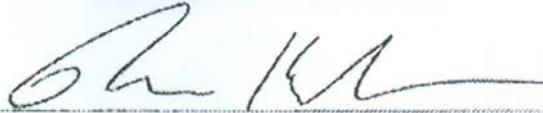
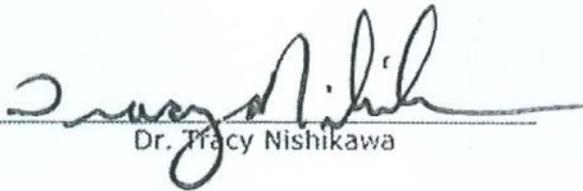


TESIS DEFENDIDA POR
José Rubén Campos Gaytán
Y APROBADA POR EL SIGUIENTE COMITÉ



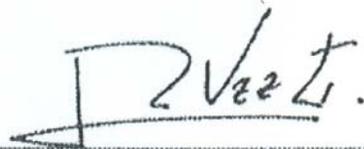
Dr. Thomas Günter Kretzschmar Steinle

Director del Comité



Dr. Tracy Nishikawa

Miembro del Comité



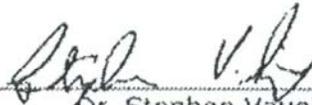
Dr. Rogelio Vázquez González

Miembro del Comité



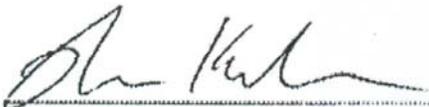
Dr. Carlos Francisco Flores Luna

Miembro del Comité



Dr. Stephen Vaughan Smith

Miembro del Comité



Dr. Thomas Günter Kretzschmar Steinle

*Coordinador del programa de
posgrado en Ciencias de la Tierra*



Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

15 de Febrero de 2008

**CENTRO DE INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA Y DE EDUCACIÓN
SUPERIOR DE ENSENADA**



**PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS
EN CIENCIAS DE LA TIERRA**

**SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL
ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA,
MÉXICO**

TESIS

que para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
DOCTOR EN CIENCIAS

Presenta:

JOSÉ RUBÉN CAMPOS GAYTÁN

Ensenada, Baja California, México, Febrero de 2008.

RESUMEN de la tesis de **José Rubén Campos Gaytán**, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de DOCTOR EN CIENCIAS en CIENCIAS DE LA TIERRA con orientación en GEOFÍSICA APLICADA. Ensenada, Baja California, México. Febrero de 2008.

SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

Resumen aprobado por:



Dr. Thomas Günter Kretzschmar Steinle
Director de Tesis

Se ha desarrollado un modelo del flujo de agua subterránea con el objeto de estudiar el comportamiento del nivel freático y evaluar distintas alternativas de manejo del agua subterránea a futuro en el Acuífero del Valle de Guadalupe, en Baja California, México.

En la simulación del modelo geohidrológico del Acuífero del Valle de Guadalupe se utiliza un modelo del flujo de agua subterránea en dos dimensiones y la información proporcionada por la Comisión Nacional del Agua, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada, así como la generada por trabajos académicos y de investigación realizados en la zona de estudio, sobre las condiciones geohidrológicas que presenta el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Se modifica y mejora un simulador del flujo de agua subterránea desde el punto de vista numérico, al cual se le han integrado subrutinas para considerar los efectos generados por las variables de evapotranspiración y flujo de agua superficial (o drenes).

La calibración del modelo numérico se ha llevado a cabo de manera conjunta para los estados estacionario y transitorio con el objeto de obtener el mejor ajuste posible entre el nivel freático calculado por el simulador con el registro del nivel freático medido en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Con base en el análisis de la información disponible, se determina como fecha de inicio de la simulación el mes de febrero de 1984, y a partir de la misma, se calcula la evolución del acuífero por un período de 21 años, utilizando el intervalo de muestreo de un mes.

Después de obtener los resultados del simulador, se reproducen las configuraciones de la superficie freática para las fechas que se cuenta con observaciones de campo, mayo de 1985, junio de 1988, abril de 1990, mayo de 1998, septiembre de 2001, marzo de 2003, febrero de 2004, abril de 2004, junio de 2004, octubre de 2004 y abril de 2005. En general, la comparación de las configuraciones del nivel freático, observada y calculada, tienen buen ajuste cualitativa y cuantitativamente hablando. En particular, se calcula un indicador de ajuste entre los datos calculados por el simulador numérico y los datos medidos en campo para un número finito de pozos, cuyo resultado es satisfactorio, tomando en cuenta los

objetivos del estudio. Además, en el período completo de simulación (1984-2007) se aprecia una tendencia clara del abatimiento del acuífero.

La validación de los resultados del simulador se realiza mediante la comparación con los datos del nivel freático generados en las campañas de muestreo 1 a 6 (2004-2005), desarrolladas como trabajo complementario de esta tesis.

Se han analizado seis alternativas de manejo del agua subterránea durante el periodo 2007-2025 en el Acuífero del Valle de Guadalupe. A través de la simulación de estas alternativas de manejo del agua subterránea, se ha fijado como objetivo del análisis, la búsqueda del volumen total máximo de descarga de agua subterránea, es decir, el óptimo de acuerdo con los objetivos de esta tesis. Las alternativas de manejo del agua se han clasificado en cuatro tipos de escenarios, los cuales incluyen escenarios diseñados para evaluar los posibles efectos generados por continuar con las operaciones promedio del manejo de agua subterránea vigente, satisfacer una demanda de agua futura ante la presencia de una reducción de la recarga, satisfacer un incremento en la demanda de agua futura ante la presencia de una reducción de la recarga y satisfacer una demanda de agua con un volumen de extracción considerado sustentable.

Finalmente, como resultado de esta tesis se tiene una evaluación hidrogeológica integral que determina las condiciones del recurso hídrico subterráneo y permite planear un manejo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Además, con base en los resultados de esta simulación se pueden establecer criterios técnicos y definir estrategias para el aprovechamiento y la conservación sustentable del agua subterránea.

Palabras clave: Acuífero del Valle de Guadalupe, modelo geohidrológico, agua subterránea, simulación numérica.

ABSTRACT of the thesis of **José Rubén Campos Gaytán**, presented as partial requirement to obtain the DOCTOR IN SCIENCE degree in EARTH SCIENCES with orientation in APPLIED GEOPHYSICS. Ensenada, Baja California, Mexico. February 2008.

SIMULATION OF THE GROUNDWATER FLOW IN THE AQUIFER OF THE GUADALUPE VALLEY, BAJA CALIFORNIA, MEXICO

ABSTRACT

A groundwater flow model was developed in order to study the water table behavior and to evaluate several groundwater management alternatives in the Guadalupe Valley Aquifer, Baja California, Mexico.

During the simulation of the geohydrological model of the Guadalupe Valley Aquifer is used a two-dimensional groundwater flow model and the information proportionate for the National Commission of Water, the State Public Services Commission of Ensenada, as well as the information generated by academic and research works carried out in the study zone, about the geohydrological conditions that present the Guadalupe Valle Aquifer.

A groundwater flow simulator is modified and improved from the numerical point of view. Now, the groundwater flow simulator counts with subroutines to consider the effects of variables as evapotranspiration and surface water flow (or drains).

Both steady-state and transient calibration were carried out in order to obtain the best possible match between the calculated and the measured water table elevation in the Guadalupe Valley Aquifer.

Based on the analysis of the collected information, the beginning of the simulation period is February of 1984, and the evolution of the aquifer for a period of 21 years is calculated, using a sampling interval of one month.

According to the simulator results, are reproduce the configurations of the phreatic surface for those periods with field observations. Among them are the phreatic surfaces of May 1985, June 1988, April 1990, May 1998, September 2001, March 2003, February 2004, April 2004, June 2004, October 2004 and April 2005. In general, the comparison of the phreatic surface configurations, observed and calculated, have a good adjustment qualitative and quantitatively speaking. In particular, is calculated an indicator of adjustment between the calculated data by the numerical simulator and the measured data in the field for a finite number of wells, whose result is satisfactory, according to the thesis objectives. In addition, in the whole simulation period (1984-2007) is appreciated a trend of the water table depletion in the aquifer.

Validation of the simulator results is developed throughout the comparison with the measured water table elevation generated in the six sampling campaign (2004-2005) carried out as a complementary work of this thesis.

Six groundwater management alternatives of the Guadalupe Valley Aquifer (2007-2025) were analyzed. Throughout the simulation of the groundwater management alternatives, the goal of the analysis was to seek the total maximum volume of groundwater discharge (that is, the optimum according to the objectives of this thesis). These alternatives are classified in four types of scenarios, among them are included the scenarios designed to evaluate the possible effects of the current groundwater management alternative, to supply in the future the current volume of groundwater if the recharge of water is reduced, to supply in the future an increment of the current volume of groundwater if the recharge of water is reduced, and to supply in the future a volume of groundwater discharge considered as sustainable.

Finally, as a result of this thesis was developed an integrated hydrogeological evaluation that determines the conditions of the groundwater resource and permits planning a management of the Guadalupe Valley Aquifer. In addition, based on the simulation results can be established a technical criteria and define strategies for the management and sustainable conservation of the groundwater resources.

Key words: Guadalupe Valley Aquifer, geohydrological model, groundwater, numeric simulator.

DEDICATORIA

*A mi madre, María Leticia,
Por su cariño, apoyo y comprensión.*

*A mis hermanos y mis sobrinos,
Por seguir siendo mi fuente de superación.*

*A mis tíos y primos,
Por su apoyo incondicional y afecto.*

*A mi esposa, Claudia Soledad,
Por su amor e incansable apoyo moral, mi complemento.*

*A DIOS
Por disponer este escenario para mí.*

AGRADECIMIENTOS

Al CONACyT por la beca crédito otorgada. Al finalizar ésta el apoyo económico dimanó el fondo de becas de la División de Ciencias de la Tierra del CICESE.

A mi asesor y amigo, Dr. Thomas Kretzschmar, por su apoyo, confianza y valiosa dirección. A los miembros del comité de tesis, Dr. Tracy Nishikawa, Dr. Rogelio Vázquez, Dr. Carlos Flores, Dr. Stephen Smith, y de manera muy especial al Dr. Cecilio Javier Rebollar Bustamante†, por sus valiosos comentarios y sugerencias que enriquecieron ampliamente el contenido de la versión final de esta tesis.

A las distintas instituciones de gobierno y asociaciones, tales como, la Comisión Nacional del Agua, a través de la Gerencia Regional de la Península de Baja California, la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada y el Comité Técnico de Aguas Subterráneas del Valle de Guadalupe, entre otras, así como a los múltiples usuarios locales del recurso hídrico subterráneo, por la información geohidrológica proporcionada para la realización de esta tesis y por permitirme entrar a sus predios para la recolección de muestras de agua. Un agradecimiento muy especial para el Ing. Ladislao Beltrán Gómez†, por la información y ayuda brindada para el desarrollo de este trabajo.

A Martha Elba Barrera, Guadalupe Zepeda, Dolores Sarracino y Citlalli Romero por su ayuda en las labores administrativas. Al personal de la biblioteca del CICESE, en particular, a Lupita Morales y Cecilia González, por sus atenciones.

A Alejandro Hinojosa por su asistencia computacional. A Jaime Calderón, Alejandro Díaz, Rufino García, Alejandro Kurczyn, Isaac Antuna, Armando López, Carlos Vega y Claudia Herrera por su ayuda e invaluable apoyo técnico en campo.

A mis buenos amigos del CICESE: Claudia, Yanina†, Silvia, Adriana, Tere, Carlos, Los Armandos, Sebastian y Jesús.

Muy especialmente a las Familias Campos Gaytán, Moreno Campos, Campos Ferret, Campos Villavicencio, Aguilar Campos, León Campos, León Serrano, León Félix, Félix León y Herrera Oliva.

CONTENIDO

	Página
I. INTRODUCCIÓN.....	1
I.1. Planteamiento del problema.....	2
I.2. Objetivos.....	3
I.3. Descripción de la zona de estudio.....	5
<i>I.3.1. Localización.....</i>	<i>5</i>
<i>I.3.2. Fisiografía.....</i>	<i>8</i>
<i>I.3.3. Geología.....</i>	<i>9</i>
<i>I.3.4. Climatología.....</i>	<i>12</i>
<i>I.3.5. Agua superficial.....</i>	<i>13</i>
<i>I.3.6. Agua subterránea.....</i>	<i>14</i>
II. ANTECEDENTES.....	15
II.1. Censo de aprovechamientos.....	15
II.2. Piezometría.....	20
II.3. Balance de agua subterránea.....	20
II.4. Sólidos totales disueltos (STD).....	22
III. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA.....	24
III.1. Modelo conceptual.....	24
III.2. Simulador numérico.....	26
<i>III.2.1. Código numérico (herramienta computacional).....</i>	<i>26</i>
<i>III.2.2. Modelo matemático.....</i>	<i>27</i>
<i>III.2.3. Modelo numérico.....</i>	<i>29</i>
<i>III.2.4. Soluciones del modelo numérico.....</i>	<i>32</i>
<i>III.2.5. Evapotranspiración.....</i>	<i>32</i>

CONTENIDO (continuación)

	Página
<i>III.2.6. Drenes (flujo de agua superficial).....</i>	36
III.3. Parámetros iniciales del modelo.....	41
<i>III.3.1. Hidrogeología.....</i>	41
<i>III.3.2. Definición del dominio de flujo del sistema de agua subterránea.....</i>	42
<i>III.3.3. Condición de potencial hidráulico inicial.....</i>	46
<i>III.3.4. Intervalo de tiempo de la simulación.....</i>	52
<i>III.3.5. Coeficiente de almacenamiento.....</i>	52
<i>III.3.6. Precipitación.....</i>	53
<i>III.3.7. Infiltración.....</i>	59
<i>III.3.8. Recarga por escurrimientos horizontales.....</i>	60
<i>III.3.9. Volúmenes de extracción.....</i>	69
<i>III.3.9.1. Bombeo agrícola.....</i>	70
<i>III.3.9.2. Bombeo conducido a la ciudad de Ensenada.....</i>	71
<i>III.3.10. Censo de aprovechamientos.....</i>	75
<i>III.3.11. Conductividad hidráulica.....</i>	78
<i>III.3.12. Basamento impermeable.....</i>	85
<i>III.3.13. Superficie topográfica.....</i>	87
<i>III.3.14. Frontera de potencial hidráulico constante.....</i>	93
<i>III.3.15. Frontera de flujo nulo.....</i>	93
<i>III.3.16. Los datos.....</i>	93
IV. RESULTADOS DEL MODELO.....	101
<i>IV.1. Periodo de simulación.....</i>	101
<i>IV.2. Calibración del modelo.....</i>	103

CONTENIDO (continuación)

	Página
IV.3. Análisis del balance regional de agua subterránea con un modelo de simulación de agua subterránea.....	116
IV.4. Validación de la simulación del Acuífero del Valle de Guadalupe.	120
IV.5. Resultados de la simulación.....	122
IV.6. Validación del simulador.....	128
V. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MANEJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA.....	131
V.1. Variables del manejo del agua subterránea.....	132
V.2. Alternativas de manejo del agua subterránea.....	132
V.3. Escenarios simulados.....	133
V.3.1. <i>Alternativa 1: Recarga y descarga promedia para el periodo 2007-2025.....</i>	<i>133</i>
V.3.2. <i>Alternativa 2: Precipitación menor a la precipitación actual y una extracción igual a la extracción actual durante el periodo 2007-2025.....</i>	<i>134</i>
V.3.3. <i>Alternativa 3: Precipitación menor a la precipitación actual y un incremento en la extracción actual, utilizando los pozos existentes, durante el periodo 2007-2025.....</i>	<i>136</i>
V.3.4. <i>Alternativa 4. Precipitación menor a la precipitación actual y una demanda de agua con un volumen de extracción considerado sustentable.....</i>	<i>137</i>
VI. DISCUSIÓN.....	139
VI.1. Discusión del modelo.....	139

CONTENIDO (continuación)

	Página
VI.2. Discusión de la evaluación de alternativas de manejo del agua subterránea.....	146
VII. CONCLUSIONES.....	149
VII.1. Recomendaciones.....	154
VIII. BIBLIOGRAFÍA.....	155
APÉNDICE A.....	163
APÉNDICE B.....	176
APÉNDICE C.....	183
APÉNDICE D.....	191
APÉNDICE E.....	196
APÉNDICE F.....	204
APÉNDICE G.....	208
APÉNDICE H.....	213
ANEXO I.....	214

LISTA DE FIGURAS

Figura		Página
1	Localización de la zona de estudio. a) En escala estatal. El círculo marca la zona de estudio. b) División hidrológica de la parte norte del Estado de Baja California y ubicación de la Cuenca Guadalupe. c) Área total tributaria a la Cuenca Guadalupe.....	6
2	Cuenca Guadalupe. a) Imagen de la cuenca hidrográfica, la hidrología superficial, las estaciones climatológicas y la zona de estudio. b) Imagen del Valle de Guadalupe correspondiente a la aproximación del Acuífero del Valle de Guadalupe.....	7
3	Geología superficial regional del Valle de Guadalupe (INEGI, 1976).....	11
4	Representación en diferencias finitas del dominio de flujo del sistema de agua subterránea. Cuadrícula con nodos al centro de las celdas, donde (Δx) es el espaciamiento en la dirección (x) , (Δy) es el espaciamiento en la dirección (y) , y (h) es la altura freática.....	29
5	Representación gráfica del volumen de evapotranspiración $(\theta e_{i,j})$, como una función de la elevación del nivel freático $(h_{i,j})$, en una celda donde $(I_{e,i,j})$ es la profundidad de extinción y $(T_{s,i,j})$ es la elevación topográfica. Tomada de McDonald y Harbaugh (1988).....	34
6	Perfil a través de la celda (i, j) ilustrando la pérdida de agua por el flujo convergente hacia un dren. Tomada de McDonald y Harbaugh (1988).....	37
7	Factores que afectan la pérdida de agua inmediatamente alrededor del dren: (a) tubería del dren enterrada o con material de relleno, y (b) dren abierto. Tomada de McDonald y Harbaugh (1988).....	38

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
8	Gráfica del volumen de flujo dentro de un dren ($\theta d_{i,j}$) como una función del potencial hidráulico ($h_{i,j}$), en una celda donde la elevación del dren es ($\varepsilon_{i,j}$) y la conductancia es ($\beta_{i,j}$). Tomada de McDonald y Harbaugh (1988).....	40
9	Rasgos hidrológicos y aproximación del dominio de flujo del sistema de agua subterránea. Las fronteras irregulares del Acuífero del Valle de Guadalupe se han sustituido por una configuración de trazos rectos. Las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur corresponden a fronteras impermeables. La frontera sur es de nivel freático constante. Además, se muestra con isolíneas la topografía del valle y sus alrededores.....	44
10	Localización de aprovechamientos de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe, que cuentan con información del registro histórico de la elevación del nivel freático medido en campo, y que se han considerado para el periodo de calibración.....	48
11	Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2007, con base en el registro histórico de la CNA.....	55
12	Esquema de precipitación media mensual, con base en el análisis del registro histórico de la precipitación de la CNA, considerada en la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.....	58
13	Ubicación de puntos de recarga por escurrimientos horizontales (flechas).....	67
14	Porcentaje de escurrimiento mensual promedio registrado en la estación Agua Caliente, con base en el registro histórico del escurrimiento de la CNA.....	68
15	Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos de uso agrícola en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información de Andrade (1992) y Andrade (1997).....	74

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
16	Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos operados por la CESPE, con base en la información del periodo 1993-2002. La línea oscura unida con círculos señala el valor medio.....	75
17	Localización de aprovechamientos de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Fuente: CNA (1998).....	77
18	Ubicación de los aprovechamientos de agua subterránea establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe que cuentan con registro de pozos (columnas litológicas).....	79
19	Columnas litológicas de pozos construidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información proporcionada por la CNA.....	80
20	Código de conductividades hidráulicas (K) (m/año) para el Acuífero del Valle de Guadalupe.....	84
21	Basamento impermeable. a) Contornos de igual profundidad al basamento impermeable, b) Contornos de igual elevación a la topografía irregular del basamento impermeable (msnm)....	86
22	Localización de los aprovechamientos con datos de elevaciones de la topografía superficial en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Fuente CNA (2003).....	89
23	Elevación de la topografía superficial del Acuífero del Valle de Guadalupe, determinada con base en la información reportada por el INEGI y la CNA (2003). Además, se señalan las celdas que cuentan con aprovechamientos de agua subterránea con dato de la elevación del nivel freático medida durante las jornadas de muestreo llevados a cabo como trabajo complementario de esta tesis.....	91
24	Ubicación de los 53 aprovechamientos de agua subterránea con dato medido de la elevación del nivel freático, durante las campañas de Muestreo 1 a 6, que se han utilizado para la validación del modelo.....	95

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
25	Actividades realizadas en las campañas de muestreo. a) Recolección de muestras de agua, b) Medición de niveles freáticos y c) Obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua.....	96
26	Recarga vertical por infiltración en la zona acuífera.....	106
27	Porcentaje de extracción estimado por calibración. a) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1983 a Septiembre de 1995, y b) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1995 a Septiembre de 2005.....	109
28	Porcentaje de extracción estimado por calibración. a) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1984 a Septiembre de 2005. Los círculos señalan un valor promedio del porcentaje de extracción. b) Distribución anual del volumen anual de extracciones durante el periodo 1984-2005 en el Acuífero del Valle de Guadalupe.....	110
29	Tipo de vegetación predominante, árboles de Olivos con altura mayor a los tres metros, en las áreas modeladas con una razón de pérdida por evapotranspiración de 240 mm/año..	112
30	Razón de pérdida por evapotranspiración estimada por la calibración del modelo y que ha sido considerada como constante durante el periodo completo de simulación (1984-2005).....	112
31	Localización de las celdas con drenes que simulan el flujo de agua superficial.....	114
32	Configuraciones de la superficie freática. a) En estado estacionario, fijada como condición inicial en Febrero de 1984, y b) En estado transitorio, Junio de 1988 (52 meses de simulación). En este caso particular de análisis se supone que son las distribuciones del nivel freático observado en el Acuífero del Valle de Guadalupe en las fechas establecidas.....	123

LISTA DE FIGURAS (continuación)

Figura		Página
33	Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Febrero de 2004 (240 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 2005 (254 meses de simulación). En este caso particular de análisis se supone que son las distribuciones del nivel freático observado en el Acuífero del Valle de Guadalupe en las fechas establecidas.....	124
34	Comparación de las elevaciones del nivel freático medidas con las calculadas para calibración del modelo numérico en los estados estacionario y transitorio.....	130
35	Diagrama esquemático que presenta los diferentes sistemas de flujos locales, intermedios y regionales (Modificada de Tóht (1963)).....	142

LISTA DE TABLAS

Tabla		Página
I	Superficie total de la Cuenca Guadalupe.....	5
II	Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1967.....	15
III	Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1977.....	16
IV	Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1988.....	16
V	Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1990.....	17
VI	Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1992.....	17
VII	Censo de aprovechamientos activos 1998 Acuífero BC-07 Valle de Guadalupe.....	18
VIII	Incremento en el total de aprovechamientos hidráulicos existentes por año en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA, 1998).....	19
IX	Volúmenes de recarga y descarga del sistema de agua subterránea del Acuífero del Valle de Guadalupe en 1998 (Beltrán, 1998).....	22
X	Datos de la aproximación del dominio del flujo.....	43
XI	Mediciones de la elevación del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA).....	49
XII	Mediciones de la elevación del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA). Determinación de la condición inicial.....	51
XIII	Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2007, con base en el registro histórico de la CNA.....	54
XIV	Evaluación cuantitativa de la recarga del frente de montaña mediante varios métodos (Wilson y Guan, 2004).....	64

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XV	Distribución mensual de riego agrícola (Andrade, 1997).....	70
XVI	Fecha de inicio de operaciones en los pozos de CESPE.....	72
XVII	Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos de uso agrícola en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información de Andrade (1992) y Andrade (1997).....	74
XVIII	Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos operados por CESPE, con base en la información del periodo 1993-2002.....	75
XIX	Intervalo de valores para la conductividad hidráulica. Tomada de Anderson y Woessner (1992).....	78
XX	Información del registro de pozos (columnas litológicas) para los aprovechamientos de agua subterránea establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, de acuerdo con la información proporcionada por la CNA.....	81
XXI	Datos de la elevación del terreno en los puntos de medición piezométrica de la red de monitoreo del Acuífero 0207 del Valle de Guadalupe (CNA, 2003).....	90
XXII	Elevación de la topografía superficial de las celdas donde se localizan aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con dato de la elevación del nivel freático medida y que ha sido empleada para la validación del modelo.....	92
XXIII	Relación de aprovechamientos de agua subterránea muestreados durante las campañas de Muestreo 1 a 6 en el Valle de Guadalupe.....	97
XXIV	Relación de aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con datos de la elevación del nivel freático estático medido en campo y que se utilizan para su comparación con los resultados de la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Elevaciones del nivel freático estático medido en campo dadas en msnm	102

LISTA DE TABLAS (continuación)

Tabla		Página
XXV	Recarga horizontal debido a escurrimientos que bajan de la sierra.....	107
XXVI	Porcentaje de distribución mensual de la extracción estimada por calibración para los pozos de uso agrícola del Acuífero del Valle de Guadalupe.....	108
XXVII	Parámetros del modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe.....	127
XXVIII	Valores promedio de la relación <i>RMSE</i>	129

SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA EN EL ACUÍFERO DEL VALLE DE GUADALUPE, BAJA CALIFORNIA, MÉXICO

I. INTRODUCCIÓN

El agua es un recurso vital que requiere de la atención inmediata para asegurar su conservación en términos de cantidad y calidad. El crecimiento de la demanda y el desconocimiento de las condiciones de la reserva hidrológica son factores que amenazan la conservación del recurso para años futuros. En las regiones donde la precipitación es poca, y por lo tanto, el desarrollo de fuentes de agua superficial es muy limitado, los recursos hidráulicos subterráneos son muy importantes; por lo que el estudio de estos recursos es necesario, empleando comúnmente para ello el modelado numérico de flujo de agua subterránea.

El Estado de Baja California se caracteriza por su clima semidesértico con baja disponibilidad hidráulica superficial. Sin embargo, en las últimas décadas se han incrementado las actividades agrícolas, urbanas e industriales en la región, lo que implica una creciente demanda de agua; por lo que, el desarrollo económico de la región depende de la disponibilidad de agua subterránea.

El Valle de Guadalupe es uno de los valles más significativos de Baja California, dado que es la región productora de vinos más importante en México. El Valle de Guadalupe depende completamente del agua subterránea extraída de su acuífero. Sin embargo, la naturaleza esporádica de las precipitaciones y de la consecuente recarga del

acuífero, aunadas a la extracción de agua para la vecina ciudad de Ensenada, han convergido para crear una crisis en el abastecimiento del agua.

El abatimiento del nivel freático en el Acuífero del Valle de Guadalupe ha tenido efectos negativos sobre la economía, reflejado por una profundización en la construcción de los nuevos aprovechamientos (Beltrán, 1998a). La complejidad del problema demanda una investigación interdisciplinaria que busque un manejo sustentable de los recursos de agua subterránea de la región, la cual defina como meta principal el estudio del comportamiento dinámico e integral de la hidrología, geología, hidrogeología y climatología, que resultante de la sobre-explotación del Acuífero del Valle de Guadalupe, sirva para apoyar una estrategia de manejo sustentable con sentido económico y político.

I.1. Planteamiento del problema

En la región del Valle de Guadalupe la explotación del recurso hidráulico subterráneo rebasa su capacidad renovable, en consecuencia se ha provocado el abatimiento del nivel freático en toda la zona, por consiguiente se ha disminuido el volumen de agua disponible, y se ha dado origen a la profundización en la construcción de los nuevos aprovechamientos hidráulicos. La importancia de conocer con mayor precisión el funcionamiento del sistema de agua subterránea mediante los modelos geohidrológicos, radica en que éstos últimos pueden aportar elementos técnicos de utilidad para el diseño de nuevas estrategias de operación, las cuales tienen como finalidad realizar una administración adecuada de los recursos hidráulicos subterráneos en la región. El estudio del medio hidrogeológico involucra la formulación correcta de un modelo conceptual, la

selección de los parámetros adecuados para describir espacialmente las propiedades físicas del sistema de flujo y el conocimiento de las condiciones de operación del acuífero.

A pesar de la importancia de esta región analizada, actualmente no existe una evaluación hidrogeológica integral que determine la condición real del agua subterránea y permita planear el manejo del Acuífero del Valle de Guadalupe (Vázquez, 2003).

Con base en lo anterior, el presente trabajo tiene por objetivo desarrollar un modelo hidrogeológico de la región y estudiar el comportamiento del flujo de agua subterránea en el acuífero, lo que permita realizar una administración adecuada de los recursos hidráulicos subterráneos del Acuífero del Valle de Guadalupe.

I.2. Objetivos

El objetivo general del presente trabajo es construir un modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle Guadalupe, simular el flujo de agua subterránea y predecir el comportamiento del nivel freático, como consecuencia del planteamiento de diferentes escenarios de extracción del agua subterránea, empleando para tal efecto la información sobre las condiciones hidrogeológicas que presenta la zona de estudio y el simulador numérico reportado por Campos Gaytán (2002) y Campos-Gaytán y Kretzschmar (2006).

Los objetivos particulares que se plantean en esta tesis son:

- Construir, probar y calibrar un modelo conceptual hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe.
- Estudiar el comportamiento del nivel freático en las condiciones presentes y su relación con los registros anteriores.

- Documentar numéricamente la cantidad y la evolución del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe, lo cual servirá como base para estudios posteriores.
- Aportar elementos de juicio para la toma de decisiones futuras sobre los esquemas de explotación vigentes y/o factibles de implementar, con base en el análisis de diferentes escenarios de extracción del agua subterránea.
- Generar un banco de datos hidrogeológicos actualizados para enriquecer el conocimiento sobre los recursos hidráulicos subterráneos existentes en la región.
- Para alcanzar los objetivos definidos se emplea el simulador de flujo de agua subterránea presentado por Campos Gaytán (2002) y Campos-Gaytán y Kretschmar (2006), al cual se le:
 - ◆ Integran rutinas para la evaluación numérica de los procesos de evapotranspiración y flujo de agua superficial, así como para el despliegue gráfico de datos, entre otras.

I.3. Descripción de la zona de estudio

I.3.1. Localización

La zona de estudio forma parte de la Cuenca Guadalupe (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT), 2001), la cual se ubica en el noroeste del Estado de Baja California, cuenta con una superficie total hasta su desembocadura en el mar de ~2,400 km² (Hernández y Mejía, 2003) y pertenece a la Región Hidrológica 1 (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y Gobierno del Estado de Baja California, 1995) de la vertiente del Océano Pacífico (Tabla I y Figura 1). La Cuenca Guadalupe se localiza ~37 km de la ciudad de Ensenada, entre los paralelos 31°51' y 32°15' de latitud norte, y los meridianos 115°52' y 116°51' de longitud oeste; colindando al norte con la Subcuenca Las Palmas, al sur con las subcuencas Ensenada y Maneadero, al este con la Subcuenca Laguna Salada, y al oeste con el Océano Pacífico (Beltrán, 2001).

Tabla I. Superficie total de la Cuenca Guadalupe

Número	Subcuenca	Área en km ²	Fuente:
1	Ojos Negros	1,094	Campos Gaytán (2002).
2	Guadalupe	836	Andrade (1997).
3	La Misión	455	
Superficie Total:	Cuenca Guadalupe	~2,400	Hernández y Mejía (2003).

Los escurrimientos superficiales de la Cuenca Guadalupe tienen su origen en la Sierra Juárez, pasan a través de los Valles de Ojos Negros y Guadalupe, y terminan en el Océano Pacífico a la altura del poblado La Misión (Figura 2).

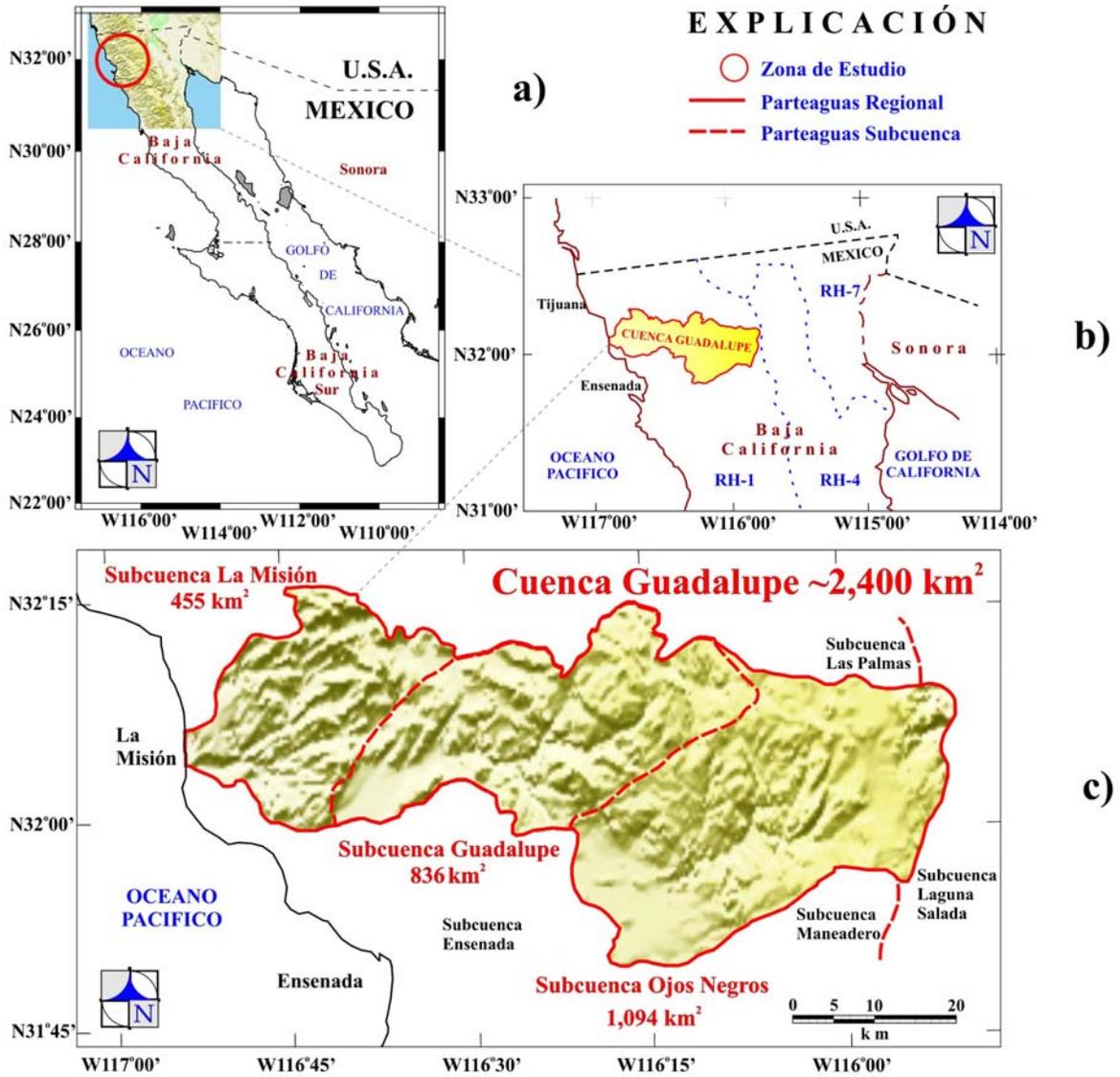


Figura 1. Localización de la zona de estudio. a) En escala estatal. El círculo marca la zona de estudio. b) División hidrológica de la parte norte del Estado de Baja California y ubicación de la Cuenca Guadalupe. c) Área total tributaria a la Cuenca Guadalupe

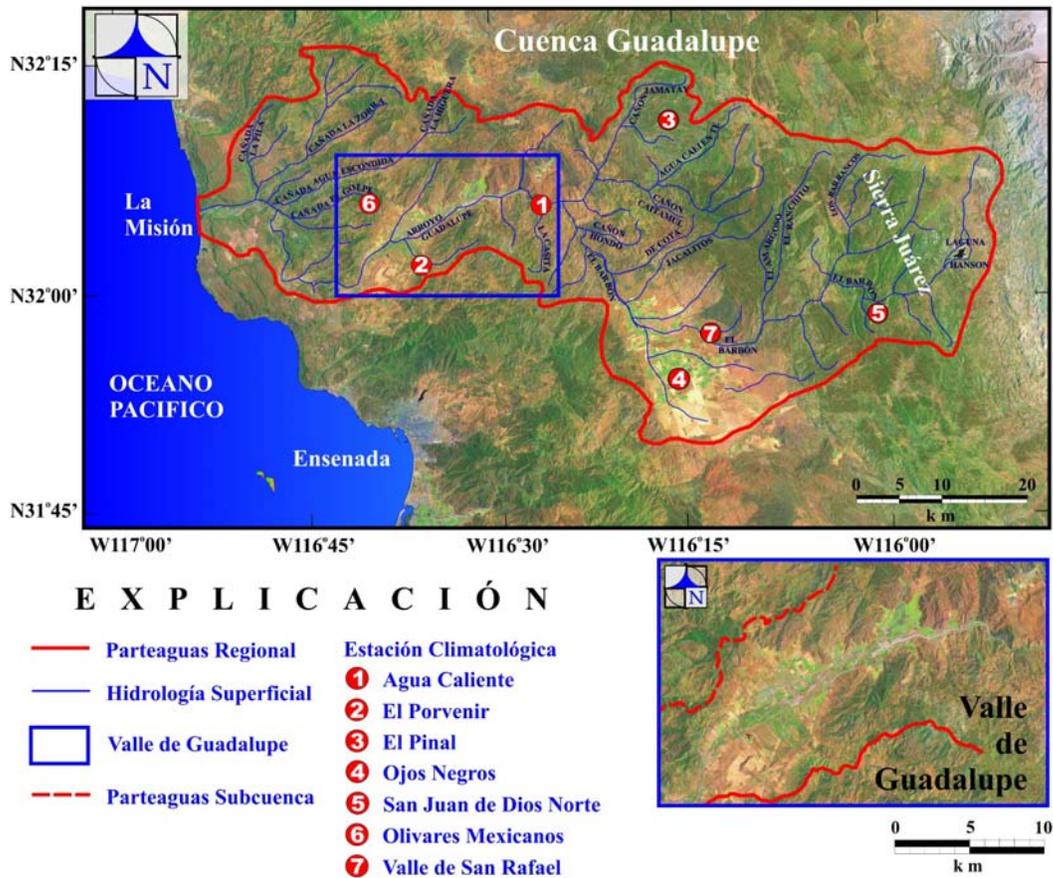


Figura 2. Cuenca Guadalupe. a) Imagen de la cuenca hidrográfica, la hidrología superficial, las estaciones climatológicas y la zona de estudio. b) Imagen del Valle de Guadalupe correspondiente a la aproximación del Acuífero del Valle de Guadalupe

La zona de estudio corresponde al acuífero que ocupa en su totalidad al Valle de Guadalupe, el cual está definido por una superficie de forma alargada y caprichosa burdamente orientada de noreste a suroeste (Andrade, 1992). El Acuífero del Valle de Guadalupe tiene una superficie de $\sim 60 \text{ km}^2$, medido desde la entrada del Arroyo Guadalupe al valle hasta la parte suroeste del poblado El Porvenir. El acceso a la zona de estudio es por la Carretera Federal No. 3 Ensenada-Tecate (Beltrán, 2001).

1.3.2. Fisiografía

El Arroyo Guadalupe drena la zona de estudio y tiene su desembocadura hacia el Océano Pacífico en el poblado La Misión, $\sim 50 \text{ km}$ al norte de la ciudad de Ensenada. El área de drenaje del Arroyo Guadalupe, medido desde el origen de sus escurrimientos en la Sierra Juárez hasta la parte aguas abajo de la estación climatológica Boquilla de Santa Rosa, es de $\sim 1,900 \text{ km}^2$ (Andrade, 1992).

El Acuífero del Valle de Guadalupe está completamente contenido dentro del área de drenaje del Arroyo Guadalupe. Este acuífero se encuentra localizado en un valle intermontano, que cuenta con una topografía superficial cuyas elevaciones medias están en el rango de 300 a 400 m sobre el nivel del mar (msnm), cuenta con un drenaje superficial predominante del tipo dendrítico con dirección hacia el suroeste principalmente y está rodeado por un sistema montañoso que se eleva hasta los 500 y 700 msnm. Hacia el borde este de la zona de estudio se localiza un sistema de montañas conocido como Sierra Blanca, el cual alcanza hasta 1,200 msnm (Andrade, 1992; Andrade, 1997; Beltrán, 1998a). El Acuífero del Valle de Guadalupe se ha sido originado por una secuencia de eventos tectónicos que sucedieron en Baja California, los cuales produjeron fallas regionales y

modelaron las características geométricas del subsuelo en el que se encuentran alojados los recursos hidráulicos subterráneos, contenidos en depósitos sedimentarios permeables (Beltrán, 2001).

1.3.3. Geología

Factores de carácter geológico intervienen de manera importante en el origen del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los diversos procesos de fallamiento que ocurrieron en la zona de estudio son los causantes de la formación de cuando menos dos fosas, alineadas sensiblemente de noreste a suroeste, actualmente rellenas con materiales no consolidados como producto posterior de acarreo y depositación (Andrade, 1997), que componen el acuífero. En la porción noreste del valle se encuentra la fosa Calafia y en el margen suroeste la fosa El Porvenir. La fosa Calafia de forma triangular a modo de un embudo cerrado en el fondo, con un espesor aproximado de relleno de 350 m en su eje mayor vertical (Andrade, 1992; Beltrán, 2001). La fosa El Porvenir, tiene una forma geométrica concéntrica, semioval de mayor amplitud horizontal que la fosa Calafia, pero con un basamento menos profundo, alcanzando una profundidad máxima de 100 m (Beltrán, 1998b; CNA, 1998). Los materiales gruesos acumulados en las bases de las fosas en cuestión y hacia la entrada del valle han sido aportados por las sierras que rodean la zona de estudio, posteriormente por efecto de la meteorización de la Sierra Juárez, principalmente, dichas fosas fueron rellenas por depósitos granulares que han sido transportados por los escurrimientos que drenan la cuenca (Beltrán, 2001).

De acuerdo con el levantamiento geológico superficial, interpretado y publicado por el INEGI (1976), regionalmente, las formaciones geológicas expuestas en la Cuenca

Guadalupe, el Valle de Guadalupe y su área circundante están representadas por rocas ígneas intrusivas y extrusivas, rocas metamórficas y por depósitos aluviales (Figura 3).

Las rocas ígneas intrusivas son las que afloran con mayor abundancia en la zona de estudio y su vecindad inmediata, están representadas por rocas ígneas cristalinas de origen plutónico, constituidas en orden de su abundancia por granodioritas, granitos, dioritas y gabros.

Las rocas ígneas extrusivas afloran principalmente hacia el oeste de la Zona El Porvenir (porción suroeste de la zona de estudio). Estas rocas están constituidas por andesitas y riolitas, tobas andesitas y riolitas, así como por otras rocas ígneas extrusivas no clasificadas.

Las rocas metamórficas, con menor abundancia de afloramiento, están expuestas hacia el este de la Zona El Porvenir (parte central-este de la zona de estudio), y se encuentran representadas por esquistos y pizarras.

Los depósitos aluviales integran el Acuífero del Valle de Guadalupe y están formados por materiales granulares no consolidados medianamente clasificados. Hacia la parte suroeste de la Zona El Porvenir, algunos cerros y lomeríos muestran la existencia de conglomerados acomodados a modo de abanicos aluviales medianamente consolidados.

Al menos tres sistemas de fallamiento pueden distinguirse en la zona de estudio. El primer sistema de fallamiento está compuesto por varias fallas normales localizadas hacia el oeste de la Zona Calafia (borde norte de la zona de estudio). Las fallas que constituyen este primer sistema tienen un rumbo que varía desde NE 30° SO hasta NE 40° SO. Como ejemplo de las fallas que pertenecen a este sistema se puede mencionar a las fallas El Porvenir y Guadalupe. Por otro lado, dentro del segundo sistema de fallamiento se puede

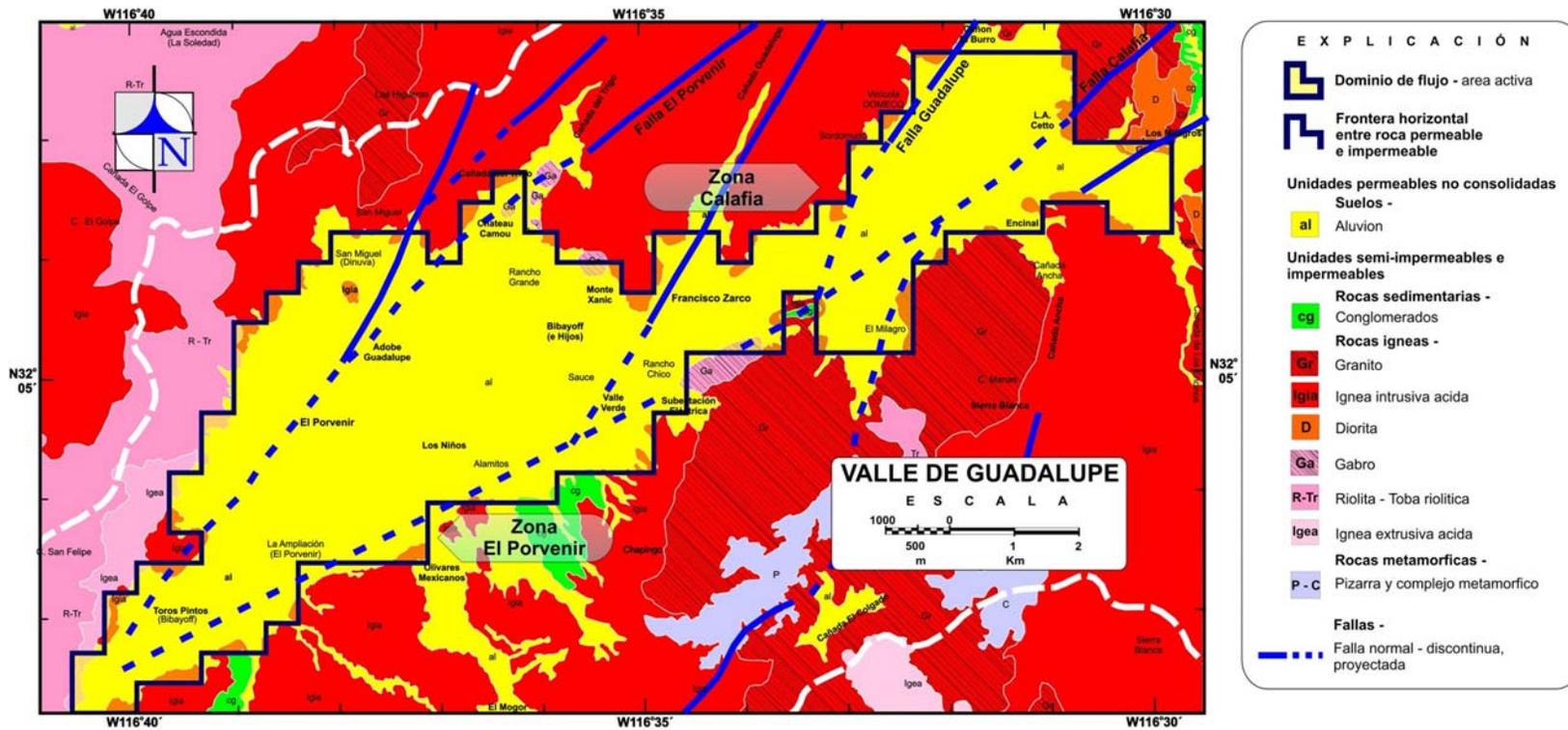


Figura 3. Geología superficial regional del Valle de Guadalupe (INEGI, 1976)

señalar a la Falla Calafia, que también es una falla normal, pero de posterior ocurrencia, localizada al este de la Zona Calafia (extremo noreste de la zona de estudio). El rumbo de este arreglo de fallas es NE 45° SO. Un tercer sistema de fallas se manifiesta con rumbos preferenciales ~NO-SE y está integrado por estructuras de carácter regional que transgreden comúnmente los límites del Estado de Baja California (Andrade, 1997). A este sistema de estructuras pertenece la falla localmente denominada como Falla El Barbón, la cual se localiza en la porción noreste del valle y corresponde a una falla del tipo normal (Andrade, 1992).

1.3.4. Climatología

De acuerdo con la Clasificación Climática de Köppen, modificada por García (1981), el clima del Valle de Guadalupe es del tipo semi-árido, subtipo moderado, con precipitaciones principalmente en invierno (Diciembre a Marzo). La temperatura media anual varía de 12°C a 18°C (Beltrán, 1998a; Escolero y Hernández, 1992).

La información climatológica utilizada en la simulación del flujo de agua subterránea es parte del registro de datos monitoreados en las estaciones climatológicas de Agua Caliente (64), El Porvenir (149), El Pinal (012), Ojos Negros (025), San Juan de Dios Norte (039), Olivares Mexicanos (026) y Valle de San Rafael (106), llevado a cabo por la CNA dentro de la Cuenca Guadalupe (Figura 1c). La precipitación es marcadamente temporal, presentándose durante el periodo Noviembre-Abril y produciendo un valor de la precipitación media anual en el orden de los 350 mm/año. Con base en los resultados de estudios previos, este valor es aproximadamente igual a los reportados en Ruiz *et al.* (2006), Beltrán (1998a) y Andrade (1997) para la zona de estudio.

1.3.5. Agua superficial

La cuenca del Arroyo Guadalupe está compuesta por diversos arroyos y corrientes que en su mayoría se originan en la porción oeste de la Sierra Juárez, los cuales descienden y drenan la sierra de forma más o menos brusca desde elevaciones mayores a los 1,800 msnm y eventualmente fluyen hacia el Arroyo Guadalupe (Andrade, 1992).

El Arroyo Guadalupe es una corriente efímera que recibe la contribución de varios tributarios, entre ellos, El Barbón, El Ranchito, Los Barrancos, Jacalitos, Agua Caliente, Cañón Jamatay y Cañón del Burro (Figura 2a).

El arroyo El Barbón drena la Sierra Juárez hacia el oeste. Este arroyo cambia la dirección de su escurrimiento aguas abajo de la Sierra Juárez al pasar por diversos cañones (Cañón Hondo y Cañón Agua Caliente), hasta que alcanza el valle donde se origina el Arroyo Guadalupe. Conforme el arroyo El Barbón fluye aguas abajo recibe las contribuciones de varios tributarios importantes, tales como, Los Barrancos y El Ranchito (Ponce *et al.*, 1999). Tras recibir la contribución de El Ranchito, el arroyo El Barbón fluye aguas abajo del sistema de montañas que integran la Sierra Juárez y después escurre tangencialmente al Valle de Ojos Negros. Más tarde, conforme el arroyo El Barbón drena hacia aguas abajo recibe los efluentes de los arroyos Agua Caliente y Jamatay, convirtiéndose en el Arroyo Guadalupe. El curso de este arroyo continúa por aproximadamente 20 km hacia el suroeste, hasta que cambia la dirección del mismo a oeste-suroeste, mediante una curva amplia, aproximadamente a la altura de los poblados Francisco Zarco y El Porvenir. Después de que el arroyo El Barbón pasa por la estación climatológica de Agua Caliente drena a través de un área aproximadamente plana conocida

como Valle de Guadalupe. El Arroyo Guadalupe escurre aguas abajo hacia la subcuenca de La Misión, pasa por el Cañón de la Boquilla de Santa Rosa y termina en el Océano Pacífico.

1.3.6. Agua subterránea

La depresión topográfica que forma el Valle de Guadalupe, con una superficie de ~60 km², está cubierta por materiales aluviales, los cuales varían desde arenas y gravas en la Zona Calafia, a arenas y arcillas en la Zona El Porvenir. El agua para la agricultura y para necesidades domésticas del propio valle, así como para satisfacer parcialmente la demanda de consumo humano en la ciudad de Ensenada se extrae exclusivamente del Acuífero del Valle de Guadalupe.

La elevación del nivel freático es dinámica; por lo tanto, esta varía en espacio y tiempo por efecto de la recarga y descarga por bombeo.

El Acuífero del Valle de Guadalupe es alimentado por diversas fuentes, las cuales incluyen: (1) recarga horizontal, que consiste de (a) flujo superficial y subterráneo del Arroyo Guadalupe en la entrada del valle por el borde noreste, y (b) flujo subterráneo distribuido debido a escurrimientos en las montañas circundantes; (2) recarga vertical, constituida por la percolación por precipitación y percolación del volumen irrigado en exceso.

La descarga natural del Acuífero del Valle de Guadalupe ocurre horizontalmente por la parte suroeste del valle y se debe principalmente a la existencia de un gradiente del potencial hidráulico.

II. ANTECEDENTES

El Acuífero del Valle de Guadalupe, los parámetros geohidrológicos y las condiciones de operación del mismo se han estudiado previamente. A continuación se presenta solamente los resultados de los trabajos previos, tocante al incremento en el número de aprovechamientos, el comportamiento histórico de la elevación del nivel freático, así como la cantidad y la calidad del agua subterránea en la zona de estudio, los cuales tienen semejanza y relevancia con los resultados generados en esta tesis.

II.1. Censo de aprovechamientos

En el año de 1967 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) realizó un censo de aprovechamientos en el Acuífero del Valle de Guadalupe. En aquel entonces la SARH contabilizó un total de 62 pozos perforados, de los cuales 42 eran pozos profundos y 20 pozos a cielo abierto (o norias). Del total de aprovechamientos de agua subterránea, 44 pozos eran para riego agrícola, 10 pozos para uso doméstico y 8 pozos para usos múltiples (Tabla II):

Tabla II. Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1967

Zona geohidrológica	Pozos perforados	Uso		
		Doméstico	Múltiple	Riego
Valle de Guadalupe	62	10	8	44

Conforme transcurre el tiempo se genera un incremento en el número de aprovechamientos de agua subterránea construidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Para el año de 1977 se reporta la existencia de 295 obras, con una extracción de 21.0 Mm³ (Comisión Nacional del Agua (CNA), 1998). Los distintos aprovechamientos de agua subterránea censados en aquella fecha, se clasifican como 181 pozos, 112 norias y 2 manantiales (Tabla III):

Tabla III. Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1977

Año	Total de obras	Pozos	Norias	Manantiales
1977	295	181	112	2

Más tarde, a través de un estudio de actualización piezométrica realizado en 1988 se detectaron 409 aprovechamientos (CNA, 1998) (Tabla IV). Sin embargo, no se menciona nada, en el contenido del estudio de actualización, sobre la clasificación y/o el uso de los aprovechamientos de agua subterránea existentes a la fecha.

Tabla IV. Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1988

Año	Total de obras
1988	409

De acuerdo con información de la CNA (1990), a la fecha de publicación de este informe técnico, se reporta la existencia de un total de 760 aprovechamientos hidráulicos. Estos aprovechamientos hidráulicos corresponden a 500 obras activas (de las cuales 176 son pozos profundos, 312 son norias y 12 manantiales), 213 obras inactivas (de las cuales 79 son pozos profundos y 134 son norias), y 47 obras destruidas (de las cuales 21 son pozos profundos y 26 son norias) (Tabla V):

Tabla V. Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1990

Aprovechamientos de agua subterránea	Activos	Inactivos	Destruídos	Total
Pozos profundos	176	79	21	276
Norias	312	134	26	472
Manantiales	12			12
Total	500	213	47	760

Por otro lado, en un censo de aprovechamientos de agua subterránea llevado a cabo por personal del organismo regulador del agua, se identificó un total de 771 aprovechamientos de agua subterránea distribuidos en todo el espacio que conforma el Valle de Guadalupe (Andrade, 1997). De esta suma, sólo 525 eran aprovechamientos activos, de los cuales 188 eran para uso doméstico y abrevadero, 330 eran para uso agrícola, 2 para uso industrial, 4 para el abastecimiento de ganado y 1 manantial; los restantes 246 aprovechamientos se encontraban inactivos (Tabla VI):

Tabla VI. Censo de aprovechamientos de agua subterránea en 1992

Aprovechamientos de agua subterránea						
Usos						
	Doméstico y abrevadero	Agrícola	Industrial	Ganado	Manantial	Total
Activos	188	330	2	4	1	525
Inactivos						246
Total						771

En el año de 1998, la CNA desarrolló un censo de aprovechamientos de agua subterránea con la finalidad de conocer el número de obras existentes en el Acuífero del Valle de Guadalupe. El resultado del censo muestra un total de 796 aprovechamientos, de

los cuales 418 son obras activas. Del número total de obras activas 130 corresponden a pozos (de los cuales 106 son para uso agrícola, 9 para uso doméstico, 11 para uso público urbano, 2 para uso pecuario, 1 para uso industrial y 1 para uso acuícola), 287 a norias (de las cuales 122 son para uso agrícola, 134 para uso doméstico, 1 para uso público urbano, 8 para uso pecuario, 4 para servicios y 18 para otros usos) y 1 a manantiales (para uso doméstico) (Tabla VII):

Tabla VII. Censo de aprovechamientos activos 1998 Acuífero BC-07 Valle de Guadalupe

Uso	Tipo de obra			Total
	Noria	Pozo	Manantial	
Agrícola	122	106		228
Doméstico	134	9	1	144
Público urbano	1	11		12
Pecuario	8	2		10
Servicios	4			4
Industrial		1		1
Acuícola		1		1
Otros usos	18			18
Total	287	130	1	418

Mientras que 374 aprovechamientos son obras inactivas, de las cuales 312 son norias, 65 pozos y 1 manantial. De acuerdo con los resultados de este censo, las obras inactivas equivalen al 47% del total de obras existentes, y aproximadamente el 85% de las obras inactivas corresponde a las 312 norias, que se encuentran ubicadas principalmente en la zona urbana de los poblados Francisco Zarco y El Porvenir. Lo anterior, es un reflejo de que en las comunidades rurales señaladas ya se cuenta con el servicio de agua potable, suministrada por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE).

La batería de 10 pozos activos, operados por la CESPE, para la extracción de agua con fines de uso público-urbano en la ciudad de Ensenada, obtienen un volumen medio anual de 9.5 Mm³. De los 418 aprovechamientos de agua subterránea existentes en el Acuífero del Valle de Guadalupe, los pozos de CESPE (solamente 10 de ellos) obtienen hasta un 48% del total de la extracción, por lo tanto, la CNA recomendó en 1998 que se lleve un control sobre sus extracciones (CNA, 1998).

Como resultado del censo de aprovechamientos de agua subterránea realizado en 1998 por la CNA, se evidencia un incremento gradual del número de obras establecidas para la extracción de aguas subterráneas. La evolución del número de aprovechamientos en el Acuífero del Valle de Guadalupe ha sido de la siguiente forma: 62 aprovechamientos en el año de 1967; 295 aprovechamientos en el año de 1977; 409 aprovechamientos en el año de 1988; 760 aprovechamientos en el año de 1990, y 796 aprovechamientos de agua subterránea en el año de 1998 (Tabla VIII):

Tabla VIII. Incremento en el total de aprovechamientos hidráulicos existentes por año en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA, 1998)

Año	Tipo de obra			Total
	Noria	Pozo	Manantial	
1967	20	42		62
1977	112	181	2	295
1988				409
1990	472	276	12	760
1998	599	195	2	796

II.2. Piezometría

Los resultados de un estudio de la SARH (1982) indican que la precipitación media anual del año de 1977 es de 291.30 mm, y que el valor de la profundidad medida del nivel freático estático es de 1.0 y 30.0 m, para la profundidad medida mínima y máxima, respectivamente, con una profundidad promedio de 10.42 m; Por otro lado, señala que la precipitación media anual del periodo 1978-1982 fue de 595 mm, y cuyas profundidades del nivel freático medidas fueron en el rango de 0.50 a 11.71 m, con una profundidad media de 3.67 m.

Andrade (1997) señala una depresión casi general en el acuífero. En la Zona Calafia existe un hundimiento, localizado en un área próxima al trazo de la carretera, que alcanza valores cercanos a los 21 m de profundidad, y la depresión restante de la misma fosa, con valores sensiblemente cerca a los 15 m de profundidad con relación al terreno, se ha ampliado notablemente invadiendo localmente al valle a lo largo del curso del Arroyo Guadalupe. El mismo efecto depresivo se manifiesta en la Zona El Porvenir, alcanzando valores máximos ligeramente mayores a los 10 m de profundidad y mínimos en el orden de los 4 m de profundidad con respecto a la superficie del terreno.

II.3. Balance de agua subterránea

Existen diferentes métodos para la estimación del volumen de recarga y descarga de un sistema de agua subterránea. Varios de los cuales son métodos físicos, químicos y numéricos que se han aplicado para estudiar la recarga y descarga, en las regiones áridas y semiáridas (Wilson y Guan, 2004; Scanlon *et al.*, 2002). A partir de la década de los setentas, en el sistema de agua subterránea del Acuífero del Valle de Guadalupe se ha

empleado el balance de agua para analizar como afectan las fluctuaciones del nivel freático al volumen de recarga y descarga.

Durante un estudio desarrollado por la SARH (1977) se concluyó que los recursos de agua subterránea son el principal suministro de agua en el valle, que la recarga principal del acuífero está constituida por la infiltración de escurrimientos superficiales del Arroyo Guadalupe y demás arroyos que drenan las montañas de los alrededores. El volumen de extracción de agua subterránea de 21 Mm³/año es mayor que el volumen de recarga anual. La recarga total es de ~18 Mm³/año, que restándole al volumen anual de bombeo resulta un déficit de 3 Mm³/año, lo cual significa que el Acuífero del Valle de Guadalupe está sobre-explotado y este volumen ha sido tomado del almacenamiento.

Andrade (1997) calculó una recarga total del Acuífero del Valle de Guadalupe equivalente a 24.28 Mm³, una descarga total de 25.18 Mm³, y como resultado de la diferencia entre ambos parámetros un cambio de almacenamiento negativo de -0.91 Mm³.

Una ecuación del balance de agua subterránea para el sistema del Acuífero del Valle de Guadalupe queda de la siguiente forma (Beltrán, 1998b):

$$Eh + Rv - (Sh + Evt + B) = \pm CVA \quad (1)$$

Donde Eh representa las entradas horizontales, Rv la recarga vertical, Sh las salidas horizontales, Evt la evapotranspiración, B el bombeo, y CVA el cambio de almacenamiento; cuyos valores están dados en Mm³. Los resultados de la investigación de Beltrán (1998b) señalan un volumen de 25.22 Mm³ para entradas horizontales (Eh), 5.41

Mm³ para la recarga vertical (Rv), 0.51 Mm³ para las salidas horizontales (Sh), 3.43 Mm³ para evapotranspiración (Evt), 19.93 Mm³ para el bombeo (B), y +6.76 Mm³ para el cambio de almacenamiento (CVA) (Tabla IX).

Tabla IX. Volúmenes de recarga y descarga del sistema de agua subterránea del Acuífero del Valle de Guadalupe en 1998 (Beltrán, 1998b)

Eh Entradas horizontales Mm ³	Rv Recarga Vertical Mm ³	Sh Salidas horizontales Mm ³	Evt Evapotranspiración Mm ³	B Bombeo Mm ³	CVA Cambio de almacenamiento Mm ³
25.219	5.414	0.509	3.430	19.930	+6.764

Beltrán (1998b) puntualiza que el Acuífero del Valle de Guadalupe se encuentra en equilibrio. Además, con base en la información piezométrica de 1990 y 1998 realizó un balance del agua subterránea y determinó que el acuífero presentaba un cambio de almacenamiento favorable de 6.8 Mm³/año. Como producto de la recarga extraordinaria, propiciada por las altas precipitaciones de 1998, se generó un incremento en la disponibilidad del acuífero de 59.4 Mm³ (Beltrán, 1998b).

II.4. Sólidos totales disueltos (STD)

En 1977 la SARH hizo el análisis de los parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, colectada en pozos localizados a lo largo y ancho del Acuífero del Valle de Guadalupe, y con base en los resultados de dicho análisis señala que el rango de calidad del agua cambia de agua fresca a agua salobre, con una concentración de STD que varía de 600

a 10,000 ppm, respectivamente, siendo predominantes las concentraciones menores a 2,000 ppm.

Por otro lado, con base en los resultados de un análisis de parámetros fisicoquímicos realizado en el Valle de Guadalupe por la SARH (1982), se indica que, en general, la calidad del agua se ha mantenido relativamente sin cambio, puesto que el contenido de STD varía de 352 ppm a 4,460 ppm, es decir, ubicándose nuevamente en un rango de calidad del agua que va de agua fresca a agua salobre, respectivamente, y con una concentración media de 1,200 ppm.

III. METODOLOGÍA PARA LA SIMULACIÓN DEL FLUJO DE AGUA SUBTERRÁNEA

En esta sección se explican algunos conceptos básicos empleados para la simulación del flujo de agua subterránea, con la finalidad de introducir al lector sobre el marco de referencia conceptual en hidrogeología. Además, se analiza la metodología propuesta por Anderson y Woessner (1992), Fetter (1994) y Kresic (1997) como criterio para diseñar un modelo de flujo de agua subterránea y se define el modelo conceptual hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe.

III.1. Modelo conceptual

Para hacer una evaluación adecuada de los recursos hidráulicos subterráneos, es necesario integrar información proveniente de diferentes disciplinas científicas en un modelo que represente el comportamiento hidráulico del acuífero. Es a partir de la interpretación de las mediciones geofísicas, hidrológicas, geológicas, hidrogeológicas y climatológicas que puede proponerse un modelo conceptual del flujo de agua subterránea para una zona determinada. Es importante definir antes de iniciar la descripción del modelo, lo que se entiende en la literatura como un modelo hidrogeológico conceptual. Tomando como referencia el texto de Anderson y Woessner (1992): **“Un modelo hidrogeológico conceptual es una representación gráfica del sistema de flujo de agua subterránea que tiene como propósito construir una versión simplificada del problema real y organizar los datos de campo relacionados al mismo, de tal forma que**

el sistema pueda ser analizado”. En el proceso de la elaboración del modelo es necesario hacer simplificaciones, ya que una reconstrucción completa del sistema real no es factible.

Los elementos que conforman el modelo conceptual del Acuífero del Valle de Guadalupe son (1) definición espacial y a profundidad del dominio del modelo, (2) condiciones hidrogeológicas en las fronteras, (3) propiedades físicas de los materiales del subsuelo, (4) variables externas al sistema (por ejemplo, climatología), (5) aprovechamiento de agua subterránea.

El modelo conceptual del Acuífero del Valle de Guadalupe, empleado durante el período completo de simulación estudiado en esta tesis, corresponde a un acuífero libre de medio heterogéneo, localizado sobre un fondo impermeable de topografía irregular, que cuenta con un flujo horizontal en régimen transitorio. Las fronteras norte, este, oeste, inferior, así como la mayor parte de la frontera sur del dominio de flujo en el acuífero se consideran impermeables, por lo tanto, se incorporan en el simulador como fronteras de flujo nulo; con excepción de los puntos donde los escurrimientos de la sierra llegan al valle, ya que estos, se consideran como fronteras de flujo conocido. Por otro lado, con base en la información del registro histórico de elevaciones del nivel freático proporcionado por la CNA, se considera una frontera suroeste de nivel freático constante, ya que la elevación del nivel freático medida hacia el suroeste de la Zona El Porvenir, ha variado menos de dos metros durante el periodo monitoreado (Apéndice C. Hidrogramas; Hidrograma del Pozo: N-21, Celda: 21,4). El acuífero es alimentado por los escurrimientos de la sierra, por infiltración del agua de lluvia en el acuífero y, seguramente, por retornos de riego. Los pozos en operación en el acuífero se consideran como descargas puntuales con caudal constante.

III.2. Simulador numérico

En la búsqueda por lograr el objetivo general planteado en este trabajo, la simulación del flujo de agua subterránea, surge la necesidad de requerir una herramienta computacional que sirva de apoyo para la realización de esta actividad. La herramienta computacional empleada para la simulación tiene implementada el modelo matemático que describe el flujo de agua subterránea en un medio poroso (Ecuación de Boussinesq, Ecuación 2) y su correspondiente modelo numérico. Con la finalidad de alcanzar una mayor semejanza entre las configuraciones del nivel freático y gradiente hidráulico, medidos en campo y calculados por el simulador, se implementa en el modelo numérico en cuestión un análisis complementario mediante las variables de evapotranspiración y drenes (flujo de agua superficial). Por lo tanto, en este apartado se hace referencia a McDonald y Harbaugh (1988) con la finalidad de explicar los conceptos de evapotranspiración y drenes (flujo de agua superficial), así como la forma en que dichos fenómenos físicos se implementan en la herramienta computacional utilizada para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

III.2.1. Código numérico (herramienta computacional)

Para la simulación del flujo de agua subterránea se debe seleccionar un código numérico que sea compatible con los datos disponibles y, principalmente, que sea capaz de cumplir con los objetivos del estudio (comportamiento regional del sistema de agua subterránea). El código numérico empleado en esta tesis para la simulación del flujo de agua subterránea es el reportado por Campos Gaytán (2002) y Campos-Gaytán y

Kretzschmar (2006); este se compone de una ecuación que describe el flujo de agua subterránea a través de un medio poroso (modelo matemático) y su correspondiente solución numérica (modelo numérico) implantada en código de computadora. A continuación, se presenta una breve descripción del modelo matemático empleado para la simulación, y su correspondiente modelo numérico, este último incluye las mejoras planteadas para lograr los objetivos de este trabajo. Es conveniente precisar, que dicho código numérico constituye la herramienta computacional empleada para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

III.2.2. Modelo matemático

La expresión matemática que describe el flujo de agua subterránea en un medio poroso, heterogéneo y anisotrópico en estado transitorio, se conoce en la literatura especializada como ecuación de Boussinesq (Trescott *et al.*, 1976; Bear, 1978; Bear y Verruijt, 1987; Anderson y Woessner, 1992; Konikow *et al.*, 1996; Kresic, 1997; Ercan, 1999; Fetter, 2001):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left\{ K(h-d) \frac{\partial h}{\partial x} \right\} + \frac{\partial}{\partial y} \left\{ K(h-d) \frac{\partial h}{\partial y} \right\} + W = S \frac{\partial h}{\partial t} \quad (2)$$

donde $h(x, y, t)$ es la altura freática respecto al nivel de referencia, $d(x, y)$ es la elevación del fondo impermeable respecto al nivel de referencia, $K(x, y)$ es la conductividad hidráulica, $S(x, y)$ es el coeficiente de almacenamiento, x e y son las variables espaciales, t es la variable temporal, y $W(x, y, t)$ es el término fuente (recarga y/o descarga). La expresión anterior se obtiene combinando la Ley de Darcy con la ecuación de

continuidad; comúnmente se aplica para el cálculo (bidimensional) del nivel freático en un acuífero libre, considerando que los ejes de anisotropía coinciden con los ejes coordenados.

Para hacer uso de este modelo matemático en la simulación, es necesario hacer algunas consideraciones con respecto al flujo de agua subterránea, tales como (1) el acuífero es heterogéneo con propiedades hidráulicas constantes en el tiempo, (2) el flujo de agua en el acuífero es horizontal, (3) no hay variaciones de densidad y/o viscosidad, y (4) se considera un solo fluido con propiedades constantes (Vázquez *et al.*, 1991). La ecuación (2), junto con la descripción de las condiciones de flujo y/o potencial hidráulico en las fronteras del sistema acuífero, así como con la condición inicial apropiada del potencial hidráulico integra una representación matemática de cualquier sistema del flujo de agua subterránea.

III.2.3. Modelo numérico

Para obtener la solución numérica del modelo matemático descrito en la sección anterior, se utiliza la técnica de diferencias finitas centrales (Trescott y Larson, 1977) con incrementos espaciales constantes en las dos direcciones horizontales. El primer paso es construir una cuadrícula subdividiendo el dominio de flujo en celdas, cada una de las cuales, se considera homogénea en cuanto a sus propiedades hidráulicas (Figura 4). El comportamiento de cada celda se representa por el valor puntual en el centro de la misma.

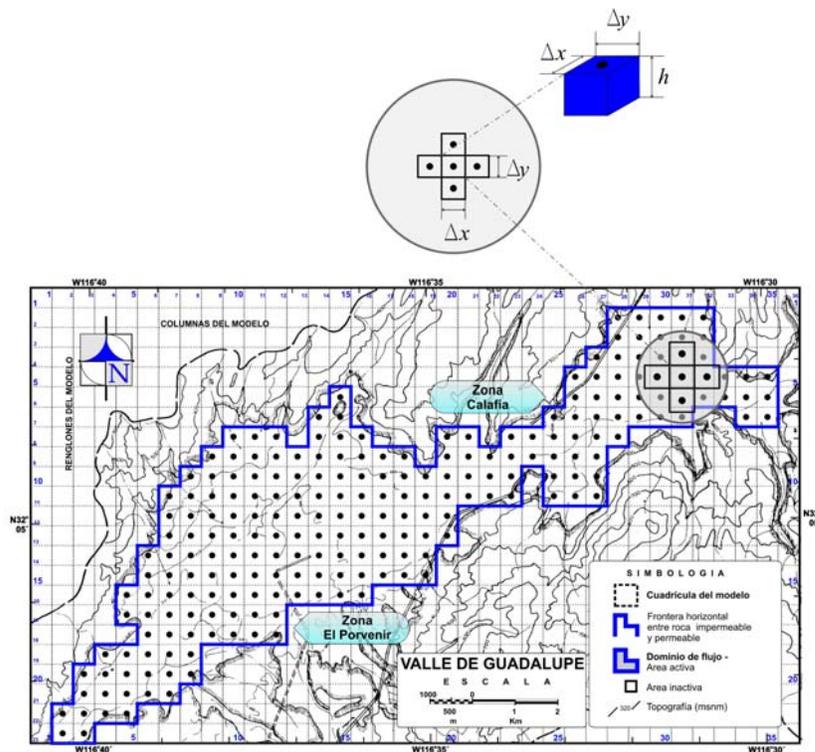


Figura 4. Representación en diferencias finitas del dominio de flujo del sistema de agua subterránea. Cuadrícula con nodos al centro de las celdas, donde (Δx) es el espaciamento en la dirección (x) , (Δy) es el espaciamento en la dirección (y) , y (h) es la altura freática

Aplicando el principio de conservación a una celda genérica central en el dominio de flujo (Figura 4), considerando los índices (i, j) como la posición ordenada de dicho elemento en las dos direcciones horizontales, y la aproximación “fully implicit” para la variación temporal, la ecuación de balance da origen a un sistema de ecuaciones algebraicas lineales de la forma siguiente (Wang y Anderson, 1982; Fetter, 1994):

$$\begin{aligned} & \frac{1}{(\Delta x)^2} \left[T_{i-\frac{1}{2},j}^{k+1} (h_{i-1,j}^{k+1} - h_{ij}^{k+1}) - T_{i+\frac{1}{2},j}^{k+1} (h_{i+1,j}^{k+1} - h_{ij}^{k+1}) \right] + \\ & \frac{1}{(\Delta y)^2} \left[T_{i,j-\frac{1}{2}}^{k+1} (h_{i,j-1}^{k+1} - h_{ij}^{k+1}) - T_{i,j+\frac{1}{2}}^{k+1} (h_{i,j+1}^{k+1} - h_{ij}^{k+1}) \right] = \\ & \left(\frac{S_{ij}}{\Delta t} \right) (h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k) + W_{ij}^{k+1} \end{aligned} \quad (3)$$

donde Δx , Δy = dimensiones de la celda en las direcciones X y Y ; Δt = intervalo de tiempo ($t^{k+1} - t^k$); i , j = índices de fila y columna en la cuadrícula; k = índice de tiempo; h^k = altura freática al tiempo t^k ; W^{k+1} = término fuente al tiempo t^{k+1} (el término fuente incluye la infiltración efectiva de agua de lluvia y el bombeo de pozos en operación); T = producto de la conductividad hidráulica equivalente (entre dos celdas contiguas de acuífero) por el espesor saturado medio (de las dos celdas correspondientes); S = coeficiente de almacenamiento.

La variable T , denotada en la ecuación (3), se considera en este trabajo regida por el esquema de linearización sugerido por Trescott *et al.* (1976), y cuyo objeto es facilitar la solución de la ecuación de balance en diferencias finitas centrales y la aproximación “fully implicit” para la variación temporal. Estos autores sugieren que el valor numérico de la

transmisividad en la iteración actual está dado en función del potencial hidráulico de la iteración anterior; resumido en la siguiente expresión:

$$T_{i\pm\frac{1}{2},j}^{n+1} = \frac{2K_{i\pm 1,j} \cdot K_{ij}}{K_{i\pm 1,j} + K_{ij}} \cdot \frac{(h^n - d)_{i\pm 1,j} + (h^n - d)_{i,j}}{2} \quad (4)$$

$$T_{i,j\pm\frac{1}{2}}^{n+1} = \frac{2K_{i,j\pm 1} \cdot K_{ij}}{K_{i,j\pm 1} + K_{ij}} \cdot \frac{(h^n - d)_{i,j\pm 1} + (h^n - d)_{i,j}}{2} \quad (5)$$

donde K = conductividad hidráulica en la celda; h = altura freática respecto al nivel de referencia; d = elevación del fondo impermeable respecto al nivel de referencia; n = índice de la iteración; i y j = índices de fila y columna en la cuadrícula.

El simulador numérico utilizado en este trabajo resuelve iterativamente el sistema de ecuaciones (ecuación 3), que incluye la aproximación “fully implicit” en diferencias finitas, linearizado por el esquema sugerido por Trescott *et al.* (1976) para las transmisividades de cada elemento de la rejilla y empleando el método de sobre relajación sucesiva (SOR, por su nombre en inglés).

Por último, la solución numérica de la ecuación que gobierna el flujo de agua subterránea, utilizando el método de diferencias finitas centrales y la aproximación “fully implicit” para la variación temporal, está implementado en código de computadora (lenguaje Fortran 90) y comprende el simulador numérico empleado en esta tesis para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

III.2.4. Soluciones del modelo numérico

La evolución de la superficie freática, gradiente y flujo hidráulico en el acuífero en función del tiempo se calcula a partir de una condición inicial, ésta es el estado de equilibrio en el que se encontraba el acuífero antes de iniciar la operación de los pozos de bombeo. Para obtener dicha condición (solución caso estacionario) se utiliza la ecuación (2), suprimiendo el término de la variación temporal. Para el desarrollo de la simulación (caso transitorio) se obtiene la solución de la ecuación (2) para cada incremento de tiempo, considerando el término de la variación temporal y los procesos dependientes del tiempo (precipitación, recarga por escurrimientos horizontales, extracción de agua realizada por los pozos en operación). Cada vez que se calcula la solución de la ecuación (2) se obtiene la distribución espacial del nivel freático en el acuífero.

III.2.5. Evapotranspiración

La herramienta numérica de evapotranspiración simula el efecto de la transpiración de las plantas y la evaporación del agua subterránea localizada cerca de la superficie del terreno. Esta aproximación se basa en las siguientes suposiciones: (1) cuando el nivel freático ($h_{i,j}$) está por encima de o en cierta elevación especificada previamente, en este caso la elevación especificada corresponde a la elevación topográfica de la celda analizada ($Ts_{i,j}$), se produce la pérdida máxima de agua por evapotranspiración señalada inicialmente por el modelador; (2) cuando la profundidad del nivel freático se encuentra por debajo de la elevación topográfica de la celda analizada y es mayor a un intervalo definido al inicio del análisis, este intervalo se conoce comúnmente como profundidad de extinción, no ocurrirá

una pérdida de agua del nivel freático debido a los efectos de evapotranspiración; y (3) entre estos límites, la evapotranspiración del nivel freático varía linealmente de acuerdo con la elevación del nivel freático.

En la implementación de la aproximación en diferencias finitas se requiere el volumen de pérdida por evapotranspiración para una celda dada dentro del dominio de flujo del agua subterránea. Este volumen se obtiene de calcular el producto de la razón de pérdida por evapotranspiración ($Pet_{i,j}$), en unidades de longitud (L) por unidad de tiempo (t), y el área horizontal, lado i (χ) por lado j (ψ), de la celda donde ocurre la pérdida por evapotranspiración, es decir:

$$\theta et_{i,j} = Pet_{i,j} \cdot \chi \cdot \psi \quad (6)$$

donde ($\theta et_{i,j}$) es el volumen de evapotranspiración para la celda en cuestión, expresado en unidades de volumen por unidad de tiempo, a través del dominio del flujo.

De acuerdo con las tres suposiciones señaladas inicialmente, acerca de las posiciones que el nivel freático puede alcanzar en el acuífero, se obtienen los siguientes volúmenes:

$$\{\text{Máximo}\} \quad \theta et_{i,j} = Pet_{i,j} \cdot \chi \cdot \psi \quad h_{i,j} > Ts_{i,j} \quad (7)$$

$$\theta et_{i,j} = 0 \quad h_{i,j} > Ts_{i,j} - Ie_{i,j} \quad (8)$$

$$\theta et_{i,j} = Pet_{i,j} \cdot \chi \cdot \psi \cdot \left(\frac{h_{i,j} - Ts_{i,j} + Ie_{i,j}}{Ie_{i,j}} \right) \quad (Ts_{i,j} - Ie_{i,j}) \leq h_{i,j} \leq Ts_{i,j} \quad (9)$$

donde ($Ie_{i,j}$) es la profundidad de extinción; de tal manera que cuando la distancia entre $Ts_{i,j}$ y $h_{i,j}$ sea mayor que la magnitud $Ie_{i,j}$, el volumen de evapotranspiración es nulo.

A continuación se muestra una gráfica del volumen de agua que se pierde por efecto de la evapotranspiración contra la elevación del nivel freático en la celda (i, j) , con base en las ecuaciones 7-9 (Figura 5).

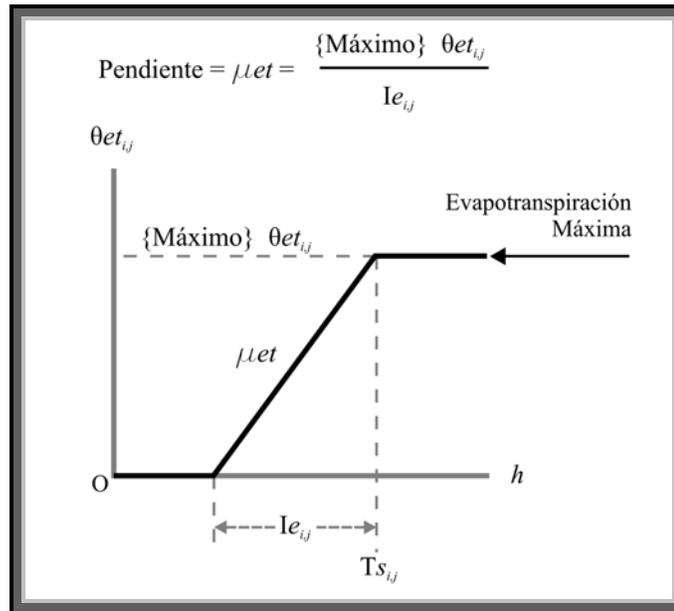


Figura 5. Representación gráfica del volumen de evapotranspiración ($\theta_{et_{i,j}}$), como una función de la elevación del nivel freático ($h_{i,j}$), en una celda donde ($Ie_{i,j}$) es la profundidad de extinción y ($Ts_{i,j}$) es la elevación topográfica. Tomada de McDonald y Harbaugh (1988)

Para cada celda (i, j) , ubicada dentro del dominio del flujo, la herramienta numérica de evapotranspiración lee el valor de la máxima pérdida de evapotranspiración (en las unidades previamente definidas) y lo mantiene constante para cada intervalo de tiempo de la simulación. A continuación, los datos de entrada correspondientes a la razón de pérdida por evapotranspiración se multiplican por el área de la celda para obtener el volumen de evapotranspiración máximo ($\{\text{Máximo}\} \theta_{et_{i,j}}$) correspondiente a cada celda

analizada. Mediante el cálculo realizado internamente por el modelo, las entradas en el arreglo $\theta et_{i,j}$ aparecen como tasas volumétricas máximas y tienen unidades de L^3/t .

El valor de la $Ts_{i,j}$, o elevación a la cual la evapotranspiración es máxima, debe ser la elevación promedio de la superficie del terreno en el mapa topográfico del dominio de flujo, específicamente la correspondiente a la celda (i, j) analizada. Respecto a la profundidad de extinción ($Ie_{i,j}$), es de uso común asumir que el valor de este parámetro es del orden de dos a tres m debajo de la superficie del terreno; aunque también podría asumirse una variación considerable, esto, como consecuencia de los efectos de factores climáticos y/o la presencia de plantas freatofitas de raíz profunda (McDonald y Harbaugh, 1988; Thomas *et al.*, 1989). Tanto los valores de la $Ts_{i,j}$, como los de la $Ie_{i,j}$ son leídas por la herramienta numérica evapotranspiración.

Debido a que el término $\theta et_{i,j}$ de las ecuaciones (6-9) ha sido definido como un flujo de salida desde el acuífero, este debe ser restado del lado izquierdo de la ecuación 2. Además, puesto que es un modelo bidimensional de una sola capa, la herramienta numérica de evapotranspiración elimina el volumen de agua por concepto de pérdida por evapotranspiración de la capa superior y única en el modelo.

III.2.6. Drenes (flujo de agua superficial)

La herramienta numérica de drenes, utilizada en este trabajo de tesis para representar el flujo de agua superficial, simula los efectos característicos de los drenes de agricultura; los cuales remueven el agua del acuífero a razón de una magnitud proporcional a la diferencia entre la elevación del nivel freático en el acuífero y cierta elevación previamente fijada. Esta herramienta se activará y, por lo tanto, tendrá algún efecto sobre la superficie piezométrica del agua subterránea, si la elevación del nivel freático en el acuífero está por arriba de dicha elevación prefijada, pero no tendrá ningún efecto si la elevación del nivel freático está por abajo de la elevación especificada.

La Figura 6 muestra un perfil a través de una celda genérica, ilustrando conceptos que representan la simulación de drenes en el modelo. Se asume que el dren se encuentra parcialmente lleno, de tal manera que la elevación dentro del dren es aproximadamente igual a la elevación media del dren. La elevación del nivel freático calculada por el modelo para la celda analizada ($h_{i,j}$), es un valor promedio para la celda, y normalmente se asume que predomina solamente hasta cierta distancia alejada del dren. Por otro lado, la elevación del dren ($\varepsilon_{i,j}$) prevalece únicamente dentro del dren y no corresponde a la celda completa. Entre el dren y el área a la cual la elevación del nivel freático prevalece, existe un patrón de flujo radial o semiradial en el plano vertical, que normalmente se caracteriza por un gradiente de elevaciones progresivo conforme se acerca al dren. La pérdida de elevación dentro de este patrón de flujo convergente forma una parte de la diferencia de elevaciones ($h_{i,j} - \varepsilon_{i,j}$). Una componente adicional de pérdida de elevaciones puede ocurrir en la vecindad inmediata del dren, si la conductividad hidráulica en esta región difiere del valor

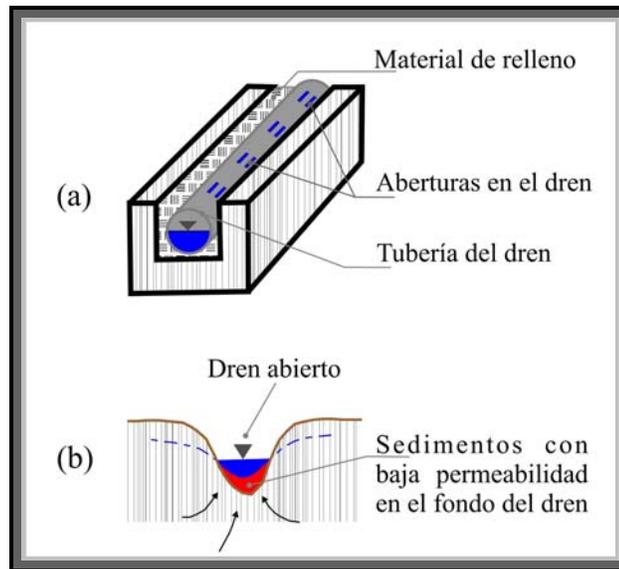


Figura 7. Factores que afectan la pérdida de agua inmediatamente alrededor del dren: (a) tubería del dren enterrada o con material de relleno, y (b) dren abierto. Tomada de McDonald y Harbaugh (1988)

Cada uno de los tres procesos discutidos arriba (flujo convergente hacia el dren, flujo a través del material de diferente conductividad hidráulica localizado alrededor del dren y flujo a través de las paredes del dren) genera una pérdida de agua. Debido a que estas pérdidas de agua ocurren en serie, la pérdida total ($h_{i,j} - \varepsilon_{i,j}$) puede asumirse como proporcional a un volumen de descarga efectuado por el dren ($\theta d_{i,j}$) localizado en la correspondiente celda analizada. Este razonamiento se incluye en la herramienta numérica de drenes y se describe por las siguientes ecuaciones:

$$\delta_{i,j} = h_{i,j} - \varepsilon_{i,j} \quad (10)$$

$$\beta_{i,j} = \frac{\kappa_{i,j} \cdot \lambda_{i,j} \cdot \alpha_{i,j}}{\omega_{i,j}} \quad (11)$$

$$\theta d_{i,j} = \beta_{i,j} \cdot \delta_{i,j} \quad \text{para } h_{i,j} > \varepsilon_{i,j} \quad (12)$$

$$\theta d_{i,j} = 0 \quad \text{para } h_{i,j} \leq \varepsilon_{i,j} \quad (13)$$

donde (i, j) son el renglón y la columna, respectivamente, de la celda donde se calcula el volumen de pérdida del dren; $\varepsilon_{i,j}$ es la elevación prefijada del dren (en este trabajo de tesis se asume que la elevación del dren es igual a la elevación de la topografía superficial, por lo tanto, $\varepsilon_{i,j} = Ts_{i,j}$); $\alpha_{i,j}$ es el ancho del dren (en este trabajo de tesis se asume que es el ancho medio del Arroyo Guadalupe); $\lambda_{i,j}$ es la longitud del dren en la celda analizada; $\omega_{i,j}$ es el espesor medio del material semi-impermeable que comprende el lecho del arroyo, y $\kappa_{i,j}$ es la conductividad hidráulica vertical del material semi-impermeable que comprende el lecho del arroyo.

El coeficiente $\beta_{i,j}$ de la ecuación 12 es una conductancia equivalente, que describe la pérdida total de elevaciones entre el dren y la región de la celda (i, j) donde se asume que predomina la elevación $h_{i,j}$. Dicho coeficiente, depende de las características del patrón de flujo convergente hacia el dren, de las características del dren mismo y de su entorno inmediato. Uno puede intentar calcular valores para $\beta_{i,j}$ mediante el desarrollo aproximado de las ecuaciones de la conductancia para cada uno de los tres procesos de flujo, y después calcular la conductancia equivalente acumulada. En la práctica es común calcular $\beta_{i,j}$ de valores medidos de $\theta d_{i,j}$ y $\delta_{i,j}$ usando la ecuación 12. Sin embargo, si el valor de $\delta_{i,j}$ no se conoce con exactitud, usualmente, se procede a ajustar el valor del coeficiente $\beta_{i,j}$ durante la calibración del modelo.

La Figura 8 muestra una gráfica de $\theta d_{i,j}$ contra $h_{i,j}$, tal como se define por las ecuaciones 12 y 13. La función es similar a aquella para el flujo entre un arroyo superficial y el acuífero, con excepción de que en este caso el flujo hacia el acuífero no se incluye y valores positivos de $\theta d_{i,j}$ se toman como flujo hacia del dren.

Dado que $\theta d_{i,j}$ en la ecuación 12 se toma como un flujo hacia afuera de la celda analizada, este valor debe ser restado del lado izquierdo de la ecuación 2 para cada celda afectada por un dren, siempre y cuando la elevación del nivel freático en dicha celda se encuentra por arriba de la elevación del dren.

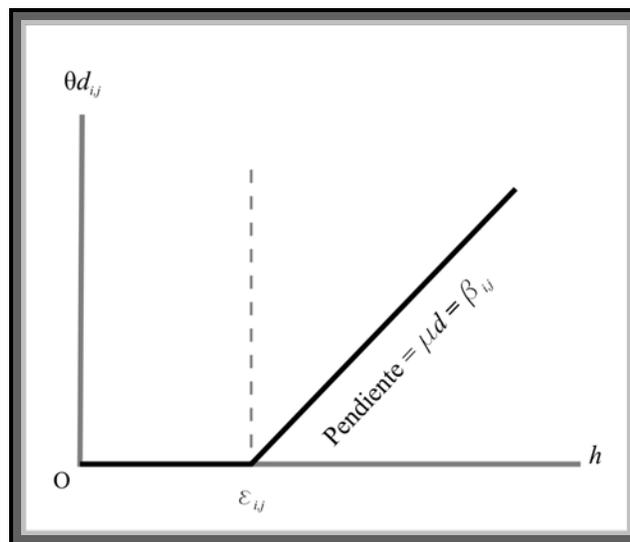


Figura 8. Gráfica del volumen de flujo dentro de un dren ($\theta d_{i,j}$) como una función del potencial hidráulico ($h_{i,j}$), en una celda donde la elevación del dren es ($\varepsilon_{i,j}$) y la conductancia es ($\beta_{i,j}$). Tomada de McDonald y Harbaugh (1988)

III.3. Parámetros iniciales del modelo

III.3.1. Hidrogeología

La información hidrogeológica acerca de las características de permeabilidad y porosidad de las rocas es necesaria para determinar las propiedades físicas que tienen las formaciones geológicas presentes en la zona de estudio y para delimitar el dominio de flujo del sistema de agua subterránea.

Conviene mencionar en este punto, el efecto que podrían tener, en el dominio de flujo del sistema de agua subterránea, los arreglos estructurales señalados en la sección de geología, los cuales se encuentran constituidos por una serie ilimitada de fallas y fracturas menores, formando entre sí una red complicada de intercomunicación por donde se filtra y fluye de manera interna y continua gran parte del agua de origen tanto meteórico como posiblemente hidrotermal, expresándose con la presencia de diversos manantiales que se observan en algunos casos alineados sobre el recorrido general en algunas de las estructuras de falla (Andrade, 1992). Sin embargo, debido al carácter especulativo de este tipo de alimentación de agua subterránea en la zona de estudio, no es posible cuantificar a la fecha el volumen de aportación que colabora en la saturación del Acuífero del Valle de Guadalupe, por lo que aún existiendo esta evidencia, no será tomado en cuenta para el cálculo de la recarga de agua que lo beneficia (Andrade, 1997).

Las rocas ígneas y metamórficas, desde el punto de vista geohidrológico, funcionan como fronteras impermeables, ya que cuentan con una conductividad hidráulica relativamente baja (3.6×10^{-8} - 3.7×10^{-3} m/año, Domenico y Schwartz, 1998; Smith y Wheatcraft, 1993; Younger, 2007). Estas rocas se encuentran presentes rodeando el valle y

en algunos afloramientos en la parte interna (Figura 3). El basamento impermeable del valle está compuesto de estas mismas rocas (Andrade, 1992; Andrade, 1997; Beltrán, 1998).

Los depósitos sedimentarios del tipo aluvial y fluvial son los materiales que constituyen el acuífero. Están formados por gravas, arenas, limos y arcillas producto de la erosión y el intemperismo de las rocas que afloran en la región. Dado el proceso de litificación de estos depósitos, resultan ser poco consolidados y presentan granulometría y compactación tales que permiten la infiltración de agua a niveles inferiores y el flujo de importantes cantidades según el gradiente hidráulico (Andrade, 1992; Andrade, 1997; Beltrán, 1998). Estas formaciones tienen alta conductividad hidráulica (2.2×10^{-4} - 2.2×10^6 m/año, Anderson y Woessner, 1992), por lo tanto, serán las únicas que se toman en cuenta para establecer el dominio de flujo del sistema de agua subterránea.

III.3.2. Definición del dominio de flujo del sistema de agua subterránea

Con la información geohidrológica recopilada fue posible definir el dominio de flujo del sistema de agua subterránea (Figura 9), y construir el código de conductividades hidráulicas.

La geometría del modelo que se propone en este estudio y que se considera durante el periodo completo de simulación corresponde a una aproximación del área donde se desarrolla el Acuífero del Valle de Guadalupe, y cuyo diseño se basa esencialmente en la información hidrogeológica recopilada.

Como se muestra en la Figura 9, las fronteras irregulares del acuífero se han sustituido por una configuración de trazos rectos, que nos permiten construir con base en

esta aproximación del dominio de flujo, el simulador numérico del acuífero. Las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur, de forma irregular corresponden a fronteras impermeables (contacto litológico entre roca permeable y roca impermeable) a excepción de los puntos donde los escurrimientos de la sierra llegan al valle. De acuerdo con información proporcionada por la CNA, hacia la frontera suroeste de la zona de estudio (salida aguas abajo del Acuífero del Valle de Guadalupe), las elevaciones del nivel freático no han variado de manera significativa con el transcurso de los años (~2.0 m en 30 años; Apéndice C, Hidrogramas. Hidrograma del Pozo: N-21, Celda: 21,4); por lo tanto, la frontera suroeste se considera de nivel freático constante.

La discretización de la cuadrícula se realiza considerando como objetivo de este trabajo, el estudio regional del flujo hidráulico y del comportamiento de la superficie freática del Acuífero del Valle de Guadalupe, por lo tanto, se determina construir una cuadrícula con celdas cuadradas de 500 m de lado (Figura 9 y Tabla X).

Tabla X. Datos de la aproximación del dominio del flujo

Dimensión de la celda cuadrada (lado x lado):	0.50	km
Área de la celda:	0.25	km²
Número total de celdas:	828	celdas
Tamaño de la cuadrícula (renglón x columna):	23x36	
Área total de la cuadrícula:	207	km²

Cuantificación de celdas en la figura de rasgos hidrológicos y aproximación del dominio del flujo.

	(km²)	(celdas)
Celdas impermeables exteriores al valle:	151	604
Celdas zona acuifera:	56	224
Totales:	207	828

Área analizada (celdas zona acuifera): **56 km²**

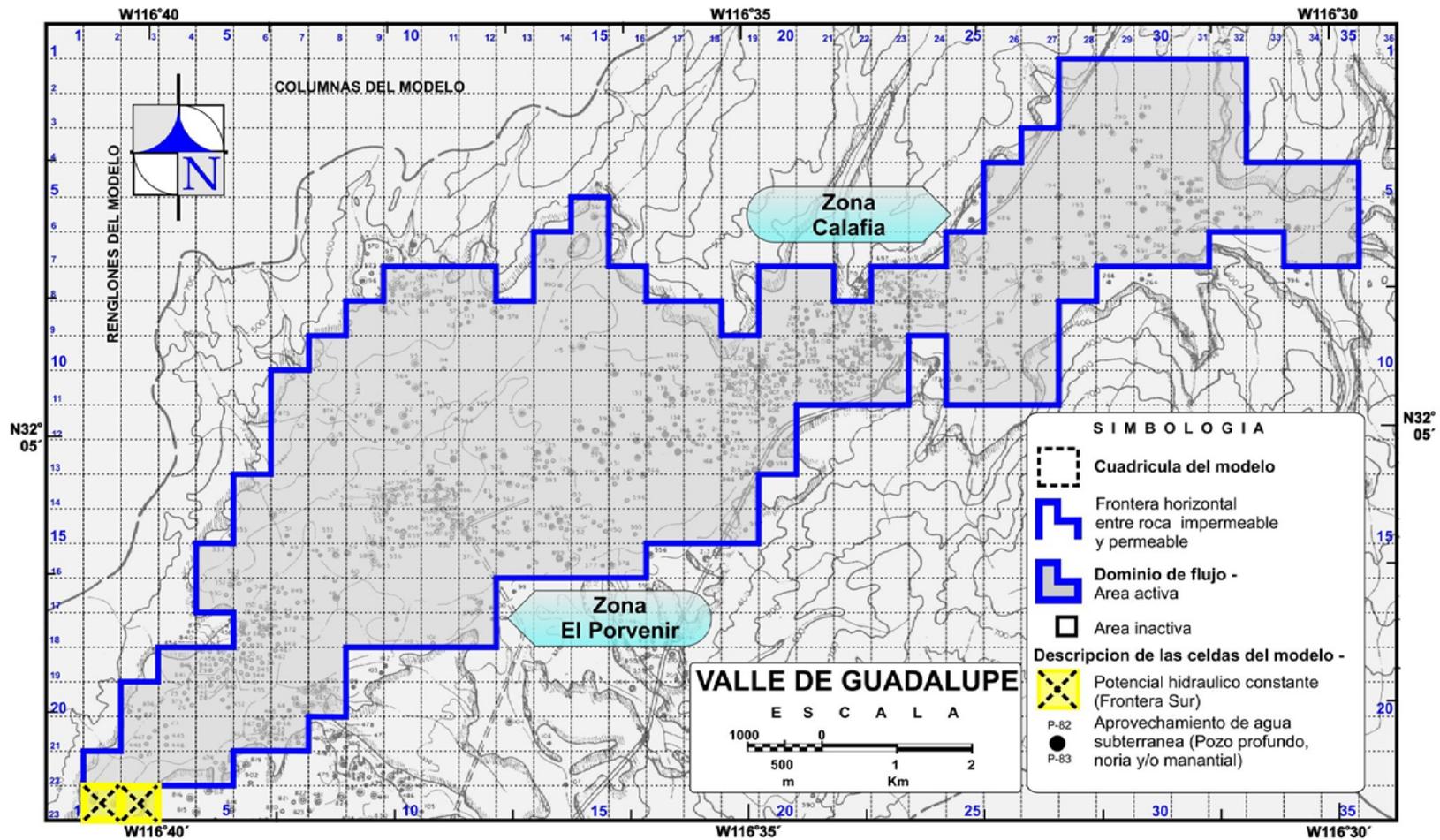


Figura 9. Rasgos hidrológicos y aproximación del dominio de flujo del sistema de agua subterránea. Las fronteras irregulares del Acuífero del Valle de Guadalupe se han sustituido por una configuración de trazos rectos. Las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur corresponden a fronteras impermeables. La frontera suroeste es de nivel freático constante. Además, se muestra con isolíneas la topografía del valle y sus alrededores

Para estudiar el comportamiento regional del sistema de flujo de agua subterránea, mediante el empleo de la técnica de diferencias finitas, se requiere que el sistema se divida en una cuadrícula. Con el objeto de lograr tal finalidad, originalmente, se construye una cuadrícula sobrepuesta en un mapa geológico donde se señala la frontera entre el aluvión y la roca impermeable (Figura 3). Más tarde, con base en información geofísica sobre sondeos verticales horizontales reportados por Andrade (1992) y Andrade (1997), la geometría del dominio de flujo se modifica y se han eliminado las celdas que contenían depósitos sedimentarios no consolidados saturados con espesores menores a los 20 m en promedio; estas celdas se ubican principalmente hacia las márgenes sur y sureste de la zona de estudio. De tal manera que, actualmente, la geometría del modelo, propuesto como sistema del flujo de agua subterránea (Figura 9 y Tabla X), comprende un total de 828 celdas cuadradas de 0.50 km por lado, integrando una cuadrícula sobrepuesta a la zona de estudio de 23 renglones por 36 columnas, y abarcando un área total de 207 km². La cuadrícula está orientada paralelamente a los ejes norte, sur, este y oeste. En cuanto a la discretización vertical, de acuerdo con el objetivo de un estudio regional, el dominio de flujo correspondiente al Acuífero del Valle de Guadalupe consiste de una sola capa con espesor variable. La única capa vertical representa los materiales de relleno saturados de la cuenca (sedimentos no consolidados), y en el análisis numérico es tratada como un acuífero libre o no confinado. Con base en la información sobre las propiedades físicas de los materiales existentes en la zona de estudio, las celdas que componen el modelo geométrico son: 604 celdas inactivas (151 km²) que representan las celdas impermeables exteriores, las cuales constituyen las rocas ígneas y metamórficas (fronteras este y oeste); se tienen 224 celdas activas (56 km²) que integran la zona del Acuífero del Valle de Guadalupe, éstas

representan los depósitos aluviales y fluviales, compuestos por gravas, arenas, limos y arcillas, depósitos de talud y pie de monte. Las fronteras irregulares del acuífero, se convirtieron en una configuración de trazos rectos; las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur corresponden a fronteras de flujo nulo, con excepción de los puntos donde los escurrimientos de la sierra llegan al valle. Con base en datos sobre el registro histórico de elevaciones del nivel freático, la frontera suroeste es una frontera de potencial hidráulico constante. Por último, la frontera inferior es la topografía del basamento impermeable.

Durante el proceso de análisis numérico, se asignan a cada celda de la cuadrícula valores promedio de los parámetros hidrogeológicos del acuífero y un potencial hidráulico promedio al centro de la celda. Los números que aparecen hacia los extremos de la cuadrícula, se utilizan como índices de la ubicación de puntos específicos en la geometría del modelo propuesta en este trabajo, y corresponden al par ordenado (i, j) , que hacen referencia al número de renglones y columnas de la cuadrícula, respectivamente. Lo anterior, con el objeto de facilitar y simplificar el manejo de la información en la computadora.

III.3.3. Condición de potencial hidráulico inicial

La condición de potencial hidráulico inicial es la solución numérica de la ecuación que gobierna el flujo de agua subterránea, en estado estacionario. Por lo tanto, con la finalidad de encontrar esta condición se han implementado en el simulador numérico las

condiciones de frontera y los parámetros hidrogeológicos correspondientes al modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe.

Para seleccionar la fecha en que se ubica la condición inicial, se ha tomado en cuenta la siguiente información: 1) de acuerdo con el registro de precipitaciones proporcionado por la CNA (Tabla XIII y Figura 11), en 1983 se aprecia el término de un período de seis años con una precipitación, casi en su totalidad, mayor a la precipitación media anual, y 2) con base en los antecedentes piezométricos, transformados a elevaciones del nivel freático (Figura 10; Tabla XI; Apéndice C. Hidrogramas), la infiltración del volumen de agua precipitada en 1983 continuó hasta 1984; lo anterior, se refleja con el registro de la elevación máxima histórica del nivel freático en Febrero de 1984, cuando más del 75% del número total de aprovechamientos de agua subterránea ubicados a lo largo de toda el área del acuífero, empleados para la calibración, mostraron la elevación máxima histórica del nivel freático, en el orden de los 0.70 m por arriba de aquella registrada en Agosto de 1983 (Tabla XII). Aunado a lo expuesto anteriormente, se supone que el efecto de los pozos en operación es mínimo o despreciable y, en consecuencia, que el Acuífero del Valle de Guadalupe se encontraba con su capacidad de almacenamiento completa o en equilibrio. Por lo tanto, en todo el modelado numérico que comprende el estudio de la evolución del agua subterránea del Acuífero del Valle de Guadalupe, se supone que la solución en estado estacionario, fijada como condición inicial, corresponde a la configuración del nivel freático reportada para Febrero de 1984.

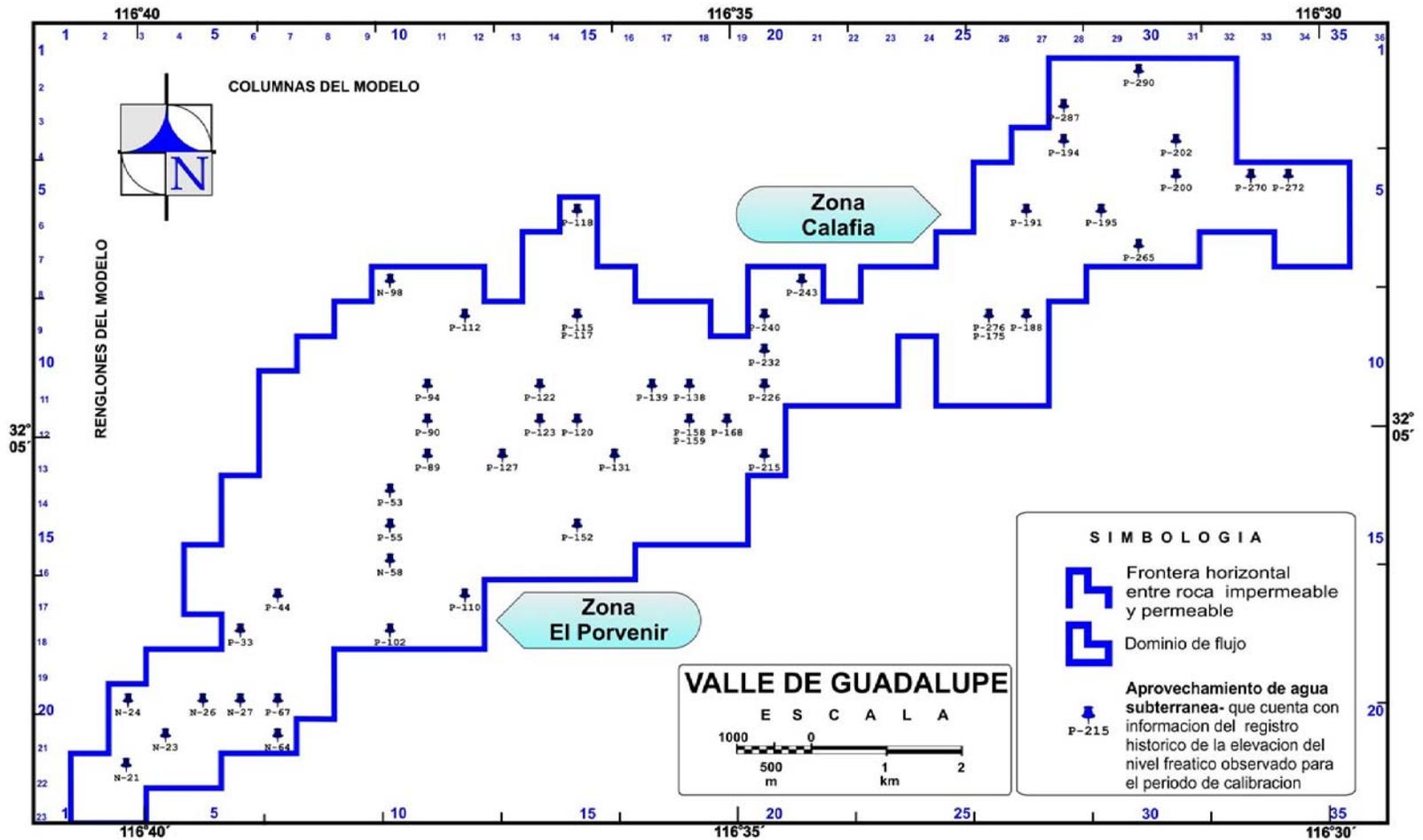


Figura 10. Localización de aprovechamientos de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe, que cuentan con información del registro histórico de la elevación del nivel freático medido en campo, y que se han considerado para el periodo de calibración

Tabla XI. Mediciones de la elevación del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA)

#H ¹	TDO ²	Celda i,j	Cota de brocal (msnm)	1972 OCT	1973 JUN	1977 JUL	1979 NOV	1981 FEB	1982 MAY	1983 AGO	1984 FEB	1985 MAY	1988 JUN	1990 ABR	1998 MAY	2001 SEP	2003 MAR
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
1	N-21	22,3	298.9	-	-	296.9	296.8	298.1	297.8	-	297.8	297.3	-	296.9	297.7	-	-
2	N-23	21,4	300.6	-	-	297.7	297.9	298.9	298.8	298.8	298.9	-	298.0	296.6	299.4	-	-
3	N-24	20,3	317.8	-	-	308.3	313.8	313.4	313.5	313.5	313.1	-	313.7	309.0	314.9	311.4	309.3
4	N-26	20,5	300.9	295.7	296.9	298.6	299.4	298.9	299.2	298.3	298.4	296.0	298.0	297.4	299.2	297.0	296.9
5	N-27	20,6	301.9	-	-	299.4	300.3	300.9	300.8	300.6	300.9	300.4	300.3	299.6	-	-	-
6	P-33	18,6	305.0	-	-	300.7	302.2	302.9	301.8	302.6	302.8	301.8	301.9	301.3	302.9	-	-
7	P-44	17,7	306.8	-	-	301.1	303.8	304.6	-	304.3	304.4	302.9	303.9	-	-	302.0	302.2
8	P-53	14,10	313.6	305.7	305.8	304.6	308.1	309.6	309.8	310.7	-	310.5	310.1	308.9	310.9	307.7	-
9	P-55	15,10	312.5	305.8	305.8	304.1	308.6	309.7	310.1	311.2	311.1	310.8	310.7	-	310.9	-	-
10	P-68	20,7	304.0	-	-	298.9	300.3	301.0	300.4	301.0	301.0	-	300.9	300.0	-	-	-
11	N-72	19,8	305.2	-	-	301.5	302.4	302.9	302.8	304.3	-	302.8	303.1	301.8	302.8	300.9	300.9
12	P-90	12,11	316.8	-	-	308.0	311.6	312.4	312.2	313.1	-	312.7	313.2	311.8	-	-	-
13	P-94	11,11	319.6	-	-	311.7	313.6	315.1	315.1	315.5	316.1	315.6	315.6	314.9	316.2	-	-
14	P-102	18,10	310.7	304.6	304.5	-	307.7	309.1	307.3	307.4	309.4	307.3	-	307.7	309.7	307.0	-
15	P-110	17,12	313.2	-	-	304.4	311.4	312.2	311.4	312.2	312.5	-	-	309.7	-	308.3	307.6
16	P-112	9,12	325.7	-	-	316.5	322.4	322.3	321.2	322.5	321.8	-	-	-	324.5	317.7	319.5
17	P-117	9,15	326.6	310.5	311.0	307.4	310.3	315.2	315.4	317.1	319.0	-	-	-	318.9	319.4	317.9
18	P-118	5,15	332.9	-	-	323.4	330.1	-	328.5	330.2	330.5	-	-	-	331.1	326.2	324.7
19	P-130	12,15	320.1	301.6	305.6	300.1	-	317.2	317.0	317.7	318.0	-	-	314.5	315.5	311.4	310.5
20	P-127	13,13	315.9	304.1	304.8	301.1	310.8	313.8	313.6	314.4	-	313.9	313.7	312.3	313.6	304.6	308.7
21	P-122	11,14	322.7	306.5	306.5	301.1	307.7	315.2	314.4	314.8	316.1	315.7	314.9	312.7	320.5	-	-
22	P-131	13,16	320.5	306.7	306.7	305.3	314.1	317.4	317.4	317.7	318.1	314.9	316.1	314.2	-	-	-
23	P-139	11,17	325.1	-	-	299.8	312.9	-	-	319.3	320.3	319.5	316.2	316.1	316.8	311.5	-
24	P-138	11,18	323.1	307.4	308.3	302.1	316.0	320.1	319.4	320.7	321.2	319.7	317.1	314.7	317.9	-	-
25	P-254	11,18	326.1	-	-	304.5	317.0	321.5	320.7	321.2	322.7	321.2	319.3	315.1	-	312.5	312.1

¹Columna A (#H) = Número del hidrógrafo.

²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria.

Tabla XI. Mediciones de la elevación del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA). Continuación.

#H ¹	TDO ²	Celda i,j	Cota de brocal (msnm)	1972 OCT	1973 JUN	1977 JUL	1979 NOV	1981 FEB	1982 MAY	1983 AGO	1984 FEB	1985 MAY	1988 JUN	1990 ABR	1998 MAY	2001 SEP	2003 MAR
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R
26	P-152	15,15	316.8	304.6	304.6	301.9	312.7	314.3	313.9	314.8	315.1	314.2	313.2	311.1	314.9	-	308.3
27	P-158	12,18	322.8	307.9	308.1	305.6	316.4	320.3	-	320.5	321.1	-	-	-	318.5	312.6	-
28	P-159	12,18	322.8	310.5	310.6	303.8	314.9	320.2	319.7	320.6	321.3	319.7	-	-	318.5	-	-
29	P-276	9,26	340.1	-	-	328.4	337.1	335.7	335.6	336.9	-	337.2	334.8	-	-	325.7	-
30	P-188	9,27	342.0	332.1	332.9	330.7	339.3	338.8	338.5	339.3	340.1	340.1	338.5	-	-	-	-
31	P-191	6,27	344.0	-	334.1	329.6	342.0	342.6	341.3	342.2	343.0	-	338.4	-	340.1	-	320.9
32	P-194	4,28	344.8	-	-	-	-	340.4	337.5	340.8	341.4	-	335.0	332.2	-	326.2	320.0
33	P-195	6,29	346.9	-	-	-	-	344.3	342.3	343.7	344.9	-	-	-	-	326.1	314.0
34	P-259	4,30	349.2	332.0	332.6	325.2	344.6	346.7	343.0	345.4	346.7	-	-	-	340.8	-	-
35	P-232	10,20	331.1	318.5	312.6	-	322.4	325.0	324.5	324.8	325.4	325.1	-	-	326.9	319.1	317.2
36	P-265	7,30	349.7	-	-	330.0	347.4	347.2	345.6	347.8	348.0	-	343.4	-	348.8	-	-
37	P-270	5,33	354.1	-	337.7	333.9	351.9	352.0	350.7	351.9	352.4	-	350.2	-	-	340.8	336.7
38	P-272	5,34	358.8	339.9	343.3	335.7	355.2	355.9	354.5	355.9	356.4	-	353.9	-	355.7	346.3	342.4
39	P-287	3,28	350.4	-	-	319.9	-	344.4	-	339.9	342.0	-	-	-	-	326.7	318.9
40	P-290	2,30	351.7	-	-	321.1	345.6	343.3	342.9	343.4	344.5	-	338.7	331.7	-	-	-

¹Columna A (#H) = Número del hidrógrafo.

²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria.

Tabla XII. Mediciones de la elevación del nivel freático en aprovechamientos de agua subterránea ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe (CNA). Determinación de la condición inicial

Hid #	Tipo de obra	Celda			Cota de brocal (msnm)	1983		1984		DIFERENCIA* (m)	
		i	j			AGO	MAX	FEB			
1	N	-	21	22	3	298.9		297.8	297.8		
2	N	-	23	21	4	300.6	298.8	298.9	298.9	0.0	
3	N	-	24	20	3	317.8	313.5	313.5	313.1		
4	N	-	26	20	5	300.9	298.3	298.4	298.4	0.2	
5	N	-	27	20	6	301.9	300.6	300.9	300.9	0.3	
6	P	-	33	18	6	305.0	302.6	302.8	302.8	0.2	
7	P	-	44	17	7	306.8	304.3	304.4	304.4	0.1	
8	P	-	53	14	10	313.6	310.7	310.7			
9	P	-	55	15	10	312.5	311.2	311.2	311.1		
10	P	-	68	20	7	304.0	301.0	301.0	301.0		
11	N	-	72	19	8	305.2	304.3	304.3			
12	P	-	90	12	11	316.8	313.1	313.1			
13	P	-	94	11	11	319.6	315.5	316.1	316.1	0.6	
14	P	-	102	18	10	310.7	307.4	309.4	309.4	2.0	
15	P	-	110	17	12	313.2	312.2	312.5	312.5	0.3	
16	P	-	112	9	12	325.7	322.5	322.5	321.8		
17	P	-	117	9	15	326.6	317.1	319.0	319.0	1.9	
18	P	-	118	6	15	332.9	330.2	330.5	330.5	0.3	
19	P	-	130	12	15	320.1	317.7	318.0	318.0	0.3	
20	P	-	127	13	13	315.9	314.4	314.4			
21	P	-	122	11	14	322.7	314.8	316.1	316.1	1.3	
22	P	-	131	13	16	320.5	317.7	318.1	318.1	0.4	
23	P	-	139	11	17	325.1	319.3	320.3	320.3	1.0	
24	P	-	138	11	18	323.1	320.7	321.2	321.2	0.6	
25	P	-	254	11	18	326.1	321.2	322.7	322.7	1.5	
26	P	-	152	15	15	316.8	314.8	315.1	315.1	0.3	
27	P	-	158	12	18	322.8	320.5	321.1	321.1	0.6	
28	P	-	159	12	18	322.8	320.6	321.3	321.3	0.7	
29	P	-	276	9	26	340.1	336.9	336.9			
30	P	-	188	9	27	342.0	339.3	340.1	340.1	0.8	
31	P	-	191	6	27	344.0	342.2	343.0	343.0	0.8	
32	P	-	194	4	28	344.8	340.8	341.4	341.4	0.6	
33	P	-	195	6	29	346.9	343.7	344.9	344.9	1.2	
34	P	-	259	4	30	349.2	345.4	346.7	346.7	1.3	
35	P	-	232	10	20	331.1	324.8	325.4	325.4	0.6	
36	P	-	265	7	30	349.7	347.8	348.0	348.0	0.2	
37	P	-	270	5	33	354.1	351.9	352.4	352.4	0.5	
38	P	-	272	5	34	358.8	355.9	356.4	356.4	0.5	
39	P	-	287	3	28	350.4	339.9	342.0	342.0	2.1	
40	P	-	290	2	30	351.7	343.4	344.5	344.5	1.0	
POZOS	34					%	22.5	100.0	77.5	PROM (m)	0.7
NORIAS	6										
TOTAL OBRAS HIDRAULICAS	40					40	39	40	35		

* Operación de diferencia entre la cota mas alta y la mas baja observada, solamente cuando la elevación del año 1984 es mayor.

344.5 344.5 Valor máximo de la elevación medida en el año de 1983 o en 1984.

III.3.4. Intervalo de tiempo de la simulación

A partir de la fecha fijada como condición inicial del potencial hidráulico, Febrero de 1984, se da inicio con la evolución del nivel freático en el acuífero. Consecuentemente, se supone que se da origen a la extracción de agua subterránea del acuífero mediante el bombeo de los pozos y los procesos dependientes del tiempo, tales como precipitación, recargas y descargas horizontales, evapotranspiración y flujo de agua superficial, entre otros, empiezan a cambiar. En la simulación del flujo de agua subterránea se utiliza un intervalo de tiempo mensual para calcular la respuesta del Acuífero del Valle de Guadalupe en un período de ~40 años de operación (1984-2025). Los primeros 21 años del periodo de simulación comprenden la calibración del modelo (1984-2005); y los años restantes representan la simulación a futuro de seis escenarios distintos, desarrollados con la finalidad de predecir el comportamiento del acuífero inducido por el esquema de explotación vigente o por la implementación de nuevos esquemas de extracción.

III.3.5. Coeficiente de almacenamiento

En Freeze y Cherry (1979) se reporta que los valores típicos del coeficiente de almacenamiento para los acuíferos no confinados fluctúan de 0.14 a 0.38. Fetter (1994), al igual que Tinajero González (1985), establece que el intervalo en que se puede encontrar el coeficiente de almacenamiento para los acuíferos libres es de 0.02 a 0.30, lo anterior, sin especificar el tipo de material permeable que compone al acuífero. Mientras que Villanueva e Iglesias (1984) puntualizan que cuando el acuífero libre está compuesto por un material permeable del tipo poroso intergranular, el intervalo en que se encuentra el coeficiente de almacenamiento es 0.05 a 0.15. Por lo tanto, con base en la información anteriormente

expuesta, el valor numérico del coeficiente de almacenamiento para los sedimentos no consolidados que componen el Acuífero del Valle de Guadalupe se encuentra en el intervalo general de 0.02 a 0.38.

III.3.6. Precipitación

Se cuenta con información climatológica registrada mensualmente por la CNA en las estaciones establecidas dentro del área de afectación de la Cuenca Guadalupe. Estas estaciones han sido seleccionadas tanto por la longitud de su serie de datos, así como por la calidad de su información. Después de un análisis de los datos recopilados, se observa que el periodo de registro de las estaciones climatológicas es variable y discontinuo, lo anterior, puesto que, 1) la Estación No. 064 Agua Caliente (AC) cuenta con un periodo de registro de 1977-2006, 2) la Estación No. 149 El Porvenir (Po) tiene un periodo de registro de 1991-2003, 3) la Estación No. 012 El Pinal (Pi), cuyo periodo de registro es de 1964-1994, 4) la Estación 025 Ojos Negros (ON) con un periodo de registro comprendido de 1948-1996, 5) la Estación 039 San Juan de Dios Norte (SJDN) cuyo periodo de registro es de 1956-1985, 6) la Estación 026 Olivares Mexicanos (OM) que tiene un periodo de registro de 1948-2000, y 7) la Estación 106 Valle de San Rafael (VSR) cuenta con un periodo de registro de 1979-2006. Por lo tanto, con el objeto de depurar la información que se utiliza en la etapa de calibración del modelo, se decide usar para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe los datos registrados durante el periodo 1984-2006 en las estaciones climatológicas Agua Caliente, El Porvenir, El Pinal, Ojos Negros, San Juan de Dios Norte, Olivares Mexicanos y Valle de San Rafael (Tabla XIII, Figura 11 y Figura 2a). Sin embargo, es conveniente mencionar en este punto, que no es

Tabla XIII. Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2007, con base en el registro histórico de la CNA

		Po	Pi	ON	SJDN	OM	AC			VSR				~Φ, +Φ, -Φ PROM	PRECIPITACION MEDIA ANUAL
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
1	1977		425.8	264.0	247.0	259.0	~Φ	285.5	-3					AC y	296.3
2	1978		999.1	449.0	833.6	737.8	+Φ	544.4	86					VSR	712.8
3	1979		660.3	459.7	575.6	465.3	+Φ	430.3	47						518.2
4	1980		971.7	489.5	795.8	643.8	+Φ	551.2	88	+Φ	465.9	75		81.5	653.0
5	1981		330.5	233.8	305.0	230.9	-Φ	198.8	-32	-Φ	189.7	-29		-30.5	248.1
6	1982		645.1	265.0	683.1	321.6	~Φ	268.6	-8	~Φ	276.9	4		-2.2	410.1
7	1983		1099.2	613.8	847.0	657.3	+Φ	576.9	97	+Φ	619.3	133		114.7	735.6
8	1984		358.0	151.3	318.3	158.3	-Φ	169.7	-42	-Φ	175.2	-34		-38.1	221.8
9	1985		398.5	212.8	170.0	235.1	-Φ	209.1	-29	-Φ	194.8	-27		-27.7	236.7
10	1986		566.7	262.9	512.7	319.6	~Φ	297.6	2	~Φ	244.2	-8		-3.4	367.3
11	1987		377.0	210.4	406.4	230.0	-Φ	224.3	-23	-Φ	204.1	-23		-23.4	275.4
12	1988		518.7	89.5	682.7	562.7	+Φ	367.5	25	+Φ	351.3	32		28.7	428.7
13	1989		214.9	77.7	161.2	114.2	-Φ	92.0	-69	-Φ	78.2	-71		-69.6	123.0
14	1990		362.4	177.9	328.3	129.0	-Φ	141.4	-52	-Φ	201.0	-24		-38.1	223.3
15	1991		510.3	389.4	625.1	371.0	~Φ	295.7	1	+Φ	358.7	35		17.8	425.0
16	1992	387.0	683.0	37.3	704.2	0.0	+Φ	368.2	26	+Φ	372.2	40		32.7	364.6
17	1993	610.6	891.5	543.2	1020.5	435.6	+Φ	517.2	76	+Φ	554.3	108		92.3	653.3
18	1994	275.5	182.4	208.2	476.8	201.3	-Φ	249.7	-15	~Φ	251.7	-5		-10.1	263.7
19	1995	533.7	882.6	395.7	826.9	602.8	+Φ	405.5	38	+Φ	461.4	73		55.8	586.9
20	1996	475.0	334.8	153.8	313.7	342.3	-Φ	163.0	-44	-Φ	166.7	-37		-40.9	278.5
21	1997	267.0	362.7	182.0	339.8	221.3	-Φ	167.5	-43	-Φ	188.8	-29		-36.0	247.0
22	1998	663.0	1044.9	524.4	978.8	697.2	+Φ	603.5	106	+Φ	434.1	63		84.5	706.5
23	1999	184.1	307.9	154.5	288.4	183.2	-Φ	161.0	-45	-Φ	143.2	-46		-45.6	203.2
24	2000	178.0	288.4	144.7	270.2	136.4	-Φ	149.0	-49	-Φ	135.8	-49		-49.1	186.1
25	2001	298.3	545.4	273.7	510.9	331.2	~Φ	270.5	-8	~Φ	267.0	0		-3.7	356.7
26	2002	103.9	119.4	59.9	111.8	72.5	-Φ	90.1	-69	-Φ	30.4	-89		-78.9	84.0
27	2003	339.0	486.1	243.9	455.4	295.2	~Φ	269.7	-8	-Φ	212.0	-20		-14.2	328.8
28	2004	163.4	257.3	129.1	241.1	156.3	-Φ	139.5	-52	-Φ	115.2	-57		-54.6	171.7
29	2005	548.4	863.7	433.5	809.1	524.6	+Φ	458.4	56	+Φ	395.6	49		52.5	576.2
30	2006	146.0	229.9	115.4	215.4	139.6	-Φ	129.4	-56	-Φ	98.6	-63		-59.4	153.5
31	2007	202.7	319.2	160.2	299.0	193.9		165.2			150.0			-43.6	212.9
32	Φ	359.6	566.4	284.2	530.6	344.0		293.2			266.2		377.7	351.1	324.4

Columna B (Año); Columnas C, D, E, F, G, I, L y P (valores de la precipitación media anual en mm, considerando un año hidrológico 01-Oct/30-Sep, en las estaciones Agua Caliente (AC), El Porvenir (Po), El Pinal (Pi), Ojos Negros (ON), San Juan de Dios Norte (SJDN), Olivares Mexicanos (OM), y Valle de San Rafael (VSR)); Columnas J, M y O (valores en %); PROM = promedio o media aritmética; Φ = Precipitación anual promedio, estimada con base en los datos del registro de la CNA; ~Φ = Precipitación anual aproximadamente igual que, o ($\leq\Phi+10\%$), o ($\geq\Phi-10\%$); +Φ = Precipitación anual ($>\Phi+10\%$); -Φ = Precipitación anual ($<\Phi-10\%$).

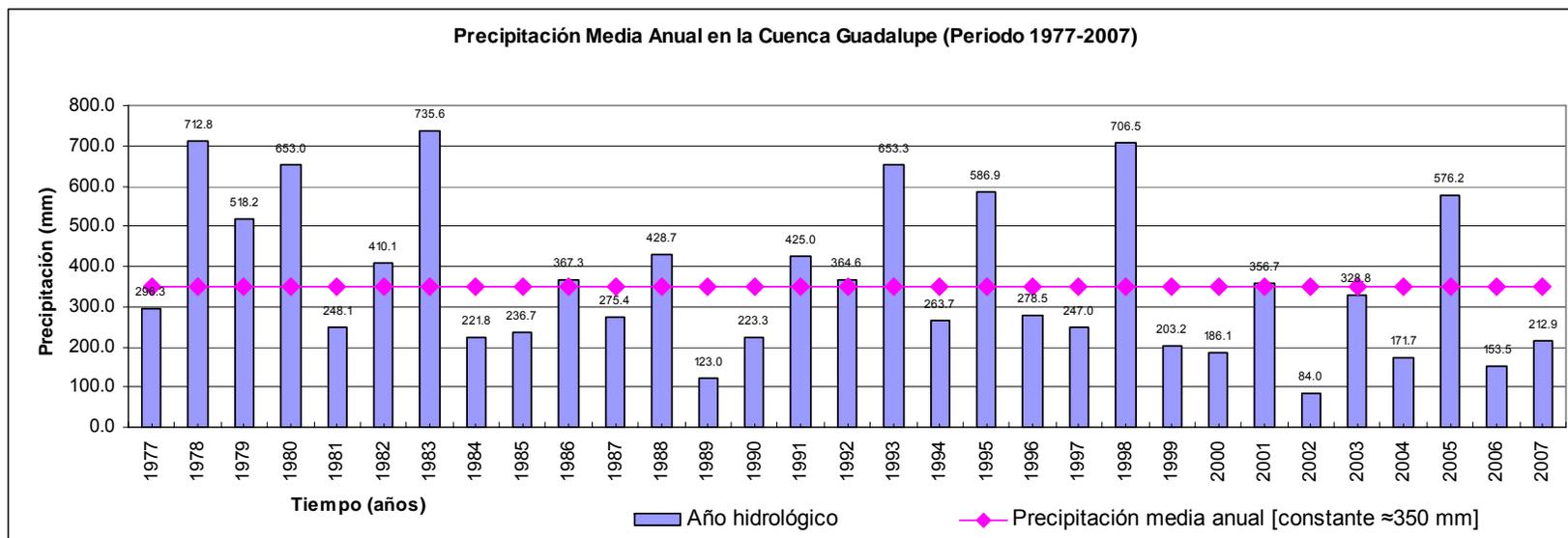


Figura 11. Precipitación media anual (mm) durante el periodo 1977-2007, con base en el registro histórico de la CNA

posible contar con el registro completo para el periodo 1984-2006 en todas las estaciones seleccionadas, debido a que algunas de ellas comenzaron a operar después de 1984 y/o han suspendido operaciones antes del 2006. Aún contemplando esta situación, se decide incluir la información de todas las estaciones, porque se considera que la mayoría de estas presentan un registro de datos importante, el cual es de gran utilidad para el desarrollo de este trabajo.

Por lo tanto, por practicidad y simplicidad, cuando en el registro de precipitación se ha requerido, el dato anual faltante se ha estimado mediante el esquema señalado a continuación. En primera instancia, con base en los datos anuales de la precipitación para cada una de las estaciones AC y VSR, se han definido los siguientes términos de referencia:

- 1) Precipitación anual promedio (Φ), corresponde a la media aritmética de los datos del registro elaborado por la CNA para cada una de las estaciones, por ejemplo, para la estación AC, puesto que para dicha estación se cuenta con datos de precipitación para todos los años que integran el periodo de registro evaluado en este trabajo (1977-2006), se tiene una (Φ) igual a la media aritmética de los 30 datos del registro;
- 2) Precipitación aproximadamente igual que la precipitación anual promedio ($\sim\Phi$), representa una precipitación anual igual que o aproximadamente igual que la (Φ), o ($\leq\Phi+10\%$), o ($\geq\Phi-10\%$);
- 3) Precipitación por arriba de la precipitación anual promedio ($+\Phi$), significa una precipitación anual numéricamente ($>\Phi+10\%$);
- y 4) Precipitación menor a la precipitación anual promedio ($-\Phi$), indica una precipitación anual numéricamente ($<\Phi-10\%$). Por otra parte, estos términos de referencia (columnas H y K, renglones 1-30) se establecen

tomando en cuenta un valor porcentual que nos indica si la precipitación anual del registro es mayor que, menor que o aproximadamente igual que la Φ . Dicho valor porcentual se ha estimado mediante regla de tres, en cuyo cálculo se considera que la (Φ) representa un 100%, mientras que el dato registrado puede ser aproximadamente igual que, o puede estar por arriba o por debajo de la (Φ), en una cantidad equivalente al $100\% \pm$ una fracción (Columnas J y M). Más adelante, se han calculado las ($\sim\Phi$, $+\Phi$ y/o $-\Phi$) promedio considerando los resultados respectivos a las estaciones AC y VSR (columna O, renglones 4-30). Aunque de forma visiblemente distinta, también se ha estimado la ($-\Phi$) promedio del año 2007 (columna O, renglón 31), en cuyo caso, el cálculo se realiza considerando los resultados de la ($\sim\Phi$ y $-\Phi$) para el periodo 1999-2006, puesto que, en este tiempo se aprecian ocho años con poca lluvia o de sequías, a excepción, por supuesto, del año 2005 en que se ha registrado una ($+\Phi$).

Para estimar los datos faltantes del registro en cada una de las estaciones (sombreado en color gris), el valor de la (Φ) respectiva a cada una de las estaciones Po, Pi, ON, SJDN y OM (columnas C-G, renglones 10-31), es afectado por el porcentaje de la ($\sim\Phi$, $+\Phi$, $-\Phi$) promedio; consecuentemente, se tiene una precipitación anual aproximadamente igual que, mayor que o menor que la Φ . Haciendo uso de este mismo criterio se ha estimado el dato faltante de las estaciones AC y VSR para el año 2007.

La información resultante, del esquema de estimación de datos faltantes, tiene un cubrimiento espacial y temporal de la precipitación ocurrida en la Cuenca Guadalupe que

satisface los propósitos planteados en este trabajo. Con base en los datos del registro de la CNA y los estimados en este trabajo para cada una las estaciones durante el periodo 1984-2007 se obtiene una precipitación media anual de ~350 mm (columna O, renglón 32).

A partir de los datos de precipitación media anual se calcula la recarga mensual dinámica aplicable a cada intervalo de tiempo que compone la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. La recarga mensual dinámica, ocasionada por la precipitación sobre la Cuenca Guadalupe, considerada durante la simulación es de acuerdo con el esquema estimado con base en el análisis de los datos del registro histórico de precipitación de la CNA: octubre, 3%, noviembre, 8%, diciembre, 12%, enero, 20%, febrero, 20%, marzo, 18%, abril, 7%, mayo, 2%, junio, 1%, julio, 3%, agosto, 3% y septiembre, 3% (Figura 12).

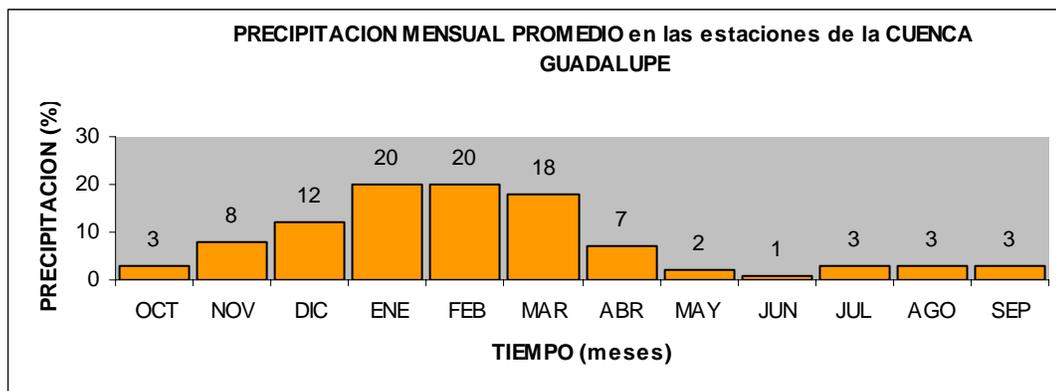


Figura 12. Esquema de precipitación media mensual, con base en el análisis del registro histórico de la precipitación de la CNA, considerada en la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe

III.3.7. Infiltración

La recarga del acuífero se refiere al volumen de agua infiltrada que llega hasta el nivel freático y pasa a ser parte del sistema de agua subterránea. Existen numerosos métodos propuestos para estimar el volumen de recarga de agua subterránea, sin embargo, la mayoría de estos solamente han tenido éxitos parciales y por lo tanto, no hay uno en particular cuya aplicación sea de uso común (Vries y Simmers, 2002). Por otro lado, de acuerdo con Anderson y Woessner (1992), para cuantificar la distribución espacial de la recarga, los modeladores han tenido que asumir tradicionalmente una recarga espacial uniforme igual a un porcentaje de la precipitación anual (y/o mensual) promedio, cuya recarga, muy a menudo, se ajusta y se define durante la calibración del modelo.

El volumen de recarga por precipitación directa varía de manera temporal y espacial, de acuerdo con las condiciones climáticas, la pendiente, la permeabilidad de la superficie del terreno, la vegetación y el coeficiente de saturación del suelo. Por ejemplo, la recarga por precipitación directa ha sido estimada para cuencas con depósitos glaciares estratificados y se ha obtenido como resultado un volumen aproximado del 55% de la precipitación anual promedio (Desimone *et al.*, 2002). Ponce *et al.* (1999) y Kresic (1997) coinciden en señalar un volumen de infiltración equivalente al 10% del agua precipitada anualmente en la cuenca analizada, estimado con base en los datos de cuencas con semejante clima semiárido, fisiografía y características de vegetación, cuyas altas temperaturas causan una elevada tasa de evapotranspiración a lo largo de casi todo el año. En general, la tasa exacta de recarga es difícil de calcular con precisión, puesto que depende de varios factores, tales como el clima, la cobertura del suelo y el uso de suelo,

topografía, geología subsuperficial, etc. De acuerdo con Marsily (1986), en las zonas áridas la lluvia es mucho mas baja que la evapotranspiración potencial y la recarga superficial es casi cero; esta situación ocurre normalmente, en los climas cálidos, cuando la precipitación media anual es menor a los 500 mm/año.

Con base en lo expuesto anteriormente, en este trabajo se asume cada uno de los valores numéricos que comprende el intervalo mínimo de 0 a 10% de la precipitación media anual durante el proceso de calibración del modelo (de acuerdo con Marsily, 1986; Ponce *et al.*, 1999; Kresic, 1997), esto con el objeto de conocer el volumen de recarga por precipitación directa (infiltración) en la zona del Acuífero del Valle de Guadalupe.

III.3.8. Recarga por escurrimientos horizontales

Wilson y Guan (2004) establecen que para los climas semiáridos, una componente significativa de la recarga a los acuíferos ocurre a lo largo del frente de montaña. Este proceso ha sido llamado tradicionalmente como ‘recarga del frente de montaña’ y ha sido estudiado en el ámbito de la modelación del flujo de agua subterránea como una condición de frontera. En general, de acuerdo con estos autores y otros investigadores del tema, las estimaciones de la recarga del frente de montaña se basan en un porcentaje de la precipitación en la montaña o en la calibración de un modelo de flujo de agua subterránea.

El término recarga de frente de montaña, generalmente es usado en climas áridos y semiáridos para describir la contribución de regiones montañosas a la recarga de los acuíferos en cuencas adyacentes. Frecuentemente, la recarga de los acuíferos se localiza a lo largo de canales o arroyos y el frente de montaña; en muchos casos la recarga del frente

de montaña es la fuente de recarga dominante (Hely *et al.*, 1971; Maurer *et al.*, 1999). En las cuencas con climas secos, la recarga directa de los acuíferos mediante la infiltración directa de la precipitación y los escurrimientos superficiales efímeros está ausente o es limitada, debido a los volúmenes de precipitación relativamente pequeños, las zonas vadosas profundas y el tipo de vegetación encontrada en el área (Foster y Smith-Carrington, 1980; Phillips, 1994; Izbicki, *et al.*, 2000; Flint *et al.*, 2002; Walvoord *et al.*, 2002).

Con base en la evidencia bibliográfica, Wilson y Guan (2004) reportan un compendio de las distintas metodologías utilizadas para estimar el volumen de recarga del frente de montaña (Tabla XIV). Algunos de los métodos que integran dicha publicación son:

- (1) **Método de regresión precipitación-escurrimiento.** Mediante el uso de dos ecuaciones empíricas distintas aplicadas a Las Montañas Sandia de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA), resulta una Recarga del Frente de Montaña (RFM) igual a 4.6% y 13% de la precipitación anual con el modelo de Waltemeyer (1994) y Hearne y Dewey (1988), respectivamente. El flujo subsuperficial y la evapotranspiración en el frente de montaña se consideró despreciable para la estimación de la RFM (Anderholm, 2000). Con base en los resultados de estos dos métodos, se estima una RFM promedio equivalente a $8.8 \pm 4.2\%$ de la precipitación anual.
- (2) **Balance de masas de los cloruros.** (2a) Las Montañas Carson y Virginia, en Eagle Valley, Nevada, cuentan con una RFM estimada de 7.8% de la precipitación anual; cuya estimación ha sido determinada con base en los datos observados en cuatro

subcuencas, integradas por rocas graníticas, basálticas y metamórficas, fracturadas e intemperizadas (Maurer y Berger, 1997). (2b) En este otro caso, se estimó una RFM igual a 6.1% de la precipitación anual para las Montañas Sandía, ubicadas en la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA) (Anderholm, 2000).

- (3) **Ley de Darcy.** Empleando este método Maurer y Berger (1997) hicieron una estimación de la RFM para las Montañas Carson y Virginia en Eagle Valley, Nevada (USA), resultando un valor del 8.8% de la precipitación anual. En el cálculo de esta estimación se consideraron datos observados en cuatro subcuencas, las cuales están constituidas por rocas graníticas, basálticas y metamórficas, fracturadas e intemperizadas.
- (4) **Modelado del acuífero.** (4a) Con una calibración que emplea el método inverso se estima una RFM en el orden del 26% de la precipitación anual para las Montañas Sandía de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA); los datos de precipitación empleados en este cálculo son los reportados por Anderholm (2000) (Tiedeman *et al.*, 1998). (4b) En cambio, con una calibración que usa la edad del agua subterránea, determinada a su vez con ^{14}C , se ha estimado una RFM equivalente al 3% de la precipitación anual para las mismas montañas (Sanford *et al.*, 2000). La RFM promedio estimada para las Montañas Sandía, con base en los resultados de estos dos métodos, es de $14.5 \pm 11.5\%$ de la precipitación anual.
- (5) **Modelado numérico en 2D.** Con una calibración que utiliza la edad del agua subterránea e incluye conjuntamente las áreas de valle y montaña, se estima una RFM de 0.6 % de la precipitación anual para las Montañas Eagle de Red Light

Draw Valley, Texas (USA). Esta zona de estudio tiene amplios horizontes de suelos cálcicos bien desarrollados y distribuidos en la cuenca (Hibbs y Darling, 1995).

- (6) **Balance de agua.** (6a y 6b) Este método ha sido utilizado para estimar la Recarga del Bloque de Montaña (RBM), resultando un valor del orden de 14% y 38% para las Montañas Sangre de Cristo y San Juan en San Luis Valley, Colorado (USA), respectivamente. Las Montañas Sangre de Cristo se encuentran integradas por rocas metamórficas (esquistos, gneisses), rocas ígneas (intrusivos graníticos) y rocas sedimentarias bien cementadas; mientras que las Montañas San Juan están constituidas por rocas volcánicas que cuentan con alta permeabilidad (Huntley, 1979). (6c) Por otro lado, una estimación de la RBM, para las zonas localizadas desde las Montañas Wasatch hasta el Distrito del Delta Weber en Utah (USA), resulta con un valor de 22% de la precipitación anual (Feth *et al.*, 1966). (6d) De acuerdo con Hely *et al.* (1971) estimó una RBM equivalente al 19% de la precipitación anual para una sección diferente de las mismas Montañas Wasatch. Con base en los resultados generados para las Montañas Wasatch, se estima una RBM promedio de $20.5 \pm 1.5\%$ de la precipitación anual.
- (7) **Modelado numérico en montañas.** Flint *et al.* (2001) hizo una estimación de la RBM para las Montañas Yucca, en Nevada (USA), y resultó un valor en el orden de 2.7% de la precipitación anual; estas montañas están constituidas principalmente por Tobas compactas y no compactas.
- (8) **Otros métodos.** Trazadores ambientales diferentes a los cloruros, desarrollados mediante el análisis de la composición isotópica del agua, siendo delta-deuterio y

delta-oxígeno 18 (δ^2H y $\delta^{18}O$) los trazadores ambientales empleados con más frecuencia; perfiles de temperatura del agua en el subsuelo y herramientas para el análisis de series de tiempo con el objeto de investigar los múltiples caminos que el agua puede tomar para llegar de las partes altas de las montañas hasta las partes bajas de las cuencas Wilson y Guan (2004) (Tabla XIV).

Tabla XIV. Evaluación cuantitativa de la recarga del frente de montaña mediante varios métodos (Wilson y Guan, 2004)

	Ubicación	Autor	Métodos	Cantidad de Recarga del Frente de Montaña (RFM) o Recarga del Bloque de Montaña (RBM) (porcentaje de precipitación anual)
1	Montañas Sandia de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA)	Anderholm (2000)	Regresión precipitación-escorrimento	RFM igual al 4.6% con el modelo de Waltemeyer (1994) RFM equivalente al 13% con el modelo de Hearne y Dewey (1988)
2	2a) Montañas Carson y Virginia de Eagle Valley, Nevada (USA) 2b) Montañas Sandia de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA)	Maurer y Berger (1997) Anderholm (2000)	Balance de masas de los cloruros	RFM en el orden de 7.8% RFM igual al 6.1%
3	Montañas Carson y Virginia de Eagle Valley, Nevada (USA)	Maurer y Berger (1997)	Ley de Darcy	RFM es de 8.8%
4	4a) Montañas Sandia de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA) 4b) Montañas Sandia de la Cuenca Albuquerque, Nuevo Mexico (USA)	Tiedeman <i>et al.</i> (1998) Sanford <i>et al.</i> (2000)	Modelado del acuífero	RFM es el 26% RFM de 3%
5	Montañas Eagle de Red Light Draw Valley, Texas (USA)	Hibbs y Darling (1995)	Modelado numérico en 2D	RFM de 0.6 %
6	6a) Montañas Sangre de Cristo en San Luis Valley, Colorado (USA) 6b) Montañas San Juan en San Luis Valley, Colorado (USA) 6c) Parte de la Cordillera de Wasatch hasta el Distrito del Delta Weber, Utah (USA) 6d) Una sección diferente de la Cordillera de Wasatch	Huntley (1979) Feth <i>et al.</i> (1966) Hely <i>et al.</i> (1971)	Balance de agua	RBM es de 14% RBM es 38% RBM igual al 22% RBM igual al 19%
7	Montañas Yucca, en Nevada (USA)	Flint <i>et al.</i> (2001)	Modelado numérico en montañas	RBM es de 2.7%
8			Otros:	Trazadores ambientales delta-deuterio y delta-oxígeno 18; perfiles de temperatura del agua en el subsuelo y herramientas para el análisis de series de tiempo

En cuanto a trabajos sobre el tema de los escurrimientos que se han realizado en la zona de estudio, destaca el desarrollado por Kurczyn-Robledo *et. al* (2007). Los autores puntualizan que en la región noreste del Valle de Guadalupe se presenta un alto potencial de escurrimiento en la parte de la serranía, cuyo porcentaje de escurrimiento promedio es de 78%, mientras que el aluvión presenta un alto potencial de infiltración, con un porcentaje de infiltración entre 30 y 44%; sin embargo, son muy claros en afirmar que esta infiltración no necesariamente se refleja como una recarga del acuífero. No obstante, establecen que la variabilidad espacial del potencial de escurrimiento/infiltración tiene implicación para el potencial de recarga del Acuífero del Valle de Guadalupe, puesto que ocurrirá el mayor aporte de la precipitación a la recarga, siempre y cuando el suelo esté saturado y la mayor cantidad de agua escurra hacia las planicies del valle, aumentando de esta manera la infiltración en el mismo.

Por otro lado, Ponce *et al.* (1999) estima una recarga por escurrimientos horizontales que bajan de la sierra igual al 10% del volumen total de agua precipitada en la Cuenca Guadalupe, los cuales drenan hacia el Acuífero del Valle de Guadalupe; este coeficiente de escurrimiento anual ha sido determinado con base en los datos de cuencas vecinas con semejante climatología, fisiografía y características de la vegetación.

Con base en lo expuesto anteriormente, en el contexto de los métodos de estimación de la recarga del frente de montaña, o recarga por escurrimientos horizontales que bajan de la sierra, y los valores estimados a través del empleo de los mismos, se tiene un intervalo de valores que fluctúa entre 0.6% y 78% de la precipitación anual, que es factible de considerar durante la calibración del modelo del flujo de agua subterránea y, de esta

manera, estimar la recarga del frente de montaña en la zona del Acuífero del Valle de Guadalupe.

El área de la Cuenca Guadalupe es de $\sim 1850 \text{ km}^2$ (Andrade, 1997), medida desde el origen de sus escurrimientos en la parte alta de la Sierra Juárez hasta la salida de los mismos por el margen suroeste del Valle de Guadalupe, aguas abajo del poblado El Porvenir; del área total de la Cuenca Guadalupe, corresponden $\sim 60 \text{ km}^2$ a la superficie del Acuífero del Valle de Guadalupe (Figura 9). Entonces, la superficie de escurrimiento factible para la aportación de un volumen de recarga del frente de montaña hacia el Acuífero del Valle de Guadalupe comprende $\sim 1790 \text{ km}^2$ (Figura 1c y Tabla X).

Las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur corresponden a fronteras impermeables, con excepción de los puntos donde los escurrimientos de la sierra llegan al valle. Inicialmente, el flujo en estos puntos es determinado en función del agua precipitada en toda la Cuenca Guadalupe y está distribuido proporcionalmente al tamaño de los arroyos o cañadas que bajan de la sierra. Los puntos de recarga por escurrimientos horizontales o recarga del frente de montaña son considerados como recarga puntual y se ubican en las fronteras del dominio de flujo de agua subterránea (Figura 13); esto a su vez define las condiciones de frontera para el modelo matemático del acuífero.

Con base en la información del registro de volúmenes de escurrimientos mensuales, medidos en la estación climatológica Agua Caliente, asumiendo que la zona es inminentemente agrícola y que el acuífero recibe cierta alimentación por retornos de riego (Andrade, 1997), se estima que la recarga del Acuífero del Valle de Guadalupe no se limita a la época de lluvias, sino que ocurre a lo largo de todo el año. Por lo tanto, de acuerdo con

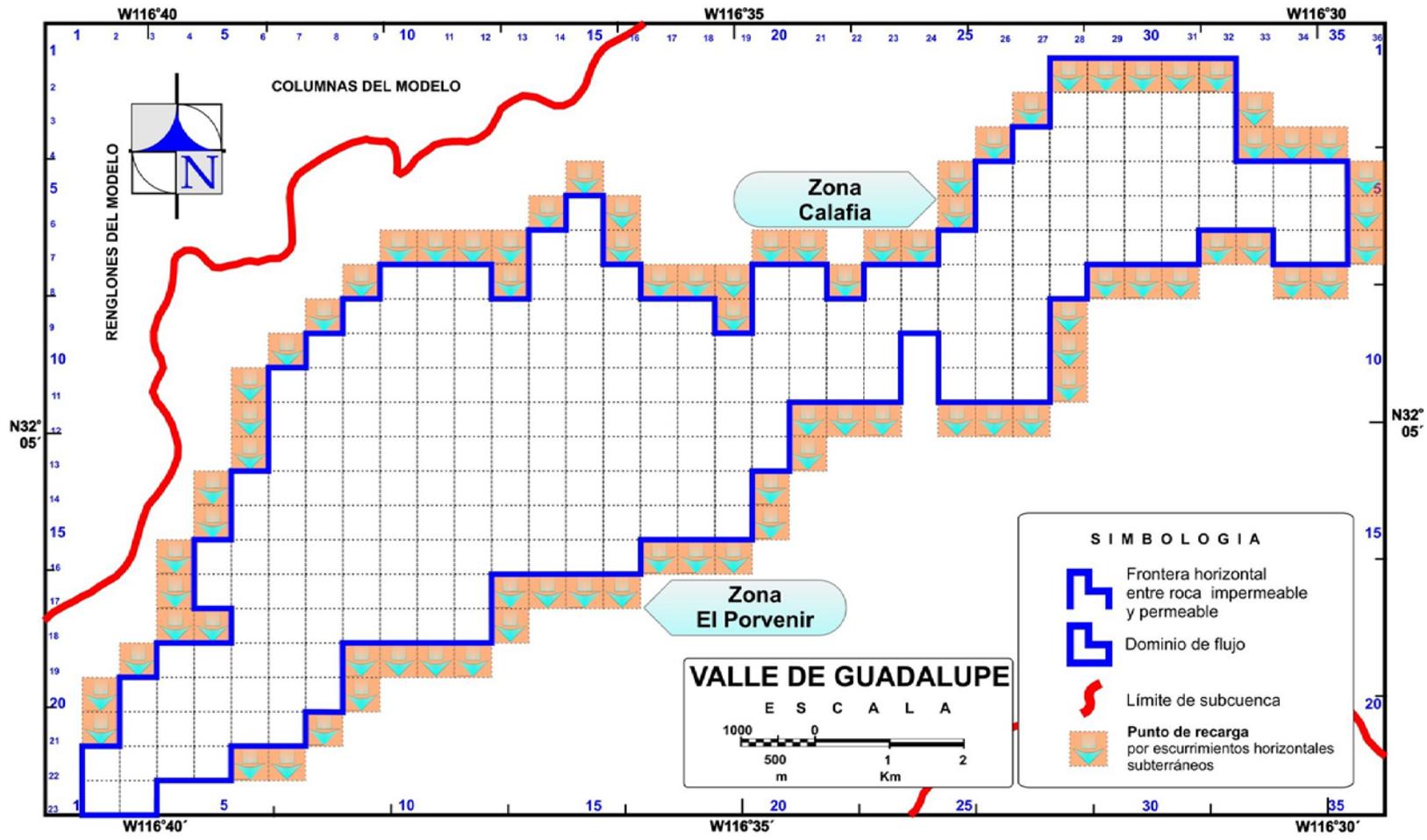


Figura 13. Ubicación de puntos de recarga por escurrimientos horizontales (flechas)

el conocimiento de la ocurrencia y la distribución de la recarga natural del acuífero, se supone que la recarga natural del Acuífero del Valle de Guadalupe debida a recarga horizontal por escurrimientos o recarga del frente de montaña cuenta con un régimen dinámico que ocurre durante todos los meses del año y se encuentra distribuido de la siguiente manera: 6% del volumen total de escurrimiento ocurre en Octubre, 6% en Noviembre, 11% en Diciembre, 16% en Enero, 14% en Febrero, 27% en Marzo, 8% en Abril, 3% en Mayo, 1% en Junio, 2% en Julio, 1% en Agosto y 5% en Septiembre (Figura 14). El mes con mayor porcentaje de escurrimiento es Marzo, con 27%; por el contrario, los meses con el menor porcentaje de escurrimiento son Junio y Agosto, con solamente 1%.

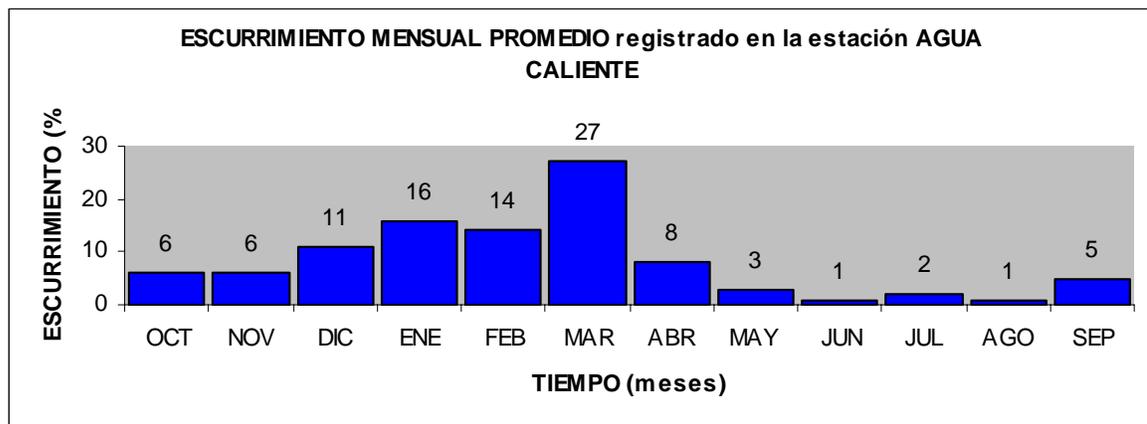


Figura 14. Porcentaje de escurrimiento mensual promedio registrado en la estación Agua Caliente, con base en el registro histórico del escurrimiento de la CNA

Las celdas que representan los puntos de recarga por escurrimientos horizontales o recarga del frente de montaña en las fronteras norte, sur, este y oeste son ficticias; es decir, estas celdas no forman parte del dominio de flujo del agua subterránea y solamente se

utilizan para simular condiciones de frontera de flujo conocido. En cambio, los puntos de recarga horizontal por escurrimientos o recarga del frente de montaña ubicados hacia el Cañón El Burro (parte norte de la Zona Calafia) sí forman parte del dominio de flujo del agua subterránea (Figura 13).

El acuífero es alimentado por los escurrimientos ya mencionados y por la infiltración de la lluvia en el área acuífera. Por lo tanto, durante el período completo de simulación (1984-2005) se supone un volumen de recarga directa equivalente a un porcentaje mensual constante de la precipitación media anual, y un volumen de recarga indirecta constituida por un régimen dinámico de recarga del frente de montaña.

III.3.9. Volúmenes de extracción

De acuerdo con la información recopilada, se distinguen dos tipos significativos de descarga por el sistema de bombeo establecido en la zona de estudio. El primer tipo se refiere a la extracción de agua subterránea para riego en los diversos cultivos que se desarrollan en el lugar, y en menor escala la destinada al servicio doméstico, industrial y pecuario local; el segundo tipo, consiste en la explotación acuífera realizada bajo el control de la CESPE, que se conduce a la ciudad de Ensenada para satisfacer parcialmente la demanda de agua en los renglones domiciliario, industrial y de servicios en general. Ambos tipos de descargas se realizan por medio de un número amplio de pozos y norias enclavadas en el Acuífero del Valle de Guadalupe (Andrade, 1997).

III.3.9.1 Bombeo agrícola

No existe un control hidrométrico confiable en cuanto al empleo del agua que se aplica al uso de riego agrícola, por lo que su cuantificación se ha realizado por medio del empleo de las láminas de riego que se aplican localmente sobre los diversos tipos de cultivo y en función de las superficies aproximadas que se observan en particular (Andrade, 1997; Andrade, 1992).

Para el caso, se consideraron las superficies físicas sembradas por subciclos de cultivo de tipos perenne, de otoño-invierno y de primavera-verano que (durante los años recientes) se han practicado en la zona de estudio, que conforme a un inventario previamente elaborado sobre la superficie aproximada de aprovechamiento agrícola, y aplicando las laminas de riego correspondiente a cada tipo de cultivo (Andrade, 1997; Andrade, 1992). De esta manera, se estima un volumen total de extracción de agua subterránea por el sistema de bombeo para uso agrícola de $\sim 14.0 \text{ Mm}^3$, el cual está distribuido a lo largo del año conforme al desarrollo ilustrado en la Tabla XV. El mayor volumen de extracción se realiza durante el periodo de Abril a Octubre, alcanzando $\sim 90\%$ del total y el restante 10% durante los meses de Noviembre a Marzo.

Tabla XV. Distribución mensual de riego agrícola (Andrade, 1997)

<i>Distribución mensual de riego aplicado (Mm^3)</i>								
Mes	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Acumulado anual
<i>Distribución (Mm^3)</i>	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	1.8	12.6
Porcentaje (%)	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	13.0	91.0
Σ % en el periodo								$\sim 90\%$
Mes	Nov			Dic	Ene	Feb	Mar	
<i>Distribución (Mm^3)</i>	0.4			0.3	0.1	0.1	0.3	1.2
Porcentaje (%)	3.0			2.0	1.0	1.0	2.0	9.0
Σ % en el periodo								$\sim 10\%$
<i>Total Distribución (Mm^3)</i>								13.8
Total Porcentaje (%)								100.0

Aunque en menor rango de consumo, es conveniente considerar, y tiene que agregarse al volumen de extracción de agua subterránea expuesto en el cuadro anterior, el renglón de extracción acuífera que es aprovechado para el servicio doméstico en los núcleos de población ubicados en la zona de estudio, para abastecer las necesidades pecuarias y para las pequeñas industrias esparcidas en el valle. La mayor parte de esta agua se extrae de numerosas norias, y aunque no es posible calcular su volumen de explotación en las condiciones actuales debido a que no existe aforo o control alguno en este renglón a la fecha, un volumen inferido de 0.5 Mm^3 de agua por año es una suma razonable para cubrir tales satisfactores (Andrade, 1997).

III.3.9.2. Bombeo conducido a la ciudad de Ensenada

El segundo tipo de extracción desarrollado en la zona de estudio, lo constituye el bombeo continuo realizado por la CESPE, mediante el manejo de diez pozos dispuestos en batería a lo largo del curso del Arroyo Guadalupe y confinados a la Zona Calafía, y cuyo caudal en conjunto se transporta por medio de un acueducto a la ciudad de Ensenada, donde atiende parcialmente los servicios de carácter doméstico e industrial de la misma. Con base en la información otorgada por la misma CESPE se estimó un volumen de extracción de agua subterránea de 8.5 Mm^3 por año (Andrade, 1997).

Para fines prácticos de la calibración del modelo, y tomando en cuenta la información proporcionada por la CNA, se asume que los pozos de la CESPE empiezan la extracción de agua subterránea a partir del año 1985. La mayoría de estos pozos tienen, por simplicidad, como fecha de inicio de operaciones el mes próximo siguiente a la fecha de terminación del aforo en el pozo en cuestión, quedando finalmente como se señala a

continuación: en enero de 1985, los pozos Guadalupe-1 (CESPE, P-5), Guadalupe-2 (CESPE, P-7) y Guadalupe-3 (CESPE, P-9); en abril de 1985, los pozos Guadalupe-4 (CESPE, P-10), Guadalupe-5 (CESPE, P-3), Guadalupe-6 (CESPE, P-1), Guadalupe-7 (CESPE, P-4), Guadalupe-8 (CESPE, P-2), Guadalupe-9 (CESPE, P-6) y Guadalupe-10 (CESPE, P-8) (Tabla XVI).

Tabla XVI. Fecha de inicio de operaciones en los pozos de CESPE

Año	84			85								
Tiempo (mes)												
Nombre del pozo	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
Guadalupe-1 (CESPE, P-5)												
Guadalupe-2 (CESPE, P-7)												
Guadalupe-3 (CESPE, P-9)												
Guadalupe-4 (CESPE, P-10)												
Guadalupe-5 (CESPE, P-3)												
Guadalupe-6 (CESPE, P-1)												
Guadalupe-7 (CESPE, P-4)												
Guadalupe-8 (CESPE, P-2)												
Guadalupe-9 (CESPE, P-6)												
Guadalupe-10 (CESPE, P-8)												

Con base en la información sobre los períodos del funcionamiento de los pozos proporcionada por la CNA, la CESPE y la reportada en estudios previos (Andrade, 1992; Andrade, 1997), se considera a través del proceso de calibración que los pozos están en funcionamiento a lo largo de todo el año.

Por otro lado, el gasto de extracción anual estimado en 1977 para el Acuífero del Valle de Guadalupe asciende a 21.0 Mm³/año (CNA, 1998). La extracción de agua subterránea se ha determinado con base en la información obtenida durante el recorrido de campo para identificar las superficies de riego, tipo de cultivo, tiempo de operación de la obra, registro hidrométrico subterráneo y aplicación de lámina de riego para cada cultivo

(Beltrán, 1998b). Como resultado de este proceso, se tienen números aproximados del gasto anual estimado, ya que no se cuenta con medidores volumétricos de gasto en la mayoría de los pozos. Por consiguiente, durante el proceso de calibración del simulador numérico los gastos de varios pozos se modifican con el objeto de poder reproducir con mejor aproximación las observaciones de campo.

Los pozos en operación en el Acuífero del Valle de Guadalupe se consideran como descargas puntuales con un volumen de extracción mensual dinámico a lo largo del periodo que comprende la simulación. El porcentaje de extracción mensual promedio para los pozos en operación que se consideran en este trabajo está distribuido conforme se aprecia en las Figuras 15 y 16. Los pozos que extraen agua subterránea para uso agrícola funcionan todo el año, a razón de un porcentaje de extracción mensual denotado por el siguiente esquema: Octubre (13%), Noviembre (3%), Diciembre (2%), Enero (1%), Febrero (1%), Marzo (2%), Abril (13%), Mayo (13%), Junio (13%), Julio (13%), Agosto (13%) y Septiembre (13%) (Andrade, 1992; Andrade, 1997) (Tabla XVII y Figura 15). En el Apéndice D se presentan los volúmenes estimados durante la calibración del modelo y asignados por el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) del Valle de Guadalupe a usuarios del recurso hidráulico en la zona de estudio.

Tabla XVII. Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos de uso agrícola en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información de Andrade (1992) y Andrade (1997)

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Σ
%	13	3	2	1	1	2	13	13	13	13	13	13	100

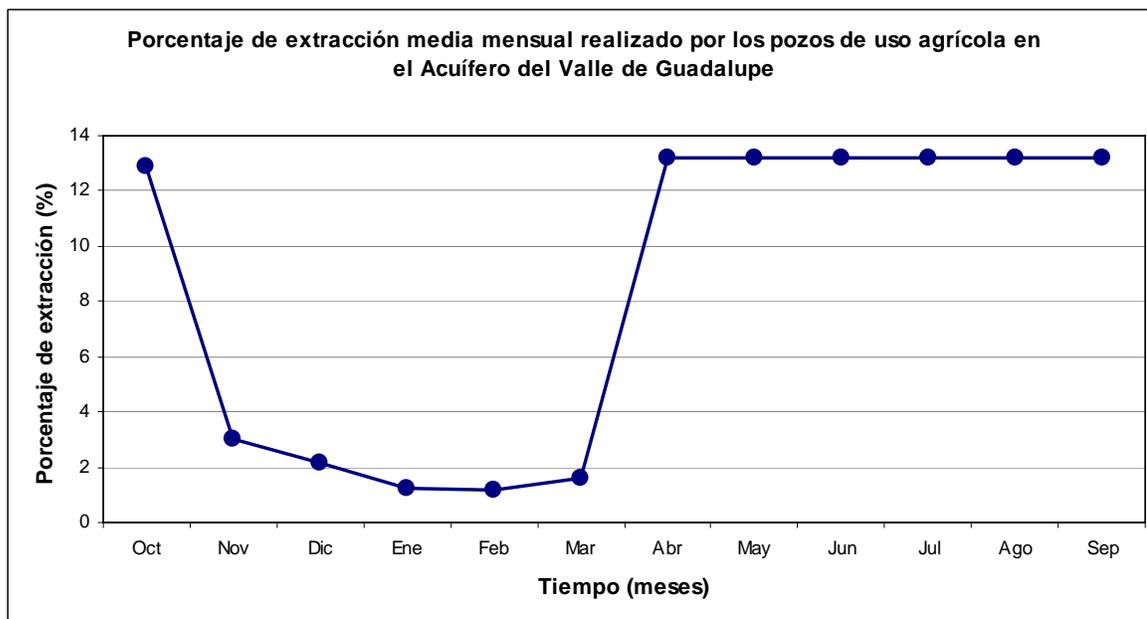


Figura 15. Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos de uso agrícola en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información de Andrade (1992) y Andrade (1997)

Dentro de la información recopilada y utilizada para la calibración del modelo de flujo de agua subterránea, se cuenta con datos de extracción mensual de los pozos, operados por CESPE (periodo 1990-2002), que suministran agua potable a la ciudad de Ensenada (Apéndice E). El esquema de extracción de agua subterránea, para pozos operados por la CESPE, tiene la siguiente distribución: 9% en Octubre, 8% en Noviembre, 8% en Diciembre, 8% en Enero, 7% en Febrero, 8% en Marzo, 8% en Abril, 9% en Mayo, 9% en Junio, 9% en Julio, 9% en Agosto, y 8% en Septiembre (Tabla XVIII y Figura 16).

Tabla XVIII. Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos operados por CESPE, con base en la información del periodo 1993-2002

Mes	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Σ
%	9	8	8	8	7	8	8	9	9	9	9	8	100

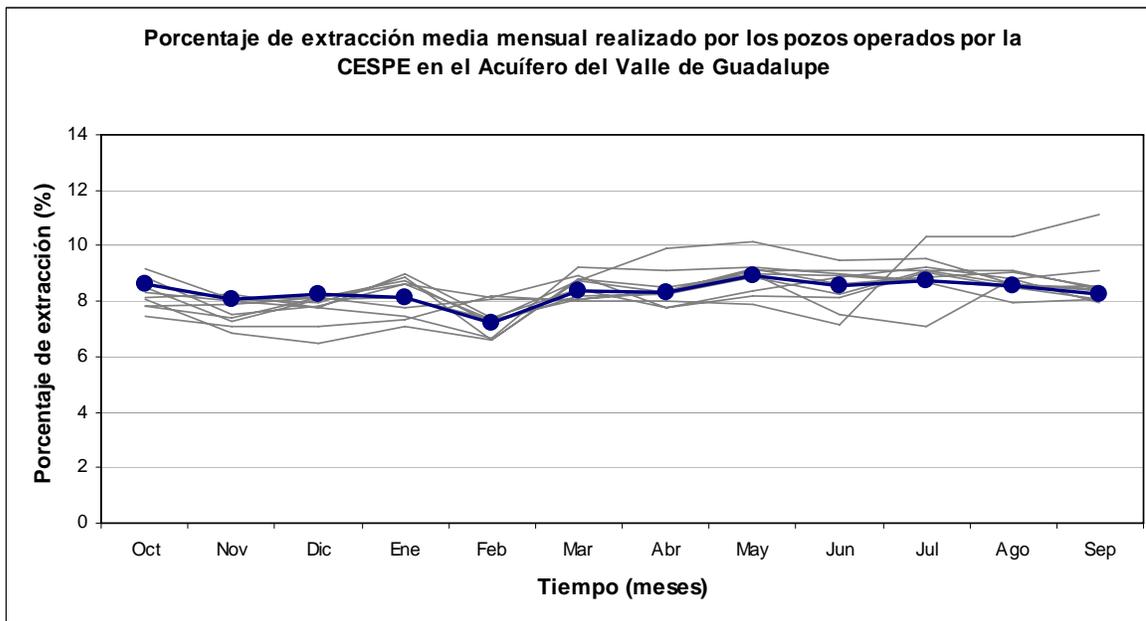


Figura 16. Porcentaje de extracción media mensual realizado por los pozos operados por la CESPE, con base en la información del periodo 1993-2002. La línea obscura unida con círculos señala el valor medio

III.3.10. Censo de aprovechamientos

Como resultado del censo de aprovechamientos de agua subterránea realizado por la CNA en 1998, se evidencia un incremento gradual del número de obras construidas con el propósito de extraer agua subterránea. Este crecimiento del número de aprovechamientos se puede apreciar en el siguiente esquema (Tabla VIII). Para el año de 1967 se han contabilizado 62 aprovechamientos; en el año 1977 han sido 295 los aprovechamientos contados; en 1988 se reporta la existencia 409 aprovechamientos; después, en el año de 1990 ya eran 760 los aprovechamientos, y hace aproximadamente una década, en el censo

de 1998, se cuantificaron 796 aprovechamientos de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Tomando en cuenta la información de los censos previamente realizados en la zona de estudio, en este trabajo se considera un total de 295 aprovechamientos de agua subterránea, valor numérico reportado en el año de 1977, para la etapa de calibración del modelo de flujo de agua subterránea; lo anterior obedece simplemente a que este censo es el último anterior llevado a cabo antes de la fecha fijada como condición inicial de la simulación (Febrero de 1984). Respecto a la ubicación de cada uno de los pozos establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, se considera la información reportada por la CNA (1998) en un mapa temático, cuya configuración se puede observar en la Figura 17.

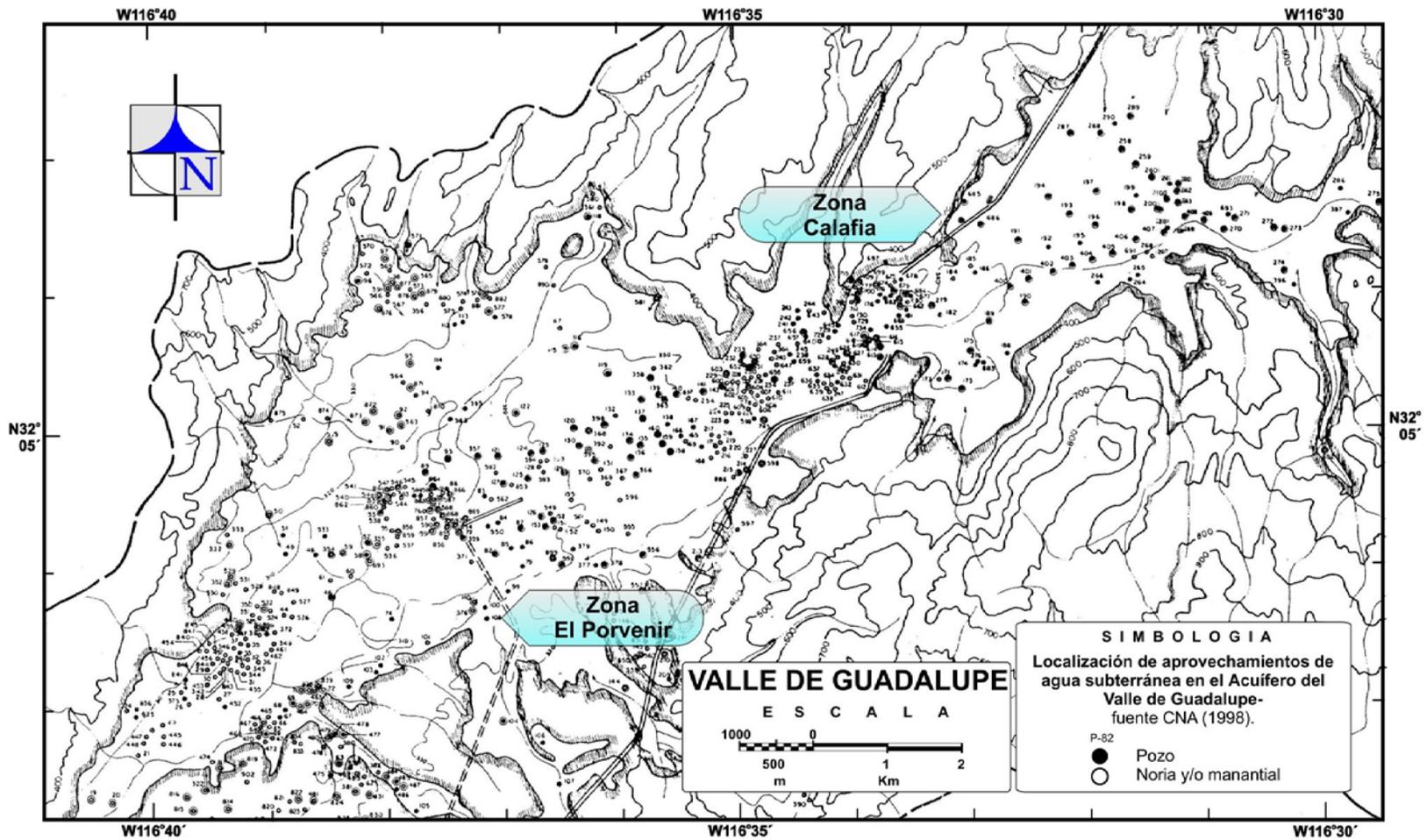


Figura 17. Localización de aprovechamientos de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Fuente: CNA (1998)

III.3.11. Conductividad hidráulica

La asignación de las conductividades hidráulicas se realizó con base en la información proporcionada por la CNA sobre ensayos de bombeo (Beltrán, 2001; Andrade, 1997; Andrade, 1992), columnas litológicas (Figura 18, Figura 19 y Tabla XX) y en valores característicos para el tipo de materiales analizados (Anderson y Woessner, 1992; Tabla XIX).

Tabla XIX. Intervalo de valores para la conductividad hidráulica. Tomada de Anderson y Woessner (1992)

Material	(m/día)	Conductividades Hidráulicas		
		(m/año)		
		Límite inferior	Media	Límite superior
Arcilla	$6.0 \times 10^{-7} - 5.0 \times 10^{-4}$	2.2×10^{-4}	6.3×10^{-3}	1.8×10^{-1}
Sedimento, suelo, cieno (Silt, loess)	$7.0 \times 10^{-3} - 4.0 \times 10^0$	2.6×10^0	6.1×10^1	1.5×10^3
Arena con sedimentos (Silty sands), arena fina (fine sands)	$7.0 \times 10^{-2} - 2.0 \times 10^1$	2.6×10^1	4.3×10^2	7.3×10^3
Arena limpia / fina-gruesa	$5.0 \times 10^{-1} - 2.0 \times 10^2$	1.8×10^2	3.7×10^3	7.3×10^4
Grava	$1.0 \times 10^2 - 6.0 \times 10^3$	3.7×10^4	2.8×10^5	2.2×10^6
Roca ígnea y metamórfica / no fracturada-fracturada	$1.0 \times 10^{-8} - 7.0 \times 10^0$	3.7×10^{-6}	9.4×10^{-2}	2.6×10^3

Durante los años 1972, 1973 y 1977, la empresa Técnicas Modernas de Ingeniería (TMI), S.A., realizó un total de 12 pruebas de bombeo de corta duración en igual número de pozos ubicados en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Los valores del coeficiente de transmisibilidad, estimados del registro de datos de las pruebas de bombeo, oscilan entre 0.3×10^{-3} y 5.2×10^{-2} m²/seg (3.0×10^1 m²/día y 4.6×10^3 m²/día), pero predominan los valores superiores a 1.0×10^{-3} m²/seg (8.5×10^1 m²/día) (Andrade, 1997). De acuerdo con la

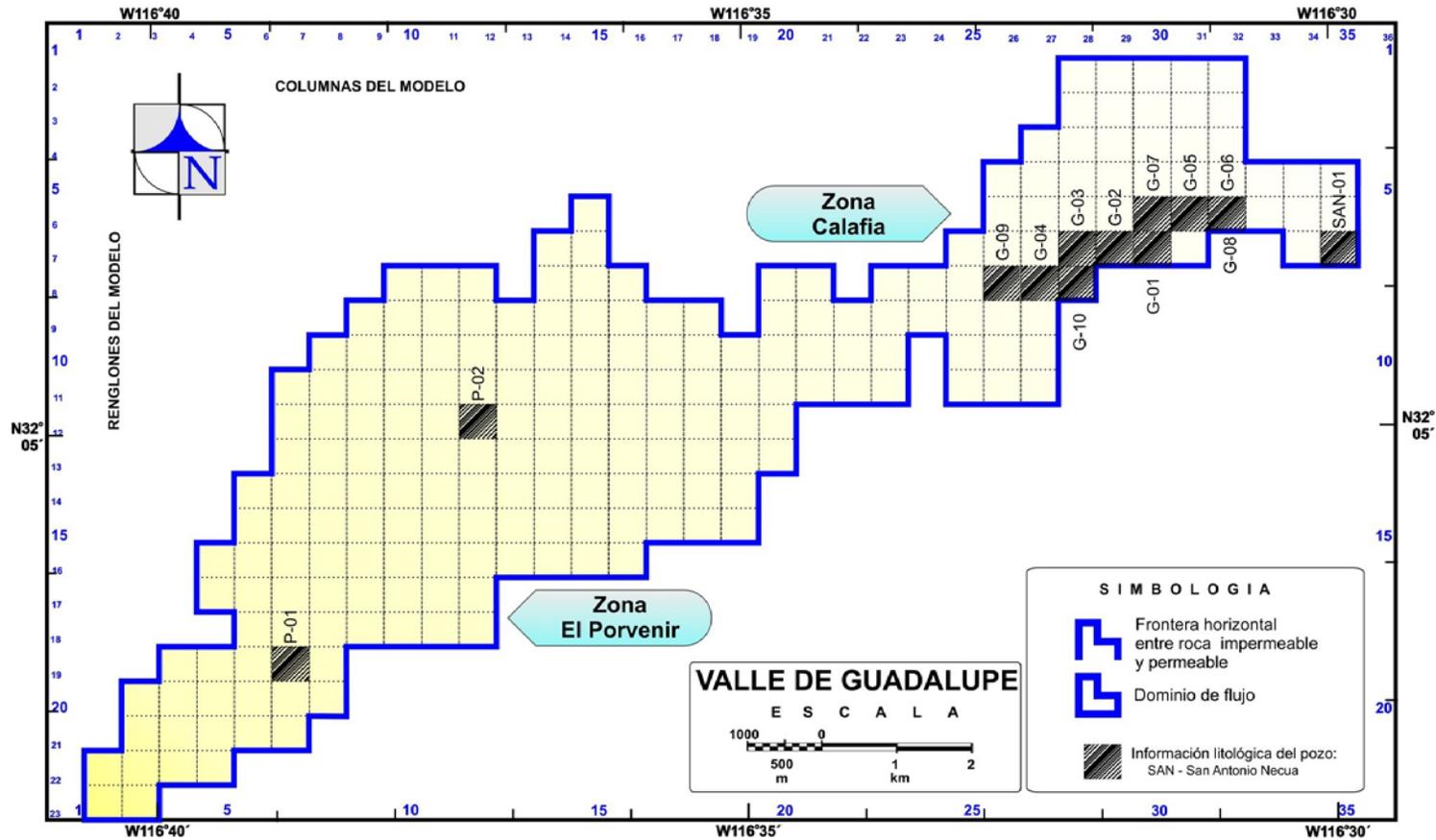


Figura 18. Ubicación de los aprovechamientos de agua subterránea establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe que cuentan con registro de pozos (columnas litológicas)

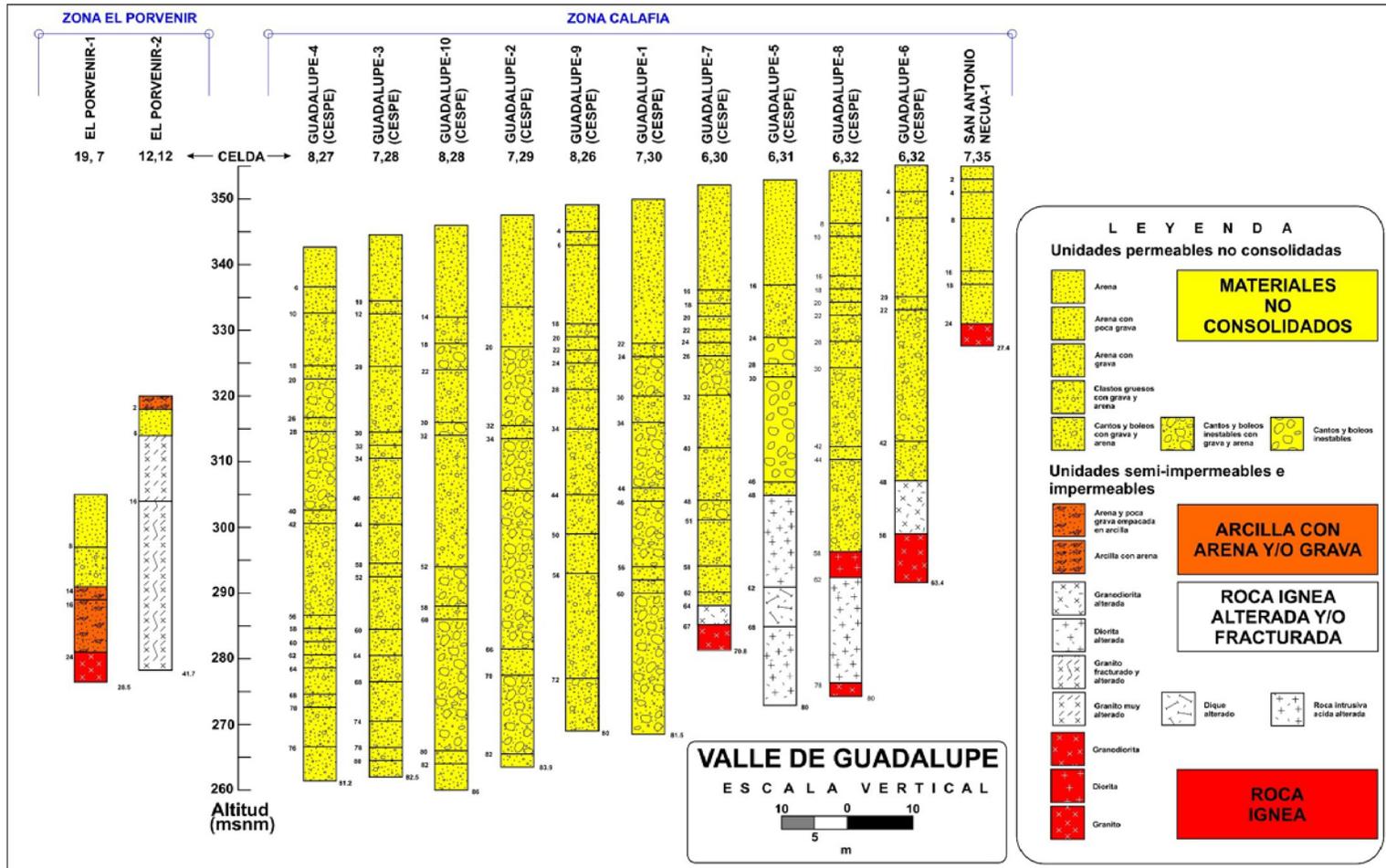


Figura 19. Columnas litológicas de pozos construidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, con base en la información proporcionada por la CNA

Tabla XX. Información del registro de pozos (columnas litológicas) para los aprovechamientos de agua subterránea establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, de acuerdo con la información proporcionada por la CNA

Información sobre cortes litológicos de pozos en el Valle de Guadalupe								
	Nombre del sitio	Coordenadas	Geográficas	Altitud aproximada (msnm)	Corte geológico predominante	Profundidad total perforada (m)	Observaciones sobre la descripción litológica	Coordenadas Modelo numérico ij
<u>1</u>	El Porvenir-1	32°03'20 N	116°38'45 W	305.00	Arena y gravilla	28.57	Granito (24.00-28.57 m)	19,7
<u>2</u>	El Porvenir-2	32°05'10 N	116°37'20 W	320.00	Arcilla, arena, granito	41.70	Granito fracturado y alterado (16.00-41.70 m)	12,12
<u>3</u>	San Antonio Necua-1	32°06'30 N	116°30'05 W	355.00	Arena gruesa y gravillas	27.41	Granito (24.00-27.41 m)	7,35
<u>4</u>	Guadalupe-1 (CESPE)	32°06'27 N	116°31'37 W	350.00	Clásticos, cantos y arenas	81.50	No se alcanzó a cortar basamento	7,30
<u>5</u>	Guadalupe-2 (CESPE)	32°06'21 N	116°32'03 W	347.50	Cantos, clásticos y arenas	83.90	No se alcanzó a cortar basamento	7,29
<u>6</u>	Guadalupe-3 (CESPE)	32°06'15 N	116°32'23 W	344.50	Clásticos, cantos y arenas	82.50	No se alcanzó a cortar basamento	7,28
<u>7</u>	Guadalupe-4 (CESPE)	32°06'11 N	116°32'31 W	342.61	Cantos, clásticos, gravas y arenas	81.20	No se alcanzó a cortar basamento	8,27
<u>8</u>	Guadalupe-5 (CESPE)	32°06'36 N	116°31'15 W	352.90	Cantos, gravas y arenas	80.00	Roca intrusiva ácida (diorita) (48.00-62.00 m)	6,31
<u>9</u>	Guadalupe-6 (CESPE)	32°06'43 N	116°30'45 W	355.11	Cantos, clásticos y arenas	63.40	Granodiorita (56.00-63.40 m)	6,32
<u>10</u>	Guadalupe-7 (CESPE)	32°06'34 N	116°31'36 W	352.12	Grava, arena, clásticos y boleos	70.80	Granodiorita (67.00-70.80 m)	6,30
<u>11</u>	Guadalupe-8 (CESPE)	32°06'45 N	116°31'05 W	354.30	Clásticos, arenas y cantos	80.00	Roca intrusiva ácida (diorita?) (58.00-62.00 m)	6,32
<u>12</u>	Guadalupe-9 (CESPE)	32°06'05 N	116°32'52 W	349.00	Clásticos, cantos y arenas	80.00	No se alcanzó a cortar basamento	8,26
<u>13</u>	Guadalupe-10 (CESPE)	32°06'11 N	116°32'15 W	346.00	Clásticos, cantos, arena y grava	86.00	No se alcanzó a cortar basamento	8,28

clasificación cualitativa de la transmisibilidad reportada por Krásný (2003), en el Acuífero del Valle de Guadalupe se pueden encontrar materiales con una transmisibilidad moderada así como materiales con una transmisibilidad muy alta, predominando la ocurrencia de materiales con transmisibilidades moderadas. El coeficiente de transmisibilidad se define como el producto de la conductividad hidráulica por el espesor saturado. Aunque las estimaciones hechas por TMI para el coeficiente de transmisibilidad son valores aproximados, se obtiene con esta información el orden de magnitud de la conductividad.

La información sobre columnas litológicas proporcionada por la CNA corresponden a trece pozos establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe; once de los cuales están ubicados en la Zona Calafia (Figura 18 y Figura 19). Casi en la totalidad del número de pozos situados en la Zona Calafia han sido operados a lo largo de su vida útil, y hasta la fecha, por la CESPE. Con base en la información de estas columnas litológicas (Tabla XX), el Acuífero del Valle de Guadalupe se encuentra mayormente constituido por materiales no consolidados (arenas, gravas, cantos y boleos), arcilla con arena y/o grava. Teniendo en cuenta lo anterior, y de acuerdo con la clasificación cuantitativa de la conductividad hidráulica, reportada por Anderson y Woessner (1992), los materiales que componen el Acuífero del Valle de Guadalupe tienen un intervalo de valores que varía de 3.7×10^{-6} a 2.2×10^6 m/año, que representan el límite inferior de la roca ígnea y metamórfica no fracturada y el límite superior de la grava, respectivamente.

El análisis de la información da como resultado el código de conductividades hidráulicas presentado en la Figura 20, el cual se supone constante para el desarrollo del período completo de simulación (1984-2005). Los valores estimados de la conductividad hidráulica para los materiales que componen el Acuífero del Valle de Guadalupe varían de 0.0×10^0 a 4.0×10^4 m/año.

- a) Las rocas ígneas y metamórficas que constituyen las fronteras norte, este y oeste del Acuífero del Valle de Guadalupe se suponen impermeables; por lo tanto, se les asigna una conductividad hidráulica de 0.0×10^0 m/año, y se consideran como celdas inactivas. Consecuentemente, en estas celdas no se calcula el nivel freático.
- b) Aquellas zonas con baja conductividad hidráulica, en el orden de 1.5×10^4 m/año, representan a los sedimentos con la posible presencia de lentes arcillosos.
- c) Se representa con una conductividad hidráulica de 2.5×10^4 m/año a los depósitos aluviales y fluviales constituidos por arenas finas y gruesas que componen gran parte de la Zona Calafia.
- d) Los depósitos aluviales y fluviales constituidos por limos, arcillas y arenas, que componen parte del Acuífero del Valle de Guadalupe se consideran con un valor de la conductividad hidráulica de 3.0×10^4 m/año.
- e) Se considera con una conductividad hidráulica del orden de los 4.0×10^4 m/año a los depósitos aluviales y fluviales constituidos por arenas finas, gruesas y gravas que forman el Arroyo Guadalupe.

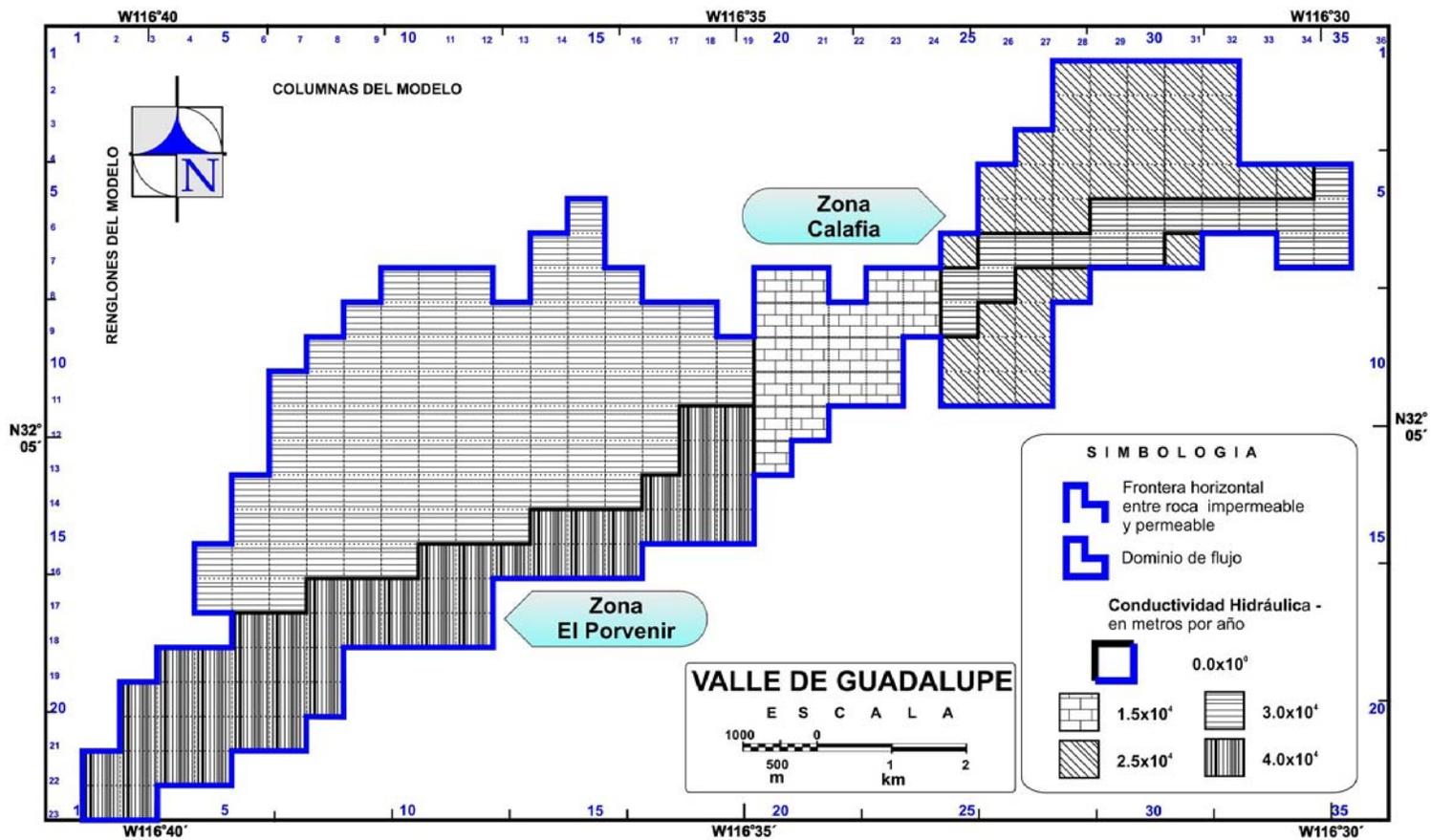


Figura 20. Código de conductividades hidráulicas (K) (m/año) para el Acuífero del Valle de Guadalupe

III.3.12. Basamento impermeable

Una vez definida la extensión en planta del dominio de flujo, es necesario determinar el espesor del estrato que lo contiene. Desde el punto de vista hidrogeológico esta información es necesaria para establecer el límite inferior del acuífero y poder estimar el volumen de material con propiedades para almacenar o conducir el agua subterránea.

Con base en la información recopilada sobre la topografía del basamento impermeable, misma que ha sido generada en estudios previos mediante el análisis e interpretación de sondeos eléctricos verticales (resistividad), para lo cual, a su vez, se han empleado como medio de calibración los cortes geológicos disponibles de algunos pozos próximos al emplazamiento de las estaciones geofísicas y, cuyo resultado tienen gran correlación con la geología superficial y estructural del Valle de Guadalupe (Andrade, 1992; Andrade, 1997), se ha estimado la elevación de la frontera inferior irregular e impermeable del Acuífero del Valle de Guadalupe. La frontera inferior esta formada por el contacto entre los materiales que constituyen el acuífero y la capa de roca ígnea (relativamente) impermeable subyacente (3.7×10^{-7} a 3.7×10^{-3} m/año; Domenico y Schwartz, 1998; Smith y Wheatcraft, 1993); esta se considera como una frontera de flujo nulo durante el periodo completo de la simulación del flujo de agua subterránea. El rasgo más importante de la configuración del basamento, consistente con la información proporcionada por la CNA, está representado por la existencia de sitios con profundidades máximas de hasta ~200 m de profundidad en la parte central de la Zona Calafia y ~100 m de profundidad en el área central de la Zona El Porvenir (Figura 21).

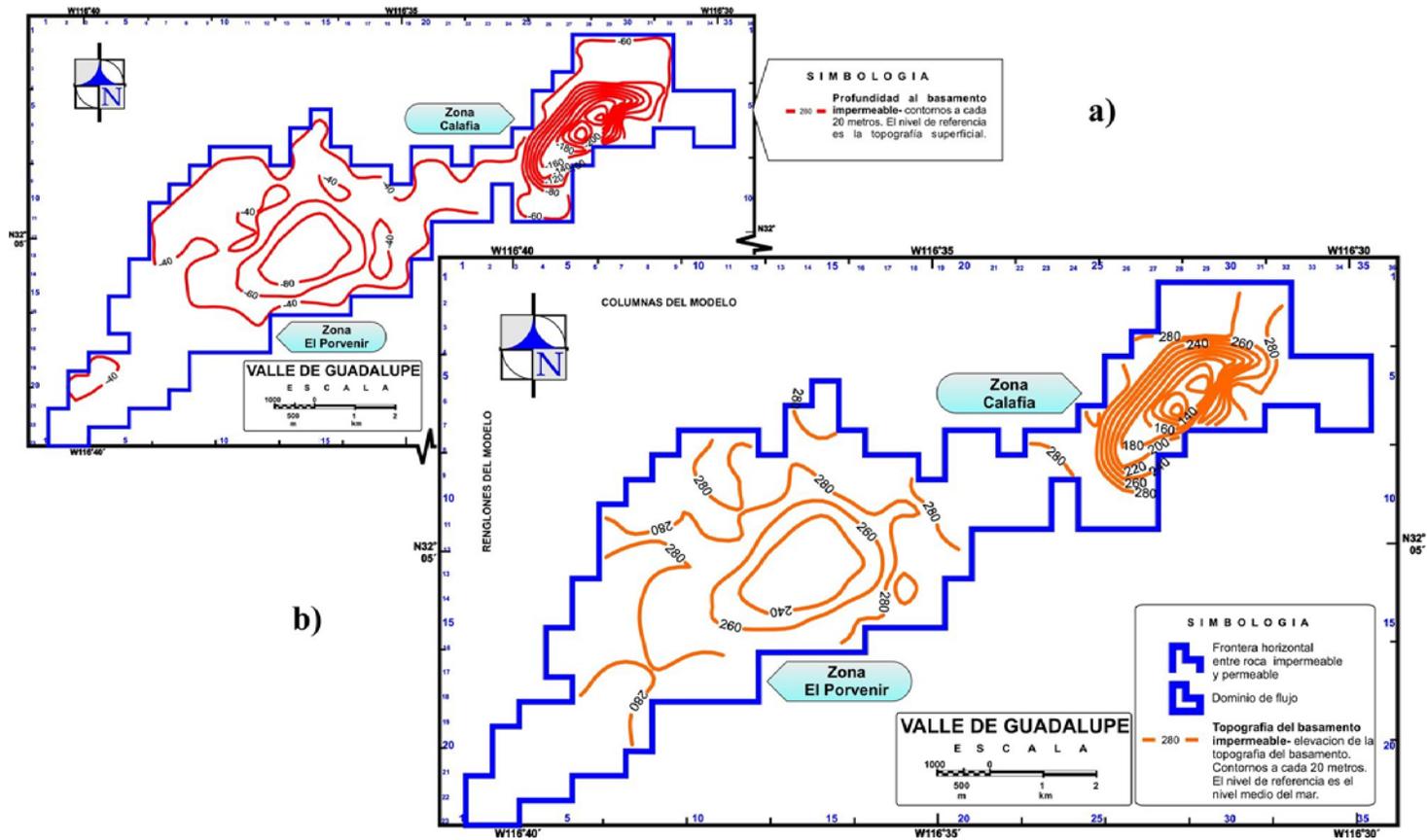


Figura 21. Basamento impermeable. a) Contornos de igual profundidad al basamento impermeable, b) Contornos de igual elevación a la topografía irregular del basamento impermeable (msnm)

En la etapa de calibración del simulador numérico algunas zonas de la topografía del basamento analizado se modifican para reproducir con mejor aproximación las observaciones de campo. La información sobre la elevación del estrato rocoso impermeable da como resultado la topografía del basamento impermeable que se presenta en la Figura 21. En el Apéndice F se presenta los valores numéricos de la discretización de los datos de topografía del basamento correspondiente al Acuífero del Valle de Guadalupe, que se supone durante el período de simulación completo (1984-2005).

III.3.13. Superficie topográfica

Después de que se ha definido la extensión en planta y en profundidad del dominio de flujo, es conveniente determinar la elevación de la superficie topográfica. Esta información se requiere para establecer un límite superior de la elevación del nivel freático en la zona de estudio, ya que, con base en la información de la superficie topográfica, se activarán o no las herramientas numéricas de evapotranspiración y flujo de agua superficial (drenes) durante la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Para determinar la superficie topográfica de la zona de estudio se considera la información de estudios realizados por el INEGI y la CNA. Con la finalidad de lograr este objetivo se analiza la información de un modelo digital de elevaciones, escala 1:50,000, para la zona del Valle de Guadalupe, así como la información de las cartas topográficas y geológicas de Francisco Zarco (I11D82) y Primo Tapia (I11D81), con escalas 1:50,000, reportadas por el INEGI. Por otra parte, también se analiza la información sobre elevaciones del nivel del terreno generada por la CNA en 2003; la cual se obtuvo a su vez

mediante la contratación de los servicios de Geomática Integral y Servicios de Baja California S. C., a través del estudio '*Nivelación de brocales de la red de monitoreo piezométrico del Acuífero 0207 del Valle de Guadalupe, Ensenada, B. C.*' Como resultado del estudio de la CNA se tiene la elevación de la superficie topográfica en 34 puntos de medición distribuidos a lo largo y ancho de la zona de estudio. Sin embargo, del total de puntos de medición, solamente los datos correspondientes a 20 aprovechamientos hidráulicos se consideran para determinar la superficie topográfica del Valle de Guadalupe. Esta selección obedece, básicamente, a puntos de medición que se localizan dentro del dominio de flujo y proveen suficiente información sobre la tendencia general de la topografía superficial en la zona de estudio, requerida para el análisis en escala regional del comportamiento del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe (Figura 22 y Tabla XXI).

Con base en el análisis de la información recopilada, sobre la topografía superficial del Acuífero del Valle de Guadalupe, se determina la elevación del terreno correspondiente al dominio del flujo de agua subterránea empleado en la simulación (Figura 23). De acuerdo con la topografía superficial determinada, las elevaciones del nivel de terreno presenta un rango de valores que van desde los 300 msnm en la frontera suroeste (zona del Rancho Toros Pintos), hasta los 370 msnm en la frontera noreste (zona del Rancho Las Flores y/o Rancho La Gotita). A partir de la información generada con este análisis se han estimado las elevaciones de la topografía superficial correspondiente a 32 celdas donde se localizan aproximadamente 50 aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con dato de la elevación del nivel freático medida, durante las campañas de Muestreo 1 a 6

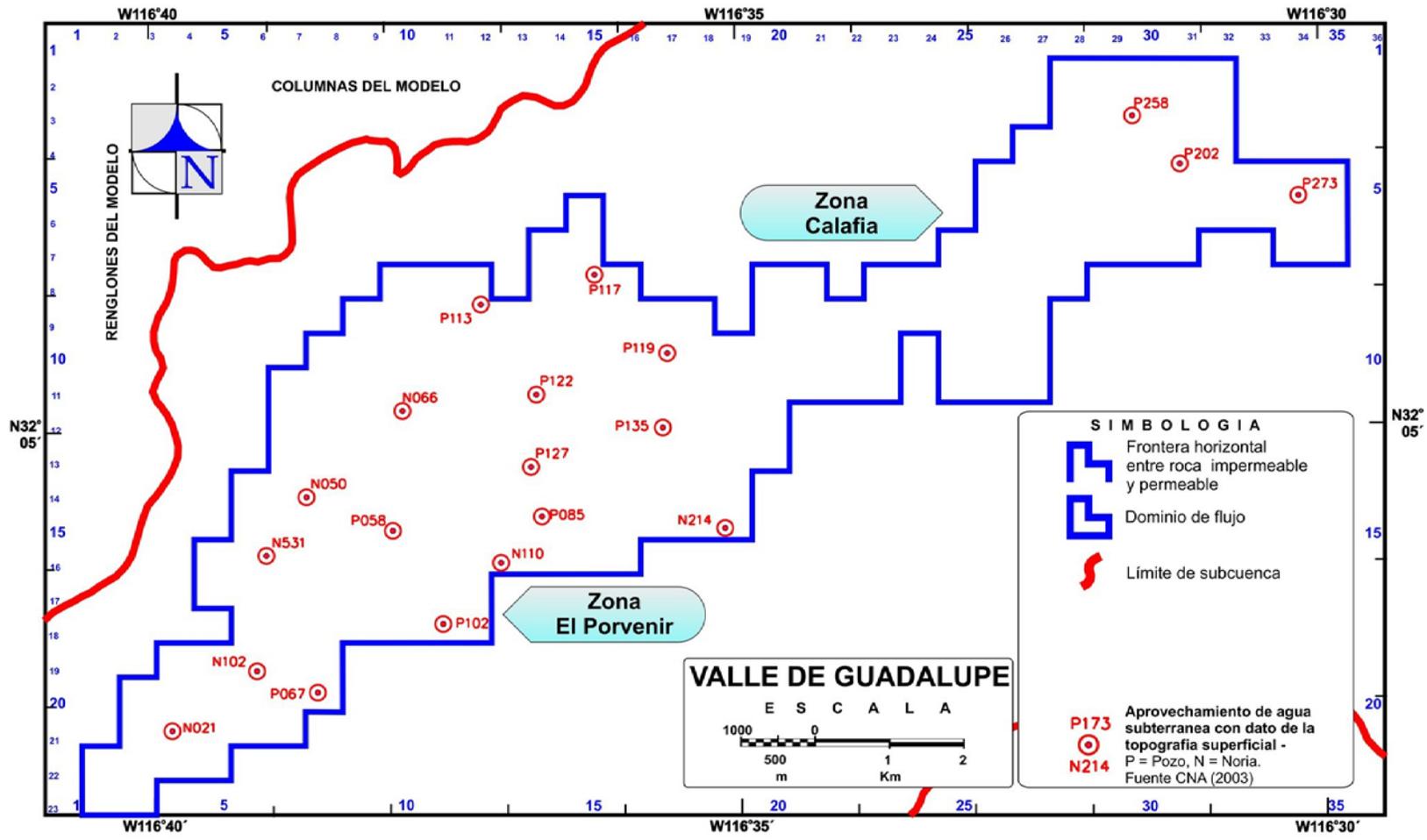


Figura 22. Localización de los aprovechamientos con datos de elevaciones de la topografía superficial en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Fuente CNA (2003)

Tabla XXI. Datos de la elevación del terreno en los puntos de medición piezométrica de la red de monitoreo del Acuífero 0207 del Valle de Guadalupe (CNA, 2003)

Coordenada Geográfica				
	Aprovechamiento de agua subterránea	Latitud	Longitud	Elevación del Terreno
1	N-021	32° 02' 39.1"	116° 40' 03.7"	298.5
2	N-50	32° 04' 24.7"	116° 38' 52.7"	317.1
3	P-58	32° 04' 09.4"	116° 38' 07.4"	311.2
4	N-66	32° 05' 03.6"	116° 38' 02.1"	317.8
5	P-67	32° 02' 56.4"	116° 38' 47.1"	304.3
6	P-85	32° 04' 15.7"	116° 36' 48.8"	316.1
7	N-102	32° 03' 06.1"	116° 39' 19.0"	302.1
8	P-102	32° 03' 27.2"	116° 37' 41.0"	310.8
9	N-110	32° 03' 47.8"	116° 37' 11.5"	313.4
10	P-113	32° 05' 51.6"	116° 37' 20.7"	327.0
11	P-117	32° 06' 04.9"	116° 36' 20.9"	330.3
12	P-119	32° 05' 29.3"	116° 35' 42.7"	326.4
13	P-122	32° 05' 10.8"	116° 36' 51.6"	322.8
14	P-127	32° 04' 38.1"	116° 36' 54.5"	316.2
15	P-135	32° 04' 55.7"	116° 35' 45.1"	323.5
16	P-202	32° 06' 54.2"	116° 31' 12.5"	354.5
17	N-214	32° 04' 04.9"	116° 35' 14.5"	342.5
18	P-258	32° 07' 16.0"	116° 31' 37.4"	352.9
19	P-273	32° 06' 39.7"	116° 30' 10.1"	361.6
20	N-531	32° 03' 58.3"	116° 39' 13.9"	315.4

desarrolladas como trabajo complementario de esta tesis y que posteriormente han sido empleados para la validación del modelo numérico (Tabla XXII).

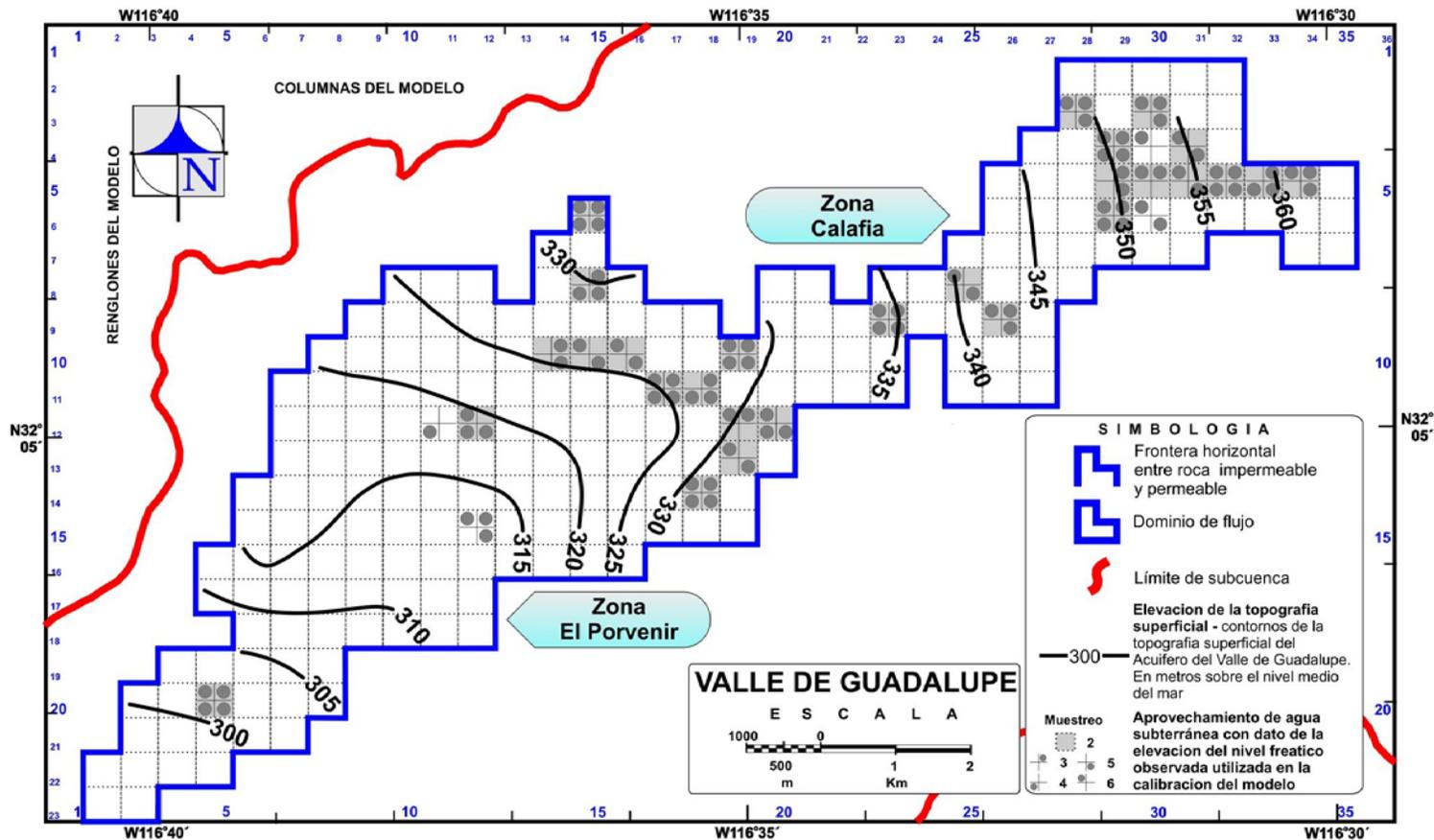


Figura 23. Elevación de la topografía superficial del Acuífero del Valle de Guadalupe, determinada con base en la información reportada por el INEGI y la CNA (2003). Además, se señalan las celdas que cuentan con aprovechamientos de agua subterránea con dato de la elevación del nivel freático medida durante las jornadas de muestreo llevados a cabo como trabajo complementario de esta tesis

Tabla XXII. Elevación de la topografía superficial de las celdas donde se localizan aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con dato de la elevación del nivel freático medida y que ha sido empleada para la validación del modelo

	Celda i,j	Elevación de la topografía superficial (msnm)	Observaciones
1	3,28	349.0	
2	3,30	352.9	(valor correspondiente al P-258) [353.5]
3	4,29	350.5	
4	4,30	353.0	
5	4,31	355.0	
6	5,29	350.0	
7	5,30	352.0	
8	5,31	354.5	(valor correspondiente al P-202) [354.5]
9	5,32	356.5	
10	5,33	359.0	
11	6,29	349.5	
12	6,30	351.5	
13	5,34	361.6	(valor correspondiente al P-273) [361.5]
14	8,25	339.5	(valor correspondiente al P-279) [340.5]
15	9,26	342.5	(valor correspondiente al P-175) [343]
16	9,23	334.5	
17	6,15	331.3	
18	8,15	330.3	
19	10,14	325.5	
20	10,15	325.8	
21	10,16	326.0	
22	10,19	329.0	
23	11,17	325.0	
24	11,18	327.0	
25	12,11	318.0	
26	12,12	319.0	
27	12,19	330.5	
28	12,20	332.5	
29	13,19	332.5	
30	14,18	332.5	
31	15,12	313.5	
32	20,5	301.0	

III.3.14. Frontera de potencial hidráulico constante

Se consideran celdas de potencial hidráulico constante aquellas ubicadas hacia el suroeste del Acuífero del Valle de Guadalupe (aguas abajo de la Zona El Porvenir, frontera sur). Lo anterior, se obtiene como resultado del análisis de la información del registro histórico de las elevaciones del nivel freático presentado en el Apéndice C; donde se observa que la superficie piezométrica en el Hidrograma del pozo N-21 (Celda: 21,4) no presenta variaciones abruptas con el transcurso de los años, ya que, las variaciones observadas en el sitio en cuestión han sido del orden menor a los 2.0 m (Tabla XI).

III.3.15. Frontera de flujo nulo

Las fronteras norte, este, oeste y la mayor parte de la frontera sur se consideran impermeables, por lo tanto, las mismas se incorporan en el simulador numérico como fronteras de flujo nulo (Figura 9).

III.3.16. Los datos

Como trabajo complementario al desarrollo de esta tesis, realizado con el objeto de generar nueva información sobre las condiciones geohidrológicas del acuífero analizado y validar el modelo numérico con mediciones de campo recientes, se han llevado a cabo campañas de muestreo en el Valle de Guadalupe.

La etapa de recolección de datos involucra un plan de muestreo llevado a cabo cada dos meses aproximadamente, durante todo un año, a través de los cuales se ha hecho la medición de niveles freáticos, dinámico y/o estático, se ha obtenido algunos de los

parámetros fisicoquímicos del agua subterránea, los cuales nos dan una idea de la calidad del agua subterránea contenida en el Acuífero del Valle de Guadalupe (tal como la temperatura, conductividad eléctrica, pH y STD, entre otros (Anexo I)), y se ha recolectado muestras de agua para su análisis posterior en laboratorio, dentro de las cuales se incluyen muestras para isótopos, en aproximadamente 120 aprovechamientos hidráulicos ubicados en la Región del Valle de Guadalupe (Figura 24, Figura 25 y Tabla XXIII). Los datos de campo se han adquirido en el transcurso de seis muestreos en la Región del Valle de Guadalupe, llevados a cabo durante los meses de Enero, Febrero-Marzo, Abril-Mayo, Junio-Julio y Octubre-Noviembre del año 2004, y en Abril de 2005.

Del total de sitios muestreados se toman en cuenta los datos del nivel freático estático observado, en 53 aprovechamientos de agua subterránea localizados en 32 celdas distribuidas a lo largo y ancho de la zona de estudio, para la validación del simulador numérico con mediciones de campo recientes. La selección de estos aprovechamientos de agua subterránea obedece, básicamente, a su ubicación en el interior del dominio de flujo del modelo que representa al Acuífero del Valle de Guadalupe (Figura 24). Los datos sobre profundidades del nivel freático en estos 53 aprovechamientos de agua subterránea se han convertido en elevaciones del nivel freático en metros sobre el nivel medio del mar y se toman en cuenta para la comparación de mediciones de campo recientes contra los datos calculados por el modelo durante la simulación del modelo (Tabla XXIV).

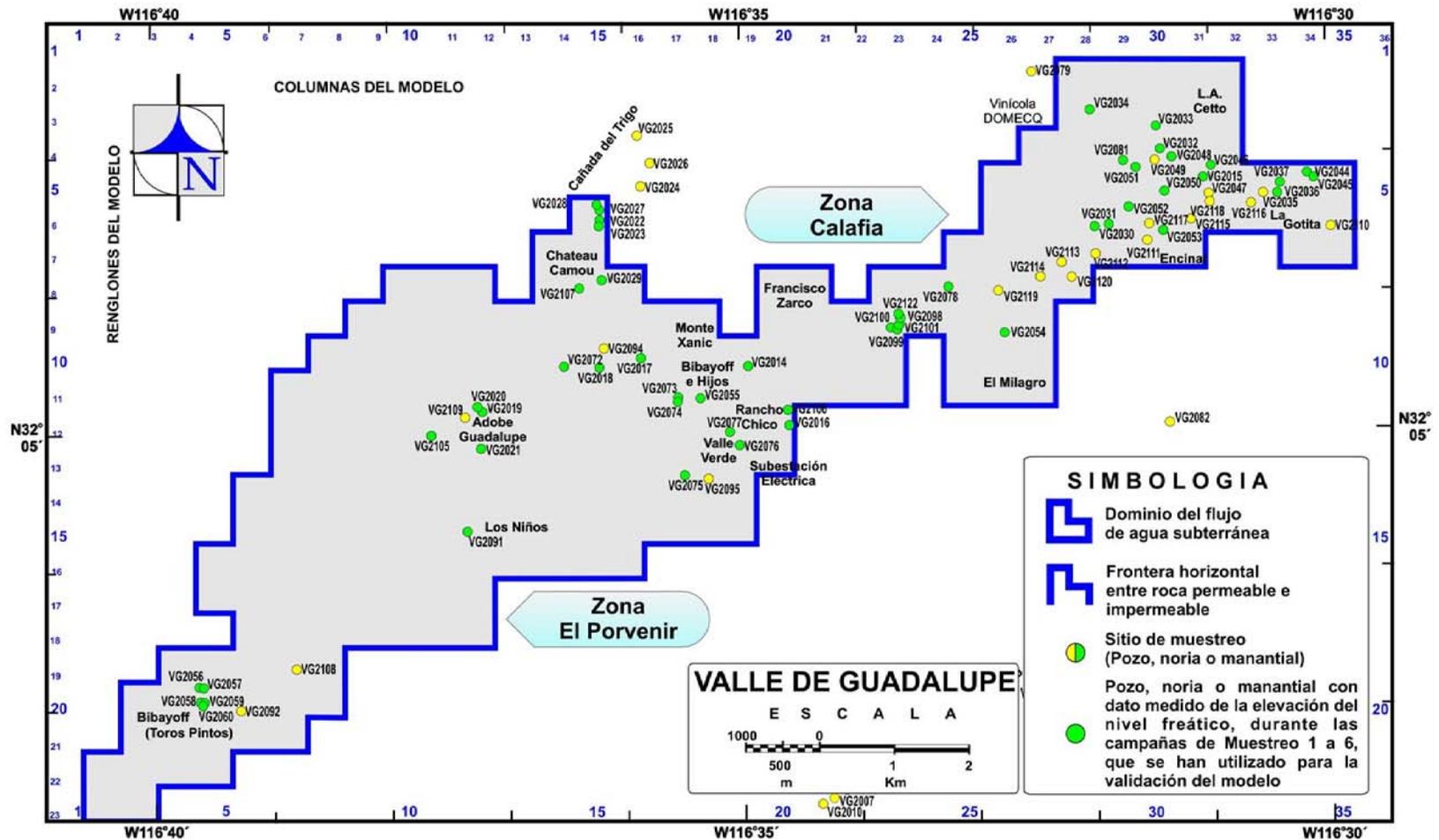


Figura 24. Ubicación de los 53 aprovechamientos de agua subterránea con dato medido de la elevación del nivel freático, durante las campañas de Muestreo 1 a 6, que se han utilizado para la validación del modelo



Figura 25. Actividades realizadas en las campañas de muestreo. a) Recolección de muestras de agua, b) Medición de niveles freáticos y c) Obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua

Tabla XXIII. Relación de aprovechamientos de agua subterránea muestreados durante las campañas de Muestreo 1 a 6 en el Valle de Guadalupe

	Isótopos	Clave del sitio	Nombre del sitio	Celda ij	Coordenadas	Geográficas	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}	6 ^{to}
<u>1</u>	I	VG2001	Viña Liceaga	F	31°58'52 N	116°38'47 W	√	√	√	√	√	√
<u>2</u>	I	VG2002	Casa de Piedra	F	31°58'42 N	116°39'05 W	√	√	√	√	√	√
<u>3</u>	I	VG2003	Vinisterra	F	31°58'02 N	116°38'45 W	√	√	√	√	√	√
<u>5</u>		VG2004	Vinisterra	F	31°58'03 N	116°38'43 W						√
<u>4</u>	I	VG2005	Vinisterra	F	31°58'08 N	116°38'48 W	√	√	√	√	√	√
<u>6</u>	I	VG2006	El Mogor	F	32°02'02 N	116°35'03 W	√	√	√	√	√	√
<u>7</u>	I	VG2007	El Mogor	F	32°02'23 N	116°34'15 W	√	√	√	√	√	√
<u>8</u>	I	VG2008	El Mogor	F	32°02'06 N	116°36'08 W	√	√	√	√	√	√
<u>9</u>		VG2009	El Mogor(El Papalote)	F	32°02'12 N	116°34'27 W						
<u>10</u>		VG2010	El Mogor	F	32°02'21 N	116°34'21 W	√	√		√		√
<u>11</u>	I	VG2011	El Mogor	F	32°02'23 N	116°34'09 W	√	√	√	√		√
<u>12</u>	I	VG2012	R. Sierra Blanca	F	32°02'48 N	116°33'24 W	√	√	√	√	√	
<u>13</u>		VG2013	El Mogor	F	32°02'05 N	116°34'55 W						
<u>14</u>	I	VG2014	Monte Xanic (La Oficina)	10,19	32°05'30 N	116°34'58 W	√	√	√	√	√	√
<u>15</u>	I	VG2015	Monte Xanic (R. Olé)	5,31	32°06'57 N	116°31'10 W	√	√	√	√	√	√
<u>16</u>	I	VG2016	Monte Xanic (Arroyo Guadalupe)	12,20	32°05'07 N	116°34'37 W	√	√	√	√		√
<u>17</u>	I	VG2017	Monte Xanic (R. 7 Leguas)	10,16	32°05'30 N	116°35'38 W	√	√	√	√	√	√
<u>18</u>	I	VG2018	Monte Xanic (R. Samari)	10,15	32°05'26 N	116°35'59 W			√	√	√	√
<u>19</u>	I	VG2019	Adobe Guadalupe	12,12	32°05'12 N	116°37'11 W	√	√	√	√	√	√
<u>20</u>	I	VG2020	Adobe Guadalupe	12,12	32°05'17 N	116°37'13 W	√	√	√	√	√	√
<u>21</u>	I	VG2021	Adobe Guadalupe	12,12	32°04'56 N	116°37'12 W	√	√	√	√	√	√
<u>22</u>	I	VG2022	Chateau Camou	6,15	32°06'39 N	116°36'11 W	√		√			√
<u>23</u>	I	VG2023	Chateau Camou	6,15	32°06'36 N	116°36'12 W	√	√	√	√	√	√
<u>24</u>	I	VG2024	Chateau Camou	F	32°06'51 N	116°35'52 W	√	√	√	√	√	
<u>25</u>	I	VG2025	Chateau Camou	F	32°07'13 N	116°35'53 W	√	√	√	√	√	√
<u>26</u>		VG2026	Chateau Camou	F	31°52'04 N	116°39'50 W						√
<u>27</u>		VG2027	Chateau Camou	6,15	32°06'56 N	116°35'49 W						√
<u>28</u>		VG2028	Chateau Camou	6,15	32°06'48 N	116°36'00 W						√
<u>29</u>		VG2029	Chateau Camou	8,15	32°06'10 N	116°36'09 W						
<u>30</u>	I	VG2034	Uvas de California I. Dq	3,28	32°07'24 N	116°32'03 W		√	√	√		√
<u>31</u>	I	VG2030	Uvas de California IV. Dq	6,29	32°06'31 N	116°31'56 W			√			√
<u>32</u>	I	VG2031	Uvas de California IV. Dq	6,29	32°06'30 N	116°32'03 W		√		√		√
<u>33</u>	I	VG2032	Uvas de California II. Dq	4,30	32°07'07 N	116°31'27 W		√		√		√
<u>34</u>		VG2033	Uvas de California II. Dq	3,30	32°07'16 N	116°31'32 W				√		√
<u>35</u>	I	VG2035	Doña Lupe (R. La Gotita)	5,33	32°06'30 N	116°30'30 W		√	√	√	√	√
<u>36</u>	I	VG2036	R. Las Flores	5,33	32°06'45 N	116°30'21 W		√	√	√		
<u>37</u>		VG2037	R. Las Flores	5,33	32°06'49 N	116°30'30 W						√
<u>38</u>	I	VG2038	Ojo de agua. Carretera	F	32°06'11 N	116°33'18 W		√	√	√	√	√
<u>39</u>		VG2039	LA CETTO (R. Las Bellotas)	F	32°06'59 N	116°28'47 W						
<u>40</u>		VG2040	LA CETTO (R. Las Bellotas)	F	32°07'07 N	116°28'33 W				√		
<u>41</u>	I	VG2041	LA CETTO (R. Las Bellotas)	F	32°07'11 N	116°28'33 W			√			√
<u>42</u>	I	VG2042	LA CETTO (R. Viña Alegre)	F	32°06'56 N	116°29'18 W			√	√		
<u>43</u>		VG2043	LA CETTO (R. Viña Alegre)	F	32°07'01 N	116°29'37 W				√		

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Aprovechamiento de agua subterránea que cuenta con dato del nivel freático medido, obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua y/o muestra de agua durante las campañas de muestreo especificado. Muestreo: 1^{er} = Ene/04, 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^{to} = Jun-Jul/04, 5^{to} = Oct-Nov/04 y 6^{to} = Abr/05

Tabla XXIII. Relación de aprovechamientos de agua subterránea muestreados durante las campañas de Muestreo 1 a 6 en el Valle de Guadalupe. Continuación

	Isótopos	Clave del sitio	Nombre del sitio	Celda ij	Coordenadas	Geográficas	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^o	5 ^o	6 ^o
<u>44</u>		VG2044	LA CETTO (R. La Alfalfa)	5,34	32°06'45 N	116°30'13 W				√		
<u>45</u>		VG2045	LA CETTO (R. La Alfalfa)	5,34	32°06'45 N	116°30'10 W				√		
<u>46</u>		VG2046	LA CETTO (R. VLACSA)	5,32	32°06'59 N	116°31'05 W						
<u>47</u>		VG2047	LA CETTO (R. VLACSA)	5,32	32°06'47 N	116°31'06 W						
<u>48</u>	I	VG2048	LA CETTO (R. VLACSA)	4,31	32°07'03 N	116°31'28 W			√	√		√
<u>49</u>		VG2049	LA CETTO (R. VLACSA)	4,30	32°06'51 N	116°31'33 W						√
<u>50</u>		VG2050	LA CETTO (R. VLACSA)	5,30	32°06'45 N	116°31'28 W						
<u>51</u>		VG2051	LA CETTO (R. VLACSA)	5,30	32°07'05 N	116°31'47 W						√
<u>52</u>		VG2052	LA CETTO (R. El Cuatro)	5,29	32°06'41 N	116°31'46 W						
<u>53</u>	I	VG2053	LA CETTO (R. El Encinal I)	6,30	32°06'25 N	116°31'29 W			√	√		√
<u>54</u>		VG2054	LA CETTO (R. El Milagro)	9,26	32°05'38 N	116°32'49 W						
<u>55</u>	I	VG2055	R. Bibayoff (e hijos)	11,18	32°05'18 N	116°35'22 W		√	√	√	√	√
<u>56</u>	I	VG2056	R. Bibayoff (Toros Pintos)	20,5	32°03'12 N	116°39'37 W		√	√	√	√	√
<u>57</u>	I	VG2057	R. Bibayoff (Toros Pintos)	20,5	32°03'12 N	116°39'32 W		√	√	√	√	
<u>58</u>		VG2058	R. Bibayoff (Toros Pintos)	20,5	32°03'06 N	116°39'34 W						
<u>59</u>		VG2059	R. Bibayoff (Toros Pintos)	20,5	32°03'05 N	116°39'31 W			√	√	√	
<u>60</u>		VG2060	R. Bibayoff (Toros Pintos)	20,5	32°03'04 N	116°39'32 W						
<u>61</u>	I	VG2061	R. Sr. Eustacio Martínez	F	32°08'12 N	116°26'35 W		√	√		√	
<u>62</u>	I	VG2062	R. Bustillos. Hijo . Parcela 30	F	32°07'59 N	116°26'53 W		√	√	√		
<u>63</u>		VG2063	R. Bustillos. Hijo . Parcela 30	F	32°08'05 N	116°26'55 W					√	
<u>64</u>	I	VG2064	R. Bustillos. Padre . Parcela 20	F	32°08'47 N	116°25'59 W		√	√	√		
<u>65</u>	I	VG2065	R. 3 Hermanos Horta	F	32°08'02 N	116°26'52 W		√	√	√	√	
<u>66</u>	I	VG2066	R. Los Estafiates	F	32°09'03 N	116°26'01 W		√	√	√	√	
<u>67</u>		VG2067	R. Los Estafiates	F	32°08'28 N	116°25'44 W			√		√	
<u>68</u>		VG2068	*Nivel de lecho de arroyo. Desembocadura en el Ejido Zaragoza	F	32°11'56 N	116°27'07 W						
<u>69</u>	I	VG2069	Ejido Emiliano Zapata (Sres. Mayoral)	F	32°08'44 N	116°31'16 W		√	√	√	√	√
<u>70</u>	I	VG2070	Arroyo Agua Caliente. Arroyo	F	32°06'23 N	116°27'10 W		√	√	√		
<u>71</u>	I	VG2071	Arroyo Agua Caliente. Manantial	F	32°06'11 N	116°26'53 W		√	√	√		
<u>72</u>	I	VG2072	LA CETTO (R. Parras/R. El Cinco)	10,14	32°05'32 N	116°36'30 W				√		
<u>73</u>		VG2073	LA CETTO (R. del Sr. Camilo)	11,17	32°05'16 N	116°35'30 W						
<u>74</u>	I	VG2074	LA CETTO (R. del Sr. Camilo)	11,17	32°05'17 N	116°35'33 W			√	√		
<u>75</u>	I	VG2075	LA CETTO (R. Valle Verde)	14,18	32°04'44 N	116°35'30 W		√				√
<u>76</u>	I	VG2076	LA CETTO (R. Chico)	13,19	32°04'57 N	116°35'02 W			√	√		√
<u>77</u>		VG2077	LA CETTO (R. Chico)	12,19	32°05'03 N	116°35'07 W				√		√
<u>78</u>		VG2078	LA CETTO (R. El Cerrito)	8,25	32°06'07 N	116°33'17 W		√		√		
<u>79</u>	I	VG2079	LA CETTO (Caballerizas)	F	32°07'40 N	116°32'35 W	√		√	√	√	√
<u>80</u>	I	VG2080	LA CETTO (R. Olivos)	F	32°08'12 N	116°31'36 W			√	√		
<u>81</u>		VG2081	LA CETTO (R. El Encinal II)	4,29	32°06'59 N	116°31'49 W						
<u>82</u>	I	VG2082	R. Sierra Blanca	F	32°04'23 N	116°31'26 W		√				
<u>83</u>		VG2083	R. Sierra Blanca	F	32°04'38 N	116°31'34 W						

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Aprovechamiento de agua subterránea que cuenta con dato del nivel freático medido, obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua y/o muestra de agua durante las campañas de muestreo especificado. Muestreo: 1^{er} = Ene/04, 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^o = Jun-Jul/04, 5^o = Oct-Nov/04 y 6^o = Abr/05

Tabla XXIII. Relación de aprovechamientos de agua subterránea muestreados durante las campañas de Muestreo 1 a 6 en el Valle de Guadalupe. Continuación

	Isótopos	Clave del sitio	Nombre del sitio	Celda i,j	Coordenadas	Geográficas	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}	6 ^{to}
<u>84</u>		VG2084	R. Sierra Blanca	F	32°03'06 N	116°32'46 W						
<u>85</u>	I	VG2085	R. Sierra Blanca	F	32°03'01 N	116°32'32 W		√				
<u>86</u>	I	VG2086	R. Sierra Blanca (Aguaje El Verdillo)	F	32°02'07 N	116°30'46 W		√				
<u>87</u>	I	VG2087	R. Sierra Blanca (Aguaje El Borreguero)	F	32°01'04 N	116°29'41 W		√				
<u>88</u>	I	VG2088	Ranchito Valencia	F	32°01'44 N	116°40'22 W			√	√	√	√
<u>89</u>		VG2089	El Mogor	F	32°02'07 N	116°34'29 W						√
<u>90</u>	I	VG2090	R. Sierra Blanca	F	32°03'19 N	116°31'31 W			√	√		
<u>91</u>	I	VG2091	R. de los Niños	15,12	32°04'20 N	116°37'19 W			√	√	√	√
<u>92</u>		VG2092	Bibayoff. Toros Pintos	20	32°03'02 N	116°39'13 W						
<u>93</u>	I	VG2093	Agua Caliente. Casa	F	32°06'45 N	116°27'46 W			√	√		
<u>94</u>		VG2094	LACetto. R. Parras/R. El Cinco	10	32°05'21 N	116°36'24 W			√			
<u>95</u>		VG2095	LACetto. R. Valle Verde	14	32°04'43 N	116°35'18 W						
<u>96</u>	I	VG2096	San Marcos II. Tiendita Los Pinos	F	32°00'28 N	116°40'41 W			√	√	√	√
<u>97</u>	I	VG2097	R. Los Gutierrez	F	32°01'54 N	116°40'21 W			√	√	√	
<u>98</u>	I	VG2098	Vivero Roca	9,23					√	√		
<u>99</u>	I	VG2099	Vivero Guadalupe	9,23	32°05'48 N	116°33'43 W			√	√		√
<u>100</u>	I	VG2100	Vivero Guadalupe	9,23	32°05'49 N	116°35'47 W			√	√	√	√
<u>101</u>	I	VG2101	Vivero Guadalupe	9,23	32°05'50 N	116°33'42 W			√	√	√	
<u>102</u>	I	VG2102	R. Mora	23,2	32°02'20 N	116°40'25 W			√	√	√	√
<u>103</u>	I	VG2103	R. Mora	23,2	32°02'17 N	116°40'22 W			√	√		
<u>104</u>		VG2104	R. Mora	23,2	32°02'17 N	116°40'17 W				√	√	√
<u>105</u>		VG2105	R. 5 Estrellas. Hugo D'Acosta.	12,11	32°05'00 N	116°37'37 W				√		
<u>106</u>		VG2106	Monte Xanic. Arroyo.	12,11	32°05'13 N	116°34'38 W						
<u>107</u>		VG2107	Victor González. Parcela 47.	8,15	32°06'10 N	116°36'17 W				√	√	
<u>108</u>		VG2108	El Porvenir-1	19,7	32°03'20 N	116°38'45 W						
<u>109</u>		VG2109	El Porvenir-2	12,12	32°05'10 N	116°37'20 W						
<u>110</u>		VG2110	San Antonio Necua-1	6,35	32°06'30 N	116°30'05 W						
<u>111</u>		VG2111	Guadalupe-1	7,30	32°06'27 N	116°31'37 W						
<u>112</u>		VG2112	Guadalupe-2	7,29	32°06'21 N	116°32'03 W						
<u>113</u>		VG2113	Guadalupe-3	7,28	32°06'15 N	116°32'23 W						
<u>114</u>		VG2114	Guadalupe-4	8,27	32°06'11 N	116°32'31 W						
<u>115</u>		VG2115	Guadalupe-5	6,31	32°06'36 N	116°31'15 W						
<u>116</u>		VG2116	Guadalupe-6	6,33	32°06'43 N	116°30'45 W						
<u>117</u>		VG2117	Guadalupe-7	6,30	32°06'34 N	116°31'36 W						
<u>118</u>		VG2118	Guadalupe-8	6,32	32°06'45 N	116°31'05 W						
<u>119</u>		VG2119	Guadalupe-9	8,26	32°06'05 N	116°32'52 W						
<u>120</u>		VG2120	Guadalupe-10	8,28	32°06'11 N	116°32'15 W						
<u>121</u>			Agua Caliente (arroyo)								√	
<u>122</u>		VG2121	R. La Valentina	F	32°00'09 N	116°40'13 W					√	
<u>123</u>		VG2122	Vivero Roca	9,23							√	

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Aprovechamiento de agua subterránea que cuenta con dato del nivel freático medido, obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua y/o muestra de agua durante las campañas de muestreo especificado. Muestreo: 1^{er} = Ene/04, 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^{to} = Jun-Jul/04, 5^{to} = Oct-Nov/04 y 6^{to} = Abr/05

Tabla XXIII. Relación de aprovechamientos de agua subterránea muestreados durante las campañas de Muestreo 1 a 6 en el Valle de Guadalupe. Continuación

	Isótopos	Clave del sitio	Nombre del sitio	Celda ij	Coordenadas Geográficas	1 ^{er}	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^{to}	6 ^{to}
<u>124</u>			Inocente Sánchez Pérez							√	
<u>125</u>			Vinisterra								√
<u>126</u>			Arroyo El Mogor								√
<u>127</u>			Arroyo El Mogor 1								√
<u>128</u>			Arroyo Bibayoff								√
<u>129</u>			Arroyo El Tigre								√
<u>130</u>			LA CETTO (El Manaz)								√
<u>131</u>			Vivero Guadalupe								√
<u>132</u>			El Porvenir. Escuela								√
<u>133</u>			El Porvenir. (atrás escuela)								√
<u>134</u>			Arroyo Guadalupe (frente a pozo CESPE 2)		32°06'66 N 116°30'95 W						√
	65		Total de muestras			22	43	60	68	44	62

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Aprovechamiento de agua subterránea que cuenta con dato del nivel freático medido, obtención de los parámetros fisicoquímicos del agua y/o muestra de agua durante las campañas de muestreo especificado. Muestreo: 1^{er} = Ene/04, 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^{to} = Jun-Jul/04, 5^{to} = Oct-Nov/04 y 6^{to} = Abr/05

IV. RESULTADOS DEL MODELO

Durante el desarrollo de esta sección se presentan y analizan los resultados de la de la simulación numérica del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe en condiciones estacionarias y transitorias.

IV.1. Periodo de simulación

Con base en el análisis de la información recopilada se ha seleccionado el mes de Febrero de 1984 como la condición estacionaria presentada por el sistema de agua subterránea. Por lo tanto, para calibrar el modelo en condiciones de equilibrio se utiliza la elevación del nivel freático medido en Febrero de 1984, en 39 aprovechamientos de agua subterránea elegidos previamente y establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Los datos de elevación del nivel freático utilizados para la calibración, en condiciones transitorias, han sido obtenidos del registro histórico de antecedentes piezométricos elaborado por la CNA. Las fechas con que se cuenta información del registro del nivel freático medido en campo, para los 39 aprovechamientos de agua subterránea seleccionados, y que han sido empleadas para comparar con los resultados de la simulación son Mayo de 1985, Junio de 1988, Abril de 1990, Mayo de 1998, Septiembre de 2001 y Marzo de 2003. Además, se cuenta con mediciones del nivel freático observado en campo, en 53 aprovechamientos de agua subterránea, durante los meses de Febrero de 2004, Abril de 2004, Junio de 2004, Octubre de 2004 y Abril de 2005; estas mediciones han sido generadas durante las jornadas de muestreo llevadas a cabo como trabajo complementario de esta tesis (Tabla XXIV).

Tabla XXIV. Relación de aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con datos de la elevación del nivel freático estático medido en campo y que se utilizan para su comparación con los resultados de la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Elevaciones del nivel freático estático medido en campo dadas en msnm

	Clave del sitio	Nombre del sitio	Elevación de la topografía superficial	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^o	5 ^o	6 ^o	√
1	VG2014	Monte Xanic (La Oficina)	329.00	315.9	315.9	315.7	315.3	315.7	√ 1
2	VG2015	Monte Xanic (R. Olé)	354.53	327.2	-	-	325.5	342.0	√ 2
3	VG2016	Monte Xanic (Arroyo Guadalupe)	332.50	319.8	-	-	319.7	321.0	√ 3
4	VG2106	Monte Xanic. Arroyo.	332.50	-	-	320.5	-	-	
5	VG2017	Monte Xanic (R. 7 Leguas)	326.00	311.9	310.3	-	310.9	309.6	√ 4
6	VG2018	Monte Xanic (R. Samari)	325.75	312.1	-	-	311.4	306.8	√ 5
7	VG2019	Adobe Guadalupe	319.00	306.0	-	305.8	308.6	306.4	√ 6
8	VG2020	Adobe Guadalupe	319.00	-	-	-	-	-	
9	VG2021	Adobe Guadalupe	319.00	-	-	-	-	-	
10	VG2022	Chateau Camou	331.25	322.8	322.6	-	322.0	326.8	√ 7
11	VG2023	Chateau Camou	331.25	-	-	-	-	-	
12	VG2027	Chateau Camou	331.25	-	-	322.6	-	-	
13	VG2028	Chateau Camou	331.25	-	-	-	-	-	
14	VG2029	Chateau Camou	330.25	317.6	317.5	317.7	-	-	√ 8
15	VG2107	Victor González. Parcela 47.	330.25	-	-	-	318.2	-	
16	VG2034	Uvas de California I. Dq	355.00	312.3	301.5	-	306.8	313.2	√ 9
17	VG2030	Uvas de California IV. Dq	349.50	313.3	312.4	310.7	307.7	333.2	√ 10
18	VG2031	Uvas de California IV. Dq	349.50	-	-	-	-	-	
19	VG2032	Uvas de California II. Dq	355.00	-	-	-	-	331.2	√ 11
20	VG2033	Uvas de California II. Dq	352.88	319.0	312.2	-	311.8	325.3	√ 12
21	VG2036	R. Las Flores	359.00	340.6	-	-	338.5	-	√ 13
22	VG2037	R. Las Flores	359.00	-	339.8	339.4	-	-	
23	VG2044	LA CETTO (R. La Alfalfa)	361.57	344.0	-	-	342.3	358.0	√ 14
24	VG2045	LA CETTO (R. La Alfalfa)	361.57	-	344.1	-	-	-	
25	VG2046	LA CETTO (R. Vlacsá)	356.50	331.3	331.1	-	329.8	-	√ 15
26	VG2047	LA CETTO (R. Vlacsá)	356.50	-	-	329.3	-	343.4	
27	VG2048	LA CETTO (R. Vlacsá)	360.00	321.2	-	-	316.7	336.6	√ 16
28	VG2050	LA CETTO (R. Vlacsá)	355.00	318.2	318.2	-	-	331.8	√ 17
29	VG2051	LA CETTO (R. Vlacsá)	355.00	-	-	-	-	-	
30	VG2052	LA CETTO (R. El Cuatro)	355.00	314.0	313.3	-	309.0	-	√ 18
31	VG2053	LA CETTO (R. El Encinal I)	351.50	-	-	-	319.8	343.1	√ 19
32	VG2054	LA CETTO (R. El Milagro)	350.00	318.1	317.4	-	316.4	323.6	√ 20
33	VG2055	R. Bibayoff (e hijos)	327.00	312.5	311.9	310.9	311.3	-	√ 21
34	VG2056	R. Bibayoff (Toros Pintos)	301.00	294.6	-	-	294.3	-	√ 22
35	VG2057	R. Bibayoff (Toros Pintos)	301.00	-	-	-	-	296.3	
36	VG2058	R. Bibayoff (Toros Pintos)	301.00	-	-	-	-	-	
37	VG2059	R. Bibayoff (Toros Pintos)	301.00	-	-	293.3	-	-	
38	VG2060	R. Bibayoff (Toros Pintos)	301.00	-	297.1	-	-	-	
39	VG2072	LA CETTO (R. Parras/R. El Cinco)	325.50	314.3	313.5	-	314.2	-	√ 23
40	VG2073	LA CETTO (R. del Sr. Camilo)	325.00	311.1	309.9	308.9	310.3	310.5	√ 24
41	VG2074	LA CETTO (R. del Sr. Camilo)	325.00	-	-	-	-	-	
42	VG2075	LA CETTO (R. Valle Verde)	332.50	319.5	321.9	320.7	321.3	324.2	√ 25
43	VG2076	LA CETTO (R. Chico)	332.50	320.2	-	-	319.3	322.6	√ 26

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Número de celdas diferentes. Muestreo: 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^o = Jun-Jul/04, 5^o = Oct-Nov/04 y 6^o = Abr/05. ‘ - ‘ = Sin dato, No Determinado, Medición del Nivel Dinámico o pertenece a un conjunto de pozos que coinciden en la misma celda

Tabla XXIV. Relación de aprovechamientos de agua subterránea que cuentan con datos de la elevación del nivel freático estático medido en campo y que se utilizan para su comparación con los resultados de la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Elevaciones del nivel freático estático medido en campo dadas en msnm. Continuación

	Clave del sitio	Nombre del sitio	Elevación de la topografía superficial	2 ^{do}	3 ^{er}	4 ^{to}	5 ^o	6 ^o	√
44	VG2077	LA CETTO (R. Chico)	330.50	318.9	318.7	-	-	319.3	√ 27
45	VG2078	LA CETTO (R. El Cerrito)	339.52	323.3	322.9	-	322.4	-	√ 28
46	VG2081	LA CETTO (R. El Encinal II)	355.00	317.2	316.7	315.8	314.4	331.4	√ 29
47	VG2091	R. de los Niños	313.50	-	306.3	-	305.9	307.9	√ 30
48	VG2098	Vivero Roca	334.50	-	323.8	-	-	-	√ 31
49	VG2099	Vivero Guadalupe	334.50	-	-	324.0	323.6	328.1	
50	VG2100	Vivero Guadalupe	334.50	-	-	-	-	-	
51	VG2101	Vivero Guadalupe	334.50	-	-	-	-	-	
52	VG2122	Vivero Roca	334.50	-	-	-	-	-	
53	VG2105	R. 5 Estrellas. Hugo D'Acosta.	318.00	-	-	302.9	-	-	√ 32
				29	25	17	31	27	32

F = Fuera del dominio de flujo del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe. √ = Número de celdas diferentes. Muestreo: 2^{do} = Feb-Mar/04, 3^{er} = Abr-May/04, 4^{to} = Jun-Jul/04, 5^o = Oct-Nov/04 y 6^o = Abr/05. - = Sin dato, No Determinado, Medición del Nivel Dinámico o pertenece a un conjunto de pozos que coinciden en la misma celda

IV.2. Calibración del modelo

El procedimiento de calibración del modelo se puede describir como “...un proceso que emplea un modelo para lograr una reproducción similar entre las distribuciones registrada (histórica) y simulada de la variable dependiente, mediante la selección de un valor de la variable independiente, esta última localizada a su vez dentro de un rango de valores posibles” (American Water Works Association (AWWA), 2007; Bergfeld, 2005).

Los modelos de flujo del agua subterránea normalmente se calibran con datos del potencial hidráulico medido en campo en puntos de observación previamente seleccionados. Los contornos de residuales que se obtienen del proceso de calibración se calculan restándole el valor del potencial hidráulico medido en campo, en los puntos de observación, al valor calculado por el simulador para esos mismos puntos. El valor del

residual representa una medida cuantitativa del ‘buen ajuste’ entre los resultados de la simulación y el parámetro que se ‘conoce’ o se observa del sistema real. Esta información es muy útil para identificar las regiones del modelo donde la calibración es menos satisfactoria y para determinar si el modelo está sobre-estimando o sub-estimando los valores observados (Visual MODFLOW, 2004).

En este trabajo de tesis, se ha hecho la calibración del estado estacionario y transitorio de manera conjunta e iterativa. A través del proceso de calibración del modelo de flujo de agua subterránea se involucra un ajuste, a prueba y error, de los parámetros del modelo que representan las propiedades del acuífero, la recarga y la descarga, para obtener una similitud aceptable entre las configuraciones de los niveles freáticos medidos y calculados.

Las distribuciones de la elevación del nivel freático medido y calculado en el Acuífero del Valle de Guadalupe correspondiente a Febrero de 1984 se presentan en la Figura 32. Durante el proceso de calibración en condiciones transitorias se emplea la configuración de la elevación del nivel freático calculado para Febrero de 1984 como condición inicial.

La estrategia para la calibración del modelo ha sido lograr una similitud, la mejor posible, por cierto, entre las configuraciones de la elevación del nivel freático medido y calculado para la zona de estudio, en 39 y 53 aprovechamientos hidráulicos durante los periodos 1984 a 2003 y 2004 a 2005, respectivamente.

Durante la calibración, la ubicación y tipo de las fronteras del modelo se suponen conocidas y no varían con el tiempo. En cambio, los parámetros que sí varían como parte

del proceso de calibración son la conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento y el volumen de recarga, entre otros.

Los valores de la conductividad hidráulica analizados en el proceso de calibración, se han seleccionado del intervalo general de valores sugerido en la información de estudios previos. Durante la calibración, los valores de la conductividad hidráulica han variado entre 7.3×10^2 m/año a 8.0×10^4 m/año; estos valores están dentro del rango de las conductividades hidráulicas para sedimentos no consolidados constituidos por arenas y gravas no consolidadas. Cuando se emplean valores altos de la conductividad hidráulica en las partes altas de la Zona Calafia, el agua subterránea contenida en el dominio de flujo fluye y se seca más rápido. De tal manera que, si no se tiene ningún volumen de agua adicional como recarga del modelo por las fronteras norte, sur, este y oeste, los niveles se abaten significativamente. Una conductividad hidráulica media de 2.7×10^4 m/año genera la mejor similitud entre las configuraciones del nivel freático medida y calculada por el modelo.

Con base en el conocimiento de los materiales del acuífero, se ha estimado inicialmente un coeficiente de almacenamiento de 10%. Sin embargo, durante el proceso de calibración, este parámetro ha cambiado de 5 a 26% y se han obtenido como resultado sustanciales efectos en las elevaciones del nivel freático. Por lo tanto, de acuerdo con la calibración, un coeficiente de almacenamiento de 20% genera el mejor ajuste entre elevaciones del nivel freático medido y calculado.

De acuerdo con los resultados de la simulación, la recarga del Acuífero del Valle está compuesta por la recarga vertical que comprende el 10% del agua precipitada en la zona acuífera o dominio del flujo de agua subterránea (Figura 26), y por la recarga

horizontal, debido a los escurrimientos que bajan de la sierra, comprendida por ~5% de la precipitación ocurrida en el resto de la Cuenca Guadalupe. El volumen de recarga horizontal se encuentra asignada a 85 puntos que integran 7 áreas localizadas en los alrededores del dominio del flujo, y cuyo esquema de distribución de volúmenes de recarga es para Calafia Sur, 11%, Francisco Zarco Sur, 4%, Porvenir Sur, 6%, Porvenir Norte, 10%, Francisco Zarco Norte, 4%, Calafia Norte, 12%, y El Pinal y alrededores, 53% (Figura 13 y Tabla XXV).

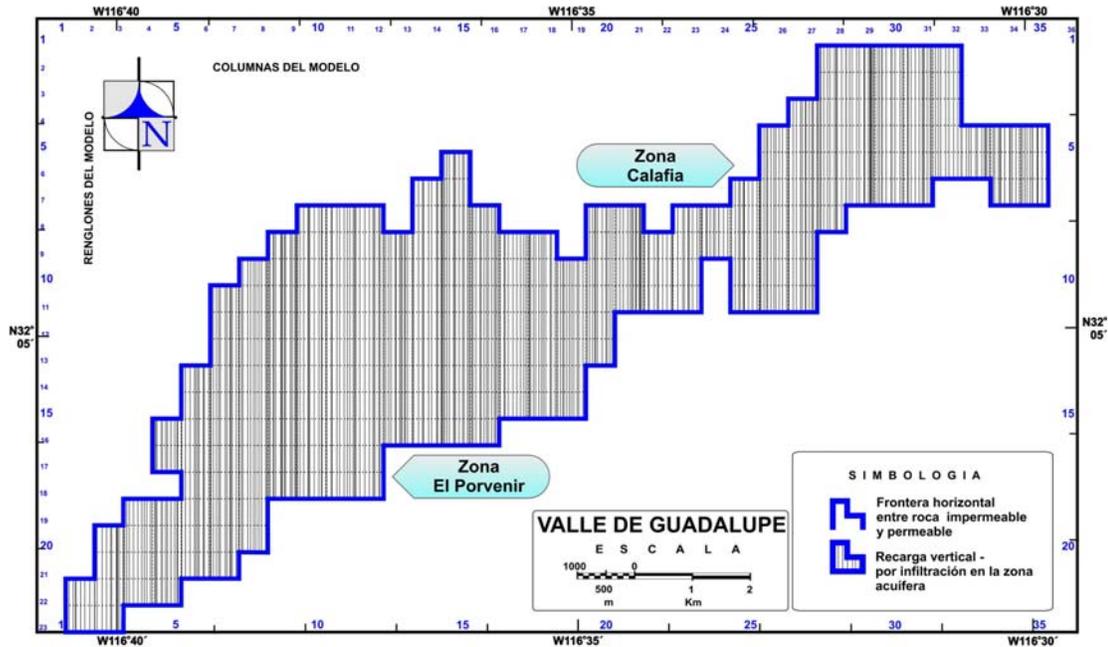


Figura 26. Recarga vertical por infiltración en la zona acuífera

Tabla XXV. Recarga horizontal debido a escurrimientos que bajan de la sierra

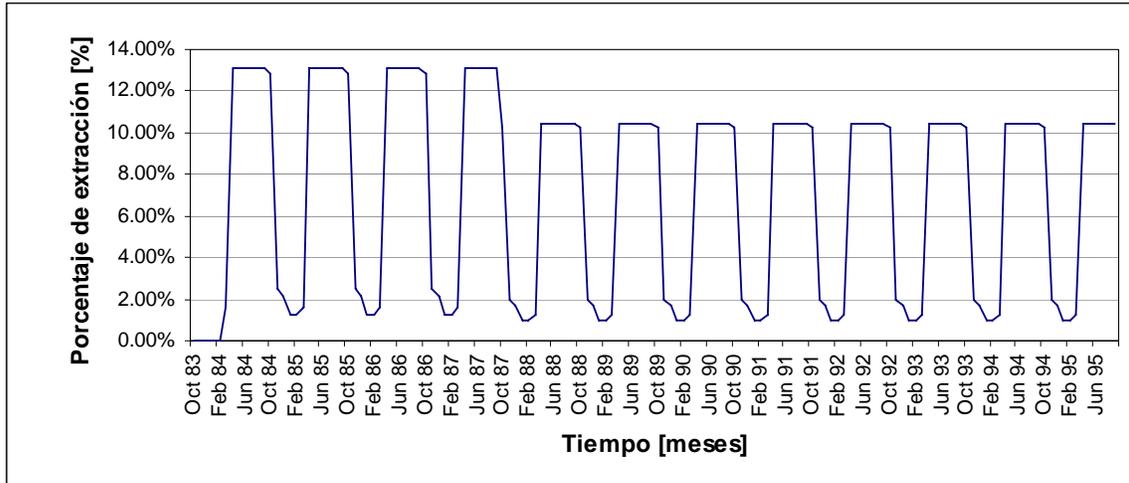
Área de recarga	Nombre	Recarga (%)	
1	Calafia Sur	11	
2	Francisco Zarco Sur	4	
3	Porvenir Sur	6	
4	Porvenir Norte	10	
5	Francisco Zarco Norte	4	
6	Calafia Norte	12	
		Subtotal	47
7	El Pinal y alrededores		53
		Total:	100

Por otro lado, el volumen de descarga del acuífero esta compuesto por la integración de los volúmenes correspondientes a la extracción por pozos para uso agrícola y pozos administrados por la CESPE, evapotranspiración y/o flujo de agua superficial.

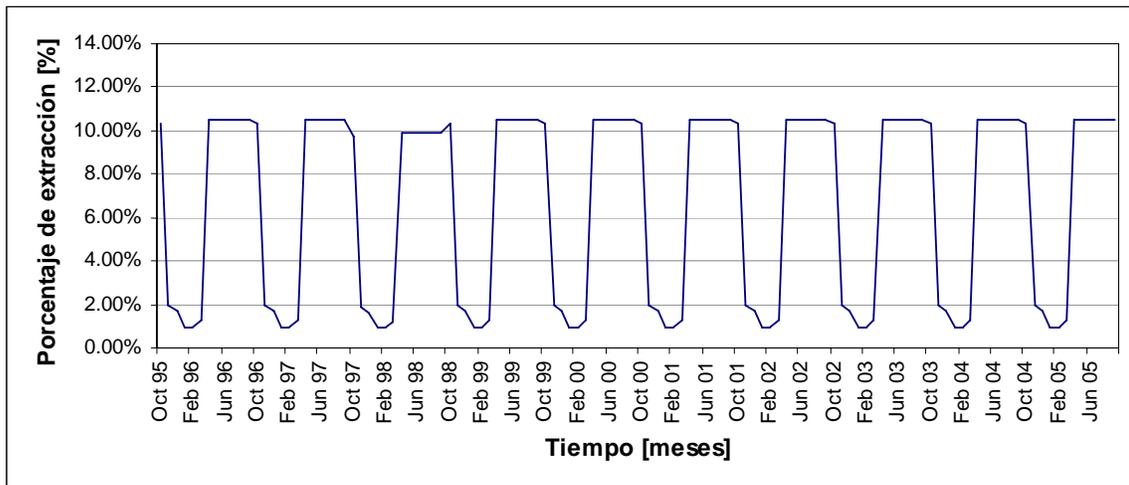
El porcentaje de extracción media mensual estimado, durante el periodo completo de simulación (1984-2005), para los pozos de uso agrícola es igual al 10% en Octubre, 2% en Noviembre, 2% en Diciembre, 1% en Enero, 1% en Febrero, 1% en Marzo, 11% en Abril, 11% en Mayo, 11% en Junio, 11% en Julio, 11% en Agosto y 11% en Septiembre (Tabla XXVI, Figura 27 y Figura 28). Los valores anteriores acumulan al año ~80%, es decir, ~16.5 Mm³/año, del volumen asignado originalmente con base en la información proporcionada por COTAS, y posteriormente estimado durante el proceso de calibración del modelo (Apéndice D).

Tabla XXVI. Porcentaje de distribución mensual de la extracción estimada por calibración para los pozos de uso agrícola del Acuífero del Valle de Guadalupe

	Oct [%]	Nov [%]	Dic [%]	Ene [%]	Feb [%]	Mar [%]	Abr [%]	May [%]	Jun [%]	Jul [%]	Ago [%]	Sep [%]	Σ [%]
1984	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.6	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	80.1
1985	12.9	2.5	2.2	1.2	1.2	1.6	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	100.0
1986	12.9	2.5	2.2	1.2	1.2	1.6	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	100.0
1987	12.9	2.5	2.2	1.2	1.2	1.6	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	13.1	100.0
1988	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1989	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1990	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1991	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1992	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1993	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1994	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1995	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1996	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1997	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
1998	9.8	1.9	1.6	0.9	0.9	1.2	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	9.9	76.0
1999	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2000	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2001	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2002	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2003	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2004	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2005	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2006	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
2007	10.3	2.0	1.7	1.0	1.0	1.3	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	10.5	80.0
media	10	2	2	1	1	1	11	11	11	11	11	11	83
Σ						7						76	83
%						8						92	100.0

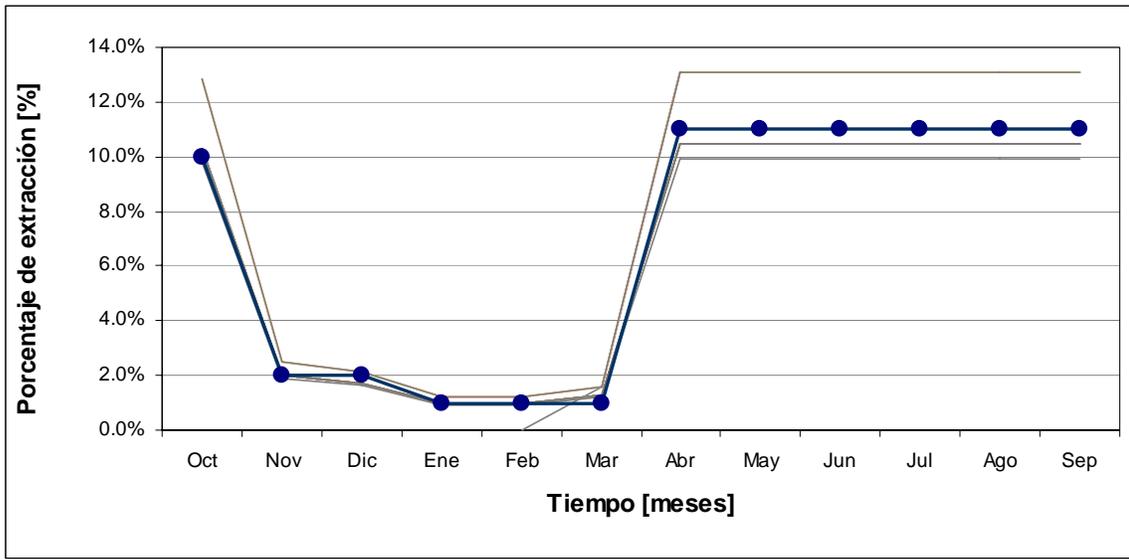


a)

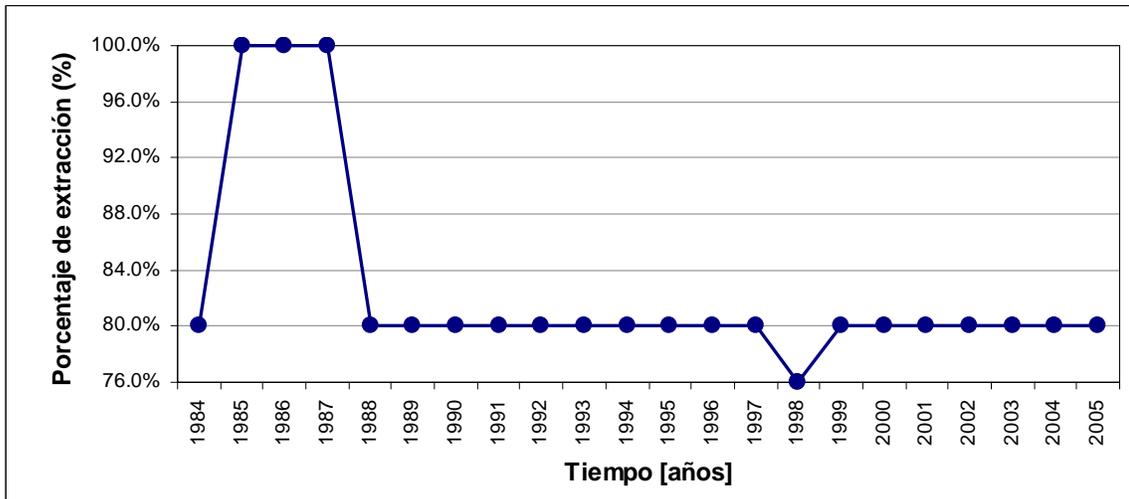


b)

Figura 27. Porcentaje de extracción estimado por calibración. a) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1983 a Septiembre de 1995, y b) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1995 a Septiembre de 2005



a)



b)

Figura 28. Porcentaje de extracción estimado por calibración. a) Distribución mensual durante el periodo de Octubre de 1984 a Septiembre de 2005. Los círculos señalan un valor promedio del porcentaje de extracción. b) Distribución anual del volumen anual de extracciones durante el periodo 1984-2005 en el Acuífero del Valle de Guadalupe

Otro factor que produce una descarga de agua subterránea, en la zona de estudio, es el fenómeno de evapotranspiración. Como resultado de la calibración del modelo se ha estimado una razón de pérdida por efectos de evapotranspiración de 240 mm/año y 60 mm/año asociados con zonas del dominio del flujo sembradas con árboles de Olivos, principalmente, cuya altura en promedio es mayor a los tres metros (Figura 29), y aquellas áreas sembradas parcial o mayoritariamente con plantas cuyas alturas son relativamente menores a la señalada, por ejemplo, vid, alfalfa, cítricos, frutales, forrajes, hortalizas, flores y/o granos, entre otros. Durante el periodo completo de simulación (1984-2005) se considera que los valores anuales estimados para la razón de pérdida por evapotranspiración son constantes, y tienen una distribución mensual equitativa a lo largo del año (Figura 30).

Es evidente que un volumen de evapotranspiración adicional ocurre en las partes altas de las montañas que rodean al Valle de Guadalupe, sin embargo, para dichas áreas, se ha utilizado una infiltración neta para simular el efecto combinado de la precipitación y la evapotranspiración. Además, es importante mencionar en esta parte, que bajo las condiciones de campo que imperan en la zona de estudio y considerando el criterio aplicado anteriormente para diferenciar los valores de pérdida por evapotranspiración con base en la altura de la vegetación, se podría esperar una razón de pérdida más alta, con un patrón dinámico mensual, inclusive, relacionada con el periodo de máximo crecimiento de la vegetación (por ejemplo, en primavera) y no limitarse a ser constante solamente. Sin embargo, de acuerdo con los resultados de esta simulación, se han obtenido similitudes satisfactorias entre las configuraciones del nivel freático medido y calculado, por lo que,

en este caso particular de estudio, no hace falta hacer una mejor definición del esquema de pérdida por evapotranspiración.



Figura 29. Tipo de vegetación predominante, árboles de Olivos con altura mayor a los tres metros, en las áreas modeladas con una razón de pérdida por evapotranspiración de 240 mm/año

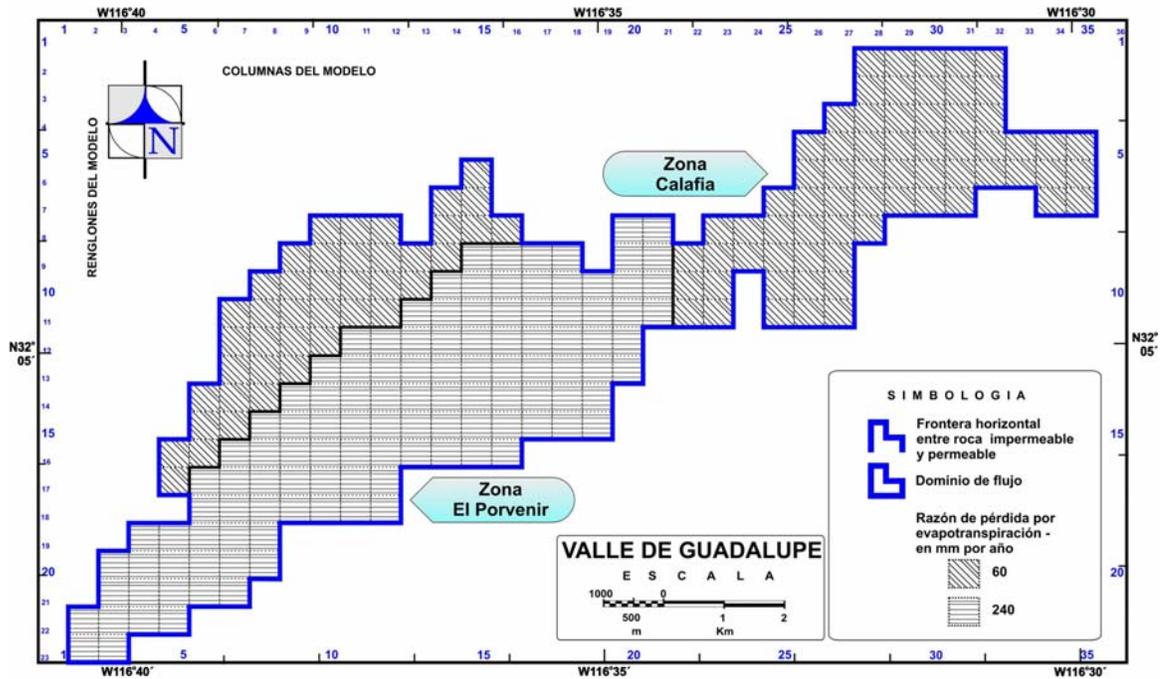


Figura 30. Razón de pérdida por evapotranspiración estimada por la calibración del modelo y que ha sido considerada como constante durante el periodo completo de simulación (1984-2005)

Finalmente, en cuanto a los volúmenes de descarga respecta, y con base en los resultados de la calibración, se supone que los drenes que simulan el flujo de agua superficial, tienen un ancho de 100 m, una longitud de 500 m y un espesor semi-impermeable constante del lecho del arroyo de 1 m a lo largo del Arroyo Guadalupe. Los valores de la conductancia vertical en los drenes no se limita a ningún intervalo durante la calibración, puesto que, con antelación no existía ninguna estimación de este parámetro para el acuífero analizado. Por lo tanto, estos valores se han ajustado y seleccionado hasta que las elevaciones del nivel freático simuladas reprodujeran lo mejor posible los contornos del nivel freático medido. En total resultan 38 celdas que simulan el flujo de agua superficial, cuya distribución coincide con las celdas donde se localiza el Arroyo Guadalupe en el interior del dominio del flujo (Figura 31).

En general, los resultados que se muestran en la Figura 32 y Apéndice G indican que el modelo de flujo de agua subterránea proporciona una razonable representación del sistema regional de agua subterránea. El modelo también reproduce los cambios históricos del nivel freático en el periodo de simulación de ~20 años (1984-2005).

Con el objeto de evaluar la calibración de los modelos de flujo de agua subterránea se han empleado diferentes técnicas para la cuantificar el error de ajuste y distribución espacial. Una de ellas, está constituida por la comparación entre mapas de contornos de los potenciales hidráulicos medidos y calculados, la cual provee una medida visual (cualitativa) de la similitud entre patrones de la variable analizada. Por otro lado, el graficado de los potenciales hidráulicos medidos versus los calculados por el simulador

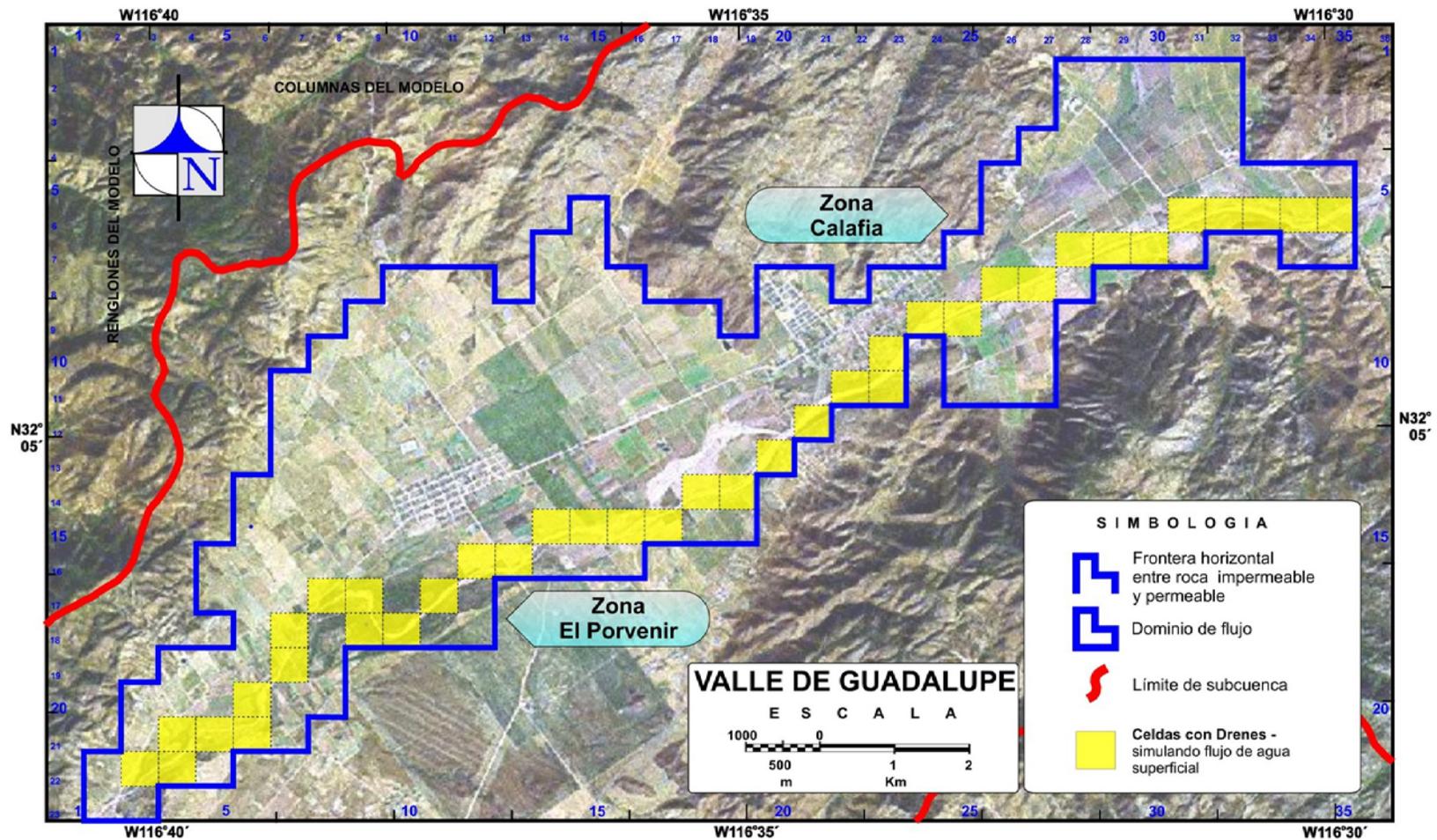


Figura 31. Localización de las celdas con drenes que simulan el flujo de agua superficial

comprende otra de las técnicas empleadas para la medición del ajuste de calibración. Además, un reporte de los valores del potencial hidráulico medido en campo y el calculado por el simulador para los distintos puntos de observación previamente seleccionados, junto con sus diferencias y el calculo del valor medio de la misma (por ejemplo, el error medio al cuadrado o *RMSE*, por sus siglas en ingles) es también una forma común de reportar los resultados de la calibración. En cuanto a la determinación cuantitativa de la distribución espacial del error de ajuste de calibración, se han desarrollado mapas para conocer la distribución de residuales del potencial hidráulico. Por ende, a lo largo de este capítulo se retomarán estas técnicas señaladas con la finalidad de evaluar cualitativa y cuantitativamente la calibración del modelo de flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Con la finalidad de evaluar el ajuste cuantitativo entre los datos del nivel freático medido en campo y los generados por la calibración del modelo de flujo de agua subterránea, para un número finito de pozos de extracción localizados en el Acuífero del Valle de Guadalupe, se ha calculado la raíz media del error de ajuste al cuadrado o *RMSE*, mediante la siguiente expresión (Freyberg, 1988; Anderson y Woessner 1992; Boyle *et al.*, 2000; Reilly y Harbaugh, 2004; Chowdhury *et al.*, 2004):

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{P} \sum_{i=1}^P [hc^i - ho^i]^2} \quad (14)$$

donde P es el número de pozos analizados, hc^i es la elevación del nivel freático calculada para el i -ésimo pozo, y ho^i es la elevación del nivel freático medida en el i -ésimo pozo.

La relación *RMSE* estimada es de 5.7 m y 7.5 m (promedio) para la calibración del modelo en condiciones estacionarias y transitorias, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 34 se presenta el graficado de las elevaciones calculadas y medidas del nivel freático, para las condiciones de equilibrio y para todas aquellas fechas que comprenden el periodo transitorio de la simulación.

Los valores de los parámetros descritos arriba reúnen los objetivos de calibración y proporcionan una razonable representación de las elevaciones del nivel freático. En el Apéndice B se presenta las gráficas de residuales y su ubicación dentro del dominio del flujo de agua subterránea para cada intervalo de tiempo que se cuenta con medición. Estas gráficas proveen una indicación de la similitud entre niveles freáticos medidos y calculados en distintas áreas de la zona de estudio y, también, cómo esta similitud cambia conforme la simulación progresa.

IV.3. Análisis del balance regional de agua subterránea con un modelo de simulación de agua subterránea

Durante la simulación de potenciales hidráulicos se generan errores de truncamiento, de discretización y/o de redondeo. Además, cuando el conjunto de ecuaciones algebraicas que representa la ecuación de flujo de agua subterránea se resuelve mediante algún método iterativo (como en esta tesis), existe una fuente adicional de error conocida como ‘error residual de iteración’. Una forma de verificar la cantidad del error residual de iteración en la solución es a través de la comparación de los flujos totales de agua de recarga y de descarga, tal como se sugiere en un balance de aguas subterráneas. En las simulaciones transitorias, la entrada y salida del agua subterránea al y

desde el almacenamiento también debe incluirse en el balance. Este error residual se puede minimizar mediante la selección apropiada de valores relativamente pequeños para el error de ajuste en el balance de aguas. En los totales del balance de agua, toda entrada de agua al dominio de flujo se considera como recarga y toda salida de agua se considera como descarga. La diferencia entre los totales de recarga y descarga se divide entre el volumen mismo de recarga o descarga para generar un error de ajuste en el balance de aguas. Idealmente el error de ajuste en el balance de agua debe ser menor al 0.1% (Konikow, 1978); sin embargo, un error de ajuste en el orden del 1%, normalmente se considera aceptable. Por último, los balances de agua subterránea, además de servir como una verificación de la exactitud en el cálculo de la solución, son un medio para identificar los errores realizados cuando se diseña el modelo. Por ejemplo, un error en la selección del valor correcto de la conductividad hidráulica se puede reflejar como un valor alto o bajo del flujo hacia o desde el modelo, el cual carece de sentido razonable. En cambio, un error en la selección del parámetro correcto del coeficiente de almacenamiento podría reflejarse en un balance de aguas subterráneas como un volumen de agua que deja o entra al almacenamiento, e igualmente, sin sentido razonable.

En esta tesis se emplea la simulación del modelo de agua subterránea para cuantificar el balance regional de agua subterránea. Los componentes del balance de agua subterránea para el periodo de simulación de 1984-2005 se presentan en el Apéndice A y, entre ellos, se incluye a las recargas vertical y horizontal, las descargas por flujo de agua superficial y por evapotranspiración, así como el flujo por las fronteras y el cambio en el almacenamiento.

Como se puede apreciar en los datos de la simulación, la principal fuente de recarga del acuífero es la recarga horizontal. A pesar de que, con base en los resultados de la simulación, durante los meses de Marzo de 2003, Febrero de 2004 y Abril de 2005 ha habido una ganancia en el cambio del almacenamiento (DS) del agua subterránea, es más evidente una pérdida continua de este DS durante las restantes fechas que integran el periodo de simulación de ~20 años, analizadas en esta calibración.

De acuerdo con un análisis estadístico (media aritmética) de la precipitación en 7 de las estaciones climatológicas de la CNA establecidas en la Cuenca Guadalupe, se estimó un valor de la precipitación media anual de ~350 mm/año. Entonces, tomando en cuenta este valor de la precipitación se ha estimado a su vez un volumen de recarga equivalente al agua precipitada en el área completa de la Cuenca Guadalupe, en la cual se incluye el área del acuífero. El volumen total estimado de agua precipitada sobre el área de la Cuenca Guadalupe para la calibración del estado estacionario es de ~12.5 Mm³/mes.

Inicialmente se ha simulado un volumen de pérdida por evapotranspiración constante para el área completa del acuífero. Sin embargo, conforme han sucedido las iteraciones de la calibración, la razón de pérdida por evapotranspiración ha sido simulada con un valor diferente para las áreas del acuífero cubiertas por árboles de Olivos y con otros tipos de cultivos (por ejemplo, vid, alfalfa, cítricos, frutales, forrajes, hortalizas, flores y granos, entre otros). Con base en los resultados de la calibración del modelo se ha estimado una razón de pérdida por evapotranspiración de ~20 mm/mes para las áreas plantadas con árboles de Olivos y con ~5 mm/mes para el resto de las áreas sembradas con otros tipos de cultivos (Figura 30). Los valores estimados de la razón de pérdida por evapotranspiración se consideran constantes durante del periodo completo de simulación

(1984-2005). En este contexto, durante el proceso de calibración se ha empleado una función que depende de la profundidad para simular la evapotranspiración en las áreas interiores del Valle de Guadalupe. La calibración del modelo de agua subterránea involucra la variación y ajuste del parámetro de la función relacionada con la razón de pérdida por evapotranspiración máxima, puesto que la profundidad a la cual la evapotranspiración es igual a cero ha sido establecida desde un principio como 3 m, tal como se sugiere en la literatura especializada (McDonald y Harbaugh, 1988; Kresic, 1997). El volumen de descarga por efectos de la evapotranspiración es $\sim 0.5 \text{ Mm}^3/\text{mes}$ o $\sim 25\%$ del volumen total de descarga (Apéndice A), en condiciones estacionarias.

La descarga por bombeo de agua subterránea para los años del periodo de calibración 1984-2005 ha sido estimada con base en la información de los registros de la CESPE y COTAS. Solamente los pozos productores mantenidos en funcionamiento por la CESPE y por aquellos usuarios registrados en COTAS, que cuentan con un aprovechamiento de agua subterránea cuyo número de identificación de obra está entre 1 y 295 (correspondiente al censo de 1977, básicamente), han sido considerados. Aunque, sin duda, ha ocurrido el bombeo en algunos pozos para uso en huertos pequeños, abrevadero o para uso doméstico, se asume que la cantidad extraída causa efectos despreciables sobre el sistema de agua subterránea a la escala de este estudio. El registro mantenido por la CESPE durante el periodo 1990-2002 para cada pozo en producción se utiliza para estimar el bombeo promedio ocurrido durante el periodo 2003-2005. El volumen total de agua extraída por los pozos establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe estimado para las condiciones transitorias del periodo de simulación es de

~25.0 Mm³/año, de los cuales ~16.5 Mm³/año en promedio corresponden a los pozos de los usuarios registrados en COTAS y ~8.5 Mm³/año en promedio a los pozos de CESPE.

La descarga natural de agua subterránea, en condiciones estacionarias, simulada con celdas de potencial hidráulico constante es de ~0.7 Mm³/mes, o ~28% de la descarga total.

Los resultados globales de la calibración del modelo para el estado estacionario se muestran en la Figura 32, Apéndice A (caso estacionario, Tabla A1 y Figura A1) y Apéndice B (caso estacionario, Figura B1).

IV.4. Validación de la simulación del Acuífero del Valle de Guadalupe

Con base en los resultados de la simulación se ha alcanzado un aceptable empate entre los niveles del agua subterránea medido en campo y calculado por el simulador para los meses de Febrero de 1984 hasta Marzo de 2003, a través del ajuste de los parámetros hidrogeológicos realizado durante las calibraciones en los estados estacionario y transitorio. Con el propósito de validar el modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe y los valores calibrados de los parámetros hidrogeológicos que lo componen, se han realizado nuevas simulaciones para reproducir las condiciones transitorias desde Marzo de 2003 hasta Abril de 2005, empleando para ello el volumen de extracción mensual medido en los pozos de CESPE y el estimado para los pozos de los usuarios registrados en COTAS.

Los cambios de la elevación del nivel freático calculado por el modelo durante el periodo de validación se comparan con los valores medidos, y se pueden apreciar en el extremo derecho de la sección central de cada hidrograma presentado en las gráficas del

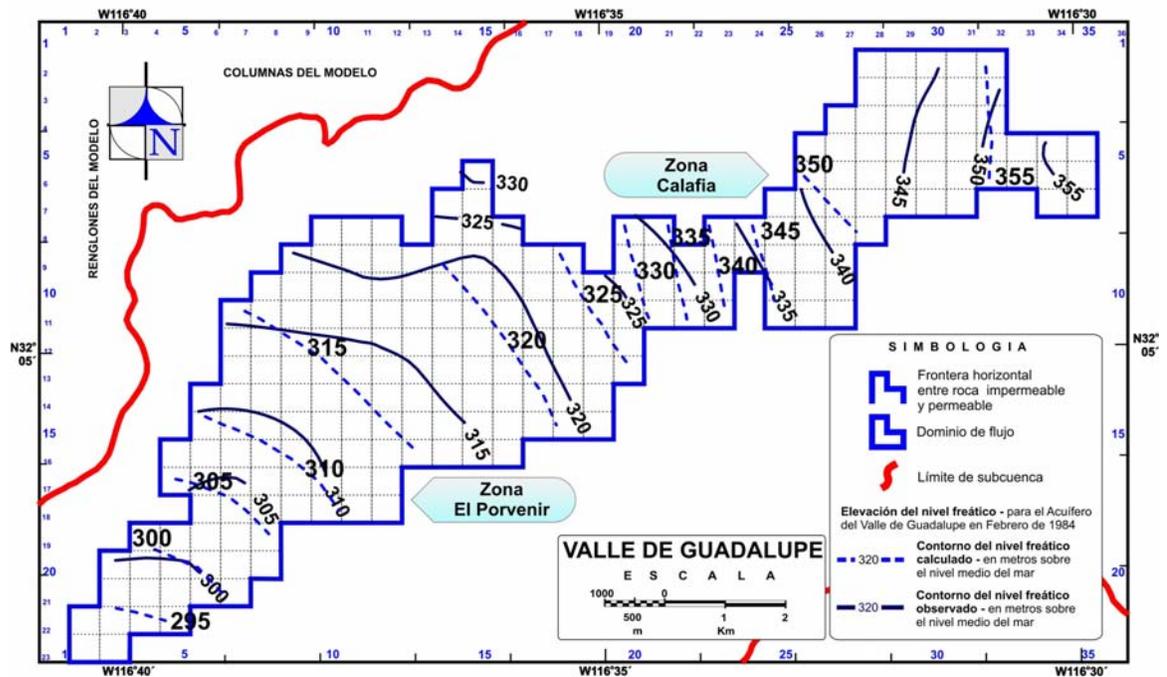
Apéndice C. Tal como se muestra en los hidrogramas, para la mayoría de los casos, el modelo reproduce satisfactoriamente las elevaciones del nivel freático medido en campo.

De acuerdo con los datos de las tablas de balance del agua subterránea, durante las simulaciones desarrolladas para la calibración en condiciones transitorias y la validación del modelo (Febrero 1984 - Abril 2005) se ha estimado un volumen de extracción promedio de $\sim 2.5 \text{ Mm}^3/\text{mensuales}$ del Acuífero del Valle de Guadalupe. Con base en los resultados de la simulación, cuando se compara el volumen de extracción mensual con el volumen total de recarga mensual promedio se indica que en promedio se ha tomado un 65% del volumen de almacenamiento de agua subterránea para satisfacer las demandas del recurso hidráulico por el propio valle y la ciudad de Ensenada (Apéndice A, condiciones transitorias, Tablas A2-A12 y Figuras A2-A12). El resto del volumen de descarga se deriva de los cambios de la elevación del nivel freático en las áreas cercanas a la frontera suroeste y partes interiores del valle, debido a descargas naturales por flujos subterráneos, básicamente, y por flujo de agua superficial y evapotranspiración, en menor escala.

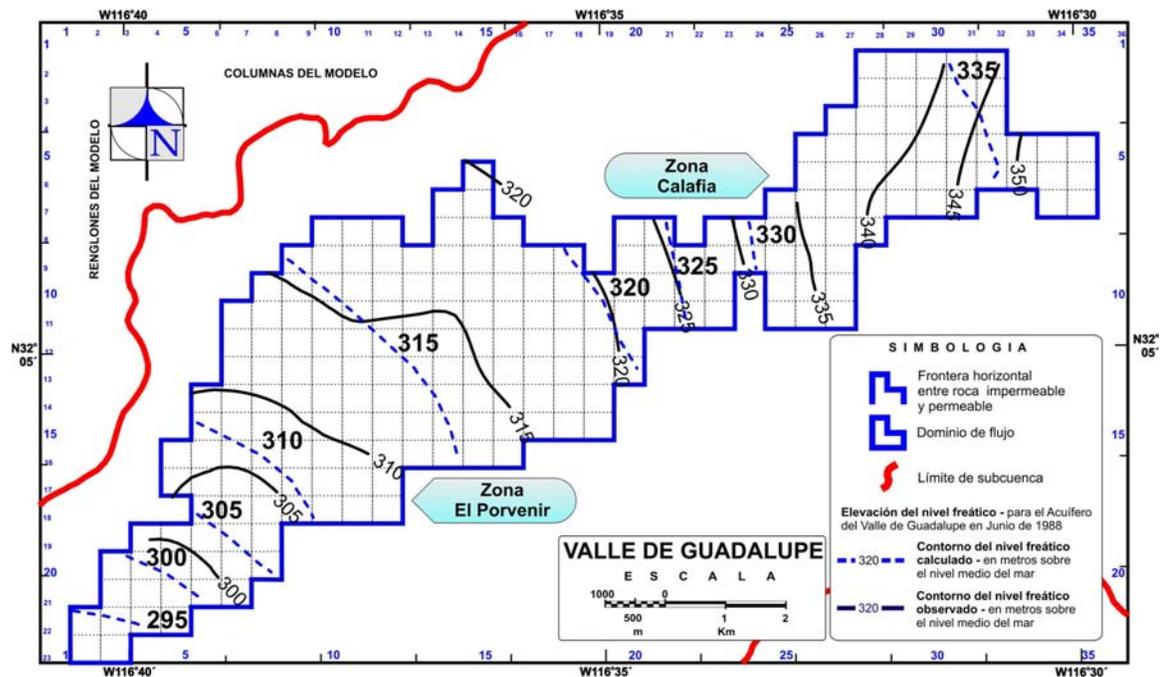
IV.5. Resultados de la simulación

Del conjunto total de configuraciones de la superficie freática elaboradas con los resultados de esta simulación, las mismas, que se supone representan las distribuciones del nivel freático en las fechas que integran el periodo de calibración y validación del modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe, se presentan en esta sección con el objeto de resaltar determinadas características particulares, tal como, los mejores ajustes entre contornos, las zonas de abatimientos o recuperaciones y el desarrollo de conos de abatimientos, entre otras, las de Febrero de 1984, Junio de 1988, Febrero de 2004 y Abril de 2005. No obstante, en el Apéndice G, se presentan las distribuciones del nivel freático para todas las fechas analizadas en este trabajo. Las dos primeras configuraciones mostradas aquí corresponden a distribuciones elaboradas con datos proporcionados por la CNA y las restantes con datos compilados en las campañas de muestreo 1 a 6, estas cuatro configuraciones se han escogido con base en el criterio de tener en promedio treinta pozos con información del nivel freático medido en campo a lo largo del periodo de la simulación.

En la mayoría de las configuraciones del nivel freático medido y calculado se observa que el espacio entre los contornos disminuye, esto en distintas áreas del dominio del flujo, por ejemplo, en el noreste de la Zona Calafia, el poblado Francisco Zarco y hacia la frontera suroeste (Figura 32 y 33). La proximidad presentada entre contornos sugiere un gradiente hidráulico abrupto y un flujo de agua subterránea relativamente más rápido, lo cual indica consistencia con los angostamientos de las fronteras del dominio del flujo. Por otro lado, debido a la presencia de niveles freáticos someros, básicamente,

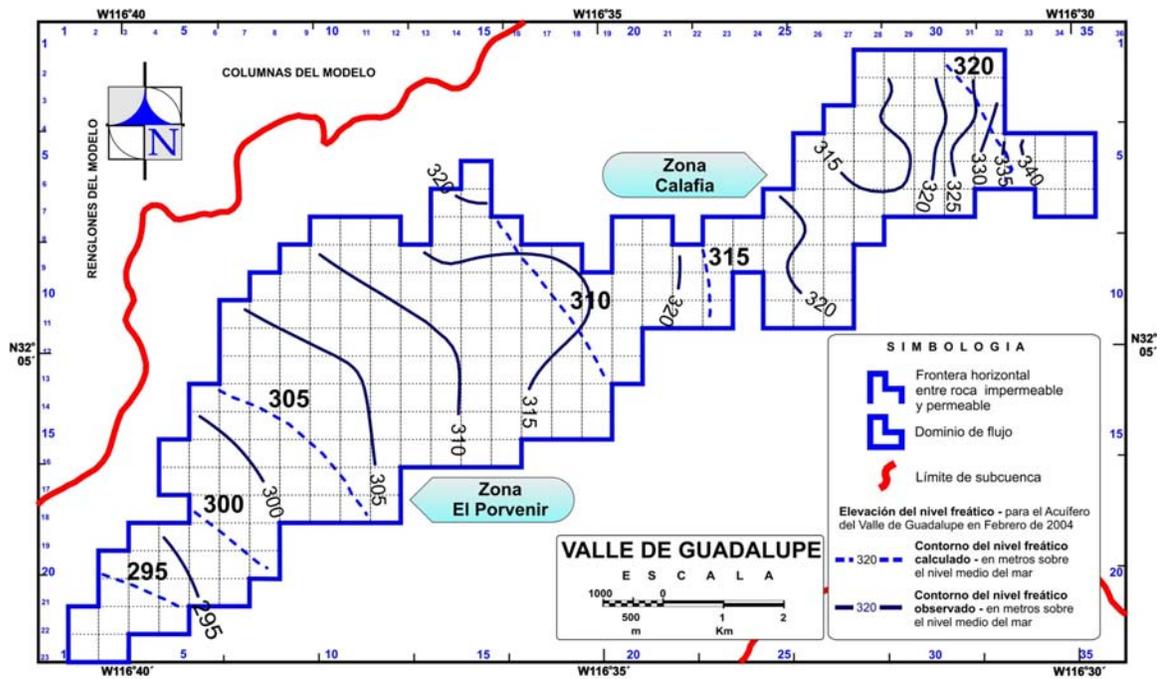


a)

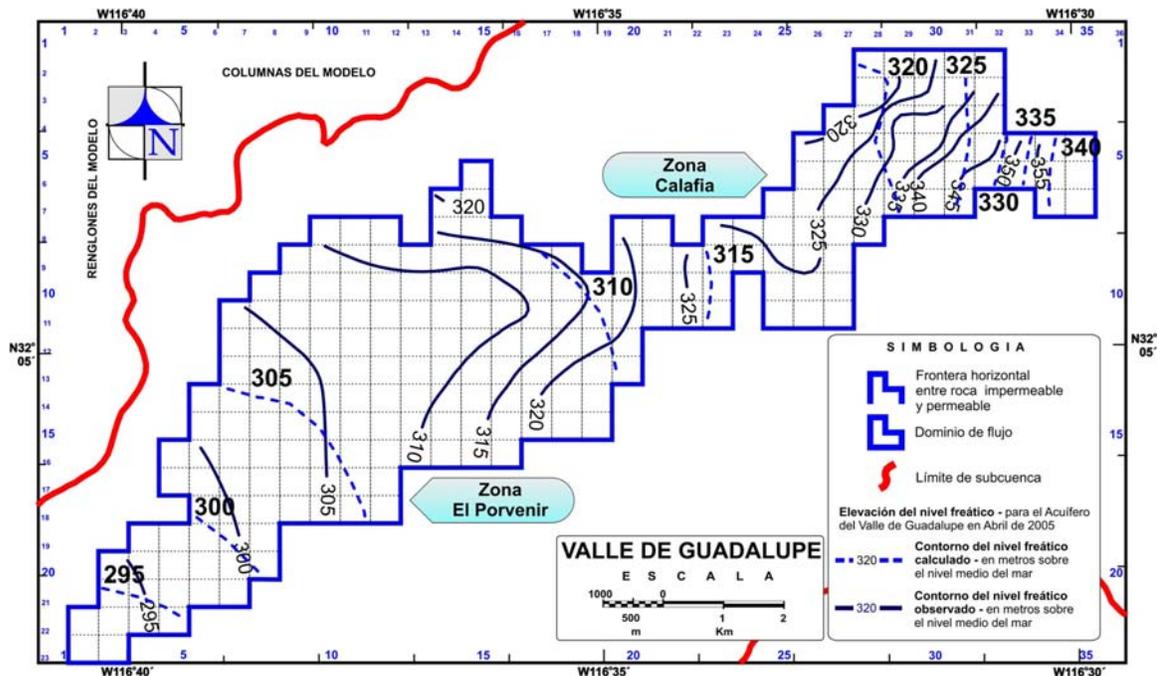


b)

Figura 32. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado estacionario, fijada como condición inicial en Febrero de 1984, y b) En estado transitorio, Junio de 1988 (52 meses de simulación). En este caso particular de análisis se supone que son las distribuciones del nivel freático observado en el Acuífero del Valle de Guadalupe en las fechas establecidas



a)



b)

Figura 33. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Febrero de 2004 (240 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 2005 (254 meses de simulación). En este caso particular de análisis se supone que son las distribuciones del nivel freático observado en el Acuífero del Valle de Guadalupe en las fechas establecidas

localizados en las cercanías de la frontera suroeste, el agua subterránea podría perderse por efecto de evapotranspiración y/o causar eventualmente el desarrollo de zonas pantanosas o lagunares.

Con base en la inspección visual de las superficies freáticas, en términos generales, en el Acuífero del Valle de Guadalupe se aprecia un comportamiento regional calculado acorde con el observado, es decir, los valores del potencial hidráulico calculado son parecidos a los observados y el gradiente hidráulico calculado es semejante al medido en campo, cuya dirección es principalmente del noreste hacia el suroeste del área analizada.

El modelo calibrado reproduce razonablemente la distribución espacial del nivel freático en el acuífero y la dirección de flujo interpretada para las condiciones del estado estacionario de Febrero de 1984 (Figura 32a). En particular, existen sitios con mayor ajuste entre potenciales observados y calculados, por ejemplo, toda la Zona El Porvenir, donde se presenta un desajuste entre niveles freáticos observados y calculados entre 2 y 5 m. Sin embargo, también se puede observar la existencia de un menor ajuste entre configuraciones de potenciales hidráulicos en la Zona Calafia y el poblado Francisco Zarco, cuya diferencia vertical puede llegar a ser mayor de 5 m (Apéndice B, Figura B1a).

A partir de la distribución del potencial hidráulico fijada como condición inicial se calcula la evolución del acuífero como respuesta a los procesos dependientes del tiempo. Las distribuciones simuladas de la superficie del nivel del agua para las condiciones transitorias reproducen razonablemente los valores medidos en toda el área del modelo (Figuras 32 y 33). Los niveles del agua en la zona de estudio muestran diferentes

respuestas a lo largo del tiempo de análisis, algunos niveles muestran un cambio relativamente pequeño y otros más muestran abatimientos considerables. Por ejemplo, en algunas áreas, se tiene mejor éxito en minimizar las diferencias entre niveles freáticos medidos en campo y calculados por el simulador numérico, tal como, la mayor parte de la Zona El Porvenir, donde se tiene diferencias cercanas al 0 ± 2 m; mientras que por otro lado, en distintas porciones de la Zona Calafia, la Zona El Porvenir, el poblado Francisco Zarco y la Cañada del Trigo, así como la entrada del Arroyo Guadalupe al dominio del flujo se ha sobre-estimado el abatimiento, dado que resultan diferencias verticales mayores a los ± 5 m (Apéndice B y Apéndice G).

De acuerdo con las configuraciones de la superficie freática, para Mayo de 1998 se aprecia que los niveles freáticos en la zona de estudio muestran una ligera recuperación comparada con años anteriores (Figura G2a).

En general, el flujo de agua subterránea fluye de áreas de topografía alta hacia áreas de topografía baja, en este caso particular de análisis del noreste hacia el suroeste. Sin embargo, a partir de 2004, se observa un abatimiento del nivel freático en la Zona Calafia, llegándose a apreciar la presencia de un gran cono de abatimiento incluso, esto, podría sugerir un excesivo bombeo de agua subterránea llevado a cabo en dicha área, lo cual ha generado cambios en la dirección del sistema natural de flujo de agua (Figuras 33, G3 y G4).

Los hidrogramas muestran la fluctuación del nivel freático en los pozos debido a los cambios estacionales en la recarga y el bombeo del agua subterránea. Generalmente, los niveles freáticos en los pozos se incrementan durante los meses de invierno y primavera, debido a la ocurrencia de la mayor parte de la recarga hacia el acuífero; pero,

el bombeo de agua subterránea disminuye los niveles freáticos en los pozos hasta una profundidad más baja que la que pudiera ocurrir de manera natural (Apéndice C).

La distribución espacial de los residuales del agua subterránea (nivel del agua medido en campo restado del nivel del agua simulado) no muestra ninguna tendencia hacia localidades específicas del dominio del flujo (Apéndice B, Figuras B1-B6).

Los resultados gráficos de la elevación del nivel freático calculada contra la observada en campo para las diferentes fechas comparadas se presentan en la Figura 34.

A continuación se presenta un resumen de los parámetros geométricos, geohidrológicos y de operación del modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe, que se consideran para obtener los mejores resultados de la simulación llevada a cabo en esta tesis (Tabla XXVII).

Tabla XXVII. Parámetros del modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe

	Unidad	Período 1984-2005
Recarga total	m ³ /año	Variable
❖ Ecurrimientos por el Arroyo Guadalupe medidos en la estación Agua Caliente durante el periodo 1984-1992	m ³ /año	Variable
❖ Porcentaje de la precipitación media mensual en:		
◆ Zona acuífera	%	10
◆ Resto de la Cuenca Guadalupe	%	5
❖ Bombeo total:		
◆ Usuarios registrados en COTAS	Mm ³ /año	16.5
◆ CESPE	Mm ³ /año	8.5
Conductividad hidráulica	m/año	0.0x10 ⁰ – 4.0x10 ⁴
No. total de pozos (cuya distribución en el acuífero se puede apreciar en el Apéndice H)		~170
Coefficiente de almacenamiento		0.20
Dimensiones de la celda	m	500 x 500
Área acuífera analizada	km ²	~60
Espesor saturado	m	0-200
Evapotranspiración	m/año	0.06-0.24

IV.6. Validación del simulador

En términos generales, la configuración de potenciales hidráulicos fijada como condición inicial tiene un flujo hidráulico con dirección noreste-suroeste, modificado por la forma irregular de las fronteras del acuífero. Específicamente, en la porción noreste de la zona de estudio se observa que las curvas de igual elevación del nivel freático presentan un gradiente hidráulico dirigido hacia el oeste casi uniformemente. Hacia la zona central, es claro el efecto del estrechamiento de las fronteras del acuífero, por lo cual se refleja un incremento del gradiente hidráulico, el cual ya tiene una dirección prácticamente noreste-suroeste. El flujo continúa al suroeste donde la zona permeable se va cerrando hasta llegar a la salida del Acuífero del Valle de Guadalupe.

En general, la comparación visual de contornos con igual elevación del nivel freático, de acuerdo al análisis de la información medida en campo y la calculada por el modelo, tienen buen ajuste cualitativamente hablando, es decir, la ubicación y morfología de los isocontornos comparados son similares.

Aún así, es conveniente realizar un análisis cuantitativo de las diferencias del nivel freático observado y calculado, tal como se sugiere en la literatura recopilada (Freyberg, 1988; Anderson y Woessner 1992; Boyle *et al.* 2000; Reilly y Harbaugh, 2004). Para lo cual, se han analizado datos del nivel freático observado y calculado en pozos del Acuífero del Valle de Guadalupe. Con base en los resultados de la simulación, se obtiene del análisis cuantitativo entre datos medidos y calculados un valor promedio del *RMSE* igual a 7.1 m para 28 pozos en promedio, establecidos a lo largo de toda la zona de estudio (Tabla XXVIII). A pesar de que se observa una reducción en los valores *RMSE* para Mayo de 1985 y Abril de 1990, esta podría haber sido causada por el cálculo

de dicha relación para un número menor de pozos disponibles con mediciones del nivel freático.

Tabla XXVIII. Valores promedio de la relación *RMSE*

Fecha	Feb-84	May-85	Jun-88	Abr-90	May-98	Sep-01	Mar-03	Feb-04	Abr-04	Jun-04	Oct-04	Abr-05
<i>RMSE</i> (m)	5.7	3.9	5.9	3.6	7.3	6.4	6.1	9.2	9.1	7.6	10.0	10.8
Pozos	34	21	27	24	25	22	22	40	26	20	42	34

Para continuar con el análisis cuantitativo de los resultados de la calibración, se ha generado la grafica de elevaciones del nivel freático calculadas contra las medidas en campo en los puntos de observación seleccionados previamente. En la Figura 34 se aprecia que la mayoría las elevaciones del nivel freático observadas y calculadas, para los estados estacionarios y transitorios, caen sobre las líneas a 45°. Sin embargo, también puede apreciarse que un número menor de los puntos que señalan las elevaciones del nivel freático observadas contra las calculadas caen por los lados de estas líneas a 45°.

Elevación *calculada* del nivel freático vs elevación *observada*

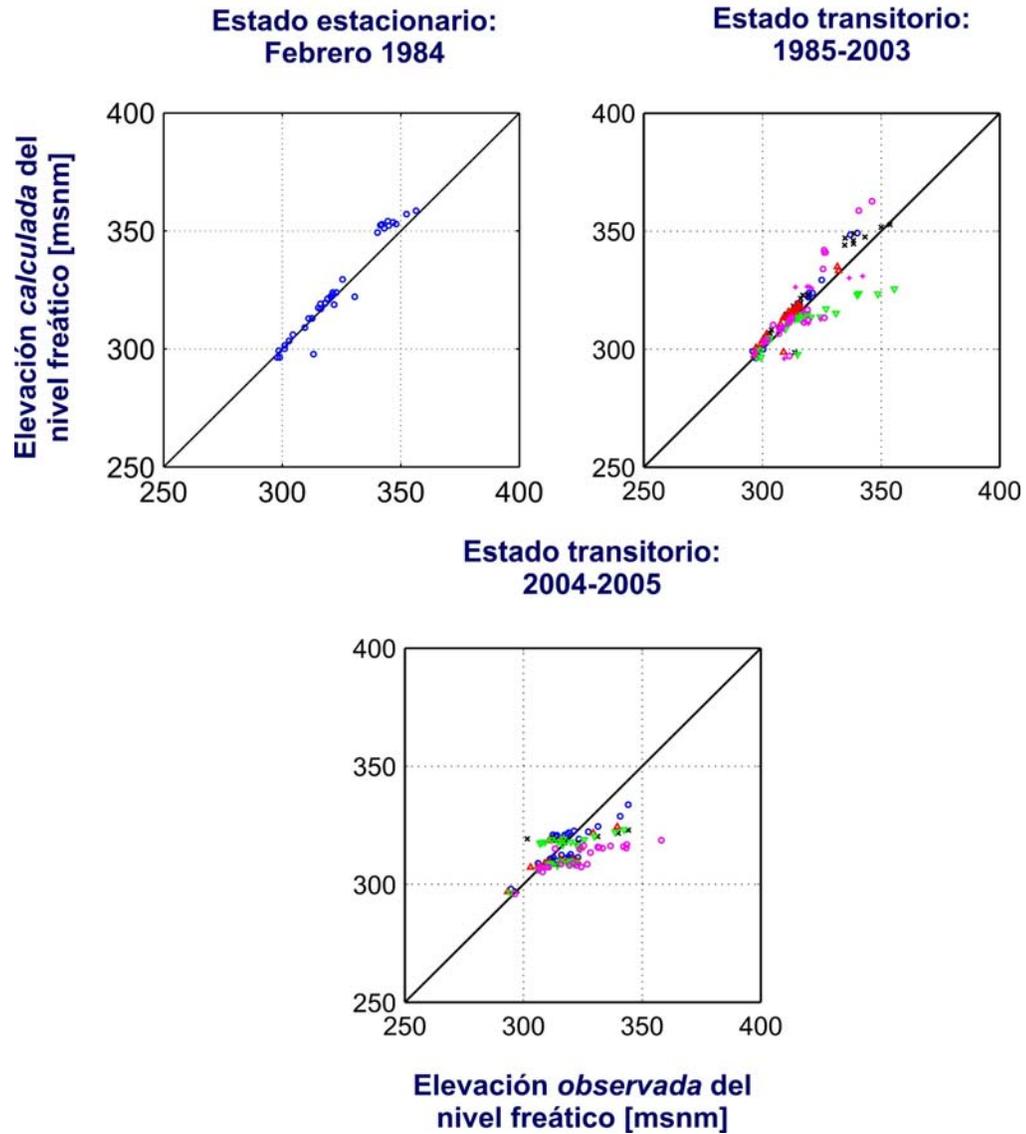


Figura 34. Comparación de las elevaciones del nivel freático medidas con las calculadas para calibración del modelo numérico en los estados estacionario y transitorio

V. EVALUACIÓN DE ALTERNATIVAS DE MANEJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA

En esta tesis se evalúan diferentes alternativas a futuro sobre el manejo del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Con este propósito, se emplea el simulador numérico del flujo de agua subterránea reportado en Campos Gaytán (2002) y Campos-Gaytán y Kretzschmar (2006), incluyendo las herramientas numéricas de evapotranspiración y flujo de agua superficial, y se diseñan seis escenarios del manejo del agua subterránea, en los cuales se tiene como objetivo generar un análisis cuantitativo de las variables involucradas y aumentar el conocimiento hidrogeológico de la zona de estudio. Por tal razón, en cada uno de los escenarios diseñados se pone especial atención en las variables de recarga y/o descarga de agua subterránea por el curso del Arroyo Guadalupe y los escurrimientos acaecidos en las márgenes de las montañas que rodean al acuífero, así como en el volumen de extracción de agua subterránea, realizado para satisfacer las necesidades propias del valle y la demanda parcial de agua de la ciudad de Ensenada. Una vez alcanzado el mejor entendimiento de cómo funcionan los parámetros hidrogeológicos del sistema de agua subterránea se puede generar un plan de manejo hidráulico que sea factible de implementar y desarrollar por los usuarios locales y regionales, o en su defecto, mostrar criterios técnicos a los beneficiarios del recurso hídrico y crear conciencia en ellos sobre los efectos de sus decisiones.

Cada escenario de manejo simula las condiciones en el acuífero desde 1984 hasta 2025 e incluye un horizonte de ~18 años (2007-2025) para investigar los efectos del cambio en las variables que lo componen. Las condiciones futuras (2007-2025) se estiman de la

recarga y descarga histórica ocurrida durante el periodo climático representativo 1984-2007.

V.1. Variables del manejo del agua subterránea

Prácticamente, a lo largo y ancho de todo el Acuífero del Valle de Guadalupe, los niveles del agua subterránea suben y bajan con los cambios en la recarga y descarga, respectivamente. Durante las sequías, la disminución del nivel de agua subterránea reduce la capacidad de extracción de los pozos que suministran agua para la agricultura, abrevadero, uso doméstico local y para la ciudad de Ensenada. En algunos casos, los niveles del agua subterránea pueden llegar a ubicarse hasta por debajo de la profundidad a la que se alimenta un pozo productor, requiriendo un alto costo para bajar la bomba o para deshabilitar el uso del pozo (Andrade, 1997; Beltrán, 1998a).

V.2. Alternativas de manejo del agua subterránea

Las alternativas de manejo del agua subterránea son:

1. Continuar con las operaciones promedio del manejo de agua subterránea vigentes.
2. Satisfacer una demanda de agua futura ante la presencia de una reducción de la recarga.
3. Satisfacer un aumento en la demanda de agua a futuro de la ciudad de Ensenada, mediante un incremento en el volumen de bombeo y, ante una reducción de la recarga.
4. Satisfacer una demanda de agua con un volumen de extracción considerado sustentable ante la presencia de una reducción de la recarga

V.3. Escenarios simulados

V.3.1. Alternativa 1: Recarga y descarga promedia para el periodo 2007-2025

En esencia en la alternativa 1 se muestra los efectos de mantener un volumen promedio de recarga de $\sim 29.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y uno de descarga de $\sim 25.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

Considerando que el objetivo primario de esta alternativa es continuar con las operaciones del manejo del agua en el presente, entonces, resulta prudente utilizar el promedio de los datos históricos y estimados sobre los volúmenes de recarga y descarga del acuífero. Por lo tanto, se emplean como recarga por escurrimientos en la entrada del Arroyo Guadalupe al valle, durante 1984-1992 los valores medidos en la estación Agua Caliente, durante 1993-2007 los estimados en la calibración del modelo y, durante 2008-2025 un promedio estimado de los datos anuales correspondientes al periodo completo de simulación, igualmente, se usa un volumen de bombeo de agua subterránea equivalente al promedio de los valores de extracción estimado y asumido durante la calibración para los pozos de uso agrícola y los operados por CESPE, respectivamente; además, se considera una precipitación promedio de $\sim 350 \text{ mm/año}$. Cualquier otra recarga, descarga y/o dato de alguna variable en el modelo numérico del flujo de agua subterránea es igual que aquella usada en la calibración.

Las cuatro alternativas se diseñan con gran similitud en cuanto a sus componentes de recarga y descarga; por lo tanto, la mayor parte de la descripción que se hace en este apartado para la alternativa 1, también se aplica al resto de las alternativas.

El resultado más obvio, del análisis de esta alternativa, es que las elevaciones simuladas para la mayoría de las áreas del modelo tienden a aplanarse y a estabilizarse de manera relativamente lenta en una elevación más baja de la que presentaron en 1984, pero similar a la que se tenía al inicio de esta alternativa. Esta aparente estabilidad de la elevación del nivel freático puede ser resultado de un volumen de recarga similar o relativamente mayor al volumen de descarga. Con base en los resultados de la alternativa 1 se puede interpretar que el Acuífero del Valle de Guadalupe entra en un aparente equilibrio cuando se consideran las condiciones hidrogeológicas y de operación promedio (Apéndice C, señalados en los hidrogramas con líneas en color azul y marcados como ‘Mejor Escenario’). Además, se puede percibir que esta alternativa es el caso más sencillo de perseguir, ya que, si se mantienen las condiciones promedio actuales se creará el menor número de problemas nuevos.

V.3.2. Alternativa 2: Precipitación menor a la precipitación actual y una extracción igual a la extracción actual durante el periodo 2007-2025

Se diseña la alternativa 2 para simular una continuidad de las operaciones del manejo del agua subterránea considerando una Precipitación (P) menor a la Precipitación actual (Pa) y una Extracción (E) igual a la Extracción actual (Ea).

En este caso, las recargas por escurrimientos y por precipitación directa en la zona acuífera acumulan un valor analizado de $\sim 18.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$.

Una de las características resultantes de este escenario es la presencia de un abatimiento intenso y continuo de las elevaciones simuladas en cada uno de los hidrogramas (Apéndice C, señalados en los hidrogramas con línea en color rojo y marcados

como 'Peor Escenario Caso 1, Escenario Actual'). Este patrón es el claro efecto de una recarga disminuida y una descarga mantenida constante, es decir, en este caso, una descarga menor y una descarga similar a la considerada en la alternativa 1. Con base en los resultados de la simulación de este escenario, en el Acuífero del Valle de Guadalupe se presentaría el problema de un pozo sin columna de agua a partir de Agosto de 2017 (Apéndice C, Hidrogramas de los pozos P-158 y P-159).

Dentro de esta alternativa se analizaron otros dos escenarios de manejo del agua subterránea, en los cuales se considera una variación del volumen de extracción estudiado en el Caso 1. Uno de ellos (Caso 2), consiste en la simulación que considera mantener constante las extracciones de agua subterránea llevadas a cabo por los pozos de CESPE (100% del volumen asumido durante la calibración y equivalente a $\sim 8.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$; Apéndice E) y de los Agricultores (45% del volumen estimado durante la calibración y equivalente a $\sim 9.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$; Apéndice D). En cambio, el otro (Caso 3) consiste en simular una extracción constante de agua subterránea realizada por los pozos de los Agricultores (80% del volumen estimado y equivalente a $\sim 16.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$) y ninguna extracción por los pozos de CESPE ($0.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$). Con base en los resultados de ambos escenarios, a pesar de la reducción del volumen de recarga de agua subterránea en el acuífero es posible mantener una política de extracción del agua subterránea en el orden de los $\sim 17.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$, mediante las opciones de bombeo CESPE 100% y Agricultores 45% o Agricultores 80% y CESPE 0%; no obstante, en consecuencia al desarrollo de cualquiera de estos dos escenarios se apreciaría el abatimiento del nivel freático y un aparente equilibrio en elevaciones menores a las observadas al inicio de los mismos incluso (Apéndice C,

denotados en los hidrogramas con líneas en color naranja y magenta, y marcados como ‘Peor Escenario, Caso 2’ y ‘Peor Escenario, Caso 3’, respectivamente).

V.3.3. Alternativa 3: Precipitación menor a la precipitación actual y un incremento en la extracción actual, utilizando los pozos existentes, durante el periodo 2007-2025

Parte del reto de un manejo de agua subterránea es determinar mediante argumentos técnicos cuanta agua deben de bombear los pozos existentes, o en su defecto, definir si deben construirse nuevos pozos y dónde deben de ponerse estos (Desimone *et al.*, 2002); entonces, y en consideración de tales cuestionamientos, mediante el análisis de la alternativa 3 se busca la evidencia técnica que ayude a dar respuesta a este tipo de preguntas y se evalúa la capacidad del Acuífero del Valle de Guadalupe para satisfacer un incremento en la demanda de agua suministrada a la ciudad de Ensenada.

De acuerdo con previas investigaciones se ha determinado que la demanda de agua para la ciudad de Ensenada se incrementará, debido al aumento de la urbanización progresiva que se ha venido realizando en la propia ciudad (comunicación personal, Jesús Alfredo Quiñónez Rodríguez, 2007, Diagnóstico actual de las demandas de agua para la ciudad de Ensenada y alternativas de abastecimiento, Segundo Simposium de Ingeniería Civil).

En esta alternativa se evalúa satisfacer la demanda futura de agua subterránea mediante el incremento en el bombeo de algunos de los pozos existentes. Dicho incremento se estima por la multiplicación de los volúmenes asumido (pozos de CESPE) y estimado (pozos de uso agrícola) por un porcentaje de aumento y uno de reducción, respectivamente, produciéndose un bombeo neto de $\sim 18.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (CESPE 125% + Agricultores 35%).

La aplicación de esta alternativa genera una disminución de las elevaciones simuladas en la mayoría de las áreas que comprenden el Acuífero del Valle de Guadalupe, dentro de las cuales se presentan elevaciones por debajo del mínimo histórico registrado y de cualquier otra que haya ocurrido durante el periodo de calibración incluso (Apéndice C, señalados en los hidrogramas con línea en color gris y marcada como 'Peor Escenario, Caso 4'). Con base en los resultados de la alternativa 3, se infiere que un porcentaje de aumento del orden del 25% en la demanda futura de agua para la ciudad de Ensenada (bombeo extra relativo de $\sim 2.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$), equivalente a un volumen de $\sim 11.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$, se puede mantener con el uso del agua subterránea del acuífero, siempre y cuando prevalezcan las condiciones climáticas con una precipitación media anual de $\sim 300 \text{ mm/año}$ y que el volumen de explotación para fines de uso agrícola desarrollado por los usuarios establecidos en el valle disminuya hasta el 35% del promedio anual estimado.

V.3.4. Alternativa 4. Precipitación menor a la precipitación actual y una demanda de agua con un volumen de extracción considerado sustentable

La alternativa 4 consiste en simular una descarga aproximada del 55% del volumen estimado para los Agricultores (Apéndice D) y 55% del volumen asumido para los pozos de CESPE (Apéndice E), con el objeto de determinar un volumen de bombeo de agua subterránea óptimo.

Con base en los resultados de esta alternativa, es posible la extracción de un volumen de $\sim 16.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ durante el periodo 2007-2025; pero, a consecuencia de la aplicación de este manejo del agua subterránea se presentaría el abatimiento del nivel freático prácticamente en toda el área del acuífero (Apéndice C, señalados en los

hidrogramas con línea en color negro y marcados como ‘Peor Escenario Caso 5, Escenario Sustentable’). No obstante, es importante resaltar que la magnitud de dicho abatimiento es menor a cualquier otro ocurrido mediante la implementación de las alternativas 1 a 3, previamente comentadas.

VI. DISCUSIÓN

VI.1. Discusión del modelo

Mediante el diseño, desarrollo y calibración de este modelo del flujo de agua subterránea se ha generado información invaluable sobre las condiciones hidrogeológicas del Acuífero del Valle de Guadalupe. Con este estudio se han determinado las áreas donde el modelo reproduce satisfactoriamente, y también no tan satisfactoriamente, los datos del nivel freático medidos en campo, cualitativa y cuantitativamente hablando.

Con base en los resultados de esta tesis, se ha observado que el uso de las características hidrogeológicas de los materiales que componen el acuífero para el agrupamiento de los mismos en zonas con propiedades hidráulicas similares, esto, tal como lo ha sugerido Vázquez González (2002) y Freyberg (1988), es una técnica efectiva porque reproduce configuraciones del nivel freático calculado semejantes a las medidas en campo.

Una manera de mejorar la simulación del modelo, especialmente en áreas claves como la Zona Calafia, es reducir el tamaño de las celdas que integran la rejilla del modelo. Si se sabe que un cambio abrupto en la conductividad hidráulica de un sitio a otro, considerando el análisis de una rejilla con celdas grandes, puede resultar en un ajuste pobre entre las elevaciones del nivel freático observado y calculado. Por el contrario, una disminución en el tamaño de las celdas que comprenden la rejilla podría facilitar un cambio gradual más fino en los parámetros hidráulicos, los cuales sin duda, podrían producir una mejor simulación del sistema de agua subterránea analizado (Vázquez González, 2002; Anderson y Woessner, 1992; Marsily, 1986). Sin embargo, la reducción

del tamaño de las celdas conlleva la necesidad de contar con una mayor resolución temporal y espacial del resto de los parámetros que componen el modelo, tales como, la precipitación, la recarga por el frente de montaña y la evapotranspiración, entre otros; de tal manera que, por simplicidad y con base en los resultados obtenidos en esta tesis, en los cuales se pueden apreciar que la configuración general de los niveles freáticos simulados se ajusta satisfactoriamente con los medidos, no se procede con una mejor definición temporal y espacial de los parámetros que componen el modelo del sistema de agua subterránea de la zona de estudio, conceptualizado como un acuífero libre con una sola capa.

Aunque se cuenta solamente con datos de escurrimiento por la zona de Agua Caliente (frontera noreste), la distribución general de recarga a lo largo de pequeños arroyos produce resultados razonables en áreas de potencial hidráulico conocido durante el análisis de las condiciones transitorias. La recarga de agua subterránea distribuida en los márgenes de la zona de estudio producen resultados satisfactorios para la mayoría de las fechas analizadas durante la calibración; sin embargo, sobre todo en el periodo de calibración con datos generados como trabajo complementario de esta tesis en el 2004 y 2005, es evidente una elevación del nivel freático calculado menor a la elevación medida en campo. Lo anterior sugiere, primordialmente, la necesidad de un incremento de la recarga de agua subterránea por la Zona Calafia con el objeto de aumentar la elevación del nivel freático calculado, puesto que la recarga por precipitación (a su vez, la recarga por escurrimientos superficiales) esta aceptablemente bien constreñida por los datos contenidos en el registro vigente de la CNA. Un factor posible para la generación de este volumen de recarga podría tener origen en el aumento de un volumen adicional de recarga

de agua subterránea ocurrida por zonas de fallas y/o fracturas localizadas en el interior y en los alrededores de la zona de estudio. Este razonamiento se fundamenta en el concepto que señala la existencia de flujos locales, intermedios y regionales (Figura 35)(Tóht, 1963; Fetter, 2001; Wilson y Guan, 2004; Lazear, 2006), y que en su momento ha sido sugerido por Andrade (1992), Andrade (1997), Beltrán (1998a) y Beltrán (2001). En este trabajo, parte de ese volumen de recarga se considera durante la simulación mediante los puntos de recarga horizontales establecidos en los alrededores de la zona de estudio; sin embargo, con base en los resultados de la simulación, la magnitud de agua recargada no ha sido suficiente.

Hasta el momento, y mediante el desarrollo de este trabajo, se conoce un rango probable de las propiedades hidráulicas del Acuífero del Valle de Guadalupe, pero, también se sabe que se requiere de un esfuerzo mayor para definir puntualmente la distribución espacial de dichas propiedades en la zona de estudio. La generación de este tipo de información resultaría esencial para el desarrollo de modelos de flujo de agua subterránea más detallados y para verificar los patrones de las propiedades hidráulicas del acuífero que hoy en día ya se conocen.

Existen algunas razones para sugerir que el orden de magnitud de las diferencias, entre potenciales hidráulicos simulados y medidos, indica un ajuste aceptable. Una de ellas es que la altura base para el control de los niveles de agua, principalmente para los puntos de observación seleccionados para la calibración del periodo 2004-2005, en gran medida se ha obtenido a partir de la información sobre cartas topográficas del INEGI (escala 1:50,000). Lo anterior podría generar un error constante presente en todo sitio

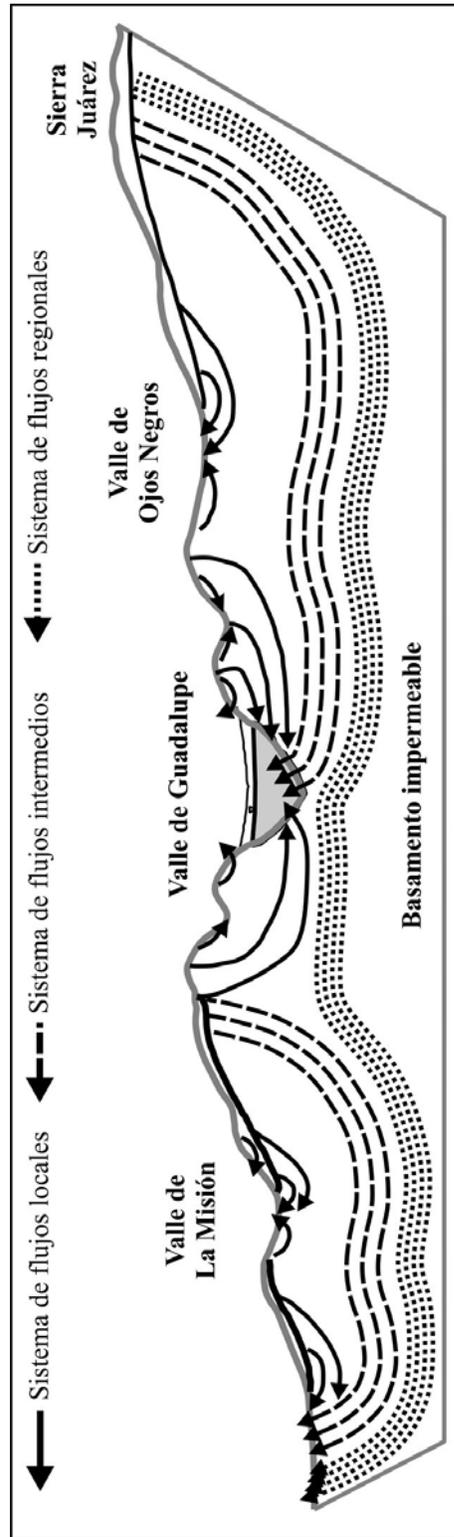


Figura 35. Diagrama esquemático que presenta los diferentes sistemas de flujos locales, intermedios y regionales (Modificada de Tóht (1963))

donde la elevación de la superficie del terreno de un pozo haya sido determinada con base en un mapa topográfico, tal como los pozos de observación seleccionados en esta tesis para la calibración del estado transitorio del periodo 2004-2005. Este error potencial se compone de la posibilidad de que la ubicación vertical del pozo, determinada con base en la información de la carta topográfica, pueda ser incorrecta y que no haya sido comprobado debido a la falta de control de campo. Las elevaciones de los niveles de agua en pozos, cuya altura de la superficie del terreno ha sido determinada de mapas topográficos, podrían acarrear un error en el orden de los 6 m (Kernodle *et al.*, 1995; Anderson y Woessner, 1992). Otra razón que define que la diferencia entre las configuraciones del potencial hidráulico obtenido sea aceptable es que muchos de los pozos, especialmente los establecidos en la Zona Calafia, usados en la comparación están diseñados y sirven como pozos productores y no como pozos de observación. De esto se podría generar un error puntual en el sitio de observación, por causa de la medición más bien de una elevación del nivel dinámico en el pozo, en vez del nivel estático; sin embargo, también podría acarrear parte de este error a un ámbito más general, toda vez que los datos hayan sido analizados mediante algún interpolador. La solución eventual a esta fuente de error podría ser la construcción y monitoreo de pozos de observación especialmente diseñados y establecidos en áreas de altos gradientes verticales.

Por otro lado, las mediciones en campo del nivel freático que son sometidos a calibración idealmente deberían coincidir con los centros de las celdas del modelo, pero en la práctica esta actividad rara vez es posible. Lo anterior, de acuerdo con Anderson y Woessner (1992), podría producir errores al momento de desarrollar la interpolación, los

cuales están causados por la estimación de niveles freáticos en el centro de la celda, y cuya magnitud podría llegar a ser mayor a los 3 m en los modelos regionales.

La recarga, descarga y los niveles de agua, generalmente, se consideran medidos o estimados correctamente. Sin embargo, errores en los valores de estas variables puede ser un problema grave porque afectan directamente a los valores de las propiedades del acuífero y/o parámetros del modelo determinados en el proceso de calibración. Por ejemplo, la recarga y la conductividad hidráulica empleada en el modelo están fuertemente conectadas, porque los valores de estas variables de entrada son las más sensibles del modelo. Esto significa que, en general, cuando la recarga o la conductividad varía durante la calibración, puede ser necesario una corrección en el segundo valor de entrada, para compensar por los cambios causados en la variación del valor de la primera entrada (Freckleton *et al.*, 1998; Freyberg, 1988).

Las diferencias observadas pueden atribuirse a limitantes prácticas del uso de modelos, tales como, la escala regional de análisis, la discretización espacial del área de estudio, y la calidad y/o cantidad de información observada que se asienta en los registros.

Los resultados de esta investigación son de gran trascendencia regional porque actualmente existe una apremiante necesidad por conocer la situación actual del recurso hidráulico y su disponibilidad a corto y mediano plazo (comunicación personal M.C. Walter Raúl Zúñiga Castillo, 2007, Jefe de Planeación Regional y Rural del Instituto Municipal de Investigación y Planeación de Ensenada, B.C.). Los planes de desarrollo hidráulico vigentes, y los que se generan actualmente (CNA, 2007), contemplan que la demanda regional de agua se incrementa anualmente y consecuentemente se requiere de

una descarga mayor del recurso hidráulico cada año; sin embargo, de acuerdo con la información analizada en esta tesis, la recarga de agua subterránea se ha visto afectada fuertemente por una reducción del volumen de agua precipitada ocasionada por un periodo de baja precipitación durante los últimos ocho años. Por lo tanto, con el objeto de estudiar cual será el comportamiento del Acuífero del Valle de Guadalupe ante el seguimiento de tales condiciones climáticas, se ha diseñado, desarrollado y analizado seis escenarios del manejo de agua subterránea, dentro de las cuales se incluye aquella alternativa que considera un aumento en la demanda de agua.

VI.2. Discusión de la evaluación de alternativas de manejo del agua subterránea

Los escenarios del manejo de agua subterránea ilustran algunas de las características más importantes del sistema hidrogeológico en la región del Acuífero del Valle de Guadalupe. El escurrimiento en las serranías y montañas adyacentes a este acuífero (por ejemplo, Sierra Juárez y Agua Blanca, entre otras) proporcionan una recarga abundante, de cierta manera, a la región semiárida. La recarga y el bombeo del agua subterránea, este último comprendiendo esencialmente toda la descarga, causan una fluctuación importante y continua en los niveles y el almacenamiento del agua, tal como se ilustra en los seis escenarios analizados.

Mediante los resultados de la alternativa 1, claramente, se indica que las elevaciones del nivel freático en la mayoría de las áreas que componen al Acuífero del Valle de Guadalupe se mantienen con elevaciones similares, y en el mejor de los casos se incrementan, a las experimentadas durante el periodo de muestreo 2004-2005 si continúan las condiciones climáticas y las operaciones del manejo del agua subterránea similares al promedio del periodo 1984-2007. En cambio, con la simulación de las alternativas 2 a 4 se deduce que diferentes suposiciones sobre el bombeo pueden resultar en un descenso progresivo y abrupto de las elevaciones del nivel freático. Durante la simulación de todas las alternativas se puede observar fluctuaciones anuales de las elevaciones del nivel freático.

Como se indica en los resultados de la alternativa 3, el Acuífero del Valle de Guadalupe podría suministrar hasta un incremento del 25% del volumen asumido durante la calibración para los pozos de CESPE (Apéndice E), siempre y cuando disminuya la

extracción por los pozos para uso agrícola establecidos en el valle y/o se incremente la recarga del acuífero mediante otras fuentes.

En la simulación de la alternativa 4 se ha buscado una política de extracción que permita un desarrollo sustentable de la región, fundamentado, básicamente, en la metodología propuesta por Kalf y Woolley (2005). La referida metodología considera que la definición del desarrollo sustentable debe basarse en los principios del flujo de agua subterránea (es decir, ley de la conservación de masa), debe permitir que los modelos numéricos (y los modeladores) proporcionen un bombeo óptimo (entre otros), de acuerdo con la ecuación del balance de agua y restringido por condicionantes tales como, necesidades de la comunidad, límites de uso y calidad del agua, requisitos ecológicos y/o efectos de subsidencia, pero sobre todo, debe permitir que el sistema de agua subterránea pueda alcanzar un nuevo estado de equilibrio conforme transcurre el tiempo. Puesto que en el análisis del escenario 5 se han reunido la mayor parte de los criterios mencionados previamente, en tal caso, se considera que es un escenario sustentable.

Frecuentemente, y a pesar de su aparente simplicidad, el diseño de un escenario del manejo de agua subterránea no es una tarea fácil de realizar. Lo anterior, puesto que se requiere hallar consistencia entre los conceptos del manejo del agua, la recarga, la descarga, los datos históricos y las proyecciones a futuro, así como con las representaciones numéricas de las mismas. La recompensa por el enorme esfuerzo invertido en el diseño y desarrollo de un escenario bien definido y numéricamente robusto es el conocimiento y entendimiento hidrogeológico de la zona de estudio, lo cual podría ser difícil de obtener mediante cualquier otro medio (Danskin *et al.*, 2006).

En la actualidad, el desarrollo y uso de modelos de flujo del agua subterránea grandes y complejos, tal como este modelo del Acuífero del Valle de Guadalupe, es una actividad muy común en todo el mundo y es una pieza importante para aumentar el conocimiento hidrogeológico de la zona de estudio (Kuniansky y Danskin, 2003).

Mediante el uso individual de un modelo del flujo de agua subterránea se pueden formular valiosos e instructivos escenarios de manejo del agua, similares a los que se han desarrollado en este trabajo de tesis. Comúnmente, los resultados generados por un modelo de flujo de agua subterránea cuando se analiza un escenario de manejo del agua subterránea, se analizan e interpretan con la finalidad de identificar tendencias generales del comportamiento del sistema. El beneficio obtenido de este análisis se traduce en un aumento del conocimiento sobre como se comportaría el sistema acuífero bajo el efecto de las diferentes estrategias de explotación.

VII. CONCLUSIONES

1. El diseño, construcción, prueba y calibración exitosa de un modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México, da como resultado un valor estimado del orden de magnitud de los parámetros involucrados en el flujo de agua subterránea. Puesto que se han fijado como objetivos enriquecer el conocimiento sobre la funcionabilidad de las variables involucradas en el flujo de agua subterránea, y la evolución histórica, actual y a futuro del nivel freático en la zona de estudio.
2. Mediante la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe se logra un ajuste razonable entre las configuraciones del nivel freático observada y calculada:
 - a) En términos generales, se presenta un comportamiento regional de la superficie freática calculada acorde con la observada, es decir, el flujo y el gradiente hidráulico observado en campo es similar al obtenido del simulador numérico, cuya dirección es principalmente del noreste hacia el suroeste, modificado solamente por la forma irregular de las fronteras del acuífero. Específicamente, en la porción noreste de la Zona Calafia, las curvas de igual elevación del nivel freático indican un flujo y un gradiente dirigido al oeste casi uniformemente. Hacia la parte central de la zona de estudio, es claro el efecto del estrechamiento de las fronteras del acuífero, reflejándose con un incremento del gradiente hidráulico, el cual ya tiene una dirección prácticamente noreste-suroeste. A partir de aquí, el flujo de

agua continúa al suroeste de la Zona El Porvenir hasta llegar a la salida del acuífero, donde la anchura y profundidad de los materiales permeables se reducen de nuevo.

- b) Las elevaciones del nivel freático medidas en campo y calculadas por el modelo numérico son muy similares y presentan diferentes respuestas a lo largo del tiempo de análisis. Algunos niveles del agua muestran un cambio relativamente pequeño, pero otros manifiestan abatimientos significativos. Particularmente, las áreas con mejor ajuste son las porciones central y noroeste de la Zona El Porvenir, así como el noroeste de la Zona Calafia, cuyo desajuste presentado está en el intervalo de 0 ± 5 m. No obstante, también se aprecia la existencia de áreas con un desajuste mayor a ± 5 m, por ejemplo, las partes centrales y los alrededores del poblado Francisco Zarco y la Cañada del Trigo. Del análisis cuantitativo de las elevaciones mencionadas, se estima un valor promedio de la relación *RMSE* de 7.1 m para un promedio de 28 pozos.
3. Con la aplicación del modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe a la simulación de diferentes escenarios de manejo del agua subterránea, durante el periodo 2007-2025, se predice el comportamiento del nivel freático y se obtiene un valor estimado del orden de magnitud de los parámetros involucrados en este manejo.
- a) Si se mantiene las condiciones hidrogeológicas y de operación promedio, considerando una recarga de ~ 29.0 Mm³/año y una descarga de ~ 25.0 Mm³/año (alternativa 1), da como resultado que las elevaciones simuladas

para la mayoría de las áreas del modelo tienden a aplanarse y a estabilizarse en una elevación similar a la que se tenía al inicio de este escenario. En tal caso, el acuífero se mantendría en equilibrio y se crearía el menor número de problemas nuevos.

- b) En la alternativa 2 se simula una continuidad de las operaciones de manejo del agua subterránea, pero, además se considera una precipitación menor a la precipitación actual. Cuando la recarga es de $\sim 18.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ y la extracción es igual al promedio actual, se generaría un abatimiento intenso y continuo de las elevaciones calculadas, reflejándose el claro efecto de una recarga disminuida y una descarga mantenida constante. Si se aplica este escenario, se presentaría el problema de un pozo sin columna de agua a partir de Agosto de 2017.
- c) Tras evaluar la capacidad del acuífero para satisfacer un incremento en la demanda de agua suministrada a la ciudad de Ensenada (alternativa 3), mediante el empleo de algunos de los pozos existentes y considerando una reducción de la precipitación actual, se obtiene la disminución generalizada de las elevaciones calculadas para la mayor parte de la zona de estudio, las cuales podrían llegar a estar por debajo de la mínima histórica. Aún así, se infiere que un 25% de aumento en la demanda futura de agua para la ciudad de Ensenada, acumulando $\sim 11.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$, se puede mantener con el uso del agua subterránea del acuífero, siempre y cuando prevalezcan las condiciones climáticas con una precipitación media anual de $\sim 300 \text{ mm/año}$ y que el volumen de explotación desarrollado por los

usuarios establecidos en el valle disminuya al 35% del promedio anual estimado. El volumen total de explotación sería de $\sim 18.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (es decir, 125% del volumen asumido para los pozos de CESPE + 35% del volumen estimado para los Agricultores).

- d) Un escenario que considere una precipitación menor a la precipitación actual y una demanda de agua de $\sim 16.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$ (55% del volumen estimado para los Agricultores y 55% del volumen asumido para los pozos de CESPE) es factible de desarrollar (alternativa 4). En consecuencia se apreciaría el abatimiento del nivel freático prácticamente en toda el área del acuífero; no obstante, la magnitud de dicho abatimiento es menor a cualquier otro ocurrido mediante la implementación de las demás alternativas. Este volumen de bombeo se considera sustentable, porque permite que el sistema de agua subterránea alcance un nuevo estado de equilibrio conforme pasa el tiempo.

Los mejores resultados de la simulación se reproducen al considerar una precipitación media anual de $\sim 350 \text{ mm/año}$ y una recarga acumulada semejante al 10% del agua precipitada en la zona acuífera más $\sim 5\%$ de la precipitación ocurrida en el resto de la Cuenca Guadalupe (esta última representa la principal fuente de recarga del acuífero). Se evidencia una pérdida continua del volumen de almacenamiento durante la mayor parte del periodo de ~ 20 años analizado y se estima un volumen de extracción de $\sim 25.0 \text{ Mm}^3/\text{año}$, de los cuales $\sim 16.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ corresponden a pozos de usuarios registrados en COTAS y $\sim 8.5 \text{ Mm}^3/\text{año}$ a pozos de CESPE. Al mes se extraen en promedio $\sim 2.5 \text{ Mm}^3$ de agua del acuífero, deduciéndose que se ha tomado un 65% (del

volumen previamente indicado) del almacenamiento para satisfacer las demandas del recurso hidráulico por el propio valle y la ciudad de Ensenada.

Dado que, en el Acuífero del Valle de Guadalupe, la elevación del nivel freático en algunos pozos tiene un cambio más pronunciado que en otros, posiblemente, esta discrepancia se deba a una heterogeneidad en las propiedades hidráulicas del acuífero con escala local, la cual no se ha podido capturar con una rejilla de análisis de medio kilómetro, o a la variación en el volumen de bombeo que afecta al acuífero.

A partir de 2004, se aprecia un cono de abatimiento del nivel freático en la Zona Calafia, lo cual ha generado cambios en la dirección del sistema natural de flujo de agua y sugiere un excesivo bombeo de agua subterránea en dicha área.

Cuando los tiempos de escasa precipitación son prolongados, es inminente una disminución del nivel de agua subterránea y, por ende, una reducción del almacenamiento y de la capacidad de extracción de los pozos productores; en ciertas ocasiones, los niveles de agua pueden llegar a ubicarse hasta por debajo de la profundidad a la que se alimenta dicho pozo. Aún conociendo estos argumentos, en la simulación de flujo y escenarios de manejo del agua subterránea no se contemplan, ya que, se asume que los pozos operan a columna de agua completa. No obstante, considerando la situación señalada y con base en los resultados de los escenarios, se puede inferir que los pozos podrían dejar de bombear agua antes del tiempo previsto en las alternativas de manejo.

VII.1. Recomendaciones

Una estrategia para inducir el aumento del volumen de almacenamiento del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe es la construcción de presas superficiales y/o subterráneas, fijas y/o temporales, ya que, se reduciría la velocidad del flujo de agua en el arroyo y, aparentemente, aumentaría la infiltración. Este razonamiento coincide con las acciones tomadas en el distrito de riego del Condado de Orange, California, donde por muchos años se ha utilizado exitosamente esta técnica en el Río Santa Ana (OCWD, 2008), y que actualmente, también se sugiere como una opción para incrementar la reserva de agua y asegurar el suministro del vital líquido en la región (CNA, 2007). El empleo del modelo de flujo de agua subterránea puede ser útil para estimar la recarga esperada en el sitio donde se hacen las modificaciones en el arroyo, debido a la construcción y/o instalación de presas, y para investigar la posible ubicación de estas presas.

Este estudio representa el primer esfuerzo invertido en la simulación de flujo y escenarios de manejo del agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe, no obstante, esta tarea podría mejorarse con información refinada suplementaria y calibración posterior que ayude al logro de estimaciones más precisas. Por lo tanto, se necesita y debe considerarse el desarrollo de estudios hidrogeológicos adicionales o proyectos de investigación a futuro con modelos a pequeña escala, de preferencia en las áreas donde los datos son dispersos o escasos, con el propósito de aumentar y verificar el conocimiento sobre las propiedades del acuífero y su variabilidad espacial y temporal. En tal caso, el modelo desarrollado en esta investigación puede utilizarse para probar la importancia de generar, analizar e incluir esta nueva información.

VIII. BIBLIOGRAFÍA

- American Water Works Association (AWWA). 2007. Water Resources Planning. Manual of water supply practices. M50. Segunda edición. 392 pp.
- Anderholm SK. 2000. Mountain-front recharge along the eastern side of the Middle Rio Grande Basin, central New Mexico. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigation Report 00-4010. 36 p.
- Anderson MP y WW Woessner. 1992. Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. 381 pp.
- Andrade M. 1997. Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California (Agosto de 1997). Grupo Agroindustrial del Valle de Guadalupe, Ensenada, Baja California. 60 pp.
- Andrade M. 1992. Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Publicas de Ensenada (SAHOPE) y CESPE. Ensenada, Baja California. 69 pp.
- Bear J. 1978. Hydraulic of groundwater. McGraw-Hill. New York. 124. 567 pp.
- Bear J y A Verruijt. 1987. Modeling Groundwater Flow and Pollution. D Reidel Publishing Company. Dordrecht, Holland. 427 pp.
- Beltrán L. 2001. Balance Geohidrológico del acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, B.C. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional en la Península de Baja California. Subgerencia Regional Técnica. 19 pp.
- Beltrán L. 1998a. Actualización Hidrogeológica del acuífero del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Ensenada, México. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Subgerencia Técnica Regional. 24 pp.
- Beltrán L. 1998b. Balance de los recursos hidráulicos subterráneos, Acuífero BC-07, Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Ensenada, México. Comisión Nacional del Agua. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Subgerencia Técnica Regional. Aguas subterráneas. 17 pp.
- Bergfeld LG. 2005. Investigative study of conjunctive use opportunities in the Stony Creek Fan Aquifer. University of California, Davis. Tesis de Maestría. 116 pp.

- Boyle DP, HV Gupta y S Sorooshian. 2000. Toward improved calibration of hydrologic models. Combining the strengths of manual and automatic methods. *Water Resources Research* 36(12): 3663-3674 p.
- Campos-Gaytán JR. 2002. Actualización del modelo geohidrológico del acuífero del Valle de Ojos Negros, Baja California. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 151 pp.
- Campos-Gaytán JR y T Kretzschmar. 2006. Numerical understanding of regional scale water table behavior in the Guadalupe Valley aquifer, Baja California, Mexico. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 3(3): 707-730 p.
- Chowdhury AH, S Wade, RE Mace y C Ridgeway. 2004. Groundwater Availability Model of the Central Gulf Coast Aquifer System: Numerical Simulations through 1999. Model Report. Groundwater Availability Modeling Section. Texas Water Development Board. 108 pp.
- Comisión Nacional del Agua (CNA). 1990. Estudio de actividades piezometría en el Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Jefatura de proyecto de aguas subterráneas. 34 pp.
- CNA. 1998. Censo de aprovechamientos para extracción de aguas subterráneas. Acuífero BC-07 Valle de Guadalupe, B.C. Gerencia Regional de la Península de Baja California. Subgerencia Regional Técnica. Reporte técnico. 8 pp.
- CNA. 2003. Nivelación de brocales de la red de monitoreo piezométrico del Acuífero 0207 del Valle de Guadalupe, Ensenada, B.C. Geomática Integral y Servicios De Baja California S. C. Contrato No. SGT-GRPBC-BC-03-008-CE-I3. 107 pp y 1 plano.
- CNA. 2007. Manejo integrado de las aguas subterráneas en los acuíferos Guadalupe, Ensenada, La Misión y Maneadero, Estado de Baja California. Subdirección General Técnica. Organismo de Cuenca Península de Baja California. Dirección Técnica. Términos de referencia. Convenio No. SGT-OCPBC-BC-07-GAS-000-RF-CONV. 44 pp.
- Danskin WR, KR McPherson y LR Woolfenden. 2006. Hydrology, description of computer models, and evaluation of selected water-management alternatives in the San Bernardino Area, California. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Open-File Report 2005-1278. 178 pp y 2 planos.

- Desimone LA, Walter DA, Eggleston JR y Nimiroski MT. 2002. Simulation of Ground-Water Flow and Evaluation of Water-Management Alternatives in the Upper Charles River Basin, Eastern Massachusetts. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 02-4234. 94 pp.
- Domenico PA y FW Schwartz. 1998. Physical and chemical hydrogeology. John Wiley, New York. 506 pp.
- Ercan S. 1999. Sustainable Management of Water Resources in the Ojos Negros Valley, Baja California. San Diego State University. Civil and Environmental Engineering Department. Tesis de Maestría. 166 pp.
- Escolero-Fuentes OA y Hernández-Rosas MT. 1992. Manejo conjunto en el Valle de Guadalupe, B.C., como una estrategia apropiada para el uso eficiente del agua en zonas áridas. Comisión Internacional de riesgo y drenaje. Tercera Conferencia Panamericana de Riesgo y Drenaje: Modernización de los distritos de riego. Mazatlán, Sinaloa. Noviembre de 1992. 12 pp.
- Feth JH, DA Barker, LG Moore, RJ Brown y CE Veirs. 1966. Lake Bonneville: geology and hydrology of the Weber Delta District, including Ogden, Utah. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U. S. Geological Survey Professional Paper 518. 76 pp.
- Fetter CW. 2001. Applied hydrogeology. Fourth Edition. Prentice Hall, Inc. 598 pp.
- Fetter CW. 1994. Applied hydrogeology. Third Edition. Macmillan College Publishing Company, Inc. 691 pp.
- Flint AL, LE Flint, J Blainey y JA Hevesi. 2002. Determining regional ground-water recharge in the Great Basin. Geological Society of America. Rocky Mountain Section. 54th annual Meeting. Abstracts with Programs 34(4): 56-56 p.
- Flint AL, LE Flint, EM Kwicklis, GS Bodvarsson y JM Fabryka-Martin. 2001. Hydrology of Yucca Mountain, Nevada. Berkeley Lab Report LBNL-46570. Reviews of Geophysics 39(4): 447-470 p.
- Foster SSD y A Smith-Carrington. 1980. The interpretation of tritium in the Chalk unsaturated zone. Journal of Hydrology 46(3-4): 343-364 p.
- Freckleton JR, P Martin y T Nishikawa. 1998. Geohydrology of Storage Unit III and a Combined Flow Model of the Santa Barbara and Foothill Ground-Water Basins, Santa Barbara County, California. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report 97-4121. 80 pp.
- Freeze RA y JA Cherry. 1979. Groundwater. Prentice Hall. 604 pp.

- Freyberg DL. 1988. An exercise in Ground-Water model Calibration and Prediction, *Groundwater* 26(3): 350-360 p.
- García E. 1981. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F. 244 pp.
- Hely AG, RW Mower y CA Harr. 1971. Water resources of Salt Lake County, Utah, Utah Department of Natural Resources. Technical Publication No. 31. 244pp.
- Hearne GA y JD Dewey. 1988. Hydrological analysis of the Rio Grande Basin north of Embudo, New Mexico, Colorado and New Mexico. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 86-4113. 244 pp.
- Hernández-Rosas MT y R Mejía-Vázquez. 2003. Relación de aguas superficiales y subterráneas del acuífero BC-07, Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. XII Congreso Nacional de Hidráulica. Comisión Nacional del Agua. Gerencia de Aguas Subterráneas. Subgerencia Regional Técnica. Jefatura de Aguas Subterráneas. Ensenada, Baja California. Marzo de 2003. 13 pp.
- Hibbs BJ y BK Darling. 1995. Environmental isotopes and numerical models for understanding aquifer dynamics in southwestern basins. **Editada por:** Cleveland TG. **En:** Advances in the Development and Use of Models in Water Resources. Houston, Texas. 195-201 p.
- Huntley D. 1979. Groundwater recharge to the aquifers of northern San Luis Valley, Colorado. *Geological Society of America Bulletin*, Part II, 90(8), 1196-1281.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI). 1976. Carta geológica Francisco Zarco (I11D82).
- INEGI y Gobierno del Estado de Baja California. 1995. Estudio hidrológico del Estado de Baja California. Aguascalientes, Ags. 180 pp.
- Izbicki JA, J Radyk y RL Michel. 2000. Water movement through a thick unsaturated zone underlying an intermittent stream in the Western Mojave Desert, Southern California, USA. *Journal of Hydrology* 238(3-4): 194-217 p.
- Kalf FRP y DR Woolley. 2005. Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeology Journal* 13(1): 295-312 p.

- Kernodle JM, DP McAda y CR Thorn. 1995. Simulation of ground-water flow in the Albuquerque Basin, Central New Mexico, 1901-1994, with projections to 2020. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 94-4251. 114 pp.
- Konikow LF, DJ Goode y GZ Hornberger. 1996. A Three-Dimensional Method-of-Characteristics Solute-Transport Model (MOC3D). U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. Water Resources Investigations Report 96-4267. 87 pp.
- Konikow LF. 1978. Calibration of ground-water models. **En:** Verification of Mathematical and Physical Models in Hydraulic Engineering. American Society of Civil Engineers. New York. 87-93 p.
- Krásný J. 2003. Distribución espacial de los parámetros hidráulicos en diversos medios hidrogeológicos. Boletín Geológico y Minero 114 (2): 171-182 p.
- Kresic N. 1997. Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling. CRC Press, Lewis Publishers. 461 pp.
- Kuniansky EL y WR Danskin. 2003. Models gone bad—common modeling problems and how to solve them. **Editada por:** Poeter, Zheng, Hill y Doherty. **En:** MODFLOW and More 2003: Understanding through Modeling. Conference Proceedings. Colorado School of Mines, Golden, Colorado. 356–360 p.
- Kurczyn-Robledo JA, T Kretzschmar y A Hinojosa-Corona. 2007. Evaluación del escurrimiento superficial en el noreste del Valle de Guadalupe, B.C., México, usando el método de curvas numeradas y datos de satélite. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas 24(1): 1-14 p.
- Lazear GD. 2006. Evidence for deep groundwater flow and convective heat transport in mountainous terrain, Delta County, Colorado, USA. Hydrogeology Journal 14(8): 1582–1598 p.
- Marsily G. 1986. Quantitative Hydrogeology: Groundwater Hydrology for Engineers. Academic Press, Inc. San Diego, California. 440 pp.
- McDonald MG y AW Harbaugh. 1988. A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Techniques of Water Resources Investigations, Book 6. 586 pp.

- Maurer DK y DL Berger. 1997. Subsurface flow and water yield from watersheds tributary to Eagle Valley Hydrographic Area, West-Central, Nevada. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 97-4191. 56 pp.
- Maurer DK, DE Prudic, DL Berger y CE Thodal. 1999. Sources of water flowing into basin-fill aquifers underlying Carson City, Nevada. Geological Society of America. 1999 Annual Meeting. Abstracts with Programs 31(7): 87-87 p.
- Orange County Water District (OCWD). 2008. Groundwater recharge operations. <http://www.ocwd.com/Groundwater-Recharge/ca-34.aspx>. 2 pp. Enero de 2008.
- Phillips FM. 1994. Environmental tracers for water movement in desert soils of the American Southwest. Soil Science Society of America Journal 58(1): 15-24 p.
- Ponce VM, RP Pandey y S Kumar. 1999. Groundwater recharge by channel infiltration in El Barbon Basin, Baja California, Mexico. Journal of Hydrology 214(1-4): 1-7 p.
- Reilly TE, y AW Harbaugh. 2004. Guidelines for evaluating ground-water flow models. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Scientific Investigations Report 2004-5038. 30 pp.
- Ruiz JA, G Díaz, S Guzmán, G Medina y M Silva. 2006. Estadísticas climatológicas básicas del Estado de Baja California (Período 1961-2003). Libro Técnico Núm. 1. INIFAP-CIRNO. Ciudad Obregón, Sonora, México. 165 pp.
- Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH). 1982. Dictamen geohidrológico del Valle de Guadalupe. 20 pp.
- SARH. 1977. Informe final del estudio geohidrológico del Valle de Guadalupe, Estado de Baja California Norte. I-1 – VII-6 p.
- SARH. 1967. Inventario de aprovechamientos superficiales y subterráneos para riego. Baja California Norte. Tomo único. Jefatura de irrigación y control de ríos. Dirección de pequeña irrigación. 173 pp.
- Sanford WE, LN Plummer, DP McAda, LM Bexfield y SK Anderholm. 2000. Estimation of hydrologic parameters for the ground-water model of the Middle Rio Grande Basin using carbon-14 and water-level data. **Editada por:** Cole JC. **En:** U.S. Geological Survey Middle Rio Grande Basin Study -- Proceedings of the Fourth Annual Workshop, Albuquerque, New Mexico. U.S. Geological Survey Open-file Report 00-488. 15-16 de Febrero de 2004. 4-6 p.

- Scanlon BR, RW Healy y PG Cook. 2002. Choosing appropriate techniques for quantifying groundwater recharge. *Hydrogeology Journal* 10(1): 18–39 p.
- Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT). 2001. Diario Oficial. Acuerdo por el que se establece y da a conocer al público en general la denominación única de los acuíferos reconocidos en el territorio de los Estados Unidos Mexicanos, por la Comisión Nacional del Agua, y la homologación de los nombres de los acuíferos que fueron utilizados para la emisión de los títulos de concesión, asignación o permisos otorgados por este órgano desconcentrado. Miércoles 5 de diciembre de 2001 (Segunda Sección). 18 pp. Enero de 2008.
- Smith L y SJ Wheatcraft. 1993. Groundwater Flow. **Editado por:** Maidment DR. **En:** Handbook of Hydrology. McGraw-Hill, New York. 6.1-6.58 p.
- Thomas JM, SM Carlton y LB Hines. 1989. Groundwater hydrology and simulated effects of development in Smith Creek valley, a hydrologically closed basin in Lander County, Nevada. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Profession Paper 1409-E. E1-E57 p.
- Tiedeman CR, JM Kernodle y DP McAda. 1998. Application of nonlinear-regression methods to a ground-water flow model of the Albuquerque Basin, New Mexico. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Water Resources Investigation Report 98-4172. 90 pp.
- Tinajero González JA. 1985. Apuntes de aspectos fundamentales en el estudio del agua subterránea (Geohidrología). Universidad Autónoma de México, Facultad de Ingeniería, División de Ingeniería Civil, Topográfica y Geodesia, Departamento de Ingeniería Hidráulica. FI/DICTG/87-063. 233 pp.
- Toth J. 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *Journal of Geophysical Research* 68(16): 4795-4812 p.
- Trescott PC, GF Pinder y SP Larson. 1976. Finite-Difference Model for Aquifer Simulation in Two Dimensions with Results of Numerical Experiments. Techniques of Water-Resources Investigations of the United States Geological Survey. United States Government Printing Office, Washington. 7. C1: 2-3. 116 pp.
- Trescott PC y SP Larson. 1977. Comparison of Iterative Methods of Solving Two Dimensional Groundwater Flow Equations. *Water Resources Research* 13(1):125-136 p.

- Vázquez R. 2003. Uso de métodos geofísicos en la identificación de acuíferos. **En:** Memorias del Taller informativo sobre el proyecto Diagnóstico geohidrológico para un manejo sustentable del Valle de Guadalupe, Ensenada, México. Departamento de Geología. CICESE. 14 de Marzo de 2003. 11 pp.
- Vázquez González R. 2002. Estimación cuasi-analítica de parámetros geohidrológicos. CICESE. Tesis de doctorado. 152 pp.
- Vázquez R, C Traslosheros, M Vega, R Vega y JM Espinoza. 1991. Evaluación Geohidrológica en el Noroeste de Baja California. Grupo de Geohidrología. División Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada, B.C. Informe Técnico. Proyecto CONACYT (Clave: P220CCOR-892531). 49 pp.
- Villanueva M y A Iglesias. 1984. Pozos y acuíferos; Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España. Talleres Gráficos IBERGESA. Madrid. 426 pp.
- Visual MODFLOW Pro v.4.0. 2004. Manual de usuario. Waterloo Hydrogeologic, Inc. 567 pp.
- Younger PL. 2007. Groundwater in the environment: An introduction. Blackwell Publishing. 318 pp.
- Vries JJ e I Simmers. 2002. Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. Hydrogeology Journal 10(1): 5–17 p.
- Walvoord MA, MA Plummer, FM Phillips y AV Wolfsberg. 2002. Deep arid system hydrodynamics 1. Equilibrium states and response times in thick desert vadose zones. Water Resources Research 38(12): 1291-1302 p.
- Waltemeyer SD. 1994. Methods for estimating streamflow at mountain fronts in Southern New Mexico. U.S. Department of the Interior y U.S. Geological Survey. U.S. Geological Survey Water Resources Investigations Report 93-4213. 17 pp.
- Wang HF y MP Anderson. 1982. Introduction to Groundwater Modeling. Finite Difference and Finite Element Methods. WH Freeman and Company. San Francisco, CA. 237 pp.
- Wilson JL y H Guan. 2004. Mountain-Block Hydrology and Mountain-Front Recharge. **Editada por:** Phillips FM, J Hogan y B Scanlon. **Preimpresión del artículo a publicar en:** Groundwater Recharge in A Desert Environment: The Southwestern United States. American Geophysical Union (AGU). Washington, DC. 23 pp.

APÉNDICE A

En este apéndice se presentan las ecuaciones de balance para cada una de las fechas que integran los casos estacionario y transitorio.

Explicación:

Los valores estimados de la recarga, descarga y cambio del almacenamiento se encuentran expresados en metros cúbicos (m^3) por mes en cada una de las ecuaciones de balance que se muestran en las Tablas A1-A12 y Figuras A1-A12.

Tabla A1. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado estacionario, Febrero de 1984

		--- E S T A C I O N A R I O ---	
		Febrero 1984	
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	333,500	13
RECARGA HORIZONTAL ESTACIONARIO ACUMULADA (RH)=		2'225,000	87
*****	RECARGA TOTAL =	2'559,000	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	729,700	28
Agua superficial	(Asup)=	1'196,000	47
Evapotranspiración	(Evpt)=	632,400	25
Suma Descargas	(Qp)=	0	0
*****	DESCARGA TOTAL =	2'559,000	100
Cambio del almacenamiento		(DS)=	0

Ecuación de Balance (Estado ESTACIONARIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = 0.00

$$Eh + RI + RH - Sh - Asup - Evpt = 0.00$$

$$-729,744.97 = 729,736.90$$

$$-8.07 [m^3/mes]$$

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

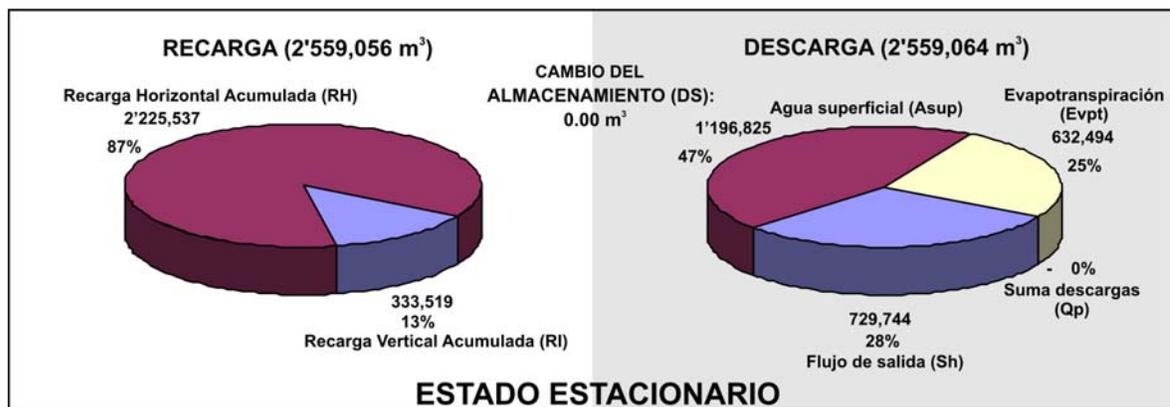


Figura A1. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado estacionario, Febrero de 1984

Tabla A2. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Mayo de 1985

--- T R A N S I T O R I O ---			
Mayo de 1985			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	26,749	4
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	571,365	96
***** RECARGA TOTAL =		598,114	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	915,909	20
Agua superficial	(Asup)=	8,700	0
Evapotranspiración	(Evpt)=	148,515	3
Suma Descargas	(Qp)=	3'523,277	77
***** DESCARGA TOTAL =		4'596,401	100
Cambio del almacenamiento		(DS)=	3'998,282 PERDIDA
Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)			
R E C A R G A - D E S C A R G A = D S			
Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)			
-915,909.46 = 915,905.48			
-3.98 [m ³ /mes]			
PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE =			0.00 [%] ACEPTABLE

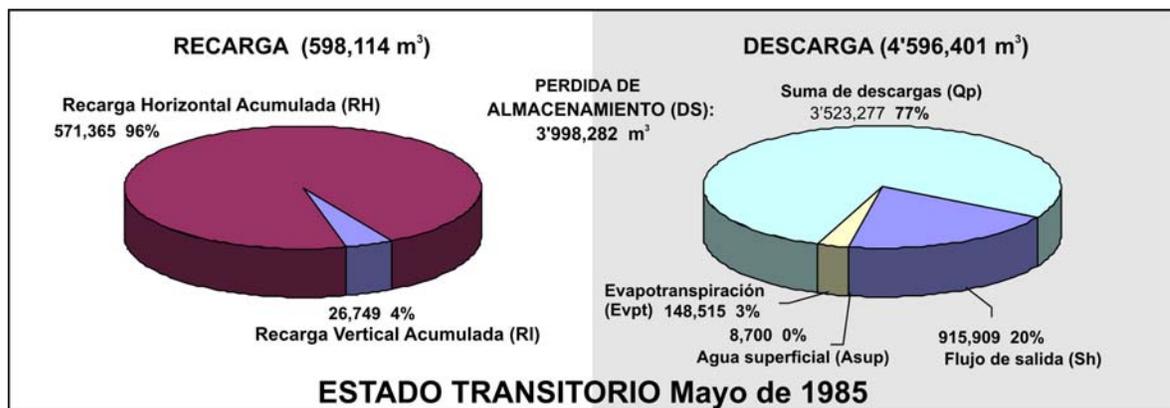


Figura A2. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Mayo de 1985

Tabla A3. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Junio de 1988

--- T R A N S I T O R I O ---			
Junio de 1988			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	24,224	9
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	254,850	91
***** RECARGA TOTAL =		279,074	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	923,144	24
Agua superficial	(Asup)=	1,551	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	16,800	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'912,851	77
***** DESCARGA TOTAL =		3'854,346	100
Cambio del almacenamiento (DS)=		3'575,269	PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -923,144.26 = 923,140.45
 -3.81 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

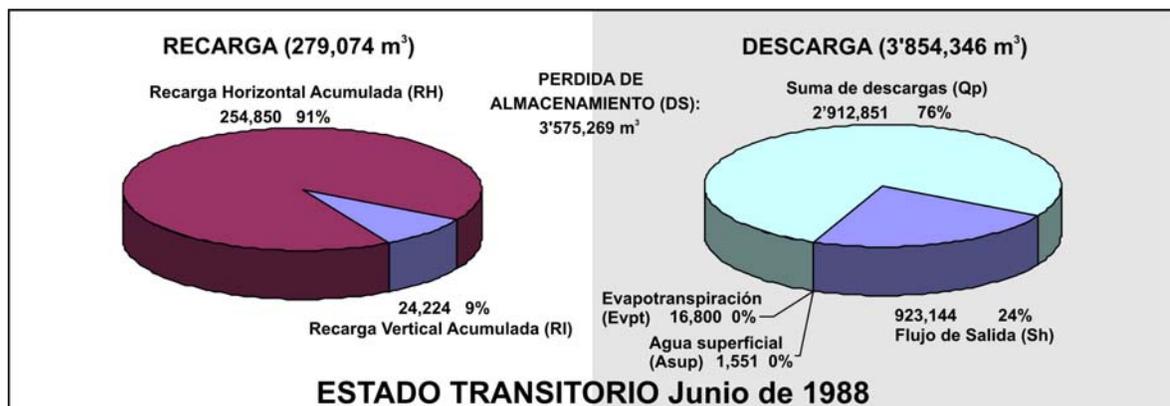


Figura A3. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Junio de 1988

Tabla A4. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 1990

--- T R A N S I T O R I O ---			
Abril de 1990			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	88,329	11
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	748,617	89
***** RECARGA TOTAL =		836,945	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	801,768	24
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	2,784	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'529,283	76
***** DESCARGA TOTAL =		3'333,835	100
Cambio del almacenamiento (DS)=		2'496,886	PERDIDA
Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)			
RECARGA -	DESCARGA	=	DS
Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)			
-801,767.99 = 801,763.95			
-4.04 [m ³ /mes]			
PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE =		0.00 [%]	ACEPTABLE

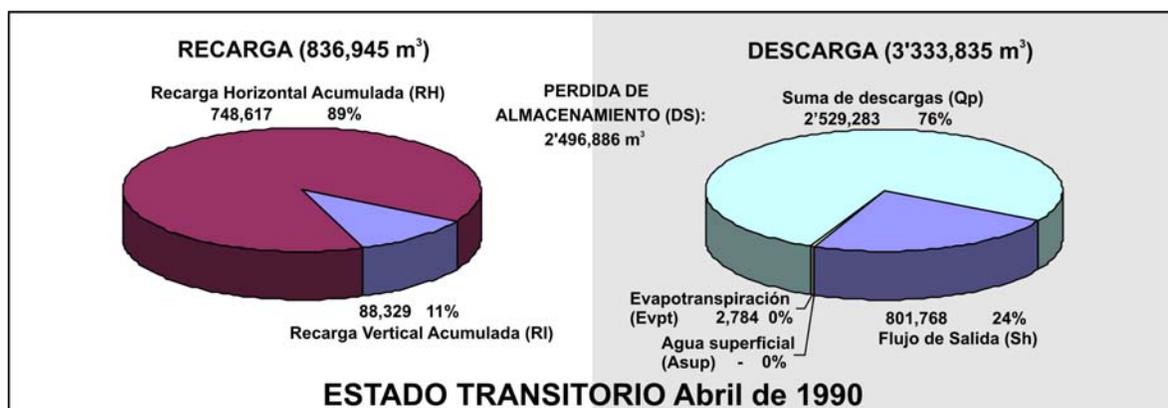


Figura A4. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 1990. Los valores estimados de la recarga, descarga y cambio del almacenamiento están expresados en metros cúbicos (m³) por mes.

Tabla A5. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Mayo de 1998

--- T R A N S I T O R I O ---			
Mayo de 1998			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	79,840	5
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	1'618,556	95
*****	RECARGA TOTAL =	1'698,395	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	708,7823	20
Agua superficial	(Asup)=	5,845	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	7,893	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'875,541	83
*****	DESCARGA TOTAL =	3'598,062	100

Cambio del almacenamiento (DS)= 1'899,663
PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -708,782.65 = 708,779.03
 -3.62 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

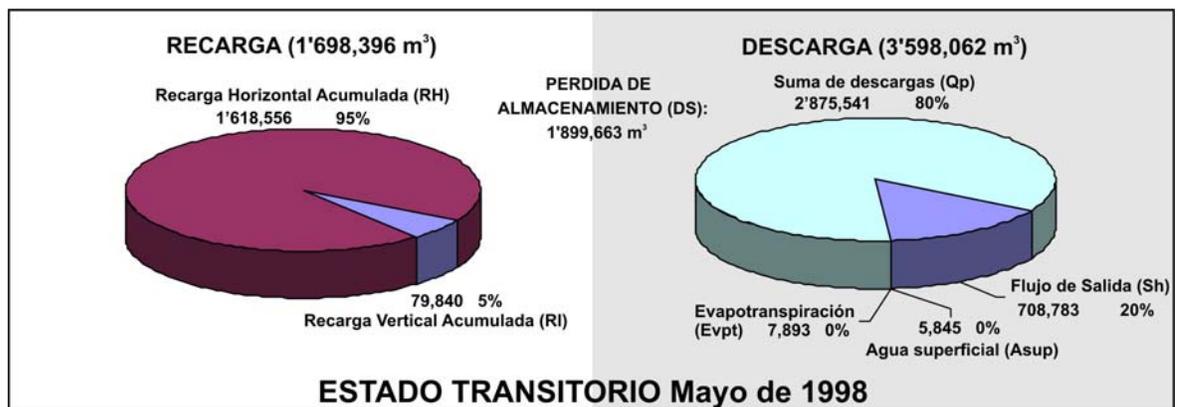


Figura A5. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Mayo de 1998

Tabla A6. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Septiembre de 2001

--- T R A N S I T O R I O ---			
Septiembre de 2001			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	60,464	10
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	546,882	90
***** RECARGA TOTAL =		607,346	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	587,935	16
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	3'108,559	84
***** DESCARGA TOTAL =		3'696,495	100

Cambio del almacenamiento (DS)= 3'089,145
PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -587,935.43 = 587,931.94
 -3.49 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

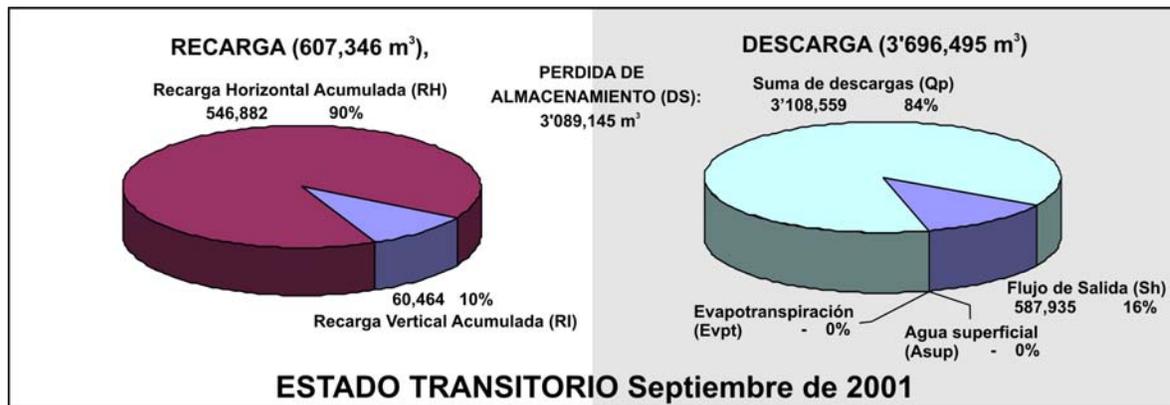


Figura A6. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Septiembre de 2001

Tabla A7. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Marzo de 2003

--- T R A N S I T O R I O ---			
Marzo de 2003			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	334,351	4
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	8'221,387	96
*****	RECARGA TOTAL =	8'555,737	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	613,360	39
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	950,584	61
*****	DESCARGA TOTAL =	1'563,944	100
Cambio del almacenamiento (DS)=		6'991,793	GANANCIA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -613,360.00 = 613,359.63
 -0.37 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = **0.00 [%]**
ACEPTABLE

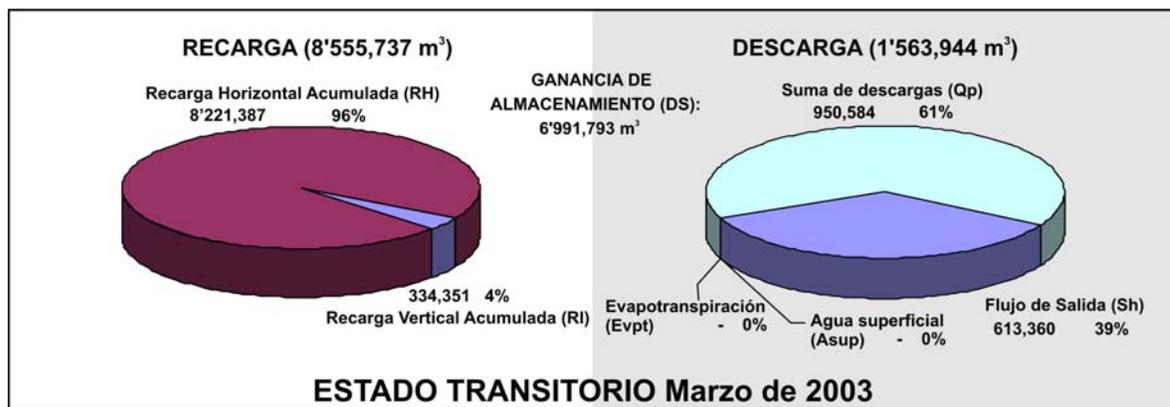


Figura A7. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Marzo de 2003

Tabla A8. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Febrero de 2004

--- T R A N S I T O R I O ---			
Febrero de 2004			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	194,019	8
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	2'272,430	92
***** RECARGA TOTAL =		2'466,449	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	533,715	40
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	803,278	60
***** DESCARGA TOTAL =		1'336,993	100

Cambio del almacenamiento (DS)= 1'129,457
GANANCIA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -533,714.51 = 533,714.18
 -0.33 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

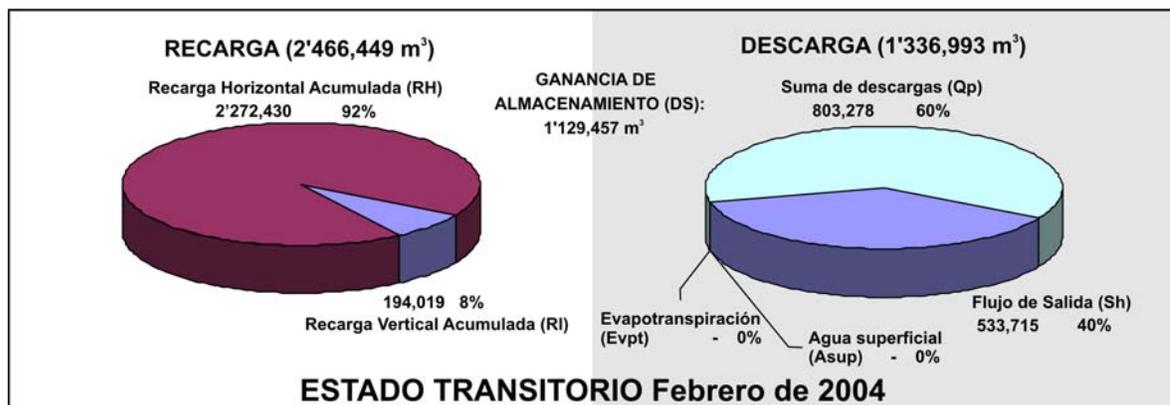


Figura A8. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Febrero de 2004

Tabla A9. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 2004

--- T R A N S I T O R I O ---			
Abril de 2004			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	67,907	5
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	1'273,434	95
***** RECARGA TOTAL =		1'341,340	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	524,418	16
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'852,256	85
***** DESCARGA TOTAL =		3'376,674	100
Cambio del almacenamiento (DS)=		2'035,330	PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -524,417.93 = 524,414.20
 -3.73 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = **0.00 [%]**
ACEPTABLE

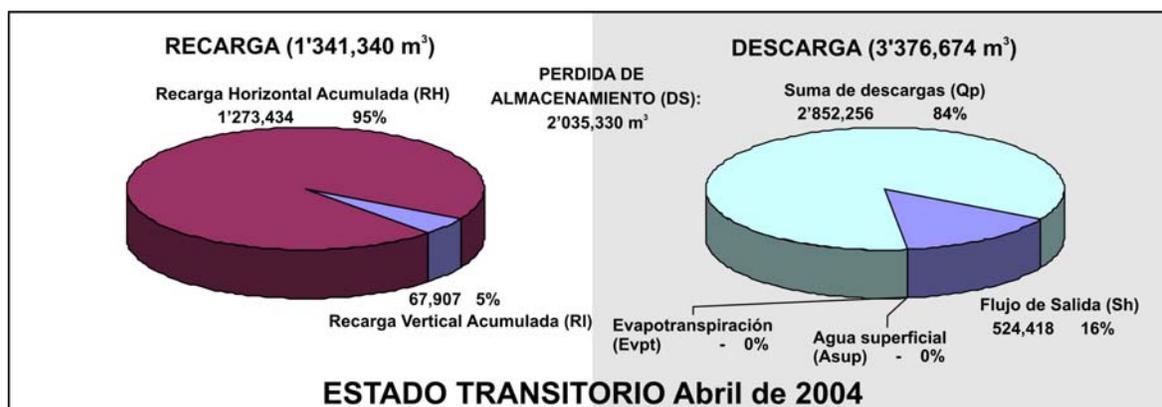


Figura A9. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 2004

Tabla A10. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Junio de 2004

--- T R A N S I T O R I O ---			
Junio de 2004			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	9,701	7
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	139,420	97
*****	RECARGA TOTAL =	149,121	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	483,247	14
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'881,835	86
*****	DESCARGA TOTAL =	3'365,082	100

Cambio del almacenamiento (DS)= 3'215,957
PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -483,247.01 = 483,247.20
 -3.81 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

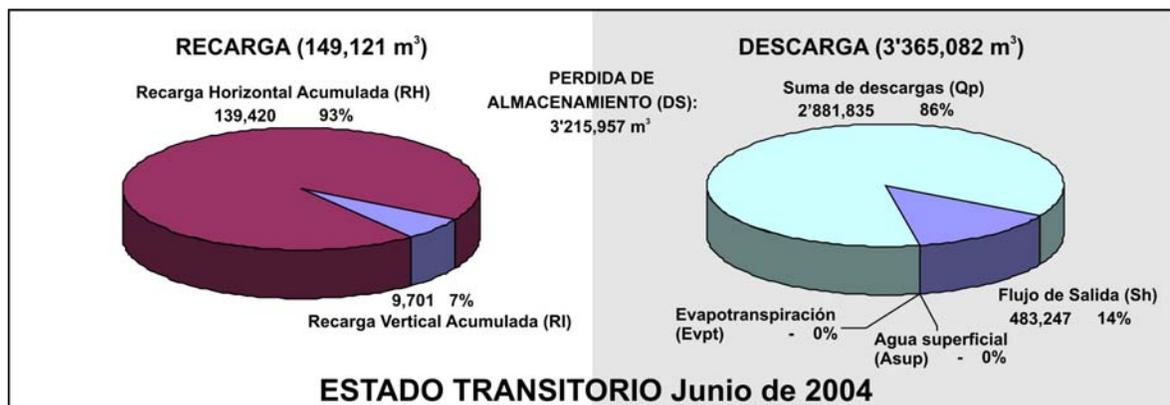


Figura A10. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Junio de 2004

Tabla A11. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Octubre de 2004

--- T R A N S I T O R I O ---			
Octubre de 2004			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	97,663	10
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	929,645	90
***** RECARGA TOTAL =		1'027,308	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	433,190	13
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'820,802	87
***** DESCARGA TOTAL =		3'253,992	100
Cambio del almacenamiento (DS)=		2'226,680	PERDIDA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -433,190.31 = 433,186.46
 -3.85 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = **0.00 [%]**
ACEPTABLE

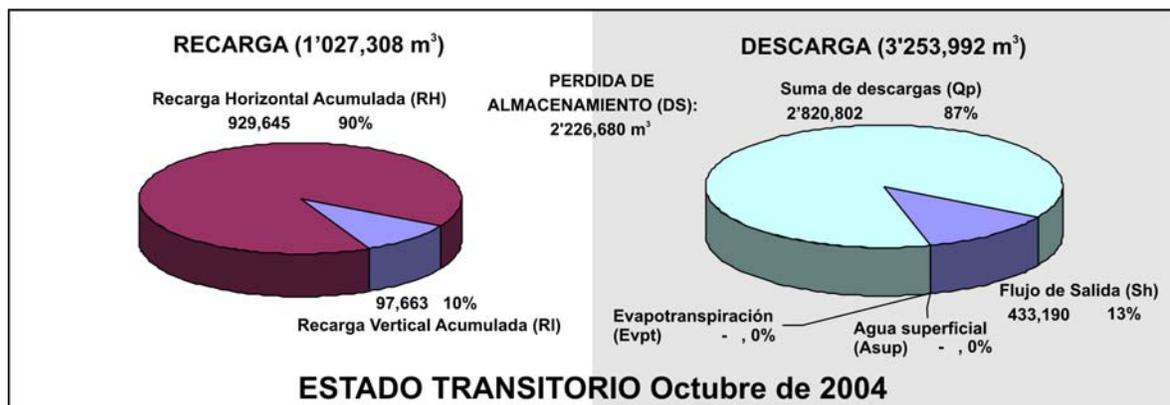


Figura A11. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Octubre de 2004

Tabla A12. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 2005

--- T R A N S I T O R I O ---			
Abril de 2005			
		[m ³ /mes]	[%]
R E C A R G A			
Flujo de entrada (frontera norte)	(Eh)=	0	0
RECARGA VERTICAL ACUMULADA	(RI)=	227,879	5
RECARGA HORIZONTAL TRANSITORIO ACUMULADA	(RH)=	4'273,956	95
***** RECARGA TOTAL =		4'501,835	100
D E S C A R G A			
Flujo de salida (frontera sur**)	(Sh)=	575,995	17
Agua superficial	(Asup)=	0	0
Evapotranspiración =	(Evpt)=	0	0
Suma Descargas	(Qp)=	2'852,256	83
***** DESCARGA TOTAL =		3'428,251	100

Cambio del almacenamiento (DS)= 1'073,587
GANANCIA

Ecuación de Balance (Estado TRANSITORIO)
 R E C A R G A - D E S C A R G A = D S

Ecuación de balance (Eh-Sh=DS-Qp+RI+RH-Asup-Evpt)
 -575,995.04 = 575,991.25
 -3.79 [m³/mes]

PORCENTAJE DE ERROR EN LA ECUACION DE BALANCE = 0.00 [%]
ACEPTABLE

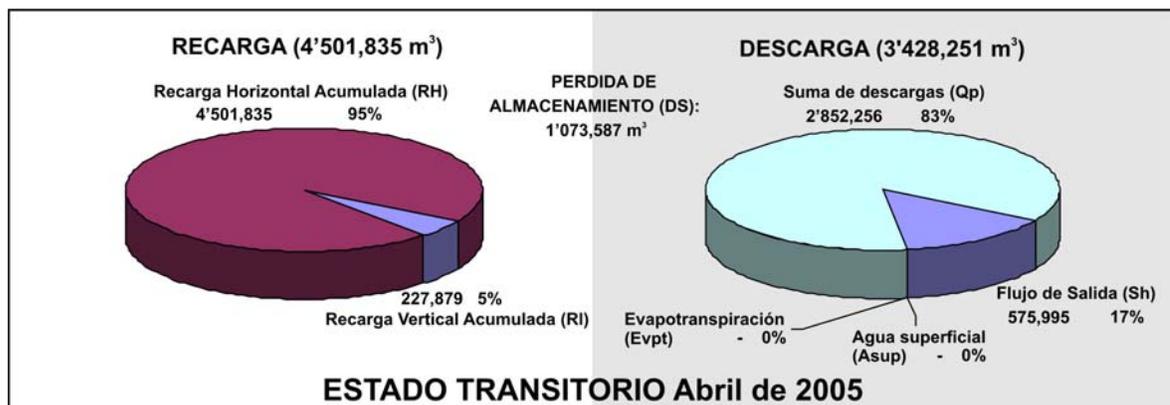
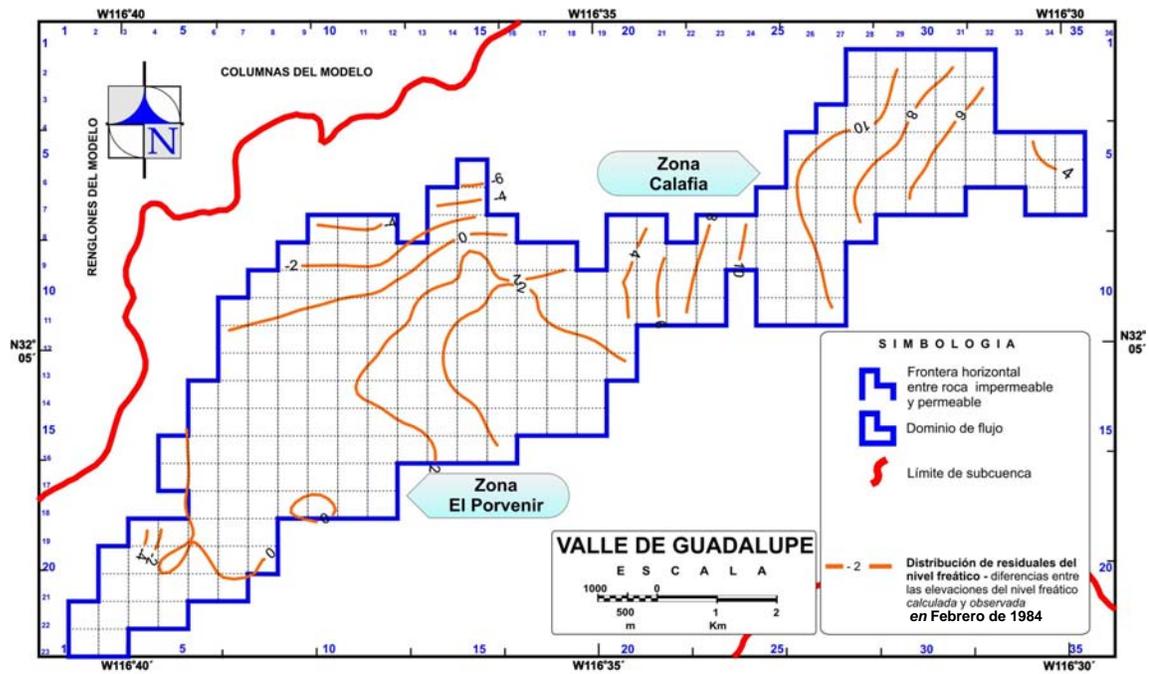


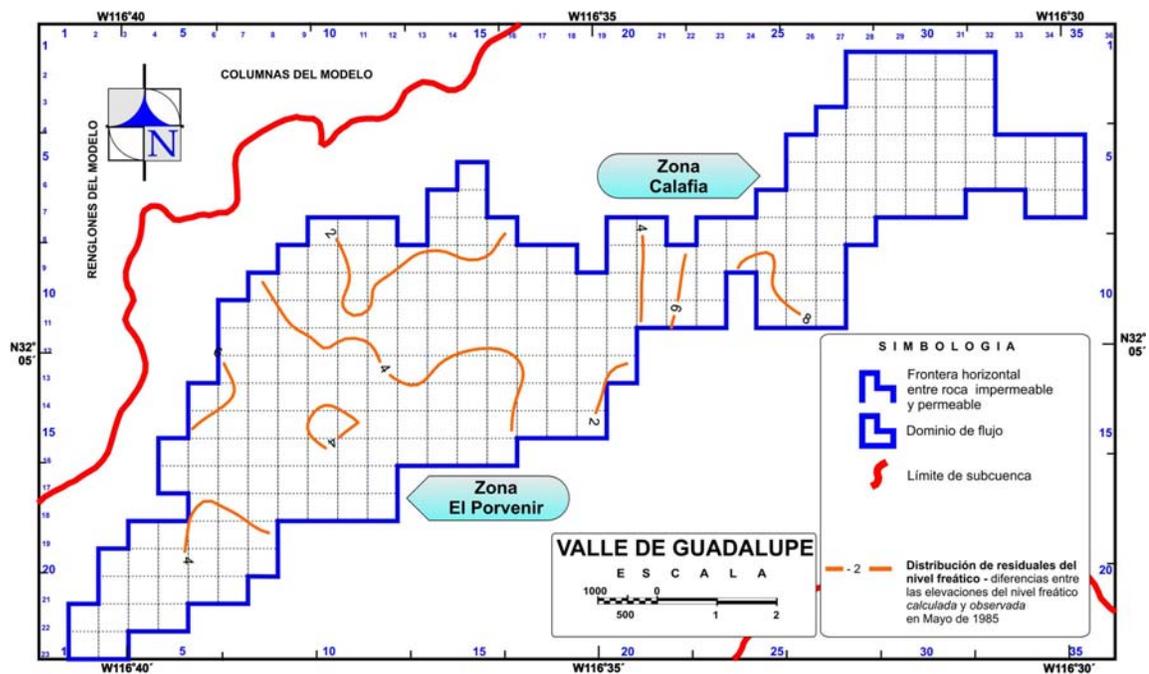
Figura A12. Ecuación de balance del agua subterránea para la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe. Estado transitorio, Abril de 2005

APÉNDICE B

En este apéndice se presenta los mapas de residuales obtenidos de la calibración del modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe.

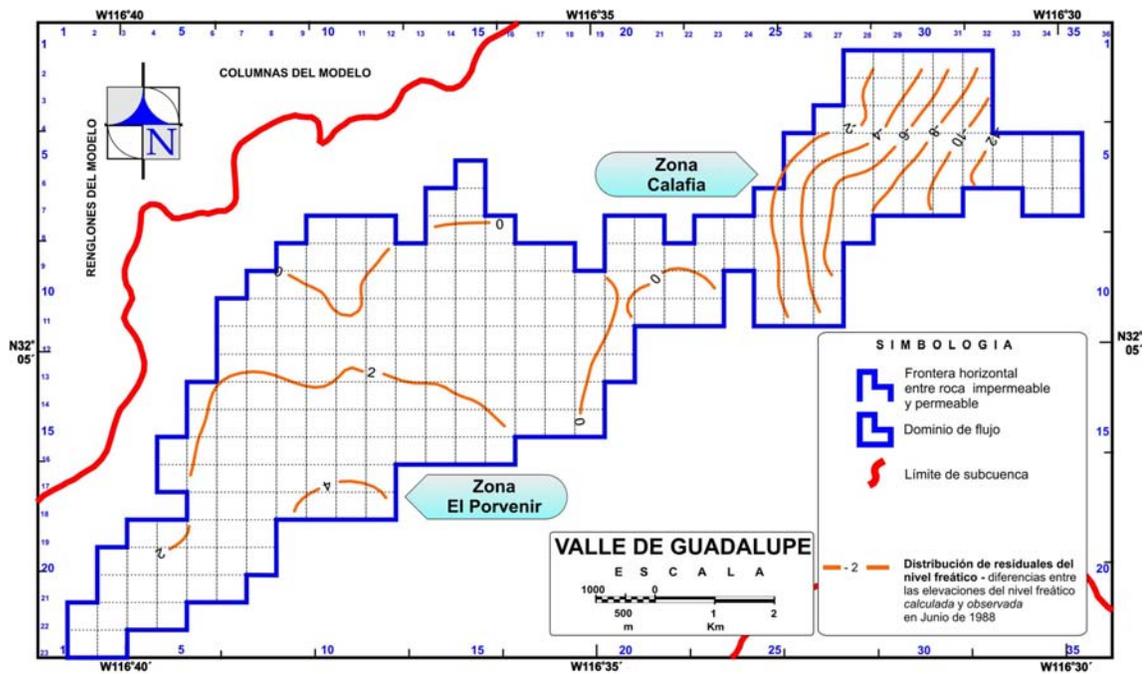


a)

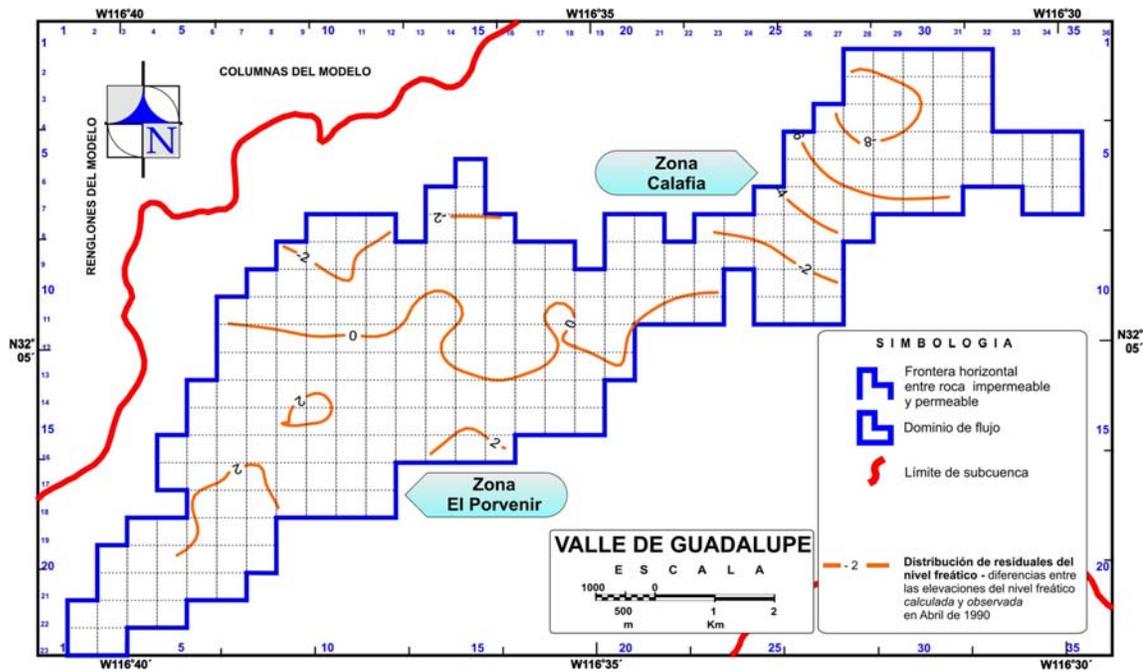


b)

Figura B1. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado estacionario, Febrero de 1984, y b) En estado transitorio, Mayo de 1985 (15 meses de simulación)

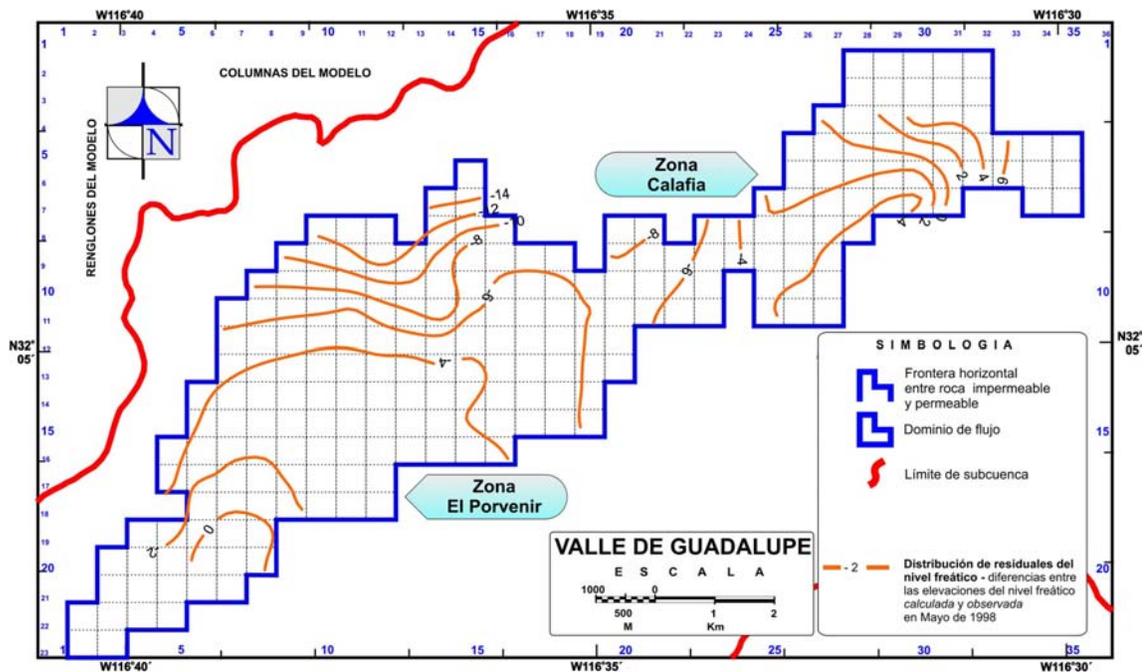


a)

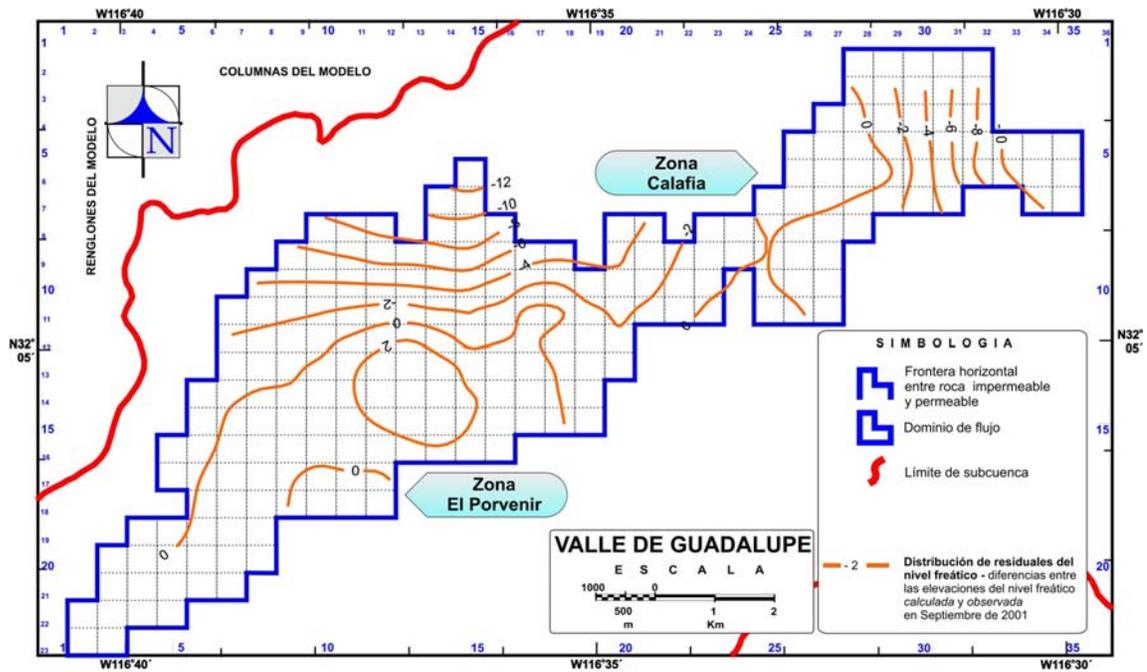


b)

Figura B2. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado transitorio, Junio de 1988 (52 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 1990 (74 meses de simulación)

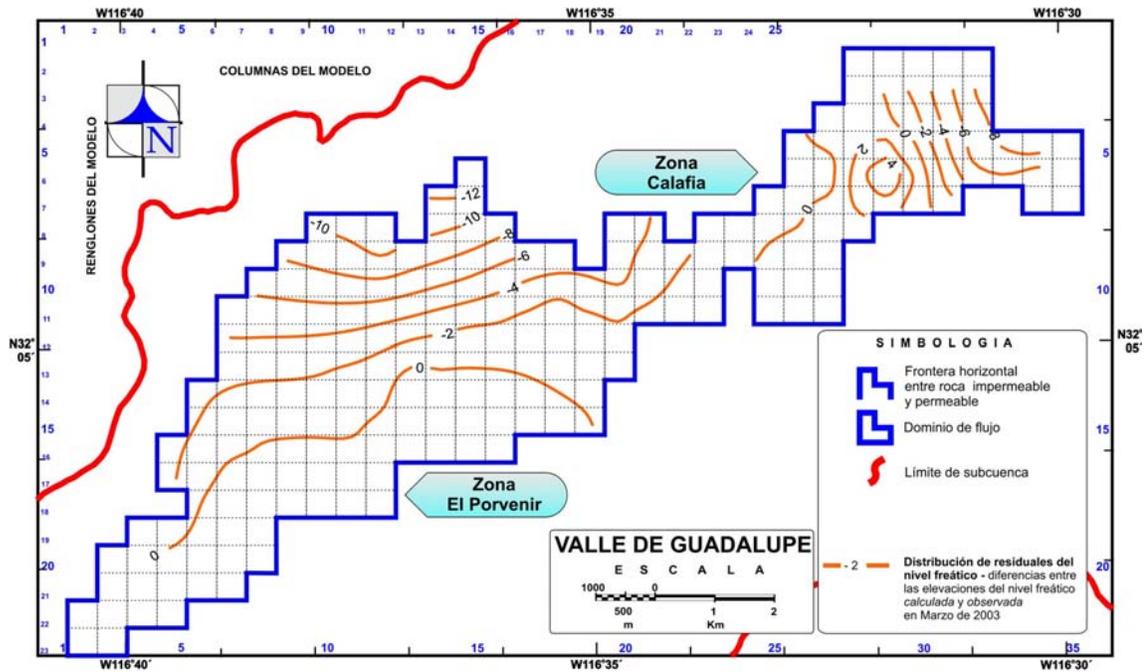


a)

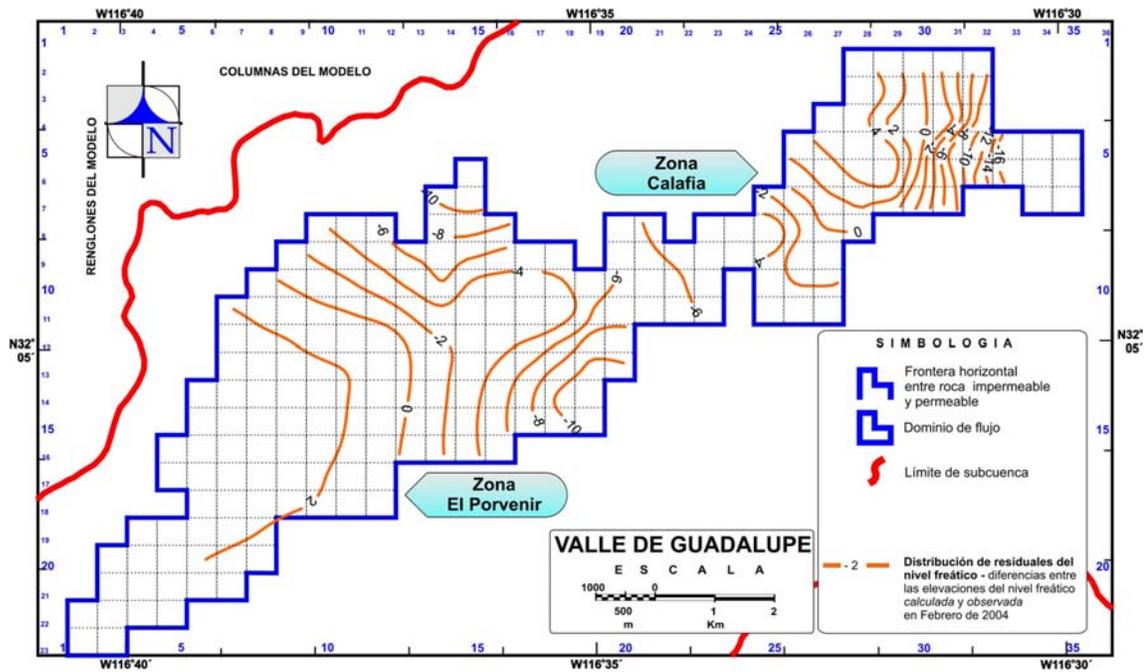


b)

Figura B3. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado transitorio, Mayo de 1998 (171 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Septiembre de 2001 (211 meses de simulación)

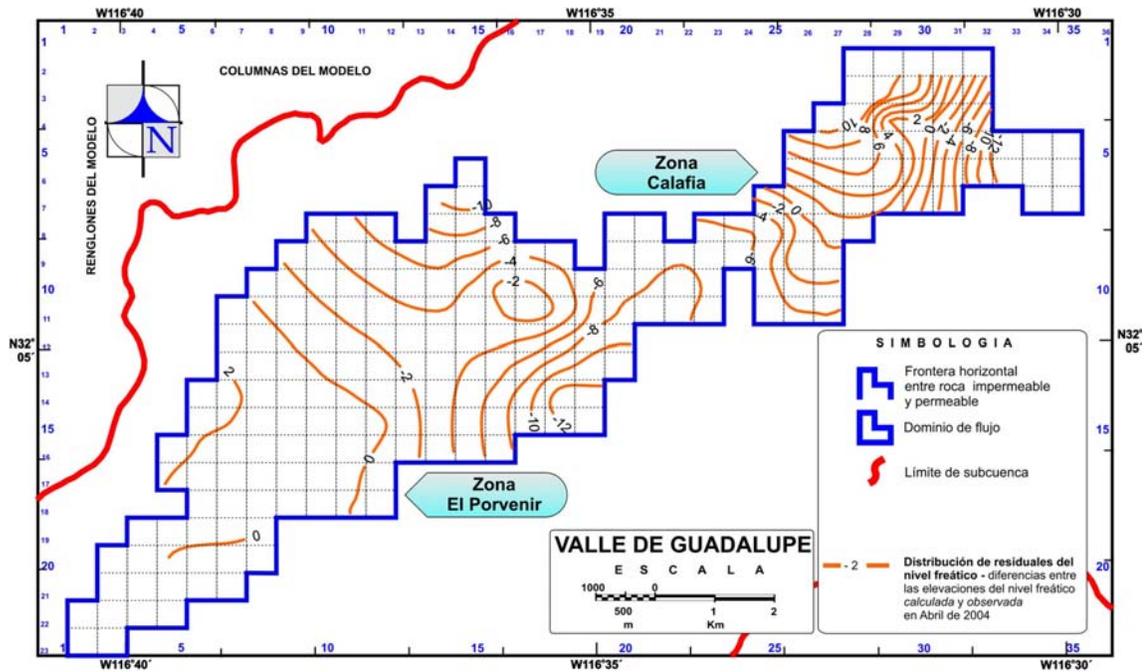


a)

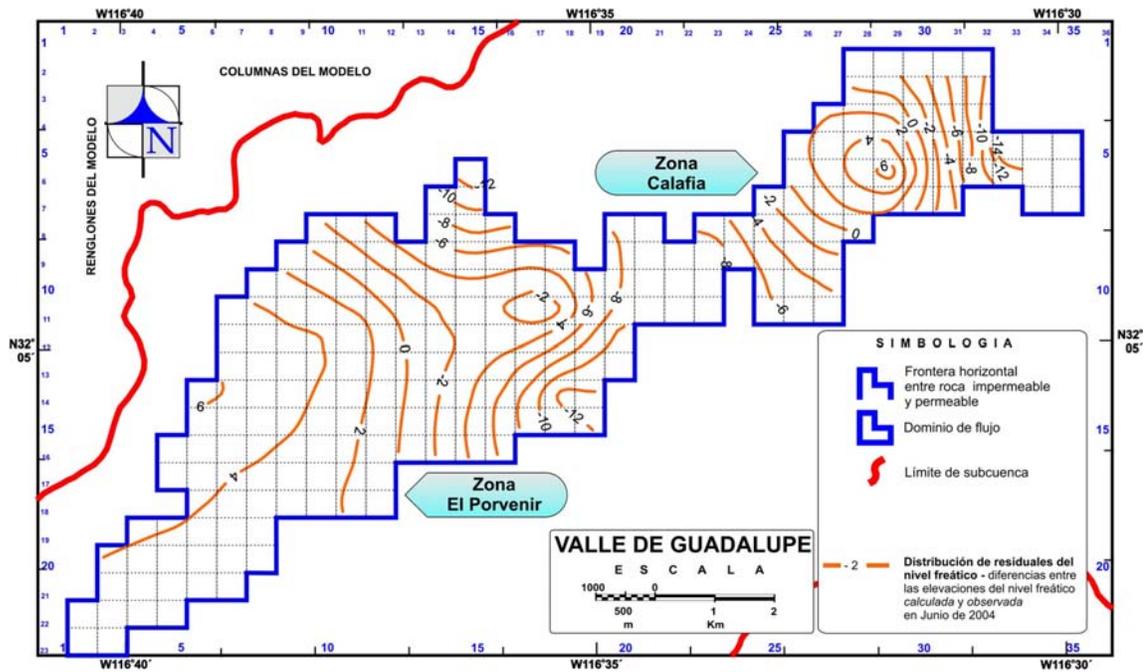


b)

Figura B4. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado transitorio, Marzo de 2003 (229 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Febrero de 2004 (240 meses de simulación)

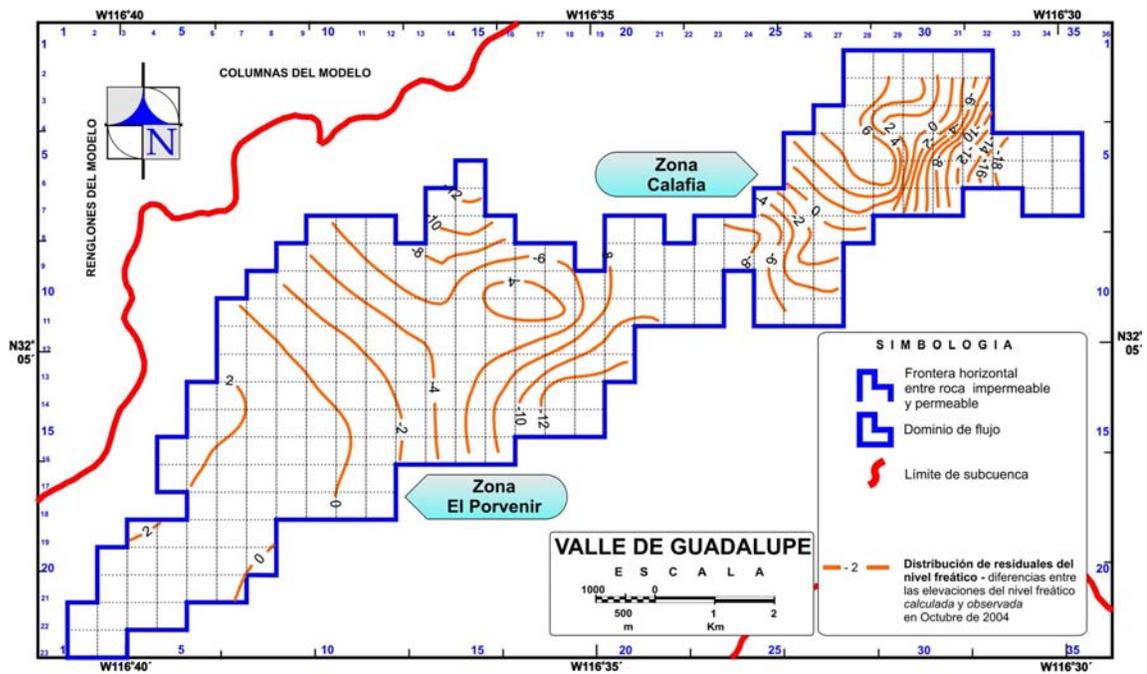


a)

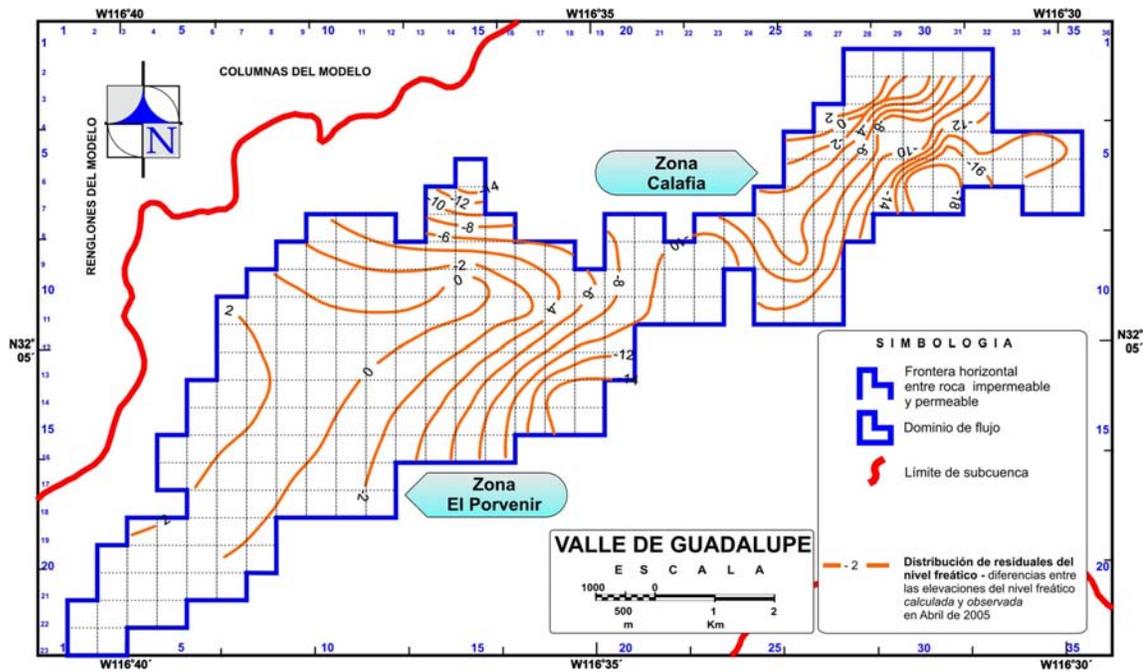


b)

Figura B5. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado transitorio, Abril de 2004 (242 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Junio de 2004 (244 meses de simulación)



a)



b)

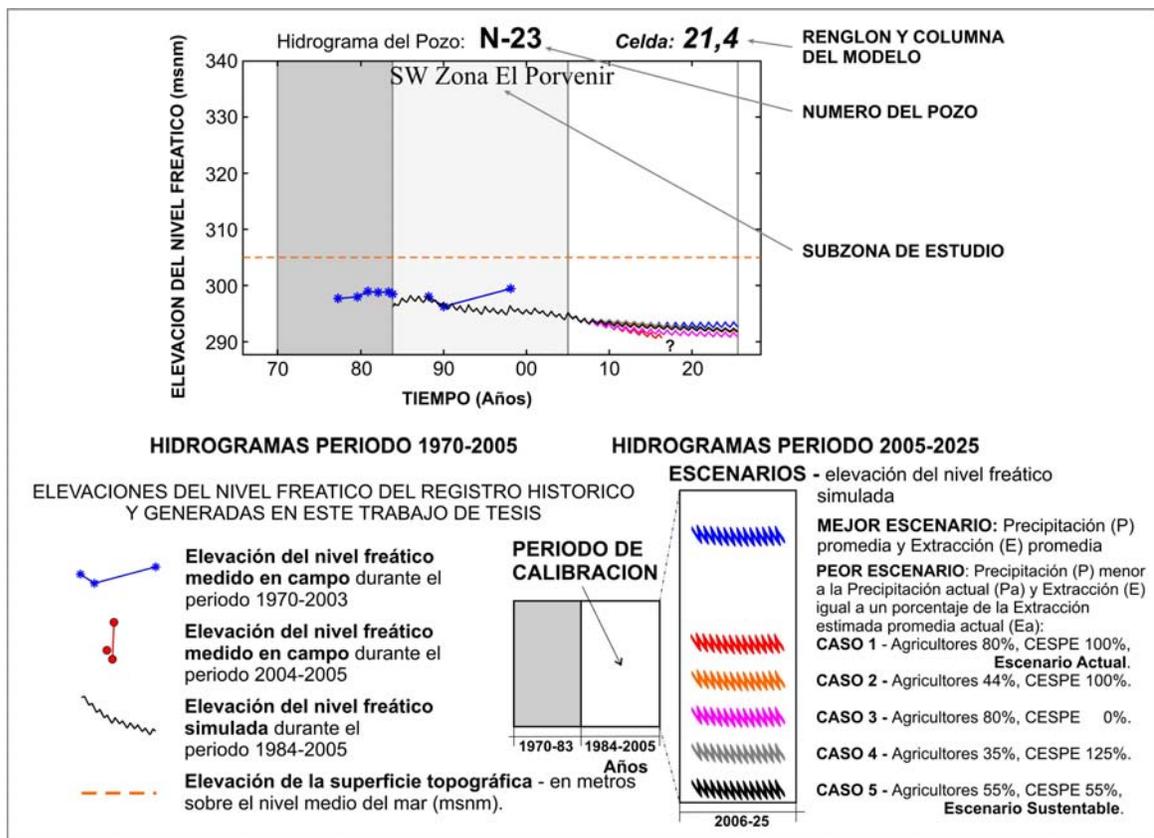
Figura B6. Distribución de residuales del nivel freático. a) En estado transitorio, Octubre de 2004 (248 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 2005 (271 meses de simulación)

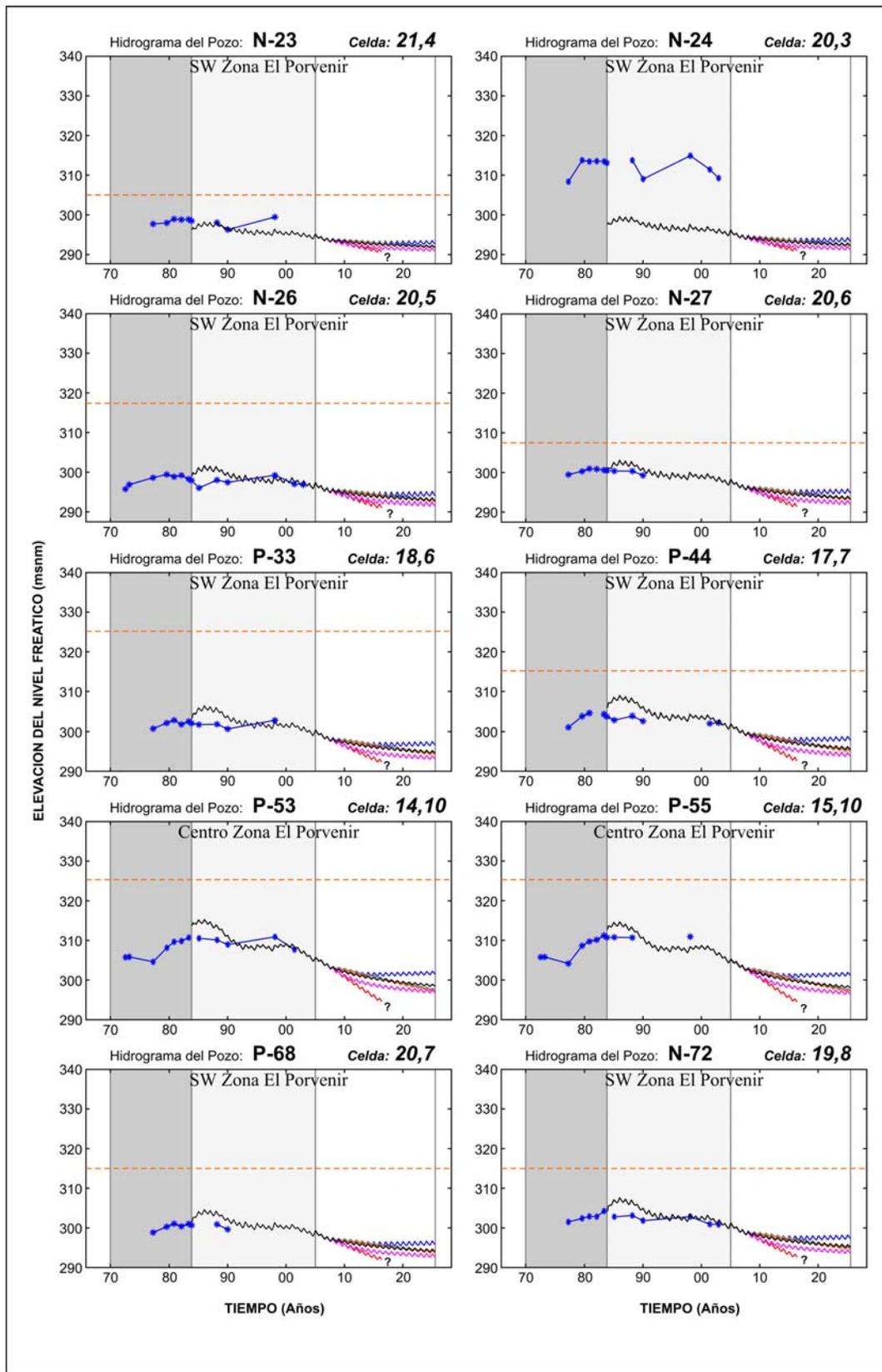
APÉNDICE C

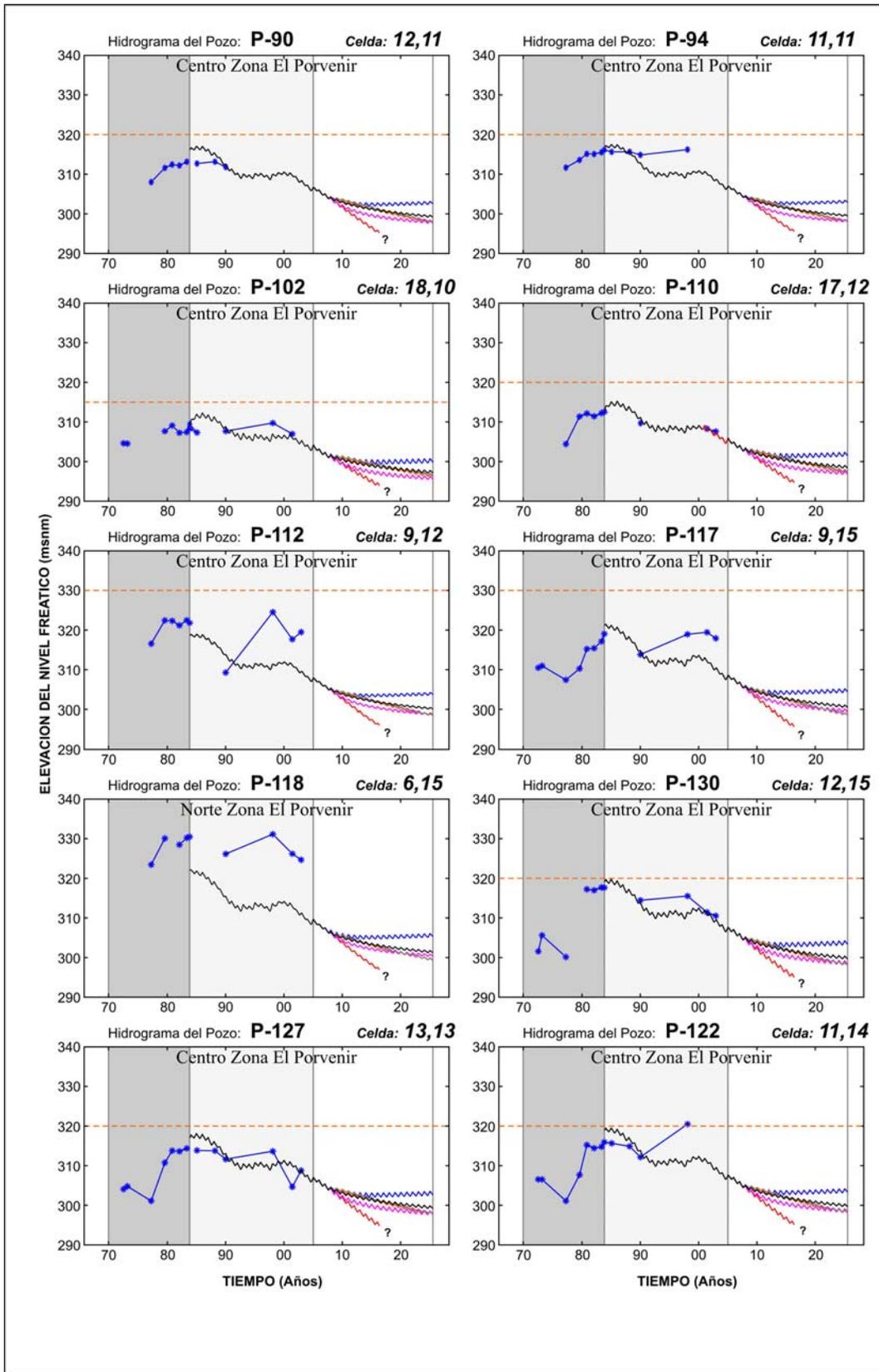
En este apéndice se presenta hidrogramas de aprovechamientos hidráulicos, establecidos en el Acuífero del Valle de Guadalupe, que cuentan con información de antecedentes piezométricos y que se emplean en la calibración.

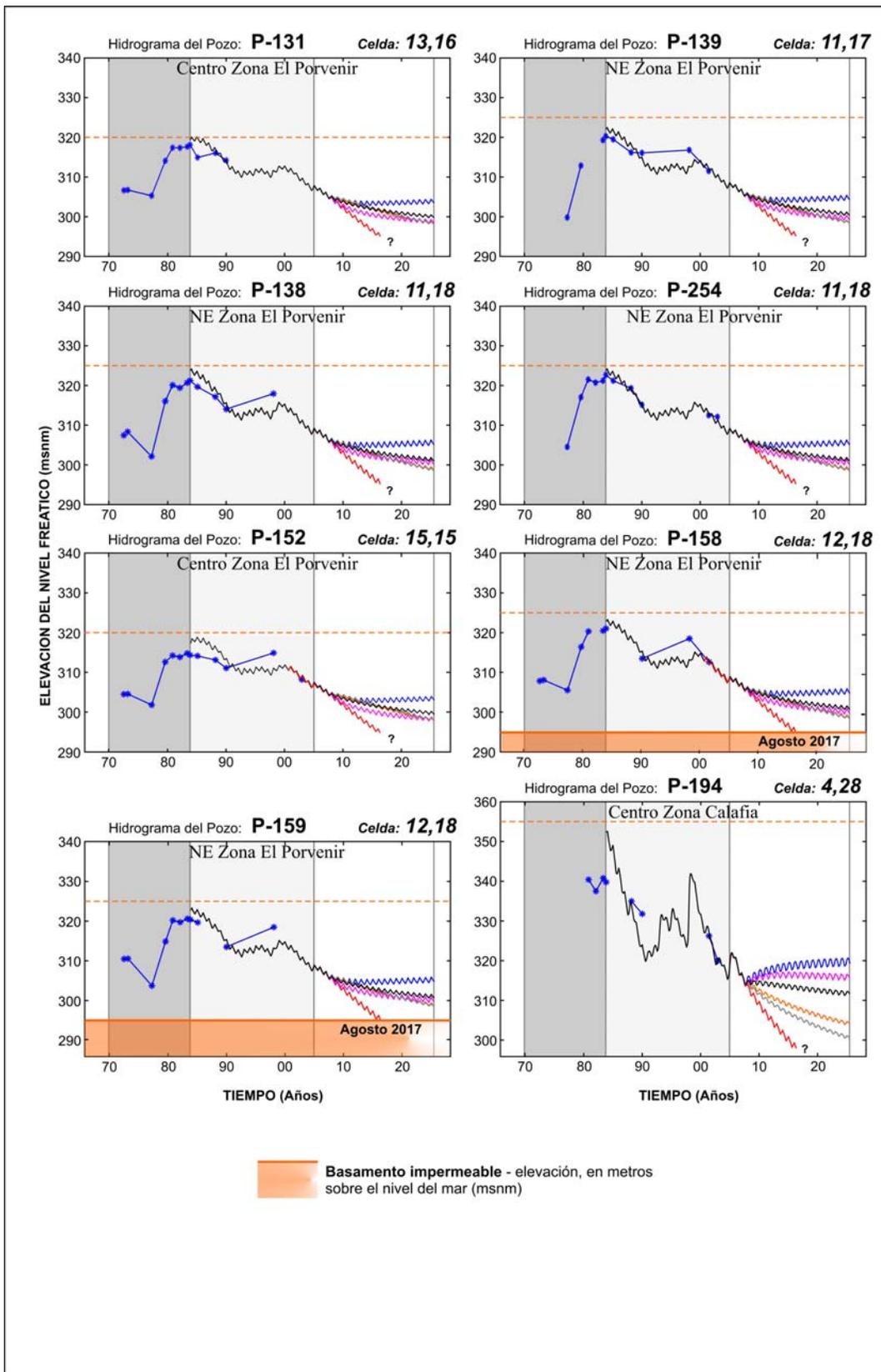
Explicación:

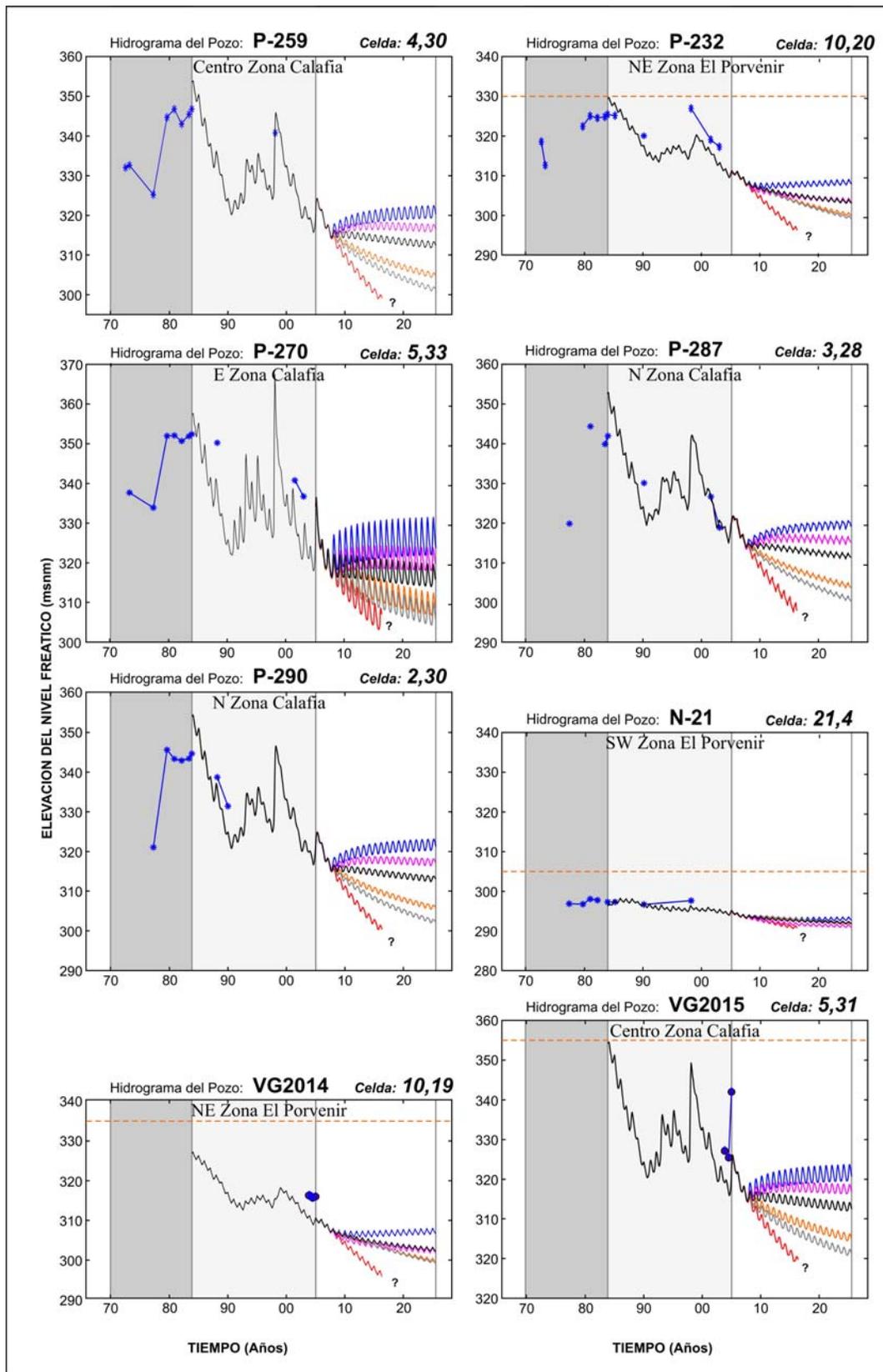
Hidrograma reproducido con información medida: a) por brigadas de la CNA en N = Noria, o P = Pozo, y b) por brigadas de muestreo durante las seis campañas llevadas a cabo como trabajo complementario de esta tesis en los pozos y norias visitadas, VG2014-2105 = Sitio de muestreo.

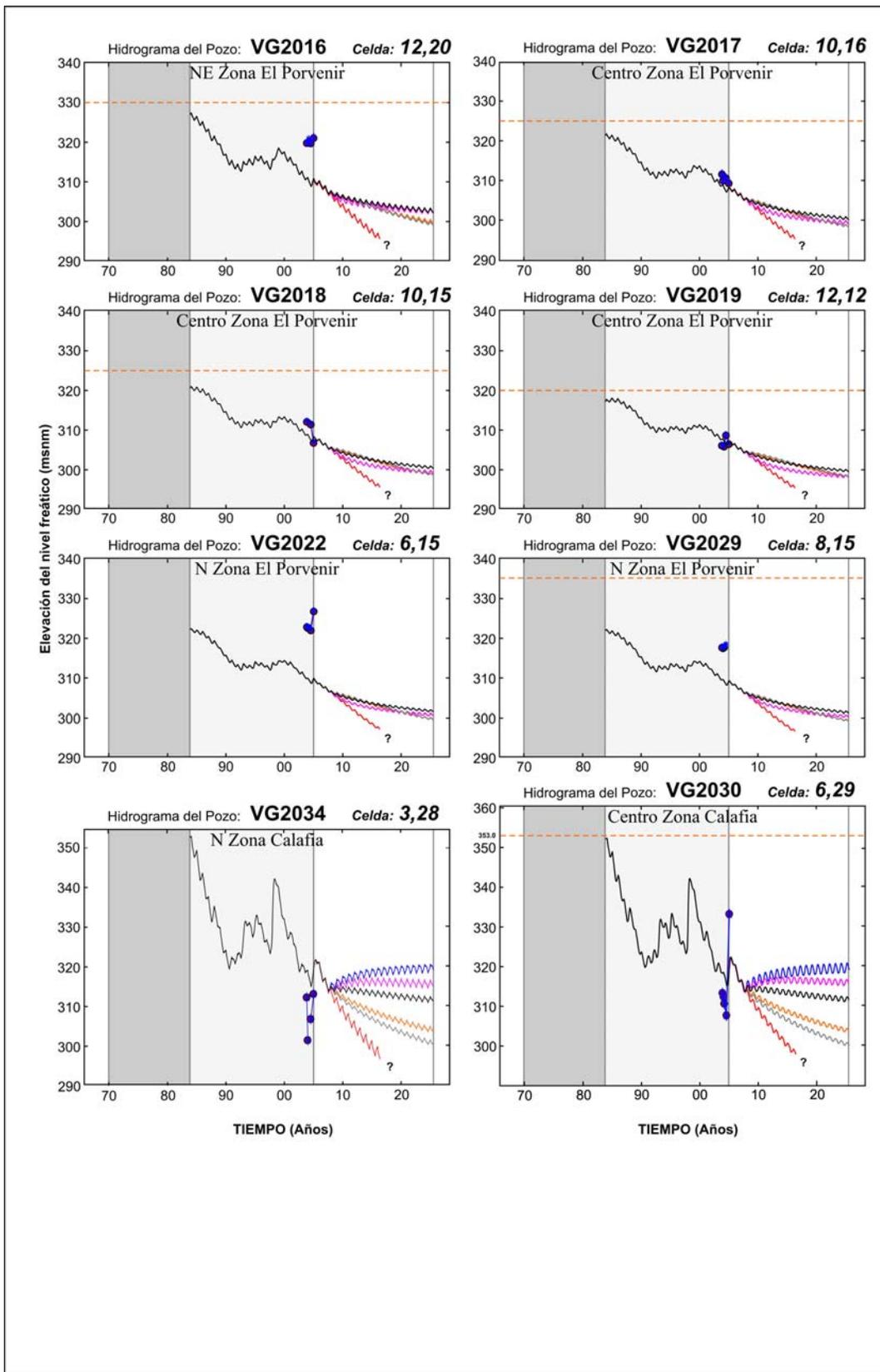


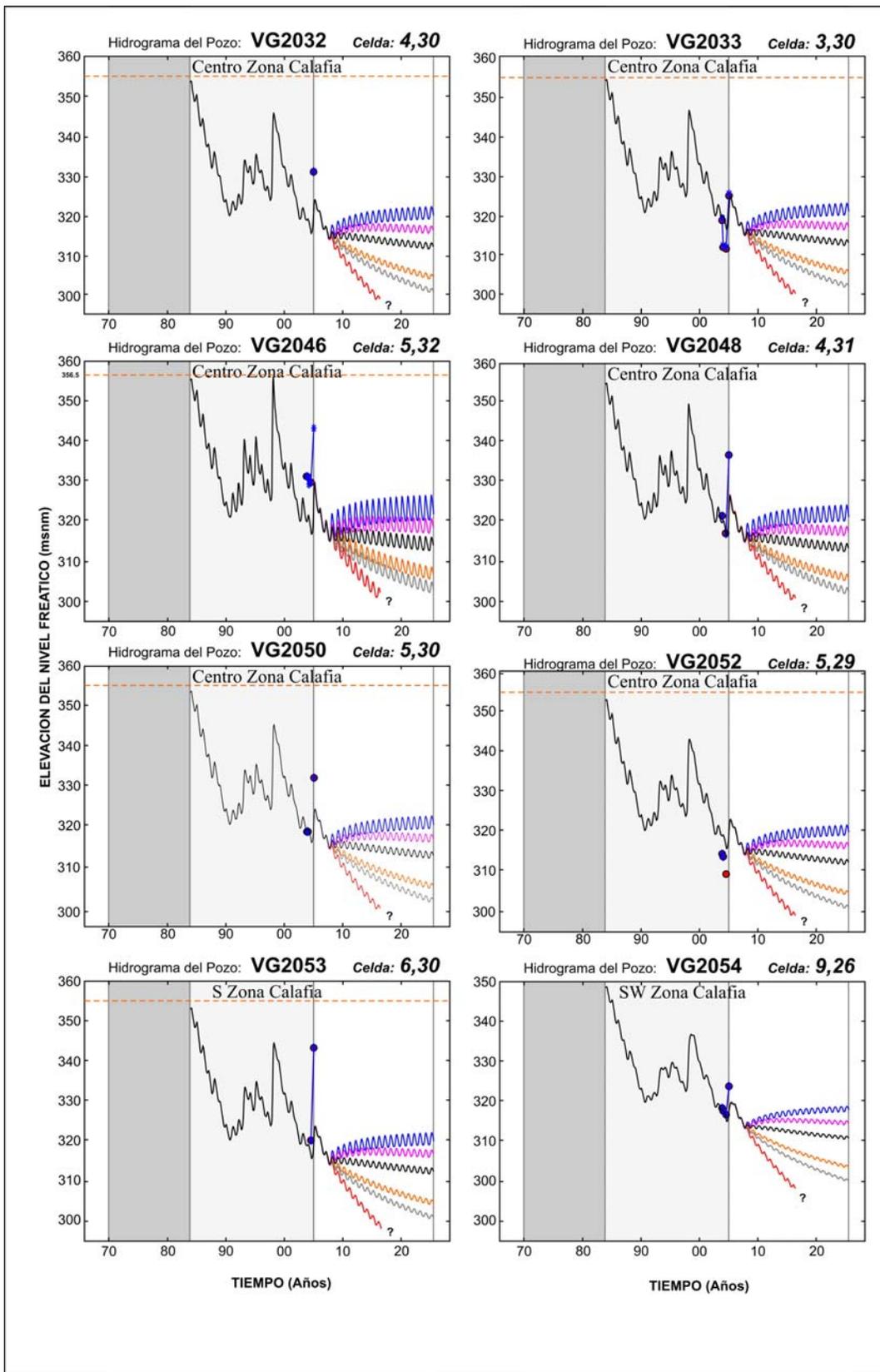


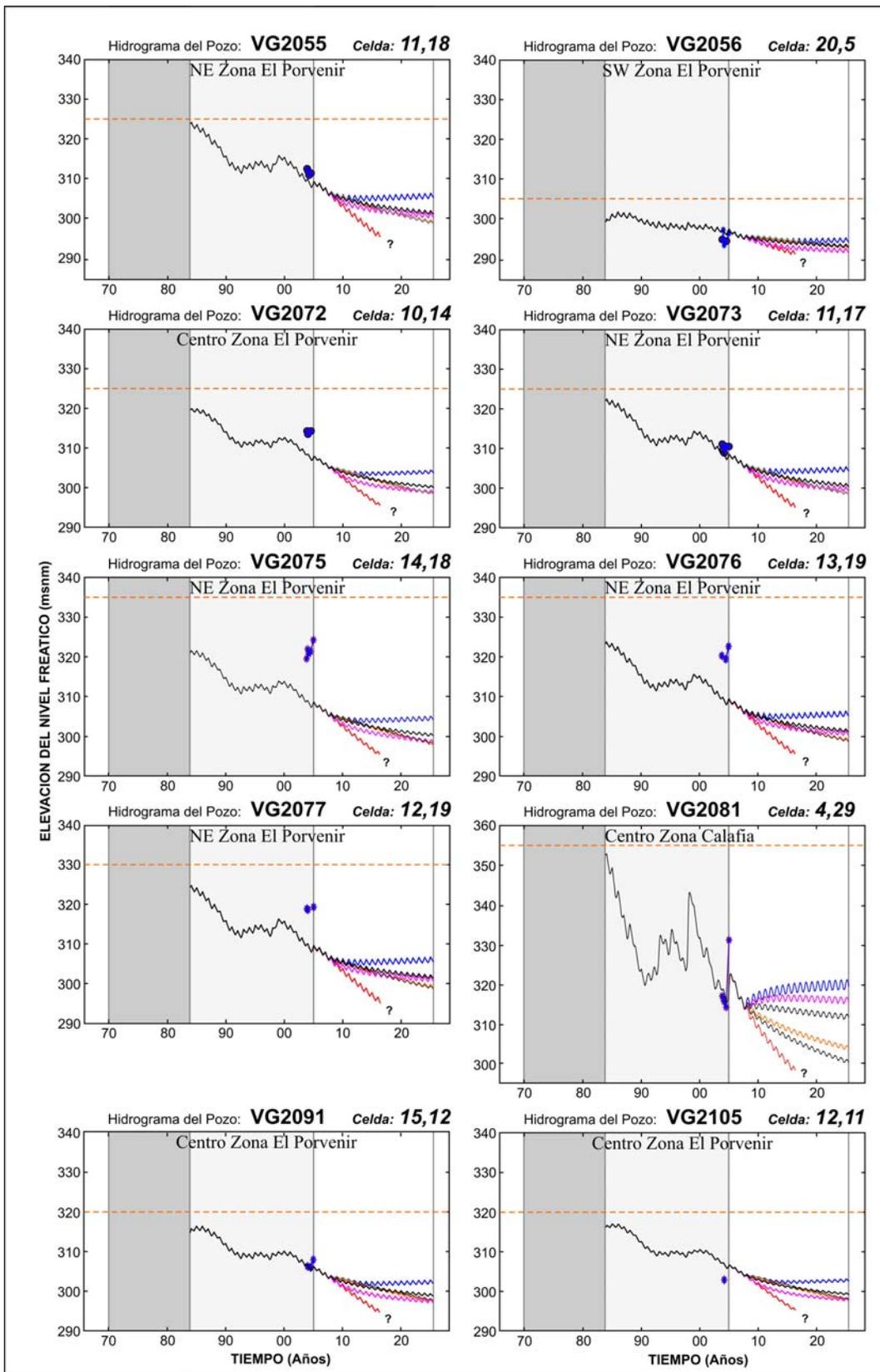












APÉNDICE D

Este apéndice presenta el volumen de extracción estimado durante la calibración del modelo y el asignado por COTAS a los usuarios del recurso de agua subterránea en el Valle de Guadalupe

Tabla D1. Volumen de extracción estimado durante la calibración y el asignado por COTAS

#	TDO ²	Celda i,j	Volumen ESTIMADO Q (m ³ /año)	Titular / Usuario	Volumen ASIGNADO por COTAS Q (m ³ /año)
A	B	C	D	E	F
1	N-19	23,2	12	Alfredo Mora Soto	-
2	N-21	21,4	238,187	Raul Bojórquez Ramírez	-
3	N-22	21,4	12	Raul Bojórquez Ramírez	-
4	N-23	21,4	12	Raul Bojórquez Ramírez	-
5	N-24	20,3	238,187	Angel Danieli	-
6	N-25	20,5	428,000	David Bibayoff Dalgoff (Toros Pintos)	428,000
7	N-25	2,30	42,533	David Bibayoff Dalgoff	-
8	N-26	3,29	42,533	David Bibayoff Dalgoff	-
9	N-27	20,6	238,187	David Bibayoff Dalgoff	-
10	N-28	19,6	238,187	Cipriano Salazar F.	-
11	N-29	19,5	16,260	José Inés García Rangel	16,260
12	N-30	19,6	12	Rubén Jauregui Pérez	-
13	N-32	19,6	12	Arturo Santana	-
14	P-33	5,29	42,533	Arturo Santana	-
15	N-35	18,6	6,000	Rubén González Villalobos	6,000
16	N-36	19,7	24,128	Francisco González Rizo	24,128
17	N-37	5,31	42,533	Crescencio Guerrero	-
18	N-38	18,7	238,187	Jesús Medina Ojeda (Toros Pintos)	-
19	N-42	18,7	12	Jesús Medina Ojeda (Toros Pintos)	-
20	N-44	17,7	238,187	Aurelio Alcalá Cerda	-
21	P-46	17,9	238,187	Gerardo Hirata Valenzuela (Tierra Santa)	-
22	P-47	21,7	12,000	Gerardo Hirata Valenzuela (Tierra Santa)	12,000
23	P-48	16,8	238,187	Tomás Villa Beltrán	-
24	N-50	14,7	30,500	Rigoberto Antonio Osuna Arce	30,500
25	P-53	14,10	238,187	Luis Madrigal (Parcela escolar, El Porvenir)	-
26	N-55	8,21	42,533	Familia Coronel Vázquez	-
27	N-57	15,10	60,000	Luis Carreón Gutiérrez	60,000
28	P-58	16,10	30,273	Pedro Carrión Gutiérrez (entre El Porvenir y Toros Pintos)	30,273
29	N-59	15,9	238,187	Juan Carreón Segovia	-
30	N-61	16,9	120,000	Gerardo Hirata Valenzuela (Ampliación El Porvenir)	120,000
31	N-64	9,21	42,533	Francisco Soto Contreras	-

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria. Los datos de la Columna D corresponden al volumen estimado durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los datos de la Columna F corresponden a la información proporcionada por COTAS del Valle de Guadalupe en 2005, donde (-) = No dato en COTAS

Tabla D1. Volumen de extracción estimado durante la calibración y el asignado por COTAS. Continuación

#	TDO ²	Celda i,j	Volumen ESTIMADO Q (m ³ /año)	Titular / Usuario	Volumen ASIGNADO por COTAS Q (m ³ /año)
A	B	C	D	E	F
32	N-65	21,7	9,000	Heliodoro Ríos Arriaga	9,000
33	P-66	20,7	12,456	José Ramírez Lomelí	12,456
34	P-67	9,22	42,533	Hilario Mungaray Rodríguez	-
35	P-68	10,21	42,533	Bernardo Ibarra C.	-
36	P-69	20,8	6,000	Luis Barragan Bañuelos	6,000
37	N-70	10,22	42,533	Rigoberto Llamas (Amp. Porvenir)	-
38	N-70	12,8	42,533	Crescencio Guerrero I.	-
39	N-71	13,16	42,533	Crescencio Guerrero I.	-
40	N-72	19,8	18,380	Evaristo Castro Morales	18,380
41	N-77	15,12	238,187	Orfanatorio (Casa Hogar para niños)	-
42	P-82	15,13	238,187	Gonzalo Fonseca Díaz (Rancho Guadalupe)	-
43	P-83	14,13	300,000	Gonzalo Fonseca Díaz (Rancho Guadalupe, Porvenir)	300,000
44	P-84	14,16	42,533	Gonzalo Fonseca Díaz (Rancho Guadalupe, Porvenir)	-
45	P-86	15,14	238,187	Ernesto Jiménez Orozco (Porvenir)	-
46	P-87	15,14	12	Ernesto Jiménez Orozco (Porvenir)	-
47	P-88	13,12	238,187	Centro de Salud (El Porvenir)	-
48	P-89	13,11	84,000	Juan de Dios Portillo Moreno (El Porvenir)	84,000
49	N-90	12,11	59,547	María de la Luz Orozco	-
50	N-91	12,10	18,639	Victor Bravo Careaga (Parcela 24, Adobe Guadalupe)	18,639
51	N-92	11,10	59,547	Jorge Ruiz (Parcela 32, Adobe Guadalupe)	-
52	N-93	13,12	12	Parcela escolar (El Porvenir)	-
53	P-94	11,11	59,547	Jorge Ruiz Hernández	-
54	N-95	10,11	6,525	Javier Carreón Rojas	13,050
55	P-96	8,10	62,500	Leandro Ulloa García (Dinuva, San Miguel)	125,000
56	N-98	8,10	6,460	José Manuel Collins Hernández	6,460
57	P-99	16,13	18,720	Olivares Mexicanos	18,720
58	N-100	16,13	18,000	Olivares Mexicanos	18,000
59	N-101	18,11	18,000	Olivares Mexicanos	18,000
60	N-102	18,10	18,000	Olivares Mexicanos	18,000
61	N-103	18,10	18,000	Olivares Mexicanos	18,000
62	P-104	20,13	12	Olivares Mexicanos	-
63	N-108	16,14	42,533	Olivares Mexicanos	-
64	N-109	18,9	238,187	Olivares Mexicanos	-
65	N-110	17,12	81,365	Marina Caldera Ramírez (Olivares Mexicanos)	81,365
66	P-112	9,12	59,547	Olivares Mexicanos	-
67	P-113	9,12	12	Olivares Mexicanos	-
68	P-114	17,10	42,533	Enrique Ruiz (San Miguel)	-
69	P-115	9,15	74,000	CETTO	74,000

Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria. Los datos de la Columna D corresponden al volumen estimado durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los datos de la Columna F corresponden a la información proporcionada por COTAS del Valle de Guadalupe en 2005, donde (-) = No dato en COTAS

Tabla D1. Volumen de extracción estimado durante la calibración y el asignado por COTAS. Continuación

#	TDO ²	Celda i,j	Volumen ESTIMADO Q (m ³ /año)	Titular / Usuario	Volumen ASIGNADO por COTAS Q (m ³ /año)
A	B	C	D	E	F
70	P-116	9,15	156,110	CETTO	156,110
71	P-117	9,15	12	Camilo Magoni (Chateau Camou)	-
72	P-118	6,15	59,547	Ernesto Alvarez Morfin (Vinícola Chateou Camou)	-
73	P-119	10,16	238,187	Alejandro Somari	-
74	P-120	12,15	12	Alejandro Samarín D. (entre El Porvenir y Francisco Zarco)	-
75	P-121	13,13	238,187	FORMEX IBARRA (El Porvenir)	-
76	P-122	11,14	238,187	FORMEX IBARRA (El Porvenir)	-
77	P-123	12,14	238,187	FORMEX IBARRA (El Porvenir)	-
78	P-124	12,14	12	FORMEX IBARRA (El Porvenir)	-
79	P-125	13,14	12	FORMEX IBARRA (El Porvenir)	-
80	P-126	14,14	238,187	Olivares Mexicanos	-
81	P-127	13,13	12	Agaffia Rogoff	-
82	P-128	13,14	60,090	Raul Ignacio Villarreal Ojeda (Rancho El Rufo, entre El Porvenir y Francisco Zarco)	60,090
83	P-129	13,15	238,187	José Garduño Cruz (Rancho Luisiana, entre El Porvenir y Francisco Zarco)	-
84	P-130	12,15	102,000	Luis Angel y León Alberto Gutiérrez-Lemini (entre El Porvenir y Francisco Zarco)	102,000
85	P-132	11,16	238,187	Hector Jiménez	-
86	P-133	11,17	238,187	Ernesto Jiménez Orozco (Monte Xanic)	-
87	P-134	12,17	238,187	Ernesto Jiménez Orozco (Rancho EL Sauce)	-
88	P-135	12,17	12	Ernesto Jiménez Orozco (Monte Xanic)	-
89	P-136	12,17	12	Ernesto Jiménez Orozco (Rancho EL Sauce)	-
90	P-137	11,17	12	Ernesto Jiménez Orozco (Rancho EL Sauce)	-
91	P-138	11,18	550	Ernesto Jiménez Orozco (Rancho El Sauce, Francisco Zarco)	550
92	P-139	11,17	12	Camilo Magoni (Francisco Zarco)	-
93	P-140	11,18	12	Santiago Bibayoff Kriloff	108,165
94	P-141	10,19	364,346	Miguel David Fuentes Abendschein (Rancho San Martín, Francisco Zarco)	364,346
95	P-143	10,19	210,000	Diana Luz Olvera Olivas (Rancho Delicias, Francisco Zarco)	210,000
96	P-151	15,15	238,187	Olivares Mexicanos	-
97	P-152	15,15	12	Olivares Mexicanos	-
98	P-153	14,14	12	Olivares Mexicanos	-
99	P-158	12,18	238,187	Alberto Limón Valerio (Monte Xanic)	-
100	P-159	12,18	12	Alberto Limón Valerio (Monte Xanic)	-
101	P-160	12,17	12	Alberto Limón Valerio (Rancho Delicias)	-
102	P-171	10,25	238,187	Carmen Aguirre García	-
103	N-172	10,25	12	Carmen Aguirre García	-
104	P-173	10,26	12	Hector Jiménez	-

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria. Los datos de la Columna D corresponden al volumen estimado durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los datos de la Columna F corresponden a la información proporcionada por COTAS del Valle de Guadalupe en 2005, donde (-) = No dato en COTAS

Tabla D1. Volumen de extracción estimado durante la calibración y el asignado por COTAS. Continuación

#	TDO ²	Celda i,j	Volumen ESTIMADO Q (m ³ /año)	Titular / Usuario	Volumen ASIGNADO por COTAS Q (m ³ /año)
A	B	C	D	E	F
105	P-174	10,26	120,110	Ricardo Jiménez Quiñónez	120,110
106	P-175	9,26	324,329	Hector Fuentes	324,329
107	N-176	8,23	238,187	Concepción Rosales (Carretera)	-
108	N-178	8,23	12	José María Espinoza M.	-
109	N-181	8,24	238,187	Martín Mireles	-
110	P-814	7,25	238,187	Hector Fuentes	-
111	N-185	7,26	12	Hector Fuentes	-
112	P-186	7,26	99,360	Hector Fuentes	99,360
113	P-188	9,27	238,187	Ricardo Jiménez Quiñónez (Campo Manas)	-
114	P-191	6,27	619,095	CETTO	619,095
115	P-192	6,28	238,187	Familia Saldivar (Rancho El Desafío, CESPE)	-
116	P-193	5,28	238,187	Olegario Sandoval Borja	-
117	P-194	4,28	318,000	Olegario Sandoval Borja	318,000
118	P-195	6,29	238,187	Uvas de California	-
119	P-197	4,29	270,000	CETTO	270,000
120	P-198	5,30	120,000	CETTO	120,000
121	P-199	4,30	300,000	CETTO	300,000
122	P-200	5,31	238,187	Olegario Sandoval Borja	-
123	N-201	5,31	12	Loreto Nevarez	-
124	P-202	5,31	12	Olegario Sandoval Borja	-
125	N-213	15,19	238,187	José Ramírez Corona	-
126	P-214	13,20	30,110	José Muñoz	30,110
127	P-215	13,20	60,000	José Muñoz	60,000
128	N-216	12,19	238,187	Humberto Ortega	-
129	N-220	12,19	12	María de Jesús C. (Francisco Zarco)	-
130	N-224	11,19	12	Carlos Olivares (Francisco Zarco)	-
131	N-225	11,19	1,050	Mung King de México	1,050
132	N-226	11,20	400,000	Mung King de México	400,000
133	N-227	12,10	238,187	Edmundo Miranda	-
134	N-228	10,20	12,000	Mung King de México	12,000
135	P-232	10,20	12	Hector Fuentes	-
136	P-233	9,20	238,187	Hector Fuentes	-
137	N-234	10,21	238,187	Francisca Alcalá Esparza (Francisco Zarco)	-
138	N-237	10,21	12	Juan Muñoz Gutiérrez	-
139	N-240	9,20	12	Francisco Liziein (Francisco Zarco)	-
140	P-254	11,18	238,187	Miguel Fuentes (Rancho San Martín, Francisco Zarco)	-
141	P-258	3,30	12	Uvas de California (Uvas No. 2)	-
142	P-259	4,30	12	Uvas de California (Uvas No. 2)	-
143	P-260	4,31	240,000	CETTO	240,000
144	P-261	4,31	300,000	CETTO	300,000

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria. Los datos de la Columna D corresponden al volumen estimado durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los datos de la Columna F corresponden a la información proporcionada por COTAS del Valle de Guadalupe en 2005, donde (-) = No dato en COTAS

Tabla D1. Volumen de extracción estimado durante la calibración y el asignado por COTAS. Continuación

#	TDO ²	Celda i,j	Volumen ESTIMADO Q (m ³ /año)	Titular / Usuario	Volumen ASIGNADO por COTAS Q (m ³ /año)
A	B	C	D	E	F
145	P-262	4,31	100,000	CETTO	100,000
146	P-263	5,31	12	Francisco Lucero Hernández (Rancho San Valentín)	-
147	P-264	7,30	126,000	CETTO	126,000
148	P-265	7,30	510,000	CETTO	510,000
149	P-266	7,29	238,187	Jesús Gutiérrez (Rancho Encino)	-
150	P-270	5,33	168,000	Guadalupe Córdova Ezrre (Rancho La Gotita)	168,000
151	P-271	5,33	12	Hector Jiménez	-
152	P-272	5,34	720,000	CETTO	720,000
153	P-273	5,34	180,000	CETTO	180,000
154	P-274	6,34	277,540	San Antonio Necua	277,540
155	P-276	9,26	12	Ricardo Jiménez Quiñónez	-
156	N-278	11,20	12	Juan Anguiano (Francisco Zarco)	-
157	P-279	8,25	74,000	CETTO	74,000
158	P-280	4,31	195,000	CETTO	195,000
159	P-287	3,28	1'781,300	Uvas de California (Uvas No. 1)	1'781,300
160	P-693	5,33	12	Hector Jiménez	-
ΣV			20'633,758		9'805,221
Σ POZOS	98				
Σ NORIAS	62				
Σ #	160				

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CNA; donde P = Pozo, y N = Noria. Los datos de la Columna D corresponden al volumen estimado durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe. Los datos de la Columna F corresponden a la información proporcionada por COTAS del Valle de Guadalupe en 2005, donde (-) = No dato en COTAS

APÉNDICE E

En este apéndice se presenta los volúmenes de extracción asumidos para los pozos de CESPE durante el periodo de calibración.

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³)

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	1985														
1	P#1				105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,030,177	12
2	P#2				94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	824,447	9
3	P#3				72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	619,011	7
4	P#4				72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	422,213	5
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11
6	P#6				57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	651,807	7
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8				84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	680,575	8
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10				81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	726,943	8
	Σ	176,018	149,086	245,951	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	7,576,493	85
	1986														
1	P#1	41,409	87,993	111,598	105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,271,177	14
2	P#2	78,802	77,242	93,486	94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	1,073,977	12
3	P#3	33,240	60,479	52,596	72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	765,326	9
4	P#4	47,939	40,189	68,226	72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	578,567	6
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11
6	P#6	54,344	52,543	70,619	57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	829,313	9
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8	54,893	59,627	81,553	84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	876,648	10
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10	57,688	56,480	67,480	81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	908,591	10
	Σ	544,333	583,639	791,509	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	8,924,919	100
	1987														
1	P#1	41,409	87,993	111,598	105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,271,177	14
2	P#2	78,802	77,242	93,486	94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	1,073,977	12
3	P#3	33,240	60,479	52,596	72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	765,326	9
4	P#4	47,939	40,189	68,226	72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	578,567	6
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1: 6,32; P#2: 6,32; P#3: 6,31; P#4:6,30; P#5: 7,30; P#6: 8,26; P#7: 7,29; P#8: 8,28; P#9: 7,28, y P#10: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total. Las celdas sombreadas marcan el inicio de operaciones asumido en la calibración para los pozos correspondientes

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
6	P#6	54,344	52,543	70,619	57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	829,313	9
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8	54,893	59,627	81,553	84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	876,648	10
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10	57,688	56,480	67,480	81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	908,591	10
	Σ	544,333	583,639	791,509	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	8,924,919	100
	1988														
1	P#1	41,409	87,993	111,598	105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,271,177	14
2	P#2	78,802	77,242	93,486	94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	1,073,977	12
3	P#3	33,240	60,479	52,596	72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	765,326	9
4	P#4	47,939	40,189	68,226	72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	578,567	6
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11
6	P#6	54,344	52,543	70,619	57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	829,313	9
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8	54,893	59,627	81,553	84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	876,648	10
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10	57,688	56,480	67,480	81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	908,591	10
	Σ	544,333	583,639	791,509	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	8,924,919	100
	1989														
1	P#1	41,409	87,993	111,598	105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,271,177	14
2	P#2	78,802	77,242	93,486	94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	1,073,977	12
3	P#3	33,240	60,479	52,596	72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	765,326	9
4	P#4	47,939	40,189	68,226	72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	578,567	6
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11
6	P#6	54,344	52,543	70,619	57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	829,313	9
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8	54,893	59,627	81,553	84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	876,648	10
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10	57,688	56,480	67,480	81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	908,591	10
	Σ	544,333	583,639	791,509	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	8,924,919	100
	1990														
1	P#1	58,613	59,831	62,766	51,823	62,311	71,360	58,933	65,337	57,160	63,753	62,949	77,443	752,278	14
2	P#2	41,867	42,736	44,833	37,016	44,508	50,971	42,095	46,670	40,828	45,538	44,964	55,317	537,342	10
3	P#3	41,867	42,736	44,833	37,016	44,508	50,971	42,095	46,670	40,828	45,538	44,964	55,317	537,342	10
4	P#4	41,867	42,736	44,833	37,016	44,508	50,971	42,095	46,670	40,828	45,538	44,964	55,317	537,342	10
5	P#5	37,680	38,463	40,349	33,315	40,057	45,874	37,886	42,003	36,746	40,984	40,467	49,785	483,607	9

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1: 6,32; P#2: 6,32; P#3: 6,31; P#4:6,30; P#5: 7,30; P#6: 8,26; P#7: 7,29; P#8: 8,28; P#9: 7,28, y P#10: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
6	P#6	37,680	38,463	40,349	33,315	40,057	45,874	37,886	42,003	36,746	40,984	40,467	49,785	483,607	9
7	P#7	46,053	47,010	49,316	40,718	48,959	56,068	46,305	51,336	44,911	50,091	49,460	60,848	591,076	11
8	P#8	37,680	38,463	40,349	33,315	40,057	45,874	37,886	42,003	36,746	40,984	40,467	49,785	483,607	9
9	P#9	37,680	38,463	40,349	33,315	40,057	45,874	37,886	42,003	36,746	40,984	40,467	49,785	483,607	9
10	P#10	37,680	38,463	40,349	33,315	40,057	45,874	37,886	42,003	36,746	40,984	40,467	49,785	483,607	9
	Σ	418,666	427,364	448,325	370,164	445,078	509,711	420,950	466,695	408,284	455,375	449,638	553,166	5,373,416	100
	1991														
1	P#1	59,205	60,057	65,261	83,780	76,003	73,072	78,178	66,794	65,183	71,929	72,254	72,108	843,823	14
2	P#2	42,289	42,898	46,615	59,843	54,288	52,195	55,841	47,710	46,559	51,378	51,610	51,506	602,731	10
3	P#3	42,289	42,898	46,615	59,843	54,288	52,195	55,841	47,710	46,559	51,378	51,610	51,506	602,731	10
4	P#4	42,289	42,898	46,615	59,843	54,288	52,195	55,841	47,710	46,559	51,378	51,610	51,506	602,731	10
5	P#5	38,060	38,608	41,954	53,859	48,859	46,975	50,257	42,939	41,903	46,240	46,449	46,355	542,458	9
6	P#6	38,060	38,608	41,954	53,859	48,859	46,975	50,257	42,939	41,903	46,240	46,449	46,355	542,458	9
7	P#7	46,518	47,187	51,277	65,827	59,717	57,414	61,425	52,481	51,215	56,516	56,771	56,656	663,004	11
8	P#8	38,060	38,608	41,954	53,859	48,859	46,975	50,257	42,939	41,903	46,240	46,449	46,355	542,458	9
9	P#9	38,060	38,608	41,954	53,859	48,859	46,975	50,257	42,939	41,903	46,240	46,449	46,355	542,458	9
10	P#10	38,060	38,608	41,954	53,859	48,859	46,975	50,257	42,939	41,903	46,240	46,449	46,355	542,458	9
	Σ	422,890	428,976	466,152	598,429	542,881	521,945	558,413	477,100	465,590	513,778	516,100	515,055	6,027,309	100
	1992														
1	P#1	71,905	67,650	66,768	70,138	79,142	75,012	73,876	91,674	66,376	72,048	78,750	67,548	880,888	14
2	P#2	51,361	48,322	47,691	50,099	56,530	53,580	52,769	65,481	47,411	51,463	56,250	48,249	629,206	10
3	P#3	51,361	48,322	47,691	50,099	56,530	53,580	52,769	65,481	47,411	51,463	56,250	48,249	629,206	10
4	P#4	51,361	48,322	47,691	50,099	56,530	53,580	52,769	65,481	47,411	51,463	56,250	48,249	629,206	10
5	P#5	46,225	43,489	42,922	45,089	50,877	48,222	47,492	58,933	42,670	46,317	50,625	43,424	566,285	9
6	P#6	46,225	43,489	42,922	45,089	50,877	48,222	47,492	58,933	42,670	46,317	50,625	43,424	566,285	9
7	P#7	56,497	53,154	52,460	55,108	62,183	58,938	58,045	72,030	52,152	56,609	61,875	53,074	692,126	11
8	P#8	46,225	43,489	42,922	45,089	50,877	48,222	47,492	58,933	42,670	46,317	50,625	43,424	566,285	9
9	P#9	46,225	43,489	42,922	45,089	50,877	48,222	47,492	58,933	42,670	46,317	50,625	43,424	566,285	9
10	P#10	46,225	43,489	42,922	45,089	50,877	48,222	47,492	58,933	42,670	46,317	50,625	43,424	566,285	9
	Σ	513,609	483,215	476,911	500,986	565,303	535,801	527,685	654,814	474,111	514,629	562,503	482,488	6,292,055	100
	1993														
1	P#1	89,368	71,824	79,823	72,456	80,564	74,960	80,294	80,892	74,004	77,654	61,593	74,101	917,533	14
2	P#2	47,073	38,242	41,436	39,829	44,011	40,165	42,734	35,832	39,728	44,387	12,355	1,027	426,819	6
3	P#3	35,892	33,504	36,709	37,227	40,135	35,420	35,954	33,451	30,151	32,419	45,304	57,864	454,030	7
4	P#4	43,085	45,910	48,278	45,724	50,805	47,281	51,054	45,467	38,115	41,393	56,098	83,432	596,642	9
5	P#5	68,502	56,210	61,055	50,009	59,090	52,252	54,276	49,596	38,895	36,175	61,506	62,123	649,689	10
6	P#6	34,533	45,317	50,585	45,066	16,327	37,430	53,252	52,016	48,305	54,983	62,306	85,307	585,427	9

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1: 6,32; P#2: 6,32; P#3: 6,31; P#4:6,30; P#5: 7,30; P#6: 8,26; P#7: 7,29; P#8: 8,28; P#9: 7,28, y P#10: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
7	P#7	88,399	47,921	70,658	65,611	70,112	63,281	66,236	64,696	58,766	65,441	71,121	98,419	830,661	12
8	P#8	55,383	42,328	55,440	47,043	55,717	49,538	51,633	51,421	46,401	49,983	57,969	94,452	657,308	10
9	P#9	59,249	36,101	42,798	40,552	44,309	39,536	41,792	43,036	40,299	46,486	65,264	107,101	606,523	9
10	P#10	79,925	80,376	91,446	88,454	94,362	87,611	94,265	95,191	87,187	89,506	49,898	45,603	983,824	15
	Σ	601,409	497,733	578,228	531,971	555,432	527,474	571,490	551,598	501,851	538,427	543,414	709,429	6,708,456	100
	1994														
1	P#1	69,763	102,697	114,110	114,068	118,533	117,038	108,992	107,236	102,259	108,625	104,669	103,541	1,271,531	12
2	P#2	38,514	107,716	115,022	114,268	118,247	107,727	88,003	66,190	39,507	56,575	55,162	47,504	954,435	9
3	P#3	67,563	84,180	105,292	102,272	105,495	100,873	95,908	90,750	85,057	92,701	88,666	90,796	1,109,553	11
4	P#4	72,616	84,873	116,490	119,915	124,573	126,831	128,634	130,505	127,319	131,534	131,365	137,475	1,432,130	14
5	P#5	49,864	56,058	91,377	98,852	102,362	100,795	97,277	96,306	92,518	89,175	87,323	92,873	1,054,780	10
6	P#6	78,093	41,316	78,322	97,974	102,882	108,560	109,648	109,492	106,307	104,651	99,073	106,583	1,142,901	11
7	P#7	89,674	49,485	61,225	84,852	92,351	96,710	110,052	109,629	105,930	104,930	105,013	112,245	1,122,096	11
8	P#8	82,905	52,503	34,794	62,856	44,795	69,607	102,886	103,644	100,311	86,290	67,510	82,906	891,007	8
9	P#9	95,308	65,150	24,678	40,687	21,294	37,309	85,064	93,268	99,584	80,197	51,264	70,172	763,975	7
10	P#10	38,702	54,571	40,961	54,704	58,360	72,307	84,505	88,300	82,369	68,930	47,741	58,797	750,247	7
	Σ	683,002	698,549	782,271	890,448	888,892	937,757	1,010,969	995,320	941,161	923,608	837,786	902,892	10,492,655	100
	1995														
1	P#1	110,240	100,985	108,976	108,152	111,366	107,596	109,895	107,547	104,010	106,321	101,642	101,987	1,278,717	12
2	P#2	58,721	75,826	106,360	102,303	107,582	104,102	92,747	95,433	88,924	87,588	78,171	75,819	1,073,576	10
3	P#3	94,416	133,078	46,373	91,002	92,681	89,981	81,002	88,495	85,673	87,320	83,960	84,708	1,058,689	10
4	P#4	132,740	129,083	144,601	140,384	142,102	139,228	126,695	140,202	136,280	139,064	135,089	127,041	1,632,509	15
5	P#5	92,134	83,634	78,666	80,640	73,663	80,094	93,496	77,197	86,934	88,025	91,237	73,718	999,438	9
6	P#6	107,569	60,337	52,450	46,658	45,672	52,696	112,236	95,803	108,381	102,654	105,232	67,121	956,809	9
7	P#7	87,436	60,786	85,440	74,455	86,831	94,714	114,245	113,646	110,900	109,374	112,695	48,088	1,098,610	10
8	P#8	50,636	66,482	59,266	98,374	92,017	94,191	91,490	96,964	89,375	81,858	83,165	25,603	929,421	9
9	P#9	63,474	55,564	99,707	97,269	95,440	89,321	87,869	93,625	90,954	75,647	76,364	12,718	937,952	9
10	P#10	41,968	61,638	13,673	4,024	80,352	77,760	80,352	80,352	77,760	80,352	77,760	80,352	756,343	7
	Σ	839,334	827,413	795,512	843,261	927,706	929,683	990,027	989,264	979,191	958,203	945,315	697,155	10,722,064	100
	1996														
1	P#1	103,479	64,615	91,973	66,954	94,520	96,562	95,933	78,842	91,203	102,489	69,770	75,866	1,032,206	10
2	P#2	72,863	69,962	92,388	85,695	79,043	78,542	67,242	55,709	48,326	13,312	24,052	43,579	730,713	7
3	P#3	81,717	68,133	82,680	72,569	74,519	82,044	67,709	67,214	75,191	80,599	54,207	62,594	869,176	9
4	P#4	128,237	89,762	114,403	106,961	119,673	115,557	127,060	122,484	111,753	102,669	67,148	83,486	1,289,193	13
5	P#5	72,776	59,390	83,680	88,990	77,388	84,927	76,343	78,860	73,001	91,623	58,204	70,188	915,370	9
6	P#6	102,324	66,959	89,864	85,104	79,695	96,941	94,549	84,708	85,483	88,260	67,429	84,212	1,025,528	10

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1: 6,32; P#2: 6,32; P#3: 6,31; P#4: 6,30; P#5: 7,30; P#6: 8,26; P#7: 7,29; P#8: 8,28; P#9: 7,28, y P#10: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
7	P#7	106,769	16,119	105,106	105,665	101,112	103,737	100,201	100,438	99,607	113,668	81,007	98,647	1,132,076	11
8	P#8	87,543	58,360	91,838	96,209	77,618	69,697	60,419	80,581	77,901	88,590	64,982	76,612	930,350	9
9	P#9	85,201	45,011	92,429	101,389	94,457	90,140	88,898	86,223	83,511	97,474	68,508	84,096	1,017,337	10
10	P#10	80,352	75,168	80,352	75,168	80,352	77,760	75,168	80,352	77,760	80,352	77,760	77,760	938,304	9
	Σ	921,261	613,479	924,713	884,704	878,377	895,907	853,522	835,411	823,736	859,036	633,067	757,040	9,880,253	100
	1997														
1	P#1	80,808	69,215	69,047	58,674	72,258	68,265	70,043	65,057	56,554	55,077	48,756	49,973	763,727	10
2	P#2	41,389	34,467	40,249	89,786	104,302	97,073	97,324	95,012	83,476	87,753	84,490	77,699	933,020	12
3	P#3	62,079	49,180	49,872	32,841	69,737	67,615	61,639	55,267	46,268	41,236	36,045	36,941	608,720	8
4	P#4	85,020	73,599	77,570	64,103	84,940	80,940	77,259	78,314	72,384	65,170	60,594	49,356	869,249	11
5	P#5	64,349	58,125	61,496	56,469	62,848	63,696	58,200	69,009	60,401	56,587	53,076	48,876	713,132	9
6	P#6	84,343	73,154	73,607	62,762	75,601	67,567	60,650	54,975	50,009	46,976	36,568	53,880	740,092	9
7	P#7	98,764	84,951	86,463	77,603	89,134	92,051	83,183	79,203	73,369	80,591	79,228	67,477	992,017	12
8	P#8	76,528	64,043	62,367	52,446	68,286	64,722	59,673	60,592	57,071	53,003	50,595	50,963	720,289	9
9	P#9	84,059	71,435	70,629	63,741	76,956	72,789	70,301	63,351	53,592	53,470	50,994	50,224	781,541	10
10	P#10	84,891	78,289	84,456	78,201	68,849	76,128	78,601	76,779	71,979	72,493	66,518	60,793	897,977	11
	Σ	762,230	656,458	675,756	636,626	772,911	750,846	716,873	697,559	625,103	612,356	566,864	546,182	8,019,764	100
	1998														
1	P#1	41,409	87,993	111,598	105,041	105,041	108,764	120,286	118,294	116,894	121,319	115,730	118,808	1,271,177	14
2	P#2	78,802	77,242	93,486	94,784	94,784	87,504	96,487	91,638	92,329	87,915	87,768	91,238	1,073,977	12
3	P#3	33,240	60,479	52,596	72,500	72,500	76,547	80,735	74,373	73,881	35,157	59,077	74,241	765,326	9
4	P#4	47,939	40,189	68,226	72,140	72,140	10,576	-	38,546	55,597	59,901	58,170	55,143	578,567	6
5	P#5	49,476	29,875	81,854	90,942	90,942	87,010	85,377	84,179	78,738	89,874	101,414	95,220	964,901	11
6	P#6	54,344	52,543	70,619	57,108	57,108	91,061	90,842	83,758	77,803	82,947	81,065	30,115	829,313	9
7	P#7	76,340	64,021	91,354	93,335	93,335	90,182	93,267	47,244	61,965	73,092	70,405	71,269	925,809	10
8	P#8	54,893	59,627	81,553	84,847	84,847	83,676	83,131	80,610	78,499	82,081	30,896	71,988	876,648	10
9	P#9	50,202	55,190	72,743	72,230	72,230	37,077	79,407	75,003	47,791	40,009	67,541	61,187	730,610	8
10	P#10	57,688	56,480	67,480	81,451	81,451	81,335	89,013	85,400	85,432	86,727	63,776	72,358	908,591	10
	Σ	544,333	583,639	791,509	824,378	824,378	753,732	818,545	779,045	768,929	759,022	735,842	741,567	8,924,919	100
	1999														
1	P#1	118,163	109,095	120,654	116,314	119,273	113,170	116,353	113,970	108,976	110,364	105,860	113,470	1,365,662	14
2	P#2	93,810	48,844	104,059	95,830	101,282	108,190	110,602	97,127	98,194	93,106	70,653	58,549	1,080,246	11
3	P#3	73,417	66,628	73,303	88,377	71,196	104,308	115,272	102,812	107,221	96,089	78,821	85,340	1,062,784	11
4	P#4	56,459	49,078	39,846	25,017	15,786	6,841	-	73,194	114,381	111,025	107,221	90,313	689,161	7
5	P#5	34,600	33,682	59,950	68,386	73,641	74,583	77,239	70,165	63,764	63,550	56,849	57,035	733,444	8
6	P#6	72,550	66,571	74,642	72,238	73,195	68,620	66,823	66,618	60,810	60,284	56,860	50,563	789,774	8
7	P#7	72,112	64,926	72,706	62,998	63,829	61,422	61,708	53,919	82,636	91,565	81,012	90,760	859,593	9

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1: 6,32; P#2: 6,32; P#3: 6,31; P#4:6,30; P#5: 7,30; P#6: 8,26; P#7: 7,29; P#8: 8,28; P#9: 7,28, y P#10: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
8	P#8	83,798	91,567	92,512	94,255	101,623	70,372	78,146	77,198	72,924	73,633	69,854	72,916	978,798	10
9	P#9	68,345	62,056	62,400	58,484	63,514	67,810	70,957	70,623	67,488	68,596	67,618	66,246	794,137	8
10	P#10	75,554	74,651	76,606	93,149	97,201	92,142	97,318	89,124	81,866	86,080	78,509	79,352	1,021,552	11
11	P#10R	-	-	-	-	-	-	-	-	-	97,947	119,996	122,099	340,042	4
	Σ	748,808	667,098	776,678	775,048	780,540	767,458	794,418	814,750	858,260	952,239	893,253	886,643	9,715,193	100
	2000														
1	P#1	112,495	100,576	96,822	55,144	86,624	83,267	77,214	73,699	72,150	63,433	58,132	61,728	941,284	10
2	P#2	73,021	64,480	77,444	68,072	75,267	60,222	49,577	48,968	47,418	45,166	42,034	36,415	688,084	7
3	P#3	72,063	72,206	89,763	83,831	95,648	93,115	75,886	74,741	81,259	69,978	50,248	56,721	915,459	10
4	P#4	81,949	22,826	56,853	107,990	116,283	107,930	92,848	96,382	97,802	98,549	99,945	98,223	1,077,580	12
5	P#5	46,963	48,297	63,635	59,977	63,415	58,286	54,135	56,132	52,162	50,791	48,836	54,255	656,884	7
6	P#6	51,422	51,142	53,483	48,561	69,192	51,721	47,181	44,768	41,546	48,508	47,411	52,316	607,251	7
7	P#7	88,864	86,756	93,250	87,210	93,392	83,345	77,283	82,509	79,401	76,714	68,606	67,917	985,247	11
8	P#8	70,693	67,295	74,135	69,586	74,410	63,482	57,800	54,236	39,955	44,907	47,606	47,655	711,760	8
9	P#9	66,745	60,482	66,198	59,956	64,662	56,597	50,008	50,004	49,747	43,010	38,956	40,752	647,117	7
10	P#10	75,426	71,610	74,517	74,200	86,643	68,075	65,541	67,235	61,526	63,103	58,367	59,656	825,899	9
11	P#10R	117,243	110,820	113,074	107,041	118,886	105,307	94,837	85,206	62,322	103,715	113,409	115,050	1,246,910	13
	Σ	856,884	756,490	859,174	821,568	944,422	831,347	742,310	733,880	685,288	707,874	673,550	690,688	9,303,475	100
	2001														
1	P#1R	60,320	50,491	58,912	56,567	54,940	60,014	101,036	79,048	108,016	116,675	105,726	84,191	935,936	9
2	P#2R	36,817	36,561	45,486	52,569	46,029	49,126	89,786	80,384	102,109	102,391	91,470	87,545	820,273	8
3	P#3R	52,674	49,900	52,992	54,146	56,041	56,793	81,131	84,365	86,993	87,784	74,629	71,582	809,030	8
4	P#4R	99,645	89,461	100,104	91,913	90,440	82,200	81,658	86,293	75,981	84,947	66,598	62,317	1,011,557	10
5	P#5R	55,615	44,433	112,662	108,769	95,440	104,014	87,914	92,797	87,058	90,408	69,067	54,420	1,002,597	10
6	P#6R	53,579	43,871	50,554	51,907	83,760	86,485	71,522	80,640	75,852	72,323	69,581	55,260	795,334	8
7	P#7R	70,392	74,120	110,319	104,356	102,516	111,127	90,210	99,493	88,280	94,619	84,197	75,845	1,105,474	11
8	P#8R	45,177	43,373	47,944	52,627	99,853	86,957	89,044	87,816	86,756	88,595	85,894	78,290	892,326	9
9	P#9R	40,114	33,830	41,441	48,916	100,998	97,258	76,240	77,841	75,397	72,206	73,336	65,507	803,084	8
10	P#10	55,066	48,388	54,533	49,745	-	-	-	-	-	-	-	-	207,732	2
11	PR ZARCO				670	92,372	90,788	93,436	92,074	88,020	86,289	67,978	128,857	740,484	7
12	P#10R	113,076	101,369	115,063	114,238	122,867	116,726	98,747	98,291	74,978	75,357	76,894	63,720	1,171,326	11
	Σ	682,475	615,797	790,010	786,423	945,256	941,488	960,724	959,042	949,440	971,594	865,370	827,534	10,295,153	100
	2002														
1	P#1R	98,919	99,007	93,982	82,727	38,620	45,487	79,698	82,167	76,358	81,021	42,608	62,372	882,966	10
2	P#2R	37,289	-	27,472	97,112	92,910	78,794	82,037	75,984	71,047	70,951	64,271	62,797	760,664	9

¹Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1 y P#1R: 6,32; P#2 y P#2R: 6,32; P#3 y P#3R: 6,31; P#4 y P#4R: 6,30; P#5 y P#5R: 7,30; P#6 y P#6R: 8,26; P#7 y P#7R: 7,29; P#8 y P#8R: 8,28; P#9 y P#9R: 7,28; P#10, P#10R y PR ZARCO: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total

Tabla E1. Volúmenes de extracción asumidos durante la calibración para los pozos de CESPE operados en el Valle de Guadalupe. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³). Continuación

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
3	P#3R	73,119	67,078	80,654	73,503	76,791	62,881	68,245	55,706	48,094	47,757	45,782	48,746	748,356	8
4	P#4R	67,526	62,483	67,044	42,998	59,202	59,686	58,029	51,281	42,040	42,790	2,455	-	555,534	6
5	P#5R	80,225	77,397	83,068	73,786	76,785	57,353	56,259	47,929	57,591	57,984	53,932	44,903	767,212	9
6	P#6R	69,442	58,254	58,874	46,653	58,149	48,952	43,729	39,680	10,661	13,540	38,558	30,312	516,804	6
7	P#7R	92,926	90,920	89,736	85,004	95,085	90,369	70,440	49,496	50,260	51,214	49,034	48,281	862,765	10
8	P#8R	81,018	85,235	91,028	64,542	91,459	92,107	91,444	92,683	90,217	90,030	62,364	82,249	1,014,376	11
9	P#9R	65,827	69,466	73,489	72,306	68,503	70,816	67,340	64,521	59,176	45,895	57,036	58,028	772,403	9
10	P R ZARCO	118,157	108,740	74,479	88,491	67,119	83,964	88,116	87,151	78,258	67,057	67,283	72,239	1,001,054	11
11	P#10R	68,721	55,763	63,648	84,717	99,780	101,044	100,755	98,141	92,360	97,692	107,185	95,953	1,065,759	12
	Σ	853,169	774,343	803,474	811,839	824,403	791,453	806,092	744,739	676,062	665,931	590,508	605,880	8,947,893	100

Tabla E1A. Volúmenes de extracción para el periodo 2003-2005. Este volumen ha sido estimado a través de la media aritmética de los gastos de extracción asumidos para los pozos operados por la CESPE en el Acuífero del Valle de Guadalupe durante el periodo 1990-2002. Número total de aprovechamientos: 10 en promedio. Los volúmenes mensuales están dados en (m³)

#	TDO ²	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total	%
A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
	2003	/	2005												
1	P#1R	82,668	80,310	87,745	80,141	84,554	84,197	90,056	86,966	84,549	88,516	79,111	81,780	1,010,594	12
2	P#2R	54,909	52,869	67,888	75,939	78,368	74,476	74,403	69,395	65,066	64,425	58,712	56,711	793,160	10
3	P#3R	60,131	62,948	62,259	65,787	70,005	71,256	70,322	68,233	65,737	63,032	59,197	63,431	782,339	9
4	P#4R	73,133	63,171	74,812	74,162	79,328	71,832	68,765	78,656	77,419	78,878	72,116	72,451	884,723	11
5	P#5R	56,651	51,359	69,436	69,929	70,413	69,545	67,396	66,619	62,491	65,210	62,999	61,013	773,061	9
6	P#6R	63,859	52,310	59,863	57,407	61,644	65,470	68,159	65,872	60,498	62,205	61,663	58,095	737,045	9
7	P#7R	78,519	60,566	78,408	77,134	81,427	81,489	79,431	75,086	73,799	78,802	74,648	73,040	912,350	11
8	P#8R	62,349	57,798	62,777	65,773	71,571	68,109	69,331	71,509	66,210	67,116	58,337	63,323	784,203	10
9	P#9R	61,576	51,911	59,364	60,599	64,781	61,517	65,655	66,259	60,681	58,195	58,033	58,123	726,695	9
10	P R ZARCO	70,546	68,651	67,220	66,266	75,788	74,825	75,076	74,557	67,243	71,619	67,256	70,675	849,721	10
	Σ	664,341	601,892	689,773	693,137	737,879	722,716	728,593	723,153	683,695	697,998	652,071	658,642	8,253,891	100

Columna A (#) = Número de obra. ²Columna B (TDO) = Tipo de obra y número de identificación oficial del aprovechamiento hidráulico en la CESPE; donde P = Pozo. Los datos de las Columnas C-O corresponden al volumen asumido durante la calibración del modelo de flujo del Acuífero del Valle de Guadalupe para los pozos de CESPE y están dados en (m³), donde (-) = No dato en el registro. Celdas del P#1R: 6,32; P#2R: 6,32; P#3R: 6,31; P#4R: 6,30; P#5R: 7,30; P#6R: 8,26; P#7R: 7,29; P#8R: 8,28; P#9R: 7,28; P#10R y PR ZARCO: 8,27. La Columna P señala el porcentaje de extracción desarrollado en el pozo en cuestión, el cual es relativo al volumen anual total.

APÉNDICE F

En este apéndice se presentan los valores numéricos de los parámetros empleados durante la simulación del flujo de agua subterránea en el Acuífero del Valle de Guadalupe.

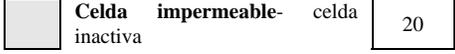
Explicación:

Tabla F1. Razón de pérdida por evapotranspiración estimada

Tabla F2. Porcentaje de infiltración estimado como recarga vertical

Tabla F3. Datos de la topografía del basamento impermeable estimada

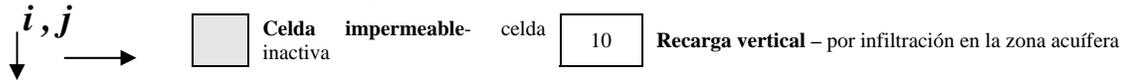
Tabla F1. Razón de pérdida por evapotranspiración estimada en la calibración del modelo y considerada constante durante el periodo completo de simulación (1984-2005)

i, j 

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
1																																								
2																													5	5	5	5	5							
3																													5	5	5	5	5	5						
4																												5	5	5	5	5	5	5						
5																											5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
6															5												5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5	5
7														5	5											5	5	5	5	5	5	5	5	5			5	5	5	
8										5	5	5		5	5	5					20	20		5	5	5	5	5	5	5										
9									5	5	5	5	5	5	5	20	20	20	20		20	20	5	5	5	5	5	5												
10								5	5	5	5	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	5	5		5	5	5												
11							5	5	5	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	5	5		5	5	5											
12							5	5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20																	
13							5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20																		
14						5	5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20																			
15						5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20																				
16					5	5	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20																								
17					5	20	20	20	20	20	20	20																												
18						20	20	20	20	20	20	20																												
19				20	20	20	20	20																																
20			20	20	20	20	20	20																																
21			20	20	20	20	20																																	
22		20	20	20	20																																			
23		20	20																																					

VALLE DE GUADALUPE

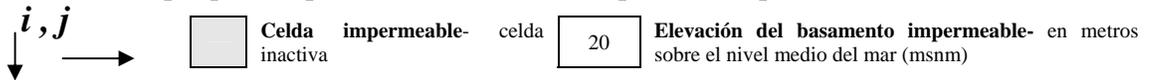
Tabla F2. Porcentaje de infiltración estimado como recarga vertical durante la calibración del modelo y considerado constante durante el periodo completo de simulación (1984-2005)



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
1																																						
2																																						
3																																						
4																																						
5																																						
6																																						
7																																						
8																																						
9																																						
10																																						
11																																						
12																																						
13																																						
14																																						
15																																						
16																																						
17																																						
18																																						
19																																						
20																																						
21																																						
22																																						
23																																						

VALLE DE GUADALUPE

Tabla F3. Datos de la topografía del basamento impermeable estimada, correspondiente al Acuífero del Valle de Guadalupe, que se suponen constante durante el período completo de simulación



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36				
1																																								
2																												280	280	280	280	280								
3																												280	280	280	280	280								
4																											280	280	280	280	280	280								
5																											280	275	190	145	170	240	305	280	280	280				
6																280											295	205	130	100	290	275	300	280	280	280				
7															280	295											310	225	145	85	200	270	295			280	280			
8																																								
9																																								
10																																								
11																																								
12																																								
13																																								
14																																								
15																																								
16																																								
17																																								
18																																								
19																																								
20																																								
21																																								
22																																								
23																																								

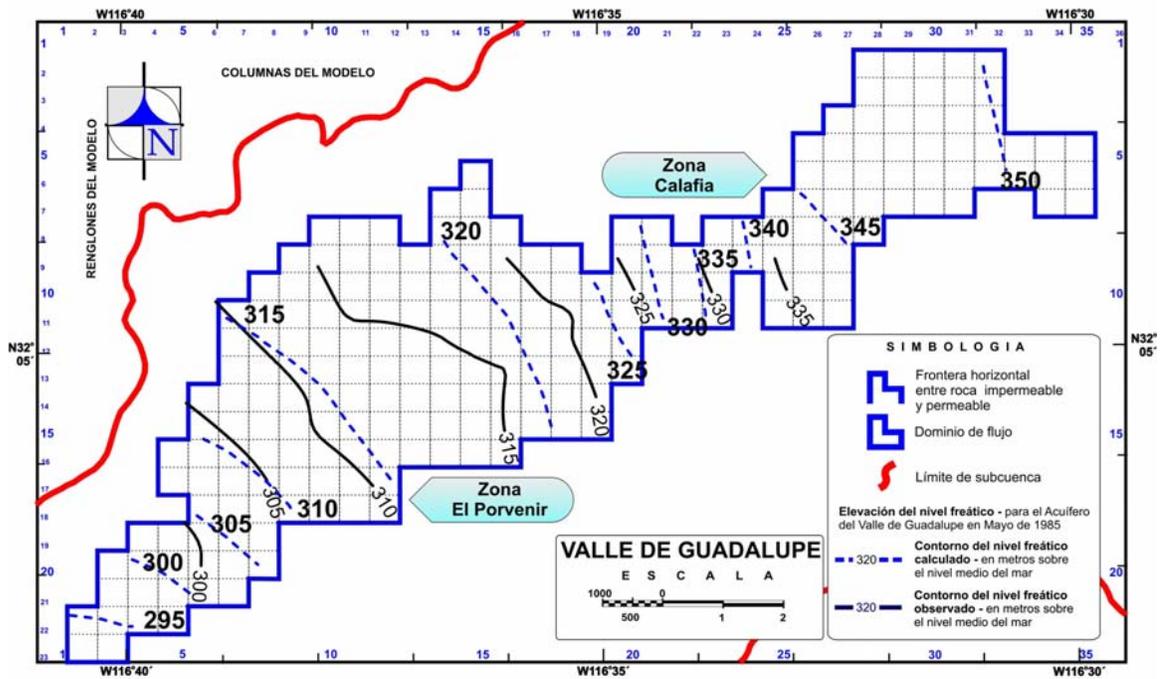
VALLE DE GUADALUPE

APÉNDICE G

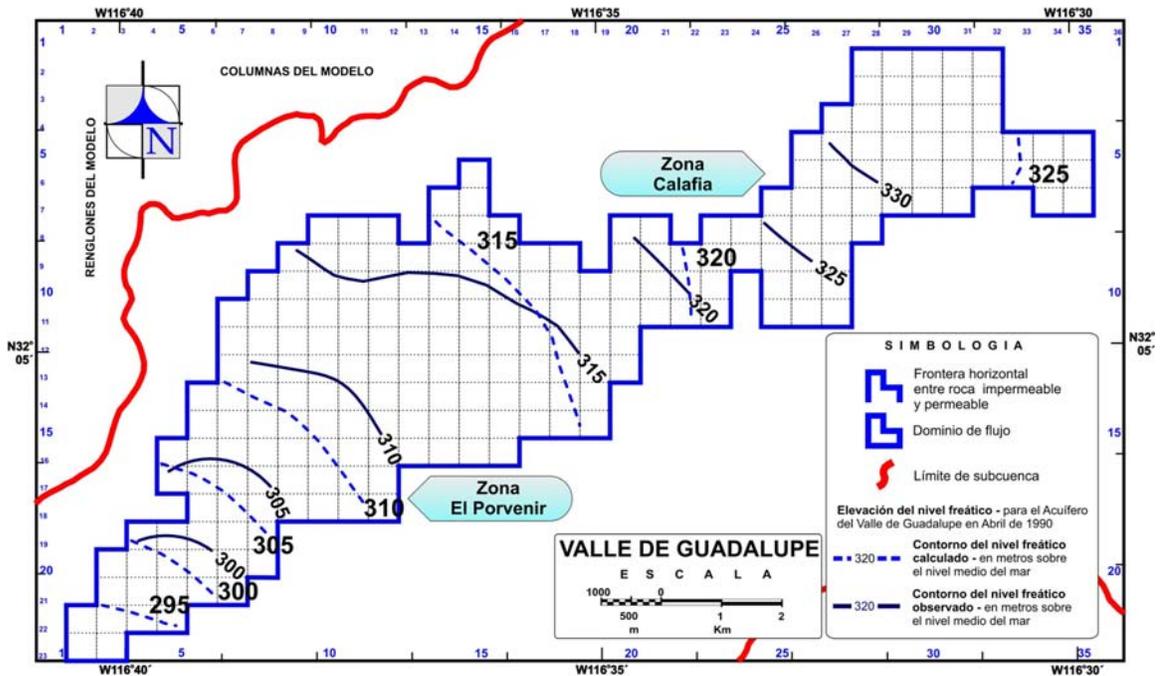
En este apéndice se presenta las configuraciones de la superficie freática simuladas con el modelo hidrogeológico del Acuífero del Valle de Guadalupe, así como aquellas que se emplean para la calibración del mismo, estas últimas se elaboran con información de la CNA y la generada en las campañas de muestreo 1 a 6.

Explicación:

Para el caso particular analizado en este trabajo se supone que son las distribuciones del nivel freático observado en la zona de estudio en las fechas establecidas.

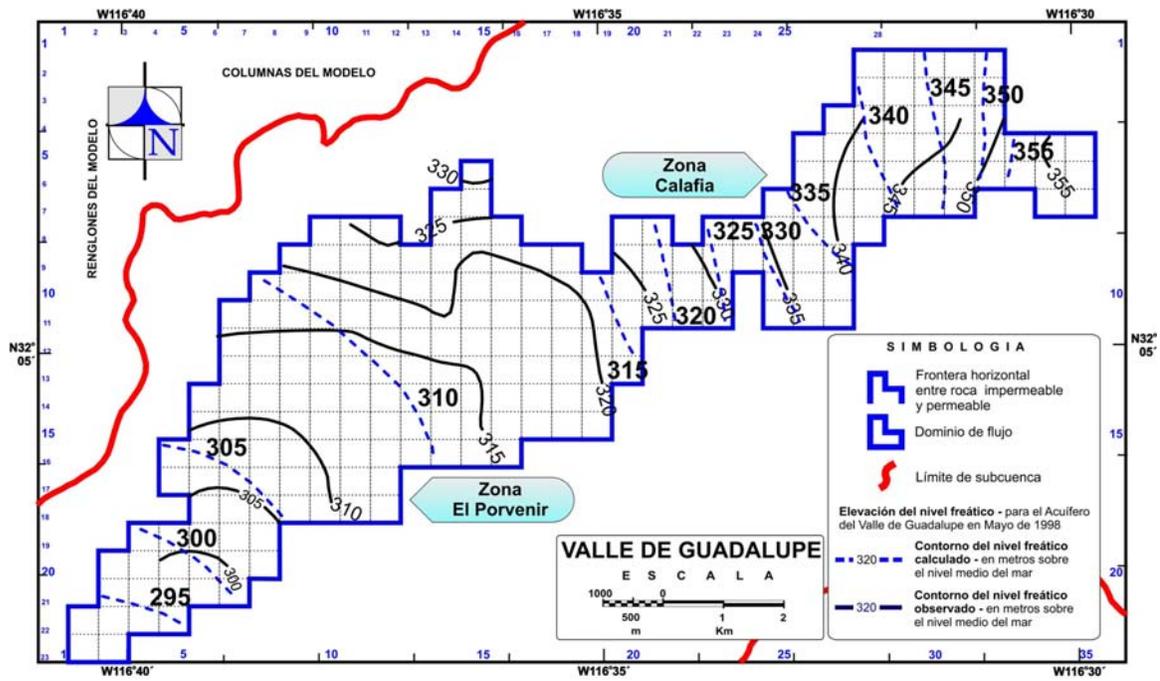


a)

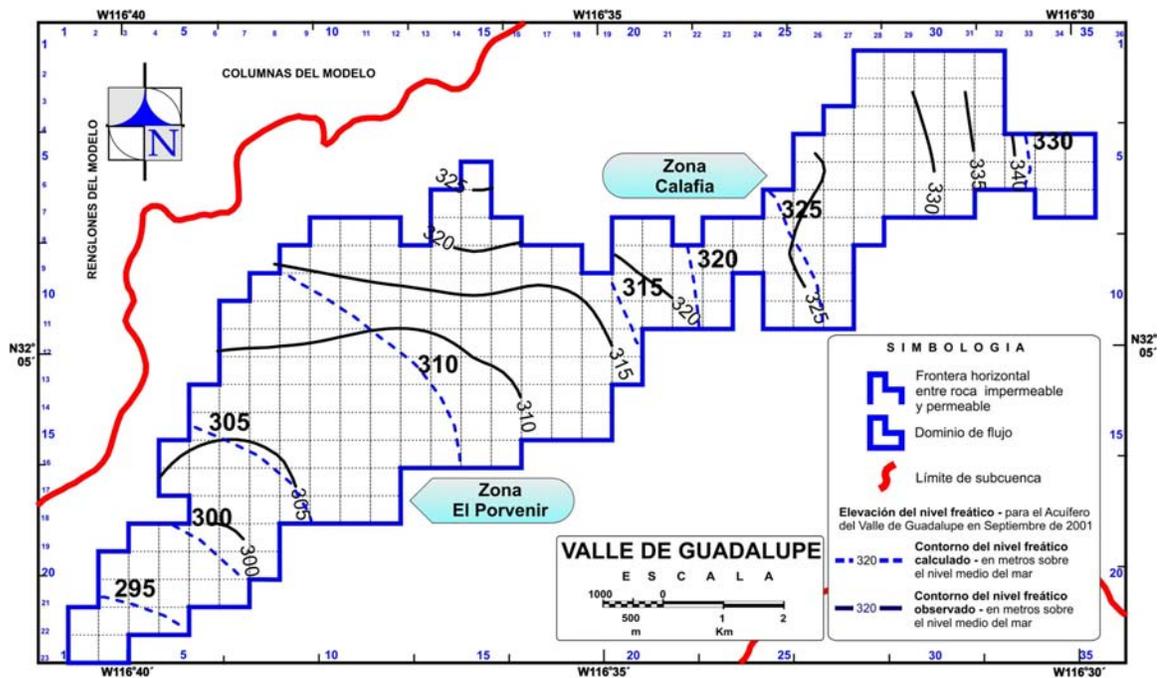


b)

Figura G1. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Mayo de 1985 (15 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 1990 (74 meses de simulación)

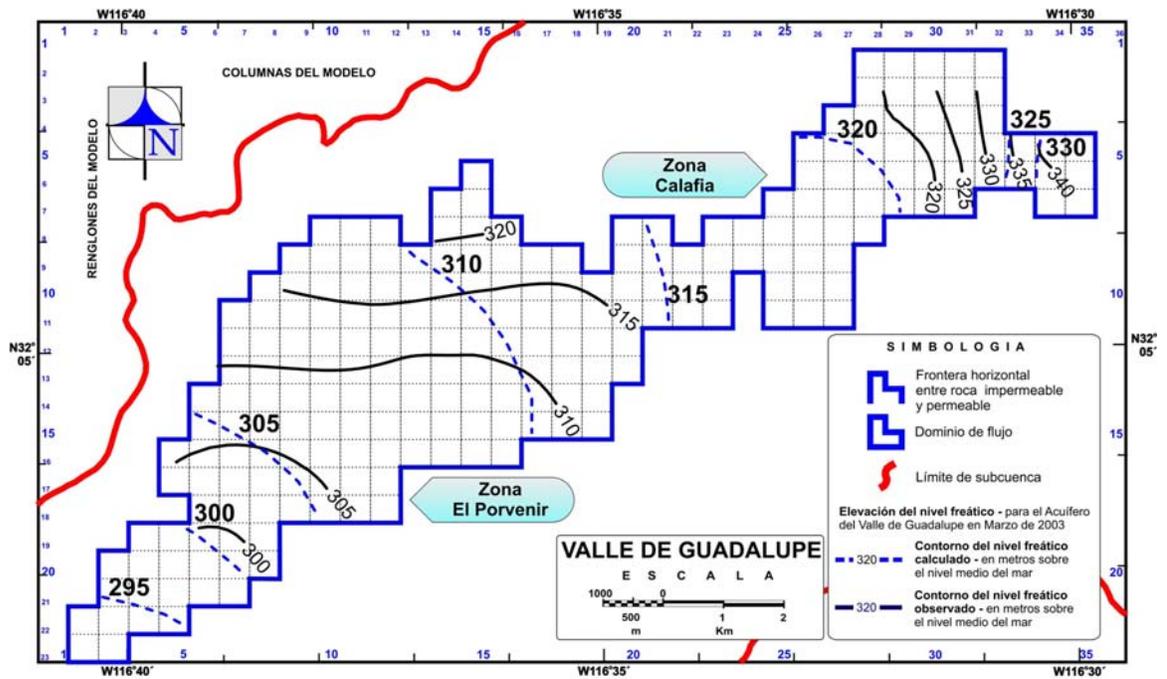


a)

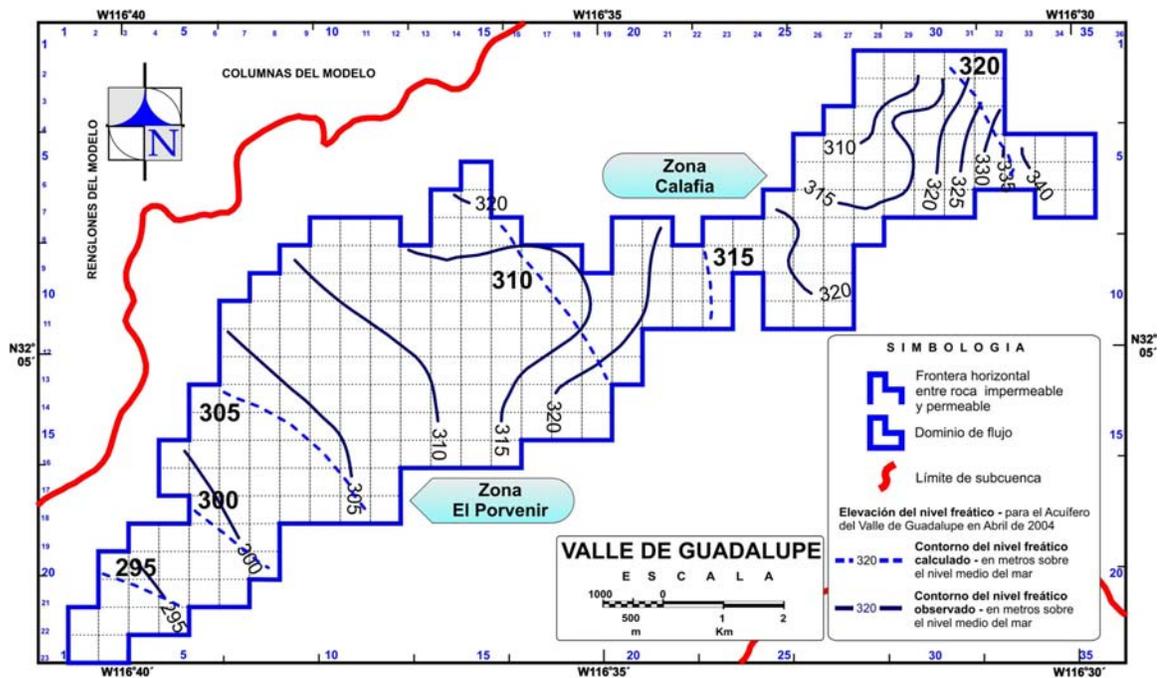


b)

Figura G2. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Mayo de 1998 (171 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Septiembre de 2001 (211 meses de simulación)

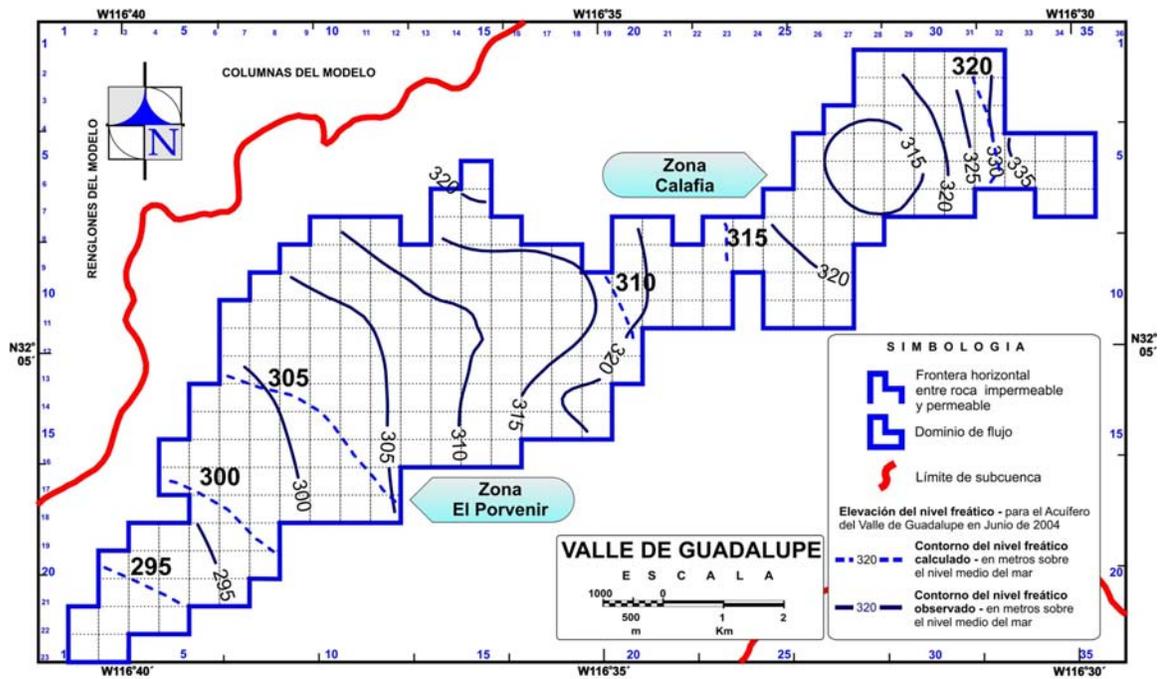


a)

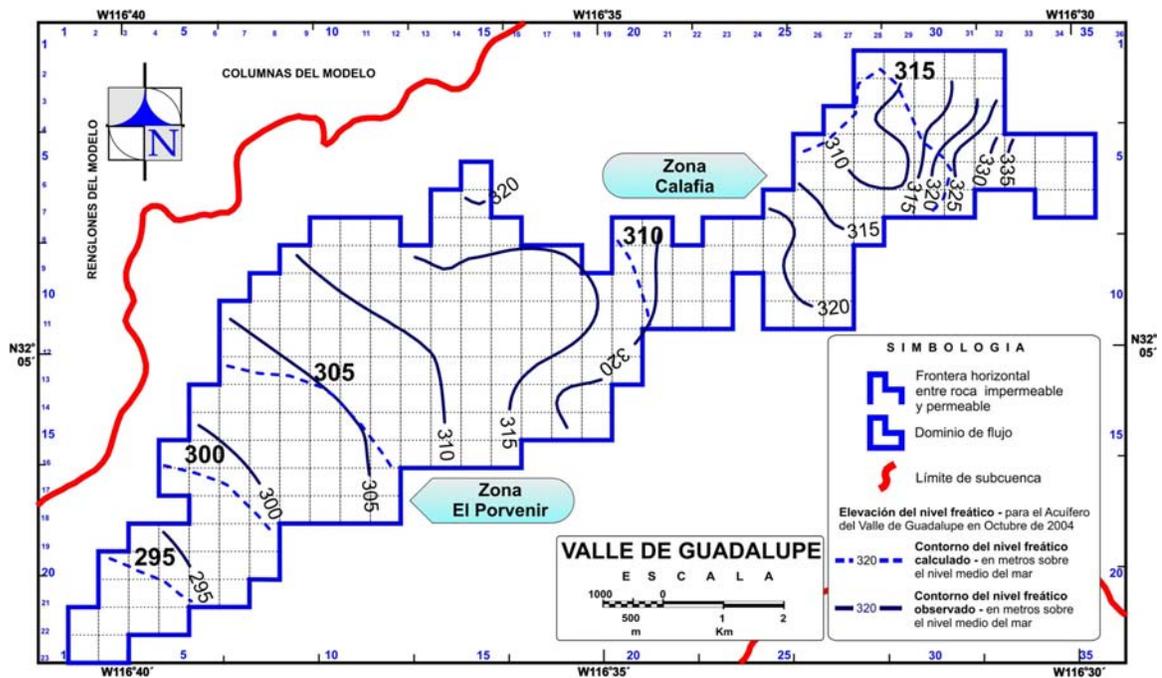


b)

Figura G3. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Marzo de 2003 (229 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Abril de 2004 (242 meses de simulación)



a)



b)

Figura G4. Configuraciones de la superficie freática. a) En estado transitorio, Junio de 2004 (244 meses de simulación), y b) En estado transitorio, Octubre de 2004 (248 meses de simulación)

APÉNDICE H

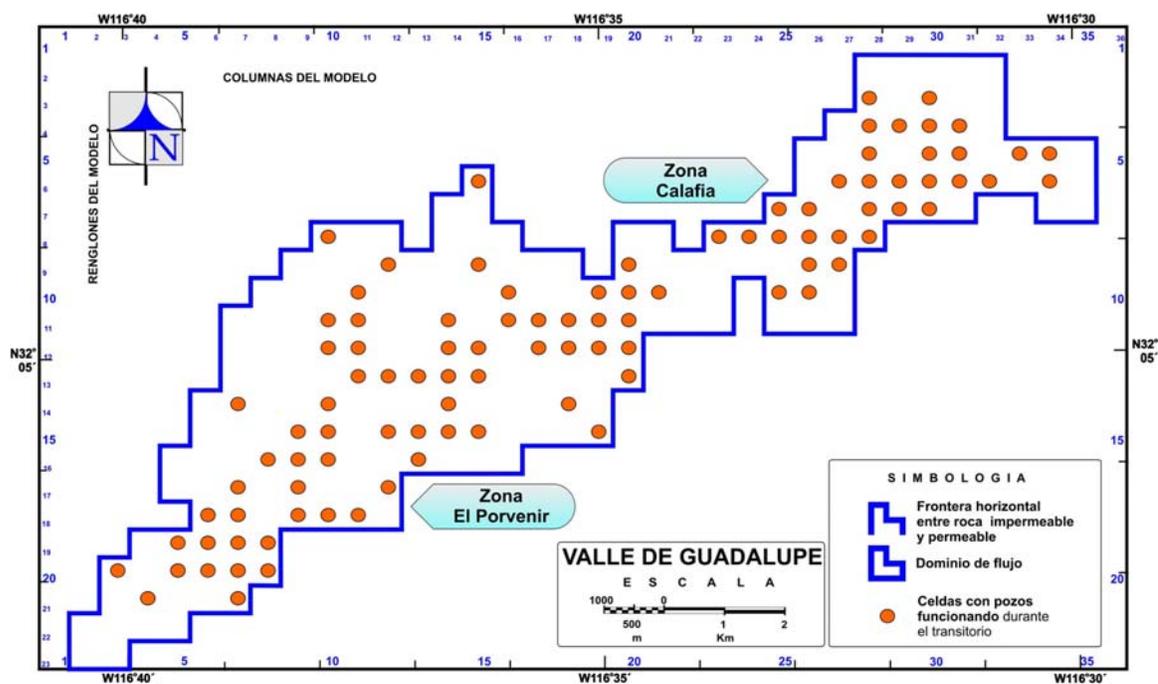


Figura H1. Distribución de celdas con pozos funcionando durante el transitorio, la cual genera los mejores resultados de la simulación

ANEXO I

Información generada durante las campañas de Muestreo en el Valle de Guadalupe, proyecto “Diagnóstico geohidrológico para un manejo sustentable del Valle de Guadalupe, Ensenada, México (Proyecto CONACYT 2003-2005)”.



1^{er} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2001	7.4	1,390	697	11.7	8.2	0.4
VG2002	7.6	1,589	810	15.7	12.1	-
VG2003	7.7	926	450	19.8	8.6	0.6
VG2005	8.0	1,026	516	17.0	9.9	0.4
VG2006	7.4	703	353	20.8	9.0	-
VG2007	7.3	950	450	16.4	6.3	1.3
VG2008	7.2	1,479	742	18.3	4.6	1.0
VG2010	7.5	723	362	16.1	7.9	0.9
VG2011	7.5	686	343	12.4	8.8	1.3
VG2012	7.1	1,384	700	18.4	5.4	2.3
VG2014	7.6	1,891	950	20.3	9.7	0.5
VG2015	7.7	1,423	713	19.2	8.7	0.2
VG2016	7.9	1,238	618	17.5	11.7	0.5
VG2017	7.5	2,750	1,370	21.4	9.1	0.8
VG2019	7.6	1,439	720	21.2	7.6	0.7
VG2020	7.6	1,324	663	21.0	8.0	0.6
VG2021	7.5	2,130	1,060	22.3	9.2	0.8
VG2022	7.2	802	399	20.4	6.0	2.3
VG2023	8.0	778	389	20.9	7.4	0.3
VG2024	7.9	906	453	21.8	13.4	0.4
VG2025	8.0	1,208	605	16.9	13.4	0.3
VG2079	7.4	808	397	15.0	8.1	0.6

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}$ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de $\text{HCO}_3^- / \text{CO}_3^{2-}$ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ‘ - ‘ = Sin Dato.

2^{do} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	STD (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2001	7.7	1,669	1,171	-	9.4	0.3
VG2002	7.7	1,926	1,349	-	14.6	0.3
VG2003	7.8	1,263	884	-	11.2	0.4
VG2005	8.1	1,383	969	-	13.2	0.2
VG2006	6.9	946	663	-	5.7	1.1
VG2007	7.5	654	668	-	9.9	0.3
VG2008	7.0	1,839	1,291	-	5.7	0.6
VG2010	7.3	1,223	864	21.0	7.8	0.6
VG2011	7.6	839	588	15.0	11.1	0.4
VG2012	6.9	1,847	1,281	20.0	6.9	0.8
VG2014	7.8	2,560	1,790	21.0	11.6	0.2
VG2015	7.6	1,902	1,327	20.5	11.1	0.3
VG2016	7.5	1,668	1,171	19.5	13.2	0.3
VG2017	7.5	3,420	2,390	22.0	9.8	0.4
VG2019	7.3	1,885	1,320	23.0	8.9	0.5
VG2020	7.4	1,907	1,324	24.0	8.6	0.5
VG2021	7.3	4,020	2,820	23.5	12.0	0.5
VG2023	7.7	1,106	775	22.5	8.5	0.3
VG2024	7.8	1,245	874	23.0	9.6	0.4
VG2025	8.0	1,376	964	19.0	9.2	0.4
VG2031	7.8	1,688	1,185	18.0	10.1	0.2
VG2032	7.5	2,950	2,060	20.0	9.6	0.3
VG2034	7.4	2,320	1,551	20.0	10.5	0.9
VG2035	7.5	1,097	768	17.0	8.2	0.2
VG2036	7.5	1,558	1,088	17.5	9.2	0.4
VG2038	7.5	874	613	17.0	8.6	0.2
VG2055	7.6	3,290	2,280	21.0	15.0	0.5
VG2056	6.4	2,380	1,586	20.0	7.4	1.4
VG2057	6.5	1,475	1,032	20.0	6.9	2.3
VG2061	7.2	650	454	19.5	5.1	0.5
VG2062	7.4	600	421	17.5	6.1	0.2
VG2064	7.8	657	460	22.0	5.0	0.1
VG2065	7.4	951	666	19.0	4.7	0.1
VG2066	7.3	733	512	21.0	6.4	0.2
VG2069	7.3	1,326	933	18.0	10.0	0.2
VG2070	8.3	1,256	870	19.0	8.8	-
VG2071	7.2	1,028	729	21.0	7.0	0.4
VG2075	6.6	1,653	1,155	19.0	10.0	1.9
VG2079	7.2	1,038	734	18.0	8.5	0.6
VG2082	7.3	227	159	17.0	8.1	0.1
VG2085	7.0	899	630	24.0	6.6	0.1
VG2086	6.5	516	360	19.0	50.3	1.2
VG2087	6.7	423	296	18.0	50.0	1.0

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.

3^{er} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)	T (°C)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2003	7.2	1,274	891	22.5	5.6	0.6
VG2001	7.0	1,868	1,314	24.0	5.0	0.5
VG2002	7.4	2,130	1,445	24.0	75.9	0.5
VG2005	7.2	1,595	1,124	22.0	139.5	1.8
VG2006	6.6	775	397	23.3	3.0	0.6
VG2006	6.7	778	413	20.1	64.0	1.8
VG2007	7.2	794	399	24.0	98.0	1.0
VG2008	7.1	1,926	959	22.1	54.8	0.7
VG2011	7.4	753	378	18.0	99.2	1.0
VG2012	6.7	1,521	789	21.0	70.1	1.9
VG2014	7.3	1,993	960	21.0	127.0	0.8
VG2015	7.5	-	-	-	106.8	0.7
VG2016	7.5	-	-	-	152.8	0.7
VG2017	7.2	-	-	-	159.5	2.5
VG2018	7.2	280	140	19.5	138.4	1.1
VG2019	7.4	1,591	794	26.0	8.5	1.5
VG2020	6.4	1,524	749	26.0	9.3	1.0
VG2021	6.8	1,968	990	26.0	10.6	1.3
VG2022	7.4	862	432	22.0	8.4	0.4
VG2023	7.4	856	425	21.0	8.7	0.3
VG2024	7.3	1,040	517	21.0	9.5	0.5
VG2025	7.4	1,334	663	21.0	10.9	0.5
VG2030	7.1	1,039	536	21.0	10.4	0.9
VG2034	6.6	2,060	1,090	27.0	12.1	2.2
VG2035	7.2	970	488	22.0	9.1	0.5
VG2036	7.3	1,331	685	22.0	10.0	1.2
VG2038	7.2	769	391	21.0	9.3	1.4
VG2041	7.4	1,116	558	18.0	9.5	0.1
VG2042	7.3	1,043	522	22.0	10.6	0.2
VG2048	7.5	1,377	703	21.0	13.9	0.2
VG2053	7.9	876	442	23.0	9.0	0.1
VG2055	7.4	2,530	1,290	22.0	1.7	1.1
VG2056	7.0	1,802	878	19.0	7.4	1.5
VG2057	7.1	1,094	543	19.0	7.4	1.3
VG2059	6.8	4,070	2,040	19.0	13.2	1.7
VG2061	7.3	598	306	21.0	6.4	0.8
VG2062	7.3	580	292	24.0	6.4	0.9
VG2064	7.3	557	287	25.0	5.4	0.7
VG2065	7.1	823	434	25.0	5.4	1.2
VG2066	7.4	696	357	25.0	7.3	0.7
VG2067	7.3	439	226	24.0	5.3	0.7
VG2069	7.2	1,244	627	23.0	11.0	1.5
VG2070	8.4	1,124	561	25.0	7.5	-
VG2071	7.3	844	425	22.0	7.7	0.4
VG2072	7.5	2,500	1,280	24.0	19.5	0.4
VG2074	7.6	2,480	1,280	24.0	19.8	0.3
VG2076	7.8	1,374	682	20.0	16.4	0.1
VG2079	7.3	887	455	21.0	9.2	2.0
VG2080	7.1	1,270	642	24.0	11.4	0.6
VG2086	6.5	516	360	19.0	50.3	1.2
VG2087	6.7	423	296	18.0	50.0	1.0
VG2088	6.9	2,510	1,682	22.0	4.1	0.6
VG2089	7.4	4,120	2,070	21.0	233.5	1.9
VG2090	6.7	939	484	21.0	80.6	2.2
VG2091	7.2	1,355	684	21.0	10.9	0.6
VG2096	7.4	1,523	760	19.0	7.4	1.4

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.

3^{er} Muestreo. Continuación

Clave del sitio	pH	CE (μ S/cm)	STD (mg/L)	T (°C)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2097	7.2	985	501	19.0	5.9	0.8
VG2098	7.3	2,380	1,190	24.0	27.8	2.3
VG2099	6.9	2,510	1,260	27.0	22.1	2.5
VG2100	7.0	2,010	1,010	26.0	20.1	2.1
VG2101	7.1	993	507	25.0	14.1	1.3
VG2102	7.1	1,319	670	23.0	12.5	1.2
VG2103	7.1	1,496	752	24.0	12.5	1.2

4^{to} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE (μ S/cm)	STD (mg/L)	T (°C)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2001	7.7	1,818	-	24.0	9.6	0.1
VG2002	7.9	2,020	-	21.9	15.5	0.2
VG2003	7.8	1,176	-	22.7	10.6	0.2
VG2005	8.0	1,355	-	20.0	12.9	0.1
VG2006	7.1	898	-	22.3	6.2	0.5
VG2007	7.5	951	-	24.0	10.2	0.2
VG2008	7.4	2,010	-	21.5	6.5	0.2
VG2010	7.2	1,310	-	29.7	7.8	0.6
VG2011	7.4	852	-	21.0	11.0	0.4
VG2012	6.8	1,760	-	22.4	6.8	0.9
VG2014	7.7	2,360	-	22.8	11.9	0.2
VG2015	7.7	1,669	-	23.0	1.4	0.1
VG2016	7.7	1,663	-	22.0	14.5	0.3
VG2017	7.4	4,350	-	23.4	16.7	0.6
VG2018	7.6	2,470	-	23.6	13.5	0.4
VG2019	7.6	1,619	-	23.4	7.8	0.2
VG2020	7.4	1,754	-	23.8	9.1	0.3
VG2021	7.4	2,410	-	24.7	10.5	0.3
VG2022	7.3	1,053	-	24.5	7.9	0.3
VG2023	7.8	1,054	-	23.7	8.2	0.1
VG2024	7.7	1,235	-	24.0	9.0	0.1
VG2025	7.7	1,698	-	27.5	8.6	0.1
VG2031	7.3	1,443	-	21.5	10.2	0.5
VG2032	7.2	2,890	-	22.6	8.7	0.6
VG2033	7.3	2,920	-	22.9	7.5	0.4
VG2034	7.2	1,899	-	23.5	10.1	0.5
VG2035	7.5	1,178	-	22.5	8.9	0.2
VG2036	7.2	1,454	-	20.2	9.2	0.7
VG2038	7.5	855	-	20.0	9.0	0.2
VG2040	7.4	1,201	-	19.3	7.8	0.3
VG2042	7.4	1,186	-	19.6	8.3	0.3
VG2043	7.6	1,189	-	19.5	8.6	0.1
VG2044	7.5	1,362	-	19.8	9.1	0.3
VG2045	7.2	1,258	-	19.5	8.7	0.5
VG2048	7.4	1,575	-	22.3	9.8	0.3
VG2053	7.4	988	-	22.2	7.2	0.1
VG2055	7.5	3,050	-	22.5	16.0	0.6
VG2056	7.3	1,759	-	21.0	7.0	0.2
VG2057	7.3	1,118	-	21.9	7.0	0.2
VG2059	7.7	4,360	-	21.1	12.9	0.2
VG2062	7.6	689	-	22.0	5.5	0.1
VG2064	7.5	628	-	22.0	5.5	0.2

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.

4^{to} Muestreo. Continuación

Clave del sitio	pH	CE (μ S/cm)	STD (mg/L)	T (°C)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2065	7.4	988	-	23.0	5.1	< 0.1
VG2066	7.9	751	-	24.7	7.0	< 0.1
VG2069	7.3	1,512	-	23.5	11.0	0.4
VG2070	9.1	1,513	-	30.2	4.6	-
VG2071	7.5	1,124	-	27.6	7.3	0.2
VG2072	7.3	3,440	-	22.4	10.5	0.4
VG2074	7.7	2,830	-	22.2	16.1	0.4
VG2076	7.8	1,628	-	20.3	14.3	0.2
VG2077	7.6	2,750	-	21.9	19.7	0.4
VG2078	7.1	3,190	-	21.9	20.0	1.0
VG2079	7.3	1,040	-	22.5	8.9	0.3
VG2080	7.0	1,429	-	23.3	9.2	0.7
VG2088	6.9	2,710	-	21.5	7.3	1.1
VG2090	6.8	1,058	-	21.3	7.9	1.2
VG2091	7.7	4,770	-	21.7	25.0	0.7
VG2093	7.6	1,642	-	24.8	10.1	0.2
VG2096	7.3	1,654	-	19.6	7.0	0.5
VG2097	7.4	1,133	-	20.9	5.2	0.3
VG2098	7.3	2,920	-	22.9	25.3	0.7
VG2099	7.1	3,030	-	23.6	20.8	0.3
VG2100	7.9	2,800	-	20.1	19.3	0.4
VG2101	7.3	1,134	-	21.8	13.1	0.5
VG2102	7.3	1,471	-	21.9	10.1	0.7
VG2103	7.5	1,577	-	23.7	10.2	0.4
VG2104	7.7	965	-	21.3	7.4	0.3
VG2105	7.2	2,260	-	21.7	8.6	0.5
VG2107	7.3	1,163	-	23.0	8.4	0.4

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.

5^{to} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)	T (°C)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2001	8.0	2,390	1,365	18.2	4.2	0.2
VG2002	8.0	2,960	1,605	20.9	6.7	0.3
VG2003	8.0	1,678	923	20.1	4.8	0.4
VG2005	8.1	2,870	1,656	17.9	6.3	0.3
VG2006	7.9	1,136	716	14.0	3.0	0.9
VG2007	7.8	1,260	726	17.9	4.0	0.5
VG2008	7.7	2,970	-	19.4	2.7	1.0
VG2012	7.6	2,520	1,460	17.6	2.1	0.6
VG2014	7.6	3,470	-	23.3	5.0	0.5
VG2015	7.6	2,780	-	19.0	4.3	0.5
VG2017	7.5	4,300	-	21.5	4.5	0.7
VG2018	7.6	3,910	-	21.9	5.0	0.7
VG2019	7.6	2,520	-	21.3	3.6	0.9
VG2020	7.8	2,470	1,313	22.2	4.5	0.8
VG2021	7.6	4,790	-	21.8	5.0	1.2
VG2023	7.7	1,476	-	18.4	4.0	0.5
VG2024	7.6	1,657	-	20.5	4.2	0.6
VG2025	7.6	1,427	-	19.3	3.8	0.6
VG2035	7.5	1,608	-	18.5	3.8	0.6
VG2038	7.2	2,120	-	21.7	4.3	0.7
VG2055	7.5	4,070	-	18.3	6.2	0.5
VG2056	7.7	1,413	769	20.9	3.0	0.5
VG2057	7.7	1,948	1,055	21.1	3.2	1.0
VG2059	7.7	8,400	-	20.3	6.7	0.6
VG2061	7.8	901	497	20.4	2.5	0.5
VG2063	7.9	933	507	19.8	2.9	0.4
VG2065	7.8	1,483	812	21.1	2.2	0.6
VG2066	7.9	1,069	581	20.9	3.5	0.5
VG2067	8.0	728	389	19.7	2.2	0.3
VG2069	7.1	2,460	-	22.4	4.5	0.8
VG2079	7.7	1,950	-	18.5	3.8	0.4
VG2088	7.5	5,700	-	20.0	3.6	0.6
VG2091	7.7	7,030	-	21.5	10.1	0.6
VG2096	8.1	2,350	1,340	18.4	3.0	0.4
VG2097	7.7	3,000	1,644	20.3	2.5	0.6
VG2100	7.7	3,600	-	19.3	8.8	0.6
VG2101	7.9	3,210	-	15.1	9.0	0.4
VG2102	8.0	1,957	1,096	19.3	4.6	0.3
VG2104	8.0	1,563	898	18.2	4.6	0.4
VG2107	7.7	1,533	885	18.4	3.5	0.9
VG2121	7.8	1,217	663	20.6	2.3	<0.1
VG2122	7.6	3,430	-	18.0	9.6	0.9

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.

6^{to} Muestreo

Clave del sitio	pH	CE ($\mu\text{S/cm}$)	STD (mg/L)	T ($^{\circ}\text{C}$)	* ¹ HCl (ml)	* ² NaOH (ml)
A	B	C	D	E	F	G
VG2001	7.2	1,783	-	19.5	11.2	0.8
VG2002	7.3	2,050	-	20.6	16.2	1.2
VG2003	7.2	1,216	-	21.2	10.7	0.6
VG2004	8.0	837	-	18.9	13.3	0.4
VG2005	7.7	662	-	17.7	18.0	2.0
VG2006	6.5	663	-	19.1	5.2	1.0
VG2006	7.7	793	-	21.5	5.6	0.4
VG2007	7.7	923	-	15.8	15.9	0.4
VG2008	6.4	721	-	17.9	6.0	1.6
VG2010	7.1	786	-	16.8	5.8	0.4
VG2011	7.1	867	-	20.3	10.9	0.8
VG2014	7.2	2,250	-	21.5	12.7	0.7
VG2015	7.8	526	-	19.2	5.7	0.2
VG2016	7.4	1,184	-	19.2	11.5	0.5
VG2017	7.1	3,940	-	20.4	18.0	1.3
VG2018	7.4	2,420	-	21.0	14.0	0.6
VG2019	7.0	1,742	-	21.5	8.5	0.6
VG2020	7.0	1,645	-	18.8	10.0	0.8
VG2021	7.4	3,130	-	21.0	13.7	0.3
VG2022	7.1	429	-	20.8	7.7	0.5
VG2023	7.2	936	-	20.9	8.0	0.3
VG2025	7.0	1,289	-	17.7	10.3	1.0
VG2026	7.6	990	-	17.5	7.1	0.2
VG2027	7.6	920	-	16.7	7.6	0.1
VG2028	6.8	1,573	-	18.9	9.5	1.0
VG2030	7.4	1,199	-	21.0	10.1	0.4
VG2031	7.4	595	-	21.6	6.5	0.5
VG2032	7.3	2,760	-	18.3	8.9	0.6
VG2033	7.1	2,910	-	21.4	8.9	0.8
VG2034	7.2	2,320	-	22.3	12.2	0.7
VG2035	7.7	544	-	18.3	6.2	0.1
VG2037	7.7	1,241	-	21.3	9.4	0.1
VG2038	7.2	875	-	20.9	9.9	0.7
VG2041	7.6	1030	-	21.2	9.3	0.1
VG2048	7.4	1,482	-	19.8	12.1	0.5
VG2049	7.4	1,026	-	17.2	9.3	0.4
VG2051	7.2	1,945	-	20.3	10.6	0.6
VG2053	7.2	852	-	23.0	8.4	0.8
VG2055	7.5	2,700	-	16.9	16.7	0.7
VG2056	6.6	1,415	-	21.1	7.0	1.2
VG2069	7.0	1,526	-	22.2	12.9	1.3
VG2075	7.9	904	-	26.0	8.9	0.1
VG2076	7.7	1,352	-	24.1	7.5	0.1
VG2077	7.8	1,706	-	20.5	15.4	0.2
VG2079	7.1	1,206	-	18.3	11.3	1.1
VG2088	7.1	5,080	-	19.0	13.0	1.9
VG2089	6.7	860	-	19.8	7.5	1.0
VG2091	7.4	4,940	-	20.5	24.7	1.8
VG2096	6.9	4,030	-	17.3	7.8	0.9
VG2099	7.0	1,455	-	20.3	16.9	1.4
VG2100	7.2	1,065	-	19.2	12.4	0.8
VG2101	7.0	1,527	-	20.8	12.0	1.1
VG2102	6.9	1,028	-	18.6	7.4	0.6
VG2104	7.2	1,167	-	16.4	10.7	0.6

CE = Conductividad Eléctrica. Columna F = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=4.3 (HCl en ml). Columna G = Titulación* de HCO₃ / CO₃ para pH=8.2 (NaOH en ml). *^{1,2} Molaridad = 0.1 Normal de HCl y de NaOH. ' - ' = Sin Dato.