

Tesis defendida por
Javier González Ramírez
y aprobada por el siguiente comité

Dr. Rogelio Vázquez González

Director del Comité

M.C. Alejandro Hinojosa Corona

Miembro del Comité

Dr. Jonás De Basabe Delgado

Miembro del Comité

Dr. Jorge Torres Rodríguez

Miembro del Comité

Dr. Antonio González Fernández

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

Dr. David Hilario Covarrubias Rosales

Director de Estudios de Posgrado

22 de Febrero de 2013.

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



**Programa de Posgrado en Ciencias
En Ciencias de la Tierra**

Monitoreo y modelado de la respuesta del nivel freático ante eventos de precipitación en el
acuífero de Valle de Guadalupe, B.C.

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de
Maestro en Ciencias

Presenta:

Javier González Ramírez

Ensenada, Baja California, México

2013

Resumen de la tesis de Javier González Ramírez, presentada como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geociencias Ambientales.

Monitoreo y modelado de la respuesta del nivel freático ante eventos de precipitación en el acuífero de Valle de Guadalupe, B.C.

Resumen aprobado por:

Dr. Rogelio Vázquez González
Director de Tesis

El Valle de Guadalupe, ubicado en el municipio de Ensenada, Baja California, es la región vitivinícola de mayor importancia en el país y cuenta para su abastecimiento de agua con un acuífero libre, que se recarga de los escurrimientos de la Sierra de Juárez. Debido al crecimiento de dicha industria y a que este acuífero es una de las fuentes de abastecimiento de la Cd. de Ensenada se ha documentado una sobre explotación del mismo.

Los modelos matemáticos simulan el flujo indirectamente utilizando una ecuación gobernante la cual representa el proceso físico que ocurre en el sistema. Dicha ecuación, para el caso de acuíferos libres, se conoce en la literatura especializada como ecuación de Boussinesq y esta se basa en la Ley de Darcy y el principio de conservación de la masa.

Se modificó y adaptó un algoritmo de simulación de flujo de agua subterránea en dos dimensiones a las condiciones geohidrológicas del Valle de Guadalupe para estimar los niveles piezométricos. Para resolver el modelo numérico se empleó el método de diferencias finitas centrales con incrementos temporales y espaciales constantes. Dicho modelo considera un acuífero libre, heterogéneo y en estado transitorio, utilizando la ecuación de balance.

Se presentan los resultados del modelado y el proceso de calibración utilizando datos de nivel piezométrico proporcionados por sensores de registro continuo instalados en una red de pozos de monitoreo, así como registros de precipitación de las temporadas 2009-2010 y 2010-2011. Se logró ubicar, correlacionar y modelar eventos específicos de precipitación – recarga; lo anterior con el fin de obtener una estimación de la medida en la que estos eventos se ven reflejados directamente en el nivel del acuífero y como éste reacciona ante eventos extraordinarios simulados.

Palabras clave: **Modelo geohidrológico, precipitación, recarga, ecuación de Boussinesq, diferencias finitas.**

Abstract of the thesis presented by Javier González Ramírez, as a partial requirement to obtain the Master in science degree in Earth Sciences with orientation in Environmental Geosciences.

Monitoreo y modelado de la respuesta del nivel freático ante eventos de precipitación en el acuífero de Valle de Guadalupe, B.C.

Abstract approved by::

Dr. Rogelio Vázquez González
Director de Tesis

The Guadalupe Valley in the Ensenada municipality, Baja California, is the country's most important region for wine making and its water supply comes from an unconfined aquifer that recharges from the Sierra Juárez runoff. Because of this industry and the fact that the aquifer provides water for the consumption of the city of Ensenada, it has been documented an over exploitation of the aquifer.

Mathematical models simulate the flow indirectly using an equation that represents the physical process that occurs in the system. This equation, in the case of unconfined aquifers, is known in the specialized literature as the Boussinesq equation and it is based in the Darcy Law.

A two dimensional algorithm for underground water flow simulation was modified and adapted to the geohydrological conditions of the Guadalupe Valley. In order to solve the numerical model, the central finite differences with spatial and temporal constant increments method were used. Such model considers an heterogeneous and transient unconfined aquifer, using the balance equation.

Modelling and calibration processes are presented using the data of water table levels provided by the water level data loggers installed in a monitoring net and rainfall data of both seasons: 2009-2010 and 2010-2011. It was possible to locate, correlate and model specific rainfall-recharge events, this last with the aim of obtain an estimation of how these events are directly reflected on the water table level and how this reacts against simulated extraordinary events.

Keywords: Geohydrologic model, rainfall, recharge, Boussinesq equation, finite differences method.

Dedicatoria

A mi madre, María Hilda
Por impulsarme a ser siempre mejor...

Agradecimientos

A Anna por apoyarme en todos los sentidos a concluir con éxito éste ciclo.

A todos mis tíos y primos en Nayarit, por siempre apoyarme y creer en mí, pero en especial a mi tía Chelo, mi tío Pablo y mis primos Pablo Antonio y Ricardo.

Al Dr. Rogelio Vázquez González por todo el conocimiento transmitido en estos años de trabajo y el apoyo económico en tiempos difíciles.

A mi comité de tesis por todas sus correcciones y recomendaciones que enriquecieron de gran forma la versión final de este trabajo de tesis.

Al CICESE por brindarme la oportunidad de realizar mis estudios de posgrado.

Al personal técnico y administrativo de Ciencias de la Tierra: Alejandro Díaz, Lupita, Martha, Olimpia, Samantha, Jaime Calderón.

A mis compañeros del posgrado: Minerva, Nancy, Claudia, Mario, Cristina, Clemente, Alejandra, Viridiana, Samuel, Florian, a Francisco del Toro y Ena Gámez por datos que fueron de gran ayuda para éste trabajo.

Al personal de COTAS de Valle de Guadalupe por la información proporcionada, en especial al Ing. Carlos López por todas las facilidades para la adquisición de datos.

CONTENIDO

	Página
Resumen	i
Abstract	ii
Dedicatoria	iii
Agradecimientos	iv
Lista de figuras	viii
Lista de tablas	xi
1. Introducción	1
1.1. Justificación	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Objetivos	2
1.3.1. Objetivo general	2
1.3.2. Objetivos particulares	3
1.4. Generalidades de la zona de estudio	3
1.4.1. Localización	3
1.4.2. Geología	4
1.4.3. Hidrología	5
1.4.4. Climatología	6
2. Metodología	7
2.1. Modelo	7
2.1.1. Modelo conceptual	8
2.1.2. Modelo matemático	9
2.1.3. Modelo numérico	12
2.1.4. Diseño de modelo	16
2.1.4.1. Método de sobre relajación sucesiva	16
2.1.4.2. Condiciones de frontera	18

CONTENIDO

	Página
2.1.4.3. Condición inicial	19
2.2. Parámetros de entrada	19
2.2.1. Niveles piezométricos	19
2.2.1.1. Compendio de datos	20
2.2.1.2. Corrección barométrica	21
2.2.2. Topografía	22
2.2.3. Basamento	23
2.2.4. Conductividades hidráulicas	24
2.2.5. Coeficientes de almacenamiento	27
2.2.6. Precipitación	27
2.2.7. Entradas del sistema	28
2.2.7.1. Recargas horizontales	28
2.2.7.1.1. Recarga principal	29
2.2.7.1.2. Recargas secundarias	31
2.2.7.2. Recargas verticales	31
2.2.8. Salidas del sistema	33
2.2.8.1. Extracción por bombeo	33
2.2.8.2. Evapotranspiración	35
2.2.8.3. Flujo superficial	37
3. Resultados	39
3.1. Análisis de los datos	39
3.1.1. Temporada 2009 – 2010	39
3.1.2. Temporada 2010 – 2011	39
3.2. Calibración del modelo	47
3.3. Modelado de eventos precipitación – recarga	50
3.4. Validación del modelo	54

CONTENIDO

	Página
4. Discusión	56
4.1. Los Datos.....	56
4.2.El Modelo	57
Conclusiones.....	59
Recomendaciones	60
Referencias bibliográficas	61
Apéndice A	64
Apéndice B	66
Apéndice C	70
Apéndice D	73
Apéndice E	75

Lista de figuras

	Pág.
Figura 1. Localización regional y local de Valle de Guadalupe, BC.....	1
Figura 2. Geología superficial de la zona de estudio.....	5
Figura 3. Metodología de modelación.....	7
Figura 4. Modelo conceptual del acuífero de Valle de Guadalupe.....	9
Figura 5. Análisis de un cubo infinitesimal.....	10
Figura 6. Interpretación geométrica de las aproximaciones hacia adelante, atrás y central por diferencias, de la derivada de una función dada.....	13
Figura 7. Orden de incremento en celdas activas.....	14
Figura 8. Conductividad hidráulica equivalente en dos celdas contiguas.....	15
Figura 9. Nomenclatura utilizada en la ecuación de balance.....	15
Figura 10. Orden que sigue la iteración en el método Gauss–Seidel.....	17
Figura 11. Estructura del algoritmo básico del modelo geohidrológico.....	17
Figura 12. Ubicación de la red de monitoreo piezométrico operada por COTAS de Valle de Guadalupe.....	20
Figura 13. a) Variación de presión atmosférica registrada por el barómetro colocado en el pozo P-254-R, b) Comparación del nivel piezométrico, corregido y sin corrección por presión atmosférica del pozo P-202.....	22
Figura 14. Nivel topográfico obtenido de los modelos de elevación digital SRTM de NASA.....	23
Figura 15. Datos de profundidad de basamento en metros.....	24
Figura 16. Ubicación de registros de pozos (columnas litológicas).....	25
Figura 17. Ubicación de las zonas de recarga consideradas en el modelo.....	29
Figura 18. Secciones a lo largo del cauce del arroyo Guadalupe consideradas en la herramienta numérica de recarga principal.....	30
Figura 19. Superficie que presenta recarga vertical por infiltración, aprox. 103.55 km ²	31
Figura 20. Distribución de aprovechamientos en la zona del acuífero de Valle de Guadalupe.....	33
Figura 21. Herramienta evapotranspiración, en achurado se muestran las celdas en las que se ha activado la herramienta.....	36
Figura 22. Pozos con registro por temporadas, y ubicación de los mismos con respecto al cauce del arroyo Guadalupe.....	40
Figura 23. Evolución del nivel freático en el pozo CNA-A-167, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 al 6 de Marzo de 2012.....	41
Figura 24. Evento A, correspondiente a la temporada 2009 – 2010.....	41
Figura 25. Evento B y C, correspondiente a la temporada 2010 – 2011.....	41
Figura 26. Evolución del nivel freático en el pozo P-213, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 y finalizando el día 13 de Agosto de 2010.....	42
Figura 27. Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (A-Fig. 23).....	42

Figura 28.	Evolución del nivel freático en el pozo P-452, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 y finalizando el día 12 de Octubre de 2012.....	43
Figura 29.	Evento A, correspondiente a la temporada 2009-2010.....	43
Figura 30.	Eventos B y C, correspondiente a la temporada 2010-2011.....	43
Figura 31.	Evolución del nivel freático en el pozo POP-3, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 4 de Marzo de 2012.....	44
Figura 32.	Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (A-Fig. 28).....	44
Figura 33.	Evolución del nivel freático en el pozo POP-3, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 4 de Marzo de 2012.....	45
Figura 34.	Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (A-Fig. 30).....	45
Figura 35.	Evolución del nivel freático en el pozo P-202, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 5 de Marzo de 2012.....	46
Figura 36.	Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (A-Fig. 32).....	46
Figura 37.	Proceso de recarga esquematizado producto del análisis previo para las temporadas estudiadas.....	47
Figura 38.	Arriba, proceso de respuesta rápida y lenta del acuífero a eventos de precipitación.....	49
Figura 39.	Izquierda, Esquema de la respuesta del nivel freático asociado a eventos de precipitación individuales.....	49
Figura 40.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo POP-3.....	50
Figura 41.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo POP-2.....	50
Figura 42.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo POP-1.....	51
Figura 43.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-202.....	51
Figura 44.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo CNA-A-167.....	51
Figura 45.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-452.....	52
Figura 46.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-213.....	52
Figura 47.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-117.....	52
Figura 48.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-166.....	53
Figura 49.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-122.....	53
Figura 50.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-120.....	53

Figura 51.	Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación en el pozo P-197.....	54
Figura 52.	Se muestra la comparación entre el ajuste ideal (línea azul) y el obtenido (línea azul) en estado estacionario.....	55
Figura 53.	De igual forma que la figura anterior pero en estado transitorio a 220 días de simulación.....	55
Figura 54.	Una vez más en estado transitorio al final de la simulación (730 días).....	55
Figura A1.	Distribución de conductividades hidráulicas (K) en metros por día, en las celdas sin color se supone un flujo nulo es decir conductividad hidráulica igual a 0 m/día.....	64
Figura A2.	Distribución de coeficientes de almacenamiento (S), las celdas sin color representan medio en el que no es posible almacenar un volumen de agua.....	65
Figura D1.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-117.....	73
Figura D2.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-122.....	73
Figura D3.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-130.....	73
Figura D4.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-166.....	73
Figura D5.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo CNA-A-167.....	73
Figura D6.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-197.....	73
Figura D7.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-213.....	73
Figura D8.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-452.....	73
Figura D9.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo POP-2.....	74
Figura D10.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo POP-1.....	74
Figura D11.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo POP-3.....	74
Figura D12.	Niveles observado y simulado mensualmente en el pozo P-202.....	74

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Requerimientos básicos de información para la generación del modelo conceptual.....	8
Tabla 2. Datos generales de la red de monitoreo.....	21
Tabla 3. Información de columnas litológicas para algunos aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero de Valle de Guadalupe según información de CNA.....	26
Tabla 4. Valores de conductividades hidráulicas para distintos materiales.....	26
Tabla 5. Valores de coeficiente de almacenamiento para distintos materiales.	27
Tabla 6. Volúmenes de recarga vertical mensuales por precipitación directa en el área que conforma el acuífero de Valle de Guadalupe.....	32
Tabla 7. Régimen de bombeo utilizado en las simulaciones.....	34
Tabla 8. Valores de extracción por Evapotranspiración potencial utilizados en las simulaciones.....	37
Tabla B1. Aprovechamientos, localización y volúmenes de extracción anual.....	66
Tabla C1. Valores correspondientes a recargas horizontales utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas mensuales y en amarillo las recargas diarios, la primera de ellas utilizada en el periodo de calibración mientras que la segunda en la simulación final.....	70
Tabla C2. Valores correspondientes a recargas verticales utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas mensuales y en amarillo las recargas diarios, la primera de ellas utilizada en el periodo de calibración mientras que la segunda en la simulación final.	71
Tabla C3. Valores correspondientes a recargas extraordinarias del periodo 2009-2010 utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas producto del evento de precipitación extraordinario.....	71
Tabla C4. Valores correspondientes a recargas extraordinarias del periodo 2010-2011 utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas producto del evento de precipitación extraordinario.....	72

1. Introducción

Todo ser viviente sobre la faz de la tierra depende del agua (Campos-Aranda, 1992). En la zona del Noroeste de México, el tema del abastecimiento así como conservación de la calidad del agua para consumo humano, agrícola e industrial ha sido parte fundamental para el desarrollo de la región desde que se dieron los primeros asentamientos.

El Valle de Guadalupe, ubicado en el municipio de Ensenada al noroeste del estado de Baja California, es la región vitivinícola de mayor importancia en el país y cuenta para su abastecimiento de agua con un acuífero libre, que se recarga de los escurrimientos de la Sierra de Juárez. Debido principalmente al crecimiento de dicha industria y a que este acuífero es una de las fuentes de abastecimiento de la ciudad de Ensenada, se ha documentado una sobre explotación del mismo; es por ello que es crucial entender de una mejor forma los procesos de precipitación – recarga en la zona de estudio.

1.1. Justificación

Este proyecto surge de la necesidad de seguir con la línea de trabajo que han venido realizando distintas instituciones tanto gubernamentales como educativas, así como de la iniciativa privada a través de diferentes proyectos de investigación y monitoreo del acuífero del Valle de Guadalupe durante las últimas décadas. Esto debido al desarrollo de la industria vitivinícola principalmente, abastecimiento para consumo humano y en años recientes la industria turística.

La importancia de este trabajo radica en analizar el estado del acuífero a través de modelos de simulación de flujo utilizando datos de registro continuo en pozos de monitoreo para observar tendencias abatimiento-precipitación-recarga; y así, determinar en qué medida la sobre explotación del acuífero ha ido aumentando. Lo anterior para poder proporcionar una base sólida que, en trabajos posteriores, permita definir un plan de manejo integral del acuífero con el objetivo de lograr un consumo sustentable del recurso hídrico en el Valle de Guadalupe.

1.2. Antecedentes

Existen diversos estudios acerca de las condiciones de operación y las características geohidrológicas del acuífero del Valle de Guadalupe, muchos de ellos realizados por la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH), la Comisión Nacional del Agua (CNA), Departamento de Geofísica Aplicada - Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE) y el Comité Técnico de Aguas Subterráneas (COTAS) – Valle de Guadalupe. Algunos de ellos reportando consumos activos e inactivos en diferentes rubros, principalmente abastecimiento para uso agrícola. En el 2006 el número de aprovechamientos de aguas alcanzo la cifra de 1,394, de ellos se encontraron 731 activos y 663 inactivos. En el 2009 en el censo de infraestructura realizado por el colegio de postgraduados, se tuvo un alcance de 1, 422 estando en proceso de análisis la información obtenida (COTAS, 2010).

Campos (2008), en su trabajo de tesis de doctorado, llevo a cabo una simulación del flujo de agua en el acuífero del Valle de Guadalupe a partir de un modelo en dos dimensiones basado en la metodología de Vázquez *et al* (1991) y Campos (2002) así como la información proporcionada por algunas de las fuentes antes citadas. Él tomó como fecha de inicio para la simulación el mes de febrero de 1984 y un intervalo de muestreo de 1 mes por un periodo de 21 años, para posteriormente recrear las condiciones en fechas establecidas en las cuales se cuenta con datos del estado del nivel freático y así compararlas con el modelo. Arrojando de esta forma un ajuste aceptable tanto cualitativa como cuantitativamente.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Ubicar eventos importantes de recarga utilizando los datos proporcionados por la red de sensores de registro continuo del nivel freático del acuífero de Valle de Guadalupe; Así mismo, recopilar e integrar información de precipitación para la ubicación de tormentas

extraordinarias y correlacionarlas con los incrementos de nivel antes mencionados. Finalmente modelar los eventos de precipitación - recarga y comparar los resultados con datos observados en los medidores de nivel continuo.

1.3.2. Objetivos particulares

- Construir un modelo de simulación de flujo de agua subterránea adaptado a las características del acuífero de Valle de Guadalupe, a partir del algoritmo de Vázquez (1991) modificado por Puente (2007).
- Ubicar eventos específicos de precipitación extraordinaria y correlacionarlos con incrementos de nivel freático en las series proporcionadas por los medidores de nivel continuo.
- Realizar una descripción de cómo fueron los procesos de recarga en el acuífero para los eventos analizados.
- Modelar los eventos antes mencionados y describir los alcances y limitaciones del modelo geohidrológico para este propósito.

1.4. Generalidades de la zona de estudio

1.4.1. Localización

El Valle de Guadalupe se encuentra dentro de la Cuenca Guadalupe al noroeste del estado de Baja California; dicha cuenca cuenta con una superficie total de $\sim 2400 \text{ km}^2$ y pertenece a la región hidrológica 1 (CNA, 2003). La cuenca se localiza $\sim 37 \text{ km}$ de la ciudad de Ensenada, entre los paralelos $31^{\circ}51'$ y $32^{\circ}15'$ de latitud norte, y los meridianos $115^{\circ}52'$ y $116^{\circ}51'$ 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). 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 (Campos, 2008).

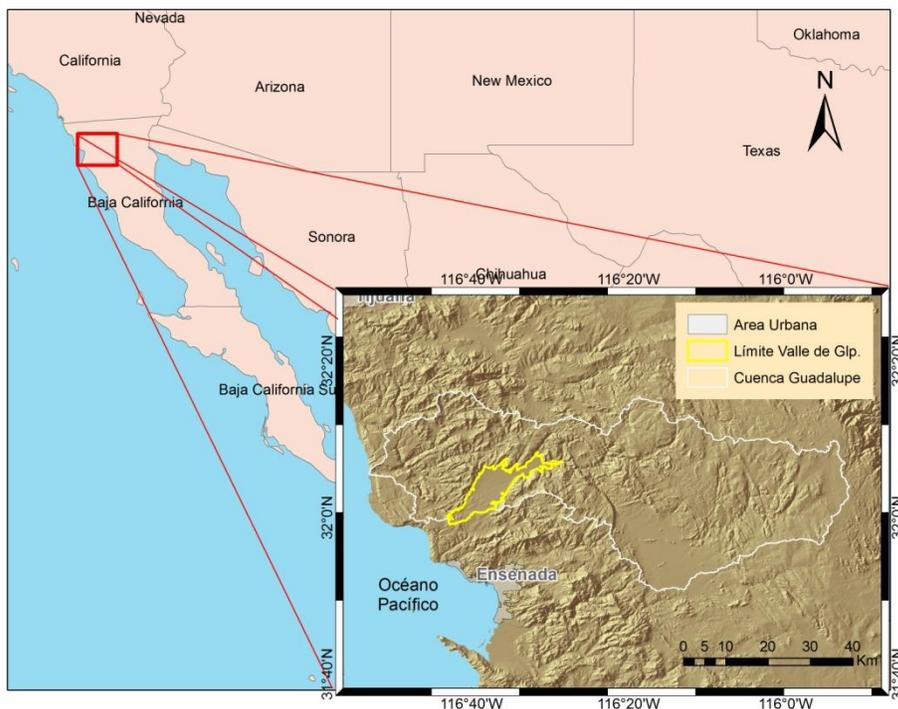


Fig. 1 – Localización regional y local de Valle de Guadalupe, BC.

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).

1.4.2. 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).

Observando la geología superficial se puede inferir que el vaso confinante que contiene el material en el cual se encuentra el acuífero está compuesto principalmente por rocas ígneas intrusivas como granitos, granodioritas, dioritas y tonalitas principalmente y en menor medida andesita, dacita y riodacitas; así como algunos afloramientos de rocas metasedimentarias. En cuanto a la geología estructural se pueden apreciar tres fallas importantes: falla El Porvenir, falla Guadalupe y Falla Calafia.

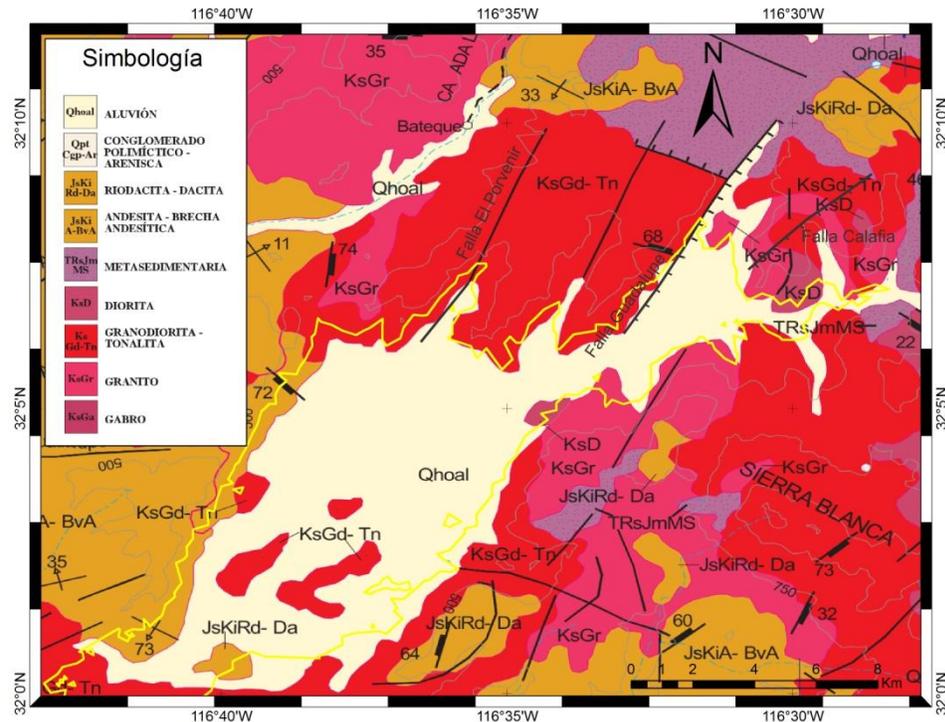


Fig. 2 – Geología superficial de la zona de estudio, tomada de la carta I11-11 del Servicio Geológico Mexicano

1.4.3. Hidrología

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 acuífero del Valle de Guadalupe, un acuífero libre, que se define como un cuerpo de agua subterráneo que se encuentra en un estrato y está limitado en la parte inferior por

un basamento confinante y la parte superior por el mismo nivel freático, se encuentra en la depresión topográfica rellena de sedimentos aluviales que conforman el valle.

El acuífero en estudio 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 (Campos, 2008).

1.4.4. 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 una precipitación promedio anual que oscila entre los 250 y 300 mm por año, presentandose principalmente en invierno (Diciembre a Marzo). La temperatura media anual varía de 12°C a 18°C (Beltrán, 1998a; Escolero y Hernández, 1992).

2. Metodología

2.1. Modelo

Por definición, un modelo es cualquier dispositivo que nos da una representación aproximada de un caso de estudio real. En geohidrología se puede clasificar un modelo como físico o matemático.

Los modelos físicos tales como tanques de arena en laboratorio simulan el flujo de agua subterráneo directamente. Un modelo matemático simula el flujo indirectamente utilizando una ecuación gobernante, la cual representa el proceso físico que ocurre en el sistema junto con ecuaciones que describen niveles o flujos en las fronteras del modelo, llamadas condiciones de frontera (Anderson & Woessner, 1992), dichos modelos matemáticos pueden ser resueltos: analítica y numéricamente.

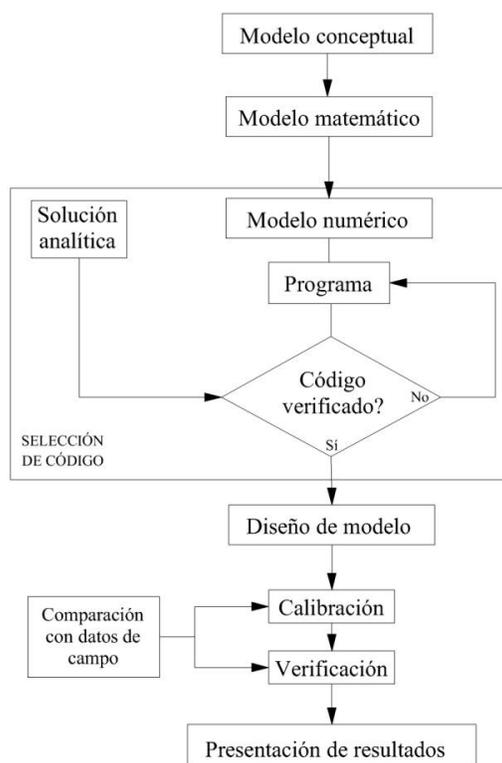


Fig. 3-Metodología de modelación, modificado de Anderson & Woessner (1992, pág. 7).

2.1.1 Modelo conceptual

Según Anderson & Woessner (1992): “Un modelo geohidrológico 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 modelo conceptual se integran todas las características hidrológicas y geohidrológicas del sistema, así también se lleva a cabo la identificación del tipo de fronteras del mismo. Es en este apartado donde se colecta toda la información de campo necesaria tal como: topografía, geología, estudios geofísicos previos para la obtención de información acerca del basamento, datos de niveles piezométricos, características de los materiales que comprenden la zona saturada tales como: conductividad hidráulica, coeficientes de almacenamiento, entre otros.

Tabla 1 - Requerimientos básicos de información para la generación del modelo conceptual

Marco físico

- Mapa geológico que muestre las fronteras del sistema.
 - Mapa topográfico en los que se observen los cuerpos de agua.
 - Mapas de curvas de nivel del basamento confinante del acuífero.
 - Mapas de la extensión y grosor de sedimentos.
-

Marco Geohidrológico

- Niveles piezométricos del acuífero.
- Mapas que muestren la distribución de las distintas conductividades hidráulicas.
- Mapas de los distintos coeficientes de almacenamiento del acuífero.
- Valores de conductividad hidráulica y su distribución.
- Tasas de evapotranspiración, recarga subterránea, bombeo, y descarga natural del acuífero.

Cabe mencionar que en el proceso de la elaboración del modelo es necesario hacer simplificaciones, ya que una reconstrucción completa del sistema real no es factible (Campos, 2002).

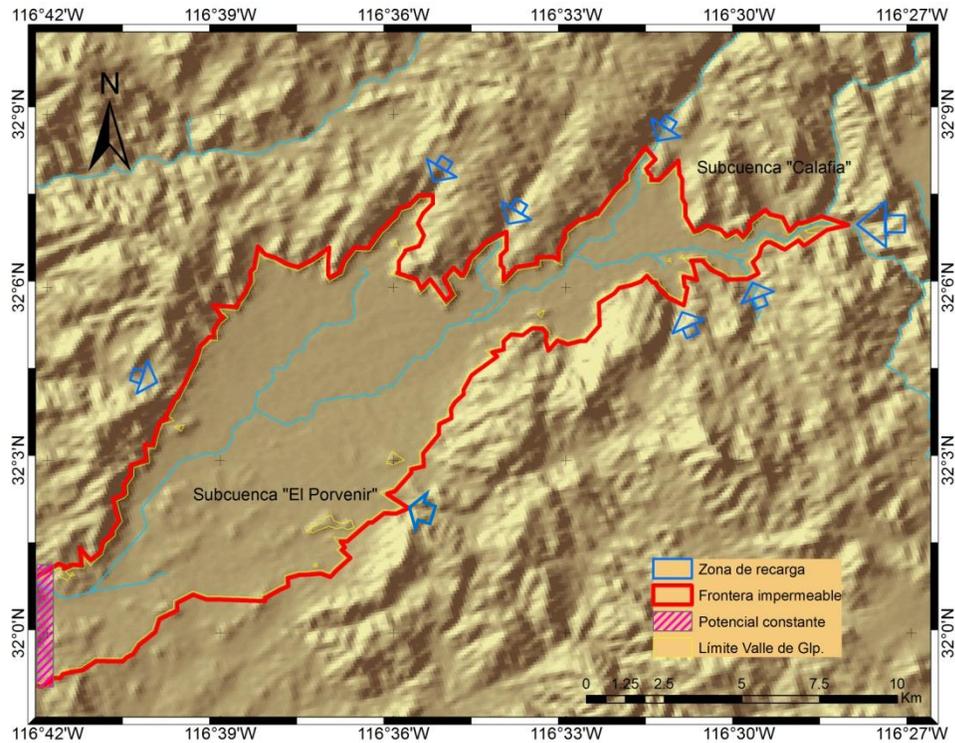


Fig. 4 – Modelo conceptual del acuífero de Valle de Guadalupe.

2.1.2. Modelo matemático

El fundamento básico del modelo matemático es la Ley de Darcy, la cual se obtuvo de forma experimental mediante el siguiente principio: la descarga Q es proporcional a la diferencia entre los niveles de agua h_A y h_B en un medio dado e inversamente proporcional a la longitud L del flujo dentro del mismo medio.

$$Q \propto h_A - h_B \text{ y } Q \propto -1/L$$

Dado que el flujo también es proporcional a la sección transversal, A , cuando este se combina con la constante de proporcionalidad K , el resultado es la expresión conocida como Ley de Darcy (Fetter, 2001):

$$Q = -KA \left(\frac{h_A - h_B}{L} \right), \quad (1)$$

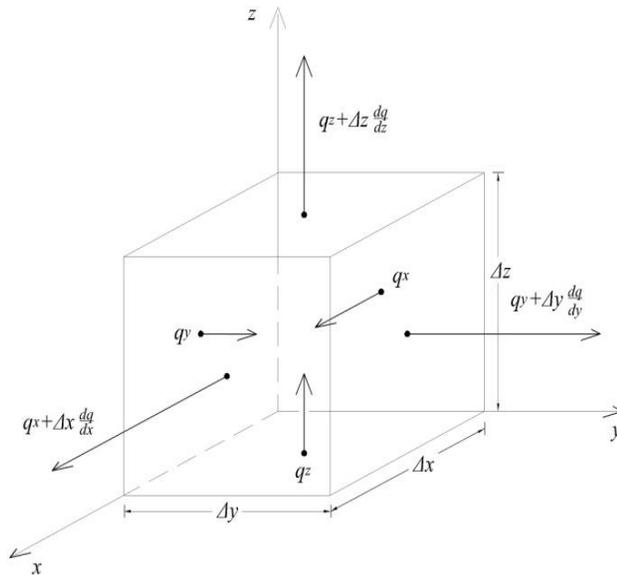
o bien

$$Q = -KA \left(\frac{dh}{dl} \right),$$

donde dh/dl es el gradiente hidráulico. Dividiendo el caudal Q entre la sección A obtenemos la descarga específica q , que es la tasa del flujo que pasa por unidad de área,

$$q = -K \left(\frac{dh}{dl} \right). \quad (2)$$

La generalización tridimensional de la Ley de Darcy requiere que la forma unidimensional de la descarga específica (3) se cumpla para los componentes, x , y , y z del flujo (Wang & Anderson, 1982):



$$q_x = -K \frac{\partial h}{\partial x},$$

$$q_y = -K \frac{\partial h}{\partial y}, \quad (3)$$

$$q_z = -K \frac{\partial h}{\partial z}.$$

Fig. 5- Análisis de un cubo infinitesimal, modificado de Wang & Anderson (1989, pág. 12)

de esta forma siguiendo el análisis de la descarga específica para cada componente y apoyándonos en la figura 5 podemos definir el volumen del cubo como: $\Delta x \Delta y \Delta z$. El cambio en el flujo a través del cubo en cualquiera de los ejes está dado por la expresión: $\frac{\partial q_{eje}}{\partial eje} (\Delta x \Delta y \Delta z)$; aplicándola para los 3 ejes, y agregando un término fuente R^* , que representa recargas o extracciones del sistema, obtenemos que el cambio total en el flujo es igual al cambio en el almacenamiento:

$$\left(\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} - R^* \right) \Delta x \Delta y \Delta z = \text{Cambio en almacenamiento} \quad (4)$$

El cambio en el almacenamiento está dado por el valor del almacenamiento específico S_s , el cual puede ser definido como el volumen de agua almacenada (ΔV_a) liberado por unidad de cambio en el nivel h (Δh), lo anterior por unidad de volumen de acuífero ($\Delta x \Delta y \Delta z$) (Anderson & Woessner, 1992):

$$S_s = - \frac{\Delta V_a}{\Delta h \cdot \Delta x \Delta y \Delta z}.$$

Agregando el incremento temporal a la ecuación:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = -S_s \frac{\Delta h}{\Delta t} \Delta x \Delta y \Delta z. \quad (5)$$

Igualando las ecuaciones (4) y (5), y dividiendo entre $\Delta x \Delta y \Delta z$ obtenemos:

$$\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} = -S_s \frac{\partial h}{\partial t} + R^*. \quad (6)$$

Sustituyendo la descarga específica (3) para cada uno de los ejes en la ecuación (6), igualando a cero el término $\frac{\partial q_z}{\partial z}$ debido a que el modelo en estudio es un modelo de dos dimensiones, y multiplicando todos los términos de la ecuación por el valor del espesor saturado b (considerando $S = bS_s$ y $R = bR^*$) se obtiene la ecuación general de flujo para un acuífero libre bidimensional, heterogéneo y en estado transitorio conocida como ecuación de Boussinesq (Fetter, 2001):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x b \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y b \frac{\partial h}{\partial y} \right) = S \frac{\partial h}{\partial t} - R, \quad (7)$$

donde:

$$b = h - d,$$

en la cual $K_{x,y}$ es la conductividad hidráulica, h es el nivel piezométrico respecto al nivel de referencia, d es la elevación del basamento respecto al nivel de referencia, S es el coeficiente de almacenamiento, R son los terminos fuentes (recargas y/o descargas), x, y son las variables espaciales y por ultimo t es la variable temporal.

Para hacer uso de este modelo matemático en la simulación, es necesario tomar en cuenta las siguientes consideraciones con respecto al flujo de agua subterránea: el acuífero es heterogéneo con propiedades hidráulicas constantes en el tiempo, el flujo de agua en el acuífero es horizontal, no hay variaciones de densidad y/o viscosidad y por último se considera un solo fluido con propiedades constantes (Vázquez *et al.*, 1991).

2.1.3. Modelo numérico

Las soluciones numéricas arrojan valores solo para un número finito de puntos en el dominio del problema. Limitando el problema solo a conocer el nivel piezométrico en un número razonable de puntos N , se puede convertir una ecuación de derivadas parciales en un conjunto de N ecuaciones algebraicas con N potenciales desconocidos (Wang & Anderson, 1982).

Para resolver el modelo numérico se empleó el método de diferencias finitas centrales; así partiendo de la ecuación de Boussinesq (Fetter, 2001) se utiliza una serie de ecuaciones algebraicas para aproximar los términos diferenciales de (7).

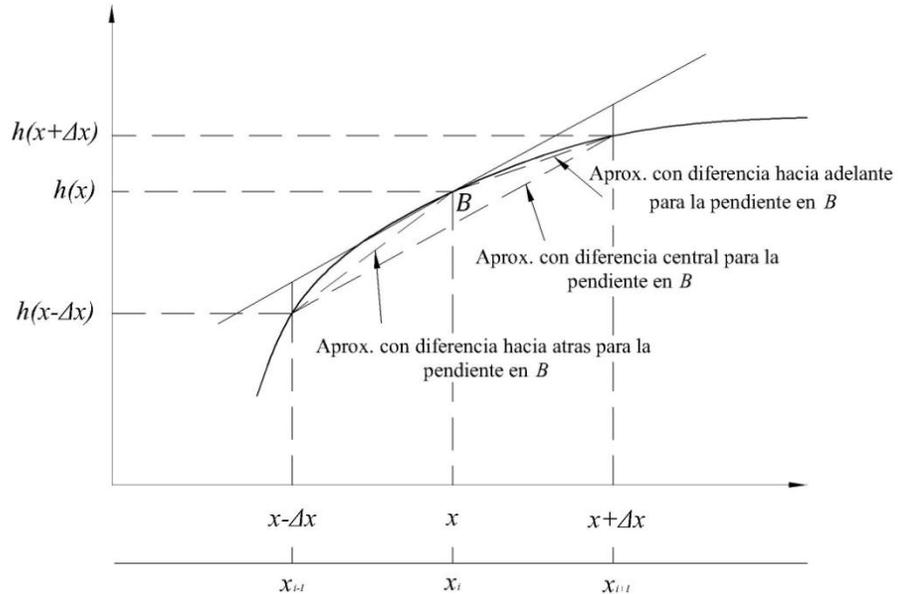


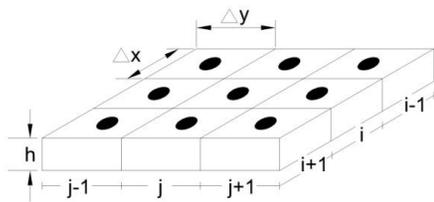
Fig. 6 – Interpretación geométrica de las aproximaciones hacia adelante, atrás y central por diferencias, de la derivada de una función dada. Modificado de Bear (1979, pág. 132).

Se supone a $h = h(x)$ como una función lo suficientemente suavizada para poder ser expandida en las siguientes series de Taylor de x en dirección positiva y negativa respectivamente (Bear, 1979).

$$h(x_0 + \Delta x) = h(x_0) + \Delta x \left. \frac{dh}{dx} \right|_{x=x_0} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{d^2h}{dx^2} \right|_{x=x_0} + \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{d^3h}{dx^3} \right|_{x=x_0} + \dots \quad (8)$$

$$h(x_0 - \Delta x) = h(x_0) - \Delta x \left. \frac{dh}{dx} \right|_{x=x_0} + \frac{(\Delta x)^2}{2!} \left. \frac{d^2h}{dx^2} \right|_{x=x_0} - \frac{(\Delta x)^3}{3!} \left. \frac{d^3h}{dx^3} \right|_{x=x_0} \dots \quad (9)$$

Sumando (8) y (9); y resolviendo para $\frac{d^2h}{dx^2}$ obtenemos la aproximación central en diferencias finitas.



$$\frac{d^2h}{dx^2} \cong \frac{h(x + \Delta x) - 2h(x) + h(x - \Delta x)}{(\Delta x)^2}$$

(10)

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} \cong \frac{h_{i+1,j}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i-1,j}^{k+1}}{(\Delta x)^2}$$

Fig. 7 – Orden de incremento en celdas activas

El mismo procedimiento se sigue para aproximar el término $\frac{\partial^2 h}{\partial y^2}$, obteniendo:

$$\frac{\partial^2 h}{\partial y^2} \cong \frac{h_{i,j+1}^{k+1} - 2h_{i,j}^{k+1} + h_{i,j-1}^{k+1}}{(\Delta y)^2}$$

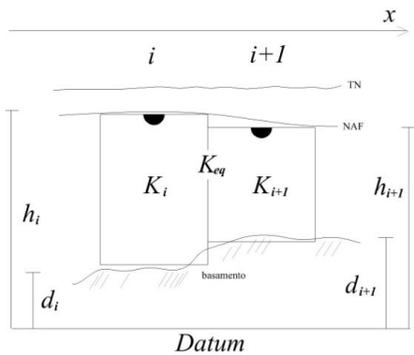
Para los intervalos temporales se utilizó la aproximación con diferencias hacia atrás, ya que según Remson *et al.*, (1971) se debe evitar el uso de la aproximación central debido a que ésta es inestable.

$$\frac{\partial h}{\partial t} \cong \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t}$$

Sustituyendo los términos en la ecuación (7) se obtiene la ecuación de Boussinesq en su forma de diferencias finitas sin términos fuente:

$$\frac{T_{i+\frac{1}{2},j} \cdot (h_{i+1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) + T_{i-\frac{1}{2},j} \cdot (h_{i-1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1})}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j+1}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) + T_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j-1}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1})}{(\Delta y)^2} = S \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t}, \quad (11)$$

donde $\Delta x, \Delta y$ son las dimensiones de la celda, Δt es el intervalo de tiempo, i, j son los índices de fila y columna respectivamente, h^k es el nivel piezométrico al tiempo k , R^{k+1} es el término que integran tanto las recargas como las extracciones al tiempo $k + 1$, S es el coeficiente de almacenamiento y T es el producto de la conductividad hidráulica equivalente K_{eq} por el espesor medio saturado, entre dos celdas contiguas y está dado por las siguientes expresiones sugeridas por Bear (1979):



$$T_{i\pm\frac{1}{2},j} = \frac{2K_{i\pm 1,j} \cdot K_{i,j}}{K_{i\pm 1,j} + K_{i,j}} \cdot \frac{(h^k - d)_{i\pm 1,j} + (h^k - d)_{i,j}}{2}, \quad (12)$$

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

Fig. 8 – Conductividad hidráulica equivalente en dos celdas contiguas.

en las cuales K es el valor de conductividad hidráulica, h^k como ya se mencionó es el nivel piezométrico en el intervalo de tiempo k y d es la elevación del basamento a un plano de referencia.

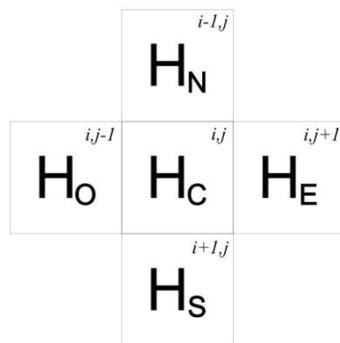


Fig. 9 – Nomenclatura utilizada en la ecuación de balance.

Cambiando la nomenclatura a:

$$T_{i-\frac{1}{2},j} = T_{NC} \quad h_{i-1,j}^{k+1} = H_N^{k+1}$$

$$T_{i+\frac{1}{2},j} = T_{SC} \quad h_{i+1,j}^{k+1} = H_S^{k+1}$$

$$T_{i,j+\frac{1}{2}} = T_{EC} \quad h_{i,j+1}^{k+1} = H_E^{k+1}$$

$$T_{i,j-\frac{1}{2}} = T_{OC} \quad h_{i,j-1}^{k+1} = H_O^{k+1}$$

$$h_{i,j}^{k+1} = H_C^{k+1}$$

y considerando $\Delta x = \Delta y = \Delta d$, agrupando términos y resolviendo para H_C^{k+1} (véase Apéndice E), obtenemos como resultado la ecuación de balance con diferencias finitas centrales para un acuífero libre, heterogéneo y en estado transitorio:

$$H_C^{k+1} = \frac{T_{SC}H_S^{k+1} + T_{NC}H_N^{k+1} + T_{EC}H_E^{k+1} + T_{OC}H_O^{k+1} + R_C^{k+1} + SE_C H_C^k}{T_{SC} + T_{NC} + T_{EC} + T_{OC} + SE_C}, \quad (13)$$

donde:

$$SE_C = \frac{S_C \cdot \Delta d^2}{\Delta t}.$$

2.1.4. Diseño del modelo

El programa básico se escribió en *Matlab R2008b*, éste, basado en el algoritmo de Vázquez (1991) en lenguaje *FORTTRAN 77* y posteriormente traducido al ambiente *Matlab* por Puente (2007). Dicho algoritmo resuelve un ejemplo básico para un acuífero libre, heterogéneo y en estado transitorio; utilizando la ecuación de balance (13) antes mencionada. El programa principal fue resultado de integrar al algoritmo antes mencionado rutinas para tomar en cuenta el relieve de basamento confinante así como el nivel del terreno natural para el cálculo de H_C , así mismo, rutinas para que éste fuera capaz de reconocer zonas de flujo nulo ($K=0$ m/día) dentro y fuera de las fronteras, herramientas de flujo superficial, evapotranspiración, entre otras. La discretización del dominio del flujo correspondiente a la zona de estudio se realizó en matrices de 170x120 celdas que contienen los parámetros de entrada que cubren las características geohidrológicas, topográficas y de basamento de la zona que comprende el Valle de Guadalupe y las zonas de recarga aledañas. Es importante mencionar que para facilitar la nomenclatura de las matrices, el modelo considera la rejilla discretizada con orientación norte-sur siendo la celda superior izquierda $i=1, j=1$ a diferencia de la zona de estudio que tiene una orientación este-oeste siendo el este la entrada del arroyo Guadalupe al valle.

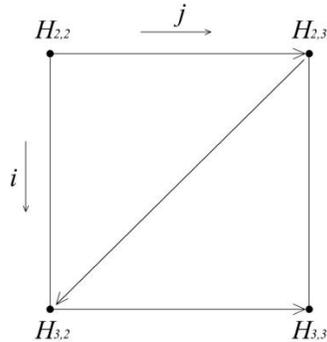


Fig. 10 – Orden que sigue la iteración en el método Gauss-Seidel, modificado de Wang & Anderson (1982, pág., 26)

El algoritmo principal utiliza el método iterativo de Gauss-Seidel en el cual el sistema a resolver es del tipo:

$$Ax = b$$

en donde A sería el producto de la conductividad hidráulica K por el espesor del acuífero b_a (T), x los niveles piezométricos $h_{x,y}$ y por último b sería el término $S \frac{\partial h}{\partial t}$, lo anterior observando la ecuación (7). Para el cálculo de H_C ; la iteración inicia en $i = 2, j = 2$ y continúa de izquierda a derecha sobre las columnas j y de arriba hacia abajo sobre los renglones i .

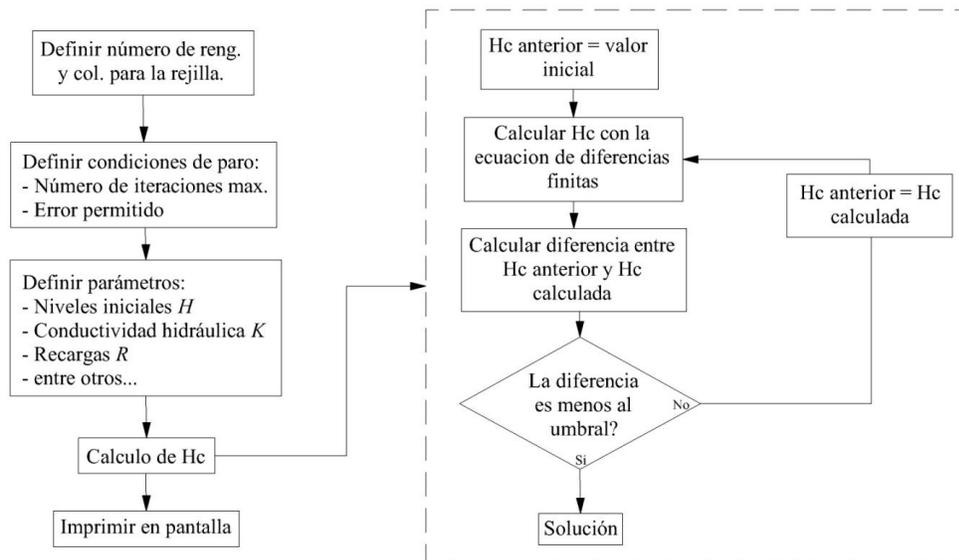


Fig. 11 – Estructura del algoritmo básico del modelo geohidrológico, modificado de Puente (2007)

2. 1.4.1. Método de sobre relajación sucesiva

Con el fin de disminuir el número de iteraciones y así acelerar la convergencia se utilizó el método de sobre relajación sucesiva (*SOR, Succesive over relaxation*); el cual establece que al multiplicar el residuo de la iteración:

$$r = H_C^{k+1} - H_C^k,$$

por un factor de relajamiento ω , así el nuevo valor de H_C^{k+1} está dado por la formula (Wang & Anderson, 1982):

$$H_C^{k+1} = H_C^k + \omega \cdot r.$$

Tomando en cuenta la recomendación que hacen Wang & Anderson (1982), se tomó un coeficiente tal que $1 \leq \omega \leq 2$. Se consideró la ecuación utilizada por Campos (2002) y Gil (2010) (Ponzini, 1986) para un acuífero discretizado en una rejilla de n renglones y m columnas, y está dado por la expresión:

$$1 + \omega = \frac{2}{1 + \sqrt{1 - \mu^2}} \quad (14)$$

$$\mu = \frac{1}{2} \left[\cos\left(\frac{1}{n+1}\pi\right) + \cos\left(\frac{1}{m+1}\pi\right) \right]. \quad (15)$$

2.1.4.2. Condiciones de frontera

Las condiciones de frontera que se utilizan en el programa son: en la región norte, sur y este el flujo es nulo, debido a que los materiales que rodean el valle en estas zonas se consideran impermeables con conductividades hidráulicas ≈ 0 . En la porción suroeste que comprende la salida del sistema, Campos (2008) basado en registros de CNA, consideró un

nivel freático constante; lo anterior debido a que el nivel ha variado menos de 2 metros durante el periodo de monitoreo. Por lo que dicha frontera se considera de tipo Dirichlet (Wang & Anderson, 1982).

De esta manera las condiciones de frontera para este trabajo de tesis se expresan matemáticamente de la siguiente forma: la frontera de potencial conocido (tipo Dirichlet, achurado violeta en figura 4) se considera como: $h(x, y) = H_0$, donde H_0 es el nivel conocido antes mencionado, las zonas de flujo nulo (contorno rojo en figura 4) es una condición tipo Neumann donde: $\frac{\partial h}{\partial x} = 0$ y $\frac{\partial h}{\partial y} = 0$, y estas se definen al asignar un valor de conductividad hidráulica (K) igual a cero y por último las condiciones de frontera de flujo conocido (también tipo Neumann y señaladas por las flechas azules en figura 4) están definidas por $\frac{\partial h}{\partial n} = \frac{q(t)}{K}$, siendo n la dirección en la que el flujo es normal a la frontera, R se refiere a recargas y los valores de éstas se encuentran en las tablas que integran el Apéndice C.

2.1.4.3. Condición inicial

La condición inicial se refiere a la distribución del nivel piezométrico en el sistema al principio de la simulación así como las condiciones de frontera. Es una práctica común seleccionar como condición inicial un estado de nivel piezométrico estacionario generado por un modelo calibrado (Anderson & Woessner, 1992).

Como condición inicial se fijó el registro piezométrico del día 01 de enero de 2010, ya que en esta fecha el nivel todavía no refleja una respuesta ante la temporada de precipitación.

2.2. Parámetros iniciales

2.2.1. Niveles Piezométricos

Se utilizaron los datos proporcionados por una red de monitoreo de nivel piezométrico puesta en funcionamiento en el año 2007 mediante un proyecto realizado por Vázquez (2007) por medio del Depto. de Geofísica Aplicada del CICESE, para el COTAS de Valle de Guadalupe.

La red de monitoreo esta formada por un total de 17 pozos instrumentados (en diferentes periodos) distribuidos en el valle, la información es registrada por medidores de nivel continuo *Levelogger Gold* modelo 3001 con capacidad para 40,000 muestras; los cuales registran columna de agua por encima de estos en intervalos de captura definidos por el usuario, esto mediante un sensor barométrico integrado en los mismos. Actualmente (2012) la red solo se encuentra registrando datos en 8 pozos tal como se puede observar en la figura 12 Fig. 12, lo anterior debido a la concordancia entre los organismos que monitoren el acuífero.

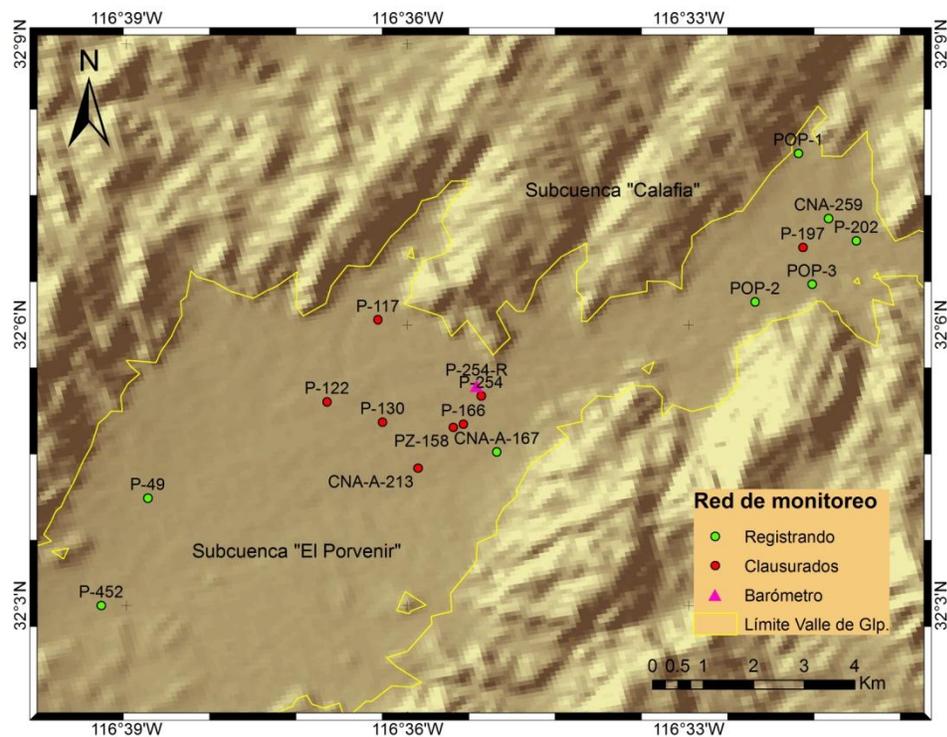


Fig. 12– Ubicación de la red de monitoreo piezométrico operada por COTAS de Valle de Guadalupe, puesta en funcionamiento en Abril de 2007.

2.2.1.1. Compendio de datos

Se cuenta con datos disponibles desde el año 2007 la mayoría de ellos intermitentes con grandes periodos sin registro.

Debido a la falta de continuidad en los datos, para efectos de calibración y validación se utilizo la información del periodo 2010 – 2012 en el cual los datos son más

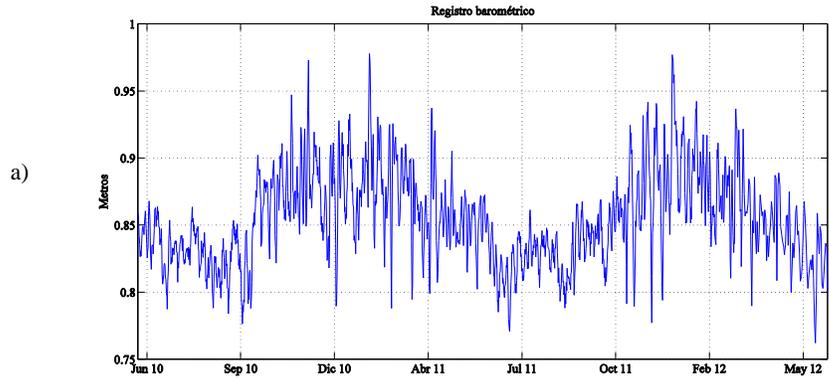
consistentes, los pozos que cuentan con información para este periodo se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 – Datos generales de la red de monitoreo

Pozo	Coordenadas UTM		Diámetro (pulg.)	Inicio de operación	Estado actual	Registros					
	X	Y				2007	2008	2009	2010	2011	2012
P-197	544297.23	3553362.33	13.00	15/01/2007	Clausurado	√	√	√	√		
P-254-R	538909.00	3550393.00	13.00	15/01/2007	Barómetro	√	√		√	√	
P-158	538520.67	3549570.00	13.00	15/01/2007	No instrumentado						
CNA-259	544800.62	3553721.71	12.63	17/04/2007	Medidor defectuoso	√	√		√	√	√
P-166	538684.34	3549632.20	12.99	02/04/2007	Clausurado	√	√	√			
CNA-A-213	537929.96	3548764.14	16.50	07/07/2007	Clausurado	√	√	√			
P-452	532619.29	3546036.19	13.00	01/08/2007	Medidor defectuoso	√		√	√	√	
P-122	536402.10	3550067.17	12.00	01/08/2008	Clausurado		√	√			
P-117	537245.00	3551692.90	12.63	01/08/2008	Clausurado			√	√		
CNA-A-167	537334.15	3549073.98	12.63	01/08/2008	OK		√	√	√		
P-130	537334.15	3549667.19	13.00	01/08/2008	OK			√			
POP-1	544291.91	3555003.47	4.00	29/05/2010	OK				√	√	√
POP-2	543576.09	3552069.06	4.00	29/05/2010	OK				√	√	√
POP-3	544529.07	3552421.13	4.00	30/05/2010	OK				√	√	√
P-202	545269.01	3553283.47	12.00	01/06/2010	OK				√	√	√

2.2.1.2. Corrección barométrica

Debido a que los instrumentos miden presión absoluta, se debió realizar una corrección por presión atmosférica; esto se llevó a cabo restando el nivel registrado por un barómetro colocado en el pozo P-254-R a cada uno de los registros de nivel piezométrico. Cabe mencionar que, por especificación, dicha corrección es válida solo para datos almacenados en medidores dentro de un rango de cobertura de 20 km; en la figura 12 se puede observar que todos los pozos de la red se encuentran dentro del rango especificado.



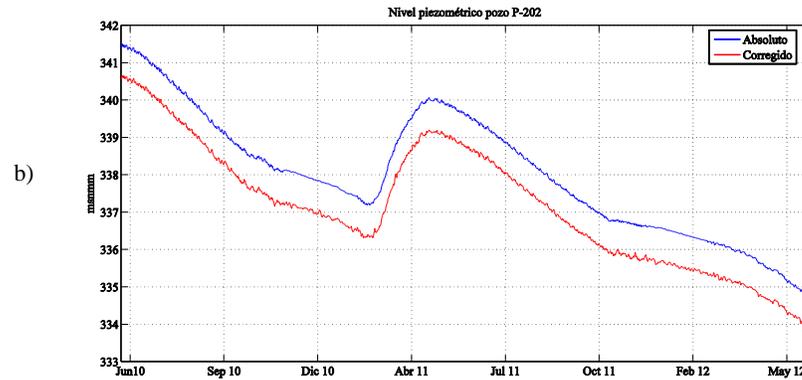


Fig. 13 – *a*) Variación de presión atmosférica registrada por el barómetro colocado en el pozo P-254-R, *b*) Comparación del nivel piezométrico, corregido y sin corrección por presión atmosférica del pozo P-202

2.2.2. Topografía

Los datos de topografía se obtuvieron de modelos de elevación digital (*DEM* por sus siglas en inglés) generados por *NASA* en la misión *Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)*. De acuerdo al *USGS*, organismo que distribuye los *DEMs*, estos tienen una resolución de pixel de 3 segundos de arco, aprox. 90 m. para regiones fuera de territorio Estadounidense.

Posteriormente estos datos fueron manipulados con un software *SIG* para así obtener la matriz de terreno natural que utiliza el modelo. En la figura 14 se observa el resultado final del cual se obtuvieron directamente los datos de nivel de terreno natural a la matriz de topografía.

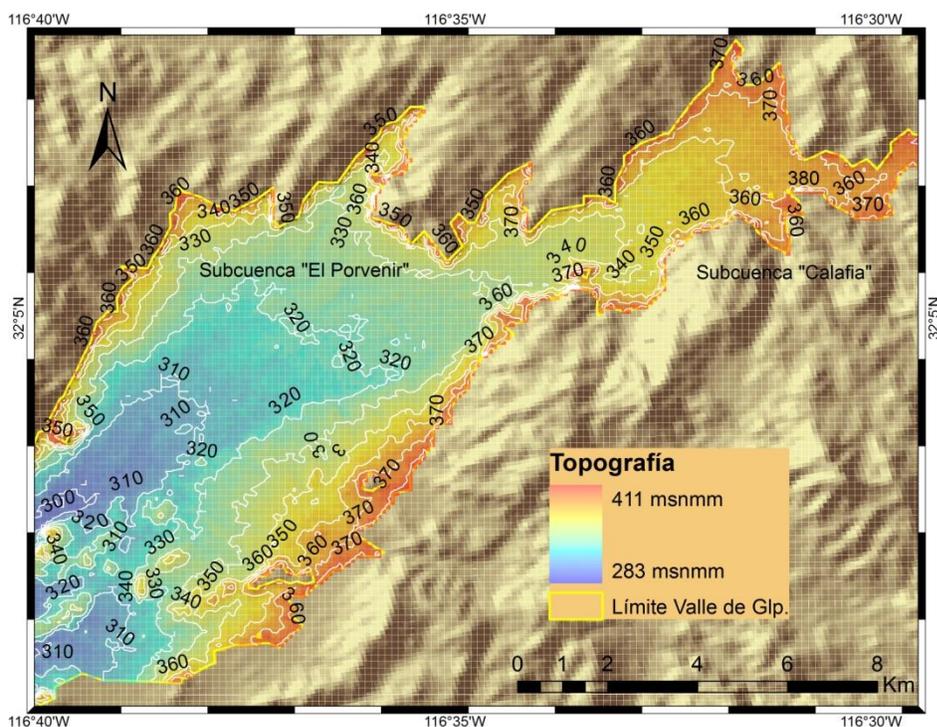


Fig. 14 – Nivel topográfico obtenido de los modelos de elevación digital *SRTM* de *NASA*.

2.2.3. Basamento

Los datos de basamento se obtuvieron de estudios previos, el primero de ellos presentado por Nájera (2006) en su trabajo de tesis de Maestría, y posteriormente en el proyecto “Estudios técnicos para la gestión integrada del agua en el Valle de Guadalupe” (Vázquez, 2007) para COTAS del Valle de Guadalupe; ambos estudios utilizaron métodos gravimétricos para la estimación de profundidad de basamento. Figura 15.

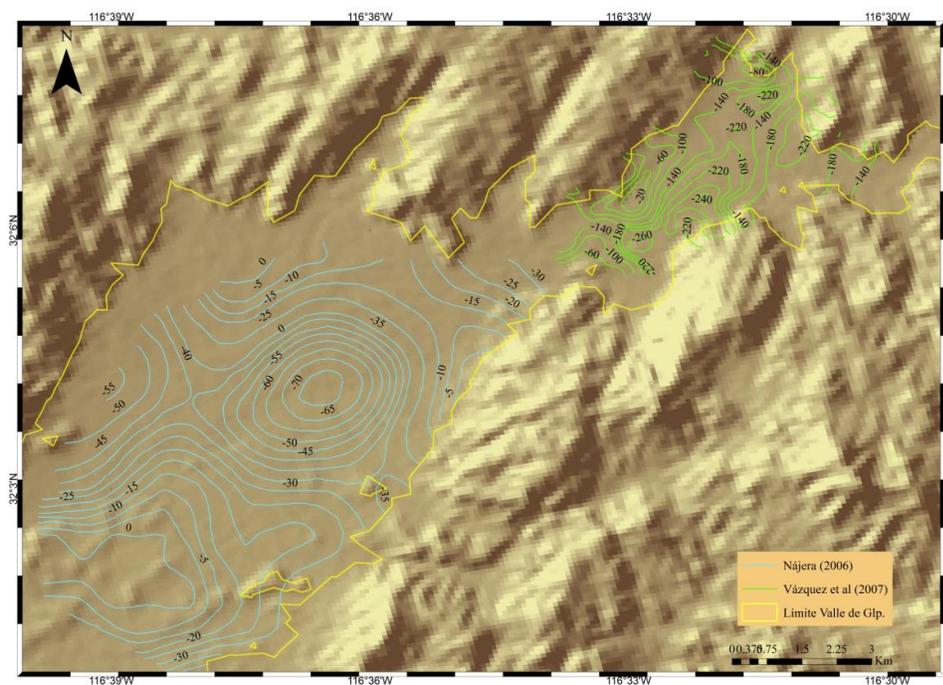


Fig. 15 – Datos de profundidad de basamento en metros, tomado y modificado de Nájera (2006, pág. 64) y Vázquez (2007, pág. 13)

2.2.4. Conductividades hidráulicas

Los datos de tipo de material que conforman la zona saturada del valle, así como el fondo impermeable; para la determinación de conductividades hidráulicas y coeficientes de almacenamiento se obtuvieron de información proporcionada por la CNA sobre ensayos de bombeo (Beltrán, 2001; Andrade, 1997; Andrade, 1992) y columnas litológicas (Campos, 2008). Esta información se corrobora con un informe de la CNA publicado en 2009.

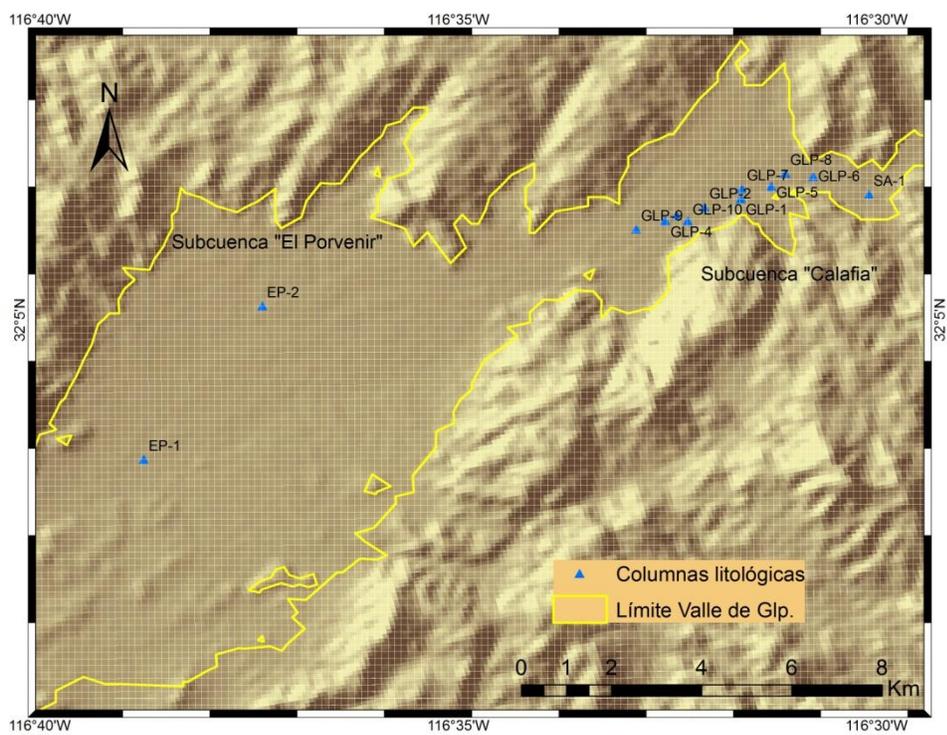


Fig. 16 – Ubicación de registros de pozos (columnas litológicas)

Tabla 3 – Información de columnas litológicas para algunos aprovechamientos de agua subterránea en el acuífero de Valle de Guadalupe según información de CNA, tomada de Campos (2008, pág. 81).

Nombre	Clave	Latitud	Longitud	Corte geológico predominante	Profundidad perforada (m)	Observaciones sobre la descripción litológica
El Porvenir -1	EP-1	32.05555556	-116.6458333	Arena y gravilla	28.57	Granito (24.00-28.57 m)
El porvenir - 2	EP-2	32.08611111	-116.6222222	Arcilla, arena, granito	41.7	Granito fracturado y alterado (16.00-41.70 m)
San Antonio Necua - 1	SA-1	32.10833333	-116.5013889	Arena gruesa y gravillas	27.41	Granito (24.00-27.41 m)
Guadalupe - 1	GLP-1	32.1075	-116.5269444	Clásticos, cantos y arenas	81.5	No se alcanzó a cortar basamento
Guadalupe - 2	GLP-2	32.10583333	-116.5341667	Cantos, clásticos y arenas	83.9	No se alcanzó a cortar basamento
Guadalupe - 3	GLP-3	32.10416667	-116.5397222	Clásticos, cantos y arenas	82.5	No se alcanzó a cortar basamento
Guadalupe - 4	GLP-4	32.10305556	-116.5419444	Cantos, clásticos, grava y arenas	81.2	No se alcanzó a cortar basamento
Guadalupe - 5	GLP-5	32.11	-116.5208333	Cantos gravas y arenas	80	Roca intrusiva ácida (diorita)(48.00-62.00 m)
Guadalupe - 6	GLP-6	32.11194444	-116.5125	Cantos, clásticos y arenas	63.4	Granodiorita (56.00-63.40 m)
Guadalupe - 7	GLP-7	32.10944444	-116.5266667	Grava, arena, clásticos y boleos	70.8	Granodiorita (67.00-70.80 m)
Guadalupe - 8	GLP-8	32.1125	-116.5180556	Clásticos, arenas y cantos	80	Roca intrusiva ácida (Diorita??) 58.00-62.00 m)
Guadalupe - 9	GLP-9	32.10138889	-116.5477778	Clásticos, cantos y arenas	80	No se alcanzó a cortar basamento
Guadalupe - 10	GLP-10	32.10305556	-116.5375	Clásticos, cantos, arena y grava	86	No se alcanzó a cortar basamento

De acuerdo a estos datos y considerando un nivel estático de 10 m (Beltrán, 2001) las conductividades hidráulicas aproximadas para el valle de Guadalupe se encuentran entre los rangos 2.94 a 45.27 $m/día$; predominando los valores superiores a 8.64 $m/día$ (CNA, 2009). Véase Apéndice A.

Tabla 4 – Valores de conductividades hidráulicas para distintos materiales, con datos de Anderson & Woessner (1992, pag. 40)

	K (m/día)		
	Min.	Max.	Media
Rocas ígneas y metamórficas			
Sin fracturar	0.0000001	0.001	0.0005
Fracturada	0.001	5	2.5005
Arcilla, Limo, Loess	0.00000007	4	2
Arenas arcillosa	0.06	10	5.03
Arena			
Fina	0.4	9	4.7
Gruesa	9	200	104.5
Grava	100	6000	3050

Tabla 5 – Valores de coeficiente de almacenamiento para distintos materiales, modificada de Anderson & Woessner (1992, pág. 27)

	Número de análisis	S		
		Min.	Max.	Media aritmética
Arcilla	27	0.01	0.18	0.06
Arena				
Fina	287	0.01	0.46	0.33
Gruesa	143	0.18	0.43	0.30
Grava	33	0.13	0.40	0.28

Observando los valores de la tabla 4, se puede corroborar que los valores de conductividad son los que describen un tipo de material predominante que va desde las arenas arcillosas hasta arenas gruesas y algunas gravas. Tal como aparece en la información de la tabla 3.

2.2.5. Coeficientes de almacenamiento

Fetter (2001) propone un coeficiente de almacenamiento para acuíferos libres que va de 0.02 a 0.30, por otra parte Villanueva e Iglesias (1985) considerando un acuífero libre de medio poroso intergranular compuesto por gravas y arenas establecen un rango entre 0.05 y 0.15 y por último en la tabla 5 se encuentran los valores, por tipo de material, considerados por Anderson y Woessner (1992).

Por lo tanto, basándose en la información anterior, los valores para coeficiente de almacenamiento utilizados en este trabajo de tesis se encuentran en un rango que va de 0.05 a 0.28.

2.2.6. Precipitación

Se utilizaron los registros de precipitación de dos estaciones meteorológicas: Valle de Guadalupe y El Mogor, estos con un intervalo de muestreo de 5 y 10 minutos correspondientemente. Para facilitar la ubicación de los eventos tanto en las series de nivel piezométrico como en los registros de precipitación, estos últimos se agruparon en nuevos intervalos de 3 horas. Debido a que en posteriores ajustes al modelo se concluyó que no era

necesaria una modelación con periodos de estrés menores a 1 día, los registros iniciales de precipitación con intervalos de 5 y 10 minutos finalmente se fijaron en registros diarios de los meses que presentan mayores volúmenes de precipitación (enero y febrero de las correspondientes temporadas) y siendo estos en los que se ubicaron los eventos extraordinarios.

2.2.7. Entradas del sistema

2.2.7.1. Recargas horizontales

Considerando un área de la cuenca de Guadalupe de $\sim 2400 \text{ km}^2$, y tomando en cuenta $\sim 455 \text{ km}^2$ correspondientes al área de la subcuenca La Misión (Campos, 2008) y los $\sim 103.55 \text{ km}^2$ del área que cubre el valle de Guadalupe; obtenemos una superficie de aportación por escurrimientos de $\sim 1841.45 \text{ km}^2$ que influyen directamente como recarga horizontal mediante el proceso de “recarga de frente de montaña” establecido por Wilson y Guan (2004) para los climas semiáridos.

La recarga por efecto de frente de montaña se presenta, en diferentes proporciones, prácticamente en toda la frontera impermeable del acuífero; sin embargo, para efectos prácticos, en este trabajo de tesis solo se consideraron 8 zonas principales de aportes horizontales.

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; se tomó este porcentaje inicial en la calibración del modelo y este fue variando hasta encontrar un valor que ajustó de la mejor forma los datos simulados con los proporcionados por los medidores.

Por otra parte, para representar de una mejor manera los procesos de recarga que se llevan a cabo en el acuífero de Valle de Guadalupe, las zonas de recarga se han dividido en dos clasificaciones generales: *Zona de recarga primaria*, que se encuentra al este del valle y comprende la entrada el arroyo Guadalupe; y por otra parte están las *Zonas de recargas secundarias* en la cual están todos los aportes que presentan efecto de frente de montaña.

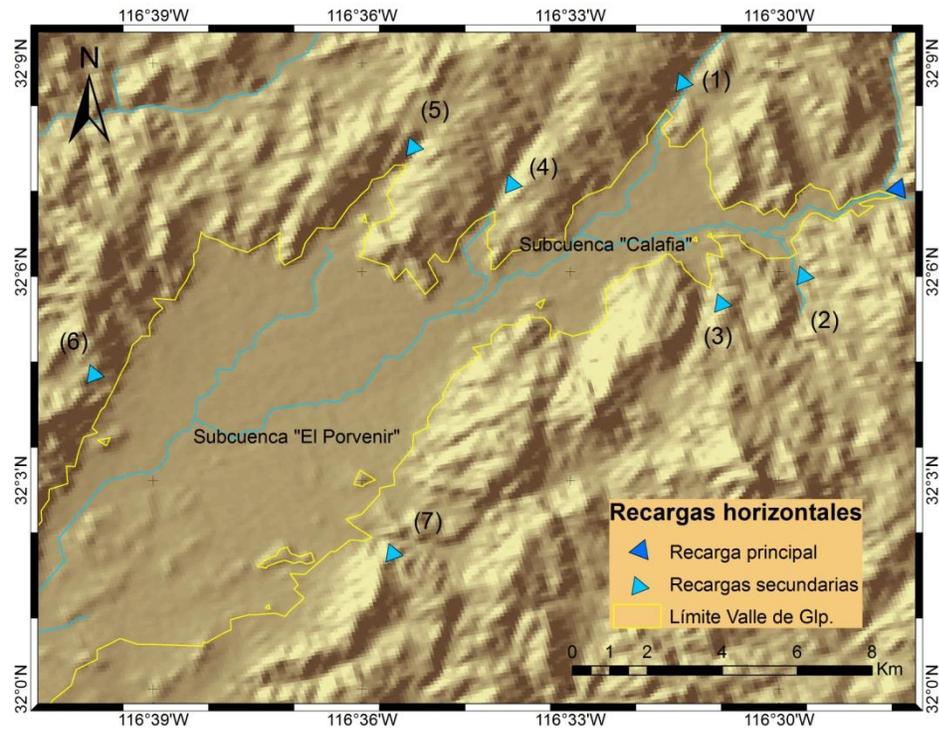


Fig. 17 – Ubicación de las zonas de recarga consideradas en el modelo

2.2.7.1.1. Recarga principal

La recarga principal se modeló implementando una herramienta numérica para simular el proceso de recarga-infiltración en la zona que comprende el cauce del arroyo Guadalupe; dicha herramienta se basa en la siguiente analogía:

Considerando un volumen de recarga R , se plantean las siguientes condiciones de recarga:

$R \leq R_{MIN}$	Se activa sección 1
$R_{MIN} < R \leq R_1$	Se activan secciones 1 y 2
$R_1 < R \leq R_2$	Se activan secciones 1,2 y 3
$R_2 < R \leq R_3$	Se activan secciones 1,2,3 y 4
$R_3 < R \leq R_4$	Se activan secciones 1, 2, 3, 4 y 5
$R_4 < R \leq R_{MAX}$	Se activan las 6 secciones

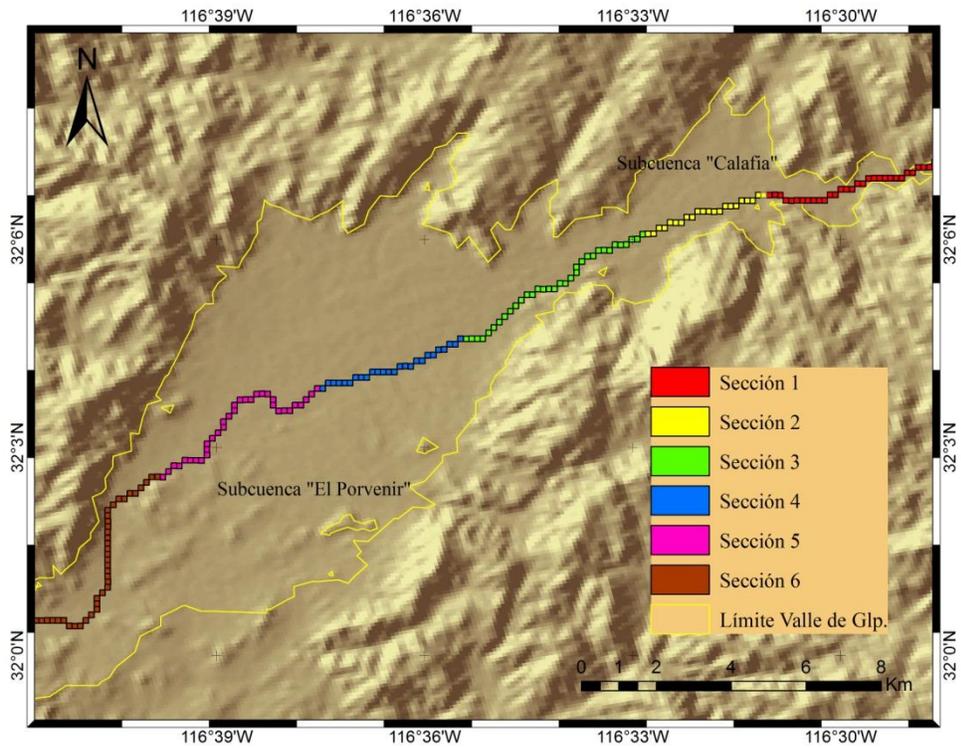


Fig. 18 – Secciones a lo largo del cauce del arroyo Guadalupe consideradas en la herramienta numérica de recarga principal.

La recarga para cada una de las secciones está dada por la ecuación:

$$RP_n = \left(\frac{R}{C_n} \right) \cdot A \quad (16)$$

$$R = RP_n + RP_{n+1} \dots + RP_6 \quad (17)$$

donde:

R es el volumen total de recarga por el arroyo Guadalupe en el periodo de estrés.

R_{MIN} es la recarga mínima de los periodos de estrés modelados.

R_{MAX} es la recarga máxima de los periodos de estrés modelados.

RP_n es el volumen parcial de recarga de la sección n .

C_n es el número de celdas que conforman la sección n .

A es el porcentaje de aporte de la sección n .

n es el número de sección activa.

2.2.7.1.2. Recargas secundarias

Las zonas de recargas secundarias o laterales consideradas en el presente trabajo son: POP-1 (1), Cañada de los encinos (2), Cañada Ancha (3), Cañada Guadalupe (4), Cañada del Trigo (5), Cañada San Felipe (6) y Cañada el Mogor (7).

2.2.7.2. Recargas verticales

La recarga vertical está dada por la porción de precipitación que cae e infiltra en la zona que comprende el valle de Guadalupe ($\sim 103.55 \text{ km}^2$). 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.

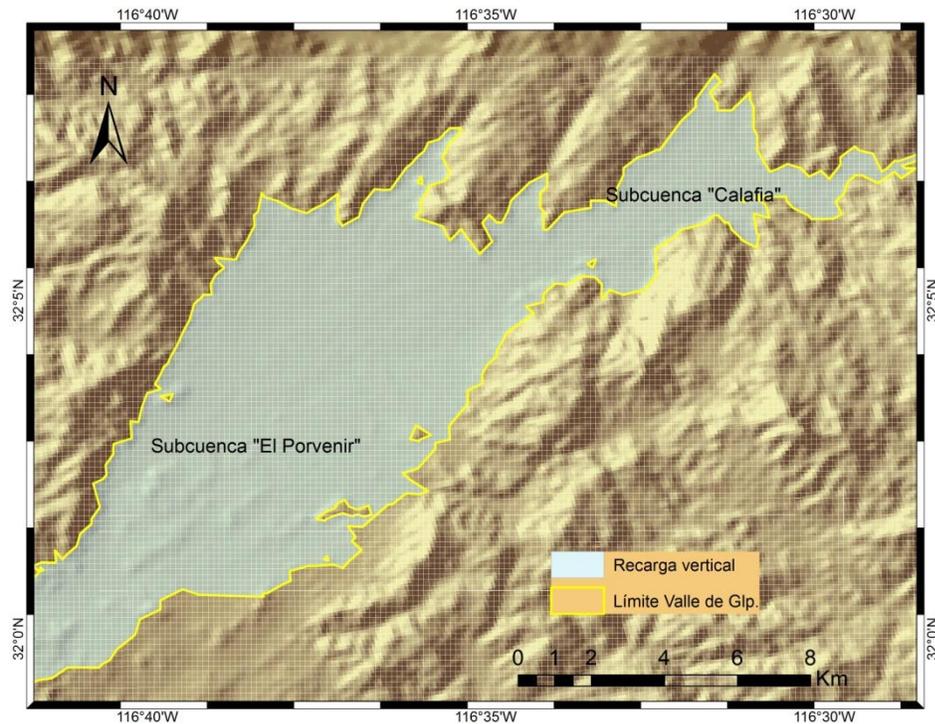


Fig. 19 – Superficie que presenta recarga vertical por infiltración, aprox. 103.55 km^2

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. (Campos, 2008).

De igual manera que en la recarga horizontal, para fines de calibración se comenzará con un porcentaje de 10% de volumen de infiltración y en corridas posteriores del modelo éste porcentaje podría ir fluctuando hasta alcanzar la correlación deseada precipitación-nivel.

Tabla 6 – Volúmenes de recarga vertical mensuales por precipitación directa en el área que conforma el acuífero de Valle de Guadalupe en el periodo 2010-2012.

Fecha	Precipitación (mm)	% de aportación	Área (km ²)	Volumen total de precipitación (m ³)
Enero 2010	207			2143485.00
Febrero 2010	102.6			1062423.00
Marzo 2010	27.9			288904.50
Abril 2010	31			321005.00
Mayo 2010	0.5			5177.50
Junio 2010	2			20710.00
Julio 2010	4.05	10%		41937.75
Agosto 2010	0.75			7766.25
Septiembre 2010	4.81			49807.55
Octubre 2010	42.61			441226.55
Noviembre 2010	25.65			265605.75
Diciembre 2010	98.95			1024627.25
Enero 2011	12.62			130680.10
Febrero 2011	134.58			1393575.90
Marzo 2011	42.49			439983.95
Abril 2011	13.59			140724.45
Mayo 2011	4			41420.00
Junio 2011	0			0.00
Julio 2011	0	10%	103.55	0.00
Agosto 2011	0.4			4142.00
Septiembre 2011	0.4			4142.00
Octubre 2011	6.4			66272.00
Noviembre 2011	65.4			677217.00
Diciembre 2011	26.6			275443.00
Enero 2012	9.6			99408.00
Febrero 2012	36.4			376922.00
Marzo 2012	43.6			451478.00
Abril 2012	44.8			463904.00
Mayo 2012	3.6			37278.00
Junio 2012	0.4			4142.00
Julio 2012	0.2	10%		2071.00
Agosto 2012	1.8			18639.00
Septiembre 2012	4.8			49704.00
Octubre 2012	5			51775.00
Noviembre 2012				0.00
Diciembre 2012				0.00

El volumen de recarga se refiere al volumen de agua infiltrada que llega hasta el acuífero. 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 & Simmers, 2002).

2.2.8. Salidas del sistema

2.2.8.1. Extracción por bombeo

Según datos de la CNA actualmente existen un total de 1374 aprovechamientos, de los cuales 754 se encuentran en operación, 57 en rehabilitación y 563 ya no están en uso.

Los volúmenes de extracción del acuífero son en primer lugar para uso agrícola, industrial, doméstico y pecuario a través de los 186 aprovechamientos principales (pozos profundos) antes mencionados extrayendo un total de $\sim 19 \text{ Mm}^3$ según datos reportados por CNA, 2009. Véase Apéndice B.

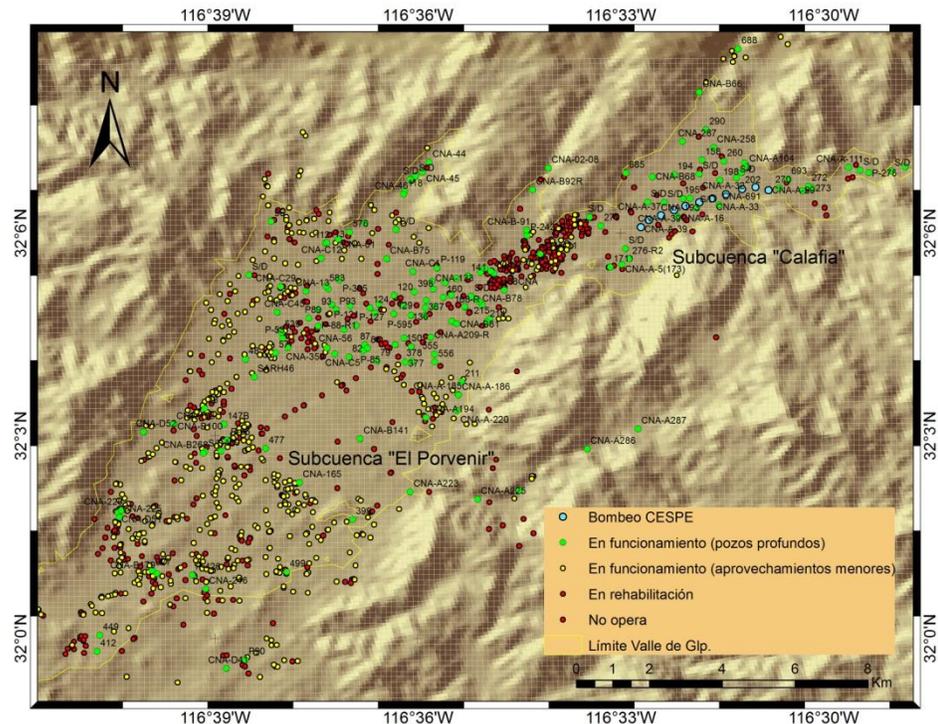


Fig. 20 – Distribución de aprovechamientos en la zona del acuífero de Valle de Guadalupe.

CNA determinó la extracción de agua subterránea para uso agrícola basándose en la información obtenida durante recorridos 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, así mismo se obtuvo información relativa a características constructivas de cada pozo activo ubicado dentro del área de análisis.

Por otra parte, está la extracción que se lleva a cabo por la Comisión Estatal de Servicios Públicos de Ensenada (CESPE) para cubrir una parte del abastecimiento de la ciudad de Ensenada, lo anterior mediante una batería de 11 pozos dispuestos en la zona del arroyo Guadalupe en la subcuenca “Calafia”.

Tabla 7 – Régimen de bombeo utilizado en las simulaciones

Mes	Porcentaje de bombeo	
	Riego	CESPE
Enero	1%	8%
Febrero	1%	7%
Marzo	2%	8%
Abril	13%	8%
Mayo	13%	9%
Junio	13%	9%
Julio	13%	9%
Agosto	13%	9%
Septiembre	13%	8%
Octubre	13%	9%
Noviembre	3%	8%
Diciembre	2%	8%

La información anterior dio como resultado una extracción media anual de $\sim 19 \text{ Mm}^3$ antes mencionada, de la cual aproximadamente 9.5 Mm^3 son aprovechados para uso público urbano de la ciudad de Ensenada y el poblado Francisco Zarco (CNA, 2009). Los porcentajes que definen los regímenes de extracciones mensuales de la Tabla 7 se obtuvieron de datos recopilados en estudios previos (Andrade, 1992, Andrade, 1997, Campos, 2008).

Aunque en menor rango de consumo, es conveniente considerar, y tiene que agregarse al volumen de extracción de agua subterránea, la extracción acuífera que es aprovechada 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 rubros (Andrade, 1997; Campos, 2008).

2.2.8.2. Evapotranspiración

En el modelo se implementó la herramienta de Evapotranspiración basada en la metodología del *USGS MODFLOW* presentada por Harbaugh(2005). Esta herramienta simula el efecto de la transpiración de las plantas y la evaporación directa, removiendo agua del régimen saturado de agua subterránea y se basa en las siguientes suposiciones:

Cuando el nivel es igual y por encima de un nivel específico, en este caso el nivel de terreno natural (TN), ocurre pérdida por evapotranspiración a la tasa especificada.

Cuando la profundidad del nivel freático debajo del nivel de TN excede un nivel específico llamado “profundidad de extinción” (PE), ocurre pérdida por evapotranspiración.

Lo anterior se expresa mediante las ecuaciones:

$$PEVT = EVT, \quad \text{Para } h_{i,j} > TN \quad (18)$$

$$PEVT = EVT \cdot \frac{h_{i,j} - (TN - PE)}{PE}, \quad \text{Para } (TN - PE) \leq h_{i,j} \leq TN \quad (19)$$

$$PEVT = 0, \quad \text{Para } h_{i,j} < (TN - PE) \quad (20)$$

Donde:

PEVT es la tasa de pérdida por unidad de área del nivel freático debido a evapotranspiración.

$h_{i,j}$ es el nivel piezométrico de la celda en la cual ocurre evapotranspiración.

EVT es el máximo valor posible de evapotranspiración.

TN es la elevación del terreno natural.

PE es la profundidad de extinción, tal que cuando la distancia entre TN y $h_{i,j}$ excede PE, la pérdida por evapotranspiración para

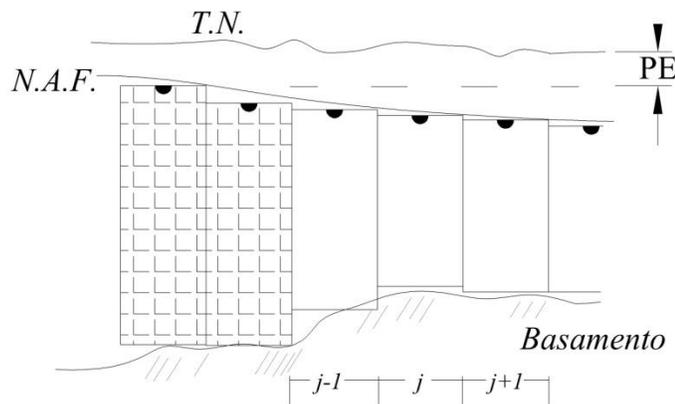


Fig. 21 – Herramienta evapotranspiración, en achurado se muestran las celdas en las que se ha activado la herramienta.

En 2009 la CNA consideró un valor de 240 mm de evapotranspiración potencial media anual utilizando datos de las estaciones climatológicas Olivares Mexicanos y Agua Caliente. Considerando el valor propuesto de evapotranspiración y aplicándolo a los 22500 m² que cubren el área de una celda de 150 x 150 m; obtenemos un estimado de la EVT potencial anual en las celdas en las que se active la herramienta de EVT.

$$EVT = (22500 \text{ m}^2) (0.240 \text{ m}) = 5400 \frac{\text{m}^3}{\text{año}} \text{ por celda}$$

La EVT potencial se distribuyó en porcentajes mensuales, debido a que varía a lo largo del año según los índices de radiación solar para la latitud en la que se encuentra la zona de estudio.

Tabla 8 – Valores de extracción por Evapotranspiración potencial utilizados en las simulaciones.

Mes	Radiación Solar (watts/m ²)	% de EVT	Vol. de EVT anual (m ³ /celda)	Vol. de EVT mensual (m ³ /celda)
Enero	90.84	4%	5400	239.64
Febrero	127.28	6%		335.77
Marzo	184.21	9%		485.95
Abril	221.53	11%		584.38
Mayo	220.71	11%		582.22
Junio	223.71	11%		590.14
Julio	234.35	11%		618.21
Agosto	221.24	11%		583.61
Septiembre	191.79	9%		505.92
Octubre	145.78	7%		384.56
Noviembre	103.35	5%		272.62
Diciembre	82.26	4%		216.99

Es importante mencionar que dicho valor solo entrará en operación en zonas activas donde el nivel freático se encuentre a 1 m o menos del nivel del terreno natural (PE).

2.2.8.3. Flujo superficial

Debido a los grandes volúmenes de recarga que entran al sistema en los eventos extraordinarias, el nivel freático presenta un incremento que sobrepasa la cota del terreno natural; debido a lo anterior; se implementó una herramienta que simula el flujo superficial mediante una extracción del sistema y está basada en las siguientes suposiciones:

$$D_{i,j} = CD \cdot (H_{i,j} - TN_{i,j}) \quad \text{Para } H_{i,j} \geq TN_{i,j}$$

$$D_{i,j} = 0 \quad \text{Para } H_{i,j} < TN_{i,j}$$

$$CD = \frac{K_{i,j} \cdot L_{i,j} \cdot A_{i,j}}{G_{i,j}}$$

Donde:

$D_{i,j}$ Es el volumen drenado,

$H_{i,j}$ es el nivel piezométrico en la celda analizada,

$TN_{i,j}$ es el nivel del terreno natural en la celda analizada,

CD se le llama la conductancia del dren,

$K_{i,j}$ es la conductividad hidráulica del material que conforma la cama del dren,

$L_{i,j}$ es la longitud del dren dentro de la celda analizada,

$A_{i,j}$ es el ancho del dren dentro de la celda analizada,

$G_{i,j}$ es el grosor de la cama del dren,

3. Resultados

3.1. Análisis de los datos

Se logró identificar y correlacionar los eventos de precipitación extraordinaria para las temporadas 2009 -2010 y 2010 -2011 en las series correspondientes a los pozos CNA-A-167, P-213, POP-3, POP-2, P-202 y P-452. Es importante mencionar que en temporadas anteriores (2007 – 2008 y 2008 – 2009) no se cuenta con el registro completo de nivel freático por lo que no se logró ubicar posibles incrementos de nivel debido a eventos extraordinarios de precipitación en estas temporadas.

3.1.1. Temporada 2009-2010

Se ubicaron cuatro eventos importantes en los registros proporcionados por la estación “El Mogor”, el primero de ellos del día 18 al 22 de enero de 2010 precipitando ~203 mm, siendo el día 21 de enero el de mayor relevancia con 64.07 mm; el segundo evento el día 6 de Febrero con 22.03 mm, seguido por el día 20 de Febrero de 2010 con 26.09 mm precipitados y por último, el evento el día 27 de Febrero con 30.59 mm.

3.1.2. Temporada 2010-2011

Para esta temporada se presentaron dos eventos extraordinarios de relevancia, el primero de ellos tuvo lugar los días 18 y 19 de Febrero de 2011 precipitando 35.49 y 53.74 mm respectivamente; el segundo evento ocurrió el día 26 de Febrero de 2011 con 28.31 mm precipitados. Es en este periodo que se puede observar de mejor manera el desfase en el aumento del nivel freático en los distintos pozos dentro del cauce del arroyo Guadalupe siguiendo el orden: POP-3, POP-2 P-167 y finalmente P-452.

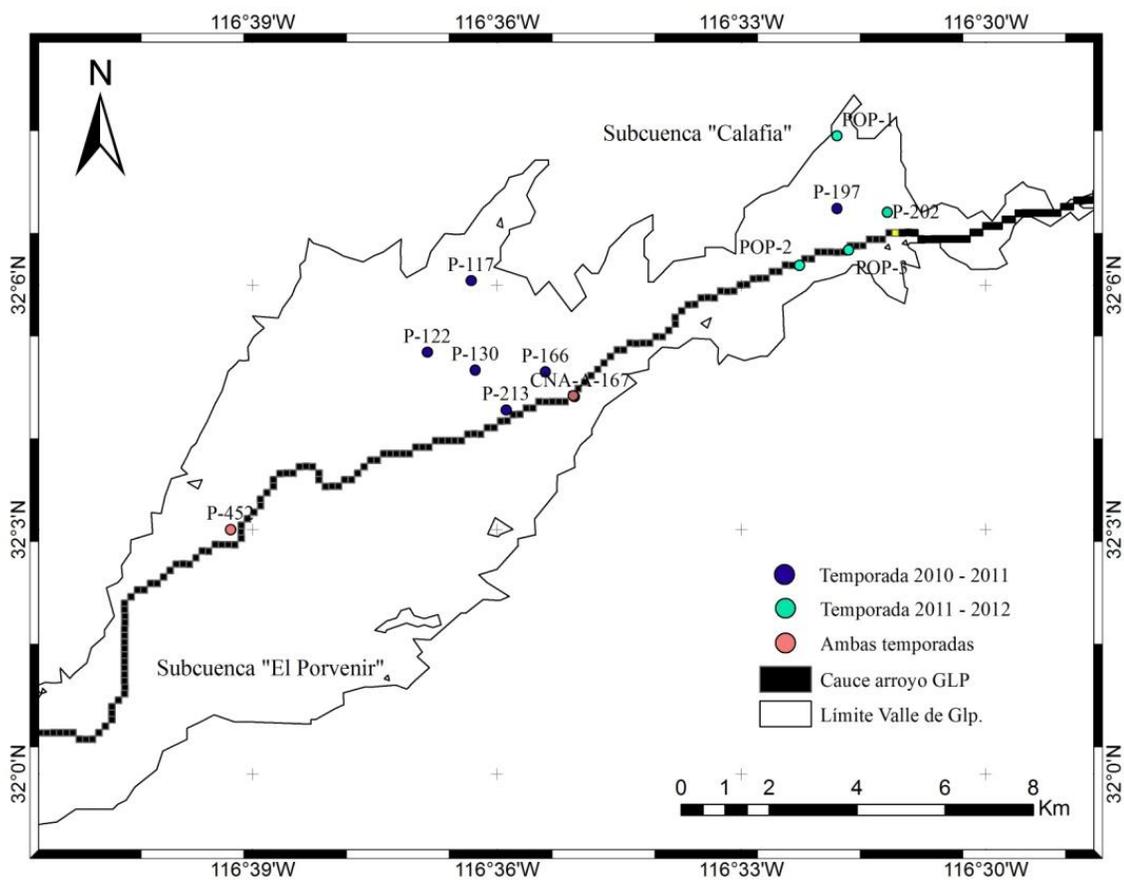


Fig. 22 – Pozos con registro por temporadas, y ubicación de los mismos con respecto al cauce del arroyo Guadalupe.

CNA-A-167

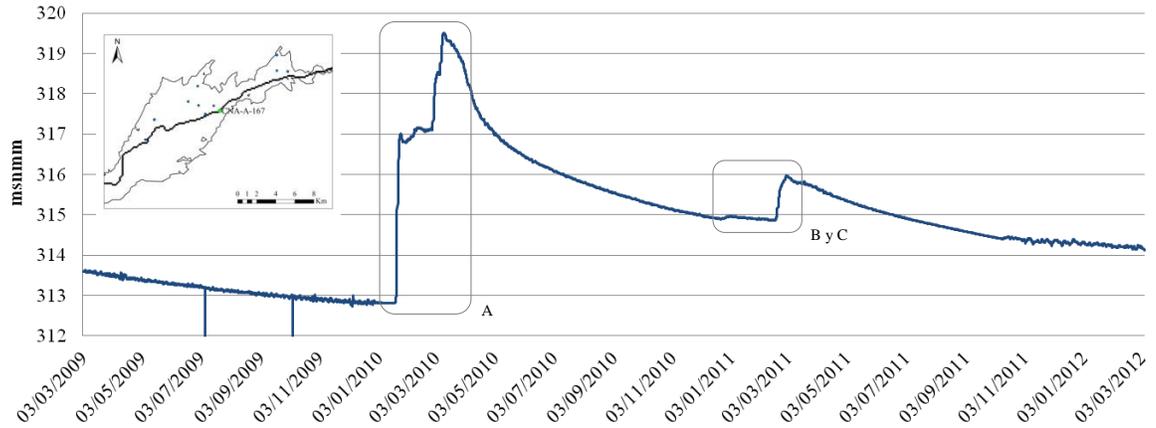


Fig. 23 – Evolución del nivel freático en el pozo CNA-A-167, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 al 6 de Marzo de 2012, donde A, B y C corresponden a respuestas del nivel freático debido a eventos de precipitación.

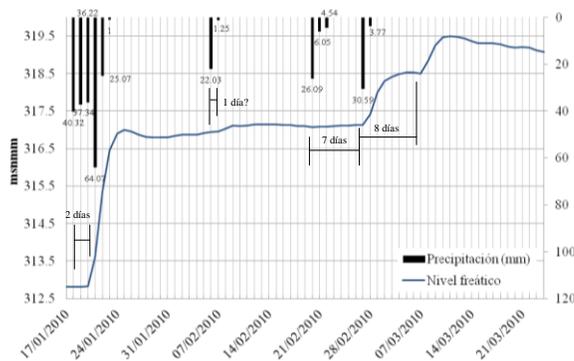


Fig. 24 – Evento A, correspondiente a la temporada 2009 – 2010.

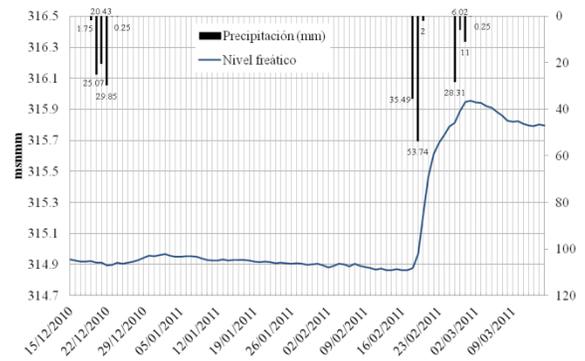


Fig. 25 – Evento B y C, correspondiente a la temporada 2010 – 2011.

El pozo CNA-A-167 al igual que el P-452 son de suma importancia ya que el registro de nivel piezométrico de estos cubre ambas temporadas de precipitación, 2009-2010 y 2010-2011. Al analizar los picos anómalos en las series de nivel y observar los registros de precipitación en las mismas fechas en que estos se presentan, se hace evidente la correlación entre éstos como se puede apreciar en la figura 24 correspondiente al pozo CNA-A-167 en la que se presenta un desfase en días entre el evento de precipitación y la respuesta del acuífero. Al parecer que el volumen de precipitación es el que parece regir el desfase entre dichos eventos y la correspondiente respuesta en el nivel piezométrico.

P-213

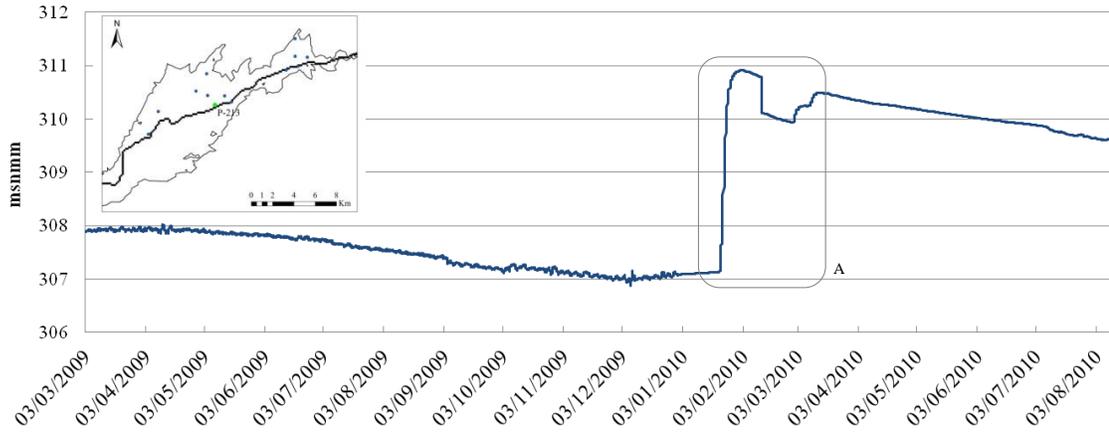


Fig. 26 – Evolución del nivel freático en el pozo P-213, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 y finalizando el día 13 de Agosto de 2010, donde A corresponde a la respuesta del nivel freático debido a eventos de precipitación.

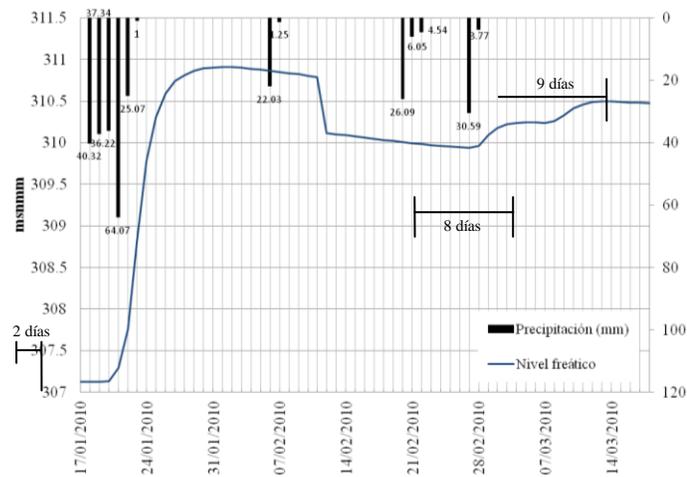


Fig. 27 – Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (Evento A, Fig. 26).

Al igual que en el pozo CNA-A-167 fue posible correlacionar precipitación-respuesta, esta vez en el pozo P-213 que se encuentra aguas abajo en el cauce del arroyo Guadalupe. En las figuras 26 y 27 se observan desfases similares a los observados en el pozo CNA-A-167 entre los días de los eventos y la respuesta de acuífero, en cuanto al descenso de nivel que se presenta el día 11 de febrero de 2010 se supone a éste como un fenómeno aislado y que se encuentra más relacionado con el manejo del equipo que con algún tipo de respuesta ante un fenómeno de índole natural.

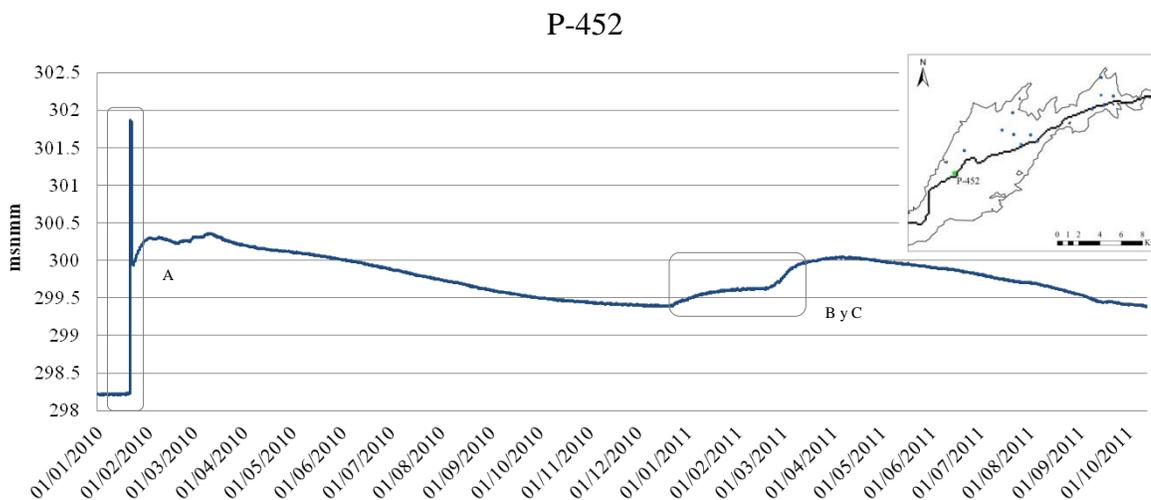


Fig. 28 - Evolución del nivel freático en el pozo P-452, dando inicio el día 3 de Marzo de 2009 y finalizando el día 12 de Octubre de 2012, donde A, B y C corresponden a respuestas del nivel freático debido a eventos de precipitación.

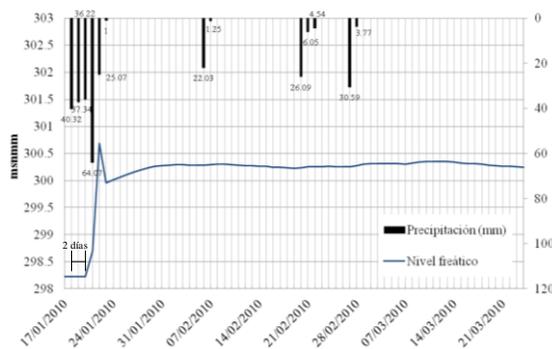


Fig. 29 – Evento A, correspondiente a la temporada 2009-2010

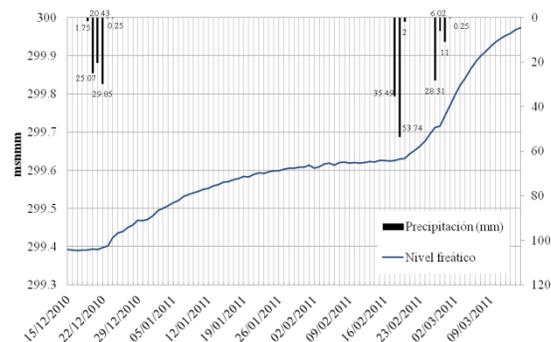


Fig. 30 – Eventos B y C, correspondiente a la temporada 2010-2011.

Como se mencionó anteriormente en el registro del pozo P-452 (figuras 28, 29 y 30) se muestran claramente los eventos de precipitación extraordinaria de las temporadas estudiadas y su correspondiente respuesta en el registro de nivel.

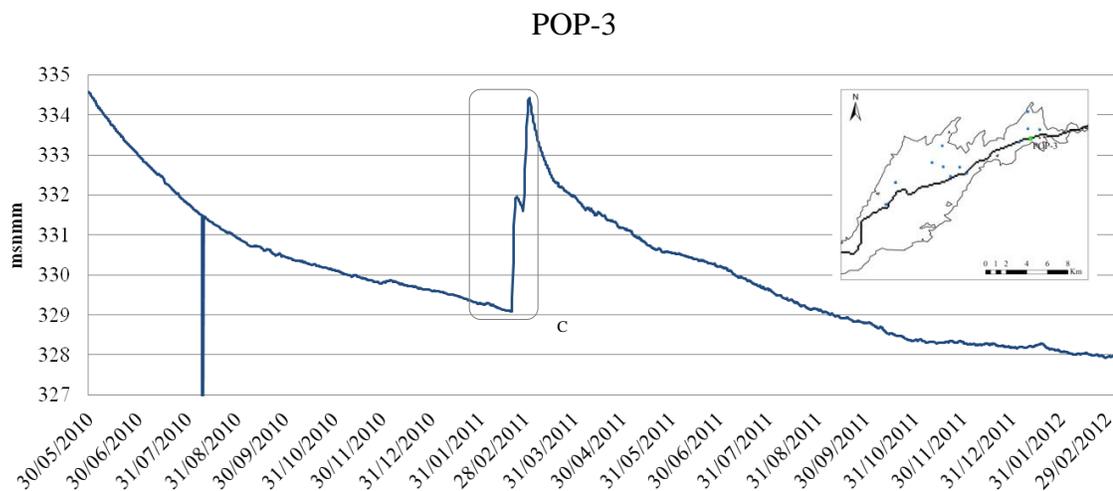


Fig. 31 - Evolución del nivel freático en el pozo POP-3, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 4 de Marzo de 2012, donde C corresponde a la respuesta del nivel freático debido a eventos de precipitación.

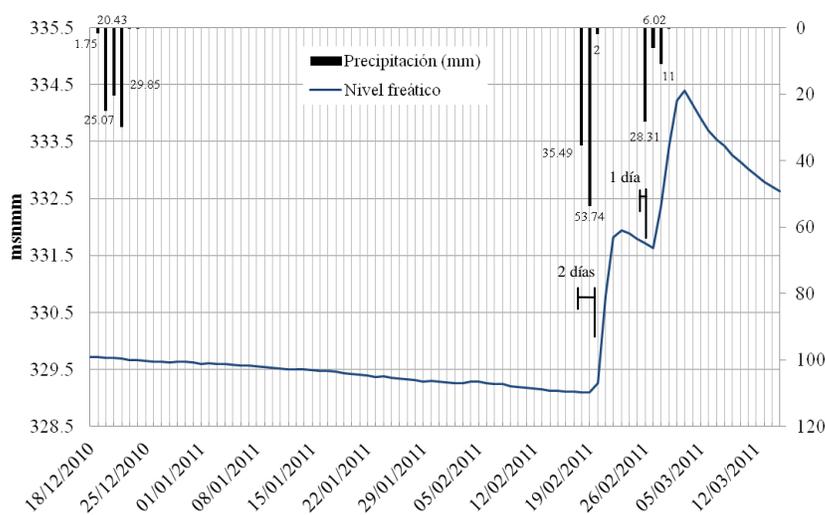


Fig. 32 - Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (Evento C, Fig. 31).

En el caso de los registros correspondientes a los pozos POP-3, POP-2 y P-202 se hace evidente que estos se encuentran en la porción aguas arriba del arroyo Guadalupe en la zona de la subcuenca “Calafia”, ya que es en estos registros en los que se observa la mayor recuperación en el nivel freático consecuencia de precipitaciones extraordinarias. Así mismo, se hace evidente la diferencia de incrementos de niveles conforme el arroyo se adentra en el valle, como es el caso del pozo POP-3 recuperando ~ 5 m y el pozo CNA-A-167 con alrededor de 1 m recuperado.

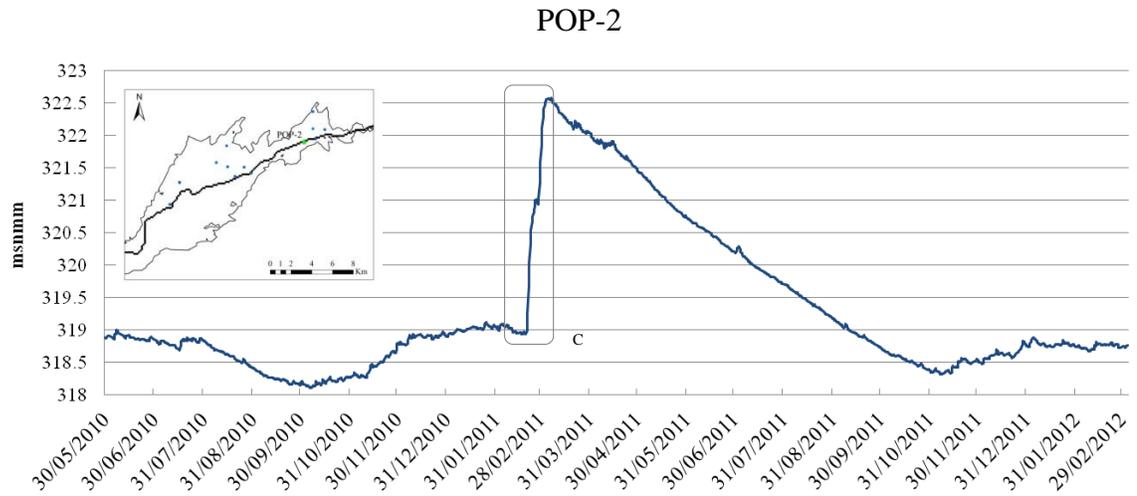


Fig. 33 - Evolución del nivel freático en el pozo POP-3, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 4 de Marzo de 2012, donde A corresponde a la respuesta del nivel freático debido a eventos de precipitación.

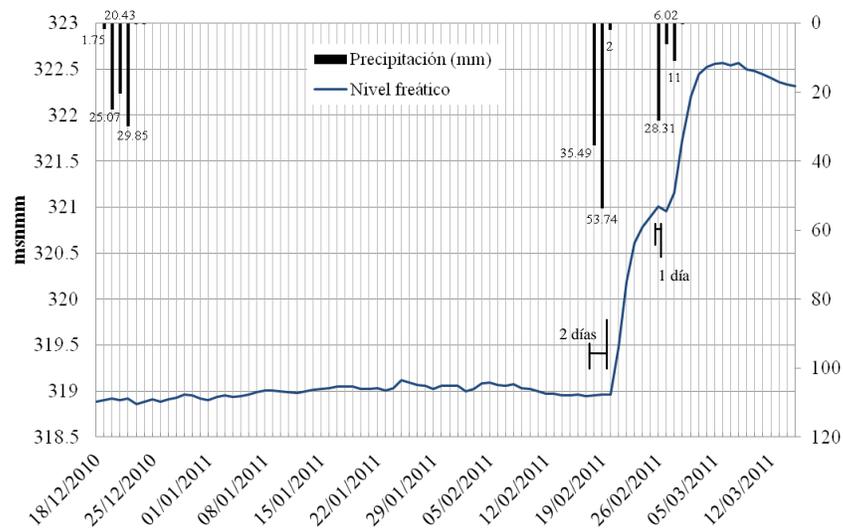


Fig. 34 - Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (Evento C, Fig. 33)

En las figuras 31 y 33 correspondientes a los pozos POP-3 y POP-2 se aprecia un comportamiento muy similar de la respuesta del acuífero a dichos eventos siendo el POP-3 el de mayor incremento con ~ 6 m de recuperación, producto de las tormentas de los días 18, 19 y 26 de febrero de 2011. En lo que respecta a la serie proporcionada por el medidor instalado en el pozo P-202 (figuras 35 y 36) se observa una anomalía más suavizada y no tan repentina como en los casos anteriores (POP-3 y POP-2), lo anterior como consecuencia

de la distancia que existe de este pozo al cauce del arroyo Guadalupe, que es por donde se supone llegan estas recargas provenientes de la zona serrana en forma de creciente.

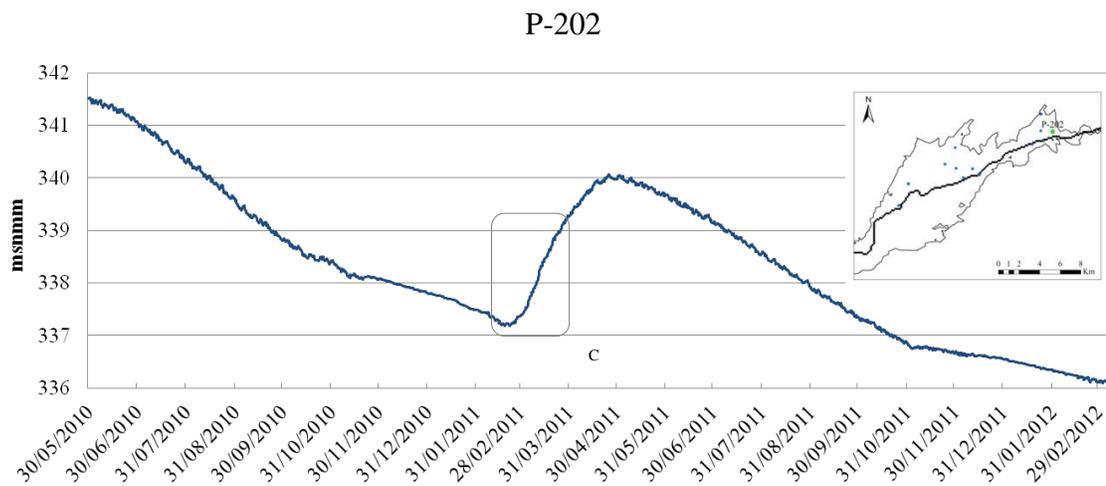


Fig. 35 - Evolución del nivel freático en el pozo P-202, dando inicio el día 30 de Mayo de 2010 y finalizando el día 5 de Marzo de 2012, donde A corresponde a la respuesta del nivel freático debido a eventos de precipitación.

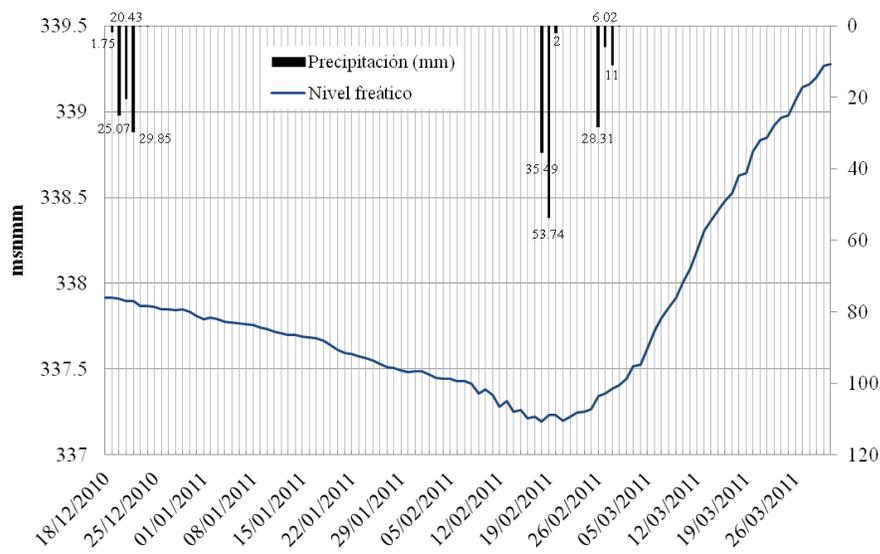


Fig. 36 - Eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta del nivel freático asociada (Evento C, Fig. 35)

3.2. Calibración del modelo

En la calibración de un modelo de flujo se demuestra que el modelo es capaz de reproducir flujos y niveles piezométricos medidos, definiendo una serie de parámetros, condiciones de frontera y periodos de estrés que producen flujos y niveles simulados que ajustan a los datos de campo con un cierto grado de error (Anderson & Woessner, 1992). En el presente trabajo se utilizó la calibración de prueba y error, en la cual se asignan valores a los parámetros y estos se van ajustando en corridas posteriores del modelo.

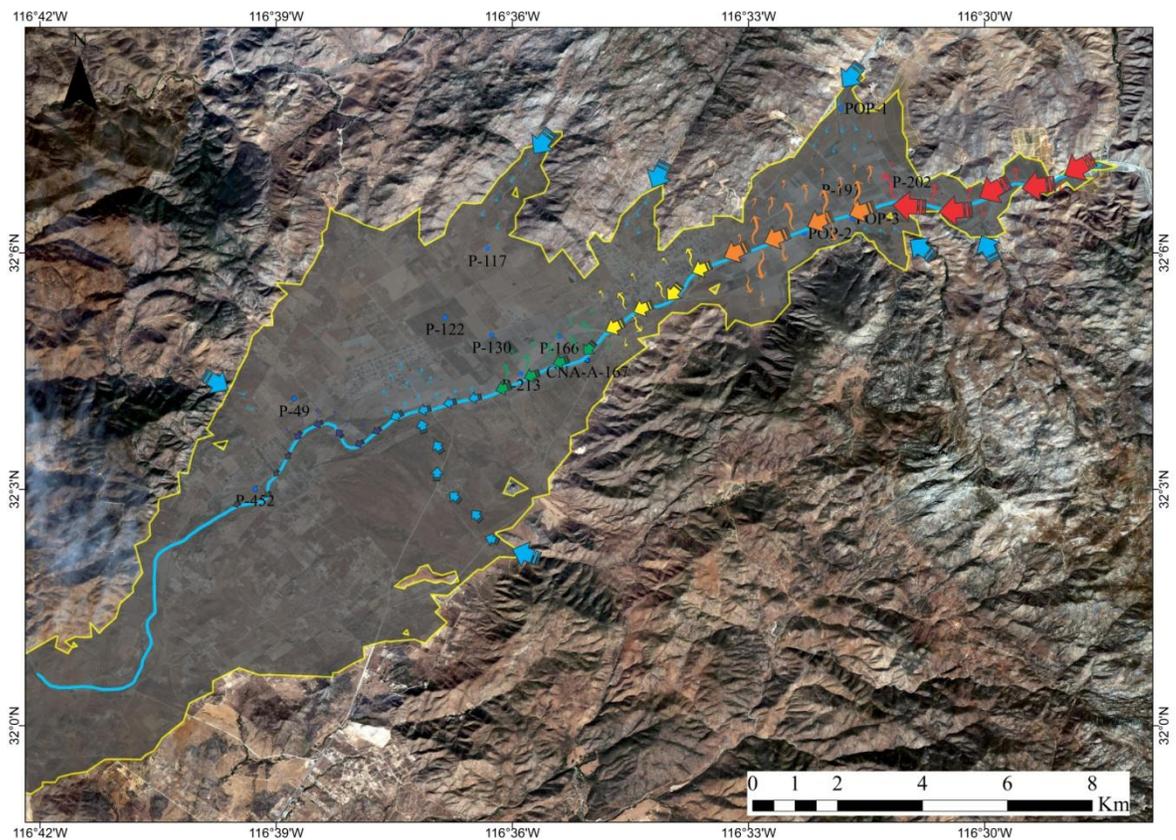


Fig. 37 – Proceso de recarga esquematizado producto del análisis previo para las temporadas estudiadas.

El proceso de calibración se basó en las siguientes suposiciones, resultado del análisis previo de los datos de las temporadas estudiadas:

- Los procesos de recarga en el acuífero de Valle de Guadalupe se calibraron utilizando tres tipos de recarga que para este trabajo llamaremos *recarga lenta* (horizontal), *recarga rápida* (flujo horizontal y posteriormente infiltración) y *recarga vertical* (infiltración).
- La *recarga lenta* se lleva a cabo a lo largo de todo el año y se da por todas las zonas de recargas definidas en el capítulo anterior, regida por porcentajes de aporte mensual directo al acuífero.
- La *recarga rápida* se presenta de forma súbita y es regida por la intensidad de eventos de precipitación extraordinaria que se presentan dentro de la cuenca Guadalupe. Siendo ésta la que se ve reflejada de mejor manera en el incremento del nivel freático en el acuífero.
- Por último, se consideró la *recarga vertical directa* en la zona que cubre el acuífero del Valle de Guadalupe.

El modelo se calibró en primera instancia en estado estacionario y posteriormente en estado transitorio, utilizando los datos mensuales de niveles piezométricos y precipitación de las temporadas de los años 2009, 2010 y 2011. Una vez pasada la primera calibración del modelo con datos mensuales (12 meses, véase Apéndice D) éste se corrió en el periodo diario (365 días) y finalmente, al lograr calibración exitosa, se llevó a cabo la simulación final de 720 días.

En la figura 39 se muestra un supuesto de cómo responde el nivel frático ante eventos de precipitación aislados, en verde y rojo se muestran los eventos de precipitación aislados y en los recuadros del mismo color que cubren parcialmente la curva de nivel freático se muestra su respuesta asociada.

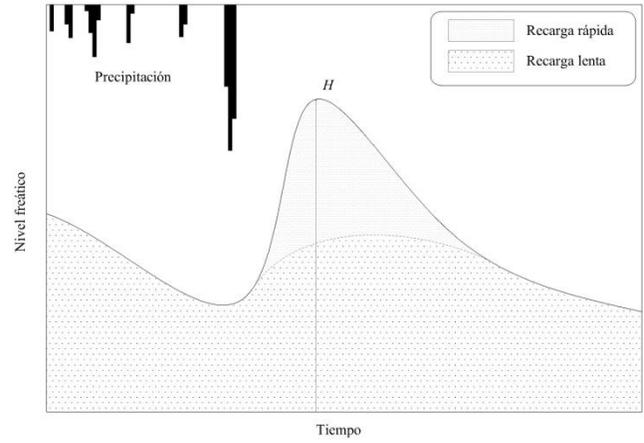
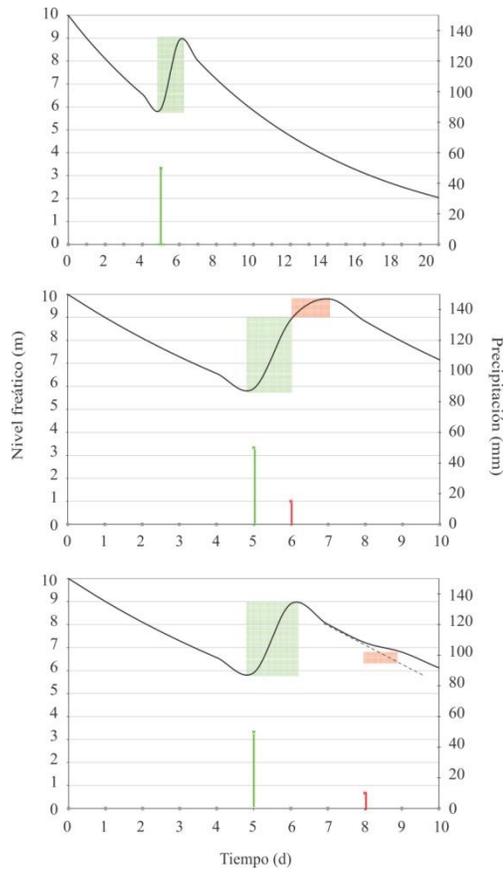


Fig. 38 – *Arriba*, proceso de respuesta rápida y lenta del acuífero a eventos de precipitación, modificado de C.D. Jan *et al.* (2011, pág. 139).

Fig. 39 - *Izquierda*, Esquema de la respuesta del nivel freático asociado a eventos de precipitación individuales, tomado de Van Gaalen *et al.* (2012, pág. 5).

3.3. Modelado de eventos precipitación – recarga.

Una vez habiendo analizado y correlacionado los eventos extraordinarios, de las temporadas 09-10 y 10-11, con la respuesta del nivel freático registrada en cada uno de los pozos que componen la red de monitoreo piezométrico y basándose en un supuesto de los procesos de recarga (figura 37), se llevó a cabo la simulación en el modelo generado obteniendo los resultados que se muestran en las figuras 40-51 en las que se muestran los datos registrados en los medidores y datos generados con el modelo, así como los eventos de precipitación extraordinaria causantes de estas anomalías.

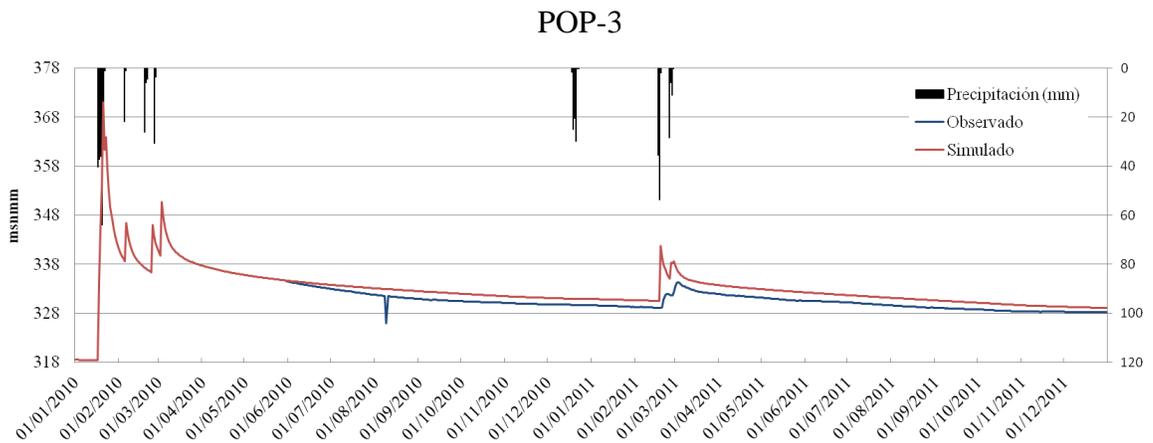


Fig. 40 – Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

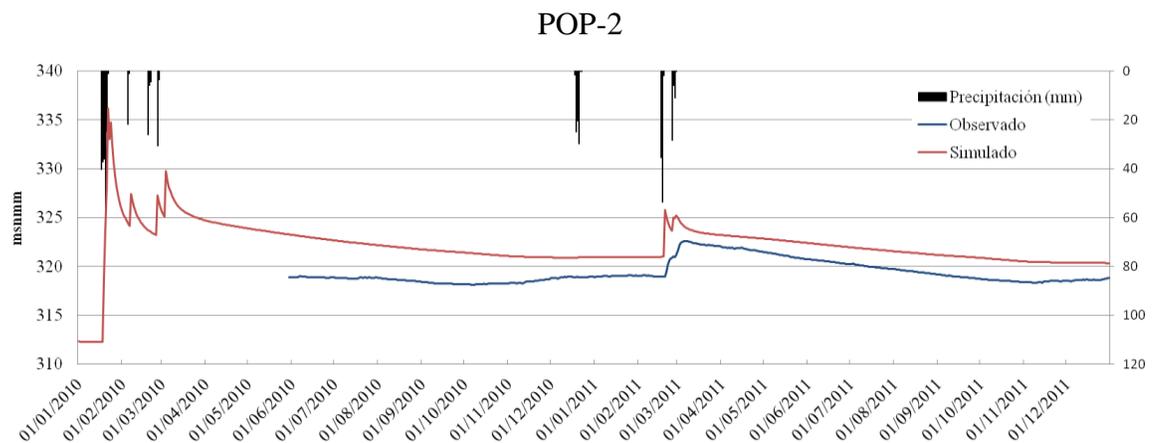


Fig. 41 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

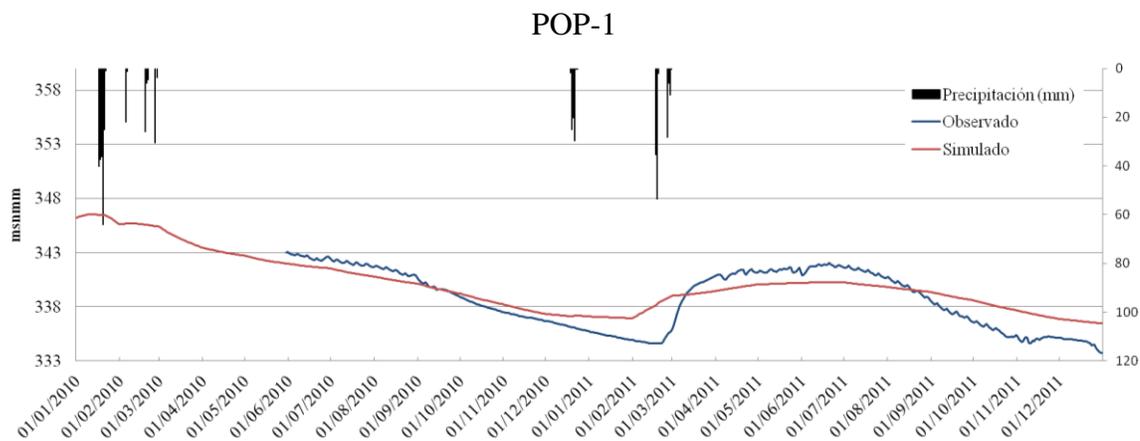


Fig. 42 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

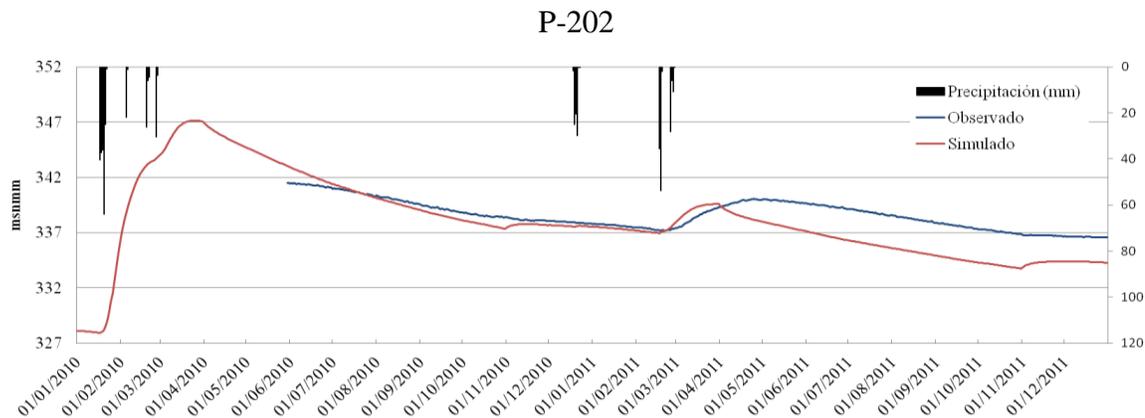


Fig. 43 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

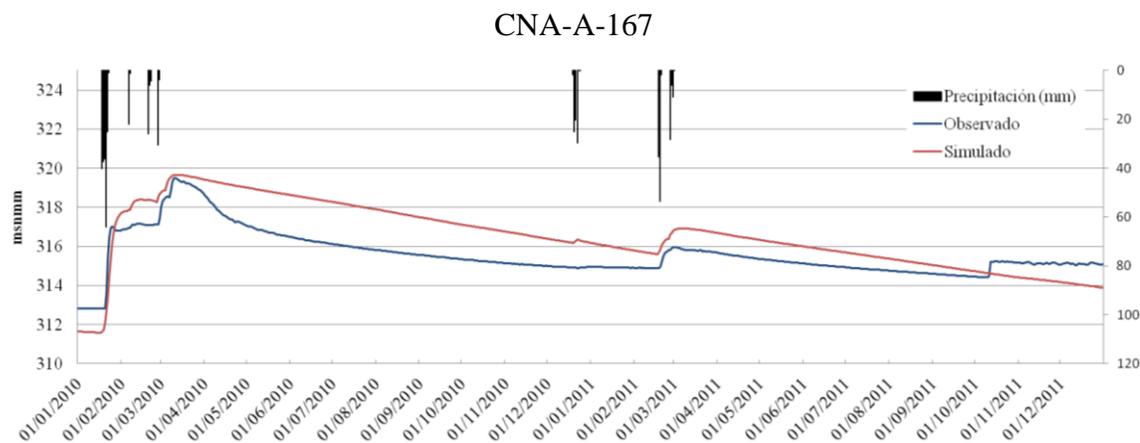


Fig. 44 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-452

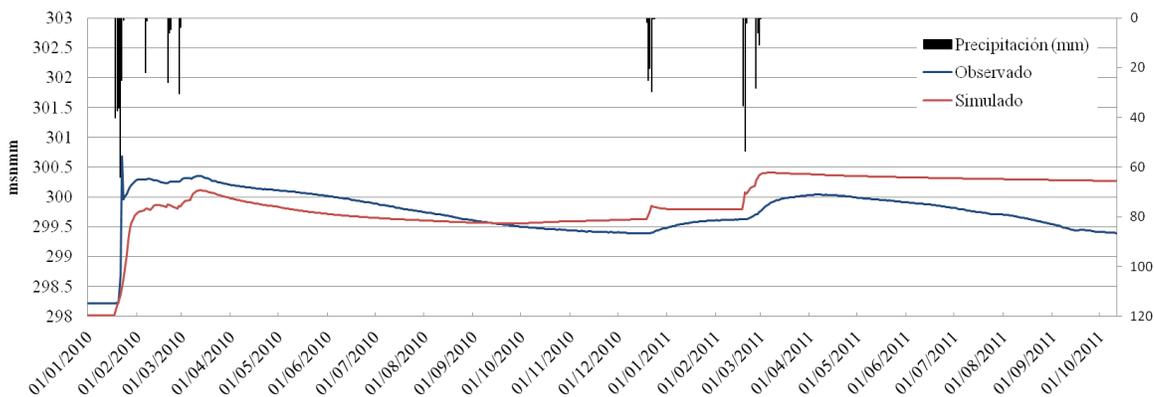


Fig. 45 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-213

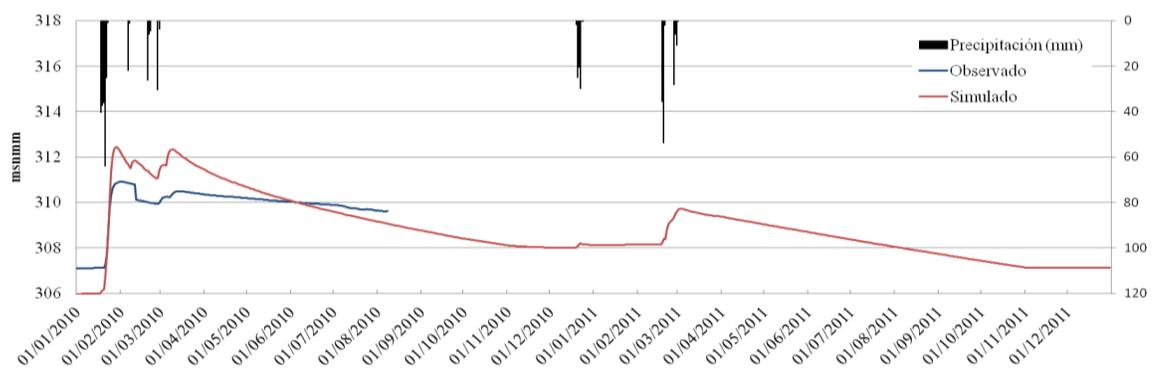


Fig. 46 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-117

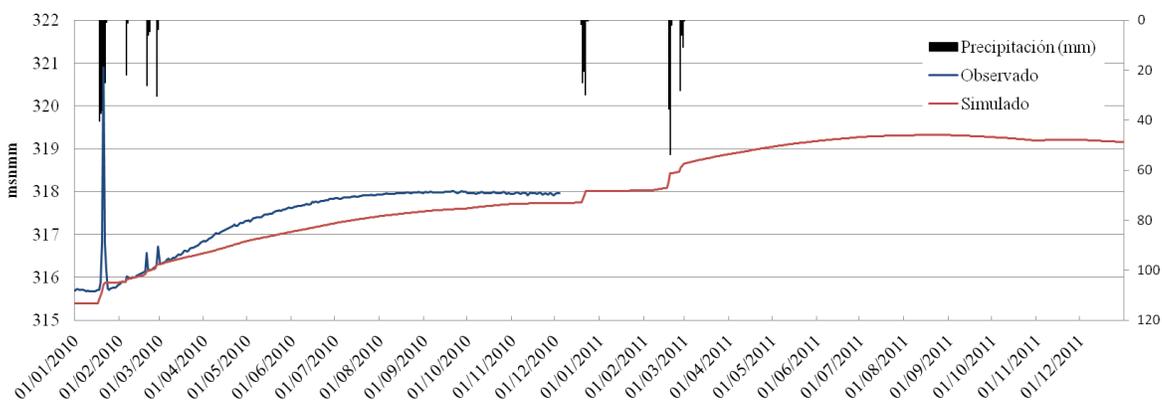


Fig. 47 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-166

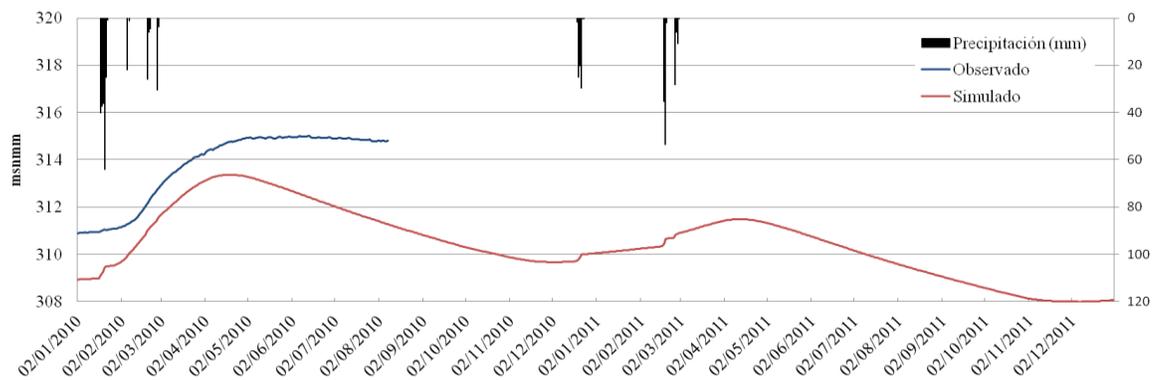


Fig. 48 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-122

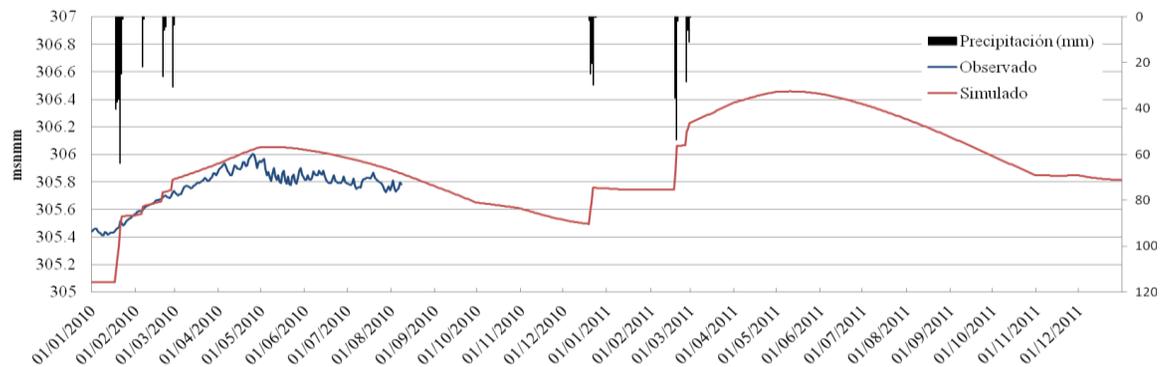


Fig. 49 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

P-130

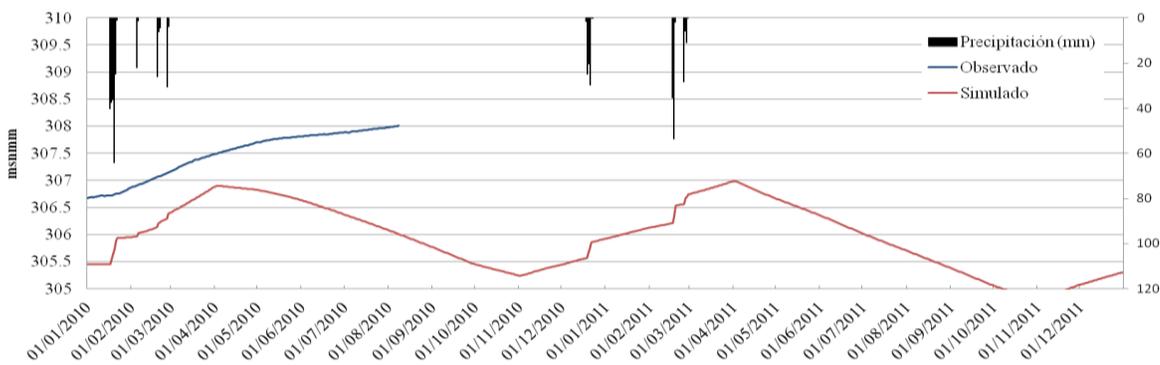


Fig. 50 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

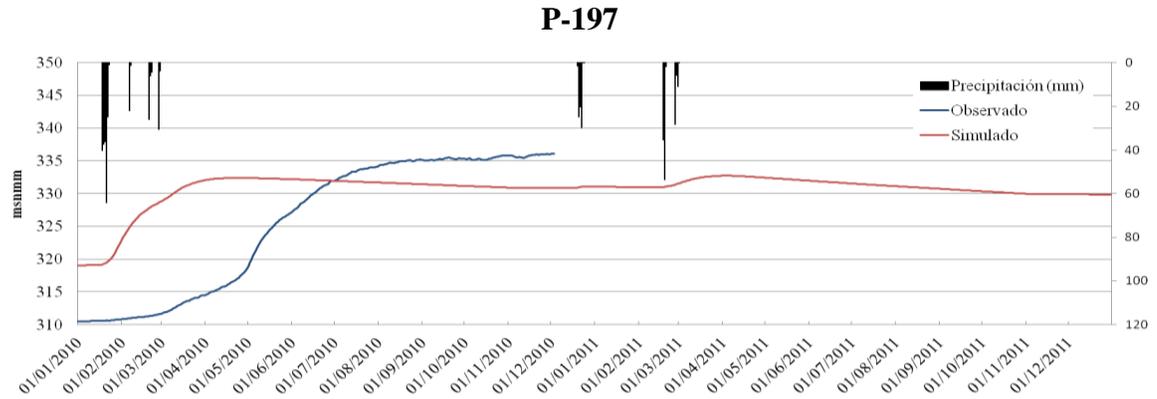


Fig. 51 - Nivel observado y simulado respecto a eventos extraordinarios de precipitación.

3.4. Validación del modelo

Se llevó a cabo la validación cuantitativa del modelo mediante la raíz media del error de ajuste (RMS por sus siglas en inglés), la cual está dada por la siguiente expresión (Anderson & Woessner, 1992):

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_{m,i} - h_{s,i})^2 \right]^{0.5}$$

Donde n es el número de pozos analizados, h_m es el nivel freático medido en campo, h_s es el nivel freático simulado y finalmente el subíndice i es el orden de incremento. Este parámetro dio como resultado 3.17 m en estado estacionario, 2.37 m hasta el día 8 de agosto de 2010 (220 días de simulación) y 1.46 m el 31 de Diciembre de 2011, (730 días de simulación); estos dos últimos en estado transitorio.

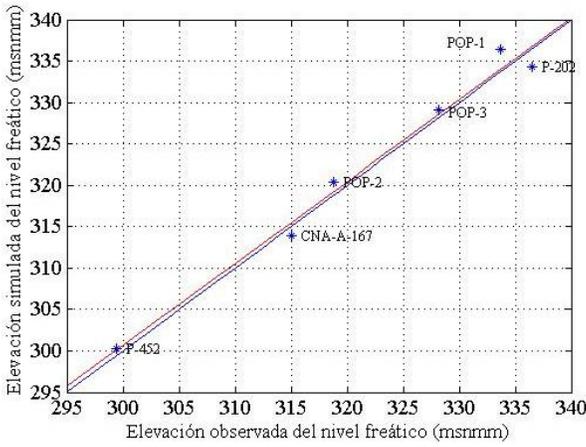
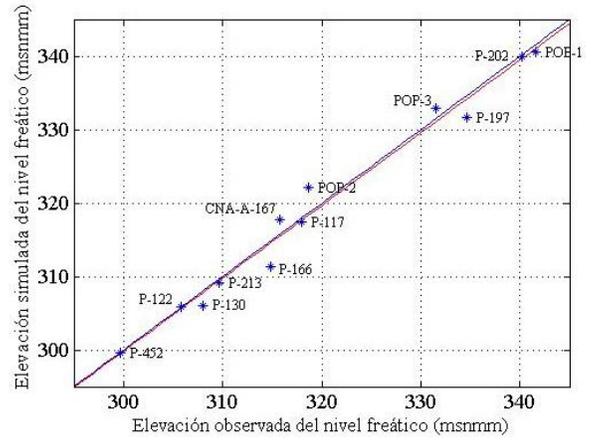
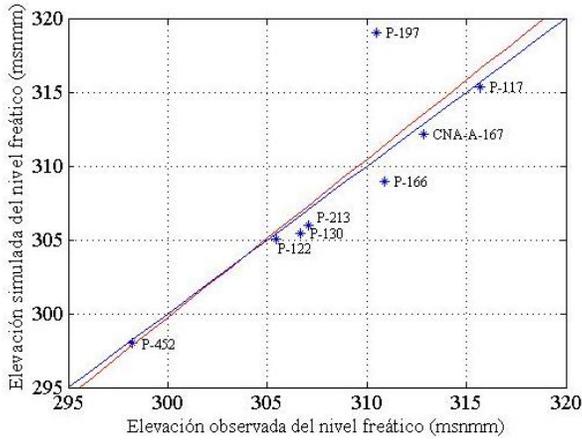


Fig. 52 (*Superior Izquierda*) – Se muestra la comparación entre el ajuste ideal (línea color azul) y el obtenido (línea color roja) en estado estacionario.

Fig. 53 (*Superior derecha*) - De igual forma que la figura anterior pero en estado transitorio a 220 días de simulación.

Fig. 54 (*izquierda*) – Una vez más en estado transitorio al final de la simulación (730 días).

4. Discusión

4.1. Los Datos

En los datos de nivel piezométrico proporcionados por una red de monitoreo se tuvieron bastantes limitantes ya que, a pesar de que el compendio es extenso, debido al mal manejo de los instrumentos, no hubo información valiosa en los primeros años de muestreo (2007-2009). Por otra parte, se presentaron periodos mensuales en los que no se registró la información de presión atmosférica proporcionada por el pozo P-254R, por lo que estos periodos, al no poder realizarse la correspondiente corrección barométrica, tampoco fueron utilizados en el presente trabajo.

De acuerdo a los datos analizados, la respuesta del nivel freático ante eventos de precipitación extraordinaria fue evidente en la zona que comprende el cauce del arroyo Guadalupe así como cercanas a éste. En las figuras 23,24 y 25 correspondientes al registro del pozo CNA-A-167 se puede observar la correlación precipitación-incremento de nivel claramente en el evento 18-22 de enero así como las tormentas de los días 20 y 26 de febrero; por otra parte se puede observar un incremento mínimo el día 7 de Febrero pudiendo ser este consecuencia de lo 22.03 mm precipitados un día anterior.

En el pozo 213 (figuras 26 y 27) se ubican dos incrementos de nivel relevantes ocasionados por 3 eventos de precipitación respectivamente. De acuerdo a las características del desnivel que se observa entre los incrementos de la 26 se puede descartar que este sea producto de algún efecto de dren o de operación de pozos de bombeo; por lo que se infiere que, el mismo fue causado por el mal manejo del medidor al momento de retirarlo y reinsertarlo para la toma de datos.

En el caso del pozo P-452, a pesar que se encuentra dentro del cauce del arroyo Guadalupe solo se vio reflejado el incremento del nivel producto del evento de los días 18 a 22 de Enero, lo anterior, seguramente, debido a que este se encuentra aguas abajo prácticamente en la salida del arroyo del valle.

El incremento súbito en el nivel debido a los eventos extraordinarios solo se vio reflejado en los pozos CNA-A-167 y P-213 los cuales se encuentran ubicados dentro de la zona que comprende el cauce del arroyo Guadalupe; así mismo fue posible identificar plenamente los eventos en las series. Para la temporada en estudio se observa que el primer evento (18-22 enero de 2010) se ve reflejado en el nivel de los pozos CNA-A-167 y P-213, ambos, 2 días después de ocurrido. Por otra parte, para los eventos de finales de febrero 2010 se observa un desfase de 1 día en el incremento de nivel entre los pozos antes mencionados, lo que sugiere que el mecanismo de recarga principal, es de creciente y el desfase (que se da en días) entre precipitación - incremento de nivel es controlado por el volumen de lluvia que precipita.

4.2. El Modelo

En lo que respecta al modelo geohidrológico, se puede decir que éste presentó un buen ajuste, con valores RMS de 3.17 m (estacionario), 2.37 m (220 días de simulación) y 1.46 m (730 días de simulación). Los resultados obtenidos, a pesar de no cubrir muchas temporadas, son de suma importancia para entender de mejor manera como operan los mecanismo de recarga de un acuífero de tanta importancia como es el de Valle de Guadalupe.

El mejor ajuste en el modelo, al igual que en el apartado de análisis de datos, se obtuvo en zonas cercanas al cauce del arroyo, en la porción de la subcuenca “Calafia” al este del valle (Pozo P-197 – figura 51) se presentó la mayor discrepancia entre los datos observados y simulados, esto puede ser resultado de diferentes factores, entre los que destaca la profundidad de la subcuenca, la cual llega a ~260 m en algunos puntos, lo que probablemente propicia una distribución más compleja de los materiales dando como resultado diferentes coeficientes de conductividad (K) y almacenamiento (S) factores a los cuales el modelo resultó presentar gran sensibilidad.

En lo que respecta a la zona de El porvenir el modelo ajustó de forma aceptable los datos simulados a los registrados por los medidores, y como se había supuesto la recarga en esta porción es más sensible a la infiltración por precipitación directa en la zona y en menor

medida por la recarga horizontal proveniente de las zonas de recarga consideradas en este trabajo (figura 17), lo anterior se concluye al observar las figuras 48,49 y 50 correspondientes a los pozos P-166, P-122 y P-130 en las que se puede apreciar que, a pesar de que las temporadas estudiadas son temporadas que presentan precipitaciones extraordinarias, no hay una recuperación importante del nivel piezométrico.

Conclusiones

Se ubicaron eventos importantes extraordinarios en las temporadas 2009-2010 y 2010-2011 de acuerdo a los datos disponibles, posteriormente se modeló y en base a los resultados obtenidos se llegaron a las siguientes conclusiones:

De acuerdo a los datos analizados y los resultados del simulador, para las temporadas analizadas se suponen dos tipos de recarga:

- *Recarga lenta*, que está dada por el volumen que precipita directamente en la zona que comprende el acuífero (recarga vertical), así como la recarga horizontal que llega por las distintas zonas de recarga laterales.
- *Recarga rápida*, la cual está dada por el volumen que entra de forma superficial por el cauce del arroyo Guadalupe e infiltra aguas abajo dentro de la extensión del valle.

En los pozos que se encuentran alejados del cauce del arroyo Guadalupe los incrementos de nivel son producto, principalmente, de la recarga vertical y las recargas laterales, el volumen extraordinario que llega por el cauce del arroyo Guadalupe no se ve reflejado en estos pozos de una forma importante.

El desfase máximo entre los eventos de precipitación extraordinaria y la respuesta en el nivel freático del acuífero fue de 9 días, lo que supone que el efecto de creciente es el que domina estos picos anómalos en los registros de nivel que a su vez se suman al régimen de recarga normal del acuífero.

El desfase entre el evento de precipitación y la respuesta en el acuífero, al parecer, está determinado por el volumen de agua precipitado.

Recomendaciones

Realizar estudios específicos con el propósito de definir de mejor forma las características y parámetros geohidrológicos de la zona que comprende el acuífero de Valle de Guadalupe.

Llevar a cabo una simulación con los mismos datos presentados en este trabajo, pero esta vez, en un modelo de simulación 3D prestando especial atención en las zonas en las que el basamento se presenta a profundidades mayores a 70 m.

Con respecto a la red de monitoreo:

- Rehabilitar los pozos instrumentados que no se encuentran registrando datos.
- Mantener un mejor control de los pozos instrumentados, para de esta forma obtener un mejor compendio de información.
- Incrementar la red de monitoreo, sobre todo en la sub cuenca “Calafia”, que debido a la profundidad del basamento, es donde se presento la mayor discrepancia entre los datos observados y los simulados.

Referencias Bibliográficas

- Anderson, MP., Woessner, WW. (1992). Applied Groundwater Modeling. Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press. 381 pp.
- Andrade Borbolla, 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 Borbolla M. (1992). Actualización geohidrológica del Valle de Guadalupe, Municipio de Ensenada, Baja California. Secretaria de Asentamientos Humanos y Obras Públicas de Ensenada (SAHOPE) y CESPE. Ensenada, Baja California. 69 pp.
- Bear J. (1979). Hydraulic of groundwater. McGraw-Hill. New York. 124. 567 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.
- Campos Aranda, DF. (1992). Procesos del Ciclo Hidrológico. Editorial Universitaria Potosina.
- Campos Gaytán, JR. (2008). Simulación del flujo de agua subterránea en el acuífero del Valle de Guadalupe, Baja California, México. División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de Doctorado. 220 pp.
- Campos Gaytán, JR. (2002). Actualización del modelo geohidrológico del acuífero del Valle de Ojos Negros, Baja California. División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 151 pp.
- Castro Escárrega, JJ. Terán Martínez, GE. Siqueiros López, C. (2003). Carta Geológico-Minera Tijuana I11-11 Baja California. Servicio Geológico Mexicano. Recuperado de: <http://www.sgm.gob.mx>
- CNA. (2009). Actualización de la disponibilidad media anual de agua subterránea acuífero (0207) Guadalupe, Estado de Baja California. Subdirección General Técnica.

- Gerencia de Aguas Subterráneas, Subgerencia de Evaluación y Ordenamiento de Acuíferos. 18 pp.
- CNA. (2003). Programa Hidráulico Regional 2002-2006 Región I Península de Baja California. Comisión Nacional del Agua. México, DF. 192 pp.
- Comité Técnico de Aguas Subterráneas. (2010). Valle de Guadalupe, Baja California, México.
- Fetter, CW. (2001). Applied hydrogeology. Fourth Edition. Prentice Hall. 598 pp.
- García, E. (1981). Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Universidad Nacional Autónoma de México. México, Instituto de Geografía. México, D.F. 244 pp.
- Gil Venegas, LE. (2010). Modelo numérico para determinar el impacto por la operación de pozos costeros en la zona del acuífero de Maneadero. División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 164 pp.
- Harbaugh, A.W. (2005). MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular groundwater model—the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6- A16, 62 pp.
- Jan, CD., Chen, TH. (2011). Analysis of rainfall-induced quick groundwater-level response by using a Kernel function. *Paddy and Water Environment* 11(1-4), pp 135-144. DOI: 10.1007/s10333-011-0299-6
- Kresic, N. (1997). *Quantitative Solutions in Hydrogeology and Groundwater Modeling*. CRC Press, Lewis Publishers. 461 pp.
- Nájera Navarrete, L. (2006). Un estudio Geofísico de la cuenca sedimentaria El Porvenir, Municipio de Ensenada, Baja California, México. División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Tesis de maestría. 71 pp.
- Ponce, VM., Pandey, RP., Kumar, S. (1999). Groundwater recharge by channel infiltration in El Barbón Basin, Baja California, México. *Journal of Hydrology* 214: 1-7 p.
- Ponzini G., 1984. Simulazione mediante modello matematico de flusso hidrico di un sistema acquifero. Dipartimento di Scienze della Terra. Sezione Geofisica. Università degli Studi di Milano. 41 pp.

- Puente Montejano, CA. (2007). Programas desarrollados en el curso de Geohidrología. División de Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Restringido.
- U.S. Geological Survey. (2010). Shuttle Radar Topography Mission Data. Recuperado de: <http://srtm.usgs.gov/index.php>.
- Van Gaalen, JF., Kruse, S., Lafrenz, WB., Burroughs, SM. (2012). Predicting Water Table Response to Rainfall Events, Central Florida. *Ground Water*. 12 pp. DOI: 10.1111/j.1745-6584.2012.00970.x
- Vázquez, R., Romo, JM., Kretzschmar, T. (2007). Estudios Técnicos Para la Gestión Integrada del Agua en el Valle de Guadalupe y Elaboración del Plan de Fortalecimiento del COTAS. División Ciencias de la Tierra. Centro de Investigación y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Informe Técnico. 53 pp.
- Vázquez, R., Traslosheros, C., Vega, M., Vega, R., Espinoza, JM. (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 (CICESE). Informe Técnico. Proyecto CONACYT (Clave: P220CCOR-892531). 49 pp.
- Villanueva, M., Iglesias, A. (1984). Pozos y acuíferos; Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Instituto Geológico y Minero de España. Madrid. 426 pp.
- Vries, JJ., Simmers, I. (2002). Groundwater recharge: an overview of processes and challenges. *Hydrogeology Journal* 10: 5–17 p.
- Wang, HF., Anderson, MP. (1982). *Introduction to Groundwater Modeling. Finite Difference and Finite Element Methods*. WH Freeman. San Francisco, CA. 237 pp.
- Wilson, JL. Guan, H. (2004). Mountain-Block Hydrology and Mountain-Front Recharge. *Groundwater Recharge in A Desert Environment: The Southwestern United States. Water Science and Applications Series, Vol. 9. American Geophysical Union (AGU)*. Washington, DC. 113-137.
- Wu, Y., Jiang, Y., Yuan, D., Li, L. (2008). Modeling hydrological responses of karst spring to storm events: examples of the Shuifang spring (jinfo Mt., Chongqing, China). *Environmental Geology* 55(7), pp 1545-1553. DOI: 10.1007/s00254-007-1105-z

Apéndice A - Distribución de los valores de conductividades hidráulicas (K) y coeficientes de almacenamiento (S), utilizadas por el modelo geohidrológico.

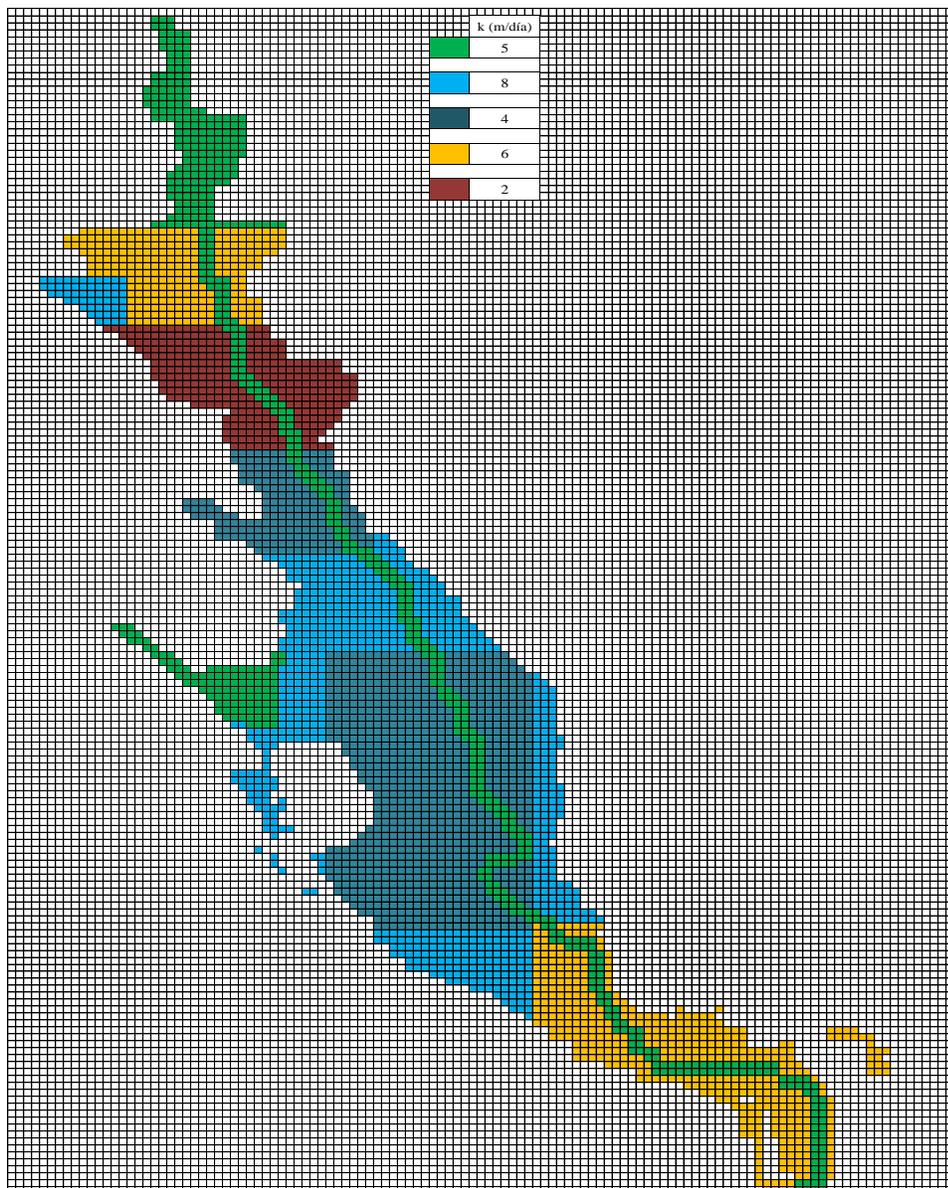


Fig. A1 – Distribución de conductividades hidráulicas (K) en metros por día, en las celdas sin color se supone un flujo nulo es decir conductividad hidráulica igual a 0 m/día.

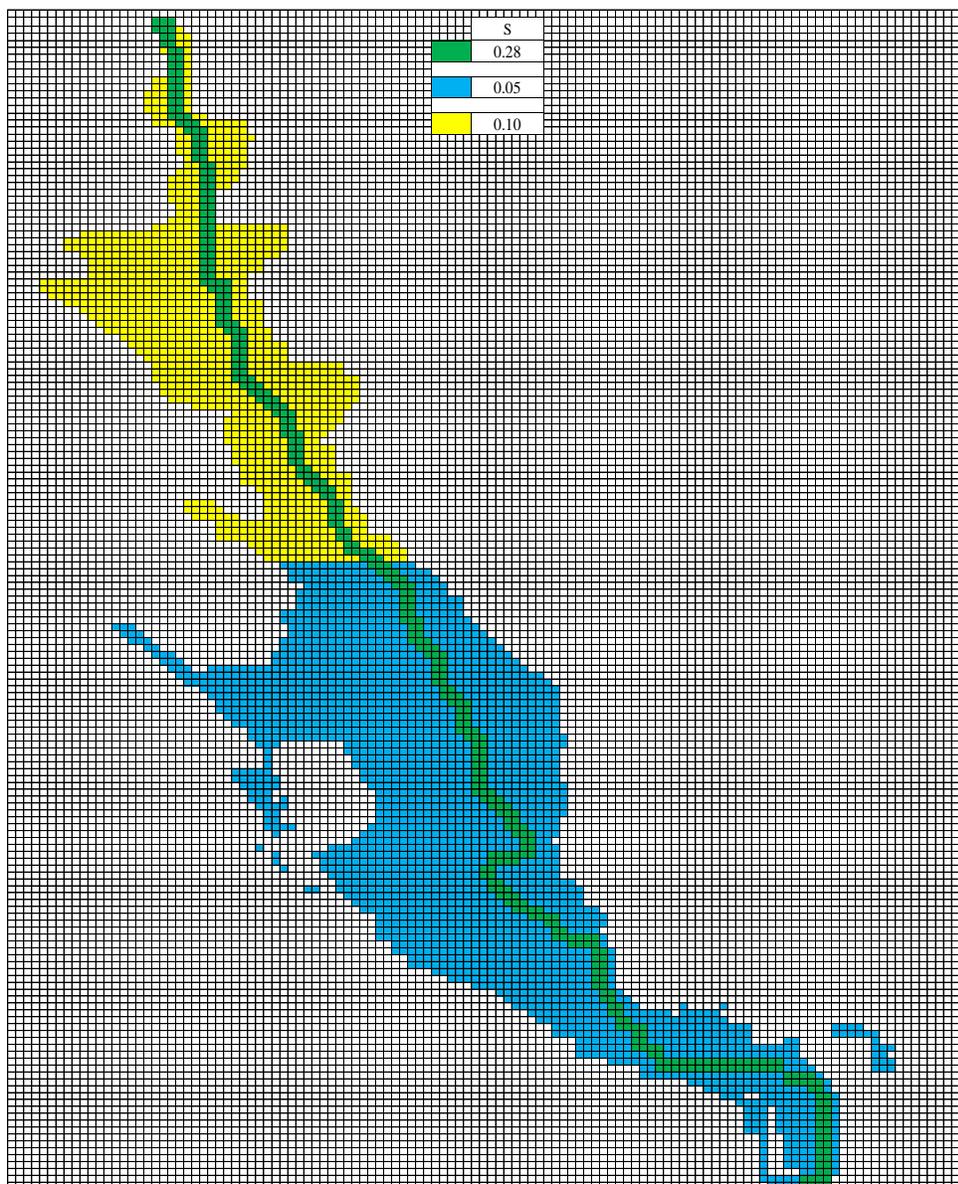


Fig. A2 – Distribución de coeficientes de almacenamiento (S), las celdas sin color representan medio en el que no es posible almacenar un volumen de agua.

Apéndice B – Información de aprovechamientos (pozos profundos) proporcionada por CNA-COTAS, utilizados en todas las simulaciones.

Tabla B1 – Aprovechamientos, localización y volúmenes de extracción anual

Pozo	Titular/Usuario	Coordenadas Geográficas		Volumen de extracción anual (m³)
		Latitud	Longitud	
CNA-56	GONZALO FONSECA DIAZ	32.07628255	-116.6181316	170100
CNA-B100	DAVID BIBAYOFF DALGOFF	32.0529397	-116.6600687	21773
CNA-103	DAVID BIBAYOFF DALGOFF	32.05284691	-116.6603055	0
CNA-B10	JAIME BUSTILLOS FLORES	32.14648434	-116.4352087	32832
CNA-140	SIMON BIBAYOFF DALGOFF	32.08882992	-116.5904856	43200
477	CALVARY CHAPEL	32.04688151	-116.6374899	56765
290	JUAN PABLO ARROYUELO	32.12556956	-116.5289096	33696
P-127	JOSE DE LA CRUZ ROGOFF	32.07724999	-116.6152222	34992
P-135	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08190957	-116.595839	21024
CNA-691	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.10701622	-116.5256882	132660
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.10627249	-116.5312192	154368
CNA-B79	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.08231718	-116.5841208	308736
CNA-B78	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.0831796	-116.5848805	93127
CNA-B77	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.08385149	-116.5855725	225522
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.08447007	-116.5868356	144720
CNA-B80	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.07824844	-116.5915909	67536
CNA-B81	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.0777208	-116.5904352	69466
CNA-B75	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.09367466	-116.6076096	46310
CNA-D41	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	31.99263535	-116.6471815	79596
CNA-B31	COMITE AGUA POTABLE EJIDO ZARAGOZA	32.18698528	-116.4775845	6307
CNA-B12	MAGDALENA HERNANDEZ LOPEZ	32.14885013	-116.4321947	33696
CNA-B3	JAIME BUSTILLOS FLORES	32.13505863	-116.4470533	216000
CNA-B-1	MAXIMINO DE HORTA ARROYO	32.13265051	-116.447312	39398
CNA-B6	ANASTACIO MARTINEZ CORTEZ	32.13740699	-116.4452934	37908
CNA-B8	JOAQUIN ALVAREZ ALVA	32.1437329	-116.4441268	1296
CNA-B7	JOAQUIN ALVAREZ ALVA	32.14546091	-116.4433436	37
688	EJIDO EMILIANO ZAPATA	32.14552428	-116.5210015	4599
CNA-B66	ROBERTO CURIEL	32.13478982	-116.530617	34560
399	OCTAVIO CHAVEZ	32.0293822	-116.6160361	6653
P90	ALFREDO ARAIZA PESQUEIRA	31.99478396	-116.64255	1685
CNA-A286	CARLOS ALBERTO LAGOS YAGUES	32.04677381	-116.5581868	30240
CNA-A287	CARLOS ALBERTO LAGOS YAGUES	32.05172684	-116.545681	0
CNA-A227	ANTONIO BADAN DAGON	32.03658862	-116.5749306	1296
CNA-A225	ANTONIO BADAN DAGON	32.03438938	-116.5852354	5616
CNA-A223	ANTONIO BADAN DAGON	32.03619224	-116.6018741	15396
499	ARMANDO PELA YO MENDOZA	32.01641145	-116.6322913	8074
P89	PEDRO PORTILLO REMIGIO	32.07903416	-116.6268749	91800
93	ESCUELA PRIMARIA FEDERAL EL	32.08110784	-116.6245251	259200
CNA-13	JOSE LUIS PEREZ ROCHA	32.08569861	-116.6275181	27000
CNA-C157	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.07175909	-116.6320065	131400
539	EJIDO EL PORVENIR	32.07554184	-116.6335404	45792
CNA-359	HOME CASA DE PAZ	32.0717067	-116.6223201	0
P93	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.08116559	-116.6201077	131400
57	JESUS MADRIGAL	32.07047699	-116.6350381	5913
48	S/D	32.06887705	-116.6424295	18144
CNA-C29	RANCHO VILLAREAL	32.08681307	-116.6337896	44064
CNA-C12	JESUS ERNESTO JIMENEZ	32.09382939	-116.6238345	58545
33	ARTURO SANTANA	32.05679806	-116.6525221	17194
SARH46	ELOISA FLORES SOLIS	32.06456657	-116.6402971	45360

Pozo	Titular/Usuario	Coordenadas Geográficas		Volumen de extracción anual (m³)
		Latitud	Longitud	
CNA-C5	JOSE FRANCISCO JIMENEZ	32.07024246	-116.6204275	31104
P-66	ALFREDO NUNGARA Y CERDA	32.0489624	-116.6469934	12960
96	JORGE H. SORIANO CAÑEDO Y	32.10296139	-116.6361096	37066
469	S/D	32.04625295	-116.6485017	0
S/D	JESUS PORRAS MARTINEZ	32.04613502	-116.6524661	389
CNA-B268	JESUS PORRAS MARTINEZ	32.04570478	-116.6528527	421
CNA-B141	OLIVARES DE CALAFIA S. A. DE C. V.	32.04927731	-116.614192	9855
CNA-D52	MONTEFIORI S. A. DE C. V.	32.05094623	-116.667586	4277
CNA-D51	MUNG KING S. A. DE C. V.	32.03109043	-116.6738947	0
CNA-226	MUNG KING S. A. DE C. V.	32.03161312	-116.6730793	1296
CNA-225	MUNG KING S. A. DE C. V.	32.02995325	-116.6734737	0
P-426	PABLO OJEDA	32.01569924	-116.6555551	0
CNA-216	ACUICULTURA DEL DESIERTO	32.01221346	-116.6522223	22118
147B	RAUL JOSE ANTONIO BULMARO JERO	32.0528812	-116.6477461	43092
CNA-B179	BODEGAS HACIENDA LA LOMITA S. A. DE	32.01604684	-116.6642911	16416
327	BODEGAS HACIENDA LA LOMITA S. A. DE	32.01679459	-116.6654527	0
449	RICARDO CRUZ DUARTE	32.00086009	-116.6783734	18662
S/D	S/D	32.08971363	-116.6416174	0
CNA-287	UVAS DE CALIFORNIA S. de R.L.	32.1226281	-116.5347346	77760
CNA-258	UVAS DE CALIFORNIA S. de R.L.	32.12111592	-116.5270592	194400
195	UVAS DE CALIFORNIA S. de R.L.	32.10860702	-116.5328653	0
CNA-193	UVAS DE CALIFORNIA S. de R.L.	32.1085191	-116.5345911	110808
270	GUADALUPE CORDOVA EZRRE	32.11116602	-116.5108885	128304
CNA-A-29	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.1106543	-116.5134984	485492
CNA-A-30	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.1113852	-116.5167804	1071047
CNA-A-31	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.11092772	-116.5200644	749064
CNA-A-32	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10962215	-116.5240236	388388
CNA-A-33	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10860384	-116.5273465	221313
CNA-A-34	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10772416	-116.5306208	83704
CNA-A-35	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10677507	-116.5340333	1038821
CNA-A-36	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10581023	-116.5368679	524330
CNA-A-37	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10449696	-116.5400713	374572
CNA-A-38	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10333849	-116.5430806	1520138
CNA-A-39	COMISION ESTATAL DE SERVICIOS	32.10152029	-116.5450337	168872
171	FILEMON AGUIRRE GARCIA	32.09168572	-116.5525535	2142
CNA-A-5(173)	GABRIEL JIMENEZ BEEDE	32.09225234	-116.5496619	131220
276-R2	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.09371548	-116.5479336	20261
CNA-A-16	JOSE ROBERTO LAFARGA BALTAZAR	32.10406621	-116.5359214	138413
685	RANCHO SORDOMUDO A.C.	32.11483662	-116.5486937	1472
P-243	JOSE LUIS MALAGON BUSTAMANTE	32.09940084	-116.5730527	51840
CNA-B-91	JOSE LUIS MALAGON BUSTAMANTE	32.10076676	-116.5731957	0
CNA-B92R	FERNANDO MARTAIN AMOZURRUTEA	32.11066796	-116.5716525	0
CNA-02-08	ALBERTO LOPEZ GARCIA	32.1160965	-116.5678148	0
118	ERNESTO ALVAREZ MORPHY CAMOU	32.11027385	-116.6032085	22453
S/D	ERNESTO ALVAREZ MORPHY CAMOU	32.11328563	-116.6018335	0
CNA-45	ERNESTO ALVAREZ MORPHY CAMOU	32.11508079	-116.5988074	24624
CNA-44	ERNESTO ALVAREZ MORPHY CAMOU	32.11749972	-116.5972205	17928
S/D	ERNESTO ALVAREZ MORPHY CAMOU	32.11403967	-116.600531	33610
CNA-46	CHATEAU CAMOU	32.10963867	-116.6034995	15120
412	ZOILA SILVIA VARGAS RODRIGUEZ	31.99684801	-116.6790404	0
693	GABRIEL JIMENEZ BEEDE	32.1133086	-116.5087171	114318
CNA-B68	CASA PEDRO DOMEQ	32.11390556	-116.5421674	0

Pozo	Titular/Usuario	Coordenadas Geográficas		Volumen de extracción anual (m³)
		Latitud	Longitud	
194	OLEGARIO SANDOVAL BORJA	32.11447176	-116.5368014	202176
S/D	MARIA SOLEDAD ROMERO AMEZCUA	32.1040015	-116.5576527	8672
CNA-31	CRISTAPURO S.A DE C.V.	32.09486372	-116.5697297	157680
604	MARCOPOLO GUTIERREZ LEMINI	32.0901033	-116.5812666	2106
CNA-A 156	COMUNIDAD FRANCISCO ZARCO	32.09058065	-116.5819119	81994
P-53	ESCUELA SECUNDARIA N° 11	32.07407794	-116.633285	0
112	S/D	32.09754165	-116.6228124	6739
113	S/D	32.0976911	-116.6224163	8035
CNA-B294	HILDA PACHECO TEYLOR	32.10247792	-116.6130433	1944
CNA-01	S/D	32.09853164	-116.619556	3974
576	S/D	32.10029737	-116.6168227	6013
CNA-B76	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.08778252	-116.5932125	146534
170-R2	GABRIEL JIMENEZ BEEDE	32.08183623	-116.5884147	108940
168-R	GABRIEL JIMENEZ BEEDE	32.08471885	-116.59177	27378
215	JOSE MUÑOZ HORTA	32.07883207	-116.5822252	6912
214	JOSE MUÑOZ HORTA	32.0780513	-116.5830102	7171
CNA-137	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08618912	-116.5961789	97200
CNA-133	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08813305	-116.5965174	54000
CNA-C9	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08341714	-116.5979248	58320
136	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08161042	-116.5981082	41040
367	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.07975349	-116.5981555	32400
S/D	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.10092911	-116.6053052	0
143	DIANA LUZ OLVERA OLIVAS	32.09034478	-116.5845217	15552
P-119	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.09146519	-116.595222	45360
CNA-C1	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.09050513	-116.6011695	33480
08CNA	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.08595308	-116.5786384	324000
07-CNA	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.09138037	-116.5835013	20563
202	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.11499051	-116.5201494	103680
S/D	MONTE XANIC S. DE R. L. DE C.V.	32.11373532	-116.5214095	0
160	DIANA LUZ OLVERA OLIVAS	32.08414997	-116.5936915	29808
CNA-A 209-R	DIANA LUZ OLVERA OLIVAS	32.07435412	-116.5967994	51840
377	DIANA LUZ OLVERA OLIVAS	32.06821371	-116.6031117	62208
378	DIANA LUZ OLVERA OLIVAS	32.06843692	-116.6014195	64800
CNA-A 194	TELNOR	32.05455573	-116.5980057	3780
410	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11920912	-116.4757037	171734
282	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11787917	-116.475916	241200
CNA-A 114	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11640236	-116.4798151	270144
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11533627	-116.4832204	212256
P-275	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11496252	-116.4888343	358906
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11553936	-116.4909589	289440
CNA-A-111	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11620295	-116.4937839	212256
273	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11106619	-116.5027367	164016
CNA-A-109-R	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11052136	-116.5051685	617472
272	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11163775	-116.5037085	164016
CNA-A-107	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.1173351	-116.51949	41407
CNA-A 104	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11639473	-116.5190424	231552
260	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11777582	-116.5245169	159192
198	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11309972	-116.52553	79596
158	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11801948	-116.5299027	192960
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.10761687	-116.5392367	0
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.10765517	-116.5433049	424512
S/D	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.11459187	-116.5305909	419688
279	VIÑEDOS L.A. CETTO S.A. DE C.V.	32.10178801	-116.5548641	173664
150	MARIO MORQUECHON	32.07204097	-116.6016355	90720

Pozo	Titular/Usuario	Coordenadas Geográficas		Volumen de extracción anual (m³)
		Latitud	Longitud	
CNA-A-214	ANTONIO ESCALANTE POMPA	32.07411356	-116.6033923	64800
79	MIGUEL ANGEL FLORES CAMPOS	32.06848897	-116.6100526	67392
CNA-C45	HORTIBAJA	32.08050476	-116.6347011	0
555	JOSE MANUEL RAMIREZ CORONA	32.07012319	-116.5958729	55296
CNA-A-220	JORGE RA UL ESCALANTE DOMINGUEZ	32.05621786	-116.5903355	0
CNA-A-185	JORGE RA UL ESCALANTE DOMINGUEZ	32.0601939	-116.590041	10714
CNA-A-186	ANTONIO ESCALANTE DOMINGUEZ	32.06007723	-116.5899479	10368
211	ANTONIO ESCALANTE DOMINGUEZ	32.06333502	-116.5891351	27216
556	JOSE JOAQUIN SANTANA SANTANA	32.06824481	-116.595784	32659
87	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.07246794	-116.613101	34560
86	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.07159505	-116.6123934	41472
P-85	GONZALO FONSECA DIAZ	32.07099793	-116.6135297	151200
82	GONZALO FONSECA DIAZ	32.06946672	-116.6169691	96768
398	ERNESTO JIMENEZ OROZCO	32.08545914	-116.6008347	21024
141	HECTOR FUENTES CABAÑAS	32.08946208	-116.5876959	31104
CNA-A-246	IGNA CIO VILLAREAL MENDOZA	32.080316	-116.6105227	9850
129	JOSE GARDUÑO CRUZ	32.08013386	-116.6058907	8770
P-121	LUIS DELFINO JIMENEZ VALDEZ	32.08212473	-116.6166233	55296
124	LUIS DELFINO JIMENEZ VALDEZ	32.08153708	-116.6117691	69120
CNA-123	LUIS DELFINO JIMENEZ VALDEZ	32.08254165	-116.6095748	82944
REP P-122	LUIS DELFINO JIMENEZ VALDEZ	32.0725583	-116.6055775	55296
120	MARIELA ELORDUY BLACKALLER	32.08467585	-116.6058534	0
CNA-54	S/D	32.08205441	-116.6034252	103680
P-595	S/D	32.07971829	-116.6016662	69120
CNA-C22	ADOBE GUADALUPE S. DE R. L. DE C. V.	32.08627964	-116.6220534	3694
583	ADOBE GUADALUPE S. DE R. L. DE C. V.	32.08690678	-116.6225641	20412
CNA-C23	ADOBE GUADALUPE JOSE MANUEL	32.08244249	-116.6212111	77760
S/D	HECTOR FUENTES CABAÑAS	32.09623156	-116.5488423	103680
CNA-165	JOSE RAMIREZ LOMELI	32.03852987	-116.6291724	7258
P-395	JUAN RIVAS AISPURO	32.0885135	-116.6193525	30240
P-88-R1	COMITE DE AGUA POTABLE DEL EJIDO EL	32.07706156	-116.6245405	102492

Apéndice C – Porcentajes y volúmenes utilizados durante las simulaciones.

Recargas horizontales:

Tabla C1 – Valores correspondientes a recargas horizontales utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas mensuales y en amarillo las recargas diarias, la primera de ellas utilizada en el periodo de calibración mientras que la segunda en la simulación final.

Temporada	Mes	Precipitación (mm)	Precip. total temp. (mm)	% de aporte total	Área (km²)	Volumen total de aporte al acuífero (m³)	Fecha	% de aportes de volúmenes		Volumen de recargas (m³)		% del Vol. total que ingresa por mes		Volumen total que ingresa por mes	
								Arroyo	Aportes laterales	Arroyo	Aportes laterales	Arroyo	Aportes laterales	Arroyo	Aportes laterales
2008-2009			290.6	2%		12307883.51	Diciembre 2009	65%	35%	8000134.28	4307759.23	9%	3%	720011.1853	129232.7769
	Julio	0					Enero 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	5%	5%	305593.2311	305593.2311
	Agosto	1					Febrero 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	20%	20%	1222372.925	1222372.925
	Septiembre	0					Marzo 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	13%	13%	794542.4009	794542.4009
	Octubre	0					Abril 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	14%	14%	855661.0472	855661.0472
	Noviembre	23					Mayo 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	12%	12%	733423.7547	733423.7547
	Diciembre	108					Junio 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	11%	11%	672305.1085	672305.1085
2009 - 2010	Enero	207	221.27			12223729.25	Julio 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	8%	8%	488949.1698	488949.1698
	Febrero	102.6					Agosto 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	7%	7%	427830.5236	427830.5236
	Marzo	27.9					Septiembre 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	4%	4%	244474.5849	244474.5849
	Abril	31					Octubre 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	2%	2%	122237.2925	122237.2925
	Mayo	0.5					Noviembre 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	1%	1%	61118.64623	61118.64623
	Junio	2					Diciembre 2010	50%	50%	6111864.62	6111864.62	3%	3%	183355.9387	183355.9387
	Julio	4.05		3%	1841.45		Enero 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	16%	5%	769829.2212	240571.6316
	Agosto	0.75					Febrero 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	33%	20%	1587772.769	962286.5265
	Septiembre	4.81					Marzo 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	10%	13%	481143.2633	625486.2422
	Octubre	42.61					Abril 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	7%	14%	336800.2843	673600.5686
	Noviembre	25.65					Mayo 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	4%	12%	192457.3053	577371.9159
	Diciembre	23.6	174.19			9622865.265	Junio 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	2%	11%	96228.65265	529257.5896
2010 - 2011	Enero	12.62					Julio 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	1%	8%	48114.32633	384914.6106
	Febrero	0.02					Agosto 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	2%	7%	96228.65265	336800.2843
	Marzo	42.49					Septiembre 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	4%	4%	192457.3053	192457.3053
	Abril	13.59					Octubre 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	5%	2%	240571.6316	96228.65265
	Mayo	4					Noviembre 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	7%	1%	336800.2843	48114.32633
	Junio	0					Diciembre 2011	50%	50%	4811432.63	4811432.63	9%	3%	433028.9369	144342.979

% del Vol. de aportes laterales según zona de recarga	ZONA	%	Recarga MENSUAL							Recarga DIARIA								
			Volumen por celda (m³)							Volumen por celda (m³)								
			Arroyo GLP	1	2	3	4	5	6	7	Arroyo GLP	1	2	3	4	5	6	7
			720011.2	28431.2	33600.5	33600.5	1292.3	18092.6	3877.0	5169.3								
1 - POP-1	25%		305593.2	76398.3	45839.0	76398.3	9167.8	30559.3	6111.9	61118.6	9857.8	2464.5	1478.7	2464.5	295.7	985.8	197.2	1971.6
2 - Cañada de los Encinos	15%		1222372.9	305593.2	183355.9	305593.2	36671.2	122237.3	24447.5	244474.6	43656.2	10914.0	6548.4	10914.0	1309.7	4365.6	873.1	8731.2
3 - Cañada Ancha	25%		794542.4	198635.6	119181.4	198635.6	23836.3	79454.2	15890.8	158908.5	25630.4	6407.6	3844.6	6407.6	768.9	2563.0	512.6	5126.1
4 - Cañada Guadalupe	3%		855661.0	213915.3	128349.2	213915.3	25669.8	85566.1	17113.2	171132.2	28522.0	7130.5	4278.3	7130.5	855.7	2852.2	570.4	5704.4
5 - Cañada del Trigo	10%		733423.8	183355.9	110013.6	183355.9	22002.7	73342.4	14668.5	146684.8	23658.8	5914.7	3548.8	5914.7	709.8	2365.9	473.2	4731.8
6 - Cañada San Felipe	2%		672305.1	168076.3	100845.8	168076.3	20169.2	67230.5	13446.1	134461.0	22410.2	5602.5	3361.5	5602.5	672.3	2241.0	448.2	4482.0
7- Cañada El Mogor	20%		488949.2	122237.3	73342.4	122237.3	14668.5	48894.9	9779.0	97789.8	15772.6	3943.1	2365.9	3943.1	473.2	1577.3	315.5	3154.5
			427830.5	106957.6	64174.6	106957.6	12834.9	42783.1	8556.6	85566.1	13801.0	3450.2	2070.1	3450.2	414.0	1380.1	276.0	2760.2
			244474.6	61118.6	36671.2	61118.6	7334.2	24447.5	4889.5	48894.9	8149.2	2037.3	1222.4	2037.3	244.5	814.9	162.9	1629.8
			122237.3	30559.3	18335.6	30559.3	3667.1	12223.7	2444.7	24447.5	3943.1	985.8	591.5	985.8	118.3	394.3	78.9	789.6
			61118.6	15279.7	9167.8	15279.7	1833.6	6111.9	1222.4	12223.7	2037.3	509.3	305.6	509.3	61.1	203.7	40.7	407.5
			183355.9	45839.0	27503.4	45839.0	5500.7	18335.6	3667.1	36671.2	5914.7	1478.7	887.2	1478.7	177.4	591.5	118.3	1182.9
			769829.2	60142.9	36085.7	60142.9	7217.1	24057.2	4811.4	48114.3	24833.2	1940.1	1164.1	1940.1	232.8	776.0	155.2	1552.1
			1587772.8	240571.6	144343.0	240571.6	28868.6	96228.7	19245.7	192457.3	56706.2	8591.8	5155.1	8591.8	1031.0	3436.7	687.3	6873.5
			481143.3	156371.6	93822.9	156371.6	18764.6	62548.6	12509.7	125097.2	15520.8	5044.2	3026.5	5044.2	605.3	2017.7	403.5	4035.4
			336800.3	168400.1	101040.1	168400.1	20208.0	67360.1	134720.1	134720.1	11226.7	5613.3	3368.0	5613.3	673.6	2245.3	449.1	4490.7
			192457.3	144343.0	86605.8	144343.0	17321.2	57737.2	11547.4	115474.4	6208.3	4656.2	2793.7	4656.2	558.7	1862.5	372.5	3725.0
			96228.7	132314.4	79388.6	132314.4	15877.7	52925.8	10585.2	105851.5	3207.6	4410.5	2646.3	4410.5	529.3	1764.2	352.8	3528.4
			48114.3	96228.7	57737.2	96228.7	11547.4	38491.5	7698.2	76982.9	1552.1	3104.2	1862.5	3104.2	372.5	1241.7	248.3	2483.3
			96228.7	84200.1	50520.0	84200.1	10104.0	33680.0	6736.0	67360.1	3104.2	2716.1	1629.7	2716.1	325.9	1086.5	217.3	2172.9
			192457.3	48114.3	28868.6	48114.3	5773.7	19245.7	3849.1	38491.5	6415.2	1603.8	962.3	1603.8	192.5	641.5	128.3	1283.0
			240571.6	24057.2	14434.3	24057.2	2886.9	9622.9	1924.6	19245.7	7760.4	776.0	465.6	776.0	93.1	310.4	62.1	621.0
			336800.3	12028.6	7217.1	12028.6	1443.4	4811.4	962.3	9622.9	11226.7	401.0	240.6	401.0	48.1	160.4	32.1	320.8
			433028.9	36085.7	21651.4	36085.7	4330.3	14434.3	2886.9	28868.6	13968.7	1164.1	698.4	1164.1	139.7	465.6	93.1	931.2

Tabla C2 - Valores correspondientes a recargas verticales utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas mensuales y en amarillo las recargas diarios, la primera de ellas utilizada en el periodo de calibración mientras que la segunda en la simulación final.

% de aporte	Fecha	Precipitación (mm)	Área (km²)	Volumen total (m³)	Volumen por celda MENSUAL (m³)	Volumen por celda DIARIO (m³)
2%	Diciembre 2009	108	103.55	223668.00	39.91	
10%	Enero 2010	3.98	103.55	41212.90	11.73	0.38
10%	Febrero 2010	23.89	103.55	247380.95	70.40	2.51
10%	Marzo 2010	27.9	103.55	288904.50	82.22	2.65
10%	Abril 2010	31	103.55	321005.00	91.35	3.05
10%	Mayo 2010	0.5	103.55	5177.50	1.47	0.05
10%	Junio 2010	2	103.55	20710.00	5.89	0.20
10%	Julio 2010	4.05	103.55	41937.75	11.93	0.38
10%	Agosto 2010	0.75	103.55	7766.25	2.21	0.07
10%	Septiembre 2010	4.81	103.55	49807.55	14.17	0.47
10%	Octubre 2010	42.61	103.55	441226.55	125.56	4.05
10%	Noviembre 2010	25.65	103.55	265605.75	75.59	2.52
10%	Diciembre 2010	23.6	103.55	244378.00	69.54	2.24
10%	Enero 2011	12.62	103.55	130680.10	32.28	1.04
10%	Febrero 2011	0.02	103.55	207.10	0.05	0.00
10%	Marzo 2011	42.49	103.55	439983.95	108.69	3.51
10%	Abril 2011	13.59	103.55	140724.45	34.76	1.16
10%	Mayo 2011	4	103.55	41420.00	10.23	0.33
10%	Junio 2011	0	103.55	0.00	0.00	0.00
10%	Julio 2011	0	103.55	0.00	0.00	0.00
10%	Agosto 2011	0.4	103.55	4142.00	1.02	0.03
10%	Septiembre 2011	0.4	103.55	4142.00	1.02	0.03
10%	Octubre 2011	6.4	103.55	66272.00	16.37	0.53
10%	Noviembre 2011	65.4	103.55	677217.00	167.30	5.58
10%	Diciembre 2011	26.6	103.55	275443.00	68.04	2.19

Tabla C3 - Valores correspondientes a recargas extraordinarias del periodo 2009-2010 utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas producto del evento de precipitación extraordinario.

Recarga horizontal	Temporada 2009-2010											
	Día de evento	Precipitación (mm)	% de aporte	Área (km²)	Volumen de aporte (Mm³)	Fecha de recarga						Volumen de recarga (m³)
						Sec.1	Sec.2	Sec.3	Sec.4	Sec.5	Sec.6	
	18-ene-10	40.32	6%	1841.45	4.45	18-ene-10	18-ene-10	19-ene-10	20-ene-10	21-ene-10	22-ene-10	4454835.84
	19-ene-10	37.34	6%		4.13	19-ene-10	19-ene-10	20-ene-10	21-ene-10	22-ene-10	23-ene-10	4125584.58
	20-ene-10	36.22	6%		4.00	20-ene-10	20-ene-10	21-ene-10	22-ene-10	23-ene-10	24-ene-10	4001839.14
	21-ene-10	64.07	6%		7.08	21-ene-10	21-ene-10	22-ene-10	23-ene-10	24-ene-10	25-ene-10	7078902.09
	22-ene-10	25.07	6%		2.77	23-ene-10	23-ene-10	24-ene-10	24-ene-10	25-ene-10	26-ene-10	2769909.09
	06-feb-10	22.03	6%		2.43	06-feb-10	06-feb-10	07-feb-10	08-feb-10			2434028.61
	20-feb-10	26.09	6%		2.88	24-feb-10	25-feb-10	26-feb-10	27-feb-10	28-feb-10	28-feb-10	2882605.83
	27-feb-10	30.59	6%		3.38	03-mar-10	04-mar-10	05-mar-10	06-mar-10	07-mar-10	07-mar-10	3379797.33

Recarga vertical	Día de evento	Precipitación (mm)	% de aporte	Área (km²)	Volumen de aporte (Mm³)	Volumen de recarga por celda (m³)
	18-ene-10	40.32	10%	103.55	0.42	106.8082886
	19-ene-10	37.34	10%		0.39	98.91422359
	20-ene-10	36.22	10%		0.38	95.94732668
	21-ene-10	64.07	10%		0.66	169.722397
	22-ene-10	25.07	10%		0.26	66.41080839
	06-feb-10	22.03	10%		0.23	58.35780251
	20-feb-10	26.09	10%		0.27	69.11280379
	27-feb-10	30.59	10%		0.32	81.03337171

Tabla C4 - Valores correspondientes a recargas extraordinarias del periodo 2010-2011 utilizados en la simulación, en color verde se muestran las recargas producto del evento de precipitación extraordinario.

Recarga horizontal	Temporada 2010-2011												
	Día de evento	Precipitación (mm)	% de aporte	Área (km²)	Volumen de aporte (Mm³)	Fecha de recarga						Volumen de recarga (m³)	
						Sec. 1	Sec. 2	Sec. 3	Sec. 4	Sec.5	Sec.6		
	20-dic-10	0	2%	1841.45	0.00	20-dic-10	20-dic-10	21-dic-10	21-dic-10	22-dic-10	22-dic-10	0	
	21-dic-10	0	2%		0.00	21-dic-10	21-dic-10	22-dic-10	22-dic-10	23-dic-10	23-dic-10	0	
	22-dic-10	0	2%		0.00	22-dic-10	22-dic-10	23-dic-10	23-dic-10	24-dic-10	24-dic-10	0	
	18-feb-11	35.49	2%		1.31	19-feb-11	19-feb-11	20-feb-11	20-feb-11	21-feb-11	21-feb-11	1307061.21	
	19-feb-11	53.74	2%		1.98	19-feb-11	19-feb-11	20-feb-11	20-feb-11	21-feb-11	21-feb-11	1979190.46	
	26-feb-11	28.31	2%		1.04	26-feb-11	26-feb-11	26-feb-11	26-feb-11	27-feb-11	27-feb-11	1042628.99	
	27-feb-11	6.02	2%		0.22	27-feb-11	27-feb-11	27-feb-11	27-feb-11	28-feb-11	28-feb-11	221710.58	
	28-feb-11	11	2%		0.41	28-feb-11	28-feb-11	28-feb-11	28-feb-11	01-mar-11	01-mar-11	405119	

Recarga vertical	Día de evento	Precipitación (mm)	% de aporte	Área (km²)	Volumen de aporte (Mm³)	Volumen de recarga por celda (m³)
	20-dic-10	25.07	10%	103.55	0.26	66.41080839
	21-dic-10	20.43	10%		0.21	54.11937836
	22-dic-10	29.85	10%		0.31	79.07310054
	18-feb-11	35.49	10%		0.37	94.01354566
	19-feb-11	53.74	10%		0.56	142.3580711
	26-feb-11	28.31	10%		0.29	74.99361729
	27-feb-11	6.02	10%		0.06	15.94707086
	28-feb-11	11	10%		0.11	29.13916603

Apéndice D – Graficas resultantes del proceso de calibración mensual, previa a la simulación por días.

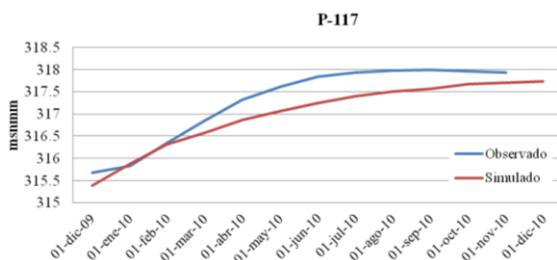


Fig. D1 – Niveles observado y simulado mensualmente

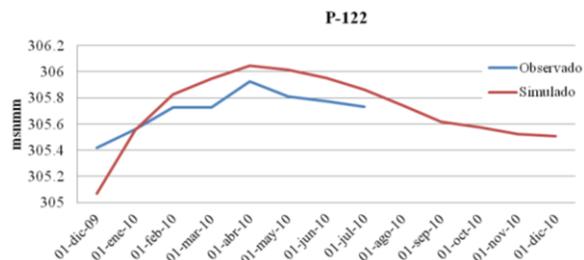


Fig. D2 - Niveles observado y simulado mensualmente

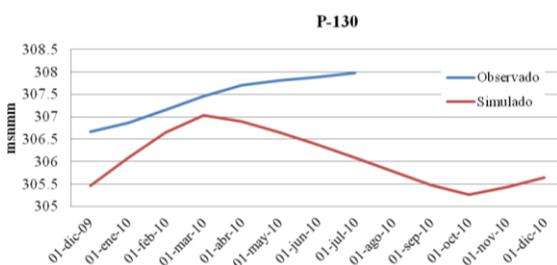


Fig. D3 - Niveles observado y simulado mensualmente

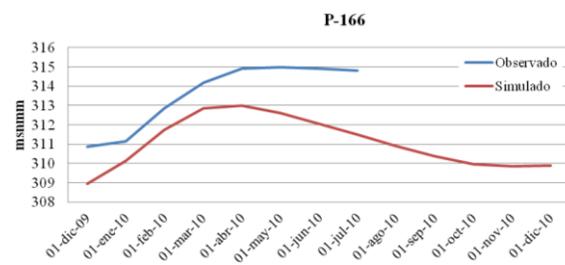


Fig. D4- Niveles observado y simulado mensualmente

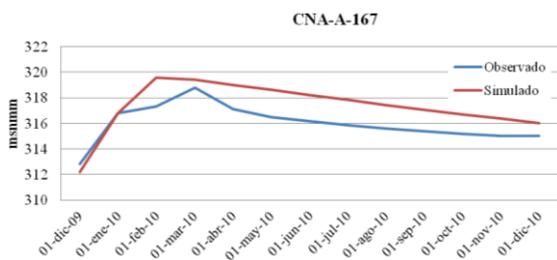


Fig. D5- Niveles observado y simulado mensualmente

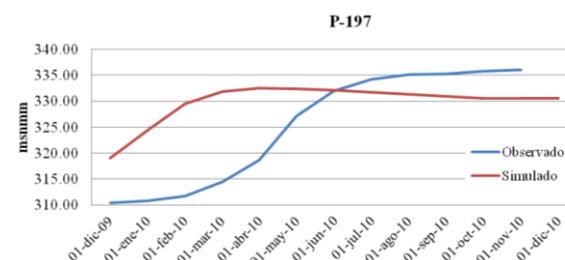


Fig. D6- Niveles observado y simulado mensualmente

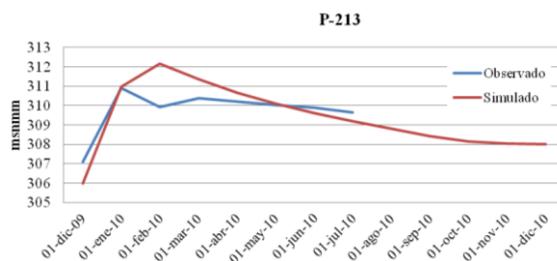


Fig. D7- Niveles observado y simulado mensualmente

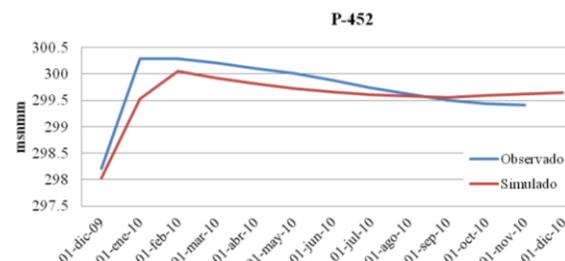


Fig. D8- Niveles observado y simulado mensualmente

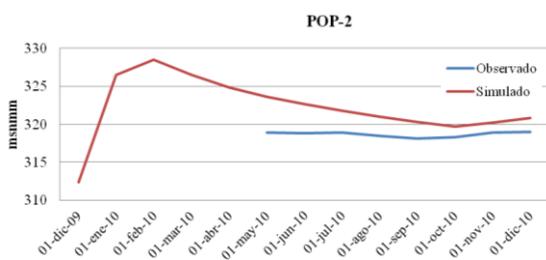


Fig. D9- Niveles observado y simulado mensualmente

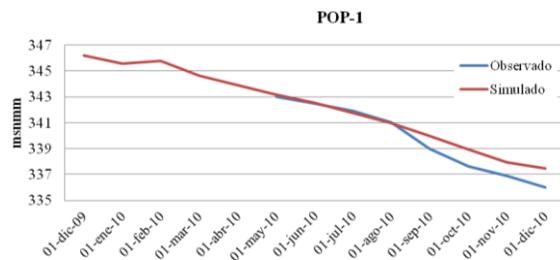


Fig. D10- Niveles observado y simulado mensualmente

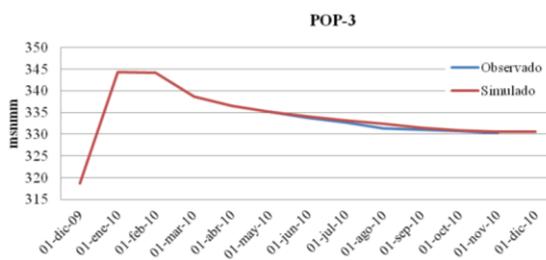


Fig. D11- Niveles observado y simulado mensualmente

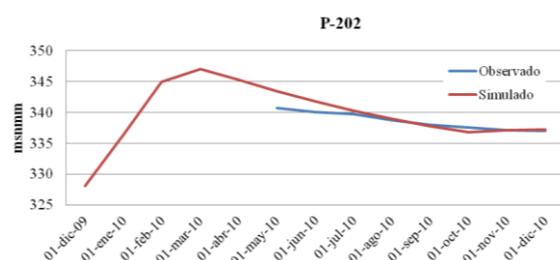


Fig. D12- Niveles observado y simulado mensualmente

Apéndice E – Solución numérica de la ecuación de balance.

Partiendo de la ecuación de Boussinesq en su forma de diferencias finitas:

$$\frac{T_{i+\frac{1}{2}j} \cdot (h_{i+1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) + T_{i-\frac{1}{2}j} \cdot (h_{i-1,j}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1})}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{i,j+\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j+1}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1}) + T_{i,j-\frac{1}{2}} \cdot (h_{i,j-1}^{k+1} - h_{i,j}^{k+1})}{(\Delta y)^2} = S \frac{h_{i,j}^{k+1} - h_{i,j}^k}{\Delta t} \quad (11)$$

$$\frac{T_{SC} \cdot (H_S^{k+1} - H_C^{k+1}) + T_{NC} \cdot (H_N^{k+1} - H_C^{k+1})}{(\Delta x)^2} + \frac{T_{EC} \cdot (H_E^{k+1} - H_C^{k+1}) + T_{OC} \cdot (H_O^{k+1} - H_C^{k+1})}{(\Delta y)^2} = S_c \frac{H_C^{k+1} - H_C^k}{\Delta t},$$

$$\frac{1}{(\Delta d)^2} (T_{SC} H_S^{k+1} - T_{SC} H_C^{k+1} + T_{NC} H_N^{k+1} - T_{NC} H_C^{k+1} + T_{EC} H_E^{k+1} - T_{EC} H_C^{k+1} + T_{OC} H_O^{k+1} - T_{OC} H_C^{k+1}) = S_c \frac{H_C^{k+1} - H_C^k}{\Delta t},$$

$$T_{SC} H_S^{k+1} + T_{NC} H_N^{k+1} + T_{EC} H_E^{k+1} + T_{OC} H_O^{k+1} - H_C^{k+1} \cdot (T_{SC} + T_{NC} + T_{EC} + T_{OC}) = S_c \cdot (\Delta d)^2 \frac{H_C^{k+1} - H_C^k}{\Delta t},$$

sustituyendo $SE_C = \frac{S_c \cdot \Delta d^2}{\Delta t}$

$$T_{SC} H_S^{k+1} + T_{NC} H_N^{k+1} + T_{EC} H_E^{k+1} + T_{OC} H_O^{k+1} = SE_C H_C^{k+1} - SE_C H_C^k + H_C^{k+1} \cdot (T_{SC} + T_{NC} + T_{EC} + T_{OC}),$$

$$T_{SC} H_S^{k+1} + T_{NC} H_N^{k+1} + T_{EC} H_E^{k+1} + T_{OC} H_O^{k+1} + SE_C H_C^k = SE_C H_C^{k+1} + H_C^{k+1} \cdot (T_{SC} + T_{NC} + T_{EC} + T_{OC}),$$

y finalmente agregando el término fuente R_C^{k+1} y resolviendo para H_C^{k+1} :

$$H_C^{k+1} = \frac{T_{SC} H_S^{k+1} + T_{NC} H_N^{k+1} + T_{EC} H_E^{k+1} + T_{OC} H_O^{k+1} + SE_C H_C^k + R_C^{k+1}}{T_{SC} + T_{NC} + T_{EC} + T_{OC} + SE_C}. \quad (13)$$