

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO



**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ACUÍFERO DE
ZAPOTITAN, HASTA LA CONFLUENCIA DEL RÍO
SUCIO CON EL RÍO FRÍO
(LAS LÁGRIMAS O AGUA CALIENTE)**

PRESENTADO POR:

JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS
HIDROGEOLÓGICOS**

CIUDAD UNIVERSITARIA, NOVIEMBRE DE 2022

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR

RECTOR:

MSc. ROGER ARMANDO ARIAS ALVARADO

SECRETARIO GENERAL:

MSc. FRANCISCO ANTONIO ALARCON SANDOVAL

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA

DECANO:

PhD. EDGAR ARMANDO PEÑA FIGUEROA

SECRETARIO:

ING. JULIO ALBERTO PORTILLO

ESCUELA DE POSGRADO

DIRECTOR:

MSc. MANUEL ROBERTO MONTEJO SANTOS

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR
FACULTAD DE INGENIERIA Y ARQUITECTURA
ESCUELA DE POSGRADO

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

MAESTRO EN GESTIÓN DE RECURSOS HIDROGEOLOGÍCOS

Título:

**MODELACIÓN NUMÉRICA DEL ACUÍFERO DE
ZAPOTITAN, HASTA LA CONFLUENCIA DEL RÍO
SUCIO CON EL RÍO FRÍO
(LAS LÁGRIMAS O AGUA CALIENTE)**

Presentado por:

JOSÉ ALEJANDRO MACHUCA LAÍNEZ

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor(a):

DRA. MARCIA LIZETH BARRERA DE CALDERÓN

SAN SALVADOR, NOVIEMBRE DE 2022

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor:

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Marcia Lizeth Barrera de Calderón', with a stylized flourish at the end.

DRA. MARCIA LIZETH BARRERA DE CALDERÓN

RESUMEN

El acuífero de Zapotitán es reconocido por presentar demandas de todo tipo de usuarios, cuyos volúmenes han presentado un incremento considerable en los últimos 50 años. A la fecha se desconocen los volúmenes de los componentes de balance hídrico y principalmente la relación que puede existir entre los aprovechamientos de agua subterránea con las cotas del nivel freático.

Para abordar este problema se realiza un modelo hidrogeológico conceptual a partir de información de perforación de pozos, modelos digitales de elevaciones, estimaciones de flujos que ingresan al sistema acuífero y niveles de pozos dando como resultado un modelo numérico de flujo de agua subterránea de 3 capas de la siguiente forma: un acuífero libre, un acuitardo o capa confinante y finalmente un acuífero confinado. Como criterio principal para la determinación de los espesores se ha tenido como insumo las pruebas geofísicas presentadas en los informes de perforación de pozos.

El modelo numérico fue calibrado en régimen permanente, según los valores presentados en 12 pozos de observación registrados por el Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales en su plataforma SIHI (Sistema de Información Hídrica).

El modelo también obedece a una interacción de flujos provenientes de los complejos volcánicos de Santa Ana y San Salvador, siendo sus principales aportaciones de agua subterránea hacia el interior del acuífero confinado de Zapotitán, dejando en un segundo plano los efectos de recarga locales o por los retornos provenientes de las demandas agrarias. Estos últimos tienen mayor incidencia en sus efectos al acuífero libre.

Como principal demanda hídrica se identifica la poblacional, no obstante, se hace del conocimiento que las bases de datos han sido limitadas a la información disponible en el MARN (SIHI, PNGIRH).

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidroestratigráficas son las siguientes: para el acuífero libre se determinó una conductividad hidráulica de 4.65×10^{-5} m/s; el segundo estrato ha sido modelado con valores equivalentes a un acuitardo correspondientes a 2.31×10^{-6} m/s y el tercer estrato con valores de 2×10^{-4} m/s, muy similar a lo utilizado por Walter (2006) correspondiente a 1.7×10^{-4} m/s. Estos parámetros permanecieron constantes en el modelo.

Del balance de masa se puede observar que el 89% de las entradas corresponden a las recargas provenientes del volcán de San Salvador, Santa Ana y de la cordillera del Bálsamo, el 3% corresponde a la recarga directa en el área de análisis (hacia adentro de la frontera del modelo), el 8% de las entradas son obtenidas a partir de la carga constante especificada para la laguna de Chanmico. Reinterpretando esta situación, la suma de las cargas constante y el flujo de los complejos volcánicos equivale al 96% de las entradas al sistema.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios Todo Poderoso por darme la oportunidad de escribir un libro.

A mi esposa Yanirita, mis hijas Valeria y Marcela por brindarme sus muestras de amor, apoyo y el tiempo para el desarrollo del máster.

A mis compañeros de maestría por su apoyo en el desarrollo de las materias y evaluaciones, principalmente a Eduardo Echeverría, Tania Maltez, Jonathan Canizales y Bernardo Romero.

A mis maestros por las enseñanzas brindadas.

A mi directora de tesis, Dra. Marcia de Calderón, por el tiempo y sus invaluable consejos para la mejora de la investigación.

A la Cooperación Italiana, quienes mediante el proyecto Agua Futura financiaron completamente estos estudios.



“Hacia la Libertad por la Cultura”

"Como consecuencia de la erupción del 3 de noviembre de 1658 quedó realzado un cono de lavas: el volcán del Playón...obstruyó el curso natural del Nixapán o río Sucio...se formó una dilatada ciénaga o laguna hacia el pueblo de Guaymoco (hoy Armenia). Con el tiempo, el Río Sucio trabajó un nuevo curso hacia el Lempa y a partir de entonces, se retiraron o consumieron las aguas, más pronto en unas partes que otras, hasta quedar reducida la gran inundación del valle a laguneta o ciénaga de Guaymoco - más tarde nombrada de Zapotitán-, la cual laguna -dice el Protocolo antiguo - no es de tanta extensión como esta ciudad de San Salvador, cuyo ámbito es muy corto" (Lardé, 1974)

INDICE

RESUMEN	i
AGRADECIMIENTOS	iii
1. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Definición del problema.....	7
1.4. Hipótesis.....	8
1.5. Preguntas generadoras.....	8
1.6. Objetivos	8
1.6.1. Objetivo general.....	8
1.6.2. Objetivos específicos	8
1.6.3. Justificación	9
1.7. Beneficios esperados	11
1.8. Delimitación y limitaciones de la investigación o del proyecto.....	11
2. MARCO TEÓRICO.....	13
2.1. Modelo Conceptual	13
2.2. Modelo Numérico	14
2.3. Balance hídrico de suelos.....	17
3. METODOLOGÍA	19
3.1. Modelo hidrogeológico conceptual.....	19
3.1.1. Delimitación del área de análisis	19
3.1.2. Balance de suelos.....	20
3.1.3. Unidades hidroestratigráficas.....	26

3.2. Modelo Numérico	26
3.2.1. Discretización del modelo.....	26
3.2.2. Cargas iniciales	28
3.2.3. Cargas constantes.....	28
3.2.4. Flujos inducidos por recarga fuera del modelo.....	29
3.2.5. Parámetros hidráulicos.....	31
3.2.6. Pozos de observación.....	31
3.2.7. Demandas hídricas.....	36
4. RESULTADOS.....	37
4.1. Modelo hidrogeológico conceptual.....	37
4.1.1. Balance de suelos.....	37
4.1.2. Recarga hídrica	42
4.1.3. Unidades hidroestratigráficas.....	44
4.1.4. Recarga aplicada al modelo numérico de flujo.....	46
4.1.5. Pozos de bombeo	47
4.1.6. Modelo hidrogeológico conceptual.....	49
4.2. Modelo Numérico	52
4.2.1. Pozos de observación.....	52
4.2.2. Calibración del modelo en régimen permanente	53
5. CONCLUSIONES	59
6. RECOMENDACIONES	61
7. BIBLIOGRAFÍA.....	63

ANEXO A: COMPARATIVA DE ESTUDIOS PREVIOS EN LA ZONA

ANEXO B: CÁLCULO DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL

ANEXO C: DATOS DE DISEÑO DE POZOS DE BOMBEO UTILIZADOS EN EL MODELO

ANEXO D: MENSAJES DE RESULTADOS EN LA EJECUCIÓN DEL MODELO

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Comparativa de modelos numéricos hidrogeológicos anteriores en la zona de estudio.....	4
Tabla 3.1 Coeficiente de pendiente	20
Tabla 3.2 Coeficiente de vegetación.....	21
Tabla 3.3 Valores de Kfc	23
Tabla 3.4. Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad aparente	24
Tabla 4.1 Comparativo de resultados de recarga hídrica potencial	43
Tabla 4.2 Demandas hídricas por tipo de rubro.....	47
Tabla 4.3 Datos de pozos de observación ajustados ingresados al modelo.....	52
Tabla 4.4. Balance de masas resultante del modelo numérico de flujo del acuífero de Zapotitán.....	54

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Área de influencia de estudios previos sobre el acuífero	4
Figura 1.2 Mapa de ubicación del área de estudio.	6
Figura 1.3 Imagen satelital del año 1986.....	10
Figura 1.4 Imagen satelital del año 2020.....	10
Figura 3.1. Mapa de usos de suelo simplificado a partir de MARN (2017).....	21
Figura 3.2. Mapa geológico 1:100,000. Miembros de la formación San Salvador: s1, s2, s3, s4, s5a, s5b, s5c, Qc, Qd, Qf; miembros de la formación Cuscatlán: c1, c2, c3; miembros de la formación Bálsamo: b1, b2 y b3.....	23
Figura 3.3. Mapa de texturas de suelo.....	25
Figura 3.4 Diagrama de perforación en pozo a) N° 9 del distrito de riego de Zapotitán, b) La Joya N°1 (Textiles Pettenati), c) Pozo N° 1 de urbanización Campos Verdes en Lourdes..	27
Figura 3.5 Configuración de la malla de diferencias finitas empleadas en el modelo.	28
Figura 3.6 Carga constante en la laguna de Chanmico.....	29
Figura 3.7 Flujos inducidos por recarga.	30
Figura 3.8 Red de monitoreo de aguas subterráneas	32
Figura 3.9 Registros de la red convencional.....	33
Figura 3.10 Nivel de pozo 0303-A-PP001.	34
Figura 3.11 Nivel de pozo 0503-A-PP002.	34
Figura 3.12 Nivel de pozo 05012-A-PP004.	35
Figura 3.13 Nivel piezométrico pozo 0504-A-PP001.	35
Figura 4.1 Coeficiente de pendiente K_p para el cálculo del balance hídrico de suelos.....	37
Figura 4.2 Coeficiente de vegetación k_v para el cálculo del balance hídrico de suelos.....	38
Figura 4.3 Mapa de coeficiente K_{fc} para el cálculo del balance hídrico de suelos.....	39
Figura 4.4 Coeficiente de infiltración.....	40
Figura 4.5 Lluvia media anual.....	41
Figura 4.6 Evapotranspiración potencial.....	41
Figura 4.7 Recarga hídrica potencial en el territorio de análisis.	43
Figura 4.8 Diagrama de pozo perforado en la zona de estudio..	44
Figura 4.9 Distribución de la unidades hidroestratigraficas. Vista hacia el sur.	45

Figura 4.10 Modelo hidrogeológico conceptual. Vista desde el norte.	46
Figura 4.11 Tipos de demanda hídrica subterránea	48
Figura 4.12 Pozos de bombeo empleados en modelo.....	49
Figura 4.13 Modelo hidrogeológico conceptual.....	51
Figura 4.14 Cotas calculadas vrs. observadas.	55
Figura 4.15 Altura potenciométrica (tabla de agua).....	57
Figura 4.16 Conos de abatimiento del modelo.	58

1. ALCANCES Y PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Introducción

El crecimiento poblacional e industrial en la zona central del país ha sido realizado principalmente en el Área Metropolitana de San Salvador (AMSS), no obstante, esta área es limitada por su fisiografía al pie del complejo volcánico de San Salvador y la Caldera de Ilopango. Es por ello que el crecimiento urbano se ha extendido a las zonas inmediatas al AMSS, en este caso, una de estas zonas es el Valle de San Andrés hacia el oeste del AMSS. El valle de San Andrés ha sido tradicionalmente una zona dedicada para el aprovechamiento agropecuario, pero en los últimos 30 a 50 años ha estado sujeta a cambios en los usos de suelo.

Estos cambios de uso de suelo, en su mayoría viviendas e industria tienen como principal fuente de agua, los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Zapotitán, cuya respuesta a las extracciones es evaluada mediante un modelo numérico de flujo en estado estacionario para el año 2019 en la región que comprendida en el acuífero de Zapotitán hasta la confluencia del río Sucio con el río Frio (Las Lágrimas o Agua Caliente).

En este capítulo 1 se desarrolla la parte introductoria del estudio, que contempla los fundamentos que dieron lugar a la construcción de este proyecto de tesis: se presenta los antecedentes, la definición del problema, la hipótesis, los objetivos, beneficios esperados, delimitación de la investigación.

El capítulo 2 contiene el marco teórico abordando temas de modelo conceptual y modelo numérico, se aborda también el balance hídrico de suelos.

Por su parte, en el capítulo 3 comprende la metodología abordada para el modelo hidrogeológico conceptual, partiendo del balance de suelos, planteamiento de las unidades hidroestratigráficas; el modelo numérico, así como su discretización, cargas iniciales, cargas

constantes, flujos inducidos por recarga fuera del modelo, parámetros hidráulicos, pozos de observación, demandas hídricas.

En el capítulo 4 se presentan los resultados del balance de suelos, unidades hidroestratigráficas que conforman el modelo conceptual y la recarga hídrica. En el modelo numérico se presentan las cargas de los pozos de observación, las características y cargas de los pozos de bombeo y los resultados de la calibración del modelo numérico en régimen permanente.

Finalmente, en el capítulo 5, se presentan las conclusiones y en el capítulo 6 las recomendaciones. La bibliografía empleada en la investigación es presentada en el capítulo 7. El material de soporte del trabajo es adjuntado en los anexos A, B, C y D

1.2. Antecedentes

En El Salvador los primeros análisis para la cuantificación del recurso hídrico fueron realizados mediante el Plan Maestro para el Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos (PLAMDARH) (1982), en donde se recopiló información hídrica a nivel nacional, reconociendo por primera vez las Regiones Hidrográficas.

SNET (2005), retomó la información plasmada en el PLAMDARH y realizó el Balance Hídrico Integrado y Dinámico de El Salvador. Mediante este estudio se realizaron balances hídricos a nivel de cuencas hidrográficas teniendo como resultados cambios de almacenamiento en el sistema, equivalentes a recargas hacia los acuíferos. Dentro de estos estudios se incluyó la cuenca del río Sucio que contiene al acuífero de Zapotitán.

En el campo particular de la hidrología subterránea, Walter (2006), realizó una modelación numérica del acuífero de Zapotitán principalmente comprendido por el distrito de riego y avenamiento, considerando 3 unidades hidroestratigráficas. El modelo empleado fue Ground Water Vistas. La autora consideró la primera unidad hidroestratigráfica comprendida por la

Toba de San Andrés (Sofield, 2005) y la TBJ (Hart, 1983), el espesor de esta unidad es de 4.5 m. La segunda unidad hidroestratigráfica comprende un paleosuelo de 2.5 m y a la tercera unidad le asigna un espesor de 150m.

Más tarde, Guevara (2011), realizó la modelación numérica del acuífero El Playón comprendido entre el Cantón Sitio del Niño y el Campo de pozos de San Juan Opico administrado por ANDA. La modelación numérica fue realizada utilizando el software Visual Modflow, el cual considera parámetros tales como espesores de estratos, conductividad hidráulica, recargas hídricas, niveles piezométricos de pozos, niveles de ríos y lagos.

Recientemente, el MARN (2017), en el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico de El Salvador, con énfasis en zonas prioritarias (PNGIRH), realizó balances hídricos a nivel de Región Hidrográfica, a los que denominó Sistemas de Gestión. Cada uno de estos sistemas fue analizado mediante Sistemas de Soporte a la Decisión (SSD), para este caso se utilizó el software Aquatool desarrollado por la Universidad Politécnica de Valencia., el cual permite hacer balances hídricos y asignar demandas de acuerdo con prioridades de usos. Como datos de entrada, se utilizaron los resultados del modelo hidrológico de Témez (1977), el cual considera los acuíferos como unicelulares, es decir, que los parámetros que gobiernan el modelo del acuífero es su volumen de almacenamiento y coeficiente de desagüe, los cuales gobiernan las salidas o escorrentía subterránea. Mediante el PNGIRH se obtuvieron series climáticas de lluvia y ETP a nivel mensual desde el año 1965 al año 2012.

Es importante mencionar que el ámbito de aplicación, así como la cantidad de información disponible para los estudios previos de la zona ha sido distinto. Como puede observarse en la Figura 1.1, el área de análisis de Walter (2006) y Guevara (2011) fueron diferentes pues comprenden distintos objetivos. Dado que estos 2 estudios consideran la base de la modelación hidrogeológica en la zona, se ha elaborado una tabla comparativa a efectos de analizar las consideraciones realizadas en ambos modelos, véase Tabla 1.1.

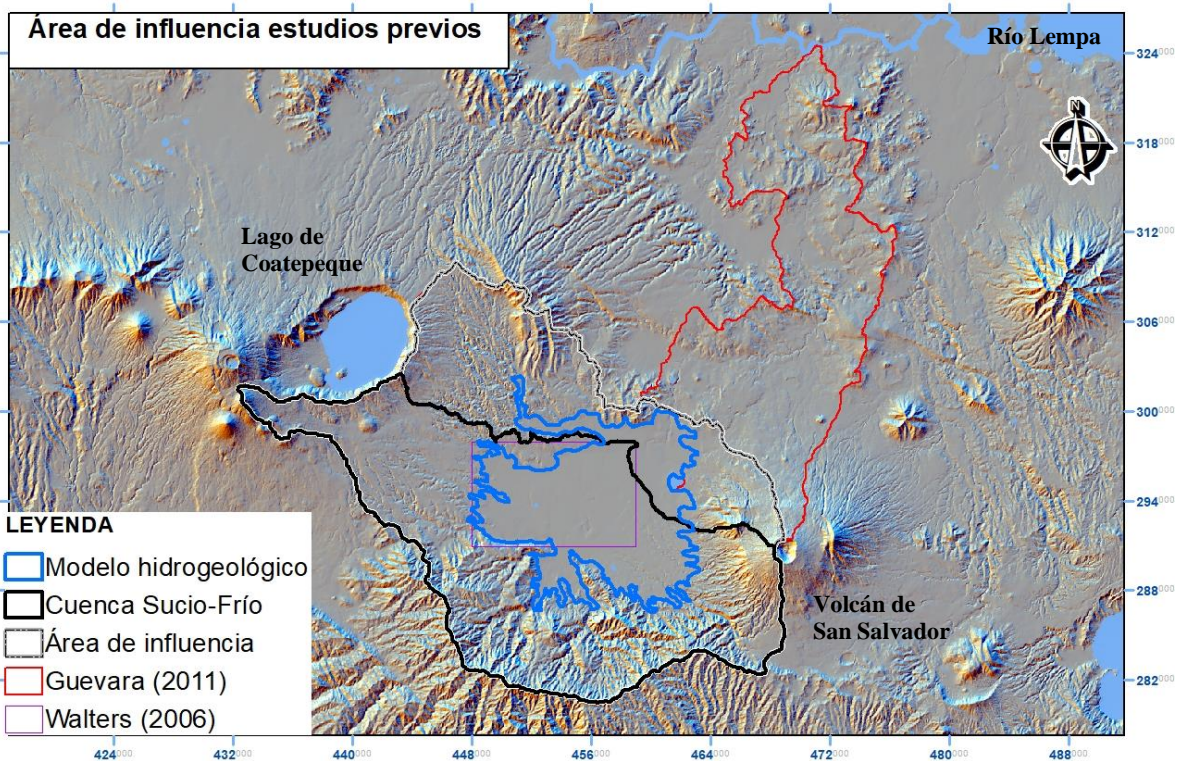


Figura 1.1 Área de influencia de estudios previos sobre el acuífero

Tabla 1.1 Comparativa de modelos numéricos hidrogeológicos anteriores en la zona de estudio

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)
Área de análisis	52-60 km ² ?	68.7 km ² ?
Número de unidades hidroestratigráficas	3	5
Descripción de unidades hidroestratigráficas	1: TBJ y toba de San Andrés 2: Paleosuelo 3: Todo debajo de esto	1 y 2: materiales sedimentarios o detríticos y volcánico fisurado 2 y 3: sedimentos lacustres, lavas básicas-intermedias y piroclásticos terciarios 4 y 5: lavas basálticas, tobas, aglomerados y lahares.
Espesores de los estratos	4.5, 2 y 150 m (uniformes)	

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)
Unidades de análisis para la estimación de la recarga.	de Estimada según tipo de cultivo (uso de suelo) en distrito de riego. 10 Zonas en m/día	Miembro geológico. Rangos 21.4-852 mm/año (máximos en lavas Playón y Teixcal)
Tamaño de celda del modelo	50x50	Variable: 100x100 en zona del playón, hasta 400x400 m
Diferencia de piezometría para calibración del modelo	de 1 m	+/- 5 m
Conductividades hidráulicas	Layer 1: 4 m/d Layer 2: 0.0001 m/d, 0.001 m/d, 4 m/d Layer 3: 15 m/d, 4 m/d, 0.6 m/d	A partir de los miembros geológicos Bálsamo: 1 y 2: 0.1 m/d 3 y 4: 1x10 ⁻⁶ m/d 5: 1x10 ⁻⁹ m/d Cuscatlán: 1-2 m/d San Salvador: Ceniza y piroclasto fino: 4-5 m/d Piroclasto grueso y lapilli: 30 m/d Terrazas aluviales: 10 m/d Lavas basálticas y escoria: 50 m/d Layers 1 y 2 tienen las mismas conductividades Layer 3 se reducen valores en Cuscatlán y San Salvador. Bálsamo es impermeable Layer 4: Bálsamo y San Salvador son impermeables a excepción de terrazas aluviales y Cuscatlán. Layer 5: Impermeable.

Como puede observarse en la tabla anterior, el ámbito de aplicación del espacio analizado es diferente entre ambos estudios, así como la cantidad de insumos (pozos, geología, modelos de elevaciones) y el desarrollo de su modelo conceptual. Guevara (2011) documenta de manera más amplia aspectos importantes para el desarrollo de un modelo hidrogeológico ya que en sus apéndices incluye los diseños de los pozos empleados para la calibración del modelo. El modelo de Walter (2006) por lo tanto es un modelo más local emplazado mayoritariamente en la zona del distrito de Riego de Zapotitán. Pese a ello, pueden observarse semejanzas en los parámetros de conductividades hidráulicas que podrían

abstraerse en tres unidades hidroestratigráficas siendo prácticamente un acuífero libre en la parte superior, un acuitardo en la parte intermedia y un acuífero confinado de gran espesor en la parte inferior. En el Anexo A puede encontrarse una tabla comparativa más amplia que contiene otras características de los modelos en ambas investigaciones.

En la Figura 1.2 se muestra la ubicación del área de estudio, específicamente el territorio considerado como el modelo hidrogeológico que se desarrollará más adelante. En dicha figura puede observarse los municipios con los que se están relacionados: Colón, San Juan Opico, Ciudad Arce, Coatepeque, El Congo, Armenia, Sacacoyo, Tepecoyo, Jayaque y Talnique. Así mismo se incluye las vías principales o carreteras hacia Santa Ana (CA-1) y Sonsonate (CA-8). También se presentan los ríos Sucio y Agua Caliente.

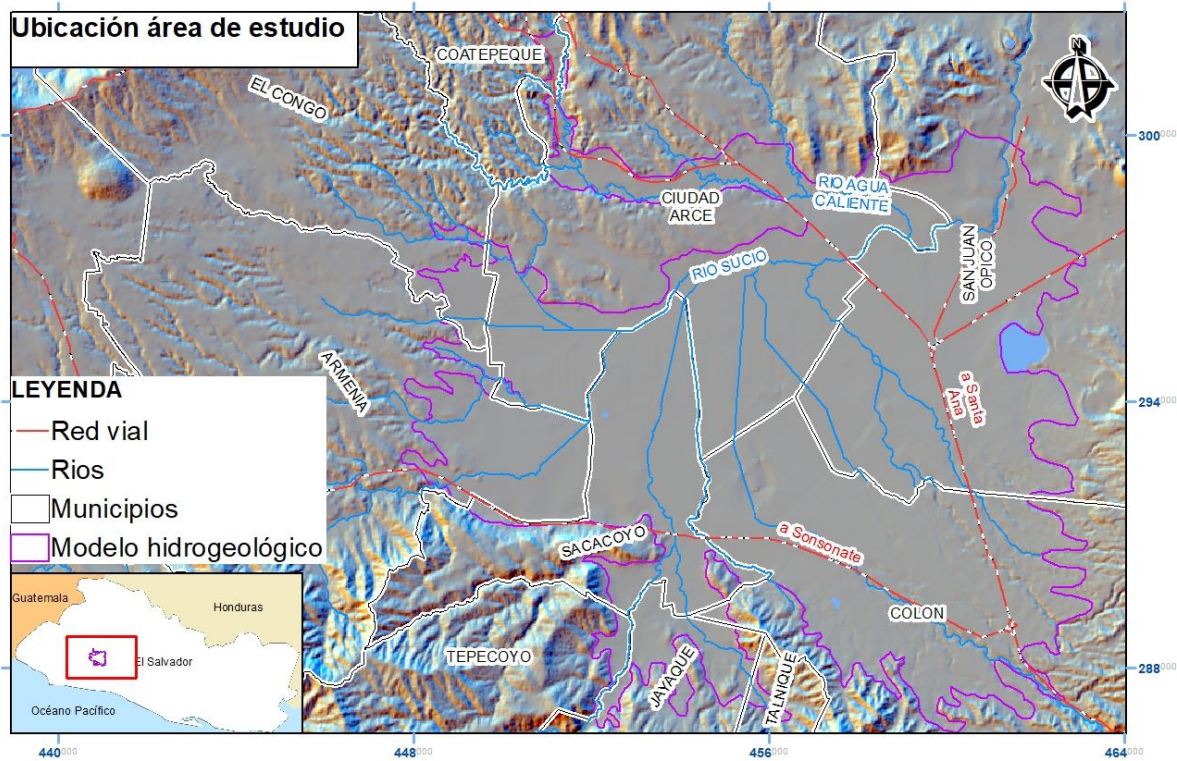


Figura 1.2 Mapa de ubicación del área de estudio.

1.3. Definición del problema

El problema consiste en que se desconoce la relación entre las demandas actuales de los recursos hídricos subterráneos y la cantidad de agua que ingresa al sistema, así como el comportamiento de la carga hidráulica en el acuífero frente a dichas extracciones, lo cual puede repercutir en una gestión poco sostenible del agua subterránea de la región.

Dadas las características fisiográficas de planicie o depósitos aluviales localizados entre los complejos volcánicos de San Salvador y Santa Ana, particularmente en la zona conocida como Zapotitán, se presentan condiciones favorables para el emplazamiento de diferentes tipos de desarrollos tanto agrícola, urbano e industrial. Esta situación incide directamente en un incremento del aprovechamiento de los recursos hídricos, de los cuales dependen las aportaciones realizadas por las recargas de los complejos volcánicos, así como la recarga directa en la zona.

El incremento de asentamientos humanos e industria conlleva procesos de impermeabilización de los suelos, lo cual incide en la recarga directa en la zona. Por otra parte, existe un componente de variabilidad climática que también se relaciona con la recarga directa en la configuración del acuífero suprayacente.

Como se mencionó en el apartado anterior, han existido dos estudios previos relevantes en la zona realizados en el año 2006 y en el año 2011, cuya información relacionada con las extracciones ha sido la disponible para dichos períodos de elaboración, por lo que la utilización de dichos modelos para la toma de decisiones relacionadas con la gestión del recurso podría deferir con la actualidad.

1.4. Hipótesis

A partir de la información hidrogeológica y de extracciones disponible, existe un modelo numérico de flujo de agua subterránea en estado estacionario del acuífero de Zapotitán que represente las condiciones de carga hidráulica del acuífero reflejadas en el conjunto de pozos de monitoreo existentes en la zona durante el año 2019, con un margen de error inferior a 10 m.

1.5. Preguntas generadoras

- ¿Cuál es el modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Zapotitán que integra la demanda y oferta de agua subterránea al año 2019 y su distribución espacial?
- ¿Cuál es la respuesta de la carga hidráulica en estado estacionario del acuífero de Zapotitán?

1.6. Objetivos

1.6.1. Objetivo general

Formular un modelo numérico de flujo del acuífero de Zapotitán, hasta la confluencia del río Sucio con el río Frío (las Lágrimas o Agua Caliente) que refleje las condiciones de carga hidráulica observadas en los pozos de monitoreo de la zona.

1.6.2. Objetivos específicos

- Establecer un modelo hidrogeológico conceptual del acuífero de Zapotitán hasta la confluencia del río Sucio con el río Frío (Las Lágrimas o Agua Caliente)
- Elaborar el modelo numérico que refleja las condiciones en estado estacionario según los pozos de monitoreo de la zona.

1.6.3. Justificación

La cuenca del río Sucio ha tenido en los últimos 50 años un crecimiento de sus demandas hídricas por el establecimiento de un distrito de riego, urbanizaciones, asentamientos humanos, industrias y emprendimientos comerciales. El rápido crecimiento poblacional e industrial, evidenciado en la Figura 1.3 y Figura 1.4 muestra que éste ha sido orientado mayoritariamente en el área perimetral del cantón Lourdes, a lo largo de las carreteras que conducen hacia Santa Ana y Sonsonate. Por su localización sus limitantes han sido de dos tipos: la fisiografía del complejo volcánico de San Salvador y Santa Ana (por sus pendientes) y por la localización del distrito de riego y avenamiento de Zapotitán. De acuerdo con el censo realizado en 1992, en los municipios del área de influencia del modelo se contaban con una población de 258,717 personas y posteriormente, en el censo del año 2007 se cuantificaron 373,415 personas, es decir, un incremento del 44.33% de la población.

Este crecimiento y cambios de usos de suelo ha tenido como principal fuente de abastecimiento los recursos hídricos subterráneos del acuífero de Zapotitán de los cuales se desconocen el efecto que ocasionan en el sistema acuífero. A la fecha, se cuenta con nueva e importante información, adicional a los dos modelos numéricos de flujo previos (Walter, (2006) y Guevara (2011)), cuya información fue limitada a ese período. Entre los nuevos datos puede mencionarse: registro de 12 pozos de monitoreo que cubren períodos variables que en algunos casos datan desde el año 2014; registro de extracciones oficiales más completo proveniente del Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN) y la Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados. (ANDA), por consiguiente, con este trabajo de tesis será posible la construcción de un modelo actualizado que integra los estudios de Walter (2006) y Guevara (2011) y la nueva información hidrogeológica disponible. Con este nuevo modelo se brinda información importante, actualizada y confiable a los tomadores de decisión para una mejor y sostenible gestión de los recursos de agua subterránea de la región.

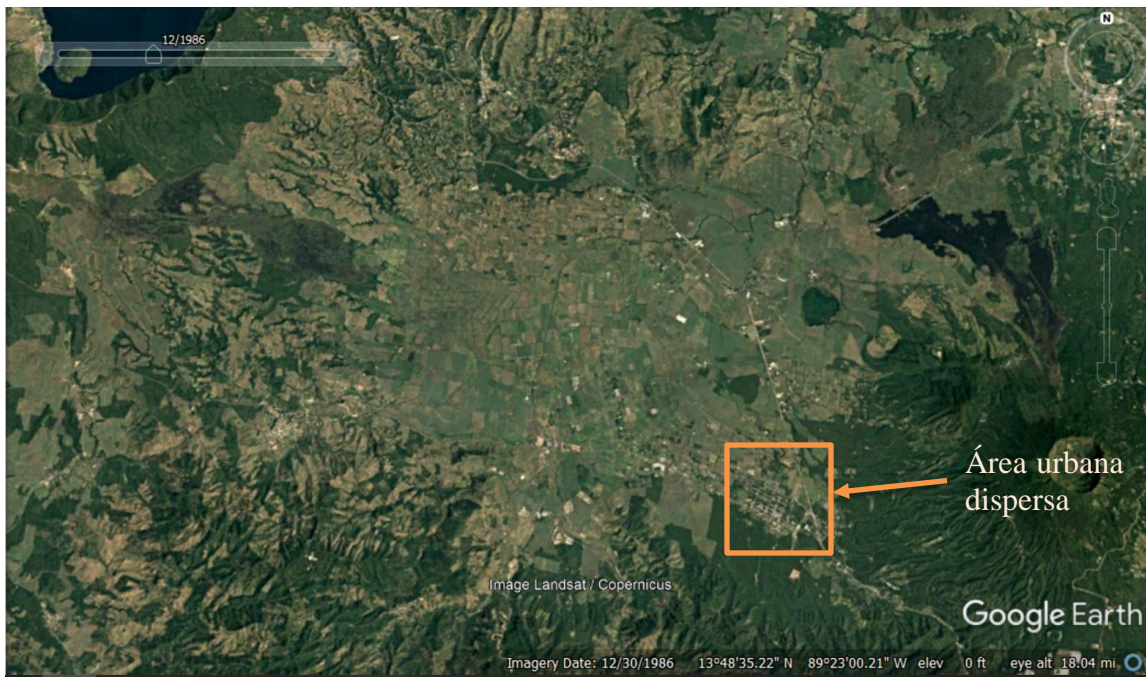


Figura 1.3 Imagen satelital del año 1986

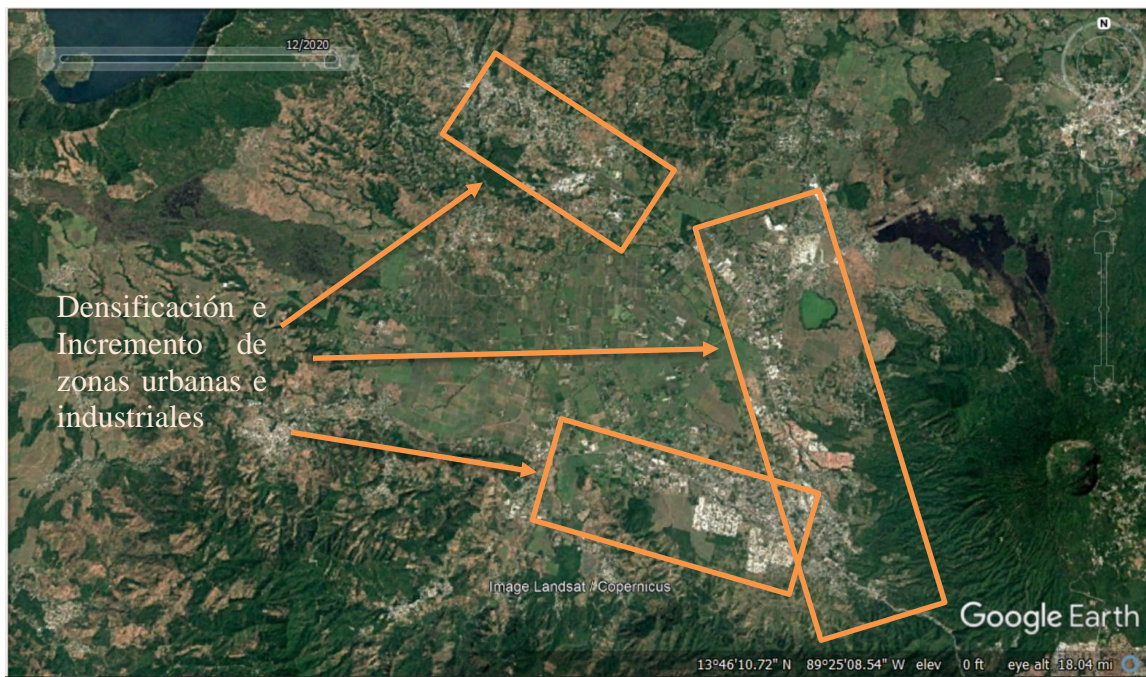


Figura 1.4 Imagen satelital del año 2020

1.7. Beneficios esperados

Se contará con una versión actualizada del modelo numérico del acuífero de Zapotitán considerando el incremento de demandas en la zona, calibrados con los registros de pozos exclusivamente de monitoreo. Este estudio podrá servir de base para la toma de decisiones para el manejo del recurso hídrico, particularmente la gestión de las aguas subterráneas en los municipios de Colón, Ciudad Arce, Sacacoyo y Armenia.

1.8. Delimitación y limitaciones de la investigación o del proyecto

La delimitación física del proyecto comprende el acuífero de Zapotitán, no obstante, ha sido necesario tener en consideración áreas de influencia particularmente la delimitación de la cuenca del río Sucio hasta la confluencia con el río Frio. Lo anterior se debe a que el modelo hidrogeológico numérico requiere la estimación de condiciones de frontera, que para efectos de la presente investigación, han sido considerando las recargas provenientes de los complejos volcánicos de San Salvador y Santa Ana, así como de la Cordillera del Bálsamo como flujos externos que ingresan a dicho modelo. Véase Figura 1.1

Para la elaboración del balance hídrico de suelos ha sido necesario contar con registros históricos de variables climatológicas, hidrométricas, los cuales han sido obtenidos a partir del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (MARN, 2017). Se ha utilizado cartografía actualizada de usos de suelo de la cuenca, la cual ha sido digitalizada con imágenes del año 2018 (MARN 2019).

Para el modelo hidrogeológico numérico se han tenido en consideración diversos informes de perforación que datan desde los años 70 a inicios del año 2000, teniendo como insumo principal las diagráfias provistas por los registros eléctricos verticales. Por otra parte, ha sido necesario contar con información de pozos exclusivamente de monitoreo en la zona, los cuales han sido obtenidos del servidor de mapas SIHI (Sistema de Información Hídrica) del MARN. Los pozos de monitoreo más antiguos cuentan con registros bianuales (generalmente uno en época seca y otro en época húmeda) que datan del año 2013. Existen otros pozos más

recientes que cuentan con monitoreo continuo. En El Salvador, así como en diversos países, uno de los principales problemas en la cuantificación de las extracciones es el acceso a bases de datos completas que integren todas las extracciones, no obstante, en este estudio se ha realizado el esfuerzo de cuantificar y actualizar las bases de datos de distintas fuentes con el fin de reflejar una condición más real en las salidas del sistema acuífero. Adicionalmente es importante destacar que el modelo ha sido construido para evaluar las condiciones actuales, proporcionando a los tomadores de decisión un instrumento que puede ajustarse y retomarse para evaluaciones de escenarios futuros, tal evaluación está fuera del alcance de este estudio. Las bases de datos obtenidas a partir de ANDA (2017) y MARN (2017) en cuanto a las demandas, son más amplias que aquellos que cuentan con diseños de pozos tanto de consumo como de monitoreo.

En el caso del modelo hidrogeológico conceptual, Walter (2006) y Guevara (2011) citando a Geotérmica Italiana (1992), mencionan que existe una fosa tectónica de aproximadamente 1,500 m a 2,000 m de profundidad. La modelación de la fosa tectónica está fuera de los alcances del estudio, lo mismo trabajar con aspectos de calidad en el modelo, es necesario aclarar que el modelo ha sido elaborado para la zona que actualmente es explotada en el acuífero. Esto obedece a que los flujos evaluados en el modelo están circulando en la zona explotada y a este momento de la evaluación de los recursos hidrogeológicos en el acuífero, no se cuenta con evidencia de que se esté movilizandoflujos más profundos. A esto se suma el hecho de que no se cuenta con datos de pozos de monitoreo que permitan conocer los niveles piezométricos o características químicas de unidades hidroestratigráficas más profundas. No obstante, en el futuro, y con fondos particularmente destinados a un conocimiento más detallado de la zona podría abordarse una evaluación con estos alcances.

De acuerdo con los resultados obtenidos por Guevara (2011) las posibles aportaciones que realiza el agua superficial por infiltración en el cauce del río se estiman en el orden del 4.5%. Teniendo esto en cuenta, para el presente modelo la interacción del río es considerada como entrada de recarga, por lo que no se plantea la modelación de río-acuífero.

2. MARCO TEÓRICO

2.1. Modelo Conceptual

Haitjema (1995) citado por Anderson et al (2015) define al modelo conceptual de aguas subterráneas como una simplificación de un problema que captura a las características esenciales del mundo real y puede ser descrito matemáticamente.

Un modelo es una representación simplificada del mundo natural. Un modelo conceptual de aguas subterráneas simplifica y consolida lo que se conoce sobre la hidrogeología en documentos de texto, diagramas, secciones transversales, diagramas de bloques y tablas. Por otra parte, se considera una manifestación del pasado y del presente basados en la información de campo y disponibles en sitios similares (Anderson, 2015).

Un modelo conceptual diseñado para la mayoría de los modelos de flujo de agua subterránea, como mínimo, incluye información sobre condiciones de frontera; hidroestratigrafía y propiedades hidrogeológicas; direcciones de flujo, fuentes y sumideros; y una estimación basada en el campo de los componentes del balance de agua subterránea (Anderson, 2015).

Las condiciones de frontera en los modelos hidrogeológicos vienen dadas por el conocimiento de características en cuanto a su geología, condiciones de carga constante, recargas hacia el acuífero.

Las condiciones de frontera incluyen características hidráulicas tales como divisorias de aguas subterráneas, cuerpos de agua superficial y rocas relativamente impermeables. La tabla de agua generalmente forma el límite superior de un modelo numérico tridimensional en un acuífero libre.

Idealmente, los límites laterales y del fondo deberían estar alineados con características físicas o hidráulicas que no se mueven ni cambian a medida que cambian las condiciones hidrológicas. Éstos incluyen divisiones de aguas subterráneas relativamente estables; el

océano, grandes lagos y ríos que están conectados al sistema de aguas subterráneas; roca relativamente impermeable (por ejemplo, granito no fracturado, esquisto, arcilla) y zonas de fallas relativamente impermeables.

El material geológico en el interior del modelo conceptual debe describirse de manera práctica. Tradicionalmente, un sistema de aguas subterráneas es descrito como un acuífero o una secuencia de acuíferos y estratos confinantes. Un acuífero es una unidad geológica, o serie de unidades geológicas conectadas hidráulicamente, que almacena y transmite volúmenes de agua subterránea (Kresic y Mikszewski, 2013).

Las cargas constantes se asignan en aquellos sitios en los cuales no se espera una variación cuando se induce un estrés hidrológico. En flujos permanentes, las cargas constantes son invariables. Se recomienda el uso de cargas constantes para representar grandes cuerpos de agua (ríos significativos, lagos, reservorios y océanos) que no afectan el estrés en el sistema cuando se bombea o existan cambios en la tasa de recarga (Anderson, 2015).

Hidrogramas de niveles de agua en los pozos de observación deben ser recolectados y analizados para el desarrollo de un modelo conceptual. Esta información es de utilidad para documentar si un modelo debe abordarse como flujo permanente o transiente. Parte importante de esta investigación ha sido analizar dichos hidrogramas los cuales son presentados en el apartado 3.2.6 Pozos de observación.

2.2. Modelo Numérico

Las ecuaciones que gobiernan el flujo a través de un medio poroso provienen tradicionalmente del flujo a través de un cubo que es suficientemente largo para representar las propiedades del medio y suficientemente pequeño para que los cambios de las cargas entre el volumen sean relativamente pequeñas. Ecuación 2.1

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde,

K_x, K_y, K_z : Conductividades hidráulicas en la dirección x, y, z respectivamente.

h: Carga hidráulica.

S_s : Almacenamiento específico, el cual es el volumen de agua liberado debido a la compresibilidad del suelo y del agua en los poros debido a un cambio unitario en el nivel de agua en el acuífero.

W: flujo volumétrico a partir de fuentes y sumideros

t: tiempo

La variable de interés, h, es la variable dependiente, mientras que x, y, z y t son las variables independientes; $K_x, K_y, K_z, S_s,$ y W son parámetros que dependen de las propiedades hidroestratigráficas

La Ecuación 2.1 es utilizada en la mayoría de los códigos de modelos numéricos de flujos de agua subterránea. La ecuación se simplifica cuando el problema se encuentra en un estado estacionario, es decir cuando no existe un cambio de la carga en función del tiempo ($\partial h/\partial t=0$) se simplifica a la Ecuación 2.2

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = -W \quad \text{Ecuación 2.2}$$

Para el presente estudio se utilizó la calculadora denominada MODFLOW-NWT la cual utiliza la metodología de Newton-Rapson en su proceso de iteración para resolver las ecuaciones no lineales en el acuífero. El método descrito por Niswonger et al. (2011) resuelve un sistema de ecuaciones que pueden ser escritas de manera simbólica como:

$$J(h^{n-1})\Delta h^n = R^{n-1} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde,

n y $n-1$ corresponden a las iteraciones actuales y anteriores respectivamente.

J es la matriz Jacobiana

h es la carga piezométrica

R es el vector residual representando los errores en el balance de agua celda por celda

Para la calibración del modelo es necesario analizar los datos observados y los calculados. En este trabajo se ha tenido en consideración el error cuadrático medio (RMS) y el error cuadrático medio normalizado (NRMS). El error cuadrático medio se calcula como el promedio del cuadrado de los residuales y el error cuadrático medio normalizado se calcula dividiendo el RMS entre la diferencia de valores máximo y mínimo observado:

$$RMS = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0.5} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

Donde,

h_m : carga medida

h_s : carga simulada

n : número de objetivos

$$NRMS = \frac{RMS}{(h_m)_{max} - (h_m)_{min}} \times 100\% \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Donde,

$(h_m)_{max}$: carga medida máxima observada

$(h_m)_{min}$: carga medida mínima observada

2.3. Balance hídrico de suelos.

El tema de la recarga hídrica recoge especial interés para el desarrollo de la investigación ya que como se verá más adelante, las entradas al modelo se plantearán como flujos que ingresan en las fronteras. En razón de lo anterior se reconoce que existen diferentes métodos para la determinación de la recarga como, por ejemplo: Thornthwaite Matter, balance de cloruros, variaciones del nivel freático y balance de suelos (Quiroz et al. 2011).

El método de Thornthwaite Matter se basa en un balance climático considerando como única entrada la lluvia y las salidas corresponden a la escorrentía y la evapotranspiración potencial. El método de cloruros considera también un balance climático, pero incorpora las concentraciones de cloruros tanto del agua lluvia como del agua subterránea. El método de variaciones del nivel freático es recomendado su aplicación en acuíferos libres poco profundos, teniendo en consideración el almacenamiento específico. (Quiroz et al. 2011). El método de balance de suelos considera tanto variables climáticas, propiedades edáficas, morfología del terreno, y tipo de vegetación.

Uno de los métodos de balance de humedad de suelos desarrollados en la región fue propuesto Shosinsky y Losilla (2006) y se ha aplicado en diversos estudios en El Salvador. El estudio del balance de suelos se fundamenta en el principio de la conservación de la materia. El agua que entra al suelo es igual a la suma del agua que se almacena en el suelo y el agua que sale de él. Las entradas son debidas a la infiltración del agua hacia el suelo, y las salidas se deben a la evapotranspiración de las plantas más la descarga de los acuíferos. La recarga al acuífero se lleva a cabo si la cantidad que agua que infiltra es suficiente para llevar al suelo a capacidad de campo y además satisfacer la evapotranspiración de las plantas. El agua sobrante, una vez satisfecha la capacidad de campo y la evapotranspiración, es la que recarga al acuífero. La Ecuación 2.6 presenta los componentes de este balance a nivel mensual:

$$R_p = P_i + HS_i - HS_f - ETR$$

Ecuación 2.6

Donde,

Rp: Recarga potencial mensual en mm/mes

Pi: Precipitación que infiltra en mm/mes

HS_f: Humedad del suelo al final del mes en mm

HS_i: Humedad del suelo al inicio del mes en mm

ETR: Evapotranspiración real en mm/mes

La humedad del suelo se calcula para inicios y finales del mes; a la humedad al inicio del mes se determina como aquella cantidad de agua que pueden aprovechar las plantas, la cual es conocida como humedad disponible. Esta humedad es comparada con la evapotranspiración potencial para determinar la humedad al final de cada mes, la cual se convierte en la humedad al inicio del siguiente mes.

3. METODOLOGÍA

3.1. Modelo hidrogeológico conceptual

3.1.1. Delimitación del área de análisis

En la Figura 1.1 han sido presentadas las delimitaciones para el área de estudio, las cuales han tenido las siguientes consideraciones:

- En contorno negro identificado como “Cuenca Sucio – Frío” corresponde el área de la cuenca hasta la confluencia con el río Sucio y el río Frío (las Lágrimas o Agua Caliente).
- Para el polígono azul denominado como “Modelo hidrogeológico”, se ha considerado el área anterior y posteriormente se han realizado interpretaciones del mapa geológico 1:100,000 (Bosse, R.H. et al. (1978)) y el mapa de unidades hidrogeológicas 1:100,000 (ANDA (2008)), con lo cual ha sido posible establecer las condiciones de frontera a según los límites asociados a las formaciones Bálsamo, Cuscatlán y San Salvador; así como de los Acuíferos Volcánicos y las Unidades no Acuíferas respectivamente.
- El polígono identificado como “Área de influencia” comprende la cuenca hidrográfica delimitada hasta el polígono identificado como modelo hidrogeológico considerando principalmente los depósitos sedimentarios del cuaternario.
- Es importante destacar que a diferencia de Walter (2006) y Guevara (2011), quienes plantearon un modelo numérico con límites basados en la cuenca, en este trabajo de tesis, el modelo está delimitado por el acuífero mismo, en la zona donde el cuerpo de agua subterránea se extiende y es aprovechado por los usuarios. Por consiguiente, la recarga sí fue cuantificada para toda la zona de influencia (cuenca) y es tomada como un flujo de entrada lateral en el sistema.

3.1.2. Balance de suelos

El balance hídrico de suelos para la determinación de la recarga hídrica potencial se basa en información cartográfica tales como usos de suelo, modelo digital de elevaciones, series de suelo, mapa geológico y datos climáticos (lluvia y evapotranspiración).

Los parámetros del modelo fueron establecidos mediante un modelo analítico para la determinación de la infiltración con base a la lluvia mensual (Schosinsky y Losilla, 2000).

Coefficiente de pendientes

Schosinsky (2006) define este coeficiente como la fracción que infiltra por el efecto de pendiente. Sus valores vienen establecidos de acuerdo con la Tabla 3.1

Tabla 3.1 Coeficiente de pendiente

Por pendiente	Pendiente	Kp
Muy plana	0.02%-0.06%	0.3
Plana	0.3%-0.4%	0.2
Algo plana	1%-2%	0.15
Promedio	2%-7%	0.1
Fuerte	>7%	0.06

Fuente: Schosinsky & Losilla (2000), Gil (2007) y Quiñones (2013)

Coefficiente de vegetación

Schosinsky (2006) define este coeficiente como la fracción que infiltra por efecto de la cobertura vegetal. Para este caso, se consideró el mapa de usos de suelo (MARN, 2017), empleado para la elaboración de las Directrices para la zonificación ambiental de la región Noroccidental. Considerando este insumo se realizaron simplificaciones de uso (Figura 3.1), dado que la metodología planteada por Schosinsky (2000) simplifica los grupos de cobertura vegetal. Otros autores (Alvarado (2007), Anaya et al (2017), Gil (2007), Quiñones (2013), Junker (2005)) han incorporado usos de suelo según la información de los sitios en estudio creada por ellos o disponible al momento de la investigación, según se muestra en la Tabla 3.2. Estos valores fueron retomados en este trabajo.

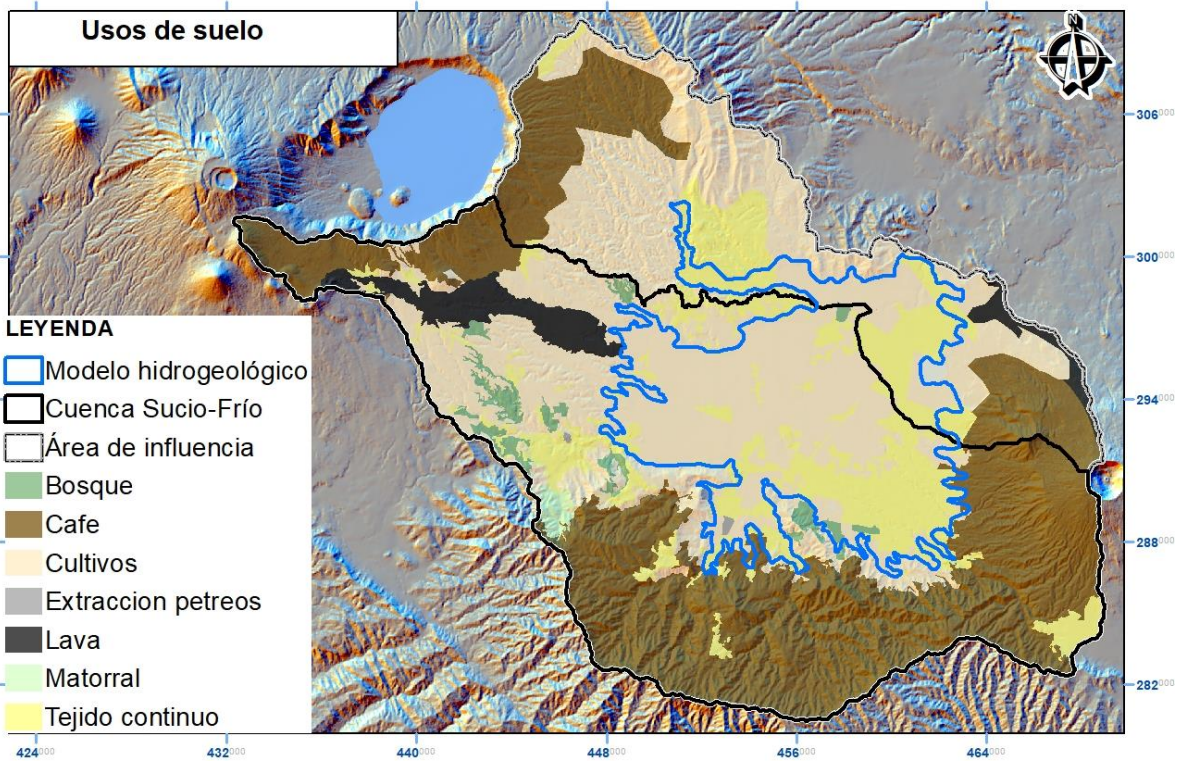


Figura 3.1. Mapa de usos de suelo simplificado a partir de MARN (2017).

Tabla 3.2 Coeficiente de vegetación.

Uso	Kv	Root (m)	Cfo
Bosque	0.2	2.5	0.2
Café	0.19	1.2	0.12
Cultivos	0.1	1	0.12
Extracción de pétreos	0.09	0.5	0.12
Lava	0.3	1	0.2
Matorral	0.1	0.5	0.12
Tejido continuo	0.05	0.25	0.12

Kv: coeficiente de vegetación, Root: profundidad de raíces, Cfo: coeficiente por intercepción. Adaptado de Alvarado (2007), Anaya et al (2017), Gil (2007), Quiñones (2013), Junker (2005)

Coefficiente de textura de suelo

Schosisnsky (2006) define este coeficiente como la fracción que infiltra por efecto de la textura del suelo. Dado que la interpretación depende de la información disponible para la asignación de valores a dicho coeficiente, en El Salvador se ha optado generalmente por tener en consideración el mapa geológico nacional a escala 1:100, 000 elaborado para el Ministerio de Obras Públicas por la Misión Geológica Alemana (1974). Este mapa presenta las diferentes formaciones y miembros en base a su edad y el contenido de silicio (Figura 3.2)

La Formación Bálsamo está constituida por lavas basáltico-andesíticas, tobas de materiales piroclásticos y brechas. Estos materiales afloran al sur del área de estudio, en la Sierra del Bálsamo, con más de 100 m de espesor y en la Caldera Chilamatal, hacia el norte, correspondientes a antiguas calderas del Mioceno y el Plioceno Temprano.

La Formación Cuscatlán está compuesta principalmente de tobas riolíticas y de sedimentos volcanoclásticos, superpuestos por domos riolíticos y lavas basálticas. Estos materiales se encuentran ubicados hacia el sur del área de estudio, en su mayor parte están cubiertos por materiales más jóvenes.

Ferrés (2014) menciona que la Formación San Salvador inicia con series de rocas piroclástica y epiclásticas amarillentas – café, de grano fino, de composición félsica (“tobas color café”), con espesores máximos de 25 m. Las rocas más jóvenes son lavas basáltico – andesíticas y la alternancia de depósitos piroclásticos y epiclásticos de color claro y naturaleza félsica (Tierras Blancas”) con rocas efusivas de basálticas a andesíticas.

Las asignaciones realizadas en dichos estudios son mostradas a manera de resumen en la Tabla 3.3 Valores de K_fTabla 3.3, para efectos del área de análisis las asignaciones utilizadas corresponden a la última columna de dicha tabla.

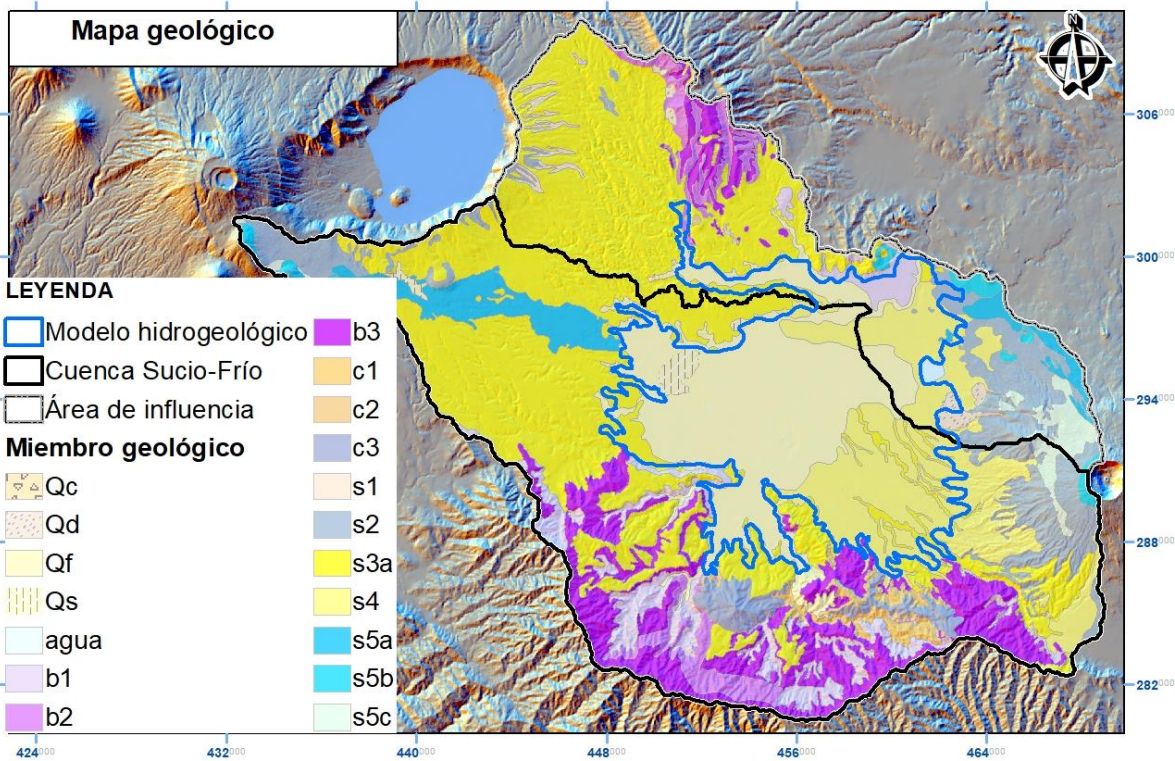


Figura 3.2. Mapa geológico 1:100,000. Miembros de la formación San Salvador: s1, s2, s3, s4, s5a, s5b, s5c, Qc, Qd, Qf; miembros de la formación Cuscatlán: c1, c2, c3; miembros de la formación Balsamo: b1, b2 y b3. Fuente: Bosse, R.H. et al. (1978)

Tabla 3.3 Valores de K_{fc}

Miembro geológico	Duarte SRMSS 2012	Gil 2007	Quiñones 2013	Alvarado 2007	Anaya et al. 2017	Chávez et al 2017	K _{fc} este estudio
b1	0.29	0.29	0.22				0.26
b3	0.29	0.29	0.22	0.88			0.42
c1	0.74	0.78		0.67			0.73
c2	0.29						0.29
c3	0.29	0.71		0.71			0.57
Q'f	0.74		0.59		0.70		0.68
s1	0.74						0.74
s2	1.00	1.00	0.66	0.72	0.70	1.00	0.81
s3a	0.64	0.64	0.46	0.74	0.50	0.86	0.67
s4	0.74	0.83	0.59	0.72			0.72
s5a					0.70	0.88	0.79
s5b					1.00	0.83	0.91
s5c						0.99	0.99
urbanizado					0.20		0.20

Coefficiente de infiltración

El coeficiente de infiltración equivale a la suma de los coeficientes anteriores y de acuerdo con la metodología no debe exceder del valor numérico de 1.

Capacidad de campo y punto de marchitez permanente

Según Schosinsky (2006), posterior a conocer la infiltración es necesario conocer la capacidad de campo y punto de marchitez permanente del suelo; estos valores se obtienen a partir de resultados de laboratorio, no obstante, se han hecho estudios locales empleando información disponible tales como el mapa geológico (Gil (2007) y Anaya et al. (2017)), mapa geológico y de tipo de suelo (Quiñones 2013), tipo de suelo (SNET (2005) y PNOT (2005)).

Para efectos del presente estudio se utilizó el mapa Levantamiento General de Suelos a escala 1:50,000 (MAG,1974), para clasificar la distribución espacial de las características texturales de los suelos de la zona de estudio elaborado (Figura 3.3); mientras que los valores promedios de capacidad de campo y punto de marchitez permanente fueron adoptados para cada clase textural según lo sugerido por Schosinsky (2006)(Tabla 3.4)

Tabla 3.4. Punto de marchitez permanente, capacidad de campo y densidad aparente

Textura del suelo	PMP (%)	CC (%)	Densidad Aparente (g/cm³)
Arenoso	4.00	9.00	1.68
Franco-arenoso	6.00	14.00	1.50
Franco	10.00	22.00	1.43
Franco-arcilloso	13.00	27.00	1.35
Arcillo-arenoso	15.00	29.00	1.30
Arcilloso	17.00	35.00	1.25

PMP: punto de marchitez permanente, CC:capacidad de campo. Fuente: Schosinsky (2006)

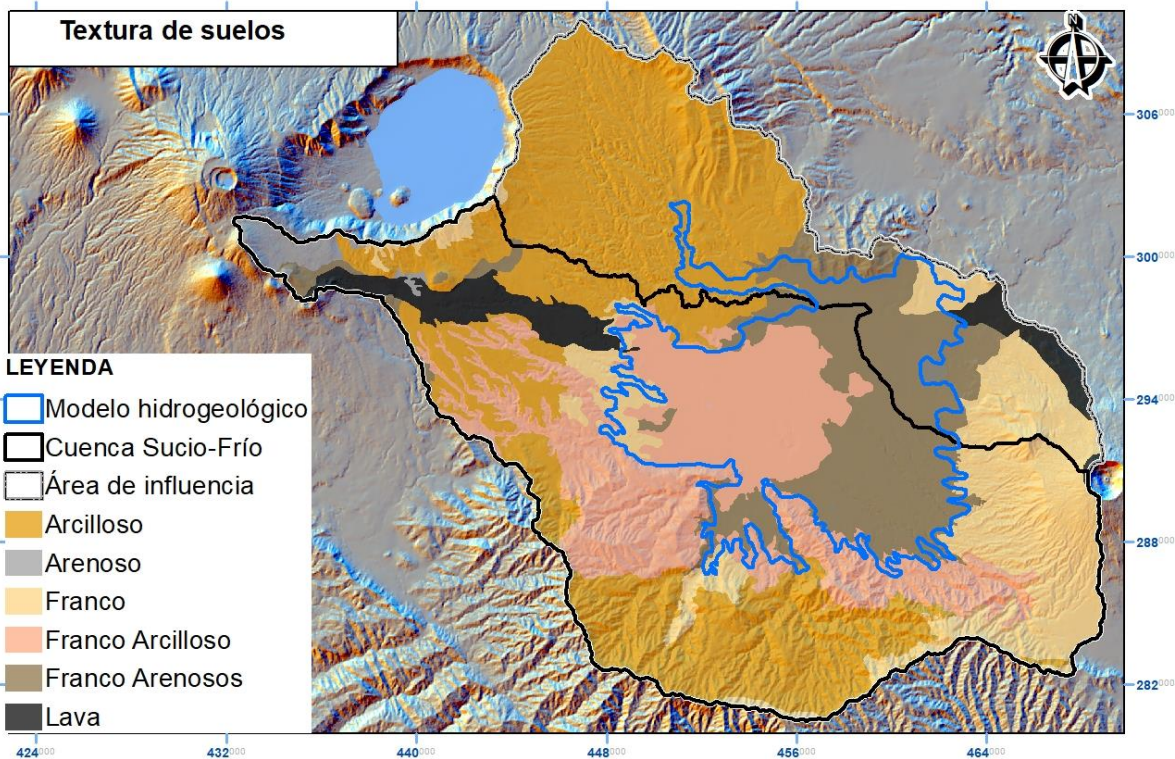


Figura 3.3. Mapa de texturas de suelo. Elaborado a partir de MAG 1974

Intercepción

De acuerdo a la metodología propuesta por Schosinsky (2006), un porcentaje de la lluvia será retenido por el follaje teniendo como umbral 5mm/mes. Si es mayor a este umbral, su valor será proporcional al tipo de vegetación, siendo que a bosques densos se aplique un coeficiente de 0.2 y cualquier otra se aplicará un coeficiente de 0.12.

Variabes climáticas

Las variables climáticas que intervienen en el modelo corresponden a la lluvia y a la evapotranspiración potencial. Estos valores fueron interpolados a partir de los datos provenientes del Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (MARN, 2017), cuyo paso es a nivel mensual comprendiendo una base desde el año 1965 hasta el 2012.

3.1.3. Unidades hidroestratigráficas

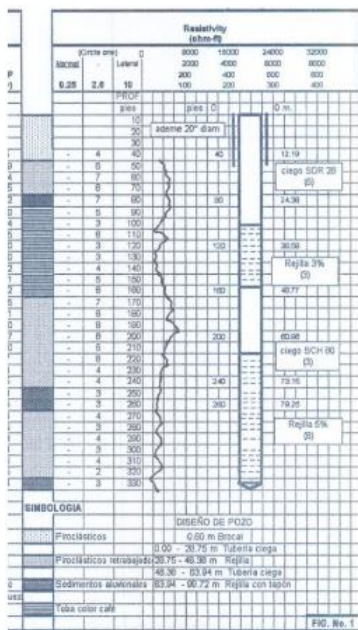
Walter (2006) y Guevara (2011) citando a Geotérmica Italiana (1992) mencionan que existe una fosa tectónica de aproximadamente 1,500 m a 2,000 m de profundidad, sin embargo, el modelo conceptual se fundamenta principalmente en insumos obtenidos de las perforaciones de pozos tales como las diagráfias y la descripción geológica. Modelar la fosa tectónica está fuera de los alcances del estudio.

A manera de ejemplo, se observa en la Figura 3.4 Diagráfia de perforación en pozo a) N° 9 del distrito de riego de Zapotitán, b) La Joya N°1 (Textiles Pettenati), c) Pozo N° 1 de urbanización Campos Verdes en Lourdes. Fuente: MAG (1997) y ANDA Figura 3.4 las diagráfias aproximadamente a escala de los pozos localizados en el área de estudio.

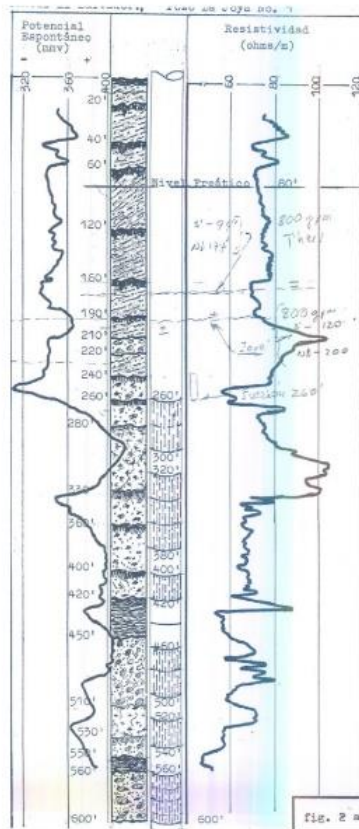
3.2. Modelo Numérico

3.2.1. Discretización del modelo

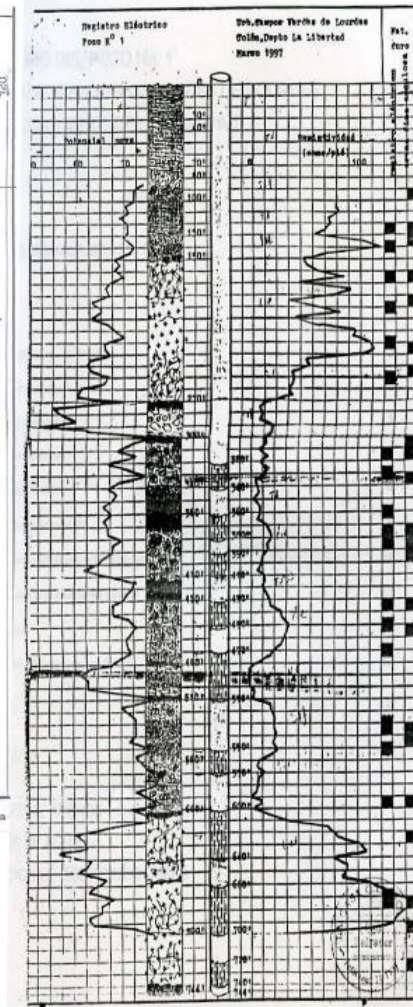
En el modelo empleado se ha considerado un mallado a partir de diferencias finitas de 50m x 50 m en un plano horizontal, generando así 300 filas y 300 columnas, que multiplicadas por 3 unidades hidroestratigráficas dan como resultado 270,000 unidades de análisis. Ver Figura 3.5



a)



b)



c)

Figura 3.4 Diagrama de perforación en pozo a) N° 9 del distrito de riego de Zapotitán, b) La Joya N°1 (Textiles Pettenati), c) Pozo N° 1 de urbanización Campos Verdes en Lourdes. Fuente: MAG (1997) y ANDA (1999)

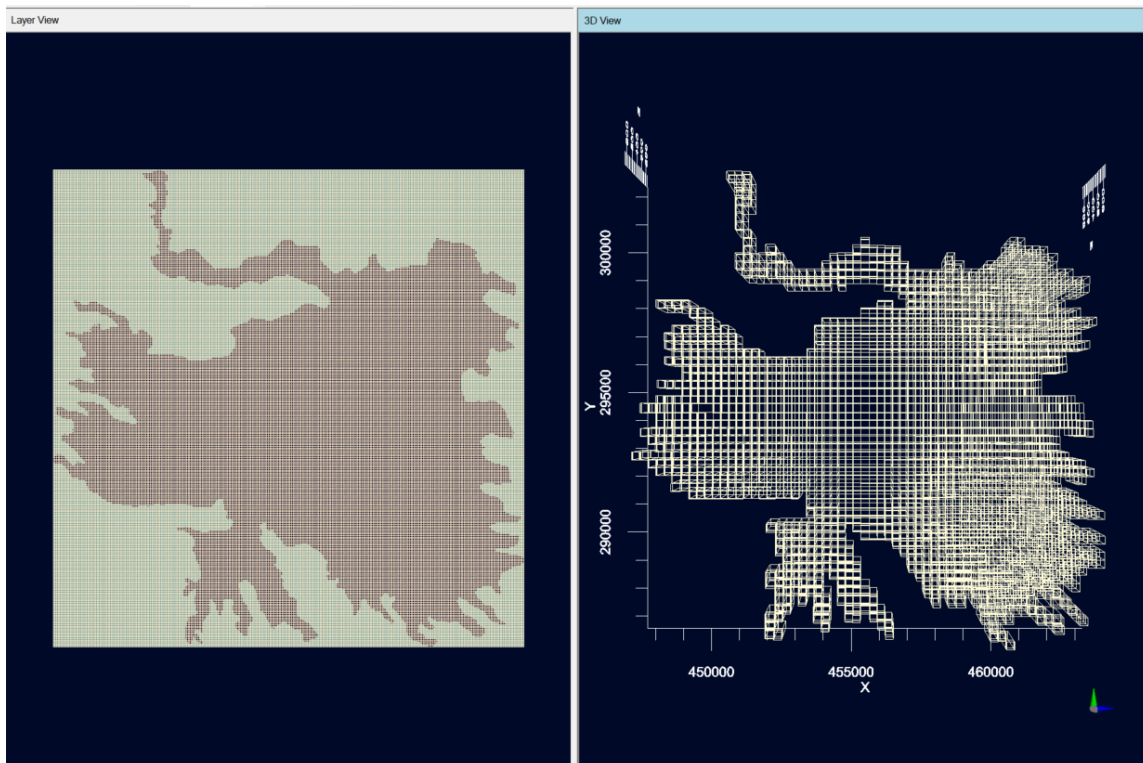


Figura 3.5 Configuración de la malla de diferencias finitas empleadas en el modelo.

3.2.2. Cargas iniciales

A partir de la información obtenida de los niveles de registrados por el sistema SIHI se ha hecho la consideración que el modelo itere a partir de una carga general de 490 m, dado que el valor inicial incide únicamente en la cantidad de iteraciones en el proceso de balance.

3.2.3. Cargas constantes

En el área de influencia del modelo se ubica únicamente un cuerpo de agua correspondiente a la laguna de Chanmico, localizada al noreste de la frontera de análisis. La cota ha sido estimada a partir del modelo digital de elevaciones 1:25,000 correspondiente a 484 msnm, y se adoptó como carga constante en esa parte del modelo (véase Figura 3.6)

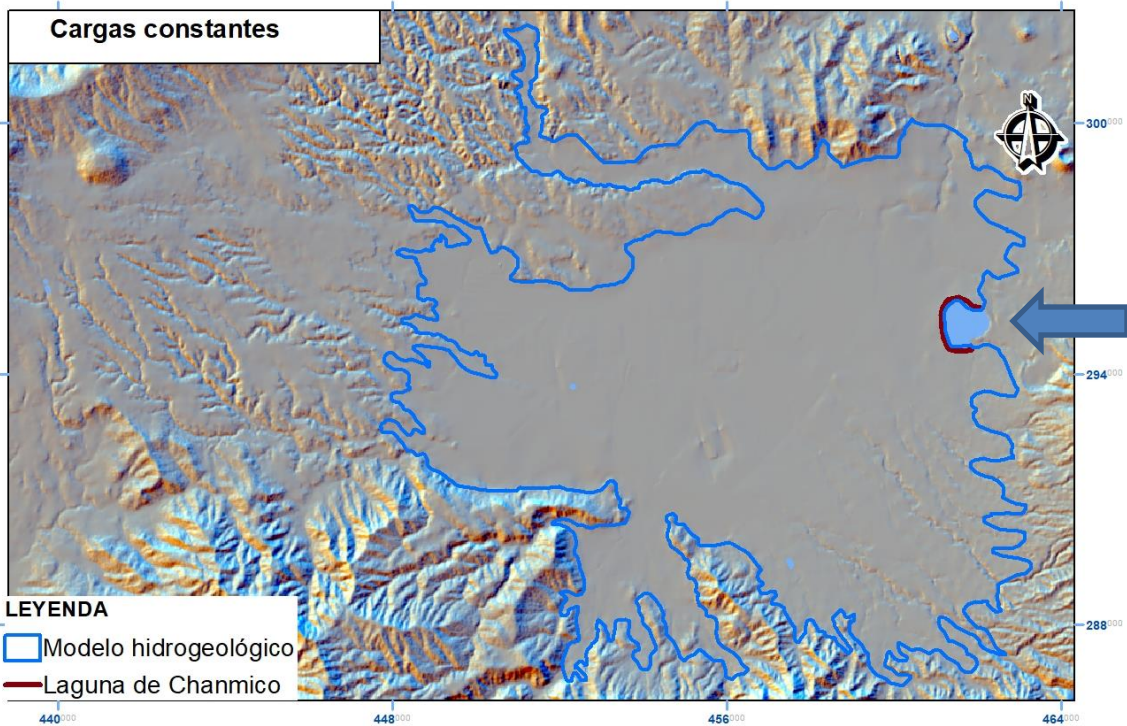


Figura 3.6 Carga constante en la laguna de Chanmico

3.2.4. Flujos inducidos por recarga fuera del modelo

Para considerar los ingresos al modelo inducidos por la recarga hídrica potencial calculada en el apartado 3.1 se ha empleado las variables de flujos específicos del volcán de San Salvador, complejo volcánico de Santa Ana y en menor medida la cordillera del Bálsamo. Para ello se ha realizado una estimación de la recarga distribuida uniformemente sobre ciertas celdas colindantes a dichas zonas.

Para el volcán de Santa Ana se estima una recarga de $15 \text{ m}^2/\text{d}$, volcán de San Salvador $26 \text{ m}^2/\text{d}$ y en la cordillera del Bálsamo $4 \text{ m}^2/\text{d}$. Estos valores se obtienen al considerar un área de influencia localizada hacia aguas arriba de la condición de frontera de 164 km^2 , 56 km^2 y 50 km^2 respectivamente, y posteriormente distribuirla uniformemente a lo largo de una línea en la frontera del modelo. Así pues, los volúmenes anuales son distribuidos en un flujo por unidad de área por día en el estrato inferior. Ver Figura 3.7. Los valores de recarga son

mostrados posteriormente en la Figura 4.7. Es importante mencionar que las ubicaciones de estos flujos han sido localizadas estratégicamente para lograr una calibración en correspondencia con los niveles de observación en modelo numérico, teniendo en consideración las características de la fisiografía como por ejemplo: la ubicación de las lavas de San Marcelino, los límites impermeables de la Caldera Chilamatal y la Cordillera del Bálsamo. Durante la calibración se observó que de incorporarse flujos distribuidos en toda la longitud superarían los niveles en los pozos de observación, situación que no es físicamente posible. Es importante mencionar que el cálculo de recarga se ha realizado teniendo como unidad de análisis los miembros geológicos, por lo que en el Anexo B se presenta los cálculos de llenado datos para la obtención de la recarga hídrica potencial.

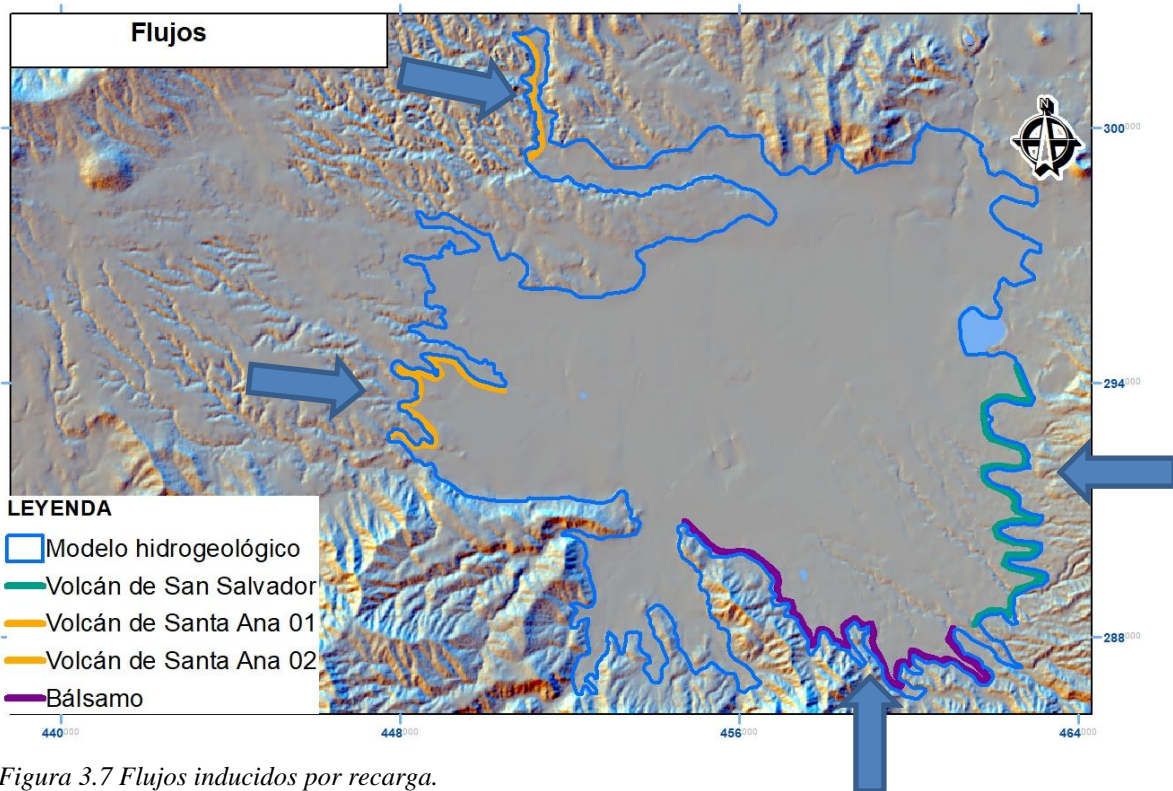


Figura 3.7 Flujos inducidos por recarga.

3.2.5. Parámetros hidráulicos

Los parámetros hidráulicos necesarios para el modelo en régimen permanente corresponden únicamente a las conductividades hidráulicas en las direcciones x, y, z. Walter (2006) y Guevara (2011) consideran que en el estrato del acuífero libre la conductividad corresponde a 4.65×10^{-5} m/s, dicho valor ha sido utilizado también para el presente análisis; el segundo estrato ha sido modelado como una capa confinante con valores de 2.31×10^{-6} m/s y el tercer estrato con valores de 2×10^{-4} m/s, muy similar a lo utilizado por Walter (2006) correspondiente a 1.7×10^{-4} m/s. El valor de conductividad para el estrato 1 no fue modificado en el proceso iterativo; no obstante, las conductividades para los estratos 2 y 3 fueron ajustados desde valores de 1.90×10^{-6} m/s hasta 2.31×10^{-6} m/s y de 1.7×10^{-4} m/s a 2×10^{-4} m/s respectivamente.

3.2.6. Pozos de observación

Para el establecimiento de las condiciones de frontera tanto del lado oeste como este (complejos volcánicos de Santa Ana y San Salvador), ha sido necesario la recolección de información de pozos obtenidos de la plataforma SIHI (MARN, 2021). En la Figura 3.8 se observa la distribución espacial de la red de monitoreo de aguas subterráneas tanto convencional como automáticas. Por lo general, los registros de la red de monitoreo convencional se toman una o dos veces por año. En la Figura 3.9 pueden observarse los niveles piezométricos de pozos excavados del lado oeste, este y norte del modelo.

Debido a que la precisión del modelo digital de elevaciones (DEM) tiene una resolución espacial de 10 m, fue necesario realizar una corrección a las alturas observadas, de tal manera que de acuerdo a la ubicación y elevación del pozo a partir del DEM se restó la diferencia de niveles medidos en SIHI. De la Figura 3.10 a la Figura 3.13 se presenta la variación de niveles piezométricos sin dicho ajuste.

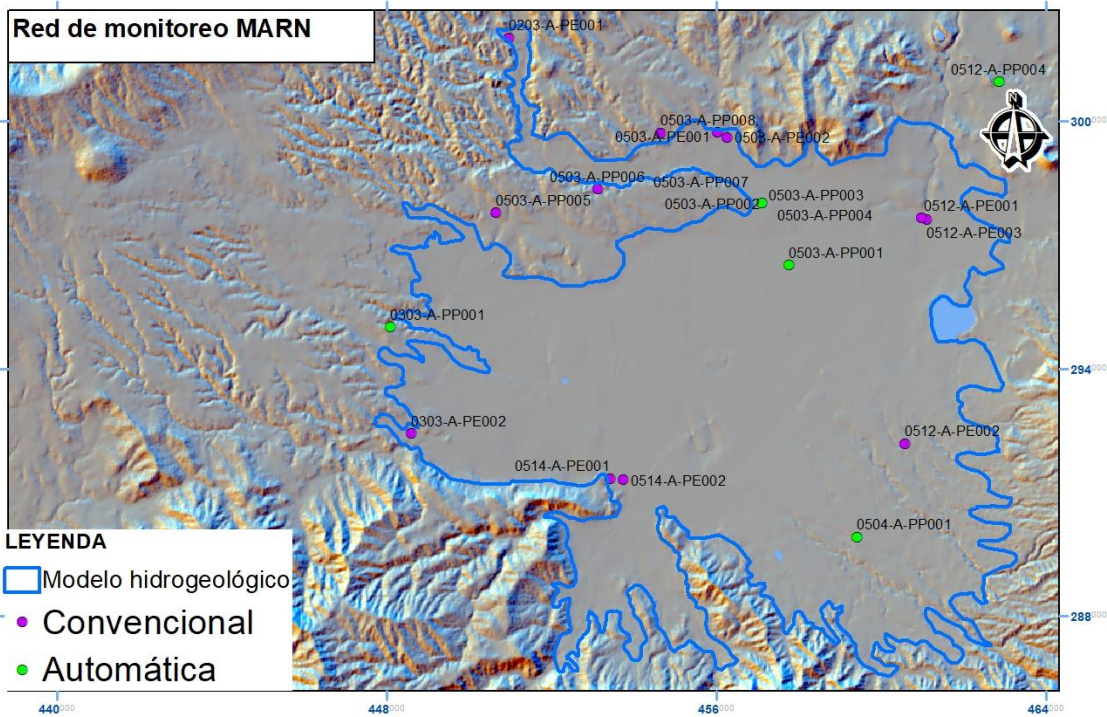


Figura 3.8 Red de monitoreo de aguas subterráneas

La red de monitoreo automática presenta registros desde el año 2015, en algunos casos se pueden observar patrones de recarga y descarga como en la Figura 3.11; por otra parte, en la Figura 3.10 y Figura 3.13 se puede apreciar una leve tendencia al descenso, mientras que en la Figura 3.12 el período de registro es demasiado corto para establecer una tendencia en este momento.

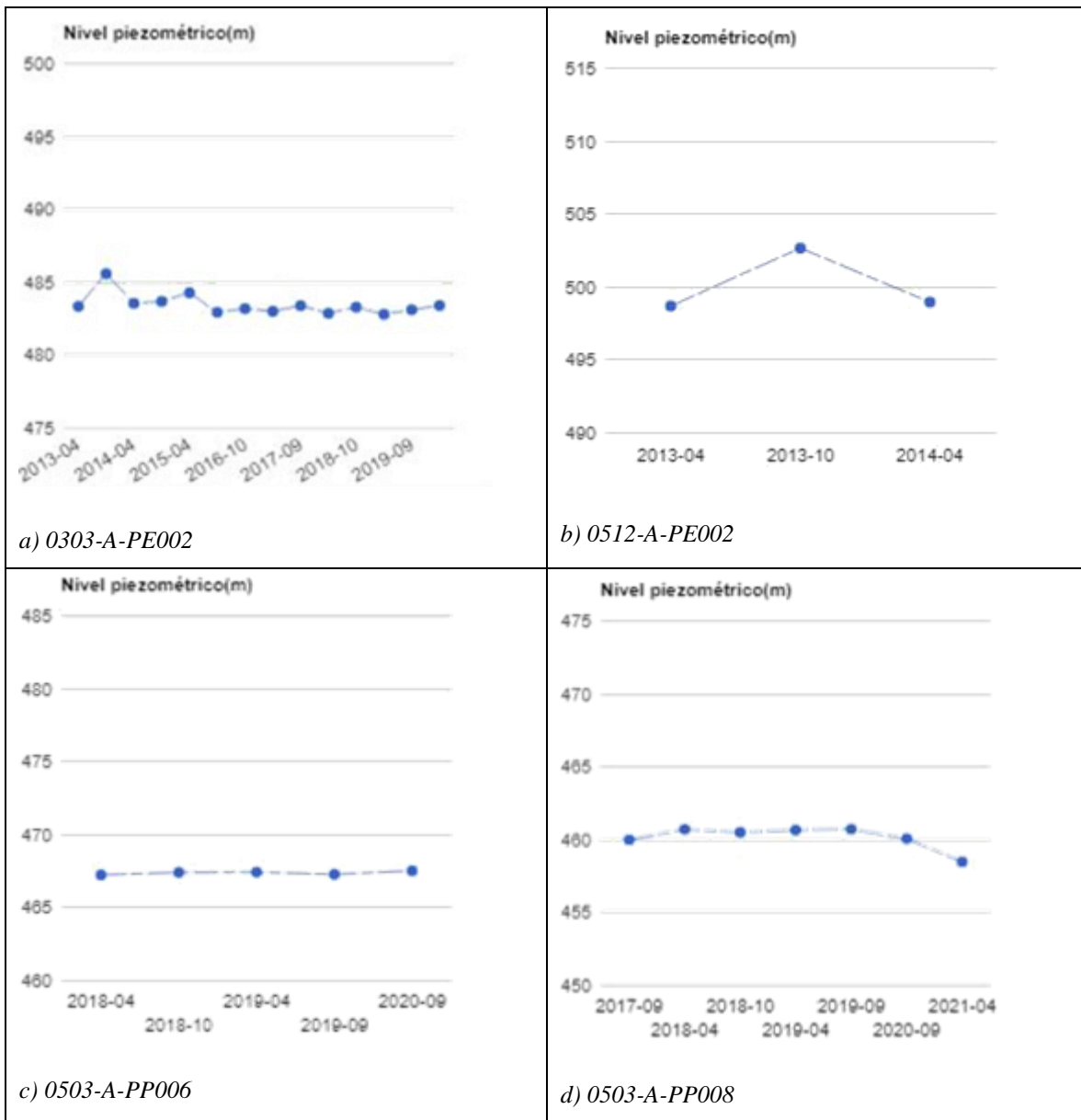


Figura 3.9 Registros de la red convencional. Fuente: SIHI, MARN (2021)

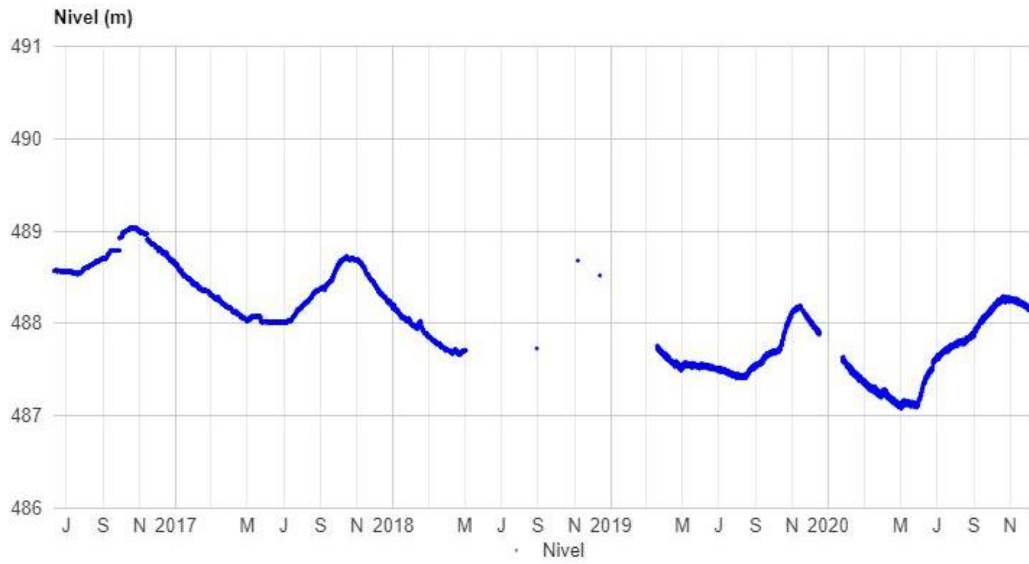


Figura 3.10 Nivel de pozo 0303-A-PP001. Fuente: MARN (2021)

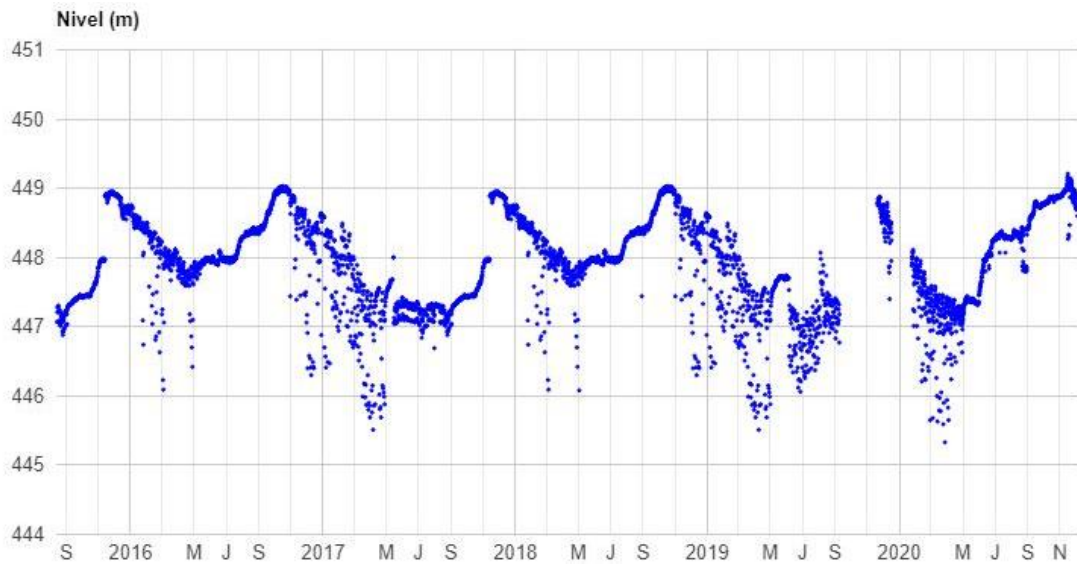


Figura 3.11 Nivel de pozo 0503-A-PP002. Fuente: MARN (2021)

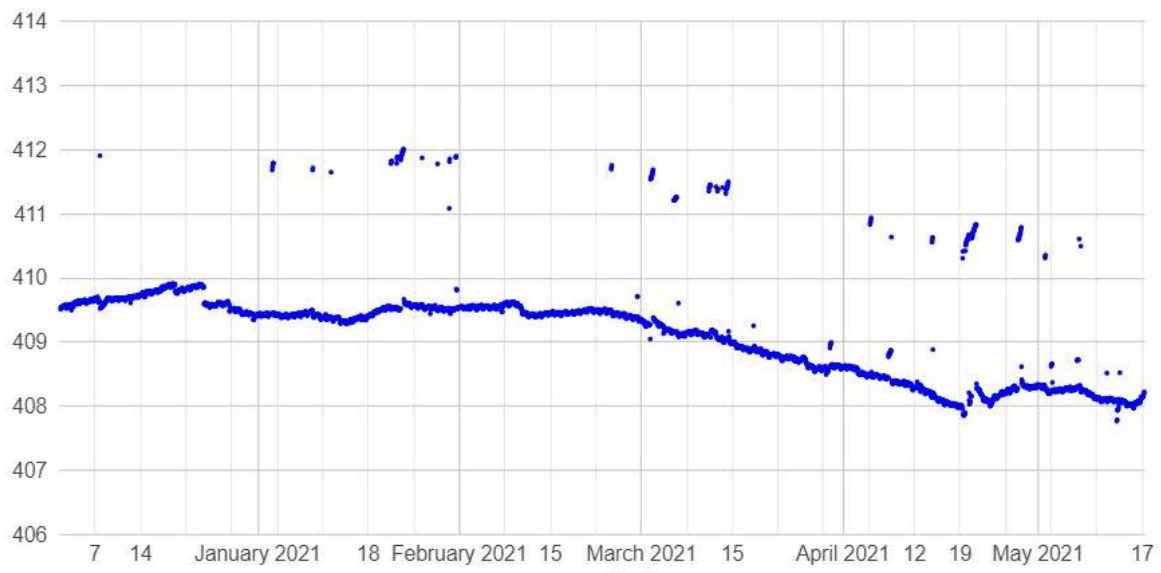


Figura 3.12 Nivel de pozo 05012-A-PP004. Fuente: MARN (2021)

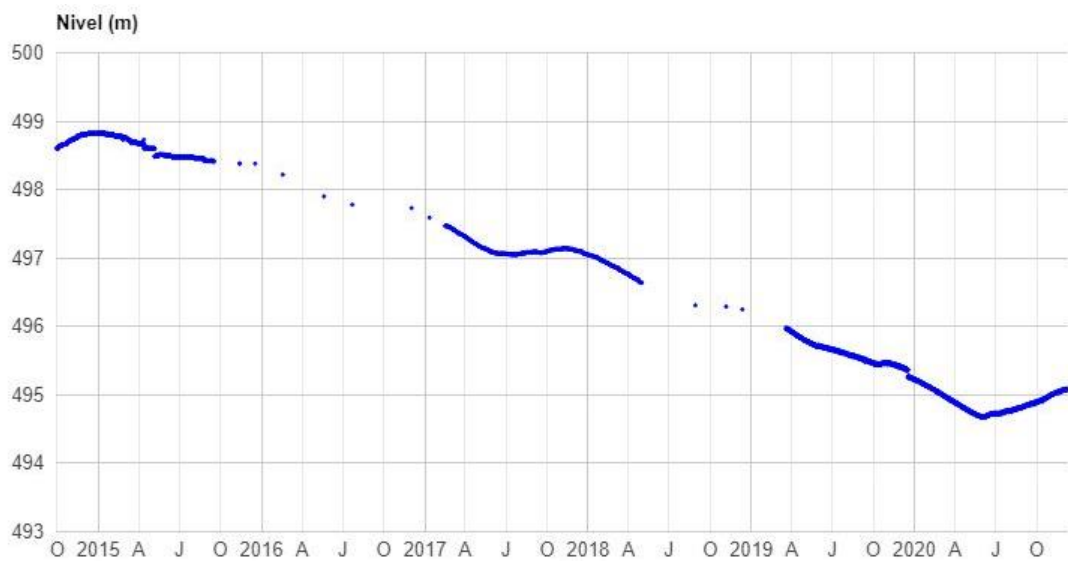


Figura 3. 13 Nivel piezométrico pozo 0504-A-PP001. Fuente: SIHI, MARN (2021)

3.2.7. Demandas hídricas

La determinación de las demandas de agua subterránea requirió una revisión de bases de datos históricas obtenidas principalmente de instituciones gubernamentales entre ellas Ministerio del Medio Ambiente y Recursos Naturales (MARN), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG) y Administración Nacional de Acueductos y Alcantarillados (ANDA). Las principales fuentes de información de la base MARN han sido el Plan Nacional de Gestión Integrada del Recurso Hídrico (PNGIRH) y el Sistema de Información Hídrica; en el caso de ANDA, la información ha sido obtenida del Plan Nacional de Agua Potable y Saneamiento. Otra documentación relevante ha sido la base presentada por Guevara (2011).

Según se menciona en el apartado 1.8, en El Salvador, así como en diversos países, uno de los principales problemas en la cuantificación de las extracciones es el acceso a bases de datos completas que integren todas las extracciones, no obstante, en este estudio se ha realizado el esfuerzo de cuantificar y actualizar las bases de datos de distintas fuentes con el fin de reflejar una condición más real en las salidas del sistema acuífero. Adicionalmente es importante destacar que el modelo ha sido construido para evaluar las condiciones actuales, proporcionando a los tomadores de decisión un instrumento que puede ajustarse y retomarse para evaluaciones de escenarios futuros, tal evaluación está fuera del alcance de este estudio.

4. RESULTADOS

4.1. Modelo hidrogeológico conceptual

4.1.1. Balance de suelos

Para la elaboración del mapa de pendientes se tuvo en consideración el modelo digital de elevaciones (MDE), elaborado a partir de la cartografía disponible en el país 1:25,000 (IGN, 1984), utilizando la herramienta Slope de ArcGIS 10.3. El procesamiento de los datos indica que en la zona del valle predominan pendientes del rango de 0 al 11% y a partir de la zona submontana las pendientes son mayores al 30%, este puede observarse en la Figura 4.1

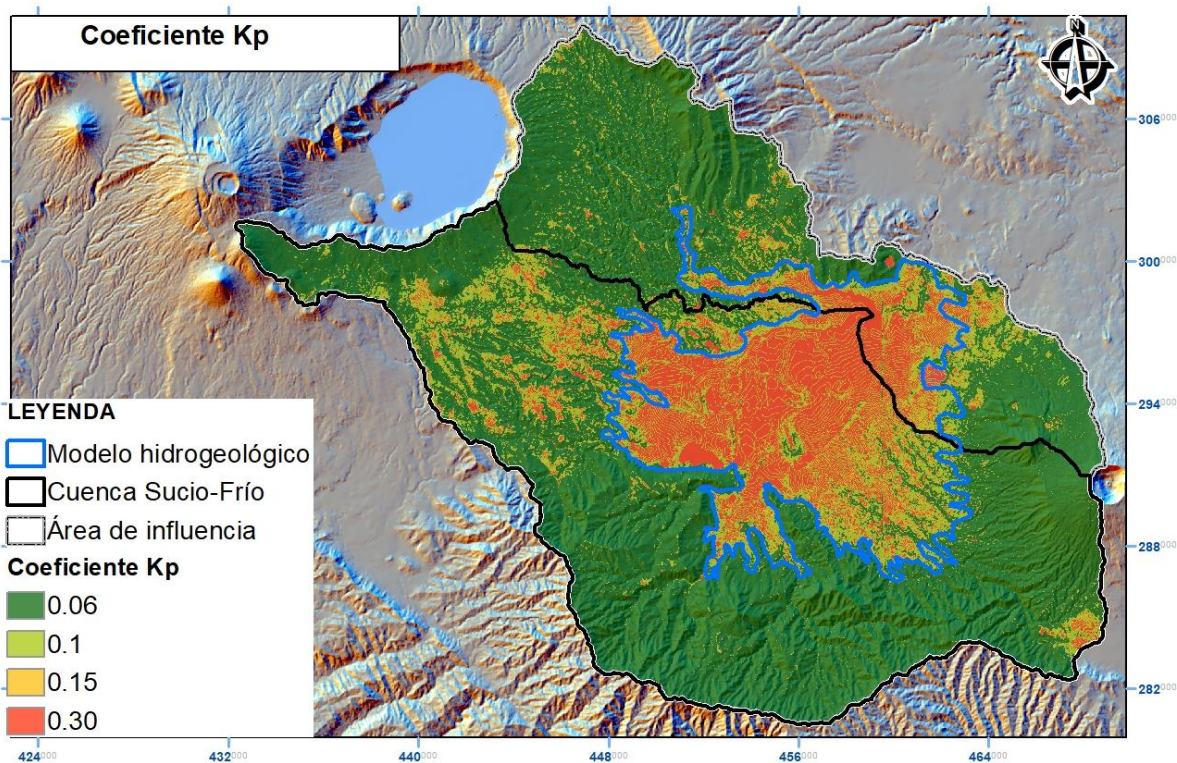


Figura 4.1 Coeficiente de pendiente Kp para el cálculo del balance hídrico de suelos (Schosinsky y Losilla, 2006.) Elaborado a partir de información de e IGN (1984)

El resultado de la asignación de los valores al mapa de vegetación es presentado en la Figura 4.2, en la cual se presenta una ponderación mayor del coeficiente kv hacia la cobertura de lavas, bosques y cafetales. En la zona de estudio los valores predominantes son de 0.05 a 0.1

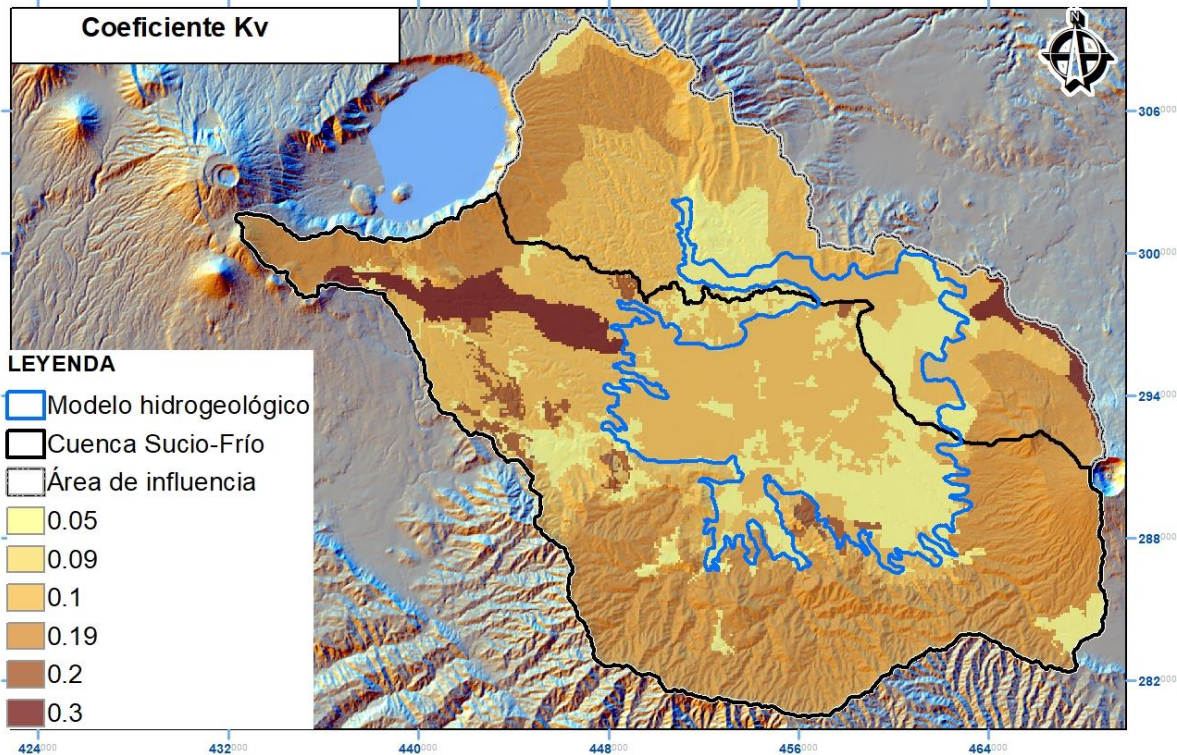


Figura 4.2 Coeficiente de vegetación kv para el cálculo del balance hídrico de suelos (Schosinsky y Losilla, 2006.) Elaborado a partir de MARN (2017)

El resultado de las asignaciones para el coeficiente de textura de suelos es mostrado en la Figura 4.3. En la zona de estudio se observan que hacia el interior del valle predominan los valores de 0.68. En la zona de lavas en el volcán de Santa Ana se presentan valores mayores a 0.81, así como en la parte más alta del volcán de San Salvador. También se puede observar que en las zonas más antiguas correspondientes a la cordillera del Bálsamo se observan valores menores a 0.42

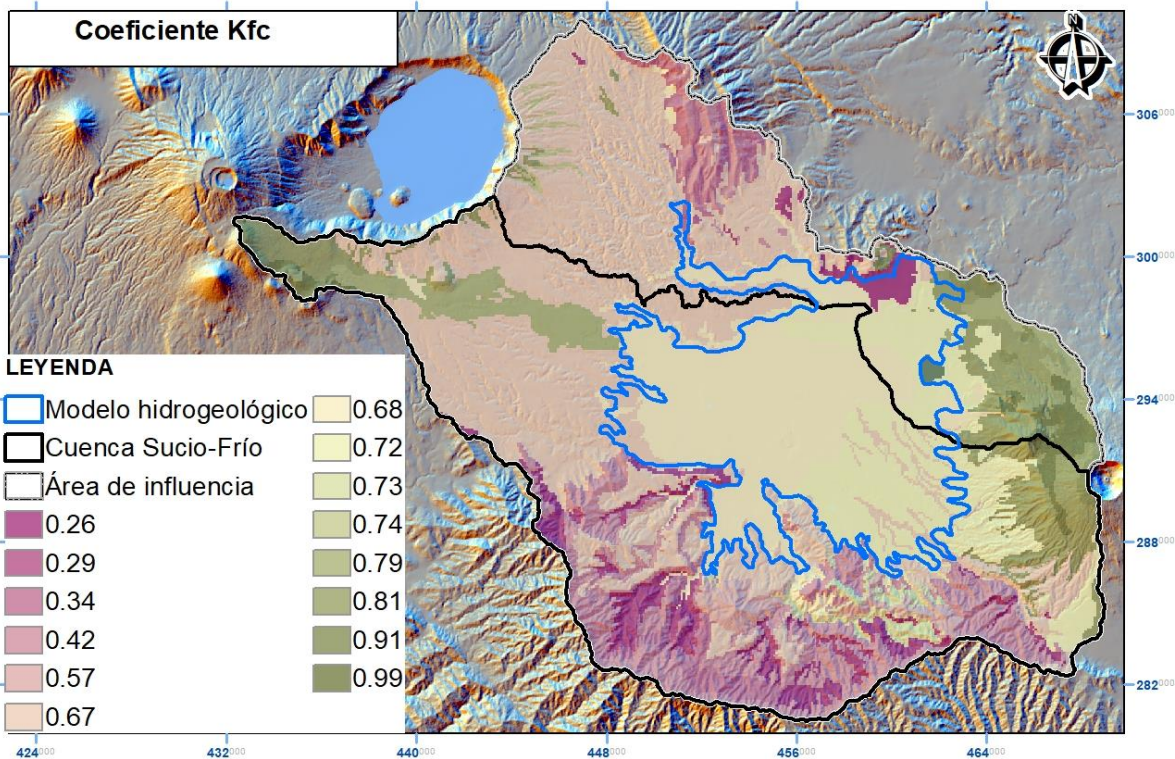


Figura 4.3 Mapa de coeficiente K_{fc} para el cálculo del balance hídrico de suelos (Schosinsky y Losilla, 2006.). Elaborado a partir de MOP (1974), Alvarado (2007), Gil (2007), Duarte (2012), Quiñones (2013), Anaya et al (2017) y Chávez et al (2017)

El coeficiente de infiltración corresponde a la suma de los coeficientes de pendiente, vegetación y de textura, cuyo valor numérico debe ser menor o igual que 1. Para el presente análisis, el resultado es mostrado en la Figura 4.4, en la cual se identifica que las áreas con mayor infiltración vendrán dadas en aquellas zonas cuyas geologías son más recientes, principalmente en la Fm. San Salvador, laderas del volcán de San Salvador y Caldera de Coatepeque, teniendo especial predominancia las lavas de dichos volcanes, es decir, las conocidas como El Playón y San Marcelino (Teixcal).

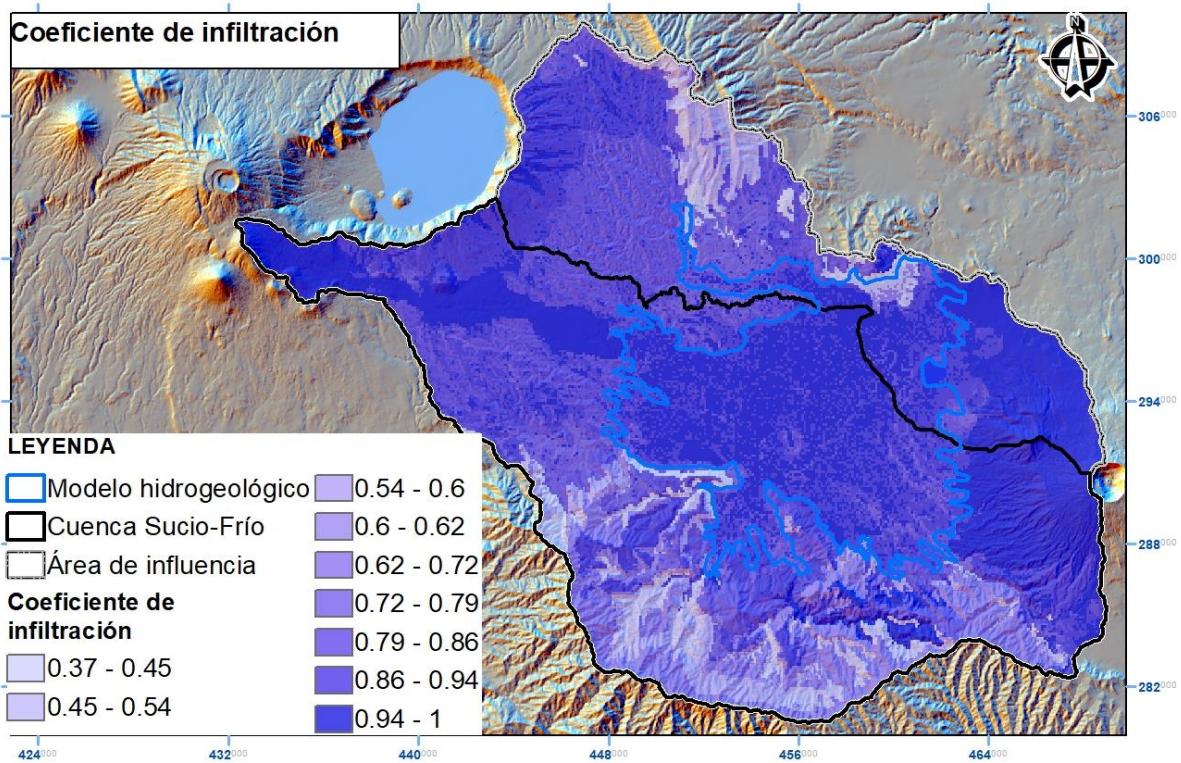


Figura 4.4 Coeficiente de infiltración

Para efectos del modelo de balance de suelos de la zona de estudio se obtuvo los valores medios mensuales de las series de lluvia y evapotranspiración potencial antes mencionada, los resultados del modelo son presentados a nivel anual en la Figura 4.5 y Figura 4.6

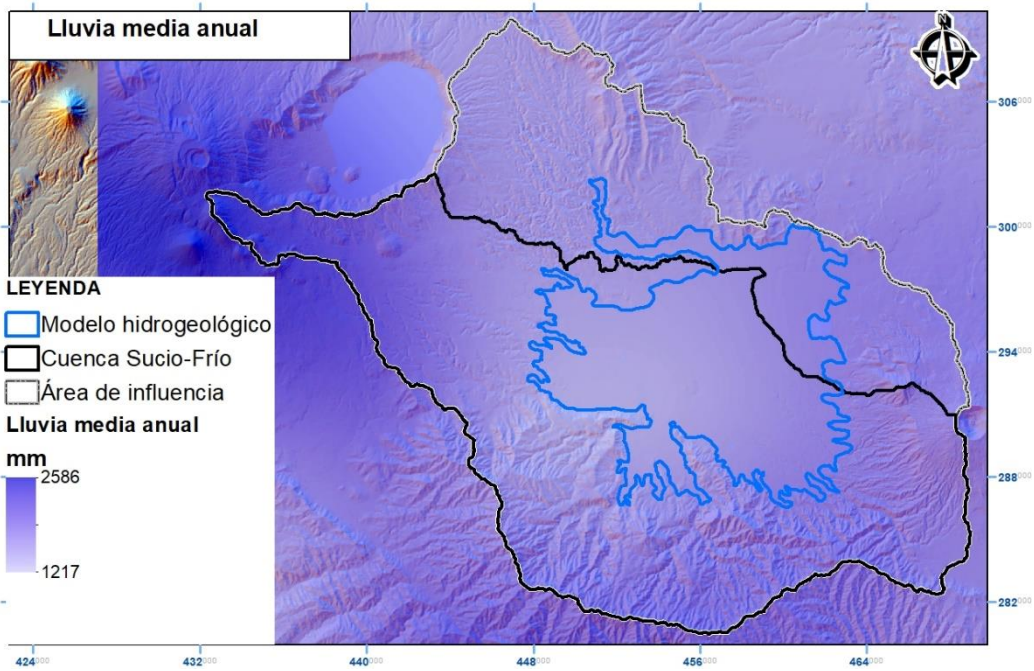


Figura 4.5 Lluvia media anual. Fuente MARN (2017)

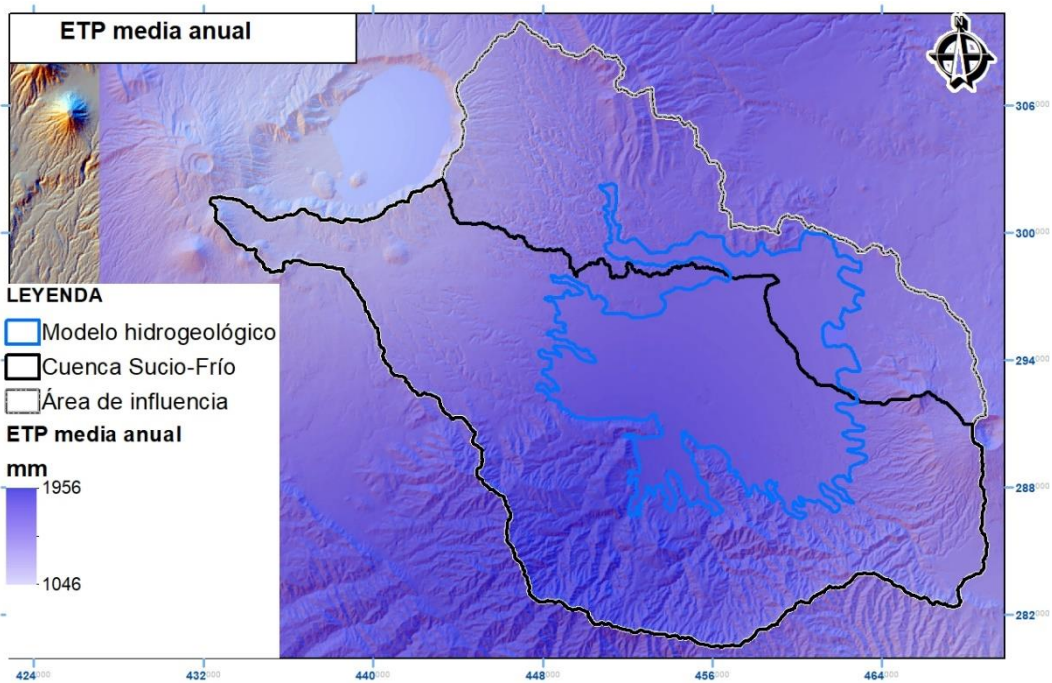


Figura 4.6 Evapotranspiración potencial. Elaborado a partir de datos de MARN (2017).

4.1.2. Recarga hídrica

La recarga hídrica anual en la zona de estudio calculada mediante la Ecuación 2.4 muestra que las zonas con mejores recargas corresponden a las zonas de lavas ubicadas tanto en el volcán de San Salvador (Playón) y Caldera de Coatepeque (San Marcelino) en el orden de magnitud mayores a 800 mm/año. Por otra parte, las Fm de San Salvador S4, S3a presentan recargas entre 400 a 800 mm/año, situación que es favorecida por el tipo de cobertura vegetal; hacia el interior del valle de Zapotitán, las recargas se ubican en el orden de magnitud de 200 a 400 mm/año, esta situación es favorecida por el tipo de geología (depósitos sedimentarios del cuaternario) y la escasa pendiente. Las menores recargas se ubican las geologías más antiguas correspondientes a Fm. Bálsamo, pese a que las características climáticas y de vegetación las favorecen, no es el caso de las características texturales, por ello las recargas se ubican en el orden de 0 a 200 mm/año (Figura 4.7). En la Tabla 4.1 se presenta un cuadro comparativo de los resultados obtenidos en los estudios previos, así como en la evaluación actual, debiéndose observar que se presenta mayor similitud con los resultados obtenidos por Walter (2006). En el Anexo B se presenta un ejemplo de cálculo de llenado datos para la obtención de la recarga hídrica potencial. Una explicación detallada del método de balance hídrico de suelos utilizado para el cálculo de la recarga puede consultarse en Schosinsky (2006).

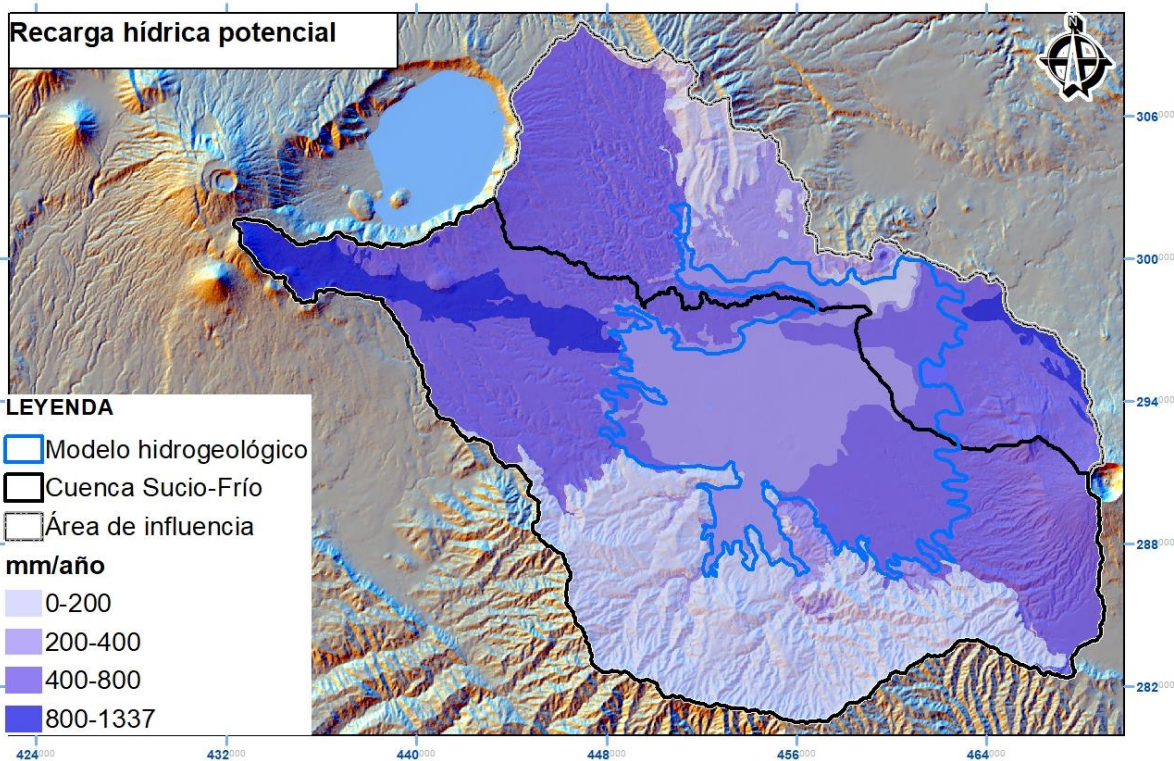


Figura 4.7 Recarga hídrica potencial en el territorio de análisis.

Tabla 4.1 Comparativo de resultados de recarga hídrica potencial

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)	Este estudio
Unidades de análisis para la estimación de la recarga.	Estimada según tipo de cultivo (uso de suelo) en distrito de riego. 10 Zonas en m/día	Miembro geológico. Rangos 21.4-852 mm/año (máximos en lavas Playon y Teixcal)	Miembro geológico. Rangos de recarga 0-1337mm/año (Máximos lavas Playón y Teixcal)
Recarga media en zona de Valle de Zapotitán	391 mm/año	125 mm/año	359 mm/año

4.1.3. Unidades hidroestratigráficas

Luego de la revisión exhaustiva de los registros disponibles se ha planteado como modelo conceptual 3 unidades hidroestratigráficas de la siguiente forma: un acuífero libre, un acuitardo (como estrato confinante) y un acuífero confinado. El estrato confinante se asume que es el que provee en ciertos puntos la condicionante artesiana surgente identificada en algunas perforaciones de pozos, dentro de las cuales esta no excede de 1 m. Este estrato confinante también ha sido asumido a partir de las diagráfias y las descripciones geológicas, como por ejemplo se puede observar en la Figura 4.8 que entre una profundidad de 15 m y 23 m existe una capa conductiva, la cual es interpretada como la capa confinante.

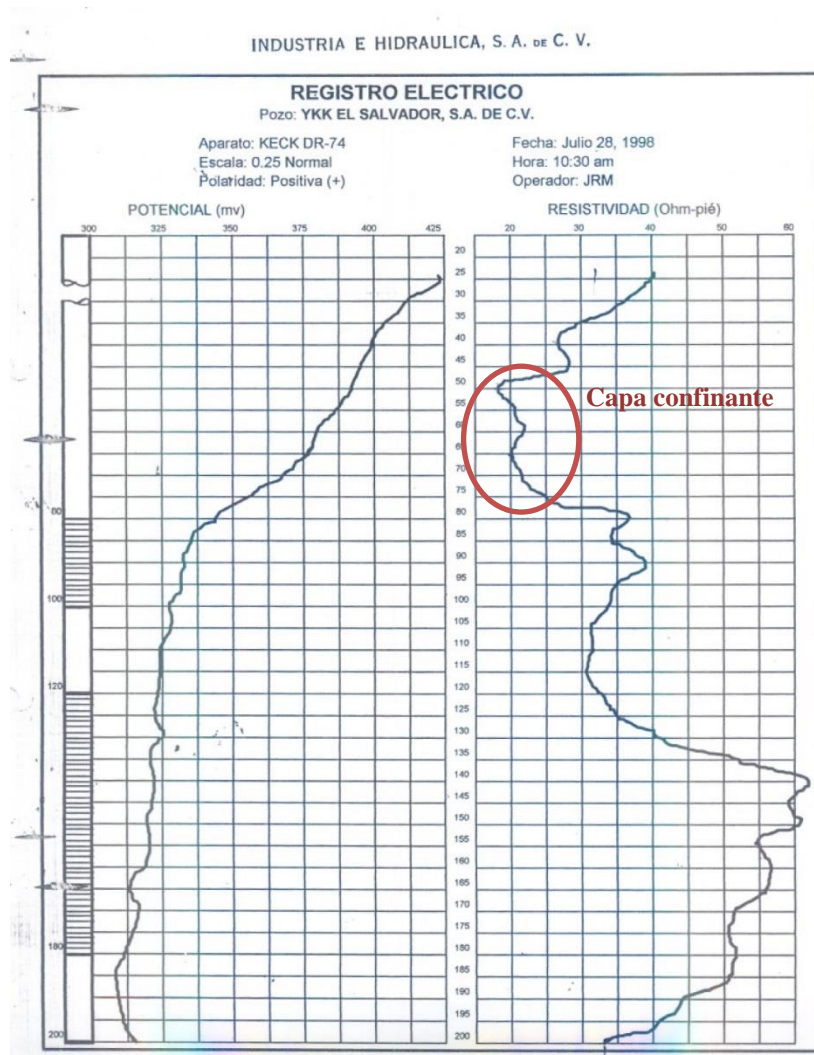


Figura 4.8 Diagráfia de pozo perforado en la zona de estudio. Fuente: ANDA.

En la Figura 4.9 se presenta una vista hacia el sur del modelo, identificándose las 3 unidades hidroestratigráficas: en color gris se observa el acuífero libre, en color naranja el acuitardo y en color cyan el acuífero confinado.

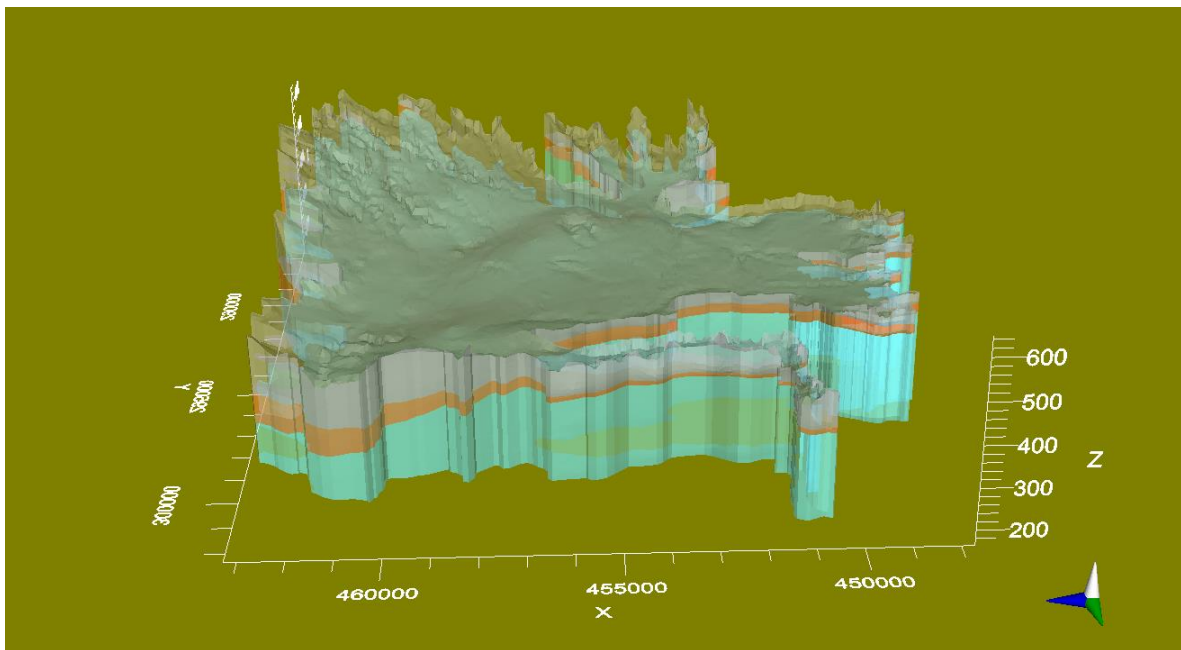


Figura 4.9 Distribución de la unidades hidroestratigraficas. Vista hacia el sur.

En la Figura 4.10 se observa que el estrato confinante es más estrecho a medida se avanza hacia el oeste en el valle de Zapotitán, situación que también es propuesta por Walter (2006) en su análisis elaborado para la zona de dicho distrito de riego.

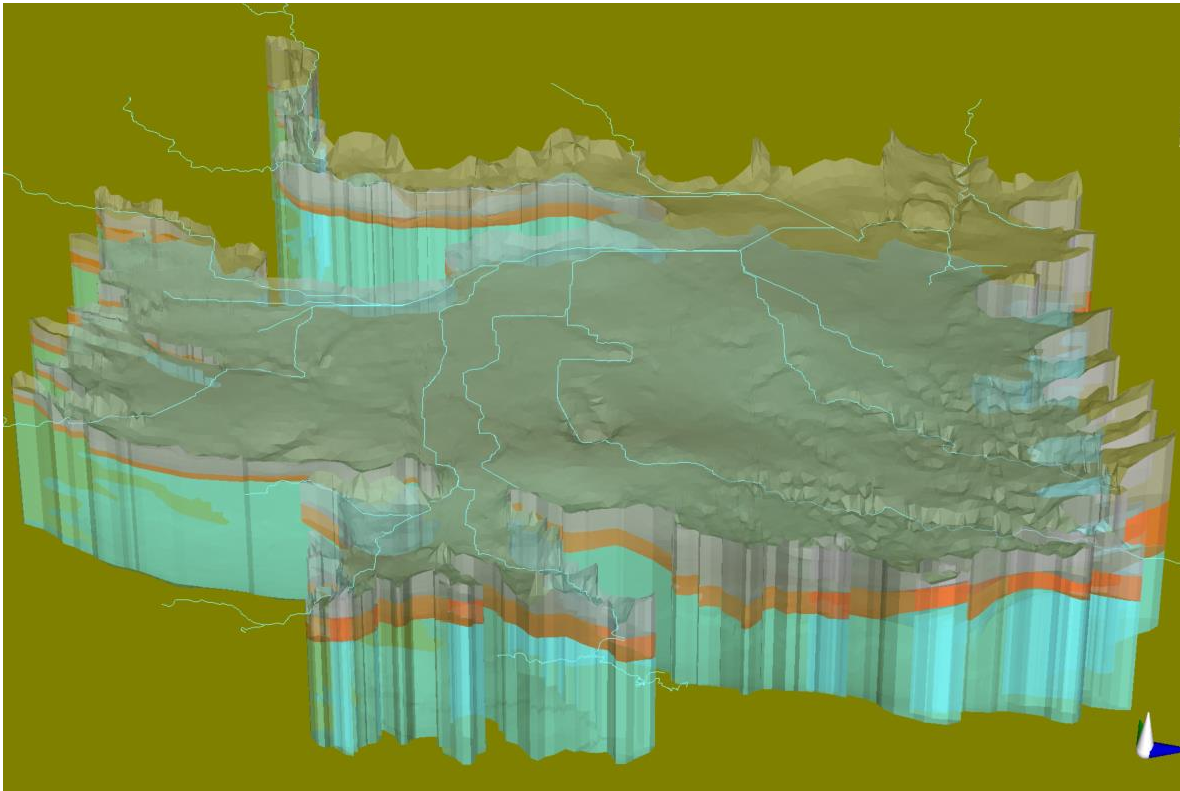


Figura 4.10 Modelo hidrogeológico conceptual. Vista desde el norte.

4.1.4. Recarga aplicada al modelo numérico de flujo

La recarga aplicable hacia el interior de la frontera del modelo fue obtenida a partir de la determinada en el apartado 4.1.1 correspondiente al miembro geológico Q'f. Asumiendo que en el modelo la recarga, en promedio, se distribuye uniformemente a lo largo del tiempo y siendo que para el presente estudio se ha corrido bajo un régimen estacionario, considerando que el sistema se encuentra en un régimen *cuasi-estacionario*¹ en el mes de junio de 2019, véanse Figura 3.10 a Figura 3.13; se ha observado en el proceso de calibración que este valor incide en la fluctuación del acuífero superficial; siendo que las profundidades del nivel

¹ Cuando los cambios de las cargas en el tiempo son pequeñas. Idealmente cuando los datos de observación reflejan un período cuando los niveles de agua y flujos permanecen constantes. Anderson et al. (2015), pp. 306-307

potenciométrico han sido tomados al inicio de la época lluviosa, se ha considerado unos valores de recarga intermedia de 45 mm/a correspondientes a los meses de junio y julio, véase también el Anexo B.

4.1.5. Pozos de bombeo

En la Tabla 4.2 se muestran las demandas estimadas a partir de las diversas fuentes de información, destacándose que aproximadamente la mitad de dichas demandas corresponde a un uso poblacional; no obstante, se hace la aclaración que los datos podrían incrementarse de tener todas las demandas inventariadas, pues esta base comprende sobre la información disponible al momento de su elaboración.

En la Figura 4.11 se muestra la distribución espacial de dichas demandas, destacándose su orientación a lo largo de los ejes o carreteras principales que conducen hacia Santa Ana y Sonsonate.

Tabla 4.2 Demandas hídricas por tipo de rubro.

Tipo de demanda	Caudal m³/d estimado	%
Agrícola	68,793	29.17
Industrial	61,789	26.20
Poblacional	104,705	44.40
Turismo	544	0.23
Total	235,831	100.00

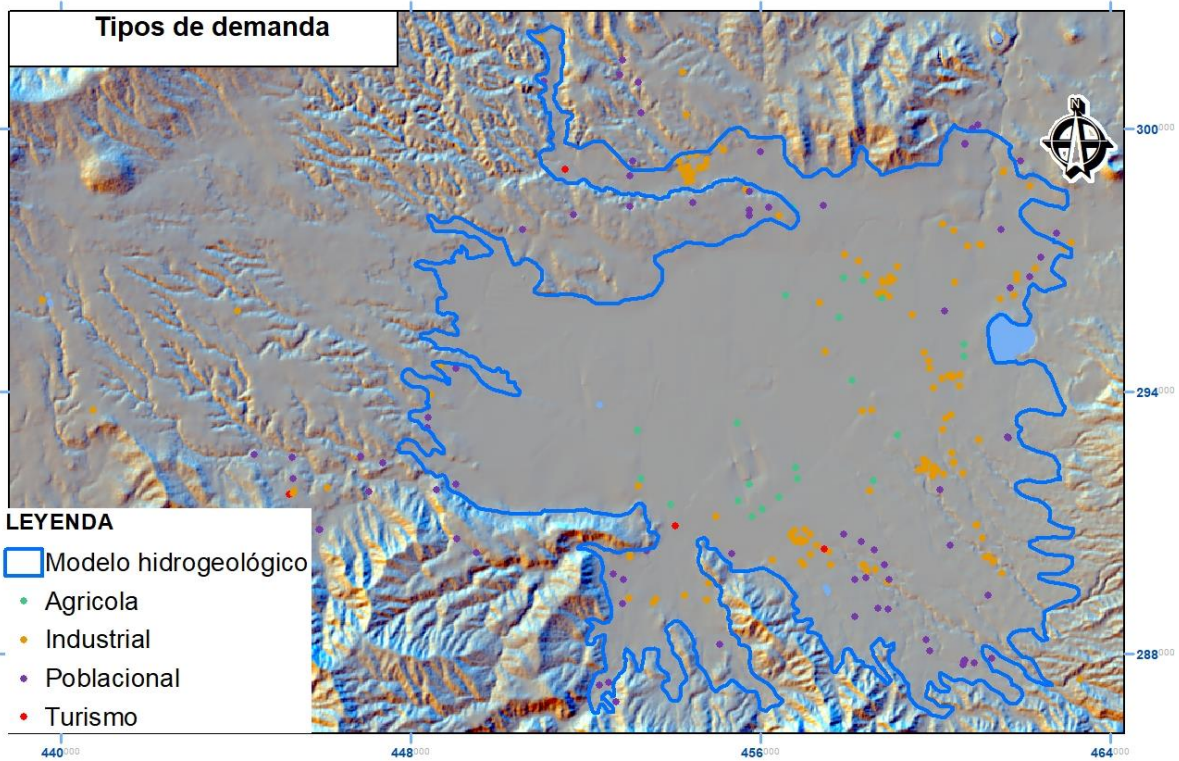


Figura 4.11 Tipos de demanda hídrica subterránea

Dada la complejidad del ingreso de aproximadamente 400 pozos al modelo y que no todos cuentan con la información sobre el diseño de pozo, se ha optado por agrupar los pozos tanto por su tipología y/o por su cercanía. Como resultado se han integrado 43 grupos los cuales son mostrados en la Figura 4.12. En el Anexo C puede encontrarse el diseño de los pozos utilizados en el presente estudio, así como las demandas empleadas.

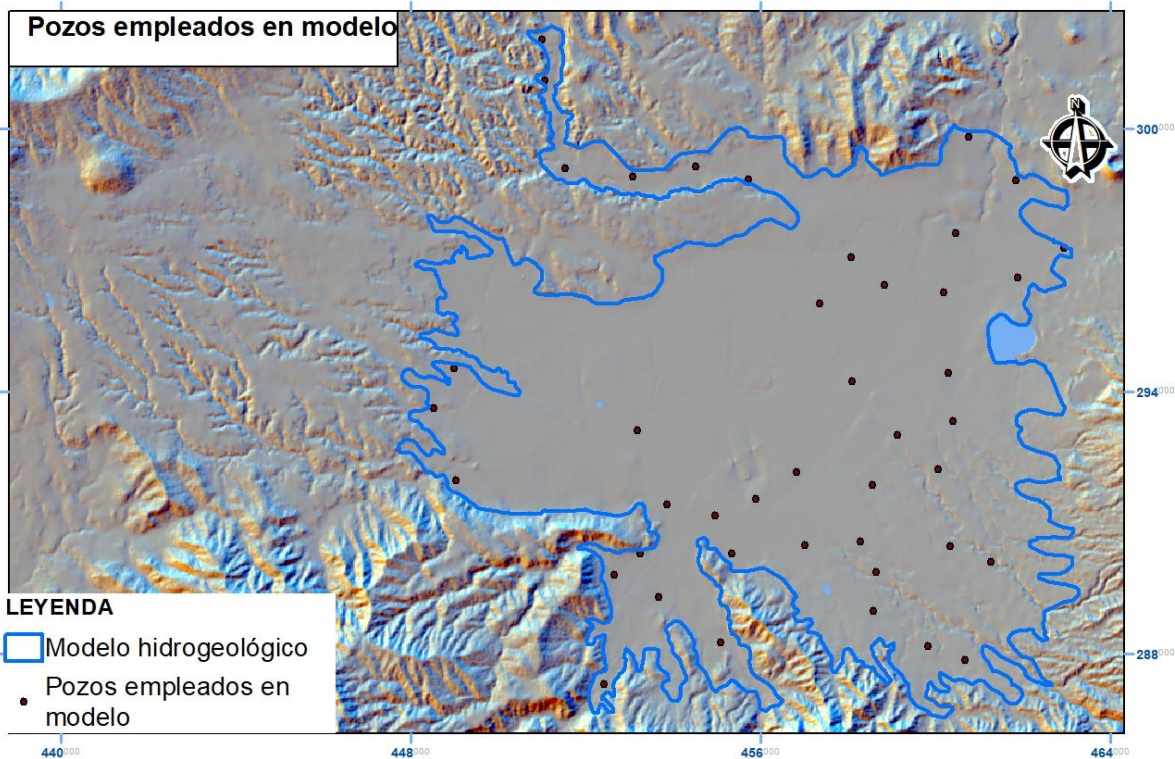


Figura 4.12 Pozos de bombeo empleados en modelo

4.1.6. Modelo hidrogeológico conceptual

Tal y como es presentado en los párrafos anteriores, el sistema acuífero estaría comprendido por 3 unidades hidroestratigráficas: un acuífero libre ($k: 4.65 \times 10^{-5} \text{ m/s}$), el segundo estrato o capa confinante ($k: 2.31 \times 10^{-6} \text{ m/s}$) y el acuífero confinado ($k: 1.7 \times 10^{-4} \text{ m/s}$).

Los ingresos al sistema corresponden a lo siguiente:

- Flujos del complejo volcánico de Santa Ana: $15 \text{ m}^2/\text{d}$
- Flujos de la Cordillera del Bálsamo: $4 \text{ m}^2/\text{d}$
- Flujos del volcán de San Salvador: $26 \text{ m}^2/\text{d}$
- Carga constante laguna Chanmico (siempre volcán de San Salvador): 484 msnm.
- Recarga local: 45 mm/a

Las salidas del sistema estarían comprendidas por los bombeos, los cuales se estiman en 235,831 m³/d. (Figura 4.13)

Como se mencionó al inicio, la modelación de una fosa tectónica queda fuera del alcance del modelo, por lo que posibles flujos ascendentes asociados a esta morfología requeriría de un conjunto de piezómetros colocados en los distintos estratos acuíferos para diferenciar las cargas y por consiguiente el gradiente hidráulico y podría corresponder a un análisis particular de un trabajo de tesis, monitorear, analizar y modelar el comportamiento temporal de estos flujos.

El conjunto de pozos de monitoreo existentes en la zona y utilizados para el modelo permite reproducir el comportamiento medio del sistema que para fines de este estudio ha resultado satisfactorio.

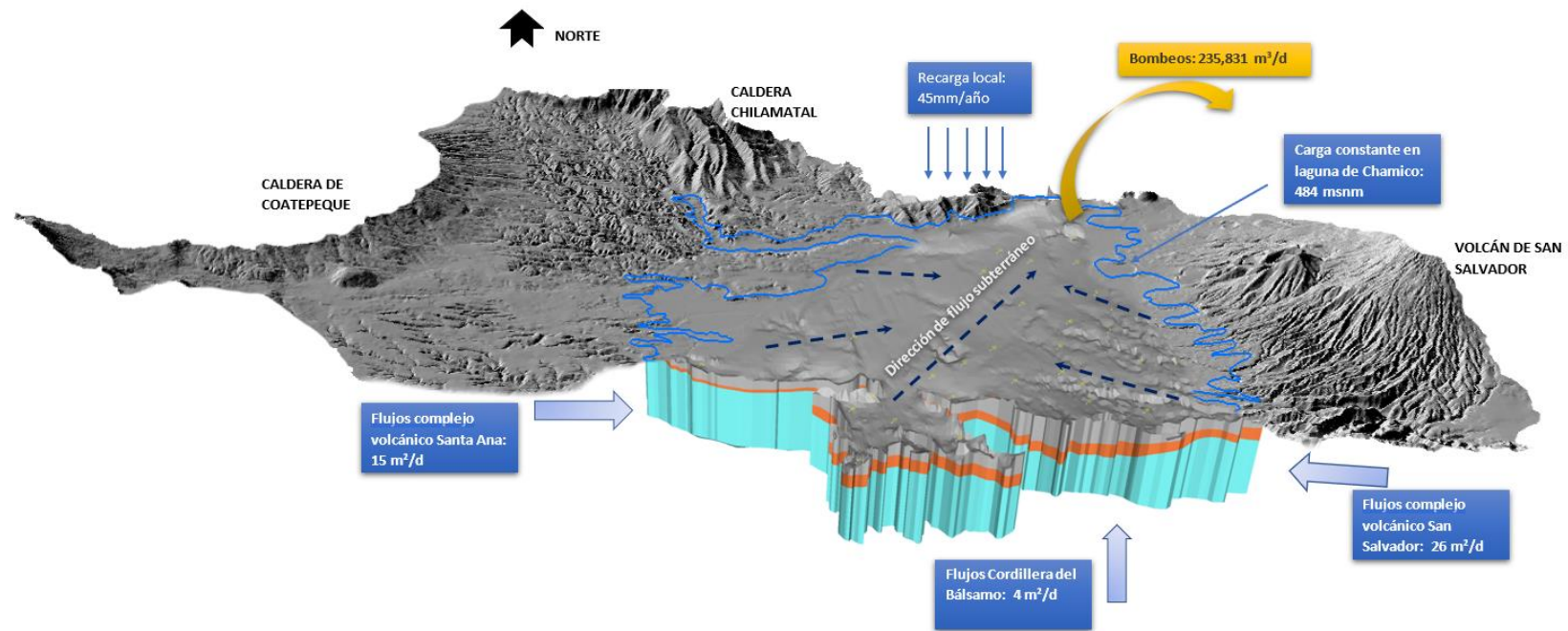


Figura 4.13 Modelo hidrogeológico conceptual

4.2. Modelo Numérico

El modelo numérico elaborado cuenta con las siguientes consideraciones relacionadas con su elaboración las cuales deben tenerse en presente en sus resultados: a) la geometría de las unidades hidroestratigráficas, dado que no todos los pozos cuentan con descripción geológica y registros eléctricos, no obstante se ha mejorado con este estudio el conocimiento de la distribución de los estratos, al considerar más información de pozos que la utilizada en los estudios anteriores b) las demandas presentadas han sido proporcionadas por las instituciones correspondientes reconociendo el esfuerzo adicional de integración y actualización en el desarrollo de la presente investigación, c) amparados en el principio de superposición según Todd (2005), los pozos de explotación presentados han sido interpretados a partir de un pozo equivalente que integre otros pozos en su inmediatez y su diseño es elaborado a partir los mismos; d) el diseño de los pozos de explotación han sido elaborados a partir de los diseños de los pozos de observación; e) tanto las cargas en los pozos de observación como los pozos de explotación han sido interpoladas a partir del DEM 1:25,000.

4.2.1. Pozos de observación

En la Tabla 4.3 se presentan las cargas en los pozos de observación ajustados según el DEM de resolución espacial de 10 m. Es importante mencionar que para el presente estudio no se pudo contar con el diseño de los pozos de observación por lo que la ubicación de las rejillas ha sido inferida a partir de los registros geofísicos y diseños de pozos en las cercanías de cada uno de ellos.

Tabla 4.3 Datos de pozos de observación ajustados ingresados al modelo.

Código SIHI	Código este estudio	X[m]	Y-[m]	Z interpolado-[m]	Cota rejilla inferida-[m]	Carga observada -[m]
0512-A-PP004	OW_01	462867.20	300953.11	459.07	341.58	408.6
0512-A-PP004	OW_01	462867.20	300953.11	459.07	261.08	408.6
0512-A-PE003	OW_02	461107.34	297605.97	442.82	416.94	431.3
0512-A-PE003	OW_02	461107.34	297605.97	442.82	398.64	431.3

Código SIHI	Código este estudio	X[m]	Y-[m]	Z interpolado-[m]	Cota rejilla inferida-[m]	Carga observada -[m]
0512-A-PE003	OW_02	461107.34	297605.97	442.82	380.39	431.3
0512-A-PE003	OW_02	461107.34	297605.97	442.82	359.09	431.3
0503-A-PP003	OW_03	457100.13	298004.23	459.50	375.72	445.3
0503-A-PP003	OW_03	457100.13	298004.23	459.50	351.22	445.3
0503-A-PP003	OW_03	457100.13	298004.23	459.50	326.72	445.3
0503-A-PP001	OW_04	457750.11	296503.86	452.33	411.08	447.3
0503-A-PP001	OW_04	457750.11	296503.86	452.33	367.34	447.3
0503-A-PE002	OW_05	456255.82	299606.34	456.04	380.69	451.5
0503-A-PP008	OW_06	454647.23	299713.63	475.50	380.69	455.0
0503-A-PP006	OW_07	453118.02	298347.81	478.60	380.69	456.1
0514-A-PE002	OW_08	453737.16	291295.22	465.68	424.49	461.7
0514-A-PE002	OW_08	453737.16	291295.22	465.68	386.23	461.7
0303-A-PE002	OW_09	448591.50	292415.77	488.99	439.70	485.5
0303-A-PE002	OW_09	448591.50	292415.77	488.99	403.80	485.5
0303-A-PE002	OW_09	448591.50	292415.77	488.99	352.75	485.5
0303-A-PP001	OW_10	448086.13	295005.47	505.53	451.92	466.0
0303-A-PP001	OW_10	448086.13	295005.47	505.53	430.68	466.0
0504-A-PP001	OW_11	459405.13	289907.70	530.22	438.93	491.7
0504-A-PP001	OW_11	459405.13	289907.70	530.22	384.06	491.7
0504-A-PP001	OW_11	459405.13	289907.70	530.22	341.39	491.7
0203-A-PE001	OW_12	450953.52	302022.21	509.60	425.03	491.8
0203-A-PE001	OW_12	450953.52	302022.21	509.60	403.53	491.8
0203-A-PE001	OW_12	450953.52	302022.21	509.60	350.03	491.8

4.2.2. Calibración del modelo en régimen permanente

El modelo calibrado refleja un coeficiente de correlación de 0.97 y un error estándar de 0.55 m, lo cual es consistente teniendo en consideración que el establecimiento de las cotas tanto del modelo digital de elevaciones y los ajustes realizados a la cota de los pozos, presentan una precisión de 10 m (cartografía 1:25,000); adicionalmente es de tener en consideración que Guevara (2011) consideró una meta de calibración de ± 5 m del valor observado para toda la cuenca del río Sucio, Walter (2006) no cita una estadística relacionada con la calibración de su modelo. El balance de masa presentado en la Tabla 4.4 muestra que la mayor parte de las aportaciones o entradas al modelo son provistas por la recarga desde el exterior de sus fronteras, pero principalmente las inducidas por los volcanes de San Salvador y Santa Ana,

ambos fuera del modelo. Como se mencionó anteriormente, estas aportaciones fueron modeladas como flujos aplicados particularmente en el estrato inferior. Del balance de masa se puede observar que el 89% de las entradas corresponden a las recargas provenientes del volcán de San Salvador, Santa Ana y de la cordillera del Bálsamo, el 3% corresponde a la recarga directa en el área de análisis (hacia adentro de la frontera del modelo), el 8% de las entradas son obtenidas a partir de la carga constante especificada para la laguna de Chanmico, por lo tanto, también del agua proveniente del volcán de San Salvador.

Reinterpretando esta situación, la suma de las cargas constante y el flujo de los complejos volcánicos equivale al 96% de las entradas al sistema. Por otra parte, es importante mencionar que Walter (2006) determina que el 63% de las aportaciones al modelo corresponden a ingresos de aguas subterráneas al sistema; asimismo, Guevara (2011) asocia un 88% a cargas constantes y generales las cuales pueden ser interpretadas como ingresos específicos de agua subterránea al sistema de agua subterránea.

Tabla 4.4. Balance de masas resultante del modelo numérico de flujo del acuífero de Zapotitán

Componente	Entradas		Salidas	
	(m ³)	%	(m ³)	%
Almacenamiento	0.00	0.00	0.00	0.00
Cargas constantes	43372.35	7.85	0.00	0.00
Pozos	0.00	0.00	552448.60	100.00
Recarga	16061.19	2.91	0.00	0.00
Flujos inducidos	492978.34	89.24	0.00	0.00
Total	552411.86	100.00	552448.60	100.00
Entradas – Salidas (m3)			-36.69	
% discrepancia			-0.01	

Dado que el modelo ha sido calibrado para un estado estacionario, no es posible establecer de manera específica las afectaciones que se tendrían en caso se perforen más pozos. Esta situación podría evidenciarse en una situación de régimen transiente, el cual queda fuera del alcance de esta investigación. No obstante, se puede observar la dependencia de los usuarios hacia el agua subterránea.

Las curva de calibración se muestra en la Figura 4.14, donde puede apreciarse que las mayores diferencias entre los datos medidos y los calculados se presentan en la zona norte del modelo en las cercanías de Ciudad Arce, en el pozo de observación OW_05 con una diferencia de -11.7 m esta situación puede deberse a que no se haya interpolado bien la cota del pozo, por lo tanto su cota de observación así como que el sistema simulado requiere mayor precisión en esta zona y no se cuenta con suficiente información. Se debe tener presente que los valores de cotas han sido ajustados a partir del DEM 1:25,000. Por otra parte, en la zona sur cercana al casco urbano del municipio de Colón se presenta una diferencia 0.34 m en el pozo de observación OW_11

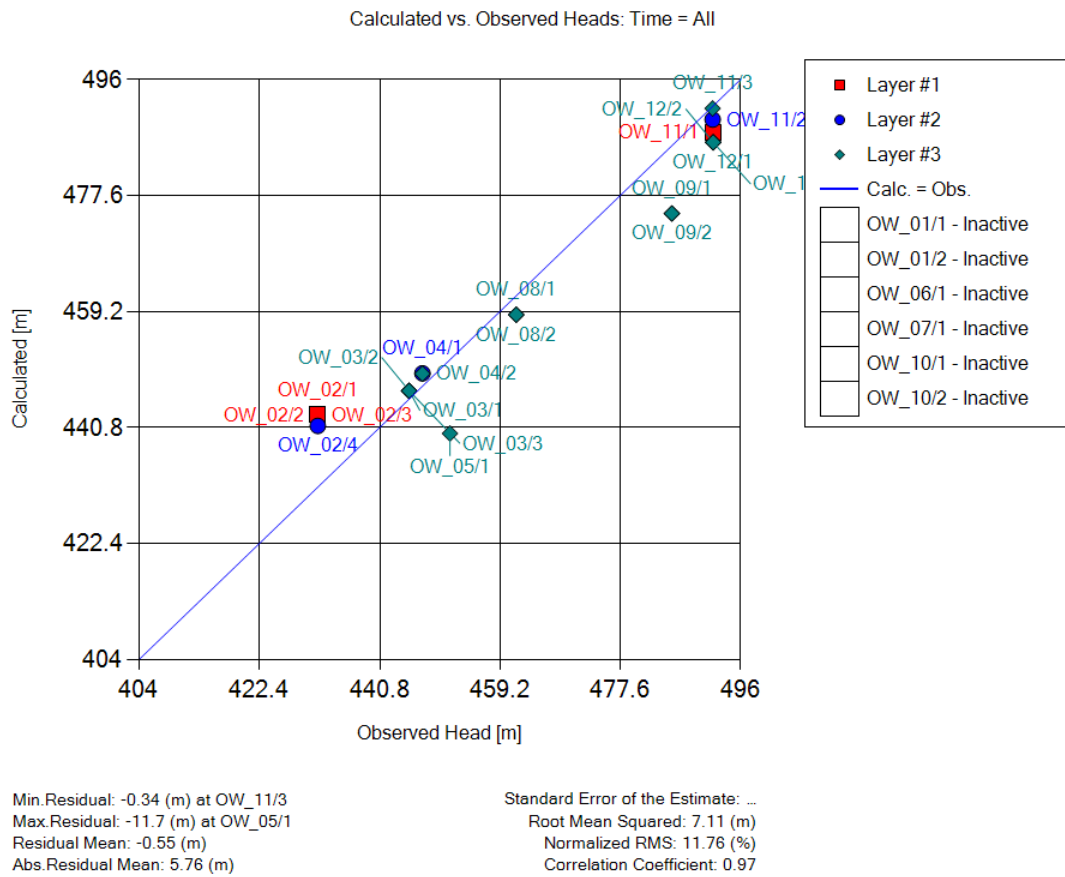


Figura 4.14 Cotas calculadas vs. observadas.

Como se puede observar en la figura anterior, el modelo elaborado presenta un error cuadrático medio (RMS) de 7.11 m y un error cuadrático medio normalizado (NRMS) de 11.76%. Durante el proceso de calibración manual se obtuvieron valores de NRMS en el rango de 40-10% y valores de RMS en el rango de 6-24m, así como valores mínimos de residuales entre -0.0064 a 21 m y máximos residuales entre 5.6 y 20m. Por ello, para la calibración se han tenido en consideración los criterios que NRMS se ubique en el orden de 10%, el máximo residual cercano a 10 m, el RMS cercano a 10 m y el coeficiente de correlación cercano a 1. La solución de esta tarea no ha sido trivial, ya que por la configuración de las unidades hidroestratigráficas, no ha sido posible autocalibrar el modelo.

De acuerdo con Anderson (2015), un modelo podría ser suficientemente calibrado si el NRMS es menor que un porcentaje en el orden de los 10 m utilizando un 10% como criterio. De cualquier forma, no hay razón que soporte una afirmación tan simple que cumpliendo ese criterio se defina que se ha calibrado el modelo de manera aproximada. Tampoco se cuentan con lineamientos establecidos por la industria con respecto a una magnitud aceptable de estos coeficientes más allá de lo deseable de minimizar estos valores. Aunque se reconoce la utilidad de los criterios estándar, la calibración uniforme no ha sido adoptada por la comunidad que realiza este tipo de modelos. En parte esto refleja que debe haber cierta conciencia en que la modelación numérica requiere un juicio subjetivo (Silver (2012), Finen (2013)). Además, es poco probable que una metodología universalmente apropiada pueda ser formulada porque la aceptabilidad de una calibración depende directamente del objetivo de modelado, y hay muchos objetivos de modelado posibles.

En la Figura 4.15 se puede observar los resultados del modelo en relación a la altura potenciométrica, identificando una relación entre el acuitardo o capa intermedia (en color naranja), con el estrato inferior o confinado, principalmente hacia la zona oeste del distrito de riego de Zapotitán, coincidiendo con Walter (2006). Estos resultados demuestran que existe una comunicación entre los 3 estratos modelados. En la Figura 4.16 Conos de abatimiento del modelo. Figura 4.16 se observan los conos de abatimiento del modelo.

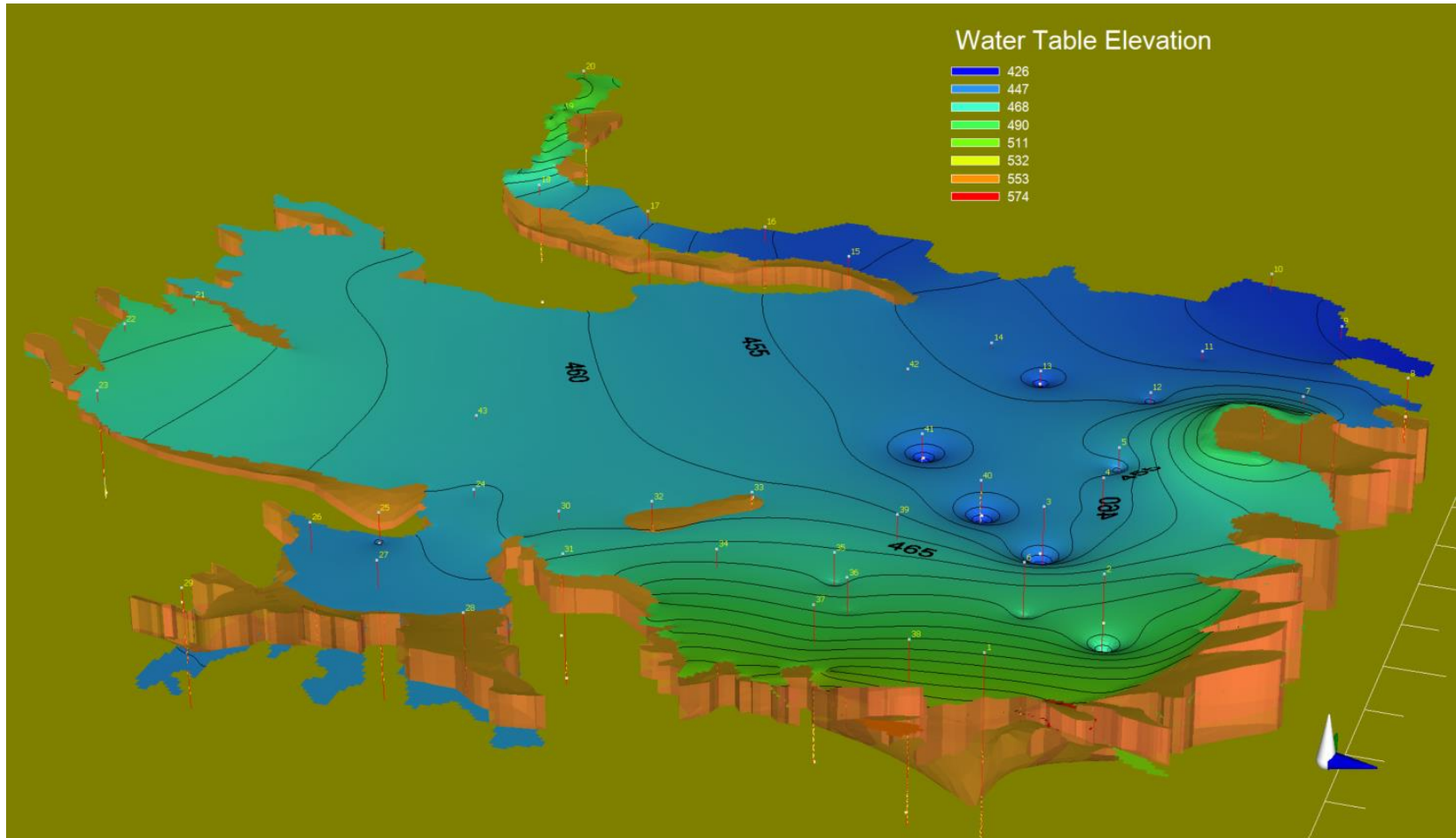


Figura 4.15 Altura potenciométrica (tabla de agua)

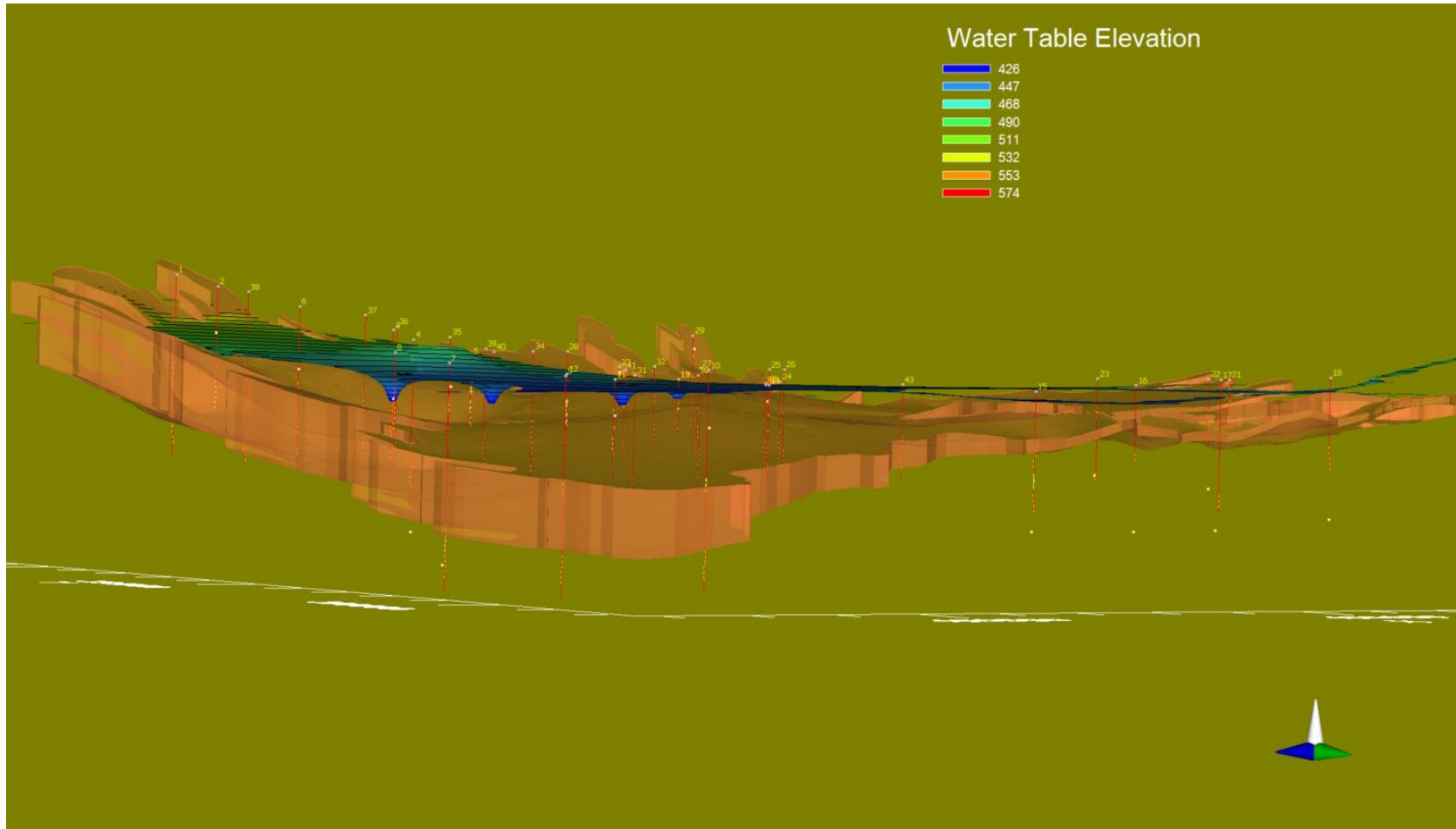


Figura 4.16 Conos de abatimiento del modelo.

5. CONCLUSIONES

A partir de la información disponible principalmente de las diagramas realizadas durante la perforación de pozos, es posible modelar el acuífero actualmente aprovechado a partir de 3 unidades hidroestratigráficas conformadas por un acuífero libre en la parte superior, un acuitardo en la parte intermedia y un acuífero confinado en la parte inferior, cuyos espesores varían 10 m a 194 m, 8 m a 100 m y de 46 m a 255 m, en cada caso. Los espesores promedio son 66 m, 30 m y 180 m respectivamente. El basamento de este acuífero probablemente se encuentre en el fondo de una fosa tectónica en el orden de 1,500 a 2,000 m, identificada por algunos estudios realizados con fines geotérmicos. No obstante, a este momento se carece de información suficiente para incorporarla en el modelo.

Conociendo la profundidad de los pozos, obtenidas de dicho informe de perforación se puede observar que el acuífero libre de la parte superior es del cual se abastecen la mayoría de usuarios de los pozos tanto perforados como excavados. Dada la gran cantidad de pozos identificados, ha sido necesario realizar una integración de los volúmenes de demanda en pozos equivalentes, partiendo de un total de 408 pozos que fueron agrupados como una técnica de modelado en 43 pozos equivalentes integrados apropiadamente en el modelo.

Ha sido necesario realizar una corrección de las cotas de los pozos obtenidos de los informes de perforación para poder compatibilizarlos con el modelo digital de elevaciones, asimismo se hicieron las respectivas correcciones de los datos de observación obtenidos de la plataforma SIHI; esta situación presenta una limitante pues el orden de magnitud de la calibración del modelo hidrogeológico oscila en la resolución espacial del modelo digital de elevaciones el cual es de 10 m.

La calibración del modelo hidrogeológico en régimen permanente ha sido elaborada mediante prueba y error, no ha sido posible desarrollar una calibración mediante estimación de parámetros automatizada, la cual viene integrada con el software utilizado, debido a que la zonificación en el modelo actual incluye más de una unidad hidroestratigráfica. No

obstante, como puede verse en los parámetros estadísticos de calibración, estos son satisfactorios según las limitantes de información de los parámetros de entrada. Coincidiendo con los planteamientos de múltiples autores en el ámbito de la modelación hidrogeológica.

Las profundidades mayores de los conos de abatimiento se observan tanto por los consumos domésticos como industriales localizados a lo largo de la carretera que conduce hacia Santa Ana como de la carretera que conduce hacia Sonsonate, zona donde se presentan los mayores volúmenes de extracción de agua en el acuífero.

De acuerdo al balance de agua en el suelo a partir de la metodología establecida por Shosinsky y Losilla (2003), las mayores recargas se dan en el complejo volcánico de San Salvador y Santa Ana, también forman parte importante la presencia de lavas (Playon y San Marcelino).

Del balance de masa se puede observar que el 89% de las entradas corresponden a las recargas provenientes del volcán de San Salvador, Santa Ana y de la cordillera del Bálsamo, el 3% corresponde a la recarga directa en el área de análisis (hacia adentro de la frontera del modelo), el 8% de las entradas son obtenidas a partir de la carga constante especificada para la laguna de Chanmico. Reinterpretando esta situación, la suma de las cargas constante y el flujo de los complejos volcánicos equivale al 96% de las entradas al sistema. Esta situación resulta importante para el establecimiento de una gestión del recurso subterráneo ya que evidencia la dependencia de los flujos de los complejos volcánicos, en donde se deben establecer acciones para mantener o incrementar las recargas subterráneas.

Los parámetros hidráulicos de las unidades hidroestratigráficas son las siguientes: para el acuífero libre se determinó una conductividad hidráulica de 4.65×10^{-5} m/s; el segundo estrato ha sido modelado con valores equivalentes a un acuitardo correspondientes a 2.31×10^{-6} m/s y el tercer estrato con valores de 2×10^{-4} m/s, muy similar a lo utilizado por Walter (2006) correspondiente a 1.7×10^{-4} m/s.

6. RECOMENDACIONES

Para contar con un modelo más certero sobre el comportamiento del acuífero en la zona, es necesario contar con una basta cantidad de información relacionada con la geometría y propiedades hidráulicas del acuífero.

Esta información proviene de los informes de perforación de pozos la cual no es estandarizada en su forma de presentación por lo que es una limitante al momento de trasladar dicha información al modelo.

Es necesario contar con una estandarización técnica de las descripciones de las litologías para que se pueda contrastar con los diagramas de resistividad y potencial espontáneo. Esta información ayudaría en gran medida la construcción de modelos numéricos en un ámbito más grande.

Se recomienda incorporar más pozos de monitoreo en la zona del distrito de riego así como en las cercanías de las áreas urbanas para llevar un mejor control de las variaciones del nivel potenciométrico, principalmente en la zona urbana de Colón tanto a lo largo de la carreteras que conducen a Santa Anta como a Sonsonate.

Futuros aprovechamientos en dichas zonas deben analizarse con modelos locales ya que se observan los mayores descensos en el área.

Trabajos futuros sobre este modelo deberán enfocarse en la calibración en régimen transitorio (variaciones del nivel en función del tiempo), este tipo de calibraciones incorporaran otras variables tales como la determinación de los coeficientes de almacenamiento, teniendo la posibilidad de reajustar los valores de las conductividades hidráulicas.

Los pasos posteriores serán incorporar los resultados del modelo hidrogeológico numérico a una integración con un modelo de sistema de gestión de los recursos hídricos. Se recomienda la vinculación con el modelo WEAP, esto contribuirá al establecimiento de los umbrales en un proceso de asignación de los recursos hídricos bajo un régimen de concesiones, el cual deberá gestionarse por la autoridad competente.

7. BIBLIOGRAFÍA

- Alvarado, C. (2007). Modelo conceptual y vulnerabilidad intrínseca del acuífero Quezaltepeque-Nejapa. Tesis de licenciatura en física. Universidad de El Salvador.
- Anaya, W. et al. (2017). Caracterización hidrogeológica del municipio de San Sebastián Salitrillo Santa Ana. Tesis de ingeniería civil. Universidad de El Salvador.
- Anderson et al (2015). Applied Groundwater Modeling. Second edition. Elsevier Inc.
- Bosse, R.H., Lorenz, W., Merino, A., Minhm, A., Rode, K., Schmitd-Thomé, M., Webber, H.S. y Wiesemann, G., (1978). Mapa Geológico de la República de El Salvador, escala 1: 100,000. Misión Geológica Alemana. Hannover, República Federal de Alemania.
- Chávez, J. et al (2017). Caracterización de zonas potenciales de recarga acuífera en el municipio de San Jorge, San Miguel, El Salvador. Tesis ingeniería agronómica. Universidad de El Salvador.
- Duarte, J. (2012). Cálculo de la recarga hídrica potencial para la subregión metropolitana de San Salvador. Trabajo realizado para Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador
- Junker, M. (2005). Método RAS. Determinación de la recarga hídrica potencial, proyecto FORGAES. Trabajo realizado para Ministerio del Ambiente y Recursos Naturales de El Salvador.
- Gil, L. (2007). Evaluación hidrogeológica y vulnerabilidad intrínseca del sistema acuífero del municipio de Nejapa, San Salvador. Tesis de maestría en ciencias en geología con énfasis en manejo de los recursos hídricos e hidrogeología. Universidad de Costa Rica
- Guevara, M. (2011) Modelación numérica del acuífero del Playón. Tesis de maestría en gestión de recursos hidrogeológicos. Universidad de El Salvador.
- MAG (1982). Plan Maestro para el Desarrollo y Aprovechamiento de los Recursos Hídricos.
- MARN (2017). Plan Nacional de Gestión Integrada de los Recursos Hídricos.

- Niswonger, R.G., Panday, Sorab, and Ibaraki, Motomu, 2011, MODFLOW-NWT, A Newton formulation for MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6–A37, 44 p.
- Pullinger, C. (1998). The evolution of the Santa Ana volcanic complex. Thesis master in science in geology. Michigan Technological University.
- Quiñones, J. (2013). Revisión y análisis de los componentes hidrológicos e hidrogeológicos del Estudio Hidrogeológico, Hidrológico, Hidráulico y de Riesgo zona Planta Nejapa, Industrias la Constancia, ILC, Nejapa, departamento de San Salvador, Nejapa
- SIHI-MARN (2021). Sistema de Información Hídrica. <http://srt.snet.gob.sv/sihi/public/>
- SNET (2005). Balance Hídrico Dinámico e Integrado.
- Shosinsky y Losilla (2006). Cálculo de la recarga hídrica potencial de acuíferos mediante un balance hídrico de suelos. *Revista Geológica de América Central*, 34-35: 13-30
- Todd K., Mays L. (2005). *Groundwater Hydrology*, 3rd edition, Wiley.
- VMVDU (2005). Plan Nacional de Ordenamiento y Desarrollo Territorial.
- Walter, M. (2006). *Groundwater Flow Modeling in the Zapotitan Valley*. Thesis master of science in hydrogeology. University of Birmingham. UK.

ANEXO A: COMPARATIVA DE ESTUDIOS PREVIOS EN LA ZONA

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)
Área de análisis	52-60 km ²	68.7 km ²
Número de unidades hidroestratigráficas	3	5
Descripción de unidades hidroestratigráficas	1: TBJ y toba de San Andrés 2: Paleosuelo 3: Todo debajo de esto	1 y 2: materiales sedimentarios o detríticos y volcánico fisurado 2 y 3: sedimentos lacustres, lavas básicas-intermedias y piroclásticos terciarios 4 y 5: lavas basálticas, tobas, aglomerados y lahares.
Espesores de los estratos	4.5, 2 y 150 m (uniformes)	
Cantidad de pozos excavados	19	
Profundidad del nivel pozos excavados	11 m	28 m
Cantidad de pozos perforados	25 (18 son del distrito de riego).	42 (14 corresponden al distrito de riego de Zapotitán). 114 pozos de extracción 98 pozos de observación 20 pozos someros
Cantidad de ríos aforados y con geometría para el modelo	13	20
Unidades de análisis para la estimación de la recarga.	Estimada según tipo de cultivo (uso de suelo) en distrito de riego. 10 Zonas en m/día	Miembro geológico. Rangos 21.4-852 mm/año (máximos en lavas Playón y Teixcal)
Cantidad de ríos con conductividad hidráulica a partir del D10	3 (Los Patos, Colón y Copapayo) Se estimó también las conductividades de estratos por este método	

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)
Demanda hacia el acuífero confinado	22.65 Mm ³ /año	114.625 Mm ³ /año
Volumen agua ingresando desde San Marcelino (incluyendo Santa Ana y Coatepeque)	45,800 m ³ /día	152 Mm ³ /año tanto de Santa Ana como de San Salvador
Volumen agua ingresando desde volcán de San Salvador	62,000 m ³ /día	
Volumen agua ingresando desde la cordillera del Bálsamo	2,000 m ³ /día	
Flujo de agua subterránea (salidas subterráneas)	7,350 m ³ /día	
Cantidad de pozos para determinar isopiezas del acuífero profundo		78
Tamaño de celda del modelo	50x50	Variable: 100x100 en zona del playón, hasta 400x400 m
Filas y columnas	140 filas y 220 columnas	224 filas x 247 columnas
Cantidad de días simulados	10	7300 días o 20 años
Diferencia de piezometría para calibración del modelo	1 m	+/- 5 m
Parámetros de calibración		Carga hidráulica, flujos en bordes, conductancia, cotas en ríos, conductividad hidráulica y almacenamiento.
Conductividades hidráulicas	Layer 1: 4 m/d Layer 2: 0.0001 m/d, 0.001 m/d, 4 m/d Layer 3: 15 m/d, 4 m/d, 0.6 m/d	A partir de los miembros geológicos Bálsamo: 1 y 2: 0.1 m/d 3 y 4: 1x10 ⁻⁶ m/d 5: 1x10 ⁻⁹ m/d

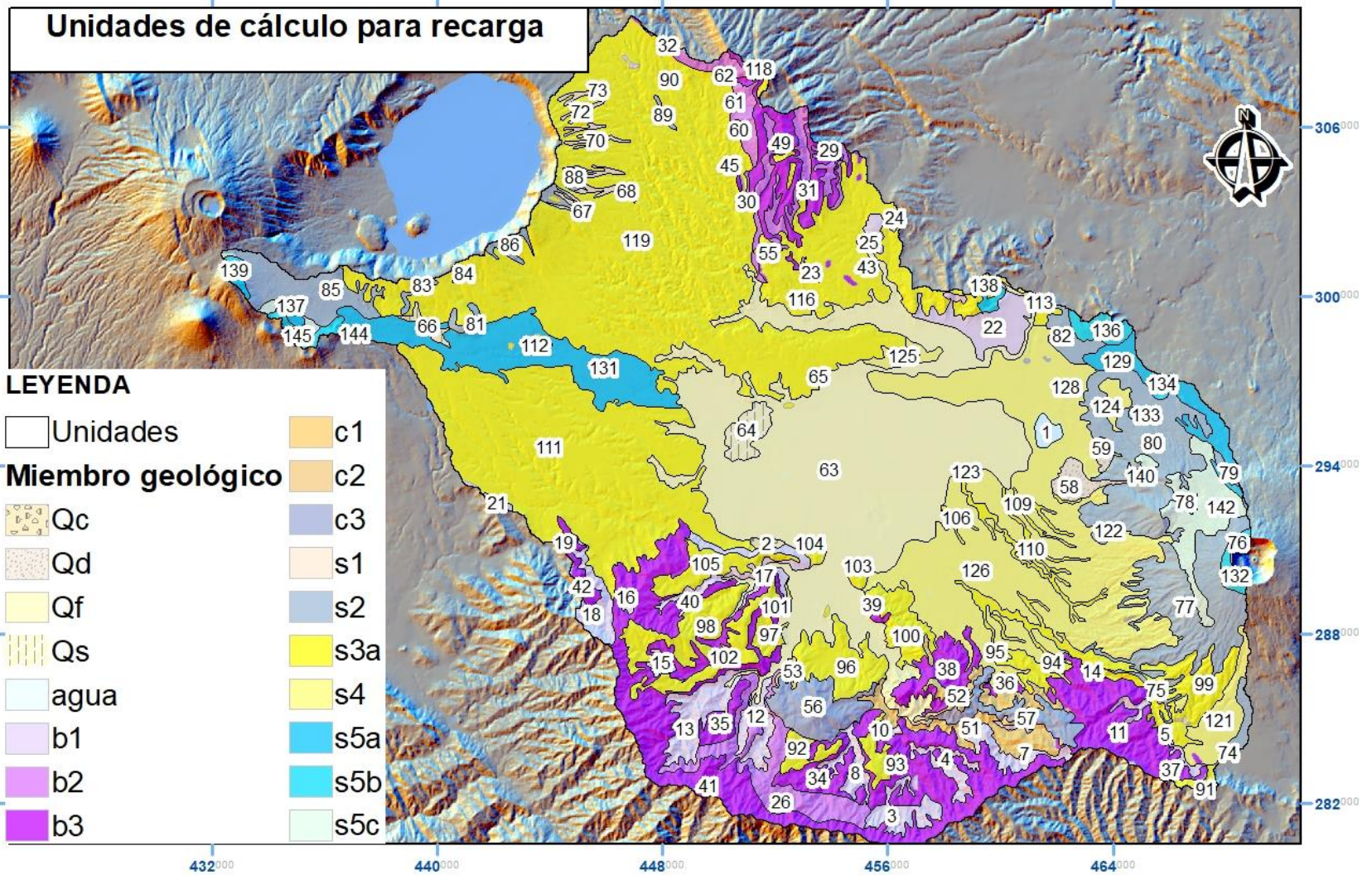
Característica	Walter (2006)	Guevara (2011)
		<p>Cuscatlán: 1-2 m/d San Salvador: Ceniza y piroclasto fino:4-5 m/d Piroclasto grueso y lapilli: 30 m/d Terrazas aluviales: 10 m/d Lavas basálticas y escoriaeáceas: 50 m/d</p> <p>Layers 1 y 2 tienen las mismas conductividades Layer 3 se reducen valores en Cuscatlán y San Salvador. Bálsamo es impermeable Layer 4: Bálsamo y San Salvador son impermeables a excepción de terrazas aluviales y Cuscatlán. Layer 5: Impermeable.</p>
Coeficientes de almacenamiento (Sy. y otros)		<p>A partir de los miembros geológicos. Sy Layer 1: 0.35 – 0.1 Sy Layer 2: 0.35 – 0.0001 Sy Layer 3:0.01 - 0.0001 Sy Layer 4: 0.001 – 0.0001 Sy Layer 5: 0.0001 Libre: 0.35 – 0.1 Para profundidades >60m: 0.001-0.00045</p>
Transmisividad		<p>Zapotitán: 340-994 m²/d Campo de pozos Opico: 4340-8875 m²/d</p>
Gradiente hidráulico	<p>VSA²-Valle: 30% VSS³:20%</p>	<p>VSA-Valle: 3.4% Valle-SanAndrés: 0.75%</p>

² Complejo volcánico de Santa Ana.

³ Complejo volcánico de San Salvador

Característica	Walter (2006)	Guevara (2011) Zapotitan:0.0006%
Cargas iniciales	100 m	Variable según isofreáticas: 100 – 2100 m
Cargas constantes	Layer 1: 470 m (Santa Ana) Layer 3: 488-509 m (VSS) y salida 444 m	Salida de la cuenca (todos los layers): 245.6 m Baterias Record: 406 m Layer 1 y 2: 460 m
Cargas generales		Layer 1 y 2: Cráter VSS: 960m Layer 1 y 2: Lago Coatepeque: 750 m
Presencia de rios en Layers	En layers 1 al 3	En layers 1 al 3
Cantidad de drenes simulados		17 en cabeceras de los ríos.
Rango de valores de conductancia para drenes (manantiales)	100-500 m ² /d	10600 m ² /d – 488160 m ² /d

ANEXO B: CÁLCULO DE RECARGA HÍDRICA POTENCIAL



Unidades de cálculo para recarga

Ejemplo de hoja de cálculo:

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O
1	*En negritas, campos que deben ser ingresados														
2							%	mm							
3						CC	23.33	275							
4				Ec.2		PM	10.99	129							
5	Ci (0.01%)	0.94		Ec. 3		CC-PM	12.337615	145							
6	DS (g/cm3)	1.39		Cua. 2											
7	Profundidad de raíces (m)	0.85		Cua. 3											
8	Hsi	275													
9	Mes con que inicia Hsi	11		Ejemplo 15											
10	Cfo	0.12		Bosques densos: 0.2, otros 0.12											
11															
12	Concepto	Fuente	Ene	Feb	Mar	Abr	Ma	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
13	P (mm)		3	3	10	58	161	267	292	311	294	159	28	9	1596
14	Ret (mm)	Ec.1	3	3	5	7	19	32	35	37	35	19	5	5	207
15	Pi (mm)	Ec.4	0	0	5	48	133	221	241	257	243	132	21	4	1305
16	Esc (mm)	Ec. 5	0	0	0	3	9	14	16	17	16	8	1	0	84
17	ETP (mm)	Ec (7)	137	138	170	166	152	130	145	143	124	125	121	125	1676
18	Hsi (mm) y definición del Mes CC							Pi>ETP	Pi>ETP	Pi>ETP	Pi>ETP	Pi>ETP			
19															
20	*A partir de este momento se decide a partir de cuál campo se inicia la iteración.														
21															
22			176	153	141	136	153	208	275	275	275	275	275	217	
23	C1	Ec (10)	0.3	0.2	0.1	0.4	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1	0.6
24	C2	Ec (11)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0	0.3	0.1	
25	HD (mm)	Ec (13)	47	23	17	55	157	299	386	402	388	277	167	91	
26	ETR (mm)	Ec (14)	23	12	10	31	78	130	145	143	124	125	80	45	946
27	HSf (mm)	Ec (15)	153	141	136	153	208	275	275	275	275	275	217	176	
28	Rp (mm)	Ec (17)	0	0	0	0	0	24	96	113	119	7	0	0	359

Evapotranspiración potencial media mensual:

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
1	122	135	166	162	146	120	136	135	115	114	106	110
2	149	142	176	171	157	138	152	150	131	133	133	137
3	141	142	177	166	149	127	143	139	120	122	124	129
4	138	141	176	166	149	125	142	138	119	121	121	125
5	115	126	157	148	130	108	122	118	101	100	95	102
6	147	145	180	171	155	132	149	145	126	128	130	134
7	131	138	172	163	145	121	138	134	115	116	114	119
8	150	146	182	171	156	134	150	146	127	130	133	138
9	132	138	172	164	146	122	139	135	116	117	114	119
10	148	145	181	172	156	134	150	146	127	130	131	136
11	119	130	162	154	136	112	128	124	106	106	101	106
12	160	148	185	175	161	142	157	153	135	138	143	148
13	162	148	184	175	162	143	158	154	136	140	146	150
14	124	134	166	159	141	117	133	130	111	111	106	111
15	160	144	180	172	160	143	157	154	136	139	144	148
16	152	138	172	167	155	139	153	150	132	134	138	140
17	153	145	179	173	159	140	154	152	133	135	137	140
18	150	135	170	164	153	138	151	148	131	132	136	139
19	138	125	159	155	145	131	144	141	124	124	125	127
20	151	142	176	171	158	139	153	151	132	134	136	139
21	126	115	147	145	135	123	135	132	116	114	114	115
22	122	135	165	163	147	121	136	136	116	115	106	110
23	126	131	162	160	146	124	137	137	118	117	110	114
24	125	134	165	163	148	123	137	137	117	116	108	113
25	125	134	164	163	148	123	137	137	117	116	109	113
26	157	147	183	173	158	138	154	149	131	135	139	144
27	124	129	159	158	144	122	136	135	116	115	108	112
28	123	128	159	158	144	122	135	134	115	114	107	111
29	126	133	164	162	148	123	137	137	117	116	109	113
30	122	127	158	157	143	121	134	133	115	113	106	110
31	125	131	162	161	146	122	136	136	116	115	108	113
32	121	124	156	155	142	119	132	131	113	110	104	108
33	140	142	177	168	151	127	144	140	121	123	123	128
34	153	146	183	172	157	136	152	147	129	132	136	141
35	162	148	184	175	162	143	158	154	136	139	145	149
36	133	140	173	165	148	124	141	137	118	119	116	121
37	120	131	163	155	137	113	128	125	107	106	102	107
38	141	143	177	169	153	130	146	143	124	126	124	129
39	147	145	179	172	157	135	150	148	129	131	130	134
40	154	143	177	171	159	140	155	152	134	136	138	142
41	151	143	178	170	155	135	151	147	129	131	134	138
42	143	129	163	159	148	134	147	144	127	127	129	131

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
43	126	134	164	163	148	124	138	137	118	117	110	114
44	125	130	161	159	146	123	137	136	117	116	109	113
45	119	123	154	154	140	119	132	131	113	110	103	107
46	126	133	163	162	147	123	137	137	117	116	109	113
47	126	134	165	163	148	123	137	137	117	116	109	114
48	125	132	162	161	147	123	136	136	117	116	109	113
49	123	128	159	158	145	121	135	134	115	114	107	111
50	132	139	172	164	147	123	139	136	117	118	114	119
51	136	140	174	165	148	125	141	138	119	120	118	123
52	140	143	177	169	152	129	145	142	123	124	123	128
53	157	148	183	175	161	141	156	153	134	137	141	145
54	143	144	178	170	154	131	148	145	125	127	126	130
55	123	128	158	157	144	122	135	135	116	115	108	111
56	155	148	183	174	160	139	154	151	132	135	138	143
57	131	138	172	163	146	122	138	135	116	117	114	119
58	122	134	165	161	144	119	134	133	113	113	105	109
59	119	133	163	160	143	117	132	131	112	111	102	107
60	120	124	155	155	141	119	132	131	113	111	104	108
61	121	125	157	156	142	119	133	132	113	111	105	109
62	121	124	156	155	142	119	132	131	113	111	104	109
63	137	138	170	166	152	130	145	143	124	125	121	125
64	136	134	166	163	150	131	144	143	124	124	121	124
65	132	135	166	164	150	128	142	141	122	122	116	120
66	89	89	118	121	111	100	111	108	94	87	79	79
67	92	94	124	127	116	101	114	112	96	89	80	81
68	97	100	130	133	121	105	117	116	99	94	85	86
69	95	98	128	131	120	103	116	114	97	92	83	84
70	95	98	128	131	120	103	115	114	97	91	83	84
71	94	97	127	130	119	102	114	113	96	90	81	83
72	94	97	127	130	119	102	114	112	96	90	81	83
73	95	97	127	130	119	102	114	113	96	90	82	83
74	115	124	154	146	129	108	120	117	101	99	95	101
75	118	129	160	152	135	112	126	123	105	104	99	105
76	116	127	156	151	135	112	125	124	106	104	97	103
77	118	128	159	153	136	113	126	124	106	105	99	105
78	116	129	159	154	138	114	127	126	107	106	98	103
79	115	127	157	153	136	113	126	125	107	105	97	102
80	117	131	161	157	141	115	130	129	110	108	100	104
81	91	90	119	122	112	101	112	110	95	88	81	81
82	118	133	163	161	145	118	133	133	113	111	101	105
83	85	86	114	117	107	97	107	105	90	83	74	75
84	85	86	114	118	108	97	108	106	91	84	75	75
85	84	87	114	116	105	96	104	102	88	81	73	74
86	86	88	116	120	110	98	109	107	92	85	75	75

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
87	89	92	121	125	114	100	112	110	94	87	78	78
88	92	94	124	127	117	101	113	112	95	89	80	81
89	110	113	143	144	132	112	125	124	106	102	95	98
90	113	115	146	147	134	113	126	125	107	104	97	101
91	113	124	155	145	127	105	119	115	99	97	93	100
92	156	148	184	174	159	138	154	150	131	135	139	144
93	148	145	180	171	155	133	149	145	126	129	131	135
94	127	136	169	161	144	119	135	133	113	114	109	114
95	131	138	171	164	147	122	139	136	117	117	114	118
96	152	147	182	174	159	138	153	150	131	134	136	140
97	156	147	182	174	161	141	156	153	135	137	140	144
98	157	144	179	172	159	142	156	153	135	138	142	145
99	121	131	162	155	137	114	129	126	108	107	103	108
100	144	144	178	171	156	133	149	146	127	129	128	132
101	153	145	180	173	160	140	155	152	133	136	137	141
102	159	146	181	174	161	142	157	154	136	138	143	146
103	146	144	178	172	157	136	151	149	129	131	130	134
104	148	144	177	172	158	137	152	150	130	132	132	136
105	151	141	175	170	157	139	153	150	132	134	136	139
106	134	140	172	167	152	128	143	142	122	122	118	122
107	125	136	168	163	146	121	137	135	116	115	109	113
108	123	135	166	162	145	120	135	134	114	114	106	111
109	126	137	168	163	147	122	138	136	116	116	110	114
110	128	137	169	164	147	123	138	137	117	117	111	115
111	124	117	148	147	136	122	135	132	116	114	112	113
112	100	98	128	131	121	108	120	118	102	97	90	90
113	119	134	164	162	146	119	134	134	114	112	102	107
114	122	135	165	163	147	121	136	136	115	114	105	109
115	124	130	161	159	145	122	135	135	116	114	107	112
116	125	133	163	162	147	123	137	137	117	116	109	113
117	124	129	160	159	145	122	135	134	115	114	107	111
118	125	129	161	160	146	121	135	134	115	114	108	112
119	108	110	140	141	130	112	125	123	106	102	95	97
120	117	127	158	150	133	110	124	121	104	102	98	104
121	115	125	156	147	130	108	121	118	101	100	96	102
122	121	133	164	159	142	117	132	131	111	111	104	108
123	129	138	170	165	149	124	140	139	119	119	113	117
124	117	132	162	159	142	116	131	131	111	110	100	104
125	128	135	166	164	149	125	139	139	119	119	112	115
126	127	137	168	163	147	122	138	136	117	117	111	115
127	115	127	157	153	136	113	126	125	107	105	97	102
128	119	134	164	161	145	119	134	133	113	112	103	107
129	115	130	159	156	140	114	128	128	109	107	97	102
130	87	90	116	118	107	98	106	103	90	84	76	77

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
131	103	101	131	132	122	109	121	119	103	98	92	92
132	117	127	157	151	135	112	125	123	106	104	98	103
133	116	131	161	158	141	115	130	129	110	108	99	103
134	114	130	159	157	140	114	129	128	109	107	97	102
135	88	90	117	118	108	99	108	105	91	85	77	78
136	116	132	162	160	143	116	132	132	111	110	99	103
137	87	90	117	118	107	98	106	103	90	84	76	77
138	122	135	165	163	147	121	136	136	115	115	105	109
139	86	91	117	117	106	96	104	101	88	82	74	76
140	118	131	162	158	141	116	130	129	110	109	100	105
141	117	131	161	157	140	115	130	129	109	108	99	104
142	116	128	158	153	137	113	127	126	107	105	98	103
144	88	89	117	119	109	99	109	106	92	86	78	79
145	88	90	117	118	108	99	107	104	91	85	77	78
146	87	90	117	118	107	97	105	103	89	83	75	77
143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Lluvia media mensual:

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
1	3	2	11	51	185	300	327	312	336	246	34	7
2	3	3	9	58	139	255	271	324	280	94	26	11
3	2	1	7	36	196	334	338	348	399	321	45	4
4	2	1	8	39	200	323	329	317	392	349	34	2
5	3	1	9	36	176	325	350	324	371	247	46	6
6	3	1	8	43	189	302	318	314	374	309	31	3
7	2	1	8	40	202	325	330	305	389	356	31	2
8	2	1	7	40	184	313	331	342	386	281	41	4
9	2	1	9	42	202	319	326	298	383	359	27	2
10	3	1	8	43	186	299	318	318	372	294	32	3
11	3	1	9	39	188	327	347	316	379	294	38	5
12	3	3	8	44	160	297	328	353	369	189	46	7
13	3	3	8	45	154	297	326	358	365	160	50	8
14	3	1	9	43	195	317	334	302	372	320	29	3
15	3	3	9	47	148	286	308	355	343	117	48	10
16	3	3	10	52	154	286	292	351	328	104	43	11
17	3	3	9	55	139	258	277	329	291	102	29	10
18	2	2	10	53	170	300	300	353	346	130	45	11
19	2	2	11	60	199	316	304	355	355	152	40	11
20	3	3	9	55	138	260	275	332	290	89	31	11
21	1	2	13	72	253	354	334	380	395	198	38	11
22	4	3	13	57	179	286	320	315	311	213	37	8
23	3	5	12	59	174	281	308	312	293	162	36	10
24	4	4	14	60	171	278	307	314	289	181	37	9
25	4	4	13	60	172	279	308	313	289	177	37	9
26	3	2	8	41	172	315	339	362	386	228	50	6
27	3	5	12	57	175	288	304	309	295	162	35	10
28	3	5	12	56	174	289	301	307	294	164	35	9
29	3	4	13	58	171	285	299	310	287	173	35	9
30	2	5	12	55	174	290	297	305	292	164	34	9
31	3	4	13	57	172	287	297	307	288	169	34	9
32	2	4	13	55	172	288	291	301	283	166	33	8
33	2	1	8	40	200	317	325	313	388	347	31	2
34	2	2	7	40	179	315	336	352	388	261	45	5
35	3	3	8	44	155	295	326	356	365	167	48	8
36	3	0	9	45	199	306	316	291	367	345	22	2
37	3	1	9	40	190	326	342	312	378	303	36	4
38	3	1	8	48	189	292	304	295	353	311	21	3
39	3	2	9	54	162	268	283	306	311	206	20	7
40	3	3	9	53	136	263	279	340	297	81	35	11
41	3	2	8	44	171	306	321	345	367	218	43	7
42	2	2	11	57	186	308	300	353	349	140	41	11

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
43	4	4	13	60	174	276	311	313	291	175	37	9
44	3	5	12	58	174	284	307	311	294	161	36	10
45	2	5	12	54	173	292	293	301	292	163	33	9
46	3	4	13	58	172	284	302	310	288	172	35	9
47	3	4	14	59	170	284	299	311	286	175	35	8
48	3	5	13	58	173	286	300	309	289	170	35	9
49	2	5	12	56	173	289	296	304	289	167	34	9
50	3	1	9	44	200	311	321	294	373	350	24	2
51	2	1	8	42	198	314	324	304	380	341	28	2
52	3	1	8	46	195	299	311	295	364	332	22	2
53	3	3	8	49	153	276	304	334	337	169	35	7
54	3	1	9	50	183	284	297	295	340	287	19	4
55	3	5	12	56	175	288	304	309	296	160	35	10
56	3	2	8	45	166	288	315	332	358	221	36	5
57	3	1	9	43	199	315	324	298	378	347	27	2
58	3	1	10	48	186	305	330	313	346	255	34	6
59	3	1	10	47	185	312	339	320	353	253	38	6
60	2	4	12	54	172	290	290	299	286	165	32	9
61	2	4	13	55	172	289	291	300	283	166	32	8
62	2	4	13	55	172	288	291	301	281	167	33	8
63	3	3	10	58	161	267	292	311	294	159	28	9
64	3	4	10	59	156	264	286	310	285	123	28	11
65	4	4	11	61	165	267	301	311	286	145	33	10
66	4	5	18	78	277	385	377	425	397	199	41	10
67	2	4	12	51	181	308	299	315	308	166	32	8
68	2	4	11	50	175	302	291	304	301	164	31	8
69	2	4	12	50	174	300	292	303	299	165	31	8
70	2	4	12	51	171	293	291	299	292	167	31	8
71	3	4	12	51	171	291	292	299	290	168	31	8
72	3	4	13	51	170	287	292	297	287	169	31	7
73	3	3	13	52	169	284	293	296	284	170	31	7
74	4	1	9	38	168	316	351	328	359	209	49	7
75	3	1	9	39	183	324	352	321	374	268	41	5
76	4	1	10	39	175	328	365	340	374	218	51	7
77	4	1	9	39	180	323	358	328	372	243	44	6
78	4	1	10	40	179	327	361	337	374	234	47	7
79	4	1	10	40	175	330	363	344	373	222	50	7
80	4	1	10	44	182	319	347	328	361	246	41	6
81	4	5	17	72	256	368	359	401	378	188	39	10
82	4	2	12	52	180	302	329	322	330	231	39	7
83	5	5	19	75	268	383	382	427	390	196	44	10
84	4	5	17	67	240	359	358	395	364	183	41	9
85	6	5	20	84	295	416	410	464	428	234	49	10
86	3	5	15	58	207	332	328	354	335	172	36	9

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
87	3	4	13	52	182	309	303	318	309	168	32	8
88	2	4	12	51	177	302	296	308	302	167	31	8
89	2	4	12	52	170	289	286	294	285	164	31	8
90	2	4	13	54	170	287	288	296	281	165	31	8
91	3	1	9	36	172	321	347	324	366	231	48	7
92	3	2	8	42	172	305	331	348	379	237	44	5
93	2	1	8	40	188	310	326	329	383	301	37	3
94	3	0	9	45	197	311	325	295	368	332	25	3
95	3	0	9	46	197	306	317	292	364	337	22	2
96	3	2	8	50	162	275	298	318	333	208	28	6
97	3	3	9	51	143	267	291	335	315	126	34	9
98	3	3	9	50	142	275	293	348	321	99	42	10
99	3	1	9	41	182	316	342	315	365	268	37	5
100	3	1	9	53	171	274	288	300	321	238	19	6
101	3	3	9	55	141	260	280	328	297	116	29	10
102	3	3	9	49	144	276	300	346	328	119	41	9
103	3	2	9	57	152	260	276	310	292	161	20	9
104	4	3	9	58	143	254	272	318	281	118	23	10
105	3	3	9	54	138	263	275	336	292	82	33	11
106	3	2	10	56	172	275	292	299	308	222	21	7
107	3	1	10	50	185	298	318	305	338	260	28	6
108	3	1	10	49	185	302	325	309	342	257	31	6
109	3	1	10	51	184	295	315	303	336	259	27	6
110	3	1	9	51	184	293	312	300	335	265	25	6
111	2	3	12	64	209	321	311	355	348	156	34	11
112	2	4	13	63	220	337	322	355	350	172	33	10
113	4	3	13	54	178	295	325	320	320	223	39	7
114	4	3	13	57	177	285	318	316	307	210	38	8
115	3	5	13	56	173	288	298	306	289	168	34	9
116	3	4	13	59	174	280	308	312	292	172	36	9
117	2	4	13	56	173	289	295	304	288	168	34	9
118	3	4	13	57	172	288	293	305	282	168	33	8
119	2	4	12	56	183	302	303	318	306	162	33	9
120	3	1	9	37	178	324	354	325	372	250	44	6
121	4	1	9	37	171	319	353	328	364	222	48	7
122	3	1	10	45	186	312	338	315	358	264	35	6
123	3	2	10	53	180	286	306	301	322	241	25	7
124	4	2	11	47	182	314	340	326	351	245	40	7
125	4	4	12	60	174	272	311	310	295	182	34	9
126	3	1	10	50	183	295	316	305	336	258	28	6
127	4	1	10	40	176	330	363	344	373	222	50	7
128	4	2	11	51	184	305	332	319	338	243	38	7
129	4	1	11	44	176	321	348	337	357	231	45	7
130	5	5	19	90	314	423	409	467	440	243	45	11

Unidad	ENE (mm)	FEB (mm)	MAR (mm)	ABR (mm)	MAY (mm)	JUN (mm)	JUL (mm)	AGO (mm)	SEP (mm)	OCT (mm)	NOV (mm)	DIC (mm)
131	3	4	14	67	230	343	333	369	357	174	35	10
132	4	1	9	39	175	326	364	338	373	220	50	7
133	4	1	11	45	181	319	346	331	358	243	42	7
134	4	1	11	44	177	322	347	337	359	235	45	7
135	5	4	19	90	315	417	403	461	435	234	43	10
136	4	2	12	50	177	306	332	328	335	230	41	7
137	5	5	19	90	314	425	410	468	442	247	46	11
138	4	3	13	57	177	286	319	316	308	211	38	8
139	6	5	19	85	297	432	417	472	447	265	51	11
140	4	1	10	44	183	319	348	327	362	249	41	6
141	4	1	10	43	182	321	350	330	364	246	42	7
142	4	1	10	40	178	327	362	337	374	232	47	7
144	5	4	19	88	308	409	399	454	425	223	43	10
145	5	4	19	91	318	421	406	465	440	241	44	11
146	5	5	19	90	312	428	412	470	445	253	47	11
143	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Coefficientes por textura, uso y recarga potencial:

Unidad	Densidad aparente (g/cm ³)	Punto de marchitez permanente (%)	Capacidad de campo (%)	Coefficiente de infiltración ()	Coefficiente follaje ()	Profundidad de raiz (m)	Recarga potencial (mm/año)
1	1.50	6.00	14.00	1.00	0.12	0.98	687
2	1.35	13.00	27.00	0.82	0.12	0.61	183
3	1.25	16.97	34.95	0.51	0.12	1.20	27
4	1.25	16.86	34.74	0.51	0.12	1.20	28
5	1.42	10.44	22.81	0.50	0.12	1.14	66
6	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.20	0
7	1.31	14.86	31.02	0.51	0.12	1.20	51
8	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.20	0
9	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.20	34
10	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.20	0
11	1.40	11.31	24.19	0.51	0.12	1.20	73
12	1.34	13.55	28.59	0.51	0.12	1.19	0
13	1.25	16.91	34.83	0.51	0.12	1.19	0
14	1.35	13.00	27.00	0.51	0.12	1.20	51
15	1.35	13.09	27.18	0.51	0.12	1.20	0
16	1.29	15.52	32.04	0.49	0.12	1.06	0
17	1.40	10.71	22.76	0.44	0.12	0.85	0
18	1.26	16.72	34.44	0.45	0.12	0.77	0
19	1.25	17.00	35.00	0.52	0.20	2.50	0
20	1.36	12.46	26.00	0.44	0.12	1.04	0
21	1.35	13.00	27.00	0.44	0.13	1.25	0
22	1.50	6.04	14.09	0.48	0.12	0.93	9
23	1.25	17.00	35.00	0.38	0.12	0.25	17
24	1.25	17.00	35.00	0.43	0.12	1.00	0
25	1.25	17.00	35.00	0.43	0.12	1.00	0
26	1.27	16.23	33.56	0.59	0.12	1.20	45
27	1.25	17.00	35.00	0.46	0.12	0.25	9
28	1.25	17.00	35.00	0.48	0.12	0.67	0
29	1.25	17.00	35.00	0.50	0.12	1.00	0
30	1.25	17.00	35.00	0.49	0.12	0.77	0
31	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.00	0
32	1.25	17.00	35.00	0.51	0.12	1.01	0
33	1.25	17.00	35.00	0.67	0.12	1.20	199
34	1.25	17.00	35.00	0.67	0.12	1.17	137
35	1.25	17.00	35.00	0.67	0.12	1.20	75
36	1.35	13.00	27.00	0.60	0.12	1.00	133
37	1.39	11.69	24.86	0.67	0.12	1.18	177
38	1.33	13.72	28.46	0.65	0.12	1.21	115
39	1.37	11.92	25.00	0.58	0.12	1.06	1
40	1.35	13.00	27.00	0.67	0.12	1.20	35

Unidad	Densidad aparente (g/cm ³)	Punto de marchitez permanente (%)	Capacidad de campo (%)	Coefficiente de infiltración ()	Coefficiente follaje ()	Profundidad de raíz (m)	Recarga potencial (mm/año)
41	1.30	15.13	31.36	0.66	0.12	1.19	91
42	1.25	17.00	35.00	0.59	0.13	1.00	37
43	1.25	17.00	35.00	0.59	0.12	1.00	13
44	1.25	17.00	35.00	0.53	0.12	0.25	40
45	1.25	17.00	35.00	0.63	0.12	1.11	38
46	1.25	17.00	35.00	0.58	0.12	1.00	6
47	1.25	17.00	35.00	0.58	0.12	1.00	3
48	1.25	17.00	35.00	0.58	0.12	1.00	7
49	1.25	17.00	35.00	0.58	0.12	0.95	14
50	1.32	14.07	29.14	0.97	0.12	1.17	133
51	1.26	16.48	34.03	0.97	0.12	1.20	116
52	1.34	13.50	28.00	0.97	0.12	1.18	147
53	1.43	10.00	22.00	0.95	0.12	0.97	118
54	1.35	13.00	27.00	0.91	0.12	1.03	159
55	1.25	17.00	35.00	0.42	0.12	0.25	12
56	1.28	15.79	32.75	0.82	0.12	1.18	155
57	1.33	13.95	29.15	0.82	0.12	1.19	137
58	1.49	6.74	15.47	0.84	0.12	0.50	525
59	1.46	8.34	18.68	0.87	0.12	1.00	537
60	1.25	17.00	35.00	0.86	0.12	1.04	273
61	1.25	17.00	35.00	0.88	0.12	1.09	290
62	1.25	17.00	35.00	0.84	0.12	1.00	254
63	1.39	10.99	23.33	0.94	0.12	0.85	359
64	1.35	12.95	26.91	0.97	0.12	1.00	333
65	1.49	6.25	14.46	0.89	0.12	0.87	340
66	1.62	7.29	10.74	0.90	0.14	0.88	934
67	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	584
68	1.25	17.00	35.00	0.97	0.12	1.16	510
69	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	533
70	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	517
71	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	522
72	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	517
73	1.25	17.00	35.00	0.99	0.12	1.20	512
74	1.43	10.00	22.00	0.97	0.12	0.46	773
75	1.40	11.23	24.05	1.00	0.12	1.20	766
76	1.68	9.00	4.00	1.00	0.12	1.20	736
77	1.43	10.07	22.09	1.00	0.12	1.19	752
78	1.43	10.00	22.00	1.00	0.12	1.20	755
79	1.66	9.08	5.42	1.00	0.18	1.05	703
80	1.46	9.53	19.39	0.99	0.12	1.12	736
81	1.28	15.85	32.78	0.99	0.12	1.10	773
82	1.45	9.93	20.66	0.98	0.12	0.62	678

Unidad	Densidad aparente (g/cm ³)	Punto de marchitez permanente (%)	Capacidad de campo (%)	Coefficiente de infiltración ()	Coefficiente follaje ()	Profundidad de raíz (m)	Recarga potencial (mm/año)
83	1.30	15.19	31.65	0.99	0.12	1.12	773
84	1.36	12.55	26.73	1.00	0.12	1.20	929
85	1.62	5.69	12.03	1.00	0.12	1.18	955
86	1.36	12.56	26.76	1.00	0.12	1.20	773
87	1.26	16.73	34.50	0.99	0.12	1.20	603
88	1.25	17.00	35.00	1.00	0.12	1.20	578
89	1.25	17.00	35.00	1.00	0.12	1.20	452
90	1.25	17.00	35.00	1.00	0.12	1.20	442
91	1.40	11.10	24.04	0.90	0.12	1.04	626
92	1.25	17.00	35.00	0.88	0.12	0.89	200
93	1.25	17.00	35.00	0.92	0.12	1.20	192
94	1.36	12.68	26.41	0.80	0.12	0.59	503
95	1.35	13.00	27.00	0.84	0.12	0.99	267
96	1.36	12.60	26.47	0.89	0.12	1.00	157
97	1.38	11.75	24.69	0.84	0.12	0.99	178
98	1.35	13.02	27.03	0.92	0.12	1.20	168
99	1.43	9.74	21.25	0.89	0.12	0.94	600
100	1.36	12.70	26.48	0.88	0.15	1.51	225
101	1.49	6.29	14.54	0.82	0.12	0.85	206
102	1.32	14.24	29.48	0.86	0.12	0.85	184
103	1.38	11.51	24.23	0.83	0.12	0.98	181
104	1.35	13.00	27.00	0.79	0.12	0.34	178
105	1.35	13.00	27.00	0.83	0.12	0.77	129
106	1.50	6.00	14.00	0.93	0.12	0.97	445
107	1.50	6.00	14.00	0.86	0.12	0.84	492
108	1.49	6.33	14.67	0.82	0.12	0.50	486
109	1.50	6.00	14.00	0.86	0.12	0.73	496
110	1.49	6.42	14.84	0.85	0.12	0.53	499
111	1.33	13.89	28.70	0.86	0.13	1.02	457
112	1.68	9.00	4.00	1.00	0.20	1.00	674
113	1.43	10.00	22.00	0.82	0.12	0.34	454
114	1.50	6.00	14.00	0.88	0.12	1.00	447
115	1.25	17.00	35.00	0.83	0.12	1.00	241
116	1.30	14.85	30.90	0.82	0.12	0.65	290
117	1.25	17.00	35.00	0.83	0.12	1.00	239
118	1.25	17.00	35.00	0.83	0.12	1.00	234
119	1.27	16.21	33.45	0.87	0.12	1.01	487
120	1.43	10.00	22.00	0.97	0.12	1.20	724
121	1.43	10.00	22.00	0.92	0.12	0.67	691
122	1.43	10.00	22.00	0.98	0.12	1.20	664
123	1.50	6.00	14.00	0.94	0.12	0.61	558
124	1.49	6.43	14.87	0.92	0.12	1.02	627

Unidad	Densidad aparente (g/cm ³)	Punto de marchitez permanente (%)	Capacidad de campo (%)	Coefficiente de infiltración ()	Coefficiente follaje ()	Profundidad de raíz (m)	Recarga potencial (mm/año)
125	1.50	6.00	14.00	0.94	0.12	0.73	469
126	1.47	7.44	16.74	0.93	0.12	0.71	426
127	1.59	9.36	10.50	1.00	0.14	1.14	840
128	1.50	6.00	14.00	0.97	0.12	0.25	721
129	1.67	9.03	4.61	0.99	0.18	1.00	1091
130	1.52	5.76	13.40	1.00	0.12	1.20	975
131	1.64	9.45	6.63	0.99	0.19	1.00	1337
132	1.51	9.69	16.36	1.00	0.12	1.20	577
133	1.43	10.00	22.00	1.00	0.12	1.14	505
134	1.66	9.07	5.29	1.00	0.13	1.00	1114
135	1.66	8.74	4.88	1.00	0.17	1.08	1140
136	1.48	9.80	18.44	1.00	0.13	1.00	447
137	1.57	5.24	12.10	1.00	0.12	1.20	988
138	1.50	6.00	14.00	1.00	0.12	1.00	382
139	1.68	4.00	9.00	1.00	0.12	1.20	1022
140	1.43	10.00	22.00	1.00	0.12	1.20	510
141	1.43	10.00	22.00	1.00	0.12	1.20	517
142	1.44	9.97	21.43	1.00	0.12	1.19	545
144	1.63	8.10	7.00	1.00	0.20	1.01	980
145	1.51	6.16	13.46	1.00	0.12	1.20	969
146	1.67	4.16	9.40	1.00	0.12	1.20	842
143	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0

**ANEXO C: DATOS DE DISEÑO DE POZOS DE BOMBEO UTILIZADOS EN EL
MODELO**

Código	X [m]	Y [m]	z	TD	bott	Rate[m ³ /d]	Number_of_Screen	Screen_Top [m]	Screen_Bot [m]
1	460685.34	287856.57	583.89	226.76	357.13	-7336.00	1	474.89	458.89
1	460685.34	287856.57	583.89	226.76	357.13	-7336.00	2	401.89	370.89
2	461269.19	290103.77	561.96	152.40	409.56	-7291.00	1	467.75	410.95
3	460055.63	292223.97	511.02	201.17	309.85	-6338.00	1	424.02	381.02
3	460055.63	292223.97	511.02	201.17	309.85	-6338.00	2	369.02	357.02
4	460411.94	293314.05	497.64	189.00	308.64	-10675.00	1	377.64	317.64
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	1	444.04	440.99
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	2	438.20	432.20
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	3	429.20	423.20
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	4	420.20	414.20
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	5	410.50	404.40
5	460302.58	294421.78	478.20	80.00	398.20	-1063.00	6	401.36	398.31
6	460341.38	290460.07	540.47	189.00	351.47	-979.00	1	449.47	440.47
6	460341.38	290460.07	540.47	189.00	351.47	-979.00	2	415.47	385.47
6	460341.38	290460.07	540.47	189.00	351.47	-979.00	3	370.47	360.47
7	461883.02	296587.84	464.06	240.00	224.06	-2163.00	1	294.06	234.06
8	462937.83	297272.23	471.72	83.00	388.72	-163.00	1	431.72	391.72
9	461844.22	298827.98	450.22	226.00	224.22	-8390.00	1	341.22	325.22
9	461844.22	298827.98	450.22	226.00	224.22	-8390.00	2	268.22	237.22
10	460768.24	299815.76	458.58	226.00	232.58	-598.00	1	349.58	333.58
10	460768.24	299815.76	458.58	226.00	232.58	-598.00	2	276.58	245.58
11	460457.80	297614.42	451.11	107.00	344.11	-217.00	1	419.99	413.89
11	460457.80	297614.42	451.11	107.00	344.11	-217.00	2	401.69	395.59
11	460457.80	297614.42	451.11	107.00	344.11	-217.00	3	389.49	371.29
11	460457.80	297614.42	451.11	107.00	344.11	-217.00	4	365.19	352.99
12	460186.16	296252.70	457.79	80.00	377.79	-792.00	1	431.50	401.50
12	460186.16	296252.70	457.79	80.00	377.79	-792.00	2	395.50	380.50

Código	X [m]	Y [m]	z	TD	bott	Rate[m ³ /d]	Number_of_Screen	Screen_Top [m]	Screen_Bot [m]
13	458838.55	296425.56	455.59	60.00	395.59	-2681.00	1	430.46	418.26
13	458838.55	296425.56	455.59	60.00	395.59	-2681.00	2	409.12	397.12
14	458065.96	297064.09	451.00	108.51	342.49	-1039.00	1	419.88	413.78
14	458065.96	297064.09	451.00	108.51	342.49	-1039.00	2	401.58	395.48
14	458065.96	297064.09	451.00	108.51	342.49	-1039.00	3	389.38	371.18
14	458065.96	297064.09	451.00	108.51	342.49	-1039.00	4	365.08	352.88
15	455716.46	298835.03	450.72	136.55	314.17	-2632.00	1	386.72	364.72
15	455716.46	298835.03	450.72	136.55	314.17	-2632.00	2	353.72	348.72
15	455716.46	298835.03	450.72	136.55	314.17	-2632.00	3	337.72	315.72
16	454527.59	299134.90	460.79	84.00	376.79	-2181.00	1	384.59	376.79
17	453070.62	298909.12	470.67	152.40	318.27	-1739.00	1	339.67	324.67
18	451543.09	299089.04	477.47	109.00	368.47	-7.00	1	397.47	369.47
19	451059.78	301099.87	491.43	43.00	448.43	-316.00	1	461.43	451.43
20	450996.28	302045.32	510.03	182.00	328.03	-743.00	1	431.03	419.03
20	450996.28	302045.32	510.03	182.00	328.03	-743.00	2	413.03	394.03
20	450996.28	302045.32	510.03	182.00	328.03	-743.00	3	370.03	330.03
21	448982.74	294517.58	483.15	72.00	411.15	-186.00	1	458.02	445.82
21	448982.74	294517.58	483.15	72.00	411.15	-186.00	2	436.68	424.68
22	448532.94	293612.70	485.30	91.44	393.86	-264.00	1	436.54	430.30
22	448532.94	293612.70	485.30	91.44	393.86	-264.00	2	427.30	403.30
23	449030.36	291951.12	484.85	140.00	344.85	-606.00	1	448.85	430.55
23	449030.36	291951.12	484.85	140.00	344.85	-606.00	2	406.85	400.75
23	449030.36	291951.12	484.85	140.00	344.85	-606.00	3	358.85	346.65
24	453866.95	291406.07	467.57	99.06	368.51	-4103.00	1	427.43	421.56
24	453866.95	291406.07	467.57	99.06	368.51	-4103.00	2	403.95	368.51
25	453242.54	290284.24	485.06	160.00	325.06	-824.00	1	449.06	430.76
25	453242.54	290284.24	485.06	160.00	325.06	-824.00	2	407.06	400.96
25	453242.54	290284.24	485.06	160.00	325.06	-824.00	3	359.06	346.86
26	452660.45	289807.99	487.63	152.40	335.23	-239.00	1	431.23	425.13

Código	X [m]	Y [m]	z	TD	bott	Rate[m ³ /d]	Number_of_Screen	Screen_Top [m]	Screen_Bot [m]
26	452660.45	289807.99	487.63	152.40	335.23	-239.00	2	382.13	357.73
26	452660.45	289807.99	487.63	152.40	335.23	-239.00	3	351.63	338.28
27	453660.58	289294.69	485.93	170.00	315.93	-1886.00	1	429.53	423.43
27	453660.58	289294.69	485.93	170.00	315.93	-1886.00	2	380.43	356.03
27	453660.58	289294.69	485.93	170.00	315.93	-1886.00	3	349.93	336.58
28	455089.33	288246.94	504.74	100.00	404.74	-348.00	1	464.60	458.73
28	455089.33	288246.94	504.74	100.00	404.74	-348.00	2	441.12	405.68
29	452427.62	287294.44	535.90	141.00	394.90	-480.00	1	510.90	505.90
29	452427.62	287294.44	535.90	141.00	394.90	-480.00	2	480.90	430.90
29	452427.62	287294.44	535.90	141.00	394.90	-480.00	3	420.90	410.90
30	454967.99	291148.03	472.88	99.06	373.82	-29.00	1	432.74	426.87
30	454967.99	291148.03	472.88	99.06	373.82	-29.00	2	409.26	373.82
31	455351.64	290283.72	471.78	160.00	311.78	-1511.00	1	340.78	325.78
32	455889.62	291531.68	480.75	97.56	383.19	-8614.00	1	452.00	434.39
32	455889.62	291531.68	480.75	97.56	383.19	-8614.00	2	416.81	383.75
33	456815.67	292144.63	477.13	72.00	405.13	-3456.00	1	470.23	452.62
33	456815.67	292144.63	477.13	72.00	405.13	-3456.00	2	440.88	405.13
34	457014.11	290468.93	497.27	190.00	307.27	-2691.00	1	410.27	367.27
34	457014.11	290468.93	497.27	190.00	307.27	-2691.00	2	355.27	343.27
35	458279.70	290552.72	510.86	189.00	321.86	-1559.00	1	435.45	417.16
35	458279.70	290552.72	510.86	189.00	321.86	-1559.00	2	386.68	356.20
35	458279.70	290552.72	510.86	189.00	321.86	-1559.00	3	331.82	325.72
36	458641.30	289873.62	523.48	190.00	333.48	-833.00	1	448.07	429.78
36	458641.30	289873.62	523.48	190.00	333.48	-833.00	2	399.30	368.82
36	458641.30	289873.62	523.48	190.00	333.48	-833.00	3	344.44	338.34
37	458583.97	288974.03	538.85	185.00	353.85	-14312.00	1	438.85	355.85
38	459831.92	288175.87	565.09	213.00	352.09	-3226.00	1	474.09	413.09
38	459831.92	288175.87	565.09	213.00	352.09	-3226.00	2	388.09	352.09
39	458554.34	291849.71	494.46	189.00	305.46	-3962.00	1	394.46	311.46

Código	X [m]	Y [m]	z	TD	bott	Rate[m ³ /d]	Number_of_Screen	Screen_Top [m]	Screen_Bot [m]
40	459136.42	293003.29	487.86	62.50	425.36	-2598.00	1	474.52	453.12
40	459136.42	293003.29	487.86	62.50	425.36	-2598.00	2	447.02	425.85
41	458094.88	294219.50	468.48	102.11	366.37	-3336.00	1	439.73	422.12
41	458094.88	294219.50	468.48	102.11	366.37	-3336.00	2	404.54	368.76
42	457362.86	296009.85	454.15	111.86	342.29	-2544.00	1	414.01	408.14
42	457362.86	296009.85	454.15	111.86	342.29	-2544.00	2	390.53	344.15
43	453185.84	293095.53	465.47	118.87	346.60	-999.50	1	425.33	419.46
43	453185.84	293095.53	465.47	118.87	346.60	-999.50	2	401.85	355.47

ANEXO D: MENSAJES DE RESULTADOS EN LA EJECUCIÓN DEL MODELO

WITH NEWTON FORMULATION
 MODFLOW-NWT-SWR1
 U.S. GEOLOGICAL SURVEY MODULAR FINITE-DIFFERENCE GROUNDWATER-FLOW MODEL
 Version 1.1.2 09/15/2016 Prec:single, x64 (64-bit)
 BASED ON MODFLOW-2005 Version 1.11.0 08/08/2013
 SWR1 Version 1.04.0 09/15/2016
 OpenMP-parallelized using 8 CPU

Using NAME file: C:\Users\Alejandro\Documents\Visual
 Run start date and time (yyyy/mm/dd hh:mm:ss): 2022/07/11 18:15:30
 Period: 1 Step: 1
 Convergence: Residual: -3.0116910E-001 Max Change: -1.0104730E-003
 Elapsed run time: 2 Minutes, 30.594 Seconds
 Run end date and time (yyyy/mm/dd hh:mm:ss): 2022/07/11 18:18:00
 Times 0... : Total CPU-times for NP= 1 process
 time 1 = 72.3 sec.
 time 0 = 146.0 sec.
 WallTime: 150.6 Total CPU_time: 146.0 sec.
 OpenMP-parallelized using 8 CPU

Extracting mass balance information...

VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 1, STRESS PERIOD 1

CUMULATIVE VOLUMES		L**3	RATES FOR THIS TIME STEP		L**3/T
IN:			IN:		
---			---		
STORAGE =	0.0000		STORAGE =	0.0000	
CONSTANT HEAD =	43372.3477		CONSTANT HEAD =	43372.3477	
WELLS =	0.0000		WELLS =	0.0000	
RECHARGE =	16061.1855		RECHARGE =	16061.1855	
SPECIFIED FLOWS =	492978.3438		SPECIFIED FLOWS =	492978.3438	
TOTAL IN =	552411.8750		TOTAL IN =	552411.8750	
OUT:			OUT:		
----			----		
STORAGE =	0.0000		STORAGE =	0.0000	
CONSTANT HEAD =	0.0000		CONSTANT HEAD =	0.0000	
WELLS =	552448.5625		WELLS =	552448.5625	
RECHARGE =	0.0000		RECHARGE =	0.0000	
SPECIFIED FLOWS =	0.0000		SPECIFIED FLOWS =	0.0000	
TOTAL OUT =	552448.5625		TOTAL OUT =	552448.5625	
IN - OUT =	-36.6875		IN - OUT =	-36.6875	
PERCENT DISCREPANCY =	-0.01		PERCENT DISCREPANCY =	-0.01	

	TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP		1 IN STRESS PERIOD		1
	SECONDS	MINUTES	HOURS	DAYS	YEARS
TIME STEP LENGTH	86400.	1440.0	24.000	1.0000	2.73785E-03
STRESS PERIOD TIME	86400.	1440.0	24.000	1.0000	2.73785E-03
TOTAL TIME	86400.	1440.0	24.000	1.0000	2.73785E-03

Compiling output data...
 Processing heads output...
 Processing drawdown output...
 Processing budget output...
 Processing water table output...
 ***** The run was successful. *****