	1092392	1	39.051	22.403	16.648	3.002545849	2.54151018	0.461035669	0.000426457		
			2	71.833	52.881	18.952	3.604933032	3.28843981	0.316493217	0.000306298		
			3	102.054	83.614	18.44	4.005428738	3.77297302	0.232455715	0.000233104	0.00153454	SemiConfinado
			4	124.591	110.761	13.83	4.252516442	4.1050274	0.147489041	0.000151735		
			5	177.06	132.673	44.387	4.725373462	4.33345973	0.391913735	0.000416942		
19 b	431541	1101825	1	2.503	1.28	1.223	1.316855903	1.07686929	0.239986616	0.00020859		
			2	5.391	3.7	1.691	1.657680389	1.48067764	0.177002752	0.000155266		
			3	8.383	7.368	1.015	1.892430068	1.82055953	0.071870535	6.36357E-05	0.0006655	Confinado
			4	10.386	9.371	1.015	2.018061957	1.95675198	0.06130998	5.45536E-05		
			5	15.563	11.374	4.189	2.27838963	2.07383389	0.20455574	0.000183458		
20 b	431753	1101690	1	17.82	9.37	8.45	2.372861063	1.95668933	0.416171731	0.000373118		
			2	42.59	27.97	14.62	3.081713721	2.71648768	0.36522604	0.00034041		
			3	60.8	48.84	11.96	3.429028335	3.21094374	0.218084592	0.000209081	0.00134866	SemiConfinado
			4	74.45	66.11	8.34	3.643840937	3.51625325	0.127587682	0.000124737		
			5	106.92	82.8	24.12	4.061792048	3.76191606	0.299875987	0.000301309		
20 b	431753	1101690	1	16.44	7.45	8.99	2.316170596	1.82661442	0.489556176	0.0004372		
			2	36.6	25.72	10.88	2.944722167	2.64899592	0.295726248	0.000273909	0.00123537	SemiConfinado
			3	52.31	45.9	6.41	3.277746905	3.15169226	0.126054642	0.000119945		

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
21 b	433446	1103423	4	64.09	56.89	7.2	3.483670585	3.36132712	0.12234346	0.000118175			
			5	92.23	71.29	20.94	3.88563196	3.59673619	0.288895773	0.000286142			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	18.53	6.4	12.13	2.400836725	1.74523531	0.655601411	0.000585651			
			2	41.31	26.25	15.06	3.053631019	2.66525516	0.388375862	0.000361111			
			3	61.28	42.15	19.13	3.437127377	3.07212777	0.364999609	0.000348334	0.0020169	SemiConfinado	
22 b	433810	1102479	4	84.47	76.65	7.82	3.784519508	3.67581502	0.108704491	0.000107562			
			5	156.53	98.36	58.17	4.553855813	3.96137135	0.592484465	0.000614243			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	13.09	0.8	12.29	2.163126381	0.93524845	1.227877933	0.001078097			
			2	33.53	15.77	17.76	2.86833628	2.28743893	0.58089735	0.00053154			
			3	48.35	34.44	13.91	3.201245224	2.89147168	0.309773545	0.000291443	0.00229552	SemiConfinado	
23 b	433663	1102289	4	76.29	71.12	5.17	3.670627251	3.59416098	0.076466275	7.5067E-05			
			5	119.64	92.33	27.31	4.201099052	3.86689537	0.314203678	0.000319373			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	14.23	2.26	11.97	2.217999633	1.27712243	0.940877205	0.0008307			
			2	33.62	16.24	17.38	2.870643838	2.30768118	0.562962662	0.000515432			
			3	48.5	34.62	13.88	3.204221437	2.89599708	0.30822436	0.000290057	0.00201821	SemiConfinado	
24 b	434892	1099376	4	76.23	71.23	5	3.669760958	3.59582778	0.073933178	7.25825E-05			
			5	115.09	89.2	25.89	4.152515642	3.84688724	0.305628403	0.000309442			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	32.11	17.12	14.99	2.831340438	2.34450481	0.486835628	0.000445661			
			2	55.99	49.86	6.13	3.345285131	3.23091611	0.114369018	0.000109391			
			3	78.49	57.22	21.27	3.702067208	3.36716467	0.334902537	0.000326302	0.0018214	SemiConfinado	
25 b	435034	1099237	4	108.9	99.84	9.06	4.084212817	3.97915972	0.105053097	0.000106654			
			5	199.86	111.72	88.14	4.90024467	4.11565799	0.784586677	0.000833397			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	32.11	17.12	14.99	2.831340438	2.34450481	0.486835628	0.000445661			
			2	55.99	49.86	6.13	3.345285131	3.23091611	0.114369018	0.000109391			
			3	78.49	56.9	21.59	3.702067208	3.36150437	0.34056284	0.000331746	0.00182685	SemiConfinado	

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero
26 b	434258	1099101	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	SemiConfinado
			1	35.04	16.89	18.15	2.906492651	2.33501081	0.571481845	0.000524144	0.00186318	
			2	58.97	50.65	8.32	3.397733705	3.24618925	0.151544457	0.000145304		
			3	79.58	59.97	19.61	3.717416142	3.41491749	0.302498654	0.000295447		
			4	111.98	103.86	8.12	4.118529101	4.02656297	0.091966128	9.37069E-05		
			5	200.03	114.41	85.62	4.901494735	4.14513993	0.756354807	0.000804581		
27 b	434675	1102582	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si		St
			1	30.47	14.92	15.55	2.787158945	2.24973128	0.537427664	0.000490178	0.00193886	
			2	53.36	32.44	20.92	3.297347708	2.84003867	0.457309037	0.000430942		
			3	61.17	53.54	7.63	3.435275279	3.30068067	0.134594607	0.000129485		
			4	100.55	84.84	15.71	3.987627868	3.78948505	0.198142819	0.000198681		
			5	182.31	111.51	70.8	4.766977997	4.1133356	0.653642392	0.000689572		
28 b	434326	1103784	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si		St
			1	17.31	6	11.31	2.352280565	1.71176986	0.640510706	0.000571197	0.00216816	
			2	39.37	23.43	15.94	3.009883072	2.57591594	0.433967132	0.000401904		
			3	60.59	40.37	20.22	3.425470926	3.03261742	0.392853509	0.00037425		
			4	84.59	74.3	10.29	3.786131619	3.64163693	0.144494693	0.000142787		
			5	166.35	100.51	65.84	4.63774474	3.9871519	0.650592836	0.000678022		
29 b	434283	1103849	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si		St
			1	16.79	5.73	11.06	2.33085474	1.68828743	0.642567311	0.000572516	0.00212776	
			2	38.78	24.38	14.4	2.996279628	2.60681439	0.389465233	0.00036086		
			3	61.85	39.78	22.07	3.446687516	3.01925249	0.427435023	0.00040732		
			4	82.92	73.28	9.64	3.763550848	3.62656644	0.136984409	0.000135159		
			5	161.43	98.98	62.45	4.596161431	3.96884588	0.627315548	0.000651901		
30 b	434177	1103840	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si		St
			1	15.44	4.39	11.05	2.272972539	1.5861681	0.714355728	0.000634236	0.00223271	
			2	37.44	22.38	15.06	2.964836523	2.54072713	0.424109396	0.000391842		
			3	60.25	38.44	21.81	3.419692968	2.98837444	0.431318525	0.000410192		
			4	81.62	73.25	8.37	3.74575163	3.62612097	0.119630657	0.000117948		
			5	165.88	100.12	65.76	4.633809846	3.98250429	0.651305556	0.000678491		
31 b	434155	1103837	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si		St

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero
32 b	433839	1104301	1	15.44	4.39	11.05	2.272972539	1.55861681	0.714355728	0.000634236	0.00223271	SemiConfinado
			2	37.44	22.38	15.06	2.964836523	2.54072713	0.424109396	0.000391842		
			3	60.25	38.44	21.81	3.419692968	2.98837444	0.431318525	0.000410192		
			4	81.62	73.25	8.37	3.74575163	3.62612097	0.119630657	0.000117948		
			5	165.88	100.12	65.76	4.633809846	3.98250429	0.651305556	0.000678491		
32 b	433839	1104301	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	18.31	6.75	11.56	2.39224967	1.77333641	0.618913256	0.000553073	0.00202453	SemiConfinado
			2	40.61	27.27	13.34	3.038014881	2.69591094	0.342103939	0.000318221		
			3	62.9	41.61	21.29	3.464138072	3.06026697	0.403871103	0.000385651		
			4	84.13	74.13	10	3.779943137	3.63913528	0.140807859	0.000139095		
5	157.09	97.62	59.47	4.558737252	3.95240683	0.606330423	0.00062849					
33 b	434039	1104442	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	19.29	7.8	11.49	2.429963042	1.85194626	0.578016779	0.000517776	0.00190973	SemiConfinado
			2	40.98	28.7	12.28	3.046292395	2.73756581	0.30872658	0.000287609		
			3	63.15	41.98	21.17	3.46826287	3.06840534	0.399857527	0.000381983		
			4	85.2	72.55	12.65	3.794301857	3.61569031	0.17861155	0.000176376		
5	146.79	96.4	50.39	4.466927885	3.93752306	0.529404825	0.00054599					
34 b	434345	1104544	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	15.39	4.85	10.54	2.270761833	1.60591488	0.664846955	0.00059074	0.00201425	SemiConfinado
			2	37.11	22.9	14.21	2.956972505	2.55829513	0.398677371	0.000368441		
			3	59.46	38.11	21.35	3.406179034	2.98065482	0.425524215	0.000404381		
			4	82.62	69.01	13.61	3.759460769	3.56183345	0.197627318	0.000194457		
5	132.68	92.37	40.31	4.333528318	3.88740047	0.446127846	0.000456228					
35 b	433898	1105710	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	15.84	6.81	9.03	2.29048026	1.77805067	0.512429588	0.000456943	0.00155562	SemiConfinado
			2	35.72	23.66	12.06	2.923300326	2.58347594	0.339824382	0.000313957		
			3	55.69	36.72	18.97	3.339897705	2.9476153	0.392282407	0.000371509		
			4	70.04	62.42	7.62	3.577699343	3.45618618	0.121513163	0.000118217		
5	100.67	77.9	22.77	3.989054966	3.69369675	0.295358216	0.000294994					
36 b	435678	1103029	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	
			1	15.89	3.46	12.43	2.292646883	1.45118516	0.841461719	0.000746031	0.00249315	SemiConfinado
2	39.95	22.49	17.46	3.023117554	2.54446708	0.478650473	0.000443067					

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
49 b	434936	1096636	3	56.7	40.95	15.75	3.357955354	3.0456232	0.312332156	0.000296956			
			4	94.31	76.1	18.21	3.911716063	3.66788235	0.243833712	0.000242475			
			5	175.21	99.84	75.37	4.710507145	3.97915972	0.731347425	0.000764625			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	40.015	25.841	14.174	3.024592329	2.65272845	0.371863881	0.000345316			
54 b	432123	1092560	2	73.763	54.639	19.124	3.633720939	3.32086195	0.312858984	0.000303482			
			3	105.036	97.162	7.874	4.040186865	3.94683466	0.093352202	9.44561E-05	0.00126255	SemiConfinado	
			4	128.21	114.036	14.174	4.289202694	4.1410702	0.148132495	0.000152907			
			5	182.746	142.609	40.137	4.77039525	4.42837184	0.342023411	0.000366387			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
55 b	427286	1102334	1	4.378	2.535	1.843	1.557337449	1.32188413	0.235453318	0.000205807			
			2	8.793	6.255	2.538	1.919734289	1.73327788	0.18645641	0.000164921			
			3	12.861	11.853	1.008	2.151703476	2.09965763	0.052045842	4.65738E-05	0.00069175	Confinado	
			4	15.921	14.043	1.878	2.293987794	2.20921493	0.084772868	7.62851E-05			
			5	23.883	17.824	6.059	2.590756901	2.37302084	0.217736062	0.000198159			
56 b	430426	1099352	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	6.25	3.72	2.53	1.732862108	1.48307421	0.249787901	0.000219372			
			2	12.24	8.78	3.46	2.119992992	1.91888238	0.201110613	0.000179183			
			3	17.77	16.39	1.38	2.370861741	2.31405505	0.056806692	5.13378E-05	0.00074699	Confinado	
			4	21.92	19.38	2.54	2.52494641	2.43335869	0.091587715	8.33374E-05			
57 b	430374	1099375	5	32.47	24.45	8.02	2.840826343	2.60905755	0.231768792	0.000213757			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	27.97	6.97	21	2.716487681	1.79048148	0.9260062	0.000834165			
			2	52.24	35.58	16.66	3.276430428	2.91985835	0.356572078	0.00033664			
			3	84.34	53.24	31.1	3.782771245	3.29512136	0.487649887	0.000475359	0.00212914	SemiConfinado	
57 b	430374	1099375	4	110.38	100.83	9.55	4.100786101	3.99095591	0.10983019	0.000111644			
			5	184.11	143.29	40.82	4.781049206	4.4347053	0.346343907	0.000371332			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	28.17	6.97	21.2	2.722300445	1.79048148	0.931818964	0.000839524			
57 b	430374	1099375	2	52.24	35.58	16.66	3.276430428	2.91985835	0.356572078	0.00033664			
			3	84.34	53.24	31.1	3.782771245	3.29512136	0.487649887	0.000475359	0.0021345	SemiConfinado	
			4	110.38	100.83	9.55	4.100786101	3.99095591	0.10983019	0.000111644			

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quibor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
59 b	435567	1100470	5	184.11	143.29	40.82	4.781049206	4.4347053	0.346343907	0.000371332			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	14.57	1.57	13	2.233766973	1.14490617	1.088860804	0.00095982			
			2	42.45	34.34	8.11	3.078671195	2.88895041	0.189720784	0.000177758			
			3	71.98	43.45	28.53	3.607144603	3.10025156	0.506893047	0.000487282	0.00269811		SemiConfinado
			4	100.15	84.36	15.79	3.982862248	3.78304033	0.199821917	0.000200269			
60 b	430274	1104602	5	203.65	110.93	92.72	4.927939011	4.10690544	0.821033568	0.000872985			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	15.85	9.95	5.9	2.290913967	1.99226417	0.298649798	0.000267459			
			2	29.77	21.74	8.03	2.767793279	2.51870823	0.249085045	0.000228667			
			3	42.63	36.59	6.04	3.082581728	2.94448077	0.138100955	0.000129639	0.0010035		SemiConfinado
			4	52.27	46.38	5.89	3.276994783	3.16154395	0.115450835	0.00010989			
LA6070030A	429746.49	1099853.72	5	75.49	58.17	17.32	3.659037224	3.38383922	0.275198008	0.000267846			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	18.55	2.11	16.44	2.401613821	1.25107901	1.150534814	0.001019052			
			2	61.21	28.56	32.65	3.435949039	2.73355276	0.702396277	0.000662831			
			3	78.76	76.39	2.37	3.705883071	3.67207001	0.033813058	3.33452E-05	0.0019326		SemiConfinado
			4	124.02	105.39	18.63	4.24666026	4.04426702	0.202393245	0.000207592			
LA6070139A	432942.481	1098347.72	5	143.88	142.88	1	4.440175424	4.43089473	0.009280691	9.78139E-06			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	44.73	28.04	16.69	3.127372907	2.71852545	0.408847459	0.000381651			
			2	100.3	60.73	39.57	3.984650914	3.42784349	0.556807426	0.00055008			
			3	133.3	124.16	9.14	4.339593448	4.24809785	0.091495603	9.51382E-05	0.00137689		SemiConfinado
			4	163.06	143.02	20.04	4.610035093	4.43219676	0.177838331	0.000189013			
LA6071007A	425445.512	1092027.73	5	204.92	185.37	19.55	4.937138428	4.79084185	0.146296574	0.000161005			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	23.91	7.74	16.17	2.591635217	1.84766098	0.743974233	0.000668924			
			2	63.49	32.61	30.88	3.47385429	2.84449543	0.629358865	0.000596833			
			3	77.74	69.03	8.71	3.69141915	3.5621431	0.129276051	0.000126855	0.00152519		SemiConfinado
			4	95.95	86.45	9.5	3.93199986	3.81091708	0.12108278	0.000121231			
LA6070090B	433263.472	1102941.714	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		

Tabla B 5. Cálculo del coeficiente de almacenamiento para todos los pozos considerados en el Valle de Quíbor.

Pozo	Este	Norte	Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St	Tipo de acuífero	
617129	426030.051	1099853.72							0.3				
			1	16.96	5.36	11.6	2.337909816	1.65481495	0.683094862	0.000608342			SemiConfinado
			2	58.38	23.24	35.14	3.387499402	2.56963144	0.817867963	0.000766618		0.00163326	
			3	76.75	68.15	8.6	3.677253036	3.54845873	0.128794311	0.000126243			
			4	94.73	85.35	9.38	3.916934067	3.79630466	0.12062941	0.000120625			
			5	110.17	109.17	1	4.098443995	4.08724803	0.011195966	1.14285E-05			
			Capas	D1 (m)	D2 (m)	D1-D2	D1 ^ 0.3	D2 ^ 0.3	D1 ^ 0.3 - D2 ^ 0.3	Si	St		
			1	3.47	1.91	1.56	1.452442146	1.21425531	0.238186839	0.000207649			Confinado
			2	7.16	5.03	2.13	1.804986287	1.62356767	0.181418613	0.000159854		0.00055243	
			3	10.71	9.71	1	2.036745855	1.97772439	0.059021468	5.25585E-05			
4	13.12	11.71	1.41	2.164612443	2.09202596	0.072586487	6.49624E-05						
5	16.38	14.68	1.7	2.313631397	2.23881298	0.074818414	6.74038E-05						
6	20	19	1	2.456456052	2.41894548	0.037510571	3.40591E-05						

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS C.

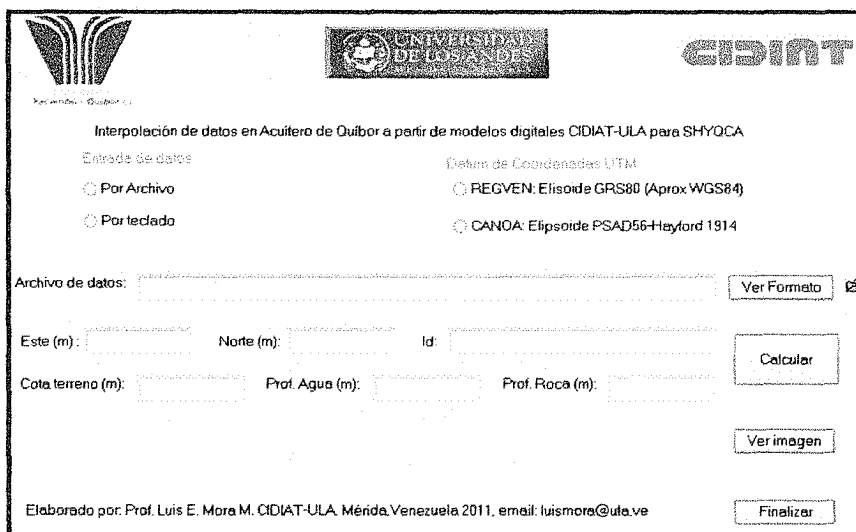
PROGRAMAS UTILIZADOS

Acui-Quibor:

Es un programa desarrollado por el Prof. Luis Mora del CIDIAT-ULA para el Sistema Hidráulico Yacambú Quíbor (SHYQ) en el año 2000. Es una interfase que permite obtener datos de Cota De Terreno, Profundidad De Capa Freática y Profundidad De Lecho Rocosó mediante la interpolación de datos existentes del acuífero de Quíbor, para llevar a cabo estos procesos el programa cuenta con un modelo digital del terreno y un modelo digital del acuífero, desarrollados y mejorados al cabo de varios proyectos realizados por el CIDIAT y el SHYQ.

El programa permite la entrada de datos en forma manual o mediante un archivo, para éste último caso cuenta con un ejemplo de formato que muestra la manera correcta en la que se debe hacer el archivo para que pueda ser leído correctamente por el programa. En lo que respecta al Datum de los datos, el programa admite REGVEN: elipsoide GRS80 (Aprox. WGS84) y CANOA: Elipsoide PSAD56-Hayford 1914 (Figura).

Al igual que la entrada, la salida del programa puede ser por pantalla o por archivo, este último es un archivo sencillo de manipular con extensión . sal.



The screenshot shows the main window of the 'Acui-Quibor' software. At the top, there are logos for the University of Los Andes (ULA) and the CIDIAT. The title bar reads 'Acui-Quibor'. The main text area contains the following information:

- Interpolación de datos en Acuífero de Quíbor a partir de modelos digitales CIDIAT-ULA para SHYQCA
- Entrada de datos:
 - Por Archivo
 - Por teclado
- Datum de Coordenadas UTM:
 - REGVEN: Elipsoide GRS80 (Aprox WGS84)
 - CANOA: Elipsoide PSAD56-Hayford 1914
- Archivo de datos: [text input field] [Ver Formato]
- Este (m): [text input field] Norte (m): [text input field] Id: [text input field] [Calcular]
- Cota terreno (m): [text input field] Prof. Agua (m): [text input field] Prof. Roca (m): [text input field] [Ver imagen]
- Elaborado por: Prof. Luis E. Mora M. CIDIAT-ULA, Mérida, Venezuela 2011. email: luismora@ula.ve [Finalizar]

Figura C1. Pantalla de entrada y salida de datos del programa Acui-Quibor. (2000)

Variowin:

Es un programa hecho en 1994 por Yvan Pannatier del Instituto de Mineralogía y Petrografía de la Universidad de Lausanne, Suiza.

El programa es de distribución gratuita y está destinado al modelado experimental de variogramas de superficie, direccionales y de nube en 2D, brindando la posibilidad de modelar anisotropías zonales.

Variowin cuenta con 3 módulos de operación (Figura C2):

1. Prevar2D: trabaja con un archivo *.dat*, que exige un formato específico para la introducción de la data (Tabla C1). El objetivo de éste módulo es formar los pares de datos en un archivo *.pcf*, que se empleará en los futuros análisis que hace el programa.

Tabla C1. Ejemplo de organización de información necesaria para el archivo de entrada del *Prevar2D*.

Línea	Parámetro	Ejemplo		
1	"Nombre de la variable y/o comentarios"	k 2008-2009		
2	Número de columnas que ocupan los datos	3		
3	Nombre de los datos de la columna 1	x		
4	Nombre de los datos de la columna 2	y		
5	Nombre de los datos de la columna 3	K		
7.....n	Datos	429854.49	1099899.72	49.35
		429746.49	1099853.72	13.95
		433828.49	1104077.74	1.22
		434464.47	1102217.72	49.03
		434681.48	1099011.73	23.53
		431330.48	1101460.71	74.24

2. Vario2D with PCF: opera con el archivo *.pcf* creado en el módulo anterior. En este módulo hay varias pestañas que permiten cambiar los límites de la data, seleccionar el tipo de variografía (directa o cruzada), el estimador con el que se quiere trabajar (semivariograma, semivariograma estándar, covarianza, correlograma) y por último permite calcular el variograma direccional, de superficie o de nube en caso de haber seleccionado el semivariograma como estimador.

Para el cálculo de variograma solicita ingresar la variable a modelar (x,y,z), el número de espaciamientos en cada eje (lags), la distancia entre lags, el ángulo de orientación del variograma y la tolerancia angular para el cálculo.

3. Model: emplea el variograma obtenido en el módulo anterior con el fin de posibilitar su ajuste a un modelo teórico (único o compuesto), lo cual se logra manipulando el rango, sill, efecto pepita, para uno o varios modelos dependiendo de las exigencias que plantee el variograma experimental. Para obtener guía a cerca de cuál es el mejor modelo se puede presionar el botón "Best fit found".

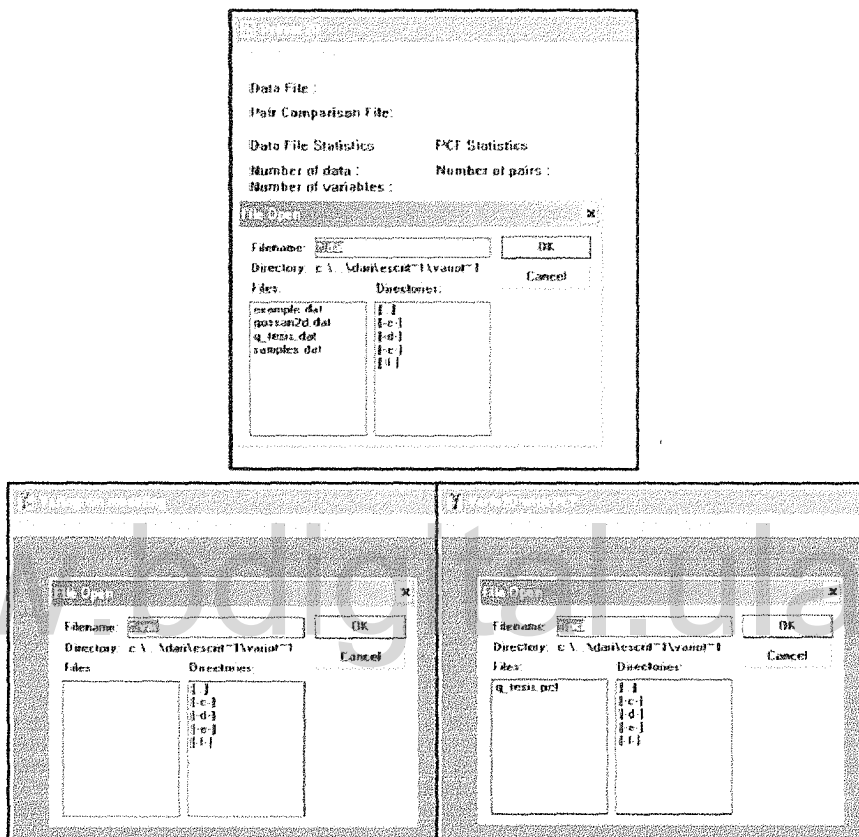


Figura C2. Módulos de operación contenidos en Variowin 2.1

Tomado de: Variowin 2.1 (1994)

www.bdigital.ula.ve

ANEXOS D

DATOS DE CAUDAL INTRODUCIDOS EN FORMA DE ARCHIVO. DAT PARA SER PROCESADOS EN VARIOWON 2.1

Tabla D 1 Variable caudal - Q

"Caudales últimos 5 años"

3

^

y

Q

427145.1599	1091007.027	9.89
427563.5068	1092011.731	32.22
427903.5072	1091000.733	14.18
425445.5119	1092027.726	30.54
426614.5083	1092198.728	39.37
428911.141	1095009.033	11.8
427367.5028	1094114.724	4.26
428630.4999	1095008.727	4.22
427673.501	1094704.723	22.38
429854.4865	1099899.715	17.66
429746.5296	1099853.774	9.55
430508.1308	1097706.043	16.92
428895.1282	1097872.032	13.92
429373.4907	1097927.718	44.49
430436.1036	1097369.736	16.33
430243.1308	1097133.038	15.21
430194.4889	1097792.72	18.32
429913.4891	1098097.719	46.5
430043.4836	1100928.712	7.14
433828.4703	1104077.714	8.5
431754.383	1101013.824	37.5
433282.1032	1102947.049	14.38
435177.4738	1099191.726	8.86
433236.1187	1099479.05	15.88
432942.4809	1098347.724	33.43
432340.4826	1098272.723	25.74
433452.4732	1101924.716	2.05
433618.1067	1102120.051	13.97
433628.4691	1103936.711	3.78
434047.4774	1098736.725	14.68
433963.1005	1103478.052	8.54
434842.1205	1098878.058	23.79
433991.1008	1103486.052	17.77
433263.4724	1102941.714	16.05
433687.4665	1105345.708	5
435467.4668	1102664.718	14.58
436021.469	1100676.724	4.5
430851.1171	1095519.737	9.76

Tabla D 2. Variable permeabilidad - k

"k data para r"

3

x

y

k

430523.4812	1101585.711	26.04
434681.4753	1099011.725	25.68
434115.4688	1103419.713	2.30
434072.4688	1103484.713	4.30
428876.4921	1097866.718	8.49
434581.4771	1098165.727	30.83
433930.4698	1103125.714	1.50
427367.5028	1094114.724	8.94
429854.4865	1099899.715	33.48
429746.5296	1099853.774	12.75
433828.4923	1104077.744	9.61
430119.4803	1102609.708	12.99
434719.4802	1096289.732	1.97
430812.4915	1095507.727	3.22
429373.4907	1097927.718	8.83
432340.4826	1098272.723	21.16
430214.4824	1101346.711	31.02
430565.4803	1102014.71	6.31
430215.4867	1098987.717	11.91
433599.4725	1102114.716	1.99
433628.4691	1103936.711	1.41
435784.4671	1102055.72	14.03
434047.4774	1098736.725	7.35
430397.4892	1097357.722	42.82
434823.4752	1098872.726	26.37
436021.469	1100676.724	15.52
428892.4973	1095003.725	9.52
430194.4889	1097792.72	34.19
437986.449	1109056.706	90.19
433263.4723	1102941.713	10.10
433944.4692	1103472.713	6.86
433972.4691	1103480.713	10.11
427563.5068	1092011.731	5.78

Tabla D 3. Variable espesor saturado - b

"b data para r"		
3		
x		
y		
B		
430523.4812	1101585.711	37
434681.4753	1099011.725	79
434115.4688	1103419.713	73
434072.4688	1103484.713	62.5
428876.4921	1097866.718	59
434581.4771	1098165.727	52
433930.4698	1103125.714	76
427367.5028	1094114.724	63
429854.4865	1099899.715	59
433828.4923	1104077.744	33
430119.4803	1102609.708	54
434719.4802	1096289.732	89
430812.4915	1095507.727	74
429373.4907	1097927.718	81
432340.4826	1098272.723	71
430214.4824	1101346.711	38
430565.4803	1102014.71	56
430215.4867	1098987.717	95
433599.4725	1102114.716	73
433628.4691	1103936.711	49
435784.4671	1102055.72	50
429746.5296	1099853.774	36
432942.4809	1098347.724	17
433263.4723	1102941.713	46
430397.4892	1097357.722	54.38
434823.4752	1098872.726	32.2
436021.469	1100676.724	10.71
428892.4973	1095003.725	63.86
430194.4889	1097792.72	52.02
434047.4774	1098736.725	51.29
433944.4692	1103472.713	45.06
433972.4691	1103480.713	45.15
427563.5068	1092011.731	97.62

www.digital.ula.ve

Tabla D 4. Variable coeficiente de almacenamiento - S

"S boonstran data para r"

3	x	y	s
432727.7001	1088469.749	0.000805719	
432981.8994	1088465.75	0.00113863	
433228.3414	1088506.809	0.001107161	
433515.8007	1088465.754	0.000730053	
436993.1766	1096144.739	0.001046272	
437228.4975	1096392.769	0.001010265	
437691.1717	1096937.736	0.000919828	
429854.4859	1099899.714	0.002185598	
429746.4863	1099853.714	0.002185598	
435260.466	1103410.715	0.002233692	
435447.4665	1102872.717	0.002298949	
436396.4641	1102872.719	0.002205059	
436021.4685	1100956.723	0.00271274	
435916.4683	1101198.722	0.002997284	
432340.4826	1098272.723	0.001778793	
432942.4809	1098347.724	0.001778476	
433217.4782	1099473.721	0.00191265	
430397.4892	1097357.722	0.002186478	
430489.4883	1097700.721	0.002113858	
430194.4889	1097792.72	0.002112635	
429869.4886	1098436.718	0.002214508	
429373.4907	1097927.718	0.002090763	
428892.4973	1095003.725	0.001554051	
430812.4915	1095507.727	0.001534536	
435445.486	1092027.744	0.000665503	
431330.4794	1101460.713	0.001348656	
431542.4791	1101325.714	0.001235372	
433235.4717	1103058.713	0.002016901	
433599.4725	1102114.716	0.00229552	
433452.4732	1101924.716	0.002018214	
434681.4753	1099011.725	0.001821404	
434823.4752	1098872.726	0.001826848	
434047.4774	1098736.725	0.001863183	
434464.4701	1102217.717	0.001938858	
434115.4688	1103419.713	0.00216816	
434072.4688	1103484.713	0.002127756	
433966.4691	1103475.713	0.002232709	
433944.4692	1103472.713	0.002232709	
433628.4691	1103936.711	0.002024531	
433828.4684	1104077.711	0.001909735	
434134.4674	1104179.711	0.002014247	
433687.4665	1105345.708	0.001555621	
435467.4668	1102664.718	0.002493154	
434725.4802	1096271.732	0.001262548	
431912.4948	1092195.738	0.000691746	
427075.4891	1101969.704	0.000746987	

digital.ula.ve

ANEXOS E

VARIOGRAMAS

Variogramas de superficie

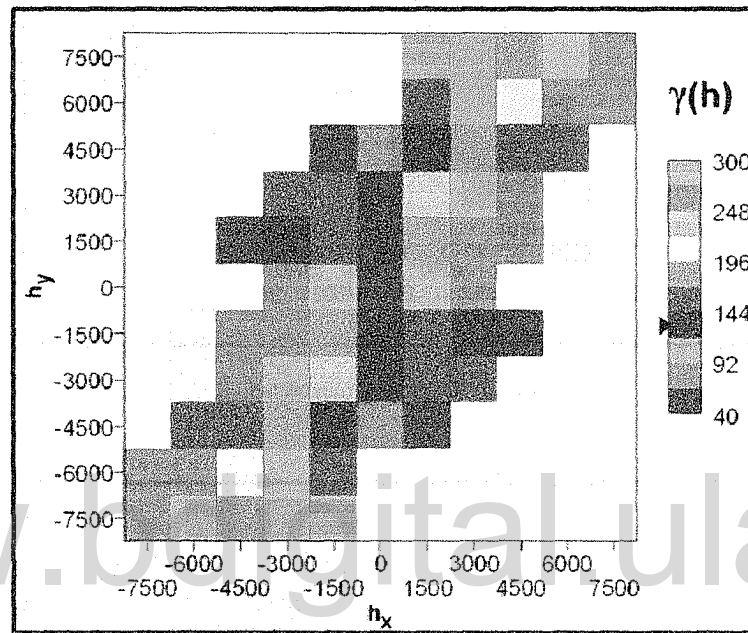


Figura E 1. Variable caudal - Q.

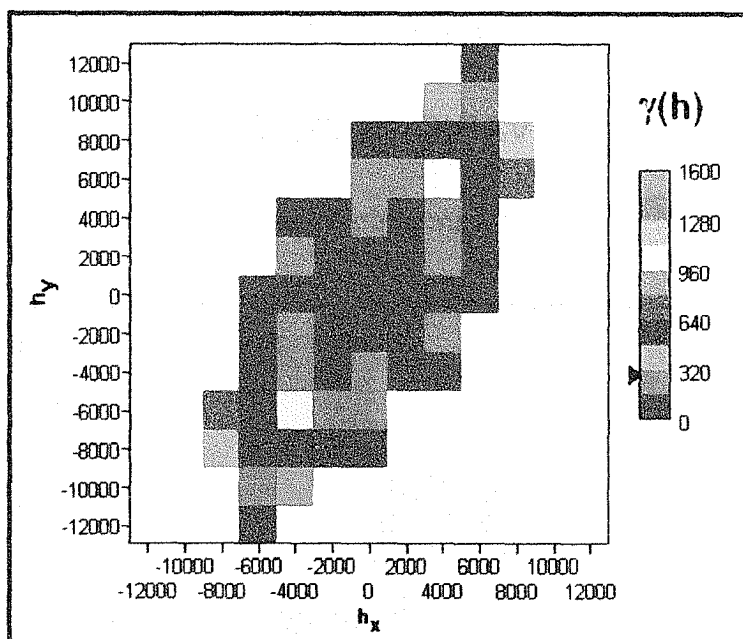


Figura E 2. Variable permeabilidad - K.

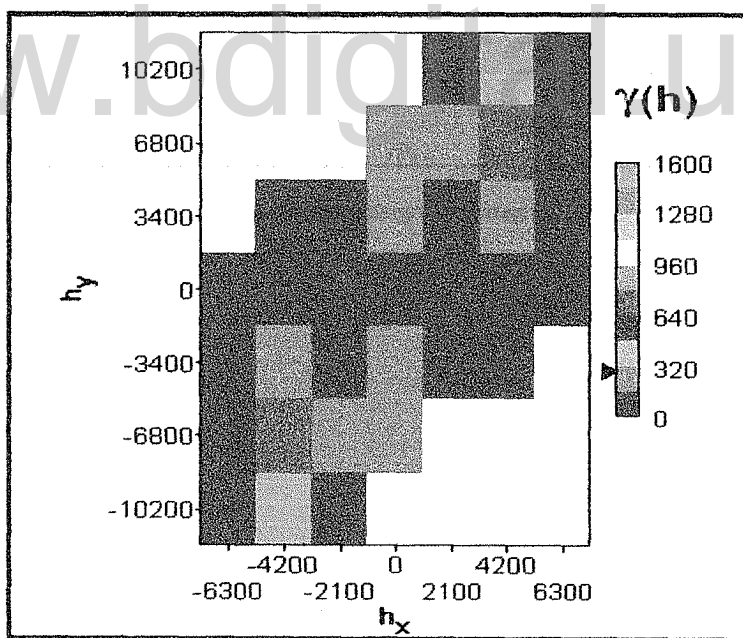


Figura E 3. Variable espesor saturado - b.

Variograma direccional

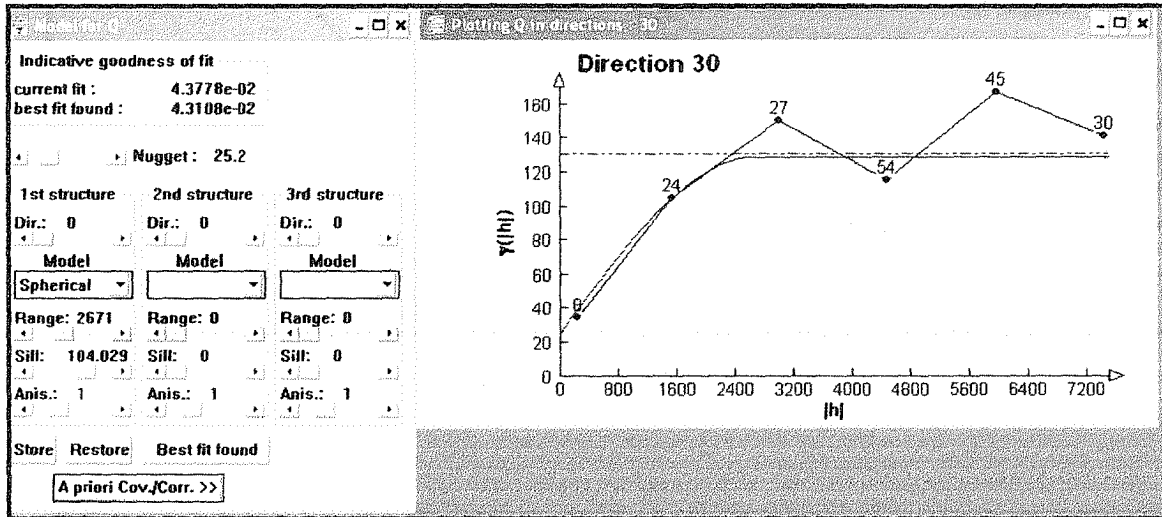


Figura E 4. Variable caudal - Q.

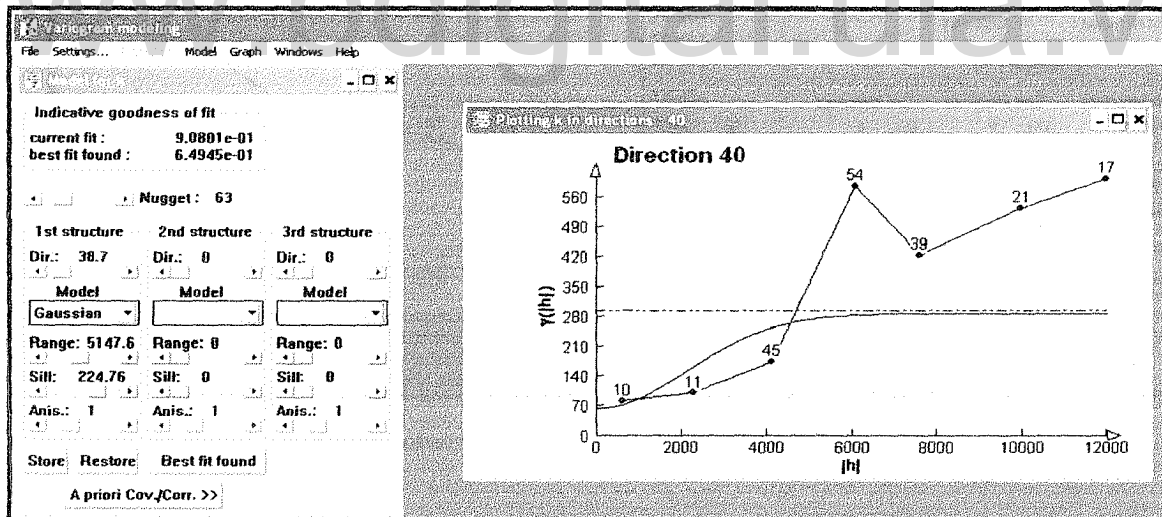


Figura E 5. Variable permeabilidad - K.

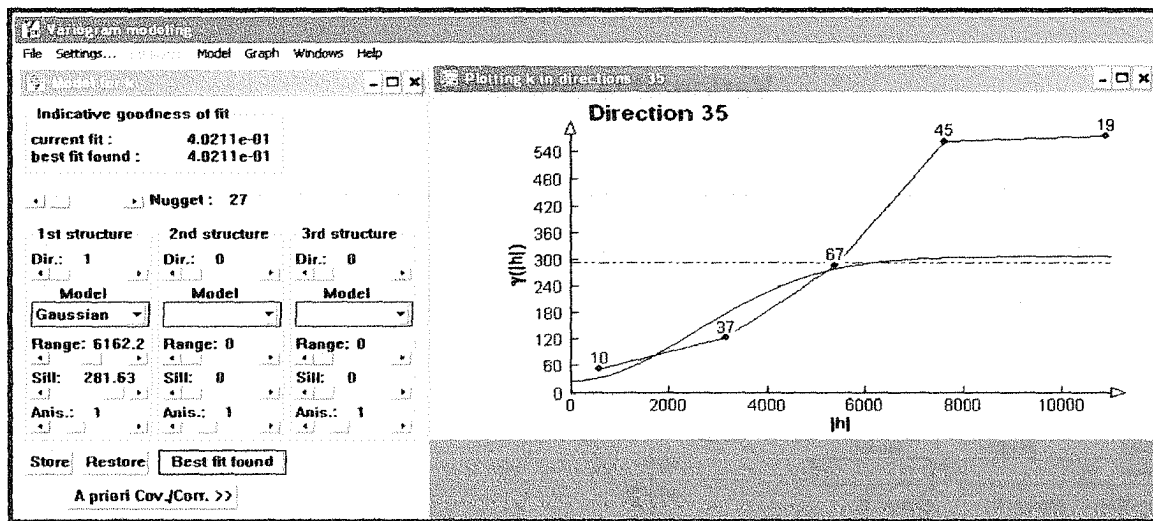


Figura E 6. Variable espesor saturado - b.

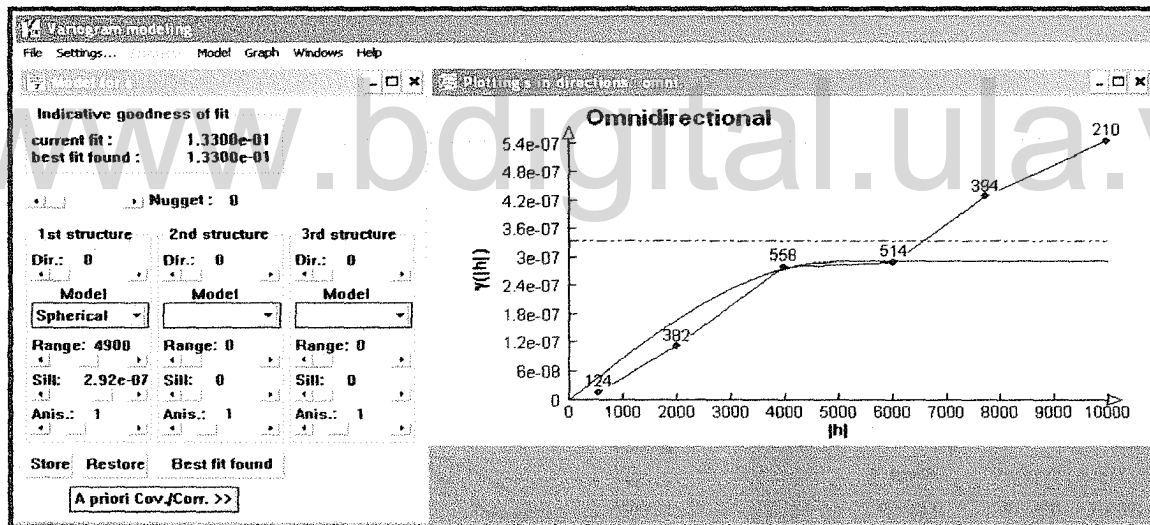


Figura E 7. Variable coeficiente de almacenamiento - S.

ANEXO F

CURVAS SINTÉTICAS DE LA BOMBA

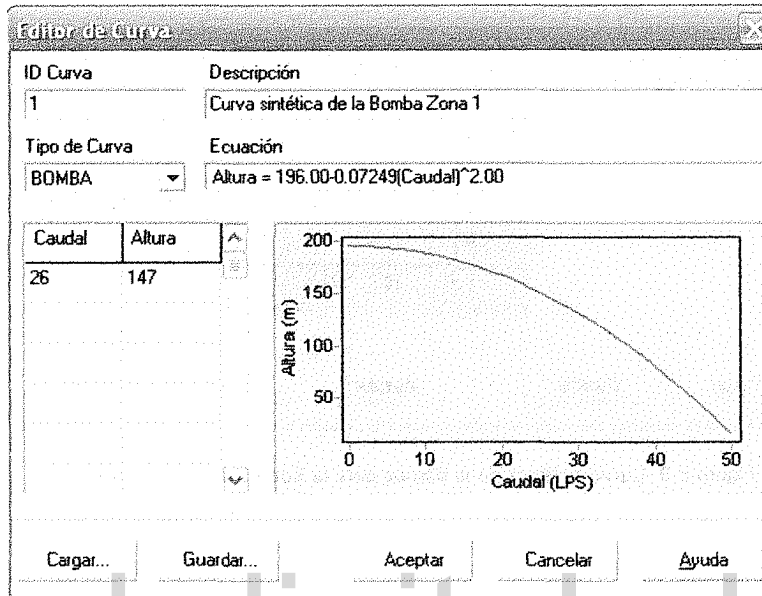


Figura F 1. Curva sintética de la bomba para la Zona 1 del Valle de Quibor.

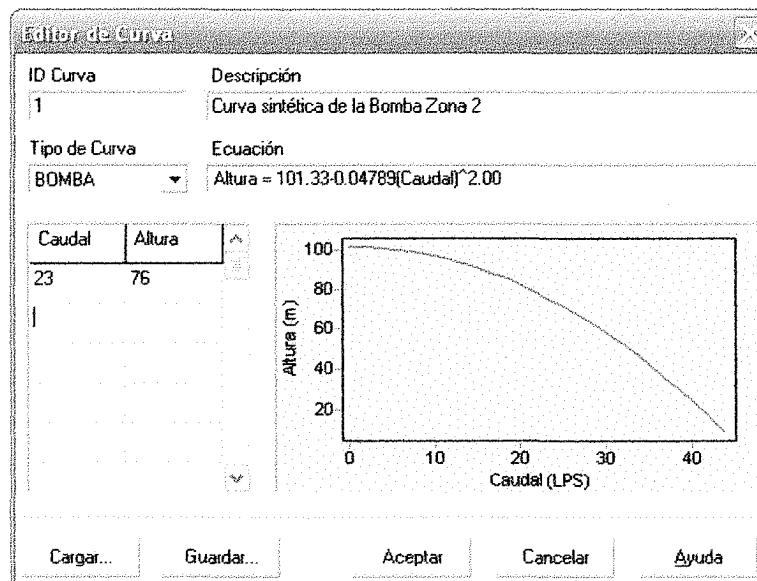


Figura F 2. Curva sintética de la bomba para la Zona 2 del Valle de Quibor.

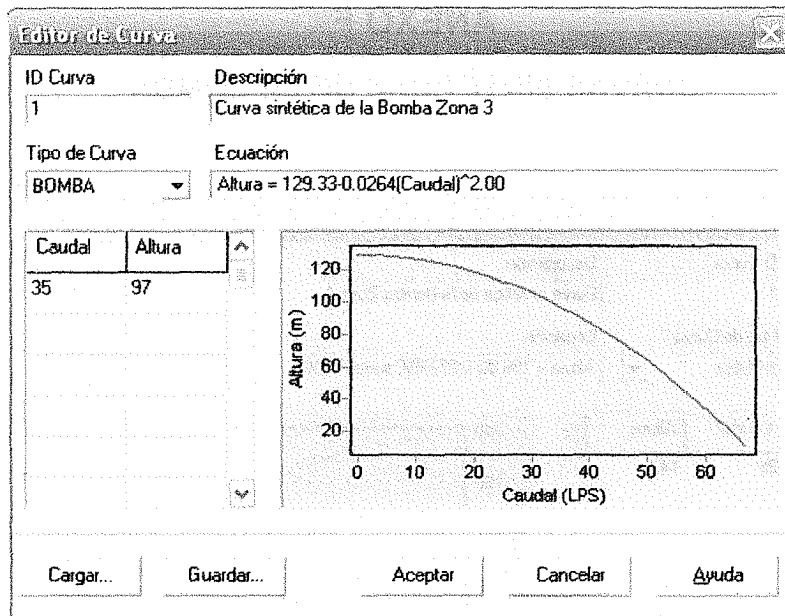


Figura F 3. Curva sintética de la bomba para la Zona 3 del Valle de Quíbor.

www.bdigital.ula.ve