



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PROGRAMA DE POSGRADO EN CIENCIAS DE LA TIERRA

**MODELACIÓN Y SIMULACIÓN HIDRODINÁMICA DEL
SISTEMA ACUÍFERO ZAMORA, EN MICHOACÁN MÉXICO.**

T E S I S

QUE COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE:
(MAESTRO EN CIENCIAS DE LA TIERRA)
(AGUAS SUBTERRÁNEAS)

P R E S E N T A

FELIPE DE JESÚS ARMAS VARGAS

JURADO EXAMINADOR

Director de tesis: Dr. Oscar A. Escolero Fuentes.
Presidente: Dr. Tomás González Morán.
Vocal: Dra. Graciela Herrera Zamarrón.
Suplente: Dra. Blanca Lucía Prado Pano.
Suplente: Dr. Mario Rebolledo Vieyra.



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Dedico este trabajo:

*Al DIOS de mis Padres (y mío),
por la oportunidad de haber nacido
y la dicha de haberme dado una familia*

A mi Papá:

*HERMILO ARMAS BALLESTEROS
Con eterno agradecimiento, amor y
respeto a quien me enseñó el camino siempre
en beneficio de mi superación.*

A mi Mamá:

*LUISA VARGAS CORONA
Por el amor y apoyo que incondicionalmente
me ha brindado, así como enseñarme
a caminar y ser agradecido con la vida.*

A mis Hermanos:

*SERGIO ROBERTO,
LUÍS ROMÁN y JUAN ANTELMO
por ser mis queridos hermanos.*

A mi familia directa e indirecta:

*que de alguna forma han influido en mi
formación personal.*

A mis distintos y distinguibles Amigos:

*quienes de alguna forma
me brindaron su ayuda, su consejo, su experiencia y
me demostraron su gran afecto y cariño.*

A mi Maestro Asesor y Guía:

OSCAR ARNOLDO ESCOLERO FUENTES
Con absoluto respeto, admiración y agradecimiento, por
brindarme su confianza y tenerme fe, para la realización
y culminación del presente trabajo.

A la Universidad Nacional Autónoma de México:

Por darme la valiosa oportunidad
de conocer y aprender de las fuentes de sabiduría
cual pozo surgente, brota de esta gran institución.

con gratitud al Posgrado en Ciencias de la Tierra y
al Instituto de Geología, al tenerme la paciencia de un santo.

Al:

CONACYT por la beca; así como a las dependencias de la CONAGUA
(en el Edo. de Michoacán y DF); a las comunidades visitadas por su tiempo y
gran hospitalidad, así como al Dr. Víctor Hugo Garduño de la UMSNH y a la
Dra. Martha A. Velázquez Machuca de la COEFREM, por el apoyo brindado.

Al Comité de evaluación:

ELOISA DOMÍNGUEZ MARIANI
LORENZO VÁZQUEZ SELEM

y a los Honorables Miembros del Jurado:

Dra. BLANCA LUCÍA PRADO PANO
Dra. GRACIELA HERRERA ZAMARRÓN
Dr. MARIO REBOLLEDO VIEYRA
Dr. TOMÁS GONZÁLEZ MORÁN

Muchas Gracias!

CONTENIDO

| | |
|--|-----------|
| RESUMEN | 11 |
| INTRODUCCIÓN | 16 |
| TRABAJOS PREVIOS. | 16 |
| GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO | 17 |
| Localización y vías de acceso | 17 |
| Descripción Física | 18 |
| Edafología | 18 |
| Hidrología | 20 |
| Distrito de Riego | 21 |
| Aguas Residuales | 23 |
| Clima | 25 |
| MARCO GEOLÓGICO. | 26 |
| Unidades Estratigráficas | 27 |
| Terciario inferior andesítico (Tia) | 27 |
| Terciario superior basáltico (Tbs) | 27 |
| Basaltos y tobas del cuaternario (Qbt) | 28 |
| Sedimentos aluviales (Qla y Qal) | 28 |
| Geología Superficial. | 30 |
| Fisiografía | 32 |
| Geomorfología | 32 |
| MARCO HIDROGEOLÓGICO | 33 |
| Características hidrogeológicas del acuífero | 35 |
| Acuífero Superior | 35 |
| Acuífero Principal | 36 |
| Acuífero Profundo | 37 |
| Basamento | 37 |
| Indicadores de sistemas de flujo | 38 |
| Zonas de Recarga y Descarga | 38 |
| Hidrografía | 40 |
| Manantiales | 41 |
| Pozos de extracción | 43 |
| Piezometría | 44 |

| | |
|--|-----------|
| Profundidad al Nivel Estático | 45 |
| Elevación del Nivel Estático | 45 |
| Evolución del Nivel Estático | 48 |
| Relación abatimiento-recuperación y tasa de cambio | 48 |
| Flujo subterráneo en el sistema acuífero. | 50 |
| OBJETIVOS | 51 |
| General | 51 |
| Particulares | 51 |
| METODOLOGÍA | 52 |
| Pero antes; ¿Qué necesitamos saber de un modelo de simulación? | 52 |
| Estructura para la realización de Modelos Hidrodinámicos. | 53 |
| Formulación del Modelo Matemático. | 56 |
| Flujo en régimen Estacionario. | 57 |
| Flujo en régimen Transitorio. | 58 |
| Resolución de las ecuaciones generales de flujo. | 58 |
| Modelo Matemático (Modflow-2000) | 60 |
| DESARROLLO Y RESULTADOS | 63 |
| MODELO CONCEPTUAL. | 63 |
| Área a modelar del sistema acuífero Zamora | 63 |
| Capas del modelo | 64 |
| Balance Hidrogeológico. | 66 |
| Aspectos hidrológicos a simular. | 69 |
| Ríos | 69 |
| Recarga | 69 |
| Condiciones de frontera | 69 |
| Pozos de extracción | 70 |
| Manantiales | 70 |
| Evapotranspiración | 71 |
| Carga Hidráulica | 71 |
| Delimitación del modelo (celdas activas e inactivas) | 72 |
| IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO | 72 |
| MODELO EN RÉGIMEN ESTACIONARIO (SS) | 74 |
| Calibración en régimen estacionario. | 75 |
| MODELO EN RÉGIMEN TRANSITORIO (TR). | 78 |
| Calibración en régimen transitorio. | 79 |
| Periodo de simulación 1977 a 1999. | 81 |
| Periodo de simulación 1999 a 2007. | 82 |

| | |
|---|------------|
| SIMULACIÓN DE ESCENARIOS | 86 |
| Análisis y descripción de resultados de simulación | 87 |
| - Escenario 1 (Statu Quo)..... | 90 |
| - Escenario 2 (Inercial) | 91 |
| - Escenario 3 (Reducción del volumen de extracción) | 91 |
| - Escenario 4 (Efecto Cambio Climático) | 92 |
| ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD | 96 |
| CONCLUSIONES. | 101 |
| REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS. | 103 |
| ANEXO | 111 |

Índice de Figuras

| | |
|---|----|
| Figura 1. Localización geográfica del área de estudio. | 17 |
| Figura 2. Delimitación del acuífero Zamora, subcuencas. | 26 |
| Figura 3. Sección geológica con base en sondeos eléctricos verticales A-A' | 29 |
| Figura 4. Sección geológica con base en sondeos eléctricos verticales B-B' | 30 |
| Figura 5. Geología superficial de la cuenca Río Duero (sistema acuífero Zamora). | 31 |
| Figura 6. Sección esquemática de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema acuífero Zamora. | 34 |
| Figura 7. Modelo Digital del Terreno que ilustra las zonas de recarga y descarga del sistema acuífero Zamora | 39 |
| Figura 8. Variación anual del bombeo en el sistema acuífero Zamora. | 43 |
| Figura 9. Volumen de extracción anual acumulado en el sistema acuífero Zamora | 44 |
| Figura 10. Isolíneas de elevación de nivel estático, mes de marzo 1977. | 47 |
| Figura 11. Isolíneas de elevación de nivel estático, 1999. | 47 |
| Figura 12. Isolíneas de elevación de nivel estático, mes de marzo 2007. | 48 |
| Figura 13. Protocolo para establecer un modelo de simulación hidrodinámica | 55 |
| Figura 14. Balance de masa en un elemento diferencial de acuífero. | 57 |
| Figura 15. Mallado de celdas en diferencia finitas (bloques centrados). | 61 |
| Figura 16. Delimitación del área a modelar dentro de la cuenca Río Duero | 64 |
| Figura 17. Esquema tridimensional de las capas que integran el sistema acuífero Zamora. | 65 |
| Figura 18. Vista en planta de las celdas activas o mallado a modelar | 72 |
| Figura 19. Implementación del sistema acuífero Zamora a Modflow 2000. | 73 |
| Figura 20. Calibración final y balance hidrogeológico en régimen estacionario, antes de 1977 | 76 |
| Figura 21. Modelo tridimensional del sistema acuífero Zamora (estado estacionario). | 78 |
| Figura 22. Calibración final y balance hidrogeológico en régimen transitorio, 2007 | 80 |
| Figura 23. Comparación entre líneas equipotenciales de nivel estático, 1999. | 81 |
| Figura 24. Comparación entre líneas equipotenciales de nivel estático, 2007. | 82 |
| Figura 25. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 1999 | 84 |
| Figura 26. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2007 | 85 |
| Figura 27. Mapa que muestra el bombeo que actualmente se mantiene operando en la región. | 88 |
| Figura 28. Sección A-A' que muestra la comparación entre las elevaciones de nivel estático | 89 |
| Figura 29. Diferencia entre la elevación de nivel estático 2007 (ENE) y los niveles simulados hasta el año 2030. | 90 |
| Figura 30. Elevación del nivel estático, escenario 1 (capa 2) | 94 |
| Figura 31. Elevación del nivel estático, escenario 2 (capa 2). | 95 |
| Figura 32. Elevación del nivel estático, escenario 3 (capa 2). | 95 |
| Figura 33. Elevación del nivel estático, escenario 4 (capa 2). | 96 |

| | |
|--|----|
| Figura 34. Análisis de sensibilidad para cargas hidráulicas calibradas del año 2007 | 97 |
| Figura 35. Análisis de sensibilidad para cargas hidráulicas del escenario 1 | 98 |

Índice de Tablas

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Distribución de los municipios que abarcan al DR-061 (CNA, 2007) | 22 |
| Tabla 2. Población total parcial por municipio y volumen de agua residual generado para el año 2000. | 23 |
| Tabla 3. Dificultades que presentan los módulos del Distrito de Riego 061. | 24 |
| Tabla 4. Principales sistemas de saneamiento para el agua residual. | 25 |
| Tabla 5. Transmisividades promedios representativas del acuífero superior (SARH, 1977) | 36 |
| Tabla 6. Características físicas del Río Duero (Modificado de Ramos, 1989). | 41 |
| Tabla 7. Distribución municipal y del caudal de descarga, de los 71 manantiales de la región. . | 42 |
| Tabla 8. Evolución y razón de cambio del nivel estático en el acuífero Zamora. | 49 |
| Tabla 9. Ventajas y desventajas de los métodos numéricos | 59 |
| Tabla 10. Características geológicas de las capas que componen al sistema acuífero | 65 |
| Tabla 11. Componentes del balance hidrogeológico, en función del modelo conceptual. | 67 |
| Tabla 12. Recarga total estimada distribuida en función de los términos más importantes | 68 |
| Tabla 13. Descarga total estimada distribuida en función de los términos más importantes. . . . | 68 |
| Tabla 14. Pozos de extracción a simular, durante los periodos de esfuerzos asignados. | 70 |
| Tabla 15. Aspectos hidrológicos asignados, en la integración del balance hidrogeológico | 73 |
| Tabla 16. Estimación de las componentes principales del balance hidrológico regional | 77 |
| Tabla 17. Comparativo entre los años de ajuste y aceptación del modelo de simulación | 86 |
| Tabla 18. Componentes del balance hidrogeológico a implementar en escenario 4. | 93 |

ANEXO (Figuras y Tablas)

| | |
|--|-----|
| Figura A. Ubicación de los módulos de riego que componen el Distrito de Riego 061, además de la distribución de los principales manantiales al sureste del valle de Zamora. | 111 |
| Figuras B1 a B6. Variación anual de niveles estáticos, representativos de cada municipio | 112 |
| Figura C. Pozos de observación sobre la zona de estudio, indicando la falta de continuidad en cuanto al seguimiento del nivel estático. | 113 |
| Figura D. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 1. | 113 |
| Figura E. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 2. | 114 |
| Figura F. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 3. | 114 |
| Tabla A. Proyección población para el periodo 2000-2030. | 111 |

Acrónimos

ALHSUD: Asociación Latinoamericana de Hidrología Subterránea para el Desarrollo.
ASCE: American Society of Civil Engineers, U.S.
BANDAS: Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales, IMTA México.
CEAMAEM: Comisión Estatal del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos, México.
CEM: Continuo de Elevaciones Mexicano, INEGI.
CFE: Comisión Federal de Electricidad, México.
CIDEM: Centro de Investigaciones y Desarrollo del Estado de Michoacán.
CIRA: Centro Interamericano de Recursos del Agua, México.
CNA: Comisión Nacional del Agua, ahora CONAGUA, México.
COEFREM: Consejo Estatal de la Fresa de Michoacán, México.
CSIRO: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation, Australian Government.
CVMG: Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato.
EA: Environment Agency, U.K Gov.
EPA: Environmental Protection Agency, U.S Gov.
ERIC III: Extractor Rápido de Información Climatológica, v.3., IMTA México.
FVTM: Faja Volcánica Transmexicana.
GDF: Gobierno del Distrito Federal, México.
GEI: Gases de Efecto Invernadero.
GSN: Geological Survey of Norway.
GW•MATE: Groundwater Management Advisory Team.
IAH: International Association of Hydrogeologists.
IGEOF: Instituto de Geofísica, UNAM México.
IGMC: International Groundwater Modeling Center.
IGME: Instituto Geológico y Minero de España.
IMTA: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
INEGI: Instituto Nacional de Estadística y Geografía, México.
ITC: International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation.
MAE: Mean Absolute Error.
ME: Mean Error.
MODFLOW: MODular three-dimensional finite-difference ground-water FLOW model.
MPI ECHAM 5: German Climate Research Center /Hamburg Model.
NRCUS: National Reserch Council of U.S.
NRMS: Normalised Root Mean Squared Error.
PEMBU-CCA-UNAM: Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario-Centro de Ciencias de la Atmósfera-UNAM, México.
PEST: Parameter ESTimation.
PLASM: Prickett Lonquist Aquifer Simulation Program.
REPDA: Registro Público de Derechos del Agua.
RMSE o RMS: Root Mean Squared Error.
SARH: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, México.
TWDB-GAM: Texas Water Development Board - Groundwater Availability Modeling.
UAEM: Universidad Autónoma del Estado de México.
UCODE: Computer Codes for Universal Sensitivity Analysis, Calibration and Uncertainty Evaluation.
UNAM: Universidad Nacional Autónoma de México.
USGS: United States Geological Survey.
UTM: Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oax. México.

“...el hidráulico ha de ser, ante todo, algo así como un psicólogo del agua, conocedor profundo de su naturaleza... no es con violencia como se pueden hurtar sus secretos, sino con amor; con esa comprensión que se deriva de una larga convivencia con ella, tan larga que ni la vida del individuo, ni la de muchas generaciones es suficiente...”

Enzo Levi^[1]

RESUMEN

Se propone un modelo de simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, para conocer el funcionamiento piezométrico en la región, a través del bombeo en pozos. El acuífero se encuentra al noroeste del estado de Michoacán (México) y esta enclavado en la cuenca del Río Duero, formada por una serie de planicies escalonadas, pequeños grupos de volcanes constituidos principalmente por derrames basálticos; flujos piroclásticos y depósitos sedimentarios.

Actualmente los modelos matemáticos se utilizan para analizar y evaluar cualquier situación, empleando un conjunto de ecuaciones diferenciales que simulan la relación estímulo-respuesta en un sistema. Este modelo realizado en Modflow-2000 reproduce en condiciones transitorias la actividad del bombeo de 1977 hasta el año 2007. Para calibrar el modelo se utilizaron mapas de isolíneas.

Los escenarios simulados hasta el año 2030 como: extracción permanente, tendencia inercial a la extracción y efecto del cambio climático, presentaron en común abatimientos en los niveles piezométricos localizados principalmente en los valles centrales de Zamora y Tangancícuaro. Mientras que el escenario, reducción del volumen de extracción presentó condiciones favorables de recuperación piezométrica en toda la región.

El modelo reproduce aceptablemente las condiciones naturales del sistema acuífero. Actualmente, existe actividad del bombeo en toda la región, por el momento no se encuentra sometido a sobreexplotación; no obstante, será necesario tomar medidas de protección. El modelo estará sujeto a actualizaciones en función de la disponibilidad de los datos.

ABSTRACT

A hydrodynamic simulation model is proposed for the Zamora aquifer system, to understand the hydrogeological behavior in the region through the pumping wells. The aquifer is located northwest of the state of Michoacán (Mexico), belonging to the Rio Duero basin, formed by a series of staggered plains, small groups of volcanoes composed basalt flows, pyroclastic flows and sedimentary deposits.

Mathematical models currently used to analyze and evaluate any pumping scheme, using a set of differential equations that simulate the stimulus-response relationship in a system. This model implemented in Modflow-2000 reproduces transient conditions of the pumping activity since 1977 to 2007. To calibrate the model we used piezometric isoline maps.

The simulated scenarios through 2030, as: *permanent extraction*, *inertial extraction* and *effect of climate change*, presented jointly drawdown in the piezometric levels located mainly in the central valleys of Zamora and Tangancícuaro. While stage where *reducing volumes of extraction*, presented conditions favorable piezometric recovery throughout the region.

The model reproduces acceptably natural conditions of the aquifer system. There is currently activity pumping in the region, is not subject to overexploitation, but will must take protective measures. The model is subject to updates based on data availability.

iiiAGUAS!!!

*Voz de alerta que se daba en la ciudad de México
sin drenaje durante La Colonia, para avisar
al transeúnte que un bacín sería vaciado en el arroyo.
Permanece como advertencia ante amenazas o peligros.
Anónimo*

Problemática:

¿De qué manera se puede contribuir al desarrollo hídrico de una cuenca?

Hipótesis:

Se puede contribuir al desarrollo hídrico mediante el uso de modelos computacionales (MODFLOW), el cual permitirá conocer por medio de simulación de escenarios (bombeo de extracción) cuales son los cuidados que se deberán tener en el recurso subterráneo.

Justificación:

El desarrollo de este modelo hidrodinámico de flujo subterráneo permitirá conocer cual es el estatus hídrico actual del sistema acuífero Zamora; además de no contar con información hidrológica reciente, misma que servirá para sustentar al modelo.

Zona de trabajo:

El sistema acuífero Zamora pertenece a la cuenca del Río Duero, ubicado al noroeste del estado de Michoacán. La geomorfología del sitio y el tipo de material geológico hacen del sistema acuífero un sitio relevante para el estudio del agua subterránea; además es un importante productor de alimentos agrícolas y pecuarios, siendo considerado el territorio más rico de todo el estado.

Breve explicación del proyecto:

Para implementar y calibrar el modelo matemático, será necesario estimar y asignar varios componentes hidrológicos, tanto superficiales como subterráneos (tales como recarga por lluvia, retornos por riego, descargas por manantiales, caudales de bombeo, aportes del acuífero al río, flujo base, entre otros); así como también el asignar las propiedades hidrogeológicas (conductividad hidráulica y coeficientes de almacenamiento) que sustentan la estructura del acuífero; además de generar configuraciones piezométricas para calibrar los años de interés.

La modelación matemática aplicada a los sistemas de agua subterránea pretende alcanzar diferentes propósitos, entre ellos conocer acerca del funcionamiento hidrológico cuando éste es sometido a diferentes condiciones, sean naturales

(sequías o inundaciones) o bien, de origen antropogénico (como el bombeo). De especial interés resulta cuando se aplican para realizar simulaciones con el objeto de contar con elementos para definir políticas de manejo (Escolero, 2004). Las simulaciones de este proyecto tendrán situaciones diversas orientadas al bombeo, como volumen de extracción permanente, incremento en el volumen de extracción, reducción en la extracción y fenómenos climáticos, con el fin de conocer a futuro el comportamiento piezométrico de la región.

El proyecto queda integrado en una primera parte orientada a la introducción del área de estudio, trabajos previos, generalidades, marco geológico e hidrogeológico, objetivos y la metodología típica para el desarrollo de modelos de flujo subterráneo. Una segunda parte condensa al desarrollo y resultados, el cual esta compuesto por evaluación de balances volumétricos para determinar los principales componentes superficiales y subterráneos, implementación y calibración del modelo en estado transitorio con simulación de escenarios hipotéticos y análisis de sensibilidad a los parámetros hidráulicos de mayor incertidumbre; y una tercera parte a conclusiones, referencias literarias y anexos.

INTRODUCCIÓN

TRABAJOS PREVIOS

En la cuenca Río Duero situada al noroeste del estado de Michoacán se han realizado los siguientes trabajos:

En 1977 la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos (SARH) encomendó a la empresa consultora Servicios Geológicos realizar el “Estudio geohidrológico de evaluación y censo en el estado de Michoacán”, enfocado a determinar el volumen de recarga del acuífero, definir los mecanismos de recarga y descarga y las condiciones de explotación, así como la interrelación entre el agua subterránea y superficial.

A finales de los 80’s y 90’s, se realizaron varios trabajos que se enfocan al río Duero perteneciente a la cuenca del mismo nombre; abarcando diversos enfoques desde calidad del agua (Gómez, 1987), distribución y abundancia en la entomofauna acuática (Ramos, 1989) y caracterización limnológica (López, 1997).

La CNA (1992) encomendó a la empresa consultora Servicios, Estudios, Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, realizar el “Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del Acuífero de Zamora Michoacán”. En este trabajo se elaboró un modelo de simulación en dos dimensiones a través del programa denominado PLASM.

La CNA (2001) encomendó al Grupo de Ingeniería en Consultoría y Obras, a realizar el “Estudio de reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos de la Meseta Tarasca”. Este trabajo consistió en conocer la evolución de los niveles de agua subterránea, inducidos por causas antropogénicas y/o de origen natural.

A mediados del 2005 el Consejo Estatal de la Fresa de Michoacán (COEFREM) realizó el estudio denominado “Diagnóstico para el saneamiento del río Duero”, donde se aborda la problemática de las aguas residuales y las posibilidades de saneamiento.

GENERALIDADES DEL ÁREA DE ESTUDIO

Localización y vías de acceso

El sistema acuífero Zamora pertenece a la cuenca del Río Duero y comprende una extensión territorial de 2400 km². Se ubica entre las coordenadas 19° 42' y 20° 12' de latitud norte y 101° 54', 102° 34' de longitud oeste, al noroeste del estado de Michoacán (Figura 1).

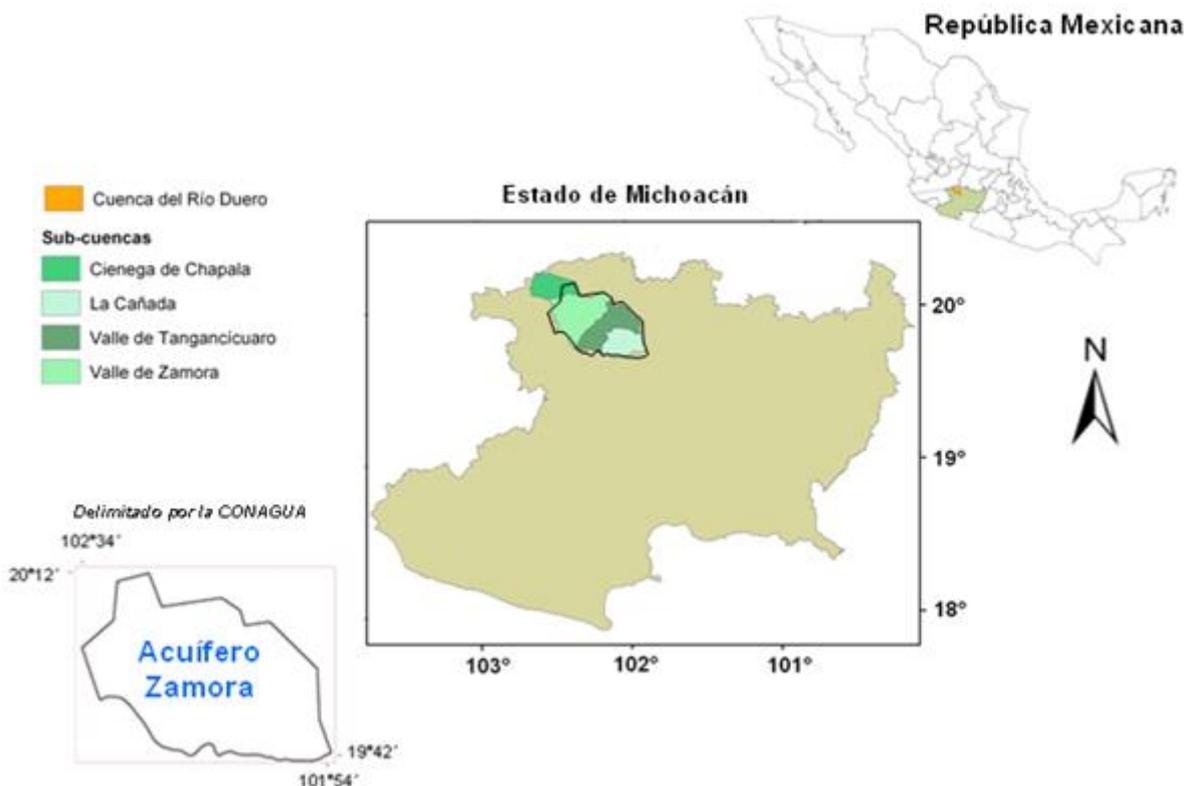


Figura 1. Localización geográfica del área de estudio.
(Modificado de Velázquez *et al.*, 2005)

Una de las principales vías de comunicación es la autopista México-Toluca hasta Atlacomulco, de ahí la carretera federal con trayectoria Maravatío-Atlacomulco, Morelia-Maravatío, Zamora-Morelia y Zamora-La Barca. Del tramo Zamora-Morelia, se deriva la carretera La Piedad de Cabadas-Uruapan y se puede llegar a los municipios de Purépero y Tlazazalca. De la carretera Zamora-La Barca, se deriva el tramo Jacona de Plancarte-Jiquilpan y se puede llegar a los municipios de Jacona, Tangamandapio y Chavinda. Para las localidades restantes como Chilchota, Tangancicuaro, Zamora e Ixtlán de los Hervores por la misma Zamora-Morelia (INEGI, 2000). Los municipios mencionados son los de mayor cobertura territorial.

La Figura 1, en el delimitado del acuífero por la CONAGUA, la parte baja de ésta originalmente abarcaba los límites de otro acuífero (ligeramente), por tal razón se optó por seguir la trayectoria de división de la Región Hidrológica Administrativa entre Lerma y Balsas (siendo que el acuífero pertenece a la región Lerma), por tal motivo este trabajo empleará en adelante el área correspondiente a 2230 km² y no a 2400 km².

Descripción Física

El distrito Zamora (integrado por nueve municipalidades) es el más rico de todos los de Michoacán, con aspecto al de un país cultivado y fértil (Velasco, 2006).

La zona de estudio (Figura 2) presenta un sentido sureste-noroeste. Los valles presentan escalonamientos con dirección NE-SW. En la región Cañada de los Once Pueblos al oriente de la cuenca se ubican los cerros con mayor altitud que van desde los 2637 a 3281 msnm (Cerro Tajejueta y Cerro La Virgen respectivamente). En esta área se ubican como principales localidades a Purépero y Carapan con altitudes variables entre los 2000 y 2200 msnm. Entre el Cerro Etucuario y San Ignacio se ubica la barranca de los Once Pueblos, labrada por el nacimiento río Chilchota con orientación este-oeste. Al salir de la barranca entra a una amplia planicie por la margen derecha el valle de Guadalupe y por la margen izquierda el valle de Tangancícuaro con una altitud promedio de 1720 msnm. La presa Urepetiro al norte del valle de Guadalupe regula las avenidas del río Tlazazalca proveniente del valle homónimo al río.

Aguas debajo de esta presa el río Tlazazalca atraviesa el valle de Tangancícuaro y se une al río Chilchota formando el río Duero, que tiene salida entre los cerros La Beata y Tamándaro con elevaciones de 2433 y 2435 msnm. Al entrar al valle de Zamora se encuentra una antigua cuenca lacustre con una altitud promedio de 1577 y 1557 msnm en la localidad de Jacona. Siguiendo la dirección SE-NW se encuentra el río Duero cauce principal de este acuífero, por la margen derecha se encuentran los cerros El Encinal, Grande, Tacari y Gacho con altitudes en metros de 2166, 2282, 2419 y 2070 respectivamente, y por la izquierda hacia el valle de Chavinda y el de Santiago Tangamandapio las elevaciones de los cerros presentan notables alineamientos. Las altitudes de estos cerros varían entre los 1808 a 2400 msnm. Finalmente al salir del valle de Zamora da comienzo la subcuenca Ciénega de Chapala con una altitud promedio de 1530 msnm sobre la localidad de Ixtlán de los Hervores. A su vez el río Duero se une al río Lerma para este desembocar al Lago de Chapala (SARH, 1977; Ramos, 1989; Velázquez *et al.*, 2005).

Edafología

Los suelos en la cuenca del Río Duero se distribuyen de la siguiente forma: para la parte sur de ésta los suelos de mayor predominio son los Andosoles (suelos típicos de la Meseta Tarasca). En la parte central (cerros Tamandaro y La Beata) y con

dirección hacia el este (cerro La Mesa) se presentan en menor extensión los suelos del tipo Luvisoles. Para los valles de Tangancícuaro, Guadalupe y las subcuencas Valle de Zamora y Ciénega de Chapala los suelos de mayor dominio son los Vertisoles.

Los Andosoles están asociados a laderas montañosas, lomeríos y colinas sobre rocas de tipo andesítico y basáltico principalmente (Cloter *et al.*, 2006). Se forman a partir de cenizas volcánicas y en condiciones húmedas-frías presentan gran porosidad; su fertilidad es buena debido al alto contenido de minerales asimilables por las plantas y se encuentran en las laderas de áreas volcánicas jóvenes y porciones planas que generalmente corresponden al fondo de cráteres (Bocco y Mendoza, 1999). Se les encuentra ocupados por vegetación templada, como bosques de pino, oyamel y encino, además de presentar problemas por las pronunciadas pendientes y ser altamente susceptibles a la erosión hídrica (FAO, 2005). Se caracterizan por ser profundos, bien drenados, negros y pardo rojizos (Cué-Bär *et al.*, 2006).

Los Luvisoles se asocian a zonas de montañas, lomeríos y colinas formados a partir de rocas basálticas y tobas ácidas y básicas, así como en laderas de conos y domos volcánicos, dentro un clima templado húmedo a húmedo semi-frío (Cloter *et al.*, 2006). Estos suelos presentan limitantes para la agricultura ya que son delgados y con alta pedregosidad. En estas zonas donde se practica la ganadería se debe tener cuidado con el sobrepastoreo, ya que son altamente susceptibles de degradación por erosión eólica e hídrica (FAO, 2005). Sobre estos suelos se desarrolla una vegetación de bosques, selva o pastizal (Gortari *et al.*, 2006).

En las planicies aluviales de la llamada “región del Bajío” se presentan con mayor dominio los Vertisoles formados a partir de depósitos de origen volcánico-clástico y material aluvial; son suelos de textura muy fina a fina que se caracterizan por un drenaje y una aireación pobre (Cloter *et al.*, 2006). Son suelos negros con abundante arcilla, se hinchan con la humedad y la superficie se caracteriza por tener grietas anchas y profundas que aparecen en época de sequía (Bocco y Mendoza, 1999). El uso principal de este suelo es agrícola, pero su dureza dificulta su manejo y con frecuencia presenta problemas de inundación y drenaje. A todo esto, tiene buenos rendimientos en el cultivo de arroz y sorgo y los más altos en la producción de granos y hortalizas de riego y temporal (CEAMAEM, 2005).

Finalmente, con menor cobertura y muy puntuales están los suelos del tipo Feozem Cambisol y Litosol.

Los Feozems pueden presentar casi cualquier tipo de vegetación en condiciones naturales. Presentan una capa superficial obscura rica en materia orgánica y nutrientes. Los usos pueden variar en terrenos planos y profundos, se utilizan para agricultura de riego o temporal con altos rendimientos; si son menos profundos y presentes en laderas y pendientes tendrán rendimientos bajos y se erosionarán con mayor facilidad. Pero bien se pueden emplear para el pastoreo o la ganadería con resultados aceptables (CEAMAEM, 2005). Se ubican al norte de las localidades de Ocumicho y Tierras Blancas municipio de Tangancícuaro; al norte de la localidad Purepero; al sureste de la localidad de Ixtlán de los Hervores y en el cerro Cuate, perteneciente mayoritariamente al suroeste del municipio de Jacona.

Los Cambisoles son suelos jóvenes y poco desarrollados, se presentan en cualquier clima menos en las zonas áridas. Pueden tener cualquier tipo de vegetación ya que se encuentra condicionada por el clima y no por el tipo de suelo, además son abundantes y se destinan a muchos usos. Los rendimientos varían de acuerdo con la subunidad de que trate. Son de moderada a alta susceptibilidad a la erosión (CEAMAEM, 2005). Se encuentran en zonas de montañas que rodean a las planicies (Cloter *et al.*, 2006). Localizándose al norte de la subcuenca Cañada de los Once Pueblos, al este de la localidad de Carapan y en la margen izquierda de los primeros 9 km del río Chilchota.

Los Litosoles son suelos poco desarrollados de escaso espesor, ocupan poca extensión y se confinan a regiones dominadas por pedregales. Es posible encontrarlos en zonas montañosas con pendientes fuertes o en terrenos con lavas (Bocco y Mendoza, 1999). Se encuentran en todos los climas y con muy diversos tipos de vegetación. Su uso depende principalmente de la vegetación que los cubre, en bosques su utilización es forestal; cuando presentan pastizales o matorrales se puede llevar a cabo algún pastoreo (CEAMAEM, 2005). Ubicándose al norte del municipio de Chavinda y al sureste de la población de Carapan.

Hidrología

La cuenca del Río Duero pertenece a la Región Hidrológica número XII, Lerma-Santiago, asimismo pertenece también a la zona hidrológica Lerma-Chapala (Ramos, 1989).

El río Duero nace cerca del poblado de Carapan en la Cañada de los Once Pueblos debido al escurrimiento de los manantiales Otacuaro, Ichan, Aricho, Ojo Chico, Cunio, Echungario Urén y Bejaren. En su margen izquierda recibe al río San Pedro que nace de los manantiales El Pedregal, Etacuaro, Cupachiro y Jungaran (López, 1997).

Guzmán *et al.* (1986) establecen que saliendo del poblado de Chilchota y en el valle de Tangancícuaro sus principales aportes provienen del río Tlazazalca por la margen derecha, con aportes de la presa Urepetiro y el Lago de Camécuaro, este último con aporte de varios manantiales perennes (Gortari *et al.*, 2006).

Al salir del valle de Tangancícuaro el río Duero ingresa al valle de Zamora. En esta zona el río es parte principal del Distrito de Riego número 061, el más grande del estado de Michoacán. Su cauce es utilizado para alimentar a la hidroeléctrica “El Platanal”, así como para irrigar los campos de cultivo. El principal aporte por la margen izquierda con el río Celio, además de recibir los desechos residuales de la ciudad de Zamora y Jacona. Como parte final del recorrido, el río Duero atraviesa la subcuenca Ciénega de Chapala antes de comunicarse con el río Lerma en las inmediaciones del poblado de Ibarra, en los límites de los estados de Michoacán y Jalisco (Velázquez *et al.*, 2005).

Correa (1974) menciona que a principios de siglo el río desembocaba en el Lago de Chapala, pero debido a obras de aprovechamiento para el riego, la desecación parcial de la Ciénega y algunas obras de desvío se ha convertido en el afluente principal del río Lerma (López, 1997).

Distrito de Riego

El Distrito de Riego 061 consta de 17,961 hectáreas aproximadamente y con al menos 4373 usuarios, estando dividido en cuatro módulos de riego (Tabla 1) (CNA, 2007).

Se localiza mayoritariamente en el valle de Zamora (anexo Figura A) cuenta con la presa Urepetiro que se ubica al oriente de este valle. Esta obra hidráulica controla las avenidas del río Tlazazalca, riega los valles de Guadalupe y los excedentes son vertidos al río Duero. A su salida del Valle de Tangancícuaro, este río es empleado para generar energía eléctrica en la central hidroeléctrica El Platanal, de la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Desde su ingreso al valle de Zamora hasta

su salida en el puente de Camucuato (hacia la Ciénega de Chapala) el caudal de este río se usa para el riego de unas 10, 500 hectáreas por la margen derecha y de 4500 hectáreas por la margen izquierda. Por otra parte los manantiales de mayor caudal se localizan en las porciones sur y oriente del distrito de riego (anexo Figura A) y son representativos de las descargas del acuífero basáltico. Este volumen descargado es aprovechado para el riego de cultivos entre otros usos (SARH, 1977; López, 1997).

Este distrito de riego (DR-061) es considerado como el más complejo de la parte centro del país con 296 km de longitud total en canales, de los cuales 49 km son de canales principales y el resto canales secundarios (Ramos, 1989).

Tabla 1. Distribución de los municipios que abarcan al DR-061 (CNA, 2007)

| No. | MODULO | MUNICIPIOS QUE ABARCA EL DISTRITO DE RIEGO 061 | SUPERFICIE REGADA, Ha |
|------------|-------------------------|---|------------------------------|
| I | P. UREPETIRO Y VERDUZCO | ZAMORA, JACONA, TANGANCICUARO Y TLAZAZALCA | 3939 |
| II | RIO NUEVO | ZAMORA, CHAVINDA, IXTLAN | 4120 |
| III | C. PEÑITAS ESTANZUELA | ZAMORA, IXTLAN, PAJACUARAN | 4742 |
| IV | C.P. CHAPARACO | ZAMORA, IXTLAN | 5213 |

El Módulo I maneja 10 canales principales distribuidos en: Urepetiro margen derecha con 8177 m de longitud y Urepetiro margen izquierda con 9340 m, más un aproximado de 49,772 m de canales sobre esta misma margen izquierda. El Módulo II incluye 8 canales entre principales y secundarios con una longitud de 70,814 m, además de los drenes "A" (16,434 m), San Agustín (2674 m), Partidas (5905 m) y del desagüe general del valle (Velázquez *et al.*, 2005).

Parte de la red hidrográfica del Módulo II es utilizada por el Modulo III. Este último se distribuye con 5 estructuras con un estimado de 42,111 m ubicados sobre la margen derecha del río Duero y por la margen izquierda se encuentran unos 49,075 m de canales. Finalmente entre los poblados San Simón y La Estanzuela el agua del río Duero se deriva hacia dos canales: canal del Cerro (13,870 m) y canal del Carbón (8323 m), junto con otros 16,592 metros de canales, así como los drenes La Plaza, El Morillo, El Carrizo, Desagüe Blanco, Vallado Viejo y la Galera que conforman la principal red hidrográfica del Modulo IV (Velázquez *et al.*, 2005).

El manejo actual del agua es complejo dentro del área de estudio, ya que existe un número no determinado de unidades de riego y se carece del conocimiento

detallado de la cuenca y de la red hidrográfica. Diferentes estudios encomendados por la CNA a empresas particulares omiten canales y no se consideran los cambios generados por el crecimiento urbano (Velázquez *et al.*, 2005).

Aguas Residuales

Gran parte de la contaminación biológica y química del río Duero tiene como origen las descargas de aguas negras domésticas e industriales (fuentes puntuales) y las actividades agrícolas (fuentes difusas) (Velázquez *et al.*, 2005).

La cantidad de agua residual generada en una población puede calcularse con base al número de viviendas con agua potable y del sistema de drenaje o alcantarillado. Jouravlev (2004) considera que el 80% del agua potable usada en servicios domésticos se transforma en agua residual. En particular para esta cuenca, no se tienen datos precisos del consumo de agua de la población. Para fines estimativos se presentan los volúmenes de aguas residuales generados en la región (Tabla 2). Se indica que estas cifras deberán ajustarse a los incrementos poblacionales en años subsecuentes (Velázquez *et al.*, 2005). En la Tabla 2 se identifica que el municipio de Zamora es el más poblado y el que genera mayor volumen de agua residual con el 50%; casi todos los municipios cuentan con drenaje para agua potable a excepción de Chilchota con el 58%, Tlazazalca y Tangancícuaro con 20 y 23% respectivamente.

Tabla 2. Población total parcial por municipio y volumen de agua residual generado para el año 2000. (Para consultar otros años de incremento poblacional se sugiere consultar anexo Tabla A; Cuadro modificado de Velázquez *et al.*, 2005)

| Municipio | Población Total [hab] | Agua potable con drenaje (% de viviendas) | Agua potable sin drenaje (% de viviendas) | Volumen de Agua Residual L/s | Volumen de Agua Residual m ³ /año |
|---------------|--------------------------|---|--|------------------------------------|--|
| Purépero | 15,666 | 90 | - | 34 | 1,056,456 |
| Chilchota | 30,711 | 36 | 58 | 37 | 1,169,986 |
| Tlazazalca | 8,830 | 75 | 20 | 17 | 526,651 |
| Tangancícuaro | 32,821 | 70 | 23 | 59 | 1,851,163 |
| Tangamandapio | 10,523 | 90 | - | 23 | 709,560 |
| Zamora | 161,918 | 96 | - | 363 | 11,434,954 |
| Jacona | 54,130 | 94 | 3 | 119 | 3,765,398 |
| Chavinda | 10,968 | 90 | 8 | 24 | 741,096 |
| Ixtlán | 14,393 | 90 | 8 | 31 | 971,309 |
| Total | 339,960 | - | - | 705 | 22,226,573 |

Fuente: Censo de población 2000. INEGI

Por razones presupuestales al ser las áreas más pobladas (Zamora-Jacona) y sin ser una muestra estadísticamente representativa, se estimo en 107 litros como el

consumo diario *per-cápita*, cifra creíble pero relativamente baja comparada con el estándar nacional de 150 (Velázquez *et al.*, 2005).

Velázquez *et al.* (2005) localizaron 102 puntos de descarga de aguas negras sobre el río Duero, canales y drenes. Prácticamente no hay punto de la red hidrográfica que escape a la contaminación por aguas residuales, con excepción de los sitios donde brotan los manantiales. Pese a ello, la dilución es un factor importante que muy posiblemente ha retardado la aparición de una crisis sanitaria en lo referente a enfermedades entéricas.

Otros problemas que enfrenta el Distrito de Riego 061 es la pérdida de áreas de cultivo por la creciente urbanización y por las actividades económicas distintas a la agricultura. El Módulo I es considerado por su ubicación geográfica afortunado, por la presencia de manantiales (Orandino, Tamándaro) caso contrario al Módulo IV, que recibe aguas residuales de las zonas conurbadas Zamora-Jacona. La Tabla 3 resume diversas problemáticas que aquejan al distrito de riego (Velázquez *et al.*, 2005). Tornándose complejo el manejo del agua dentro de la región.

Tabla 3. Dificultades que presentan los módulos del Distrito de Riego 061 (Tomado de Velázquez *et al.*, 2005)

| Problemática | Módulo de Riego |
|--|-----------------|
| Tramos de río urbanizados | I |
| Asentamientos irregulares en las áreas de mantenimiento de los canales | I |
| Contaminación del agua de riego por basura, azolves y drenaje | I, II y III |
| Escasez del agua | II y III |
| Cambios de uso de suelo | II y III |
| Inhabilitación de canales por establecimiento de fraccionamientos | II y III |
| Sin determinación precisa de responsabilidades entre módulos y distrito de riego | II y III |
| Recibe la mayor parte de sus aguas superficiales contaminadas | IV |

CNA (1988) establece que el sistema de saneamiento en la región está representado principalmente por los servicios de alcantarillado y drenaje, que generalmente descargan en la infraestructura de riego agrícola. Solo algunas poblaciones cuentan con plantas de tratamiento, aunque la mayoría de ellas opera con bajos niveles de eficiencia (Tabla 4) (Velázquez *et al.*, 2005). Sin embargo es el municipio de Zamora el único que trata al 90% el volumen de agua residual que se genera.

**Tabla 4. Principales sistemas de saneamiento para el agua residual
(Modificado de Velázquez *et al.*, 2005)**

| Tipo | Localización | Capacidad instalada L/s | Caudal tratado L/s | Eficiencia* |
|--|---------------------------|-------------------------|--------------------|----------------------|
| Lagunas de estabilización | Zamora | 495 | 330 | DBO=72% CF= 99.8% |
| Laguna de oxidación | Atacheo | - | Sin operar | |
| Aereación extendida | Central de Abastos | 6 | 4 ~ 6 | CF= 90% |
| Laguna anaerobia Laguna facultativa | Vista Hermosa | - | - | CF= 78% |
| Reactor anaerobio (tanque Imhoff) | Carapan (Chilchota) | - | - | DBO ~ 30% |
| Tanque Imhoff | Jamandúcuaro (Tlazazalca) | - | Sin operar | - |

*Medida como reducción en Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) y coliformes fecales (CF)

La Tabla 4 muestra carencias importantes en cuanto al funcionamiento adecuado de la capacidad instalada para tratar aguas negras en toda la cuenca. El municipio de Zamora (con mayor población) emite al drenaje un volumen de aguas negras de 363 l/s, pese a que su capacidad instalada es de 495 l/s, solo trata 330 l/s por medio del tratamiento lagunas de estabilización, siendo el que mejor opera con alto grado de eficiencia a nivel regional.

Clima

En la clasificación climática de Köppen modificado por García (1988), los climas predominantes en la cuenca del Río Duero son: A y C. La parte más elevada de la cuenca (2500 a 3000 msnm) en su porción sureste, se distinguen dos subtipos de climas: C(W) o clima templado subhúmedo con abundantes lluvias en verano y C(E) o clima semi-frío húmedo con lluvias en verano. En la región del río Duero el tipo de clima dominante es A(W) con tres subtipos (Velázquez *et al.*, 2005).

a) (A)C(W₂)(W), es el más húmedo de los tres. Se localiza en la Cañada de los Once Pueblos, a partir de Carapan y en gran parte del Valle de Guadalupe. La temperatura media anual varía de los 18 a 20 °C. La precipitación media anual va de los 1000 a 1200 mm (Ramos, 1989).

b) (A)C(W₁)(W), es intermedio en cuanto a humedad. Se presenta en el Valle de Guadalupe y penetra parcialmente en el Valle de Zamora. La temperatura media anual va de los 18 a 20 °C. La precipitación varía de los 800 a 1000 mm anuales (López, 1997).

c) $(A)C(W_0)(W)$ es el menos húmedo. Se presenta en la mayor parte del valle de Zamora y en la Ciénega de Chapala. La temperatura media anual es de 16 a 18 °C. La precipitación varía de los 800 a 1000 mm anuales. La región de la Ciénega de Chapala experimenta un incremento de temperatura de sur a norte con una media anual superior a 20 °C y precipitación pluvial cercana a 775 mm anuales con lluvias abundantes en verano y escasas en otoño e invierno (López, 1997).

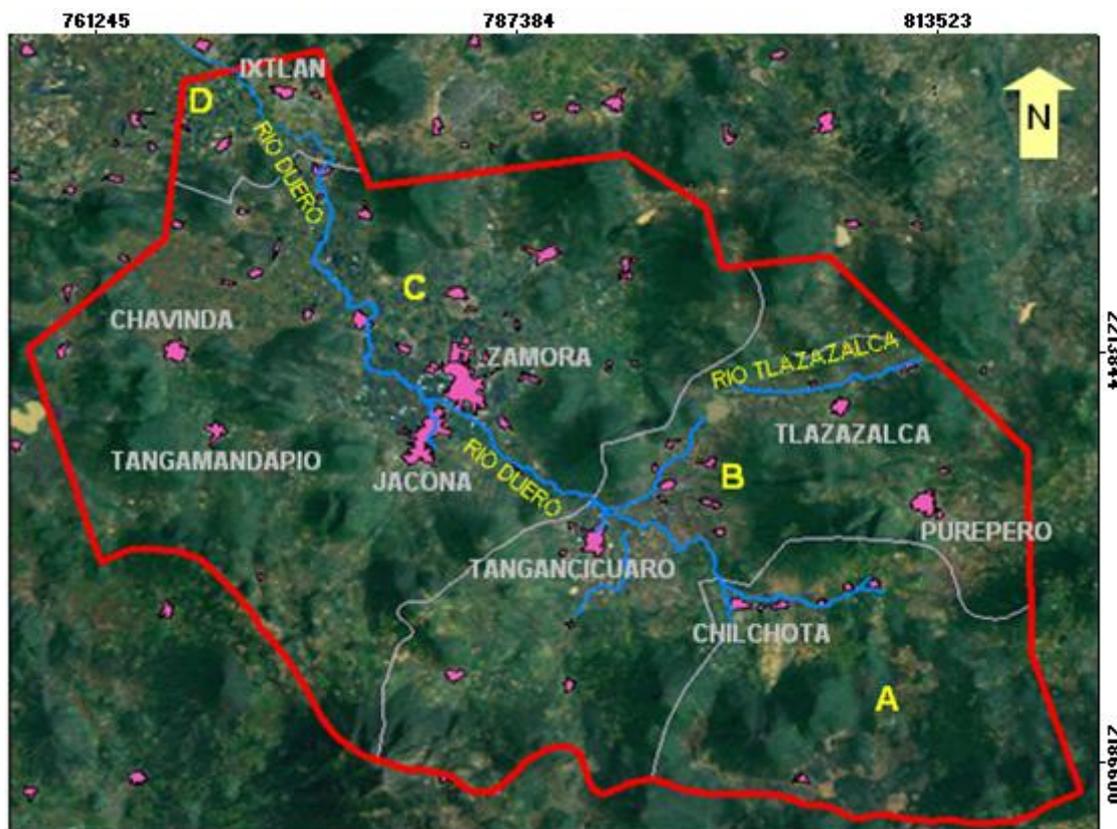


Figura 2. Delimitación del acuífero Zamora —, subcuencas: A) Cañada de los Once Pueblos, B) Valle de Tangancicuaro, C) Valle de Zamora, D) Ciénega de Chapala, río Duero (dirección SE-NW), río Celio (cruza la localidad de Jacona), río Tlazazalca (dirección NE), cabeceras municipales ■ (Imagen Satelital; ESRI, 2009).

Empleando la metodología de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1999) se obtuvo una precipitación pluvial promedio de 937 mm al año; y una evaporación promedio anual de 1720 mm (IMTA, 2005); valores representativos sólo para esta cuenca.

MARCO GEOLÓGICO

El área de estudio se localiza dentro de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) (Rivera, 1997). Su dinámica de desarrollo en el Cuaternario y en especial, en el Pleistoceno tardío-Holoceno época en que la actividad endógena se manifiesta con predominio sobre los procesos exógenos niveladores. En toda la extensión de esta

gran provincia existen lagos actuales y huellas (sedimentos) de antiguos valles fluviales, correspondientes a este periodo. Este relieve transversal consiste en una serie de planicies que se extienden desde las costas de Colima y Nayarit, hasta el estado de Veracruz (Lugo-Hubp, 1990).

Los afloramientos de esta cuenca presentan diferencias en cuanto a su estructura y composición, debido a los diversos eventos de origen volcánico. Identificándose en cuatro etapas de vulcanismo agrupados en las unidades Tia, Tbs, Qtb y Qal (SARH, 1977).

Unidades Estratigráficas

Las siguientes unidades geológicas serán descritas de la más antigua a la más reciente. El estudio hidrogeológico de 1977 contó con 40 sondeos eléctricos verticales, integrados en 6 perfiles, sumando un total de 37.5 km distribuidos en los principales valles de la región. La profundidad teórica de investigación alcanzó 520 m y se utilizó el arreglo Wenner para la separación entre electrodos.

Terciario inferior andesítico (Tia)

Está constituida por derrames y aglomeraciones de composición andesítico-basáltico, con coladas de basalto en la cima, presentando tonalidades ocre-amarillento los aglomerados, gris claro a gris mediano las andesitas y gris oscuro el basalto. Los afloramientos que conforman esta unidad son alargados y estrechos con frentes casi verticales. Los derrames andesíticos exhiben sistemas de fracturamiento y diaclasas muy cerrados, perpendiculares a sus frentes que presentan dirección E-W. Todos los afloramientos corresponden a bloques altos de fallas escalonadas que formaron y delimitaron las cuencas estructurales del área.

Terciario superior basáltico (Tbs)

Agrupar derrames, coladas, aglomerados, piroclásticos y tobas de composición basáltica y basalto-andesítico. Los tonos de las rocas, corresponden al color gris claro hasta el negro, principalmente para las coladas, derrames y algunos aglomerados; los de color ocre-rojizo predominan en derrames y coladas de aspecto brechoide, en aglomerados y en piroclásticos. De manera general estos tonos predominan en las rocas ígneas y los grises en las cimas.

Los derrames que constituyen esta unidad forman los aparatos volcánicos cerro La Beata, Tangancícuaro, Patámban, El Encinal, Ecuandureo entre otros, se encuentran fragmentados en bloques, en tanto que los derrames de la porción superior, forman los lomeríos que limitan los valles de Zamora, Chavinda y el norte de Ixtlán, se observan menos fragmentados, con sistemas de fracturas verticales, orientadas sensiblemente NE-SW y mostrando frentes de falla.

En el valle de Tlazazalca afloran depósitos lacustres, mostrando intercalaciones en su porción superior derrames basálticos y basalto-andesíticos. Hacia la Ciénega de Chapala, estos sedimentos tiene mayor área de afloramientos. Los lomeríos de los alrededores de Tangamandapio y en los valles de Zamora y Chavinda afloran en las laderas sur los aglomerados, brechas y derrames fracturados.

Basaltos y tobas del cuaternario (Qbt)

Consta de derrames, brechas, aglomerados y cenizas de composición basáltica. Los derrames y coladas presentan coloración gris oscura, mientras que las brechas, aglomerados y piroclásticos (constituidos por bloques basálticos afaníticos) son de color gris oscuro en sus superficies y ocre-rojizo en sus bordes. Los materiales piroclásticos son del tamaño de arena media y arcilla de color rojizo.

Los derrames y coladas observan estructura vesicular, con sistemas de fracturas espaciados. Los afloramientos de esta unidad se encuentran en la porción sur del área. Están constituidos por brechas, aglomerados y piroclásticos en mayor proporción, cuyas fuentes de expulsión son conos piroclásticos, de carácter predominantemente explosivo. En esta área forman parte del subsuelo de los valles de Tangancícuaro y Purépero.

En el resto de la zona, los afloramientos están representados por alineamientos de pequeñas lomas, correspondientes a aparatos volcánicos de constitución piroclástico. Asociados a estos aparatos, se observan derrames basálticos. Igualmente existen derrames basálticos en los bordes del valle de Zamora, que en parte se encuentran cubiertos por limos y arcillas de hasta unos 20 m de espesor.

Sedimentos aluviales (Qal y Qla)

Los depósitos sedimentarios de los valles de Ixtlán, Chavinda, Zamora, Tangancícuaro y Guadalupe, están constituidos por gravas, arenas, limos y arcillas

mezclados en diferentes proporciones con espesores variables. En general presentan de mediana a baja compactación con intercalaciones de diferentes grados de compacidad.

Aguas arriba de la presa Urepetiro, afloran en la ladera izquierda conglomerados arenosos pobremente consolidados, que subyacen a material tobáceo arcilloso y suprayacen a basaltos andesíticos de la unidad terciario basáltico superior (Tbs). Al norte de Purépero afloran conglomerados constituidos por cantos basálticos y andesíticos, redondeados en matriz areno-arcillosa de color crema y gris claro; subyacen a material tobáceo y piroclástico del cuaternario y suprayacen a basaltos andesíticos del terciario superior.

Cabe indicar que las secciones geológicas (Figuras 3 y 4) se retomaron del estudio hidrogeológico de la SARH en 1977, y se **agruparon** a las unidades geológicas definidas en la Carta Geológica de Michoacán de Garduño-Monroy *et al.* (1999).

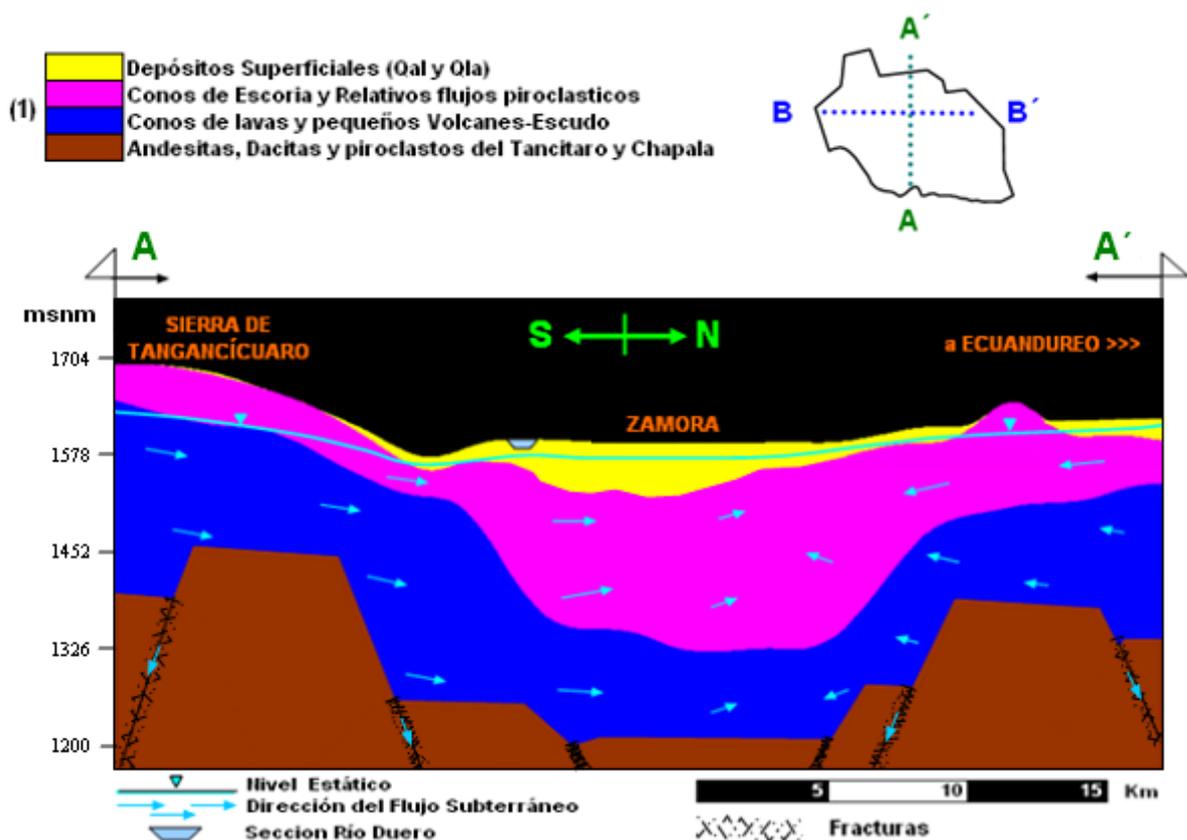


Figura 3. Sección geológica con base en sondeos eléctricos verticales A-A' (Modificado de la SARH, 1977)

El flujo subterráneo (Figura 3) que proviene de recarga de la sierra de Tangancicuaro llega hasta el valle central de Zamora con dirección de S-N y de ahí cambia su trayectoria a NW con salida hacia Ciénega de Chapala. Del norte de

Zamora el flujo subterráneo presenta dirección E-W para después incorporarse a la dirección noroeste. En la Figura 4, el flujo subterráneo que proviene de la región de Tlazazalca presenta dirección E-W hasta el valle central de Zamora. De este lugar hasta el valle de Chavinda el agua subterránea presenta dirección de sur a norte, para después incorporarse con dirección noroeste hasta su salida al valle de Ixtlán.

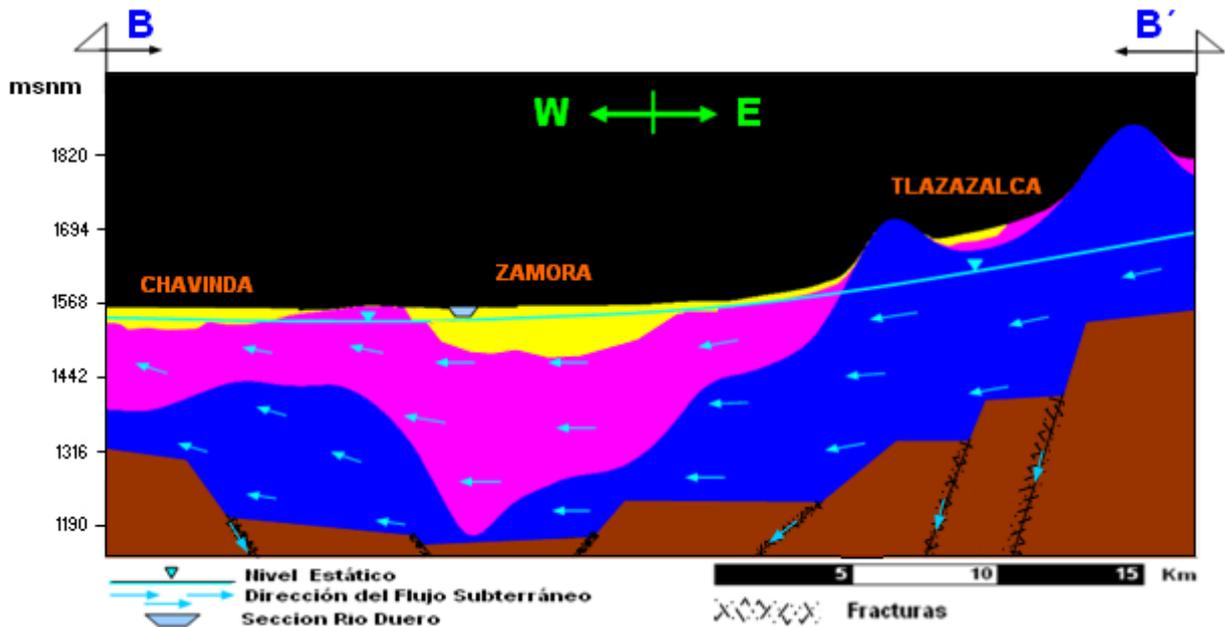


Figura 4. Sección geológica con base en sondeos eléctricos verticales B-B' (Modificado de la SARH, 1977)

Geología superficial

La cuenca del Río Duero se puede caracterizar en dos dominios: el de las cuencas lacustres por depósitos superficiales (aluviales y lacustres recientes) y por la presencia de conos de escoria y flujos piroclásticos. Garduño-Monroy *et al.* (2003) establecen que desde la Cañada de los Once Pueblos y en los valles agrícolas se han acumulado sedimentos aluviales a lo largo del Cuaternario, depósitos que están constituidos generalmente por suelo arenoso-arcilloso, formado por detritus provenientes de la erosión de las rocas ígneas, de tamaño variable y formas sub-ángulosas y sub-redondeadas. Presenta espesores de cientos de metros en la Ciénega de Chapala, antigua planicie de inundación de los ríos Lerma y Duero (Figura 5) (López-Blanco y Flores, 2008).

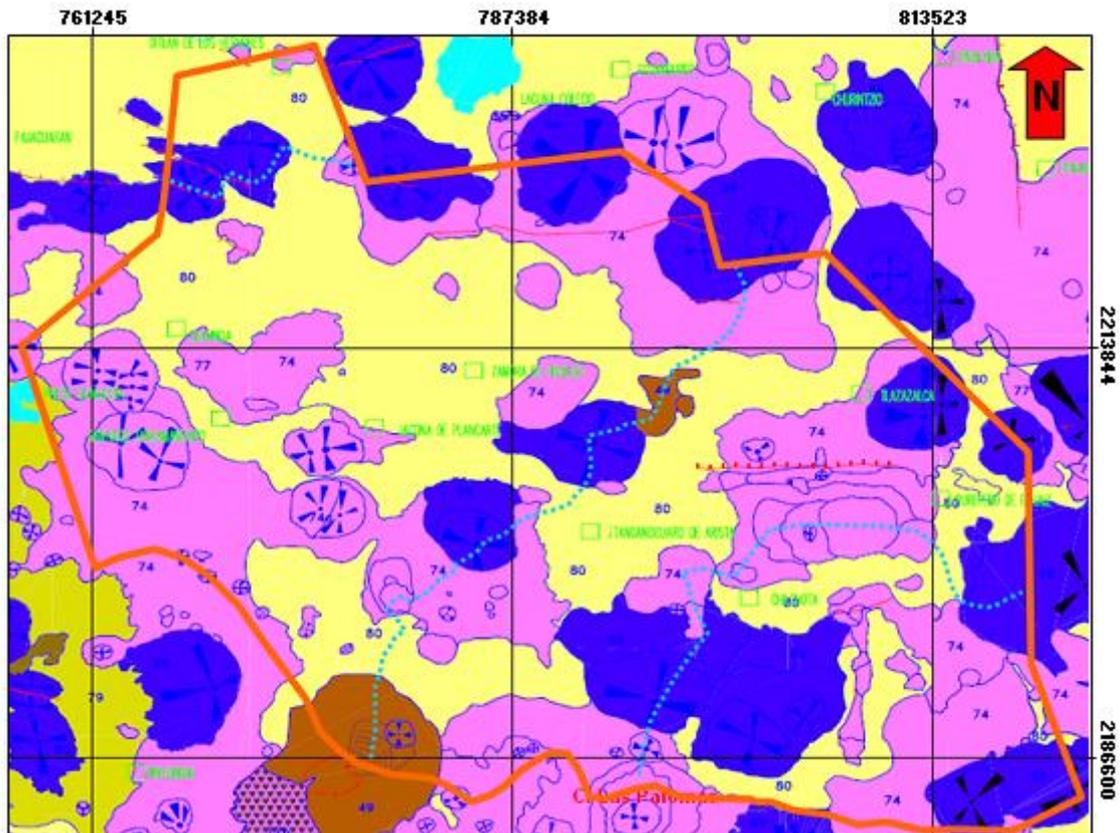
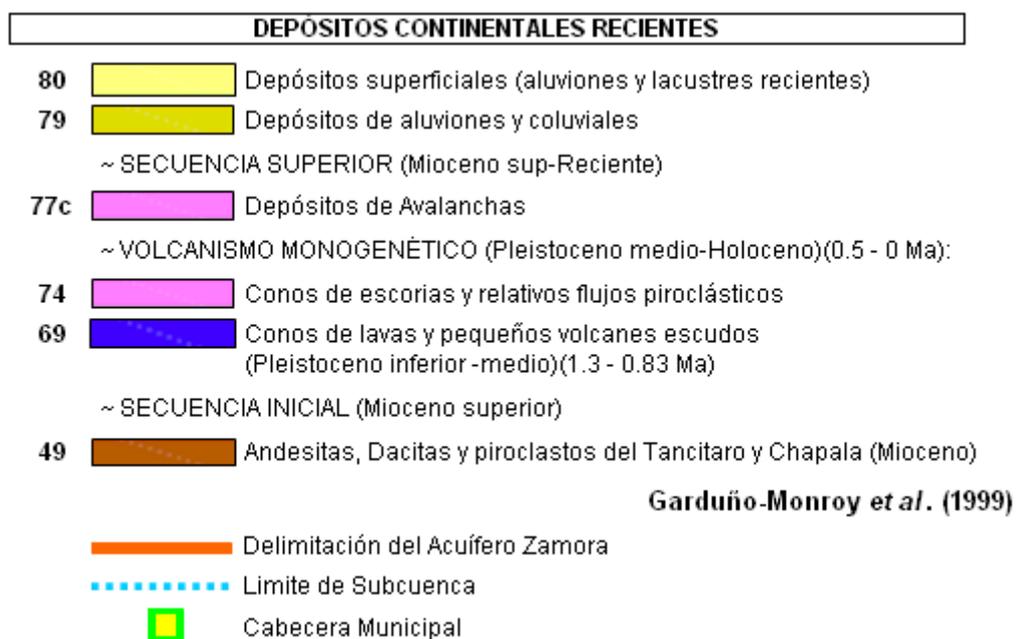


Figura 5. Geología superficial del Acuífero Zamora
(Modificado de Carta Geológica de Michoacán; Garduño-Monroy *et al.*, 1999)



Mooser (1985) cita que la gran mayoría de los cerros de esta cuenca corresponden a la unidad de flujos lávicos de basalto, originado por la actividad volcánica durante el Cuaternario. Urrutia y Del Castillo (1977) establecen que los cerros que incluyen

a las poblaciones San Simón y La Estanzuela están conformados por basalto masivo de color pardo, negro o gris oscuro, constituido por plagioclasas, olivino y otros minerales. Se encuentran dispuestos en coladas amplias y fluidas de lava. Estos basaltos expulsados por el magmatismo construccional, cubren en parte a todas las unidades anteriores del Terciario (López-Blanco y Flores, 2008).

Fisiografía

El Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato (CVMG) se encuentra ubicado en el sector central de la Faja Volcanica Transmexicana (FVTM) (Corona-Chávez *et al.*, 2006). En el sector central entre el rift de Colima y el sistema de fallas Taxco-Querétaro se desarrolla el campo volcánico, formado por centros monogenéticos y pequeños volcanes escudo de composición basáltica o basálticoandesítica (Ferrari, 2000). Hasenaka y Carmichael (1985), Hasenaka (1994) establecen que en la parte central del campo volcánico existen más de 1000 conos monogenéticos, en menor medida domos y más de 400 centros poligenéticos principalmente volcanes escudo de tamaño moderado (Gómez-Tuena *et al.*, 2005). La cuenca del Río Duero pertenece a este campo volcánico; Velázquez *et al.* (2005) establecen que dentro de esta cuenca se pueden identificar tres subprovincias fisiográficas:

| | | | |
|--------------|---|---------------------------|---|
| Subprovincia | } | ~ Cañada El Platanal | Sierras y bajíos que comprenden los cerros, valles y llanos al este de la cañada, así como los cerros que constriñen esta barranca. |
| | | ~ Neovolcánica Tarasca | Forman parte los cerros más altos del sur de la Cañada de los Once Pueblos y de los valles de Guadalupe y Zamora. |
| | | ~ Chapala | Incluye al valle de Zamora, los cerros que la limitan al sur y los que lo separan de la Ciénega de Chapala más la planicie. |

Geomorfología

Para Garduño-Monroy *et al.* (1999) y Escalera *et al.* (2000) las unidades morfogenéticas generales son de origen endógeno volcánico acumulativo de fines del Pleistoceno y principios del Holoceno, conformadas por basaltos, brechas, andesitas-basálticas y riolitas. En la región sobresalen los relieves: sierras, lomeríos, planicies y piedemontes locales (López-Blanco y Flores, 2008).

1) Las **sierras** o laderas de montaña están formados principalmente de domos, conos volcánicos y derrames de lava. Presentan rocas basálticas de hiperstena, conos de lava y pequeños volcanes escudo como la Beata, Tamandaro y San Ignacio y que bien pudieron asociarse con aquellas prominencias volcánicas conocidas como volcán El Encinal y Los Nogales y aquellos que constituyen las partes altas de la Sierra Pajacuarán (Garduño-Monroy *et al.*, 1999).

2) Los **lomeríos** están constituidos por derrames fragmentados con fracturas verticales con orientación NE-SW lajeados y con algunos frentes de falla. Debajo se hallan derrames de lavas, brechas y piroclásticos (Garduño-Monroy *et al.*, 1999).

3) Escalera *et al.* (2000) establecen que las **planicies aluviales** están distribuidas ampliamente. Se componen de material acumulativo aluvial y otros depósitos que provienen de las laderas, originados por procesos gravitacionales y fluviales. Algunas planicies se caracterizan por estar formadas por depósitos superficiales de tipo aluvial por material de acarreo cuya granulometría varía de arcillas a gravas sub-redondeadas y que están conformando principalmente los amplios valles de Zamora y Tangancícuaro (López-Blanco y Flores, 2008).

4) Los **piekemontes** están compuestos por sedimentos de lavas, tobas, cenizas y depósitos piroclásticos (López-Blanco y Flores, 2008).

MARCO HIDROGEOLOGICO

Los acuíferos de la Faja Volcánica Transmexicana (FVTM) están constituidos principalmente por rocas volcánicas, con arcillas, arenas y gravas, intercaladas con basaltos permeables. Los derrames basálticos y la mayoría de rocas que se extienden en toda la faja volcánica se caracterizan por una alta permeabilidad que varía en un amplio rango, controlado principalmente por su grado de fracturamiento, la presencia de tubificaciones en los derrames y la intercalación de material escoriaceo (Ordaz y Velázquez, 1993-1994).

Los acuíferos en derrames volcánicos fracturados están cubiertos por depósitos lacustres y aluviales. Los materiales aluviales no consolidados como gravas, arenas y sedimentos finos están ampliamente expuestos en los valles formando acuíferos someros. Su permeabilidad y transmisividad varía de acuerdo con el tamaño del grano y espesor. El coeficiente de transmisividad (**T**) de los acuíferos aluviales oscila de 5×10^{-4} a 5×10^{-2} m²/s (Ordaz y Velázquez, 1993-1994).

Los materiales piroclásticos presentan alta porosidad aunque permeabilidad baja. En la zona de saturación pueden funcionar como acuitardos, los cuales a escala regional, pueden transmitir grandes cantidades de agua a los acuíferos vecinos. En el subsuelo de los valles, las rocas consolidadas y no fracturadas bajo el nivel regional de saturación, forman barreras para el flujo de agua subterránea como los derrames andesíticos que funcionan como basamento geohidrológico (Ordaz y Velázquez, 1993-1994).

El agua circula preferentemente a través de los estratos más permeables. Presentan menos resistencia al flujo subterráneo y tienden a cruzar los estratos menos permeables por la ruta más corta. Cuando estos estratos se encuentran en la parte superior de la secuencia estratigráfica, la mayoría de las aguas infiltradas se incorporan al sistema de flujo local, caso muy frecuente en la FVTM. Los flujos de lava basáltica y los gruesos paquetes de material piroclástico forman el mayor volumen de rocas volcánicas jóvenes, establecen excelentes áreas de recarga y rápidamente transmiten el agua a profundidad, alimentando al acuífero profundo, por debajo de los valles. En el subsuelo de los valles y planicies lacustres el agua se desplaza hacia áreas de descarga (Ordaz y Velázquez, 1993-1994). El esquema de flujo subterráneo (Figura 6) presenta una dirección SE-NW, desde la localidad de Chilchota, atravesando el valle central de Zamora hasta la salida de la cuenca, en el valle de Ixtlán. De acuerdo a Tóth (2004) se presentan tres tipos básicos de sistemas de flujo de agua subterránea (con sus respectivas áreas de recarga, circulación y descarga). Los sistemas locales¹ son generados por precipitaciones de

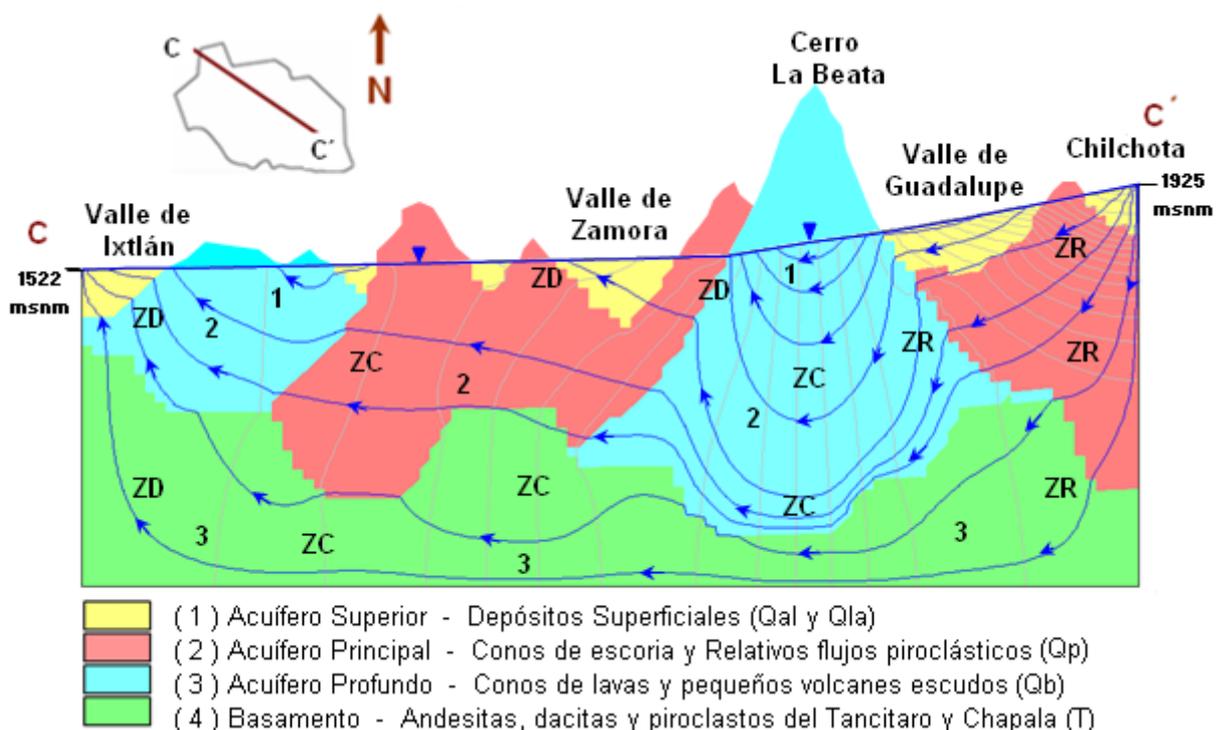


Figura 6. Sección esquemática de las unidades hidrogeológicas que integran el sistema acuífero Zamora y sistemas de flujo. (Elaborado en Topodrive; Hsieh, 2001)

reciente infiltración, ingresando verticalmente y recargando instantáneamente a los depósitos superficiales. Los sistemas intermedios², se relacionan con topografía alta, siendo lugares donde existan las condiciones apropiadas para la infiltración. Los sistemas regionales³, se relacionan con áreas de recarga que se encuentran cercano al parteaguas de la cuenca y su descarga se localiza a la salida de la misma. Estos flujos presentan temperatura alta, indicando que ha circulado por zonas profundas, como es el caso del termalismo en la región de Ixtlán.

Tóth (2000) establece que en zonas de recarga (**ZR**) los niveles piezométricos son altos y decrecen en profundidad, con presencia de flujo vertical descendente y divergente. Caso inverso sucede en zonas de descarga (**ZD**), donde los niveles piezométricos crecen con la profundidad, donde el flujo es vertical ascendente y convergente. En las zonas de circulación (**ZC**), la altura piezométrica apenas varía con la profundidad, las líneas equipotenciales presentan verticalidad y el flujo es prácticamente horizontal (Salas, 2009).

Se denominó sistema al acuífero Zamora (Figura 6) por lo siguiente: se identificaron dos sistemas acuíferos, uno granular y otro basáltico (SARH, 1977); en la Carta Geológica de Michoacán establecen dos dominios, el de los depósitos superficiales (aluviales y lacustres recientes) y el de conos de escoria y flujos piroclásticos; además de conos de lavas y pequeños volcanes escudo (Garduño-Monroy et al., 1999). En congruencia a lo anterior se propuso para este proyecto integrar el área de estudio en tres subsistemas acuíferos: 1) acuífero superior compuesto por depósitos sedimentarios, 2) acuífero principal integrado predominantemente por flujos piroclásticos, 3) acuífero profundo compuesto por basaltos fracturados y el basamento compuesto por rocas de composición andesítica.

Características hidrogeológicas del acuífero

Acuífero Superior

Los depósitos sedimentarios (Qal y Qla) se detectan en los grandes valles y en afloramientos ubicados en laderas, funcionando como una sola unidad. Estos materiales se acuñan en las laderas y se engruesan hacia el centro de los valles variando en sus profundidades. En el municipio de Zamora las profundidades de esta unidad varían de 80 m en Ario de Rayón, de 50 a 100 m en El Llano, de 60 m en el Sauz de Abajo y poco más de 200 m en la localidad de Zamora; y de 80 a 200 m hacia el centro de Tangancícuaro, para luego adelgazarse en 100 m acuñándose hacia la región norte del valle de Guadalupe (SARH, 1977).

Los depósitos sedimentarios presentan transmisividad baja por la presencia de limo y arcilla, con valores de 3.6×10^{-4} a 2.4×10^{-3} m²/s, en los municipios de Jacona, Zamora, Ixtlán y Tangancícuaro; y mayores en Chavinda y regiones localizadas de Tangancícuaro, con valores de 9.0×10^{-3} a 4.4×10^{-2} m²/s, debido a que en estas zonas se presentan intercalaciones de basalto (Tabla 5) (SARH, 1977). Estos materiales conforman acuíferos libres y son explotados por medio de norias y pozos (CNA, 2002).

Tabla 5. Transmisividades promedios representativas del acuífero superior (SARH, 1977)

| MUNICIPIOS | Transmisividad 1×10^{-3} m ² /s |
|---|---|
| Jacona y Zamora | 0.03 - 1.8 |
| Ixtlan, Zamora y Valle de Tangancícuaro | 1.8 - 5.2 |
| Ixtlan y Valle de Tangancícuaro | 5.2 - 9.8 |
| Chavinda y Valle de Tangancícuaro | 9.8 - 23.9 |
| Chavinda | 23.9 - 38 |

La conductividad hidráulica (**K**) para este acuífero varía de 0.5–449 m/día, coeficiente de almacenamiento específico (**Ss**) y rendimiento específico (**Sy**) varían del orden de 3.1×10^{-7} – 9.4×10^{-5} m⁻¹ y 0.01 – 0.18 respectivamente (IGEOF, 1994; GDF, 2002).

Acuífero Principal

Este acuífero está conformado por derrames basálticos, flujos piroclásticos y depósitos superficiales (SARH, 1977). Actualmente se encuentra en explotación primordialmente en la zona de valles, mediante pozos profundos. Esta integrado por depositos sedimentarios, basaltos y tobas del cuaternario (Qbt).

Este acuífero se extiende en todo el subsuelo de la zona de valles hasta las sierras que los rodean. En donde afloran materiales del cuaternario de origen basáltico, subyaciendo a su vez a rocas volcánicas de menor permeabilidad. Estas rocas presentan permeabilidad y capacidad de infiltración muy altas, debido a su textura vesicular y denso fracturamiento, y por ende funcionan como excelentes receptores de la precipitación pluvial (recarga) (SARH, 1977).

La buena permeabilidad de este acuífero es atribuida a todas las rocas que conforman este grupo. Los afloramientos de brechas no consolidadas y piroclásticos gruesos y sueltos, exhiben una mayor permeabilidad que los derrames

y coladas, donde la permeabilidad es atribuible al fracturamiento. En el subsuelo del valle presenta configuración escalonada a causa del tectonismo (SARH, 1977). Para este acuífero la conductividad hidráulica (**K**) varía de 0.10 – 31 m/día, y para los valores de coeficientes de almacenamiento específico (**Ss**) y rendimiento específico (**Sy**) varían del orden de 6.3×10^{-6} – $1.4 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ y 0.014 – 0.11 respectivamente (IGEOF, 1994; GDF, 2002).

Acuífero Profundo

De acuerdo a la geofísica realizada se identificó que las rocas de esta unidad (basaltos fracturados) rellenan fosas, cuyo piso debe encontrarse a más de 350 m; en la localidad de Ario de Rayón¹. En el valle de Chavinda su espesor es muy irregular alcanzando hasta 250 m en las partes más profundas; en la localidad del Sauz de Abajo¹, la existencia de estas rocas alcanzan espesores mayores a 200 m; en Aquiles Serdan¹ se presentan del orden de los 100 m y en Tangancícuaro se encuentran a mayor profundidad, siendo la más cercana a la superficie del orden de los 200 m (SARH, 1977).

Las formaciones basálticas que afloran extensamente en el área de estudio constituyen la principal fuente de agua subterránea. Para este acuífero profundo la conductividad hidráulica (**K**) varía entre 1.4 – 1987 m/día; para el coeficiente de almacenamiento específico (**Ss**) y rendimiento específico (**Sy**), el intervalo de variación oscila de 1.10×10^{-5} – $4.10 \times 10^{-5} \text{ m}^{-1}$ y 0.07 – 0.10 respectivamente (IGEOF, 1994; GDF, 2002).

Basamento

Rocas volcánicas de constitución andesítica y basalto-andesítica del Mioceno superior y reciente. Forman estructuras de fosas y pilares, presentan fracturamiento moderado a alto (SARH, 1977). A medida que crece la profundidad disminuye la permeabilidad y porosidad de las rocas volcánicas antes citadas, debido a la compresión litostática. Por tal razón a cierta profundidad se pueden comportar como unidades de baja permeabilidad (IGEOF, 1994).

En el centro del valle de Zamora los bloques se profundizan a más de 200 m y hacia la porción sur los bloques levantados de esta unidad yacen a profundidades aproximadas entre los 220 y 320 m y en dirección oriente-poniente, el piso de esta estructura se ubica a unos 230 m. En el valle de Chavinda el piso de la parte más

¹ Estas localidades pertenecen al municipio de Zamora Michoacán.

profunda de la fosa se ubica hacia la porción norte a unos 300 m y en el valle de Tangancícuaro, se detectaron una serie de bloques de esta unidad que se ubican a 200 y 300 m de la superficie (SARH, 1977).

La conductividad hidráulica (**K**) para este basamento de composición andesítica varía de 0.38 – 8.6 m/día, y con valores de coeficientes de almacenamiento específico (**Ss**) y rendimiento específico (**Sy**) de 4.4×10^{-6} – $1.4 \times 10^{-4} \text{ m}^{-1}$ y 0.03 respectivamente (IGEOF, 1994; GDF, 2002).

Indicadores de sistemas de flujo

El movimiento del agua en el subsuelo, produce ciertos efectos en la superficie del terreno. Como algunas características de las áreas de recarga están el movimiento descendente de agua subterránea, deficiencia de humedad, concentraciones mínimas de sólidos totales disueltos, niveles estáticos profundos, ausencia de suelos salinos y baja temperatura. En las áreas de recarga hay movimiento ascendente de agua subterránea, mayor humedad por arriba de la saturada, altas concentraciones de sólidos totales disueltos, niveles estáticos someros, presencia de suelos salinos, temperaturas altas, manantiales y pozos brotantes (Salas, 2009).

Zonas de Recarga y Descarga

La recarga que reciben los depósitos sedimentarios provienen de la precipitación pluvial que se infiltra por las estructuras volcánicas (conos de escoria, flujos piroclásticos, conos de lava, pequeños volcanes escudo) que se encuentran distribuidos hacia la periferia de los valles (Figura 7).

En la parte oriente del valle de Zamora con dirección N-E se ubican los cerros La Beata, Tacari, Etucuario, La Cruz y Tajejueta; con dirección S-E se localizan los cerros Las Palomas, San Ignacio, Picacho y La Virgen. Hacia el occidente con dirección S-W, los cerros Grande, Azul, Tamándaro, El Guayabo y Prieto; y con dirección N-W los cerros Alto, El Jaceño, El Gordo y El Encinal, estos dos últimos con rumbo al municipio de Ixtlán, cercanos a la salida de la cuenca (Figura 7).

Otra área de recarga (pluvial) se da sobre los depósitos superficiales con aproximadamente unas 50 mil hectáreas de extensión. El Distrito de Riego 061 abarca de ésta superficie el 36% y el restante 64% es de áreas regables pero no contabilizadas.

Como recarga adicional se contempla la derivación que realiza el Distrito de Riego sobre el caudal del río Duero, del cual se extrae un volumen anual promedio de 159,187,457 m³/año, para una superficie regable promedio de 11,754 hectáreas, generando una lámina de riego bruta del orden de los 140 cm al año.

Las rocas de origen basáltico y basalto-andesítica se establecen como la principal área de recarga al acuífero (Meseta Tarasca) abarcando la parte sur, oriente y norte de la cuenca Río Duero. Las descargas naturales se realizan por drenado natural hacia manantiales y ríos. El mayor volumen de descarga y concentración de manantiales es en los municipios de Chilchota, Tangancicuaro y Jacona.

La recarga y descarga para este tipo de acuífero puede presentarse a través de las relaciones: río-acuífero y acuífero-río. El primero es cuando el río aporta o drena naturalmente agua hacia el acuífero; y el segundo es cuando el río depende significativamente de la descarga del acuífero para poder mantener su flujo base en estiaje (Foster, 2002-2006).



Figura 7. Modelo Digital del Terreno (MDT) que ilustra las zonas de recarga y descarga del sistema acuífero Zamora. Recarga: — del río Duero al acuífero, ↓ lluvia en zonas montañosas y áreas de riego; Descarga: — del acuífero al río, ● manantiales, ↘ salidas subterráneas horizontales, ↑ evapotranspiración, ● pozos de extracción, — delimitación superficial del acuífero Zamora. Cerros a destacar: 1) La Beata, 2) La Cruz, 3) Tajejueta, 4) San Ignacio, 5) La Virgen, 6) Grande, 7) Tamándaro, 8) Alto, 9) El Gordo y 10) El Encinal (MDT obtenido del INEGI, 2007 y software libre Global Mapper v. 9)

La evapotranspiración es otro tipo de descarga que se efectúa con mayor intensidad en las zonas o áreas donde la elevación del nivel estático es muy somera. Principalmente en algunas regiones de los valles de Tangancícuaro, Zamora, Jacona e Ixtlán con valores respectivos de 0.03, 0.3, 0.4 y 0.6 metros. Cabe resaltar que el área de estudio presenta diversos rangos de profundidad.

Otro tipo de descarga que se presenta en el acuífero, se debe a la actividad antropogénica, a través del bombeo en pozos y norias. Según la CNA para el año correspondiente a 2006, en el Registro Público de Derechos del Agua (REPGA) se contabilizaron 456 pozos, de los cuales 203 corresponden sólo al municipio de Zamora.

Hidrografía

La cuenca Río Duero comprende desde su origen hasta su límite final al río Duero el cual recibe como principales aportadores al río Tlazazalca por su margen derecha y al río Celio por su margen izquierda (López, 1997). Las estaciones hidrométricas situadas en los ríos Tlazazalca y Celio, durante 40 años han llevado un caudal promedio de 1.35 y 1.5 m³/s respectivamente, incorporando un volumen de escurrimiento superficial al río Duero de 42,458,273 m³/año por la margen derecha y de 46,876,861 m³/año por la margen izquierda, éste último a la altura del municipio de Jacona (Figura 2) (IMTA, 2003).

La estación hidrométrica La Estanzuela se localiza a la salida de la cuenca entre los poblados de San Simón y la Estanzuela (Gómez, 1987), captando todos los escurrimientos y aportes superficiales que se generan a las márgenes del río Duero. Esta estación afora un gasto promedio anual de 10.5 m³/s, equivalente a un volumen total de escurrimiento de 332,070,627 m³/año (IMTA, 2003). Aparicio (1999) define que no es tarea sencilla separar el gasto base del directo, pero que existen varios métodos para lograrlo. El método utilizado (para éste proyecto) consistió en identificar el gasto mínimo en los meses de estiaje proyectando una línea horizontal a partir de ese tramo en estiaje. El flujo base estimado fue de 104,208,509 m³/año y un escurrimiento directo de 228,008,009 m³/año. La Tabla 6 muestra algunas propiedades físicas del río Duero, con 80 km de longitud, tirante y velocidad promedio de 1 m y 43 cm/s respectivamente, y un gasto que aumenta de menor a mayor en función de su área hidráulica, iniciando en la localidad de Carapan hasta su paso por la estación hidrométrica La Estanzuela con 10.5 m³/s.

Tabla 6. Características físicas del río Duero (Modificado de Ramos, 1989)
(Las localidades de El Capulín y Briseñas ya están fuera de los límites del acuífero)

| PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS FÍSICAS DEL RIO DUERO | | | | | | | | | |
|---|----------|---------|-----------------|------------|------------------|------------|--------------|---------------------------------------|----------------------------|
| LOCALIDAD | LONGITUD | LATITUD | ALTITUD msnm | LARGO m | LARGO acum. m | ANCHO m | TIRANTE m | VELOCIDAD CAUDAL m ³ /s | GASTO m ³ /s |
| <i>hasta</i> CARAPAN | -102.04 | 19.86 | 1941 | 626 | 626 | 4.7 | 0.18 | 0.15 | 0.13 |
| SANTO TOMAS | -102.09 | 19.85 | 1799 | 5,070 | 5,696 | 6.8 | 0.17 | 0.14 | 0.16 |
| CHILCHOTA | -102.12 | 19.85 | 1777 | 3,350 | 9,046 | 15 | 0.30 | 0.28 | 1.24 |
| LAS ADJUNTAS | -102.20 | 19.91 | 1699 | 11,485 | 20,531 | 7 | 0.28 | 0.36 | 0.70 |
| CAMECUARO | -102.21 | 19.91 | 1702 | 399 | 20,930 | 9 | 0.48 | 1.96 | 8.47 |
| EL PLATANAL | -102.25 | 19.93 | 1597 | 5,469 | 26,399 | 11 | 0.68 | 0.60 | 4.49 |
| LAS LIMAS | -102.28 | 19.96 | 1577 | 3,790 | 30,189 | 20 | 0.55 | 0.30 | 3.30 |
| LA ESTANZUELA | -102.37 | 20.12 | 1554 | 30,750 | 60,939 | 32 | 1.60 | 0.20 | 10.50 |
| EL CAPULIN | -102.49 | 20.22 | 1526 | 17,200 | 78,139 | 35 | 1.90 | 0.16 | 10.64 |
| BRISEÑAS | -102.52 | 20.24 | 1524 | 3,410 | 81,549 | 75 | 2.50 | 0.13 | 23.44 |

Manantiales

El sistema acuífero cuenta con gran potencial hidráulico, debido a los manantiales generados en formaciones basálticas; lo que permite suponer que la recarga de los acuíferos basálticos debe ser, por lo menos, del mismo orden de magnitud del volumen descargado por los manantiales (SARH, 1977).

De los 71 manantiales que se mencionan en el estudio hidrogeológico, 11 presentan aforo para cuatro meses. El resto de los datos se omitieron por contar con el aforo de un sólo mes y extrapolarlo para todo el año, además con esta medida se pretendió disminuir el grado de incertidumbre en el volumen estimado. Por otro lado, los manantiales seleccionados se encuentran distribuidos principalmente en los municipios de Chilchota, Tangancícuaro y Jacona, realizándose mediciones al inicio y final de la época de lluvias y estiaje (para el año 1977). El gasto total aforado de los manantiales fue de 4.8 m³/s al año, equivalente a un volumen anual descargado de 151,283,874 m³.

Los manantiales (Tabla 7) se clasificaron de acuerdo al criterio de Meinzer (1923) en el que propone ocho grupos de manantiales de acuerdo a la magnitud de descarga (Vargas, 2002). Esta cuenca abarca seis de los ocho grupos, principalmente los manantiales de segundo y tercer orden por ser los de mayor caudal, por ejemplo de los 11 manantiales utilizados, cuatro son de Chilchota variando el gasto de 0.11 a 1.25 m³/s; dos en Tangancícuaro con el mayor volumen de 0.42 a 2 m³/s y cinco en Jacona variando de 0.06 a 1.23 m³/s. Localizándose en las porciones sur y oriente de la cuenca, mismos que son representativos de las descargas del acuífero basáltico.

Tabla 7. Distribución municipal y del caudal de descarga en los 71 manantiales (SARH, 1977).

| ORDEH | CAUDAL m ³ /s MEINZER (1923) | MUNICIPIO | NUMERO DE MANANTIALES |
|-----------------------|--|--|--------------------------|
| SEGUNDO | 0.28 ~ 2.8 | JACONA, TANGANCICUARO, CHILCHOTA | 8 |
| TERCERO | 0.028 ~ 0.28 | CHILCHOTA, TANGANCICUARO, JACONA, TLAZAZALCA | 20 |
| CUARTO | 6.3 ~ 28 x10 ⁻³ | CHILCHOTA, TANGANCICUARO, TANGAMANDAPIO, ZAMORA | 18 |
| QUINTO | 6.7 x10 ⁻⁴ ~ 6.67 x10 ⁻³ | CHILCHOTA, TANGAMANDAPIO, ZAMORA | 18 |
| SEXTO | 6.0 x10 ⁻⁵ ~ 6.7 x10 ⁻⁴ | TLAZAZALCA, TANGAMANDAPIO, ZAMORA, TANGANCICUARO | 7 |
| TOTAL AÑO 1977 | | | 71 |

Con respecto al régimen de descarga, hay manantiales que presentan mínima variabilidad como lo muestran los aforos realizados al manantial Camécuaro, uno de los más importantes del valle de Guadalupe, municipio de Tangancícuaro (CNA, 2002). En 1977 el aforo de éste manantial presentó una media de 2.0 m³/s. Posteriormente García (1999) indicó que éste mismo aportó 1.8 m³/s; además de la existencia de 9 manantiales con un gasto de 2.8 m³/s localizados en el municipio de Jacona (Velázquez *et al.*, 2005).

El volumen de recarga por lluvia en sierras y montañas se estimó en 105,642,311 m³/año y el volumen descargado por manantiales fue de 151,283,874 m³/año, asumiendo que la diferencia la aporta el almacenamiento.

El registro histórico del Lago de Camécuaro (1964 a 2002), indica un gasto medio anual de 2.0 m³/s con fluctuaciones de 1.9 a 2.1 m³/s (IMTA, 2003); lo que permite suponer que hay manantiales que presentan régimen permanente (es decir que el volumen de descarga es aportado por el acuífero) y hay manantiales que presentan variabilidad en la descarga debido a la precipitación pluvial (como es el caso de la mayoría).

Velázquez *et al.* (2005) identificaron en sus recorridos de campo 86 manantiales dentro de la cuenca. Su contabilización es una incógnita, ya que actualmente se carece de un registro detallado. Por ejemplo, llama la atención que en el municipio de Ixtlán no se mencione la presencia de manantiales en ninguno de los estudios consultados (como también se omite en el estudio de la SARH). Actualmente la información oficial reconoce la presencia de siete manantiales en territorio ixtleco como el de Paracho o Peribán.

Pozos de extracción

Para conocer el comportamiento de la extracción del agua subterránea en el año de 1977, se contó con la historia hidrométrica de 112 pozos de extracción, en los municipios de Purépero, Tangancícuaro, Jacona, Zamora, Chavinda e Ixtlán.

Los pozos perforados en la cuenca presentan un promedio de 103 m de profundidad, variando desde los 3 hasta los 385 m; con excepción de algunos lugares con profundidades que alcanzan los 710 m en Chavinda; Tangamandapio con 1600 m y dos en Zamora con 1200 y 2000 m de profundidad (CNA, 2007). El promedio de los pozos perforados pertenecen al acuífero principal.

La Figura 8 ilustra el comportamiento subterráneo anual de extracción del acuífero en dos etapas. La primera indica un censo de aforo para 1977 con un volumen de extracción de 25,830,432 m³/año (SARH, 1977). La segunda presenta un comportamiento no uniforme en el bombeo (de 1994 a 2000), siendo hasta el 2001 y subsecuentes donde se define una conducta en la curva de extracción la cual se fija en una disminución promedio del bombeo en 1,830,432 m³/año. Este nuevo patrón o estabilidad en la curva se asocia a que ya se tienen los volúmenes concesionados o asignados para cada usuario del agua a través del Registro Público de Derechos del Agua (REPGA).

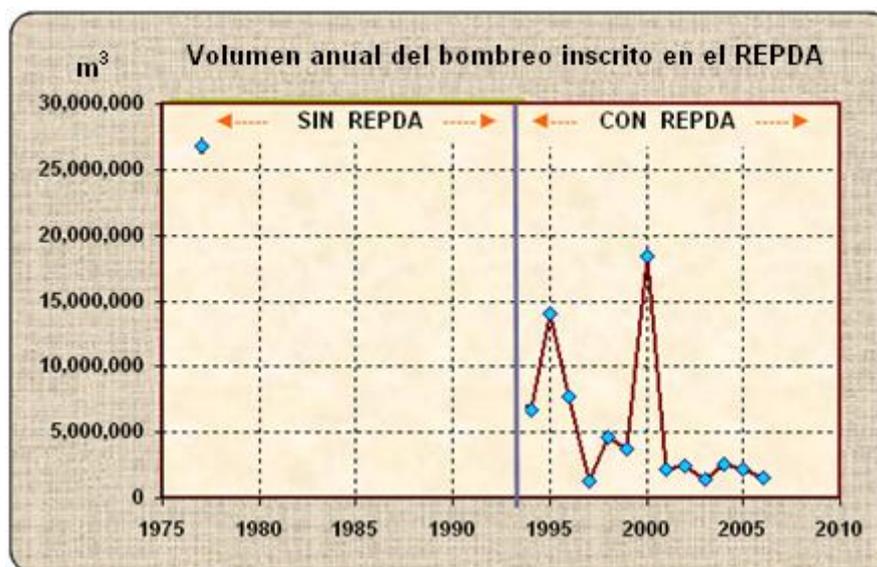


Figura 8. Variación anual del bombeo en el sistema acuífero Zamora

La Figura 9 muestra el volumen acumulado de extracción anual, donde se observa que de los años 2000 a 2006, se presenta una línea más definida, estable y con menor pendiente, asociándose a una mayor consolidación en los registros de pozos

y a la disminución en los volúmenes de extracción. Esta disminución en la pendiente se puede comparar con la Figura 8, donde para el intervalo de tiempo (2001-2006) el bombeo se estabiliza. En el tramo de línea (Figura 9) que va de 1994 al año 2000 hay una mayor pendiente con respecto a la anterior, representando los años de mayor volumen de extracción que se tienen registrados en el acuífero. Para el año de 1977, en ambas figuras se indica el volumen extracción como un punto aislado, debido a que en ese tiempo no existía el Registro Público de Derechos del Agua.

Para 2006 el REPDA, tenía registrado un volumen acumulado de extracción de 68,959,436 m³/año, distribuido en nueve municipios (dos más que en el censo de 1977). De 478 aprovechamientos subterráneos (pozos) que hay distribuidos en el acuífero, el principal uso del agua subterránea es para la actividad agrícola (con 265), seguido del público urbano (con 70), la industria (con 39) y en menor cantidad otras asignaciones. La producción de alimentos agrícolas está regida con base al año agrícola durante dos periodos: otoño-invierno y primavera-verano. El primero con siembra de cártamo, frijol, garbanzo, lenteja, hortalizas, papa, trigo, entre otros y el segundo con siembra de cebolla, fresa, jitomate rojo, maíz, hortalizas, papa y sorgo; predominando el sistema de riego sobre el de temporal (CNA, 2007).

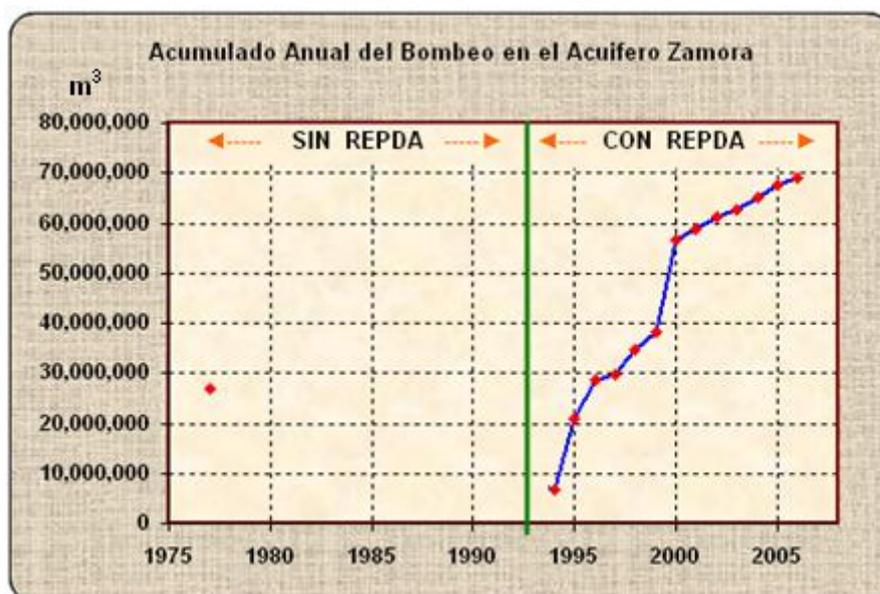


Figura 9. Volumen de extracción anual acumulado en el sistema acuífero Zamora

Piezometría

Se contó con información piezométrica de tres diferentes periodos, con la cual se elaboraron mapas de isolíneas de elevación de nivel estático, para los años de

1977, 1999 y 2007; para este último año se le dio continuidad a un trabajo elaborado por la CNA (2001) llevando a cabo la piezometría en 40 fuentes de abastecimiento (Figuras 10, 11 y 12).

Profundidad al Nivel Estático

La profundidad de los niveles subterráneos están influenciados por la topografía de la región. Los niveles estáticos varían entre 1 y 50 m, a excepción del municipio de Purépero donde alcanza profundidades de hasta 122 m. En la parte central del Distrito de Riego (DR-061) las profundidades varían entre 1 y 10 m; hacia las localidades de Chavinda e Ixtlán a 30 y 15 m respectivamente; en el valle de Tangancícuaro de 1 a 25 m y en el valle de Guadalupe de los 30 a 50 m.

Elevación del Nivel Estático

Los mapas de isolíneas del nivel estático muestran una dirección (SE-NW) perpendicular al recorrido del cauce (río Duero). De acuerdo a la Figura 10, las elevaciones del nivel estático varían entre 1700 y 2000 msnm sobre las localidades de Purépero, Tlazazalca, Chilchota y Tangancícuaro, que comprenden la parte media alta de la cuenca, generando una diferencia de carga hidráulica de 300 m, lo que implica mayor velocidad en el movimiento del agua con respecto de la planicie central de Zamora, además esta región aporta las mayores entradas de agua subterránea proveniente de las estructuras volcánicas basálticas, iniciando en la parte alta con dirección SE, de sur a norte en la parte de Tangancícuaro, Jacona, y Tangamandapio hacia el centro de los valles de Zamora. Nótese que el río Tlazazalca es paralelo a las líneas equipotenciales, debido a la configuración escalonada causada por el tectonismo de la región.

Continuando sobre el río Duero, al salir del valle de Tangancícuaro (1700 msnm) se localiza el valle de Zamora (1580 msnm) intercomunicados entre sí por la Cañada El Platanal, generando entre ambas elevaciones una diferencia de más de 100 m, el cual se utiliza como energía potencial para la central hidroeléctrica El Platanal de la Comisión Federal de Electricidad. Para la subcuenca Valle de Zamora el flujo subterráneo se encuentra entre los 1600 y los 1540 msnm, y de S-N de Chavinda a Ixtlán el flujo subterráneo se incorpora a la dirección NW siguiendo las descargas subterráneas su curso hacia la Ciénega de Chapala con elevaciones de 1520 msnm.

La Figura 11 corresponde al mapa de isolíneas realizado con información piezométrica de 1999, donde se resalta que después de 22 años las líneas equipotenciales presentan leves modificaciones en su sentido de trayectoria con respecto a la configuración piezométrica inicial de 1977. Se presume que estos cambios están asociados a fluctuaciones estacionales de origen pluvial. Pese a que en la región desde el año 1994 al 2000, el bombeo ha presentado los mayores volúmenes de extracción (Figura 8).

En 2007 se visitó la zona de estudio para realizar la piezometría en pozos piloto. El mapa de isolíneas (Figura 12) abarca solo los municipios de Tangancícuaro, Jacona, Zamora, Chavinda e Ixtlán, debido a que la piezometría que se retomó del informe de la CNA (2001) no cubrió en su totalidad los municipios de las partes altas de la subcuenca (Purépero, Tlazazalca y Chilchota). Por tal razón y en función a la poca variación que presentaron las configuraciones piezométricas de 1977 a 1999 (Figuras 10 y 11) y la estabilidad anual de extracción (en 2001 a 2006, Figura 8), se hizo la suposición que para la región faltante SE y NE las curvas de elevación faltantes para 2007 tendrían la misma tendencia y comportamiento a los años citados.

La Figura 12 muestra (así como la 10 y 11) una red de flujo. Las líneas en color amarillo son curvas que integran una superficie equipotencial estática que busca el máximo gradiente para generar movimiento, siendo perpendiculares al recorrido natural del río Duero y paralelas al río Tlazazalca (atribuyéndose el comportamiento al escalonamiento tectónico de la región); mientras que las líneas de flujo subterráneo siguen una trayectoria paralela al río Duero, presentando perpendicularidad a las líneas (amarillas) equipotenciales. Después de 8 años se siguen conservando las entradas subterráneas con respecto a las dos anteriores configuraciones. Las fluctuaciones naturales e inducidas aun no han perturbado en gran medida las configuraciones piezométricas. En el valle de Tangancícuaro las isolíneas presentan todavía dirección SE, en la sierra sur de Tangamandapio el flujo subterráneo presenta dirección de sur a norte y a la salida del valle de Zamora retoma una dirección NW. Los mapas de isolíneas (Figuras 10, 11 y 12) son representativos del acuífero superior, debido a que sus profundidades estáticas no rebasan los límites de los depósitos sedimentarios (aluviales y lacustres).

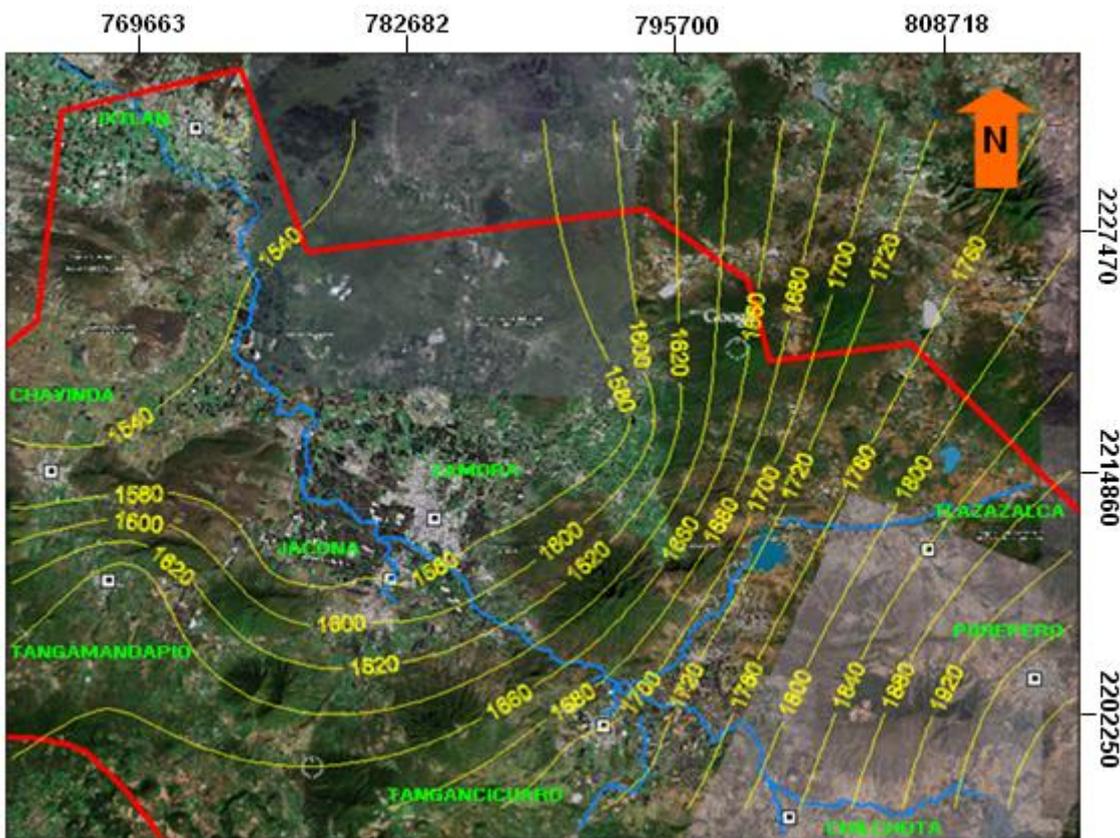


Figura 10. Isolíneas de Elevación de Nivel Estático (curvas amarillas), acuífero superior (marzo 1977). Limite acuífero Zamora —, río Duero (SE-NW) \/, río Tlazazalca (NE) /.

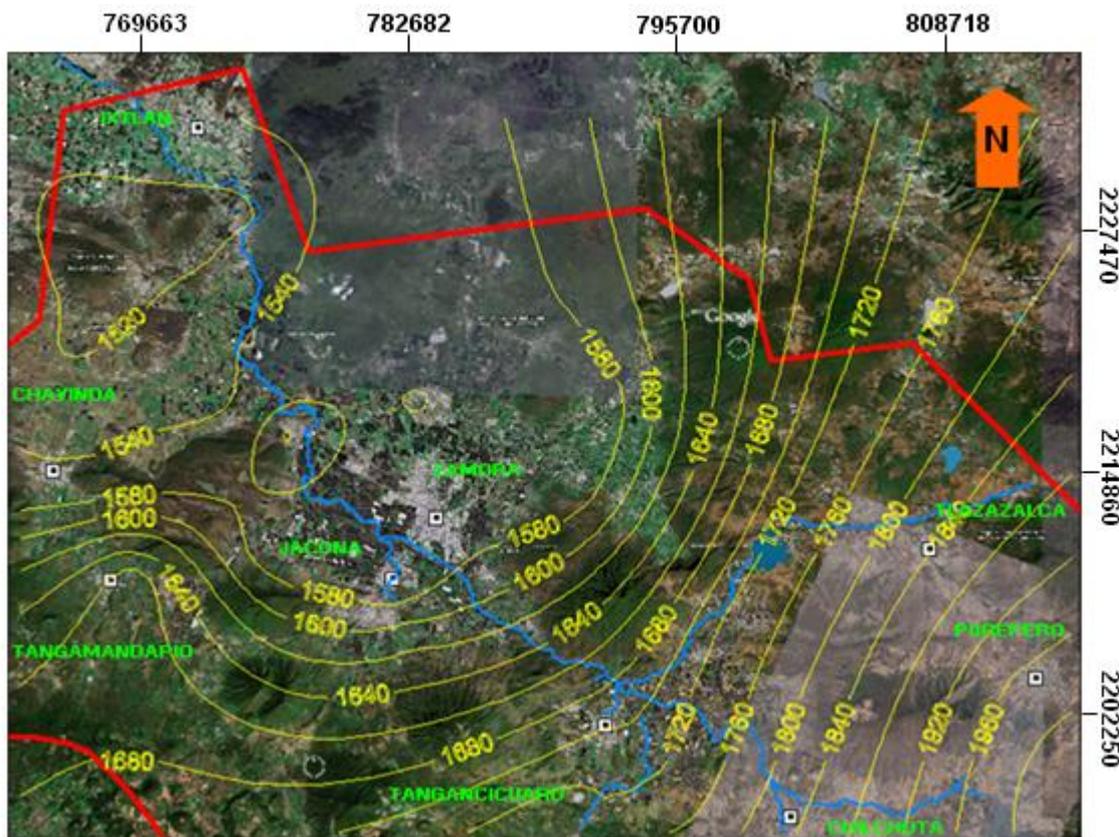


Figura 11. Isolíneas de Elevación de Nivel Estático (amarillas), acuífero superior (año 1999)

volcanes escudo favoreciendo con ello la recarga del sitio, además que los depósitos superficiales no son tan extensos, dominantes y profundos, generando con ello una mayor difusividad del agua entre los materiales en contacto, explicando con esto el por qué ésta área presenta mejor comportamiento de respuesta al ascenso de los niveles piezométricos. Caso contrario sucede en las subcuencas de la planicie (Valle de Zamora y Ciénega de Chapala) donde los depósitos sedimentarios son más extensos, dominantes y de mayor espesor. Por consiguiente las estructuras volcánicas circundantes a estos valles están más alejadas entre sí; por lo que el efecto de la difusividad en este medio es menor, influyendo en el desempeño ascendente de los niveles piezométricos.

Tabla 8. Evolución y razón de cambio del nivel estático en el acuífero superior.

| Evolución del Nivel Estático Acuífero Zamora (1977-2007) | Zonas del municipio con | | Relacion o Tasa aproximada, cm/año | |
|---|-----------------------------|------------------------------|------------------------------------|----------------|
| | Abatimiento ↓ promedio m | Recuperación ↑ promedio m | Abatimiento ↓ | Recuperación ↑ |
| Purépero | -0.3 | 0.1 | -0.8 | 0.2 |
| Tlazalca | ~ | ~ | ~ | ~ |
| Chilchota | -0.2 | 0.4 | -0.5 | 1.4 |
| Tangancícuaro | -1.1 | 1.4 | -4 | 5 |
| Tangamandapio | ~ | 6.3 | ~ | 21 |
| Jacona | -3.7 | 0.2 | -12 | 0.6 |
| Zamora | -2.2 | 1.6 | -7 | 5 |
| Chavinda | -2.2 | 4.9 | -7 | 16 |
| Ixtlán | -1.7 | 0.05 | -6 | 0.2 |

~ No hay registro

En la Tabla 8, se identifican dos zonas con la relación abatimiento recuperación. La región alta de la cuenca (zona I) el abatimiento de los niveles piezométricos es poco sensible y es más susceptible a la recuperación; para la región de los extensos valles (zona II) el abatimiento es más sensible a la actividad del bombeo y con muy poca susceptibilidad para la recuperación, a excepción de Chavinda. Se puede resumir que el promedio general de abatimiento y recuperación piezométrica es de 1.6 y 1.8 metros respectivamente, en toda la región.

La tasa de cambio se estimó para un periodo de 30 años. Las menores velocidades de descenso se presentan en la parte alta de la cuenca, a excepción del municipio de Tangancícuaro con 4 cm/año. En la región de los grandes valles se presentan los mayores descensos con 12 cm/año en Jacona, seguido de 7 cm/año para Zamora y Chavinda. En cuanto a la tasa de recuperación se presenta en mayor medida en los municipios de Tangancícuaro, Tangamandapio y Chavinda con 5, 21 y 16 cm/año respectivamente, así como incrementos menores variables (de 0.2 a 5 cm/año) en los municipios restantes.

NOTA: Cabe indicar que las cifras de la Tabla 8, no corresponden a una sola fuente, debido a la falta de continuidad en los registros. En el anexo, la Figura C lo ilustra de manera enfática.

Flujo subterráneo en el sistema acuífero

El flujo (de recarga) que proviene de la Meseta Tarasca es en dirección a los valles centrales, con tendencia de sur a norte y de oriente a poniente hasta llegar al valle de Zamora donde el movimiento subterráneo es en general de la periferia hacia el centro, para luego presentar una dirección (SE-NW) en una trayectoria casi paralela a la del río Duero con salida hacia Ixtlán de los Hervores. Este cambio de trayectoria puede atribuirse al patrón estructural (fosas tectónicas) que prevalece en la región, lo que conlleva a una disminución gradual de la carga hidráulica. A grosso modo el gradiente hidráulico en las subcuencas altas La Cañada y Valle de Tangancícuaro es del orden de $i = 1.5\%$ y para la parte media a baja en las subcuencas Valle de Zamora y Ciénega de Chapala de $i = 0.14\%$ con lo que se puede establecer una relación 1 a 10. Como ejemplo se puede establecer que las cuencas altas presentan menor radio de influencia y mayor profundidad del nivel dinámico y caso contrario para las cuencas bajas.

OBJETIVOS

General

Elaborar el modelo matemático de simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora para conocer el funcionamiento piezométrico de la región a través del bombeo en pozos.

Particulares

- Obtener información necesaria para definir el modelo conceptual del acuífero.
- Estimar el balance hidrogeológico de la región.
- Implementar el modelo computacional.
- Generar escenarios futuros para establecer la relación entre la extracción subterránea y los niveles piezométricos.

METODOLOGÍA

Pero antes, ¿Qué necesitamos saber de un modelo de simulación?

Los modelos son por definición aproximaciones y simplificaciones de un sistema natural (Dutton & Mace, 2002). Un modelo conceptual es una hipótesis de cómo se comporta un sistema o un proceso. Esta hipótesis se puede expresar de forma cuantitativa con un modelo matemático (Konikow, 1996).

Los modelos matemáticos se rigen por un conjunto de ecuaciones diferenciales que simulan la relación estímulo-respuesta de un sistema (Anderson & Woessner, 1992), usándose ampliamente para analizar y evaluar cualquier situación que uno desee (Flores y Vilchis, 2002). En este caso, los de simulación hidrodinámica tendrán como resultado los niveles piezométricos y el flujo hídrico producido (Romero y Lovera, 2005).

Muchos de los modelos de agua subterránea son modelos matemáticos determinísticos que están basados en los principios de conservación de la masa, de la energía y cantidad de movimiento o momento lineal (ímpetu). Estos modelos requieren generalmente la resolución simultánea de ecuaciones en derivadas parciales resolviéndose mediante métodos numéricos (Konikow, 1996).

Los métodos numéricos requieren de una discretización espacial y temporal. Resuelven las ecuaciones diferenciales mediante el empleo de matrices en cada una de las celdas (o malla) en la que se ha discretizado el sistema a simular. Son los más utilizados en hidrogeología e investigación y gestión de acuíferos contaminados (Núñez, 2001).

Actualmente se encuentran disponibles un gran número de modelos deterministas genéricos del agua subterránea, basados en una variedad de métodos numéricos. La selección de un modelo genérico para un problema en particular puede depender de la precisión, el costo y la utilidad (Konikow, 1996).

Al resolverse la ecuación de flujo subterráneo, se conocen los niveles de agua que tendrá la cuenca en diferentes sitios a través del tiempo, mejorando el conocimiento y cuantificación que se tiene del recurso dentro de la cuenca, prediciendo mediante escenarios de evaluación el comportamiento futuro de la cuenca, sin tener que

esperar a que ocurran. Para Escolero (2004) una de las aplicaciones de mayor relevancia es que constituyen una herramienta para la toma de decisiones.

El periodo de auditoría comprende desde el final de la calibración hasta el momento en que se recaben los datos piezométricos más recientes. Este periodo debe ser lo suficientemente largo para que la predicción del modelo se aparte de la solución de calibración, mientras mayor sea el ritmo de abatimiento de un acuífero más corto podrá ser el periodo de auditoría (Anderson & Woessner, 1992; Konikow, 1996).

Los modelos de simulación permiten entender lo que no conocemos del medio físico, además de identificar los parámetros hidráulicos de mayor sensibilidad del sistema, así como puntos vulnerables, planteando una gran diversidad de escenarios y establecer las bases para decidir donde será conveniente llevar los cambios en el uso y aprovechamiento del recurso subterráneo, con el único fin de mejorar las condiciones de vida de los habitantes sin menoscabo de los ecosistemas (Escolero, 2004).

Finalmente, los modelos de simulación se elaboran con base en una secuencia de acciones que incluyen: identificación del problema, conceptualización e implementación cuantitativa de los procesos en la región, así como la asimilación y recolección de los datos de campo que serán usados en la calibración del modelo, para poder evaluar la capacidad predictiva del modelo que se utilizará para la resolución del problema identificado (National Research Council, 2001).

Estructura para la realización de modelos hidrodinámicos

Anderson & Woessner (1992), Bear *et al.* (1992) y el National Research Council (2001) avalan la siguiente estructura o protocolo de modelación para elaborar un modelo computacional de flujo subterráneo (Figura 13). A continuación se describe brevemente cada componente:

- ~ Identificación del problema: Los objetivos de un modelo de simulación pueden ser variados dependiendo del interés que se tenga del lugar en estudio, junto con los alcances y expectativas (Ruvalcaba, 2009)
- ~ Estudios previos: Recolectar y analizar los datos disponibles de la región en estudio (informes técnicos, libros, tesis, revistas científicas); así como

registros y/o seguimientos históricos del agua subterránea y superficial, además de visitas de campo al sitio de interés (EA, 2002).

- ~ Diseño del Modelo: Consiste en definir a detalle el diseño de la malla (discretización), las condiciones iniciales y de frontera, los periodos de tiempo y selección de valores para parámetros hidráulicos y componentes hidrológicos (Anderson & Woessner, 1992).
- ~ Verificación de los datos de entrada: La selección de información se hace de acuerdo a los diferentes aspectos físicos que involucren al acuífero (topografía, hidrología, geología, geofísica, hidrogeología, historial de bombeo), así como el comportamiento variacional del flujo subterráneo (niveles piezométricos) (Anderson & Woessner, 1992).
- ~ Modelo Conceptual: Caracterizados los acuíferos existentes y sus condiciones de frontera, se procede a la construcción del modelo conceptual que simplifique las características del mismo (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006). Se establece un sistema de flujo que describa las entradas y salidas de agua a través del sistema acuífero cuantificando los caudales circundantes (Rushton, 2003). Identificando la distribución espacial del potencial hidráulico (el agua subterránea se mueve de zonas de mayor carga hidráulica a zonas de menor carga hidráulica) (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006). Siendo una representación simplificada de como se cree que se comporta un sistema acuífero (Woessner & Anderson, 1990).
- ~ Modelo Computacional: Los modelos matemáticos son abstracciones que representan los procesos en forma de una ecuación o conjunto de ecuaciones (que simulan una relación estímulo-respuesta). Las propiedades físicas se representan como constantes o coeficientes de las ecuaciones y el potencial del sistema se hace como variables. Estos modelos generalmente requieren la resolución de ecuaciones en derivadas parciales (Konikow, 1996).
- ~ Calibración: Cada modelo debe ser calibrado antes de ser utilizado como herramienta para predecir el comportamiento piezométrico en un acuífero. En esta fase las estimaciones iniciales de los coeficientes del modelo podrán ser modificados (recarga, conductividad hidráulica, rendimiento específico, condiciones de frontera). El criterio de calibración consiste en demostrar que el modelo es capaz de reproducir los flujos observados en campo, mediante

ensayo y error (Bear *et al.*, 1992). En este apartado se incluye el análisis de sensibilidad para establecer el efecto de la incertidumbre en el modelo calibrado (Anderson & Woessner, 1992).

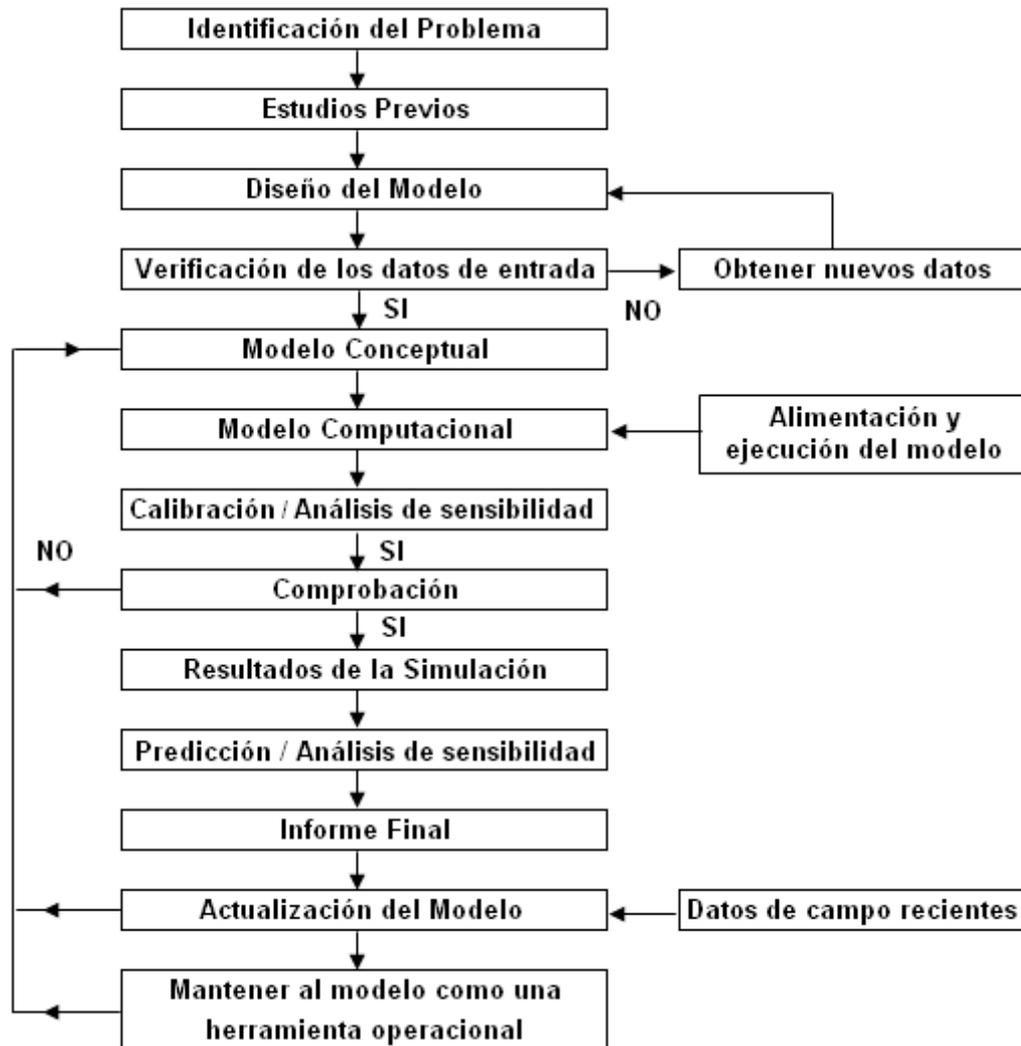


Figura 13. Protocolo para establecer un modelo de simulación hidrodinámica.
(Anderson & Woessner, 1992; Bear *et al.*, 1992)

- ~ **Comprobación:** Se revisa si el modelo matemático es capaz de reproducir los niveles observados en campo, en caso contrario, se debe regresar al diseño del modelo y revisar el modelo conceptual. La validación de los datos observados con los predichos en el modelo se harán para un periodo diferente al usado en la etapa de calibración (Woessner & Anderson, 1990).
- ~ **Resultados de la simulación:** Se incluyen las tablas, gráficos, rangos e incertidumbre en los resultados del modelo (Bear *et al.*, 1992).

- ~ Predicción: Consiste en predecir la respuesta del flujo subterráneo en situaciones futuras en que se verá sometido el sistema, exponiéndolo a escenarios típicamente desfavorables (desde bombeo intensivo, reubicación de fuentes, efectos contaminantes, entre otros). El tiempo durante el cual se realizan predicciones debe de estar relacionado y limitado por la longitud del registro histórico, es decir, predecir sólo durante el tiempo comparable al del periodo del ajuste. La precisión de las predicciones es la mejor forma de indicar su confiabilidad; sin embargo la precisión de la predicción se puede evaluar sólo después de haber predicho (Konikow, 1996). De nuevo es necesario el análisis de sensibilidad para cuantificar la incertidumbre durante la predicción del modelo (Anderson & Woessner, 1992).

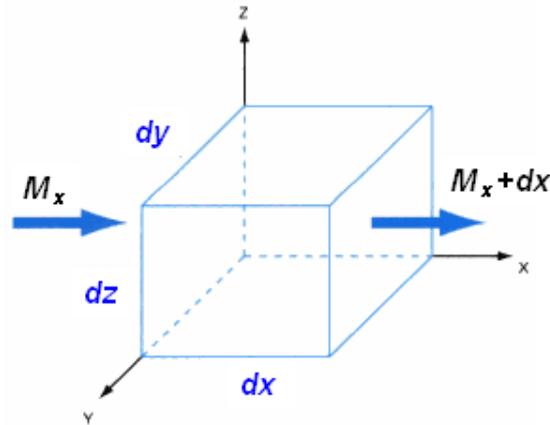
- ~ Informe final: Es una presentación clara y concisa del diseño del modelo, con la información básica empleada, resultados y conclusiones (Anderson & Woessner, 1992).

- ~ Actualización del modelo: Después de ser utilizado un modelo hidrogeológico, este tendrá como fin permitir su posterior actualización a medida que los datos estén disponibles. Por ejemplo, ampliar el registro histórico de los nuevos datos (extracción, piezometría, etc.) para posteriormente comparar la respuesta observada contra de las predicciones y evaluar nuevamente el modelo conceptual (EA, 2002).

- ~ Mantenerlo como una herramienta operacional: Si se va a utilizar en la predicción de un problema de interés para la sociedad, los registros de campo deben ser continuos y el modelo debe ser revisado y recalibrado periódicamente para incorporar la nueva información obtenida (Konikow, 1996).

Formulación del modelo matemático

Las ecuaciones matemáticas que describen los procesos de flujo y transporte subterráneo se pueden determinar a partir del principio fundamental de conservación de la masa de un fluido o de un soluto (Figura 14). Martínez-Alfaro *et al.* (2006) establecen que este principio (o ecuación de continuidad) se puede combinar con una expresión matemática (Ley de Darcy) para obtener una ecuación de tipo diferencial que describa el flujo y el transporte. En este trabajo sólo se hará referencia a la ecuación de flujo subterráneo.



**Figura 14. Balance de masa en un elemento diferencial de acuífero
(Tomado de Martínez-Alfaro *et al.*, 2006)**

La ecuación generalizada que se forma a partir de la combinación de la Ley de Darcy con la ecuación de continuidad es la base para todos los modelos de flujo de agua subterránea, estando conformada por el coeficiente de almacenamiento específico, la conductividad hidráulica, las entradas y salidas de agua (ASCE, 1996). De acuerdo a la necesidad que se tenga por resolver, la ecuación de flujo se puede establecer en estado estacionario o transitorio (Anderson & Woessner, 1992; GSN, 1997).

Flujo en régimen Estacionario

Si el régimen es permanente o estacionario, h es constante a lo largo del tiempo, por lo que se anula su derivada con respecto al tiempo, teniendo: (Anderson & Woessner, 1992; GSN, 1997).

~ Para un medio heterogéneo y anisótropo (1):

$$K_x \frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + K_y \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + K_z \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (1)$$

~ Para medio homogéneo e isótropo (2):

$$\frac{\partial^2 h}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 h}{\partial z^2} = 0 \quad (2)$$

Flujo en régimen Transitorio

Un sistema acuífero está en estado transitorio cuando la carga hidráulica h varía a lo largo del tiempo e indica que el sistema pierde o gana agua en el periodo de tiempo considerado (GSN, 1997).

~ Acuífero Confinado (medio heterogéneo y anisótropo) (3):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - q(x,y,t) \quad (3)$$

~ Acuífero Libre (medio heterogéneo y anisótropo) (4):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(-K_x \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(-K_y \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(-K_z \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} + S_y \frac{\partial h}{\partial t} - q(x,y,t) \quad (4)$$

El termino q representa las fuentes o sumideros (ríos, recargas, drenes, manantiales, pozos de extracción, de inyección, entre otros) definiendo mediante el signo positivo una fuente que aporta agua al acuífero y un signo negativo si extrae agua del mismo, esto en unidades del inverso de la unidad de tiempo. El termino h es la carga hidráulica; K_x , K_y , K_z son las conductividades hidráulicas en las direcciones cartesianas x , y , z respectivamente; S_s el coeficiente de almacenamiento específico; S_y el coeficiente de rendimiento específico (o porosidad efectiva) y t es la variable temporal.

Resolución de las ecuaciones generales de flujo

Las ecuaciones diferenciales parciales pueden ser resueltas de forma matemática utilizando soluciones numéricas. Los métodos numéricos más conocidos son: elemento finito y diferencias finitas (Schwartz & Zhang, 2003). La Tabla 8 muestra algunas ventajas y desventajas del uso de estas técnicas numéricas para resolver las ecuaciones de flujo subterráneo (Fernández, 2004).

Tabla 8. Ventajas y desventajas de los métodos numéricos, en la resolución de la ecuación general de flujo subterráneo (Tomada de Fernández, 2004)

| MÉTODO | VENTAJAS | DESVENTAJAS |
|---------------------|--|--|
| Diferencias Finitas | <ul style="list-style-type: none"> * Conserva la masa. * Intuitivo, simple, conocido y comprobado, fácil de programar * Es el mas empleado. | <ul style="list-style-type: none"> * La malla rectangular genera discretización fuera de las zonas de interés. * Dificil adaptación a sistemas complejos. |
| Elemento Finito | <ul style="list-style-type: none"> * Discretización más versátil y eficiente en zonas de interés. * Se adapta bien a geología compleja. | <ul style="list-style-type: none"> * No intuitivo. La teoría es más compleja. * Conserva la masa solo gradualmente. Errores locales en el balance de agua. |

La resolución de la ecuación general de flujo por el método de diferencias finitas consiste en sustituir los infinitos puntos que constituye el sistema acuífero reflejado en el modelo conceptual por un número finito de puntos o nodos regularmente espaciados. Cada nodo es el centro de un bloque cuadrado o rectangular llamado celda, quedando discretizado el medio físico en un conjunto de celdas de dimensiones conocidas. Para cada una de las celdas se generan una serie de ecuaciones algebraicas, que son resueltas por técnicas matriciales resolutivas (Figura 15) (Schwartz & Zhang, 2003; Martínez-Alfaro *et al.*, 2006).

Liu y Lipták (2000) establecen que cada ecuación diferencial está asociada al caso específico de flujo subterráneo y en si mismas no contienen información específica acerca del problema a desarrollar, por lo que contienen un número infinito de soluciones y para obtener de esta una solución particular que corresponda a un problema específico, *será necesario aportar información adicional* que no está contenida en las ecuaciones (Fernández, 2004).

- a) La geometría del dominio a través del cual tiene presencia el flujo subterráneo.
- b) Valores de los coeficientes físicos más importantes ($K_{x,y}$, S_y , S_s).
- c) Condiciones iniciales que describan el estado inicial del flujo en el dominio considerado.
- d) Condiciones de frontera entre el fluido y los alrededores del dominio (niveles constantes, drenajes, bombeos, ríos, manantiales, evapotranspiración, entre otros).

Modelo Matemático (Modflow-2000)

Modflow-2000 ha sido reestructurado para hacer más fácil la resolución de las ecuaciones rectoras, adicionando las ecuaciones de transporte y las ecuaciones para la estimación de parámetros hidráulicos (Anderman, 2000; Beach, 2006).

Modflow-2000 emplea un procesador (**MFi2k**) que funciona como entrada principal de datos (desde la arquitectura del modelo hasta los componentes hidrológicos), esto con la finalidad de definir y establecer las condiciones del sistema de flujo a simular (Harbaugh, 2002). Una vez resuelta la ecuación general de flujo subterráneo, se emplea un pos-procesador (Model Viewer v.1.3) que lee un archivo de salida creado por el MFi2k, mostrando en tres dimensiones los resultados del modelado subterráneo. Ilustrando la carga hidráulica o la concentración de solutos, mediante sólidos de revolución o iso-superficies graduadas de acuerdo a una escala de colores (Hsieh & Winston, 2002).

Las generalidades relevantes de este software son: simular en régimen estacionario o transitorio sin importar las condiciones en las que se encuentren las capas, estas pueden ser confinadas, libres o parcialmente convertibles. Hay que definir los aspectos hidrológicos como pozos, zonas de recarga, evapotranspiración, drenes y ríos; la topografía de la zona, el fondo de las capas que conforman el acuífero, la conductividad hidráulica, los coeficientes de almacenamiento específico y rendimiento específico; además de trabajar con acuíferos en medios homogéneos, isotrópos, heterogéneos, anisótropos, multicapas y establecer la interacción río-acuífero (Todd & Mays, 2005; Beach, 2006).

Modflow es una opción prevalente y lógica para la mayoría de las situaciones de modelado, ya que lo respaldan (Dutton & Mace, 2002):

- 1) Sus antecedentes comprobados para la administración de aguas subterráneas,
- 2) Su gran popularidad entre la mayoría de hidrogeólogos,
- 3) La actualización continua del paquete y sus capacidades,
- 4) El soporte técnico de pre-procesadores y pos-procesadores,
- 5) Su gran versatilidad y capacidad de expansión por el modelador y
- 6) las oportunidades de capacitación.

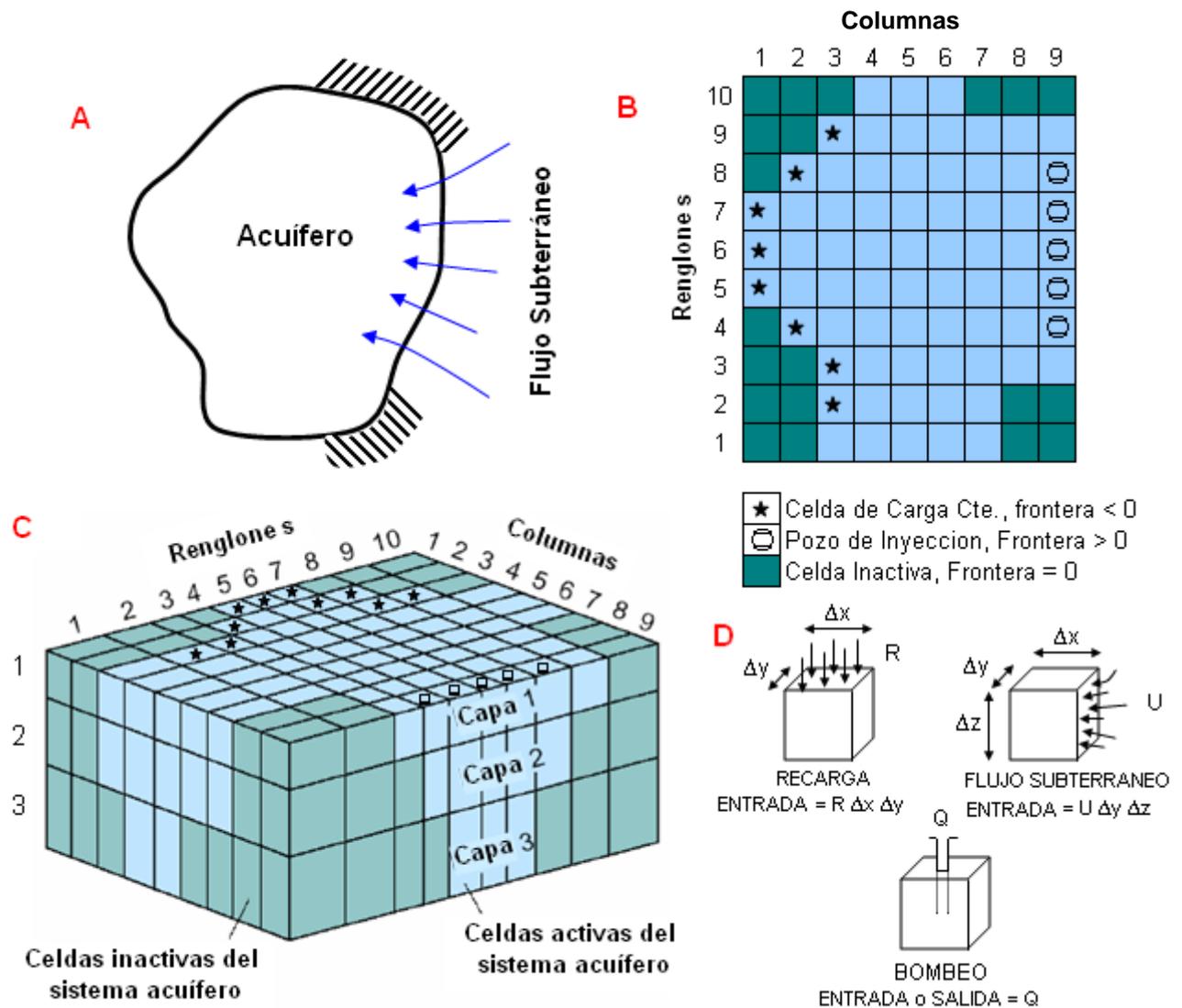


Figura 15. Mallado de celdas en diferencias finitas (bloques centrados). A) Sistema acuifero real, B) Condiciones de frontera, distribución de cargas iniciales, parámetros hidráulicos y cargas externas, C) Diseño de la malla para la simulación tridimensional de un sistema de flujo subterráneo, D) volúmenes y representación de flujos de agua (bombeo, recarga y flujo subterráneo) mediante el empleo de celdas.

(Anderson & Woessner, 1992; USGS, 1997)

*“Tenemos agua para satisfacer las necesidades de todos
pero no la avaricia de todos”.*
Mahatma Gandhi ^[2]

*“ No es sino hasta que el pozo se ha secado
que entendemos el valor del agua”.*
Benjamín Franklin ^[3]

DESARROLLO Y RESULTADOS

MODELO CONCEPTUAL

El objeto de formular un modelo conceptual es el de identificar y cuantificar los procesos que representen adecuadamente el comportamiento de un sistema real. Rushton (1998) menciona que los sistemas acuíferos son tan complejos que no es posible estudiarlos a detalle. Esto lleva a formularnos la siguiente pregunta ¿Qué debe incluirse en el estudio de un acuífero y que puede ser ignorado? Para la mayoría de los sistemas acuíferos hay factores cruciales que deben ser examinados y si uno de estos es ignorado se pueden presentar errores (EA, 2002).

Anderson & Woessner (1992) establecen que el modelo conceptual y el refinamiento del diseño numérico debe estar basado en un análisis cuantitativo de los datos de campo y tener presente que un modelo solo será confiable cuando lo sean los datos utilizados.

Área a modelar del sistema acuífero Zamora

El área a modelar consta de 813.25 km² que es aproximadamente poco más del 34% correspondiente al dominio de los depósitos superficiales (planicies aluviales y lacustres recientes) y representativo del acuífero superior. Posteriormente y a profundidad están los materiales piroclásticos que integran la capa intermedia y se definió como un acuífero principal, y más profundo compuesto mayoritariamente por materiales basálticos se define la tercer capa como un acuífero profundo. El siguiente material son las andesitas, pero por su baja capacidad de permitir el paso de agua se definió como el basamento del acuífero, y por lo tanto no se simuló. El delimitado y la propuesta de capas estuvieron en función del tipo de material predominante en la región, lo cual implica como se planteó el modelo conceptual para el sistema acuífero (Figuras 16 y 17).

El objeto de este modelo es reproducir los niveles piezométricos medidos en campo, mismos que son influenciados por aspectos hidrológicos de origen natural y antropogénico. A partir de la información recabada, se simularán las condiciones hidrogeológicas del sistema para antes de 1977 (régimen estacionario), posteriormente se prolongará la simulación hasta el año 2007 (30 años en régimen transitorio), para después generar escenarios futuros de simulación, y poder responder los planteamientos que se hagan.

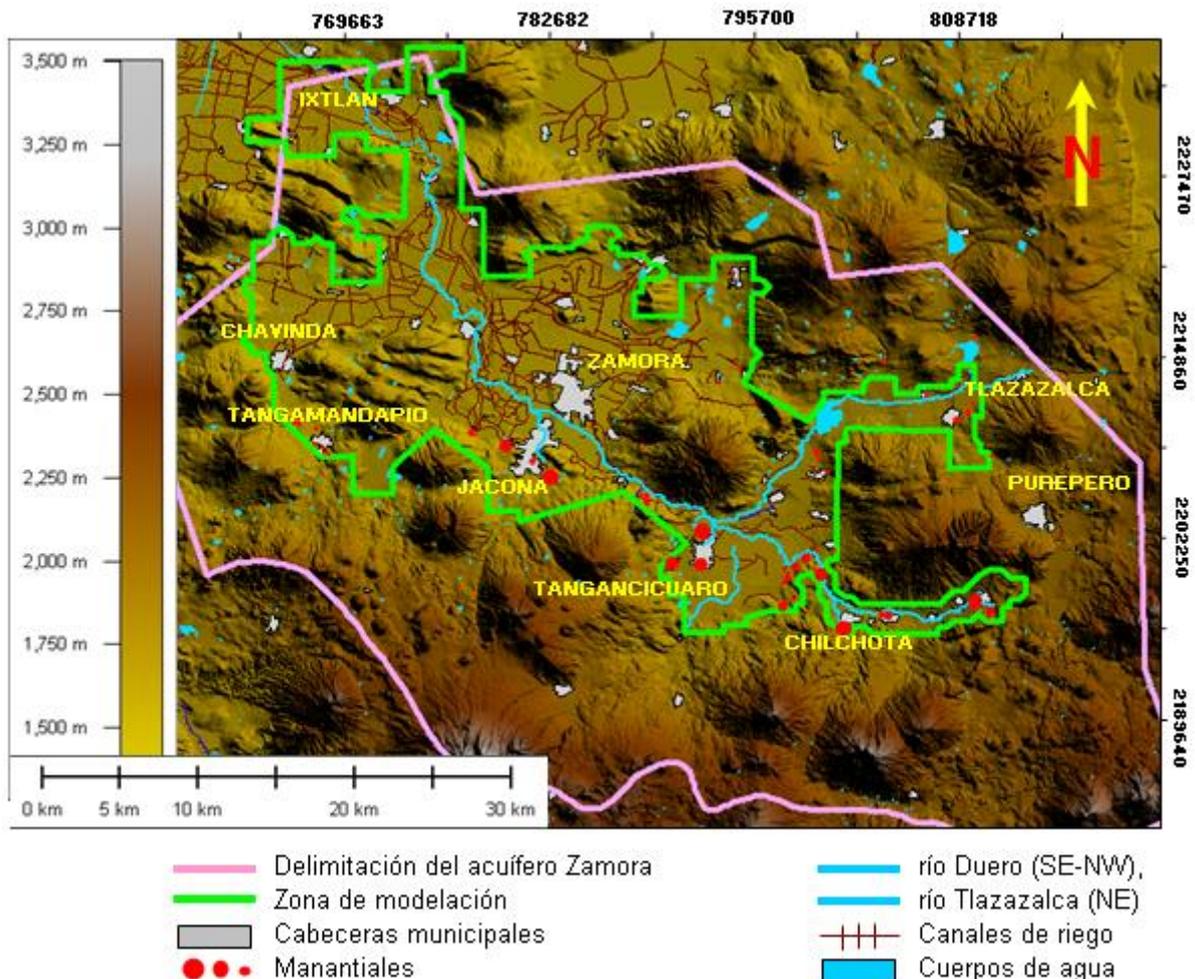


Figura 16. Delimitación del área a modelar dentro de la cuenca Río Duero.

La zona de simulación (Figura 16) abarca principalmente a los depósitos sedimentarios, mismos que están rodeados por grandes aparatos volcánicos, los cuales establecen los sistemas de recarga para los acuíferos de origen granular y basáltico. Además dentro de la zona de interés, están contenidos los manantiales, el Distrito de Riego 061, las presas de almacenamiento, los ríos Duero, Celio, Tlazazalca, así como las principales cabeceras municipales de la región.

Capas del modelo

Identificados en conjunto las unidades estratigráficas (SARH, 1977), la geología superficial del sitio (Garduño-Monroy *et al.*, 1999), y el marco hidrogeológico (Ordaz y Velázquez, 1993-1994), se optó por proponer el diseño de tres subsistemas acuíferos, definidos en tres diferentes capas intercomunicadas entre sí (Figura 17). En el Anexo (Figuras D, E y F) muestran la distribución espacial de los materiales geológicos y características hidráulicas que componen las capas del modelo.

Tabla 10. Características geológicas de las capas que componen al sistema acuífero.

| CAPA | UNIDADES GEOLÓGICAS | MATERIALES | K m/día | Ss m ⁻¹ | Sy | PROF. prom. m | TIPO |
|------|--|---|---------------|--|-----------------|---------------------|--------------------|
| 1 | Depósitos sedimentarios (Qal y Qla) | Material de acarreo cuya granulometría varía de gravas, arenas, limos y arcillas mezclados en diferentes proporciones. | 0.5 ~ 449 | 3.1×10^{-7} ~ 9.4×10^{-5} | 0.01 ~ 0.18 | 121 | Acuífero Superior |
| 2 | Conos de escorias y relativos flujos piroclásticos (Qp) | Coladas y derrames fracturados brechas y piroclásticos de mediana a nula compactación. Los afloramientos están representados por alineamientos de pequeños aparatos volcánicos de constitución piroclástico | 0.104 ~ 31 | 6.3×10^{-5} ~ 1.4×10^{-5} | 0.014 ~ 0.11 | 209 | Acuífero Principal |
| 3 | Conos de lavas y pequeños volcanes escudos (Qb), Basaltos. | Derrames, coladas, aglomerados, piroclásticos y tobas de composición basáltica y basalto-andesítico. Las sierras están formadas de domos, conos volcánicos y derrames de lava. | 1.4 ~ 1987 | 1.1×10^{-5} ~ 4.1×10^{-5} | 0.07 ~ 0.27 | 303 | Acuífero Profundo |

Cada capa representa los materiales que integran el tipo de acuífero a simular, además de un rango de valores característicos de conductividad hidráulica (K), coeficientes de almacenamiento específico (Ss) y rendimiento específico para cada unidad geológica (Tabla 10). El material que limita inferiormente a la capa 3, está compuesto de Andesitas, dacitas y piroclastos del Tancítaro y Chapala; no se simuló porque hidráulicamente es de muy baja permeabilidad, por esta razón se optó a delimitarlo en profundidad considerándolo como el basamento del acuífero profundo. El siguiente modelo tridimensional representa de forma esquemática la región en estudio, integrado por tres capas con diferentes propiedades hidrogeológicas; sirviendo de sustento para implementarse en Modflow (Figura 17).

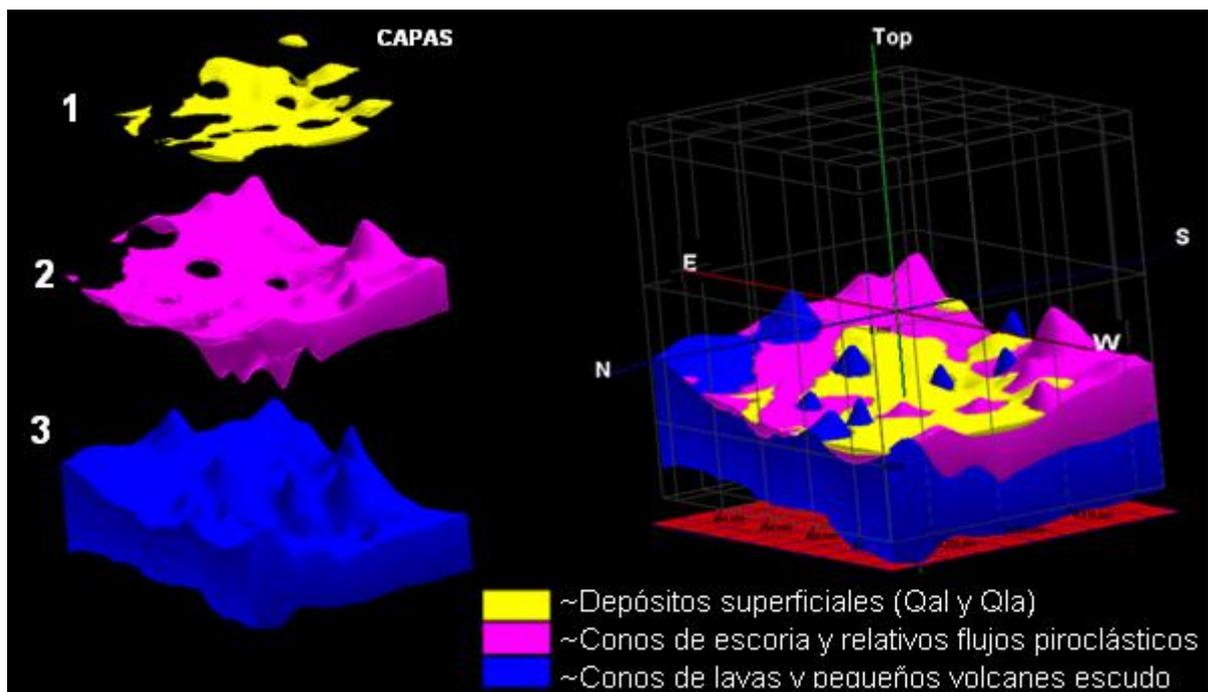


Figura 17. Esquema tridimensional de las capas que integran el sistema acuífero Zamora.

Balance Hidrogeológico

La masa de agua que entra a un elemento de acuífero en un instante de tiempo se puede expresar como el volumen de agua que entra en ese instante (sección por velocidad y por tiempo) multiplicado por la densidad del agua; en ese mismo instante por la cara opuesta separada de la anterior dx sale el volumen de agua (Figura 14). Para que se cumpla el principio de conservación de la masa, la diferencia entre la que entra y sale, ha de ser igual a la variación en el almacenamiento en esa dirección (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006). En el rango de temperaturas y presiones normales del agua subterránea su densidad no sufre variaciones de consideración y para fines prácticos puede trabajarse con volumen en lugar de masa (Fuentes, 2000), y es conocida como ecuación de continuidad (5) (Spitz and Moreno, 1996).

$$\text{Entradas} - \text{Salidas} = \text{Cambio en el almacenamiento} \quad (5)$$

Esta ecuación es la base para realizar un balance hídrico; con el fin de estimar la disponibilidad de agua en cuencas hidrológicas. En este caso, se planteará la ecuación tomando en cuenta componentes superficiales y subterráneos utilizando como referencia la cuenca superficial, a lo que se le conoce como balance hídrico integrado o balance hidrogeológico (Lafragua *et al.*, 2003).

Las entradas (recargas) así como las salidas (descargas) de agua en el acuífero se presentan de diferentes formas. La recarga puede darse por flujo subterráneo horizontal y por flujo vertical; la descarga puede tener lugar como flujo horizontal, aflorando como manantiales y/o escurrimiento hacia cuerpos de agua superficial como ríos o lagos, por bombeo y por evapotranspiración en acuíferos freáticos con niveles someros (Fuentes, 2000).

De acuerdo al modelo conceptual establecido para esta cuenca, se integraron al balance de aguas los siguientes términos superficiales y subterráneos (ecuación 6 y Tabla 11):

$$I_c + E_h + I_p + I_r - (D_m + D_c + E_{vt} + S_h + B) = \pm \Delta Q \quad L^3 \quad (6)$$

donde las entradas y salidas son:

Tabla 11. Componentes del balance hidrogeológico en función del modelo conceptual.

| ENTRADAS | SALIDAS |
|--|---|
| ~ Infiltración a lo largo de corrientes (Ic) | ~ Descargas por manantiales (Dm) |
| ~ Subterráneas horizontales (Eh) | ~ Aportación a corrientes superficiales (Dc) |
| ~ Infiltración por lluvia (Ip) | ~ Evapotranspiración (Evt) |
| ~ Infiltración en área de riego (Ir) | ~ Subterráneas horizontales (Sh) |
| ~ Infiltración por obras de recarga artificial (Ia) | ~ Extracción de agua del subsuelo (B) |

siendo ΔQ el cambio en el almacenamiento definido por: (Spitz and Moreno, 1996; Díaz, 2001)

$$\pm \Delta Q = A \cdot S_y \cdot (h(t+\Delta t) - h(t)) \quad (7)$$

donde:

t = tiempo, T

Δt = Incremento en el tiempo, T

A = Área del acuífero a considerar, L²

h = Carga hidráulica en el periodo establecido, L

S_y = Rendimiento específico

El que normalmente no de cero en un balance se debe a que es necesaria la medida independiente de cada uno de los términos de la ecuación y cuando se desconoce alguno de los términos se deduce por diferencia (ecuación 8). El periodo de tiempo seleccionado debe estar en función de los datos disponibles, estableciendo el entorno donde se aplique el balance simplificando el mayor número de términos posibles. La credibilidad de los resultados en los balances es un tema controvertido, pero se han mostrado como herramientas útiles; sin olvidar que se trata de aproximaciones a un fenómeno natural complejo (Díaz *et al.*, 2006).

Las Tablas 12 y 13 muestran las distribuciones de los volúmenes promedios anuales de recarga y descarga; seguido de una breve justificación sobre como se obtuvieron los valores de los elementos del balance hidrogeológico.

Tabla 12. Recarga total estimada distribuida en función de los términos más importantes

| Entradas (Recargas) | 1x10 ⁶ m ³ /año | % rec. |
|--|---------------------------------------|-----------|
| ~ Infiltración a lo largo de corrientes, del río al acuífero (I _c) | 111 | 5 |
| ~ Subterráneas horizontales en sierras y montañas (E _h) | 106 | 5 |
| ~ Infiltración por lluvia en áreas de riego (I _p) | 61 | 3 |
| ~ Infiltración de lo que deriva el DR 061 (I _r) | 159 | 8 |
| | 436 | 21 |

Tabla 13. Descarga total estimada distribuida en función de los términos más importantes

| Salidas (Descargas) | 1x10 ⁶ m ³ /año | % des. |
|---|---------------------------------------|-----------|
| ~ Descargas por manantiales (D _m) | 151 | 24 |
| ~ Aportación a corrientes superficiales, Gasto Base (D _c) | 104 | 16 |
| ~ Evapotranspiración (E _{vt}) | 145 | 23 |
| ~ Subterráneas horizontales (S _h) | 36 | 6 |
| ~ Extracción de agua del subsuelo (B) | 67 | 10 |
| | 503 | 79 |

Retomando la ecuación (6) y sustituyendo los valores citados de las Tablas 12 y 13, se estima que:

$$I_c + E_h + I_p + I_r - (D_m + D_c + E_{vt} + S_h + B) = \pm \Delta Q \quad L^3 \quad (8)$$

$$111 + 106 + 61 + 159 - (151 + 104 + 145 + 36 + 67) = \pm \Delta Q \quad x10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

$$\Delta Q = - 67 \quad x10^6 \text{ m}^3/\text{año}$$

Iniciada la actividad del bombeo, se modifica el equilibrio natural del acuífero, al interceptar las salidas naturales del sistema, como la evapotranspiración y el flujo base del río, perturbando al ecosistema y obligándolo a retomar posteriormente un estado de equilibrio dinámico.

Aspectos hidrológicos a simular

Ríos: El río Duero se caracteriza por tener un escurrimiento perene durante todo el año y representa una fuente de aporte a la recarga del acuífero. Esta recarga se estimó mediante un balance hídrico a lo largo de todo el cauce, calculando un volumen de infiltración de 110,774,835 m³/año. Por otro lado, el volumen subterráneo que aporta el acuífero al río en periodo de estiaje (Flujo Base) se estimó del hidrograma promedio anual de la cuenca, con 104,208,509 m³/año.

Recarga: La precipitación pluvial se presenta sobre los depósitos sedimentarios de origen aluvial y lacustre. Este volumen de infiltración se determinó empleando la metodología de Green-Ampt (1911), que es muy aplicado en hidrología para estimar la cantidad de agua que se infiltra en el suelo, calculando la tasa o velocidad de infiltración (**f**) que esta en función de la textura y estructura del suelo; la infiltración acumulada o reserva útil (**F**) como la cantidad de agua que se infiltra en el suelo y la profundidad del frente de mojado (**L**). Este método requiere de conocer valores de parámetros representativos de conductividad hidráulica (**K**), porosidad efectiva (θ_e) y cabeza de succión del suelo (ψ) en el frente de mojado (Chow *et al.*, 1994; ASCE, 1996). El volumen promedio calculado fue 60,622,311 m³/año.

Otra importante fuente de agua que entra al acuífero es la generada por la actividad agrícola (riego). Se ha estimado que se deriva al río Duero un volumen medio anual de 159,187,457 m³/año para el riego promedio de unas 11,754 Ha (CNA, 2007).

Condiciones de frontera: El criterio principal para la delimitación de la frontera fue el de seguir la periferia de los depósitos superficiales, quedando limitado entre el piedemonte de las estructuras volcánicas. La Figura 16 ilustra cómo la frontera limita internamente (en color verde) toda la planicie aluvial, así como a profundidad llegando hasta la última capa que integra al acuífero (siendo acotada por rocas andesíticas). Toda la frontera exterior representa la recarga por lluvia en sierras y montañas a excepción de la salida en el valle de Ixtlán con dirección NW hacia Ciénega de Chapala.

Para generar el flujo subterráneo de entrada que cruza las fronteras exteriores del modelo se empleo el concepto de carga remota variable, el cual consiste en asignar un valor de carga hidráulica conocido alejado de la frontera de entrada. Para la asignación de estos valores se empleo la configuración piezométrica del año 1999

para las subcuencas altas y para la región de las grandes planicies se empleo la configuración del año 2007. Finalmente estas entradas subterráneas se ajustaron al volumen promedio de recarga $105,642,311 \text{ m}^3/\text{año}$, valor estimado por el método balance hídrico de Thornthwaite-Mather (1979) (Blanco *et al.*, 1998).

De igual forma para representar el flujo subterráneo de salida (hacia Ciénega de Chapala) se empleo una carga remota conocida de menor valor alejado del punto referente de salida, y empleando la metodología de redes de flujo se obtuvo un volumen de salida promedio de $35,756,850 \text{ m}^3/\text{año}$.

Pozos de extracción: El historial de bombeo cuenta con un censo hecho en 1977 por la SARH donde se registraron 112 pozos de extracción, de los cuales 93 se utilizaron para simular por contar con ubicación geográfica (x, y). Recientemente en 2007, la CNA presentó un informe estadístico de aprovechamientos superficiales y subterráneos de la zona acuífera; de 478 pozos de extracción sólo se simularon 429 debido a que el resto se ubicaban fuera del área de interés. La Tabla 14 muestra dos periodos de tiempo a simular (de 22 y 8 años). El primer intervalo de tiempo esta asociado a un mayor volumen de extracción concentrado en pocos pozos y el segundo a una disminución en la extracción, repartida en mayor numero de pozos.

Tabla 14. Pozos de extracción a simular durante los periodos asignados (SARH, 1977; año 1999 a 2007 CNA, 2007)

| PERIODO DE TIEMPO | INTERVALO A SIMULAR | POZOS EN EL ACUIFERO | POZOS A SIMULAR | INTERVALO DE VOLUMEN DE EXTRACCIÓN ACUMULADO $\text{m}^3/\text{año}$ |
|-------------------|---------------------|----------------------|-----------------|--|
| 1 | 1977 - 1999 | 112 | 93 | 25,830,472 ~ 55,271,245 |
| 2 | 1999- 2007 | 478 | 429 | 55,271,245 ~ 66,887,947 |

Manantiales: Estas fuentes descargan en la región un volumen promedio anual de $151,283,874 \text{ m}^3/\text{año}$ (cifra reinterpretada del proyecto SARH, 1977). Se presume que este volumen procede de la precipitación pluvial y del almacenamiento del acuífero, debido a que la mayoría de los manantiales son de de menor caudal y con marcada variación estacional. Caso contrario sucede con otros manantiales, como el Camécuaro en el municipio de Tangancicuaro, siendo de mayor caudal y con variabilidad estacional mínima, presentando un aforo medio de $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1977 y de $1.8 \text{ m}^3/\text{s}$ en 1999. De comportamiento similar sucede con el Lago de Camécuaro que de 1964 a 2002 ha presentado un gasto medio anual de $2.0 \text{ m}^3/\text{s}$ con variaciones en 1.9 y $2.1 \text{ m}^3/\text{s}$.

De los 71 manantiales que hay en la zona de estudio sólo se simularon 11 por contar con mayor registro, ubicándose principalmente en las localidades de Chilchota, Tangancícuaro y Jacona. Velázquez *et al.* (2005) identificaron en campo 86 manantiales. Por tal razón este concepto hidrológico representa el volumen de descarga con mayor incertidumbre en la cuantificación del balance.

Evapotranspiración: La evapotranspiración es otro tipo de descarga que actúa con mayor intensidad en zonas o áreas donde el nivel estático es somero. Según la CNA (1998) el efecto de este fenómeno climático puede alcanzar a superficies freáticas situadas a menos de 10 metros de profundidad, para lo que se debe considerar un factor de incidencia que varía de 0 a 100% dependiendo de la profundidad (Díaz, 2001). El volumen promedio anual estimado por el modelo fue 144,977,694 m³/año.

Para estimar la evapotranspiración real en el área de estudio se utilizó el método del balance de agua en suelos de Thornthwaite-Mather (1957). Para implementar este método de balance se necesita conocer la precipitación mensual, la temperatura mensual, la evapotranspiración potencial y la capacidad de retención de agua del suelo. Bajo la consideración de que el balance hídrico es un ciclo anual y continuo mes a mes, se parte que al inicio del año hidrológico el suelo está seco, por lo que se asigna un valor de capacidad de campo, a partir del cual se producirá recarga y con el supuesto de que el suelo se puede volver a secar bajo los efectos de la evapotranspiración potencial (Blanco *et al.*, 1998).

Carga Hidráulica: La altura que alcanza el agua subterránea en el interior de un pozo dentro de un acuífero, se le conoce como nivel piezométrico o nivel freático. Por ende, la energía que tiene el agua en ese punto se le denomina potencial hidráulico o carga hidráulica. En un sistema estático la carga hidráulica tiene el mismo valor en todos sus puntos y en uno dinámico el movimiento será de los puntos de mayor carga hidráulica a puntos de menor carga hidráulica (Martínez-Alfaro *et al.*, 2006).

Los valores iniciales de carga hidráulica que se utilizaron para representar el flujo subterráneo en estado estacionario (antes de 1977) fue la topografía de la región. Posteriormente en 1977, se contó con los primeros registros piezométricos distribuidos en siete municipios de la cuenca, generando con ello la configuración inicial de elevación del nivel estático, que se implementó como condición inicial para el modelo de simulación en estado transitorio (Figura 10).

Delimitación del modelo (celdas activas e inactivas): El modelo consta de un área a simular de 813.25 km², discretizados en una malla de 100 columnas a cada 500 m y 80 renglones a cada 500 m dando un total de 8000 celdas; de las cuales 3253 son celdas activas a simular y 4747 celdas inactivas que no formaran parte de la simulación (Figura 18).

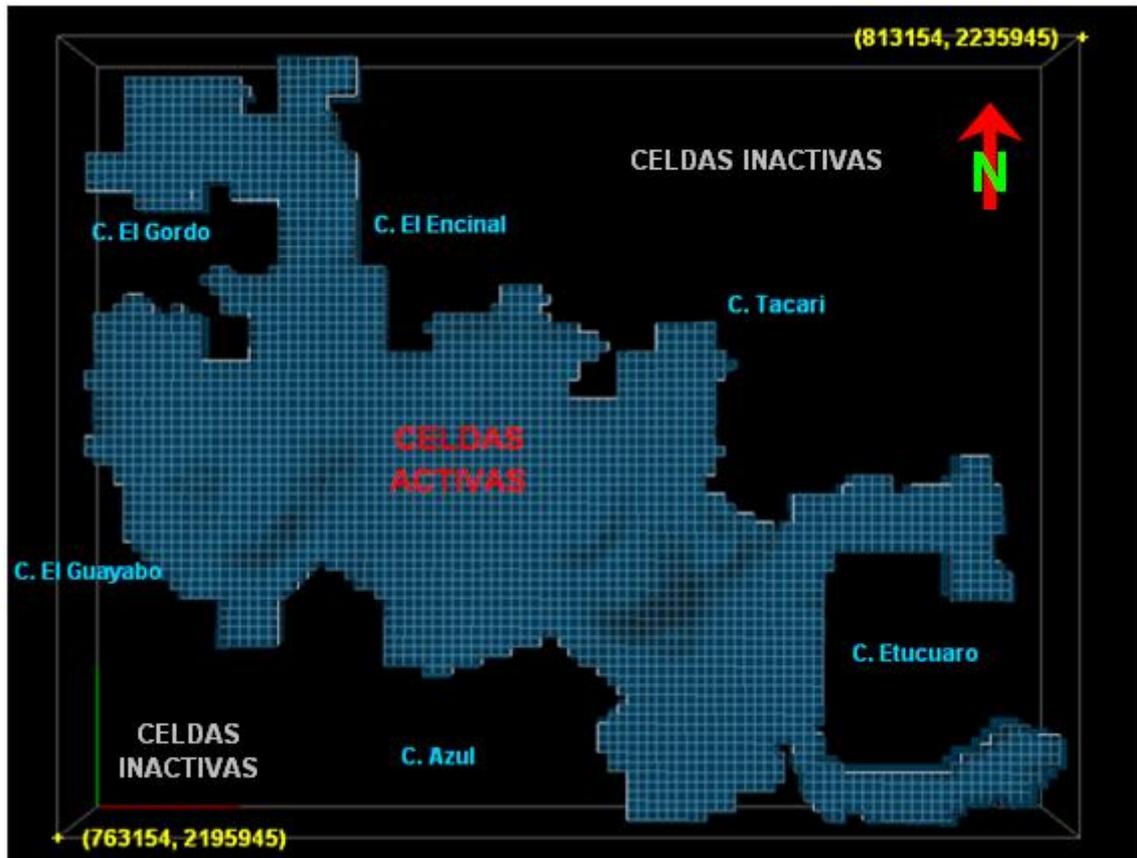


Figura 18. Vista en planta de las celdas activas o mallado a modelar (en la periferia del área a simular se indican algunas estructuras importantes)

IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO

Consiste en implementar el modelo conceptual a un modelo matemático. De acuerdo al modelo conceptual desarrollado para este proyecto, los principales componentes hidrológicos de origen superficial y subterráneo que sustentan el modelo acuífero, se definieron bajo los rubros de entradas y salidas en: recarga del río al acuífero, recarga por sierras y montañas, recarga por lluvias, recarga por riego inducido, recarga por agua residual vertida principalmente en ríos; descarga por manantiales, descarga del acuífero al río, evapotranspiración, descarga horizontal y bombeo en pozos (Tabla 15).

Tabla 15. Aspectos hidrológicos asignados, en la integración del balance hidrológico.

| EINTRADAS AL SISTEMA | |
|----------------------------------|---|
| ~ Recarga del río al acuífero | A través del lecho de los Río Duero, Río Tlazazalca y Río Celio. |
| ~ Recarga por sierras y montañas | Todos los aparatos volcánicos periféricos a los depósitos superficiales generan infiltraciones al acuífero. |
| ~ Recarga por lluvias | Infiltración presente en toda la zona de depósitos superficiales (aluvial y lacustre). |
| ~ Recarga por el DR 061 | El Distrito de Riego deriva agua del río Duero, para el riego de cultivos por medio obras hidráulicas. |
| ~ Recarga por agua residual | Vertidas principalmente sobre el río Duero (agua potable con drenaje y sin drenaje) |
| SALIDAS DEL SISTEMA | |
| ~ Descarga por manantiales | Se simularon 11 aprovechamientos (independientes entre ellos). |
| ~ Descarga del acuífero al río | Separación del gasto base del directo, del hidrograma de la estación hidrométrica La Estanzuela. |
| ~ Evapotranspiración real | Se determinó mediante el método de balance de agua en suelos. |
| ~ Salida por flujo subterráneo | Salida del caudal subterráneo hacia el valle de Chapala. |
| ~ Pozos de extracción | El tiempo de simulación de los pozos de extracción fue de 30 años correspondiente al periodo de 1977-2007. |

La implementación del sistema acuífero Zamora quedo integrado por materiales geológicos de origen basáltico, piroclástico, depósitos sedimentarios, topografía, carga hidráulica inicial y áreas regionales de recarga y descarga (Figura 19).

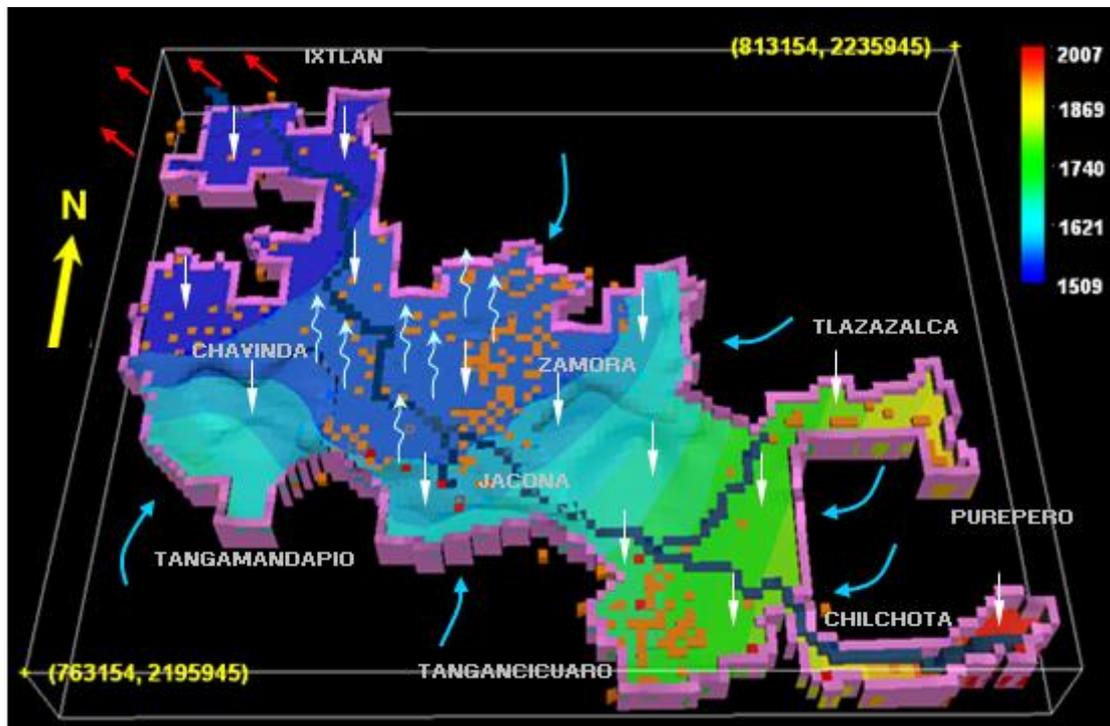


Figura 19. Implementación del sistema acuífero Zamora a Modflow 2000. ↖ Salida subterránea hacia Ciénega de Chapala, ↙ Entradas subterráneas (recarga por sierras y montañas), ↓ recarga y descarga del río al acuífero, ● descarga por manantiales, ● pozos de extracción, ↓ recarga por precipitación (blancas), ↘ descarga por evapotranspiración, ↗ configuración piezométrica (rojo-mayor carga hidráulica a azul-menor carga hidráulica).

Modelo en Régimen Estacionario (SS)

Para representar las condiciones naturales del sistema acuífero antes de ser perturbado activamente, se simuló en condiciones estacionarias donde la carga hidráulica o nivel piezométrico permanece sin cambios a lo largo del tiempo.

Para lograr esta condición será necesario implementar:

- ~ Inicialmente el balance hidrogeológico se hará sin la presencia de pozos de extracción.
- ~ Las capas que conforman al sistema acuífero están integrados por: capa 1-libre, capa 2-convertible y capa 3-confinada.
- ~ Los aspectos hidrológicos a simular estarán bajo condiciones anuales promedio.
- ~ El periodo a simular será de un año, debido a que la carga hidráulica no variara con respecto al tiempo.
- ~ Las celdas inactivas no forman parte de la modelación.
- ~ En condiciones estacionarias el almacenamiento del acuífero se considera constante, actuando solo como transmisor de flujo.
- ~ La carga hidráulica estará inicialmente representada por la topografía de la zona; por la carencia de registros históricos.
- ~ Cada material geológico utilizado para representar las capas acuíferas presentan valores propios de conductividad hidráulica, en su componente vertical y horizontal.
- ~ Modflow emplea a los aspectos hidrológicos como funciones: **(RIV)** ríos, **(RCH)** recarga vertical, **(DRN)** manantiales o drenes, **(GHB-General Head Boundary)** entradas y salidas horizontales y **(EVT)**.evapotranspiración. Mismos que representarán las condiciones naturales estacionarias en el acuífero, aun sin presencia del bombeo representado por la función **WEL** (pozos).

RIV: Para cada tramo de río se utilizó un valor diferente de conductancia, como valor promedio es $223 \text{ m}^2/\text{día}$.

RCH: En esta función se estimó un valor promedio anual de $7.4 \times 10^{-4} \text{ m}/\text{día}$. Incluye las precipitaciones pluviales y los retornos de riego.

DRN: Cada dren representa un manantial; como valor promedio es $6030 \text{ m}^2/\text{día}$.

GHB: Esta función representa las sierras y montañas del sistema acuífero, generando las entradas y salidas del sistema; con valores de conductancia estimados en 0.5 a $951 \text{ m}^2/\text{día}$.

EVT: Esta es una salida importante de agua en el sistema, estimándose para ello un valor promedio anual de $1.6 \times 10^{-3} \text{ m}/\text{día}$.

Calibración en régimen estacionario

Watts (1989) establece que el análisis de sensibilidad en el periodo estacionario se inicia con una serie de corridas modificando los datos de entrada y salida, hasta que el balance hidráulico estimado por el modelo se aproxime a cero. Así pues, cuando los volúmenes de recarga y descarga sean semejantes a lo largo del tiempo y la variación de los niveles piezométricos sean nulos se tendrá una calibración aceptable (Ruvalcaba, 2009). La calibración se realizó mediante la técnica de ensayo y error (**trial and error**) (Anderson & Woessner, 1992). Actualmente hay programas para la estimación automática de parámetros hidráulicos (*PEST* y *UCODE*), sin embargo para la realización de este proyecto se optó por la técnica tradicional de ensayo y error.

Las funciones hidrológicas que se emplearon para calibrar el estado estacionario fueron: la conductancia del río (**RIV**), los manantiales (representados por la función **DRN**) y la conductancia en las entradas y salidas del sistema (**GHB**). Estas funciones se ajustaron a los volúmenes ya estimados previamente (Tablas 12 y 13). Ahora bien, como aún no entra en juego el coeficiente de almacenamiento, se supone que las entradas son iguales a las salidas del acuífero por lo que en el balance hidrogeológico de la Figura 20, se aseguró que la línea correspondiente al porcentaje de discrepancia (**Percent Discrepancy**) estuviera del orden cercano a cero. Empleando una y otra vez este procedimiento de calibración hasta lograr

aproximar el error a cero. La recarga (**RCH**) y la evapotranspiración (**EVT**) no se calibraron porque el modelo dio como salida el mismo valor promedio que se introdujo.

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos y aceptados como primer balance hidrogeológico, donde los volúmenes de entrada son similares a los de salida. A su vez, éste modelo en condiciones naturales servirá de base para el desarrollo del modelo en estado transitorio.

| VOLUMETRIC BUDGET FOR ENTIRE MODEL AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1 | | | | | |
|--|-------------|-------------|--------|--------|--------------------------------|
| ----- | | | | | |
| CUMULATIVE VOLUMES | | | | | |
| ----- | | | | | |
| IN: | | | | | |
| --- | | | | | |
| STORAGE = | | | | | 0.0 |
| CONSTANT HEAD = | | | | | 0.0 |
| DRAINS = | | | | | 0.0 |
| RIVER LEAKAGE = | | | | | 112300576.0 |
| ET = | | | | | 0.0 |
| HEAD DEP BOUNDS = | | | | | 105068008.0 |
| RECHARGE = | | | | | 219809296.0 |
| TOTAL IN = | | | | | 437177888.0 [m ³] |
| OUT: | | | | | |
| ---- | | | | | |
| STORAGE = | | | | | 0.0 |
| CONSTANT HEAD = | | | | | 0.0 |
| DRAINS = | | | | | 148576160.0 |
| RIVER LEAKAGE = | | | | | 103720488.0 |
| ET = | | | | | 140381296.0 |
| HEAD DEP BOUNDS = | | | | | 44543572.0 |
| RECHARGE = | | | | | 0.0 |
| TOTAL OUT = | | | | | 437221504.0 [m ³] |
| IN - OUT = | | | | | -43616.0 |
| PERCENT DISCREPANCY = | | | | | -0.01 |
| TIME SUMMARY AT END OF TIME STEP 10 IN STRESS PERIOD 1 | | | | | |
| | SECONDS | MINUTES | HOURS | DAYS | YEARS |
| TIME STEP LENGTH | 3.15360E+06 | 52560. | 876.00 | 36.500 | 9.99316E-02 |
| STRESS PERIOD TIME | 3.15360E+07 | 5.25600E+05 | 8760.0 | 365.00 | 0.99932 |
| TOTAL TIME | 3.15360E+07 | 5.25600E+05 | 8760.0 | 365.00 | 0.99932 |

Figura 20. Calibración final y balance hidrogeológico en régimen estacionario, antes de 1977.

La evaluación de los recursos hídricos en una cuenca requiere de una estimación correcta de los componentes del balance hidrológico; como la precipitación que se reparte en los procesos de evapotranspiración, escurrimiento e infiltración (ecuación 9). La ecuación de balance hidrológico es una expresión muy simple aunque la cuantificación de sus términos usualmente es complicada por la falta de medidas directas (Llorens, 2003).

$$Pp = Evt + Es + In \quad L^3 \quad (9)$$

Conocida la lluvia (**Pp**), la evapotranspiración (**Evt**) y el escurrimiento superficial (**Es**) se puede calcular por diferencia la infiltración (**In**) quedando definida mediante la ecuación (10) (Llorens, 2003; Pulido, 2007).

$$In = Pp - Evt - Es \quad L^3 \quad (10)$$

A continuación se muestran los valores promedios de los componentes que integran el balance hidrológico en la cuenca Río Duero (Tabla 16).

Tabla 16. Estimación de las componentes principales del balance hidrológico regional.

| Balance hídrico de la cuenca Río Duero, en un área de 2230 x10 ⁶ m ² | | | | |
|--|------------|--|-----------|---|
| Componente | mm/año | 1 x10 ⁶ m ³ /año | % | Método directo o indirecto |
| Precipitación Pluvial (Pp) | 937 | 2089 | 100 | Estaciones climatológicas, ERIC 3 (Met. Dir.) |
| Evapotranspiración Real (Evt) | 591 | 1317 | 63 | Método de Thornthwaite-Mather, Balance de agua en suelos, (Met. Ind.) |
| Escurrimiento Superficial (Es) | 149 | 332 | 16 | Estación hidrométrica La Estanzuela, aforando a la salida de la cuenca, (Met. Dir.) |
| Infiltración (In) | 197 | 439 | 21 | Valor estimado por diferencia |

El estimar las componentes de este balance fue para observar la magnitud y distribución; principalmente el de la infiltración que es la componente con mayor incertidumbre. Cabe destacar que en la Figura 20 se muestra el volumen total de entrada (línea **Total IN**). Este volumen total que ingresa al acuífero esta desglosado en (infiltración del río al acuífero, entradas subterráneas horizontales y agrupadas las recargas por lluvia y retornos de riego), dando una suma total promedio de 437,177,888 m³/año cifra muy cercana al valor de infiltración calculado por el balance hídrico de la Tabla 12. Dicho de otra forma, primero se estimo el balance hídrico total y posteriormente se calcularon por separado las componentes que integran a ese volumen de infiltración, lo que garantiza una adecuada estimación en sus componentes porque se calcularon por dos técnicas diferentes.

Ajustado y aceptado el balance hídrico en estado estacionario (Figura 20) se presenta en forma tridimensional el sistema acuífero Zamora, con las principales entradas y salidas, así como los rangos de escala en que se presenta la carga hidráulica, aun sin estar bajo la influencia del bombeo (Figura 21).

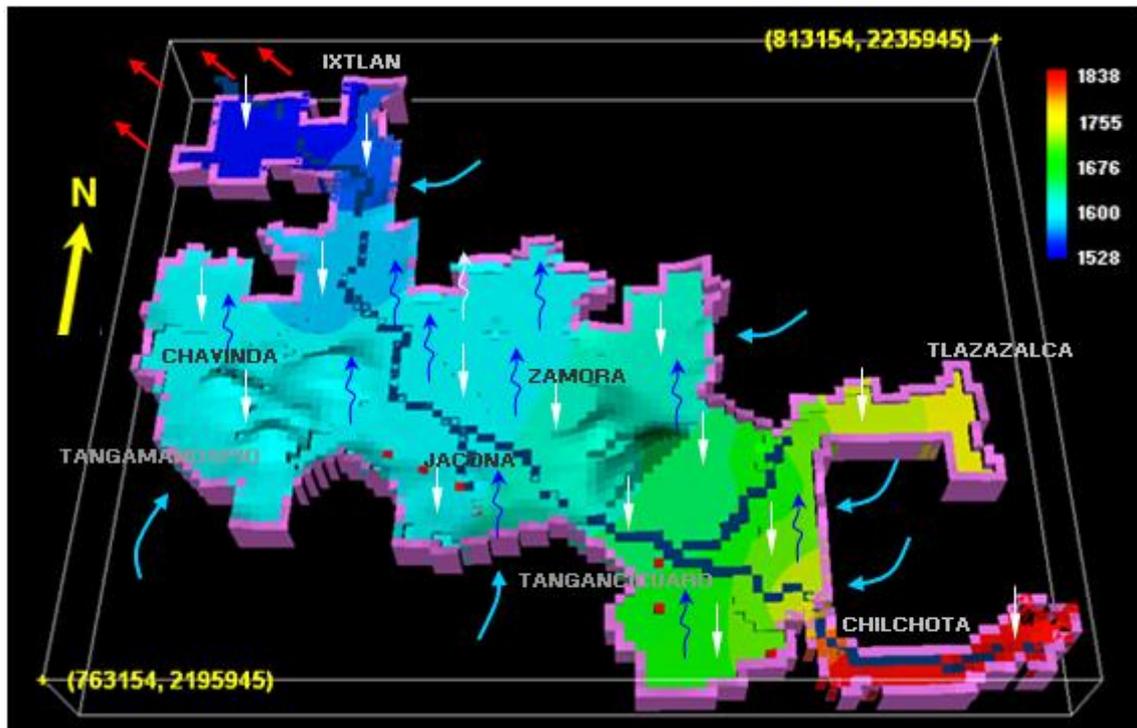


Figura 21. Modelo tridimensional del sistema acuífero Zamora (estado estacionario)

↖ Salida subterránea hacia Ciénega de Chapala, ↙ Entradas subterráneas (recarga por sierras y montañas), ↕ recarga y descarga del río al acuífero, ↘ descarga por manantiales, ↓ recarga por precipitación (blancas), ↕ descarga por evapotranspiración, ↕ niveles estáticos antes de 1977 (rojo-mayor carga hidráulica - azul-menor carga hidráulica).

Modelo en Régimen Transitorio (TR)

El movimiento del flujo subterráneo se puede presentar también bajo condiciones transitorias, es decir que la cantidad de agua contenida en el almacenamiento es variable con respecto del tiempo en cada punto del acuífero. Es decir, que el acuífero no sólo transmite agua sino que también la proporciona entrando en juego el coeficiente de almacenamiento (Díaz *et al.*, 2006).

Para lograr la condición transitoria será necesario implementar:

- ~ La simulación comenzará en 1977 por ser el año con el que se cuenta con mayor información piezométrica.
- ~ El modelo representará 30 años de simulación definido en dos periodos de tiempo. El primero de 1977 a 1999 (22 años o 8186 días) y el segundo de 1999 a 2007 (periodo de 8 años o 2861 días).

- ~ El modelo en régimen o estado estacionario servirá de base para el nuevo modelo en estado transitorio.
- ~ Como carga hidráulica inicial se utilizó la configuración de elevación de nivel estático, año 1977.
- ~ Las capas que conforman al sistema acuífero seguirán bajo la misma modalidad de capa1-libre, capa2-convertible y capa3-confinada.
- ~ Se asignaron valores de coeficiente de almacenamiento en función de cada material geológico utilizado.
- ~ Los aspectos hidrológicos se mantendrán sin cambio y se activará la función **WEL** (pozos).

WEL: Para el primer periodo de tiempo a simular se emplearán 93 pozos, con un volumen promedio de extracción de 111,098 m³/día y para el segundo periodo a simular se utilizarán 429 pozos, con un volumen de extracción promedio de 167,341 m³/día.

- ~ Como se cuenta con información piezométrica en campo de 1999 y 2007, se espera que el modelo represente satisfactoriamente el mismo comportamiento piezométrico.
- ~ En la calibración del modelo se emplearán los parámetros hidráulicos: conductividad hidráulica (**K**) y coeficiente de almacenamiento (**S**).
- ~ El modelo final ya calibrado será la base para simular los escenarios futuros.

Calibración en régimen transitorio

Los modelos tienen que ser calibrados comparando las salidas piezométricas calculadas por el modelo con las condiciones de carga hidráulica observadas en campo (Foster *et al.*, 2002). Para lograr esta comparación entre niveles se varió gradualmente en orden de menor y mayor magnitud la conductividad hidráulica (**K**) y el coeficiente de almacenamiento (**S**), hasta el punto en que la configuración de salida generada por el modelo se sobrepusiera ante la configuración de nivel estático medida en campo (Figuras 23 y 24), considerando además que en el balance hidrogeológico entradas (**IN**) y salidas (**OUT**) al final del periodo de

simulación se mantuvieran similares entre si y que el porcentaje de discrepancia (**Percent Discrepancy**) se encontrara cercano a cero (Figura 22). Una desventaja de aplicar la técnica de ensayo y error, es que al momento de ajustar el coeficiente de almacenamiento éste tiende a sobreestimar el volumen almacenamiento; por otro lado no fue necesario variar sustancialmente la conductividad hidráulica vertical (K_v) debido a que el balance hidrogeológico y los niveles piezométricos no presentaron variaciones importantes.



Figura 22. Calibración final y balance hidrogeológico en régimen transitorio, 2007.

El balance hidrogeológico en estado estacionario mantenía un equilibrio natural (Figura 20), ahora en la Figura 22 los volúmenes de entrada y salida presentan reajustes al momento de ser influenciados por el bombeo de extracción, siendo los más susceptibles el flujo base, los manantiales, la evapotranspiración y en menor medida el aporte del río al acuífero y las entradas subterráneas, como medida y respuesta natural a retomar el equilibrio dinámico.

Periodo de simulación 1977 - 1999

La SARH (1977) realizó la piezometría en la región acuífera, sirviendo estos niveles de condiciones iniciales para el modelo. Posteriormente se obtuvo la piezometría del año 1999 líneas azules (CNA, 2007), sirviendo de referente para comparar con los niveles piezométricos calculados por el modelo (líneas rojas, Figura 23).

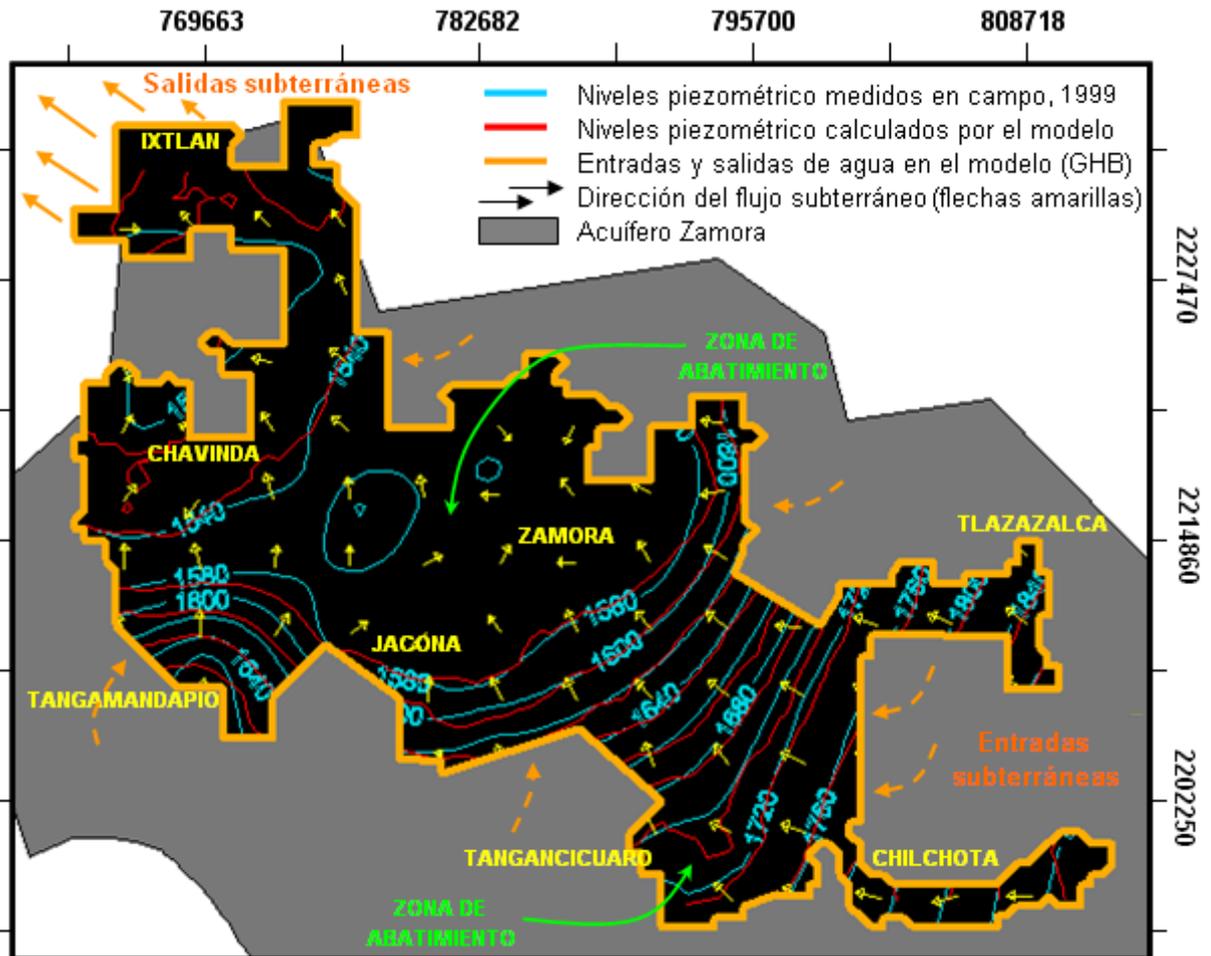


Figura 23. Comparación entre líneas equipotenciales de nivel estático, 1999.

En esta Figura 23 se localizan dos regiones (flechas en verde) con abatimiento en los niveles piezométricos producidos preferentemente por la actividad concéntrica del bombeo (Figura 27). La zona centro Zamora-Jacona presenta una área de influencia mayor, extendida sobre los grandes valles siendo delimitada por la línea piezométrica 1580 msnm hacia adentro. En la zona sur, valle de Tangancicúaro entre las líneas 1700 y 1720 msnm se localiza una menor área de influencia siendo ésta no tan extendida como la de la zona centro. Hidráulicamente se interpreta que a mayor radio de influencia y conductividad hidráulica, habrá menor cono de

abatimiento (zona centro) y caso contrario, a menor radio de influencia y conductividad hidráulica, habrá mayor cono de abatimiento (zona sur).

Periodo de simulación 1999 - 2007

En 2007 se monitoreo el nivel estático de la cuenca Río Duero. La Figura 24 representa el último periodo de simulación (2007), donde se reproduce aceptablemente la configuración piezométrica calculada por el modelo (líneas rojas) sobre la configuración piezométrica medida en campo (líneas azules).

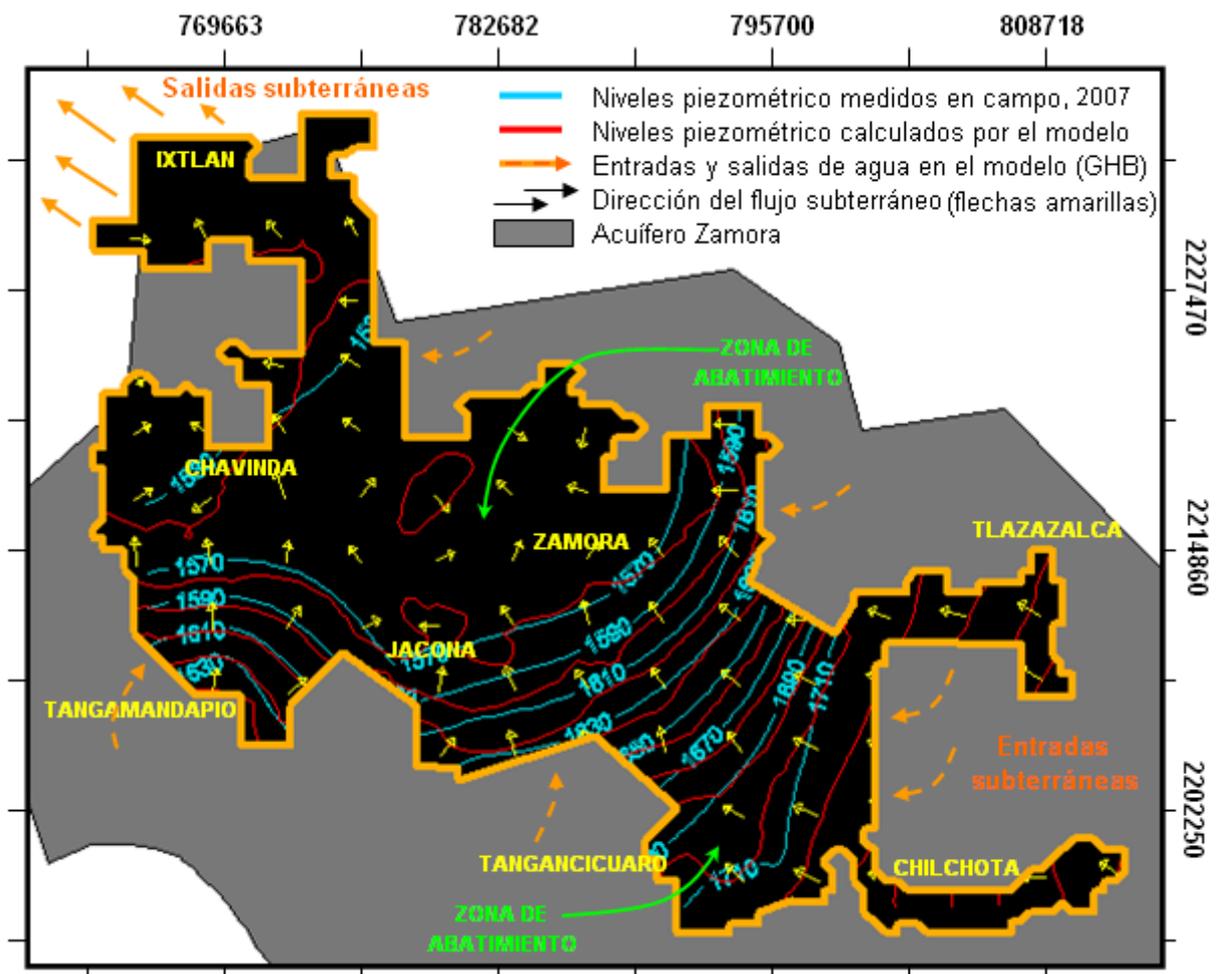


Figura 24. Comparación entre líneas equipotenciales de elevación de nivel estático, 2007

Transcurrido el tiempo (8 años después) se sigue conservando la configuración de nivel estático al tiempo en como se encontraba en 1977 y 1999. En las zonas de abatimiento el gradiente hidráulico en la subcuenca alta (valle de Tangancicuaro) es del orden de 10 veces mayor al gradiente hidráulico que se presenta en la parte media-baja de la subcuenca valle de Zamora, por lo que a mayor gradiente

hidráulico (i) y materiales de depósito más compactos habrá un mayor nivel dinámico, caso opuesto sucede si a menor gradiente hidráulico (i) y materiales de depósito menos compactos habrá menor nivel dinámico.

Otra condición obligada para validar el modelo de simulación es mediante análisis estadístico, el cual establece la aprobación o rechazo del modelo; ya que no basta con la aproximación a cero que se logre en el balance hidrogeológico y con la interpretación que uno haga al comparar las líneas equipotenciales observadas y calculadas por el modelo. Schwartz & Zhang (2003) consideran que el uso de la estadística es la forma más común de evaluar cuantitativamente la calibración de un modelo.

La aprobación de la calibración se logra mediante la evaluación de los siguientes métodos: el *Error Residual de Calibración* (ME o RM), el *Error Medio Absoluto* (MAE o ARM) y el *Error de la Raíz Media Cuadrática* (**RMSE** o **RMS**); sin embargo éste último (RMSE) es el que mejor mide el error (Rejani *et al.*, 2007).

El **error RMS** es uno de los mejores estimadores del error en la modelación y se expresa como la **raíz cuadrada de la media de las diferencias (entre los valores calculados y los valores observados) al cuadrado** (Anderson & Woessner, 1992; King *et al.*, 2003) y se define mediante la ecuación (11):

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_{calc} - X_{obs})^2} \quad m \quad (11)$$

donde:

X_{obs} son los valores de carga hidráulica medidos en campo en metros

X_{calc} son los valores de carga hidráulica simulados por el modelo en metros y

n es el número total de datos observados (en la comparación).

No obstante para otros autores (Waterloo Hydrogeologic, 1999; Fernández, 2004) el valor del **RMS** no tiene el mismo significado si el cambio de nivel en el dominio del modelo es 10 o 100 m. Por lo que se emplea como complemento el **RMS normalizado** que es igual al valor del **RMS** dividido por la máxima diferencia de los niveles o valores observados en campo y se define mediante la ecuación (12):

$$\text{Normalised RMS} = \frac{RMS}{(X_{calc})_{\max} - (X_{obs})_{\min}} \% \quad (12)$$

Una manera útil de presentar los resultados de la calibración transitoria es mediante una regresión lineal (Anderson & Woessner, 1992). La Figura 25 ilustra la distribución de cargas hidráulicas medidas en campo y calculadas por el modelo hasta el año de 1999, donde se observa que los puntos en rojo están coincidentes sobre la línea verde (referida al origen y con inclinación de 45°), lo que implica que cada punto medido en campo coincide o es semejante a cada punto calculado por el modelo. La Tabla 17 cuantifica con base en el cálculo del **RMS** de cuanto es el error de disparidad entre niveles comparados.

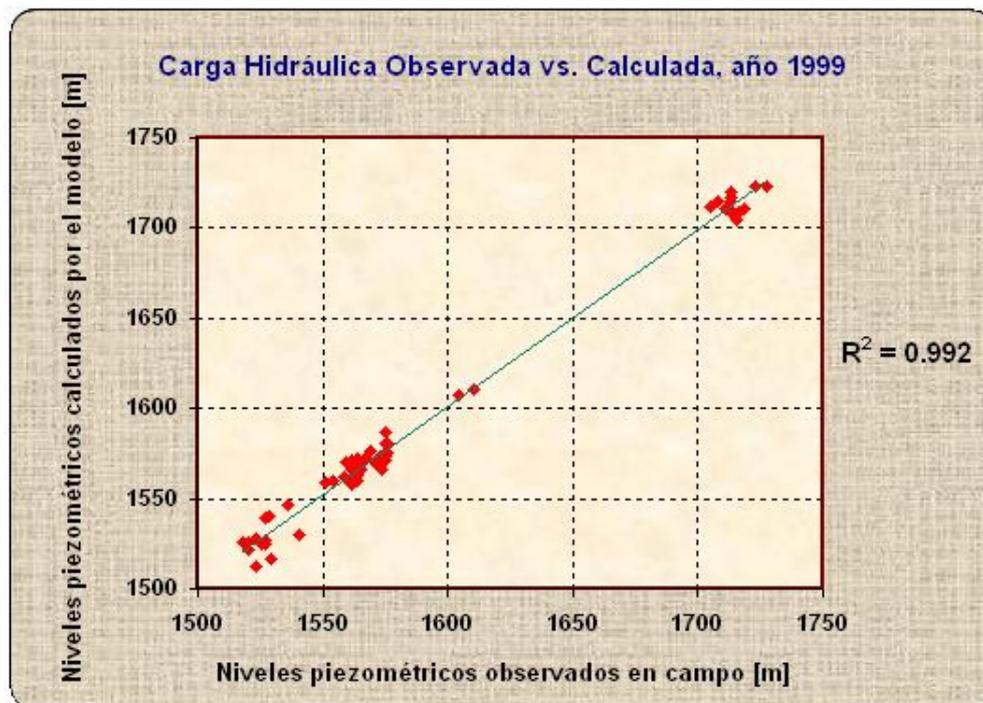


Figura 25. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 1999.

Es conveniente indicar que este primer periodo de simulación consta de 22 años de simulación, iniciado en 1977 (con información disponible) y terminado en 1999 (año con piezometría disponible). De no contar con esta información de 1999 se hubiera propuesto prolongar el periodo de simulación hasta 2007, año en que se visitó la zona de estudio para medir niveles estáticos.

El segundo periodo de simulación consta de 8 años y comprende los años de 1999 a 2007. De igual manera se compararon las cargas hidráulicas observadas y calculadas para el último año de simulación (2007) mediante un gráfico de dispersión de puntos (Figura 26). Es de observar que los puntos (rojos) se ajustan tendencialmente sobre una línea (verde), haciendo referencia a la ecuación de identidad donde a cada punto medido en “x” le corresponde uno igual calculado en “y”. Lo que significa, que el modelo se ajusta de manera aceptable a las condiciones naturales del acuífero y la cuantificación del error dentro de límites permisibles definirá su aceptación o el rechazo (Tabla 17).

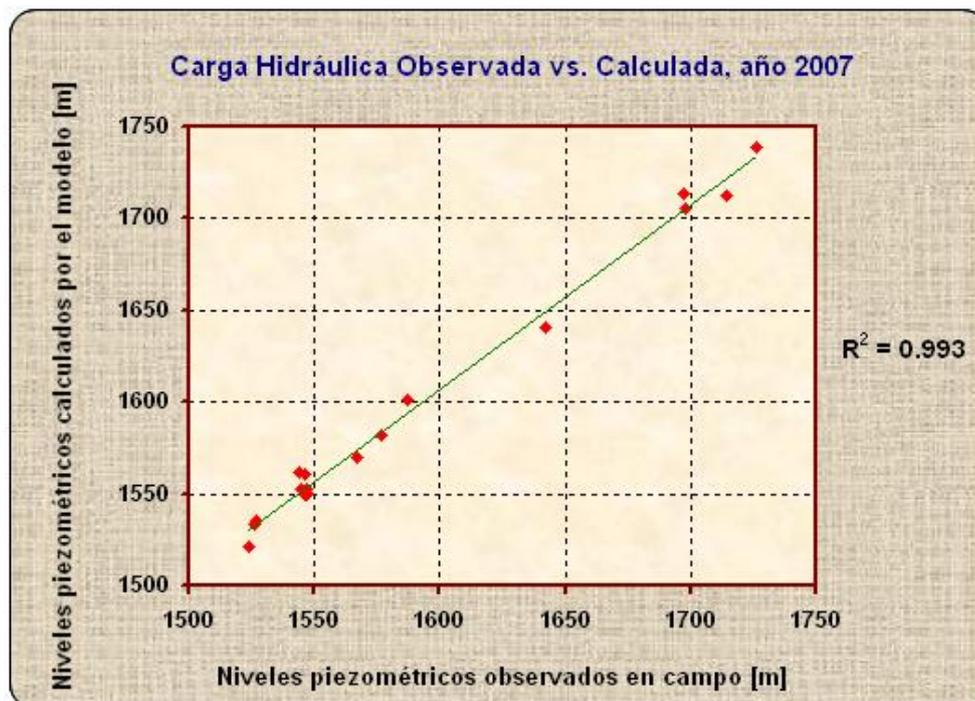


Figura 26. Correlación de los niveles piezométricos observados y calculados, 2007.

Woessner & Anderson (1990) mencionan que el criterio para tener un valor aceptable en la calibración es obteniendo un RMS bajo (Ruvalcaba, 2009). Mientras la Texas Water Development Board - Groundwater Availability Modeling (TWDB-GAM) un organismo estatal de los Estados Unidos de Norteamérica, estiman que un error (**RMS**) asociado con las cargas hidráulicas razonablemente bueno es del orden de 9 a 12 metros (Tabla 17) (TWDB-GAM, 2004).

Otro resultado relevante es el error medio cuadrático normalizado (**NRMS**). Este **error normalizado** debe mantenerse por debajo del 10%, indicando con ello una calibración aceptable (King *et al.*, 2003; Barnett & Muller, 2008). Pero si durante el periodo de calibración (este error) no sobrepasa el criterio recomendado del 5%

asegurará que el error en la estimación de los niveles se mantendrá bajo a lo largo de toda la calibración (Tabla 17) (Waterloo Hidrogeologic, 1999).

Tabla 17. Comparativo entre los años de ajuste y aceptación del modelo de simulación.

| AÑO DE AJUSTE | ERROR RESIDUAL MEDIO CUADRÁTICO (RMS) m | ERROR RESIDUAL MEDIO CUADRÁTICO NORMALIZADO (NRMS) % | COEFICIENTE DE CORRELACION (R²) % |
|----------------------|--|---|---|
| 1999 | 9.39 | 3.82 | 0.992 |
| 2007 | 9.29 | 4.11 | 0.993 |

Spitz and Moreno (1996) sugieren que el coeficiente de correlación entre los niveles de agua observados y calculados, calibrado adecuadamente para modelos de flujo subterráneo deben de estar entre 0.7 y 1.0. Con esto se interpreta que los valores observados y calculados son semejantes entre si, con tendencia lineal.

La Tabla 17 muestra los comparativos entre los dos periodos de ajuste, indicando para ambos un error residual medio cuadrático entre los valores calculados y los valores observados (RMS) del orden de los 9 metros, el cual esta comprendido dentro del limite permisible de 9 a 12 metros, sugerido por la Groundwater Availability Modeling US. Sin embargo, el valor del error normalizado (cociente que divide al RMS y la máxima diferencia de los niveles observados en campo), es el que nos refiere a decidir si el modelo es aceptado o rechazado para representar el flujo subterráneo; si por el contrario, el error normalizado fuera mayor al del intervalo propuesto se regresaría nuevamente al planteamiento del modelo conceptual. El error normalizado para este modelo de simulación fue de 4%, cifra ligeramente por debajo al 5% que recomienda el Waterloo Hidrogeologic Inc.

Simulación de escenarios

El modelo de simulación hidrodinámica que se expone en este proyecto representa el comportamiento subterráneo del sistema acuífero Zamora. El modelo opera en estado transitorio abarcando un periodo de simulación de 30 años comprendido de 1977 a 2007, dividido en dos periodos de tiempo y calibrado con información disponible para los años de 1999 y 2007.

La propuesta de escenarios a simular esta en función del bombeo de extracción proyectándose hasta el año de 2030, considerando algunas situaciones adversas para el recurso subterráneo, asícomo beneficios que trae consigo el generar

disminuciones en el bombeo. Cuatro son los escenarios de simulación obedeciendo a diversas situaciones:

Escenario 1 (Statu Quo): Este escenario plantea continuar con el actual ritmo de extracción del recurso subterráneo (hasta el 2030). Para ello, no se deberá de ejercer ninguna modificación sobre los componentes hidrológicos, esto con el fin de estimar y observar el comportamiento de los niveles piezométricos. Este escenario simula una condición de estabilidad.

Escenario 2 (Inercial): En este escenario se proyectará el volumen de extracción hasta el año de 2030, volumen que trae una inercia lineal desde el año 1977 hasta el 2006, o bien es equivalente a incrementar en un 46% el volumen de extracción correspondiente al año de 2006, distribuido de manera proporcional a toda el área de estudio. De nueva cuenta ningún esfuerzo hidrogeológico será modificado a excepción de la función WEL. Este escenario simula un ambiente desfavorable en la región.

Escenario 3 (Reducción del volumen de extracción): Este escenario contempla el disminuir el caudal de extracción en un 20% para cualquier tipo de uso que se le de al recurso (agrícola, industrial, servicios, etc.). Con el fin de generar un estímulo de recuperación en el nivel piezométrico, observando con mayor interés lo que suceda en los valles de Zamora-Jacona y Tangancicuaro. Este escenario simula una situación favorable para la región.

Escenario 4 (Efecto Cambio Climático): Este escenario simulará las consecuencias producidas por el fenómeno denominado cambio climático global; el cual contempla como principal efecto negativo (para esta región) el aumento en la temperatura promedio de la atmósfera terrestre y alteraciones del ciclo hidrológico (disminución de la precipitación pluvial). Los efectos de esta problemática mundial se verán reflejados en los niveles piezométricos del acuífero, a través de una disminución de la recarga que es la variable que cambiará en el modelo. Este escenario simula un ambiente climático desfavorable en los niveles piezométricos.

Análisis y descripción de los resultados de simulación

La Figura 27 muestra el bombeo que actualmente se mantiene operando en el sistema acuífero. La base de datos del REPDA tiene registrados 478 propietarios. Nótese que la densidad de pozos es mayor con respecto a 1977 (puntos rojos)

aumentando principalmente en los valles de Zamora, Jacona, Tangancicuaro, Chavinda y con menor presencia en los valles de Tlazazalca, Ixtlán y Chilchota (CNA, 2007). La línea en color rojo representa una sección de control (A-A') la cual servirá para comparar la carga hidráulica del año 2007 con los niveles piezométricos obtenidos en las simulaciones y así observar las variaciones entre niveles. Las envolventes indican que localidades concentran abatimiento.

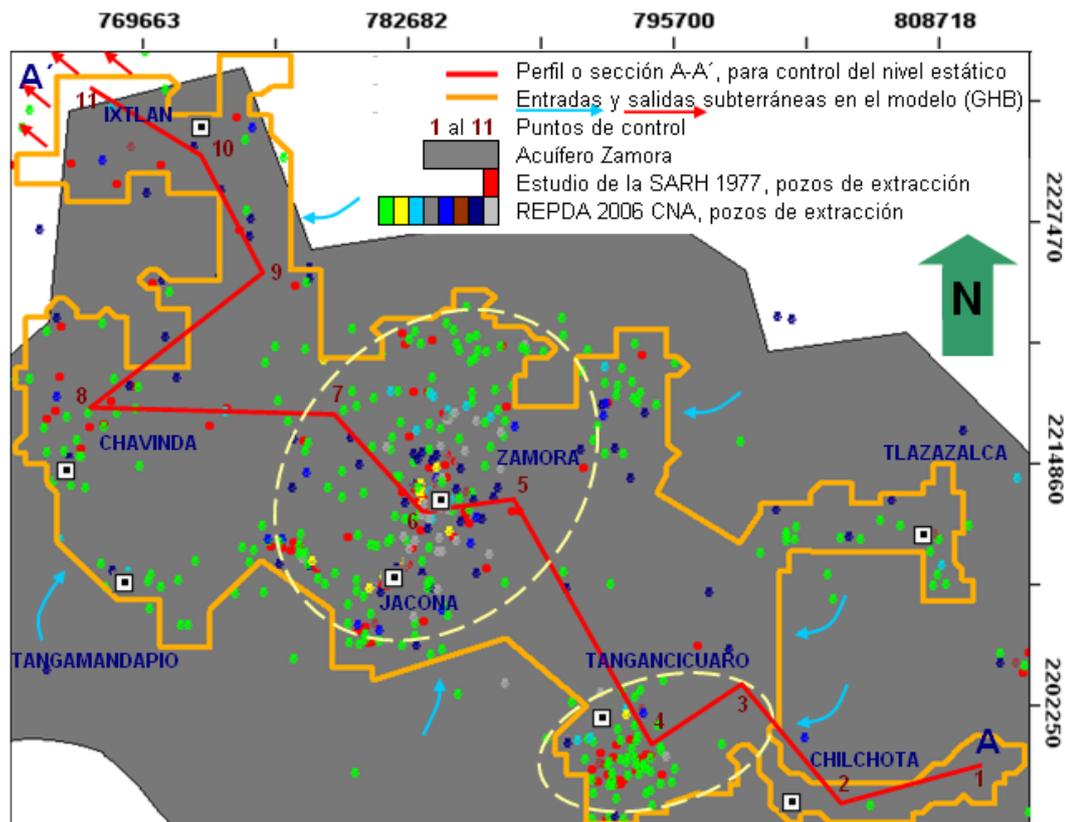


Figura 27. El volumen de extracción que se genera solo dentro de la zona de simulación es de 66,887,987 m³/año para un total de 429 pozos. De este volumen el 76% corresponde al uso agrícola, el 13% al uso urbano, seguido en menor cantidad otros usos como industrial, múltiples y doméstico con 3% y del orden del 1% los restantes usos agroindustrial, pecuario y servicios. Las envolventes localizan las áreas influenciadas por el bombeo; y en color rojo la sección de control A-A' para hacer el seguimiento en la variación de los niveles. Localidades: 1-Carapan, 2-Acachuén, 3-Valle de Guadalupe, 4-Valle de Tangancicuaro, 5-Col. Lindavista, 6- Cap. Zamora, 7-Ario de Rayón (Zamora), 8-Chavinda, 9-10-11-Municipio de Ixtlán

La comparación entre niveles estáticos medidos en campo en 2007 y los niveles calculados por los diferentes escenarios de simulación se presentan en la Figura 28 a través de una sección de control A-A' con 85 km de longitud y abarcando toda el área de interés. Esta gráfica representa en línea gruesa oscura la topografía de los valles, en color rojo una línea que representa la elevación del nivel estático en 2007 y en otros colores líneas que representan los niveles piezométricos para cada

escenario de simulación proyectados hasta el año 2030. Nótese que por el tamaño de escala no se permite diferenciar adecuadamente las variaciones de los niveles, por lo que se utilizará otro gráfico para representar y explicar los resultados de los escenarios de simulación (Figura 29).



Figura 28. Sección A-A' que muestra la comparación entre las elevaciones de nivel estático (Top-Topografía, Nivel Estático medido en campo 2007, niveles piezométricos calculados: Escenario 1-Statu Quo, Escenario 2-Inercial, Escenario 3-Reasignación del volumen de extracción y Escenario 4-Efecto Cambio Climático Global).

La Figura 29 como alterna a la anterior, servirá como base para analizar el comportamiento del nivel piezométrico en los escenarios de simulación. El gráfico siguiente, muestra en el eje de las ordenadas la diferencia entre elevaciones piezométricas referidas a partir de la elevación del nivel estático del año 2007 y con respecto al eje de las abscisas los puntos de control (PC) que son los que articulan la sección A-A', obteniéndose ahora una mejor distribución de los niveles estáticos, que a continuación se analizará con más detalle cada escenario de simulación.

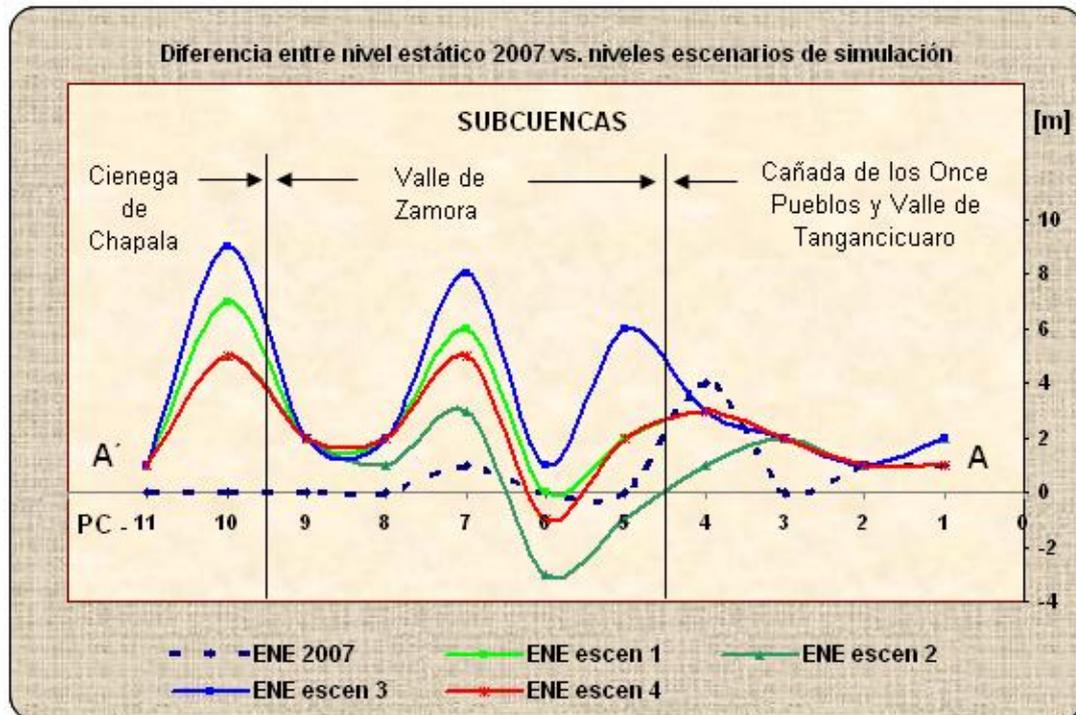


Figura 29. Diferencia entre la Elevación de Nivel Estático 2007 (ENE) y los niveles simulados hasta el año 2030 (Escenario 1-Statu Quo, Escenario 2-Inercial, Escenario 3-Reducción del volumen de extracción y Escenario 4-Efecto Cambio Climático)

Escenario 1

Durante este periodo de simulación el volumen de extracción acumulado será el mismo al volumen de 2006 alrededor de $66,887,947 \text{ m}^3$ de agua, debido a que el escenario contempla simular el actual ritmo de extracción, lo que representa un volumen de extracción anual de $1,237,383 \text{ m}^3$ de agua.

En la Figura 30 se puede suponer que dentro de la zona de Zamora-Jacona se lleva a cabo la suma de los efectos del abatimiento generado por la presencia de unos 280 pozos de extracción, en el valle de Tangancicuaro el efecto es producido por la aglomeración de unos 90 pozos (indicados en óvalos). Pese a esto, en la subcuenca la Cañada de los Once Pueblos (dentro del municipio de Chilchota, PC-1 y PC-2) los niveles piezométricos se mantendrán estables; para el valle de Guadalupe (PC-3) habrá recuperaciones oscilantes a los 2 m. Estos ascensos pueden estar asociados a que no son zonas de alta densidad de pozos y por la estrecha cercanía con materiales basálticos (Figuras 5 y 27). Para el valle de Tangancicuaro (PC-4) se presentarán descensos hasta en 1 m. Por otro lado, con respecto a los puntos PC-5 y PC-7 sitios circundantes al centro de Zamora presentarán recuperaciones variando de 2 a 5 m, a excepción donde se ubica el

PC-6 (cabecera municipal de Zamora) lugar donde se concentra la mayor cantidad de pozos no presentó variabilidad en los niveles. Para la zona de Chavinda (PC-8) e Ixtlán (PC-9 y PC-11) habrá recuperaciones del orden de los 2 m; a excepción del PC-10 el cual tendrá un ascenso de 7 m. Estos resultados simulados parecen congruentes ya que sí el ritmo de extracción en los pozos se mantiene con esa tendencia estable (Figura 8) los efectos producidos son posibles.

Escenario 2

En esta simulación el modelo estimó que el volumen acumulado de extracción ascenderá a unos 97,775,963 m³ de agua incrementándose con respecto a 2006 unos 32,591,988 m³ de agua. Anualmente el volumen de extracción simulado será de 1,798,947 m³ de agua. Este escenario definido como inercial representa la tendencia de extracción con la cual se venía bombeando en la región. Para el año de 1977 el volumen interpretado fue de 25,830,472 m³ de agua y para el 2006 el volumen utilizado por los pozos a simular fue de 66,887,947 m³ de agua, por lo que se extrapolo en línea recta la información hasta el año 2030, siendo el equivalente a incrementar el volumen acumulado de 2006 en un 46%.

De acuerdo a la configuración de la Figura 31, las líneas equipotenciales siguen conservando su similitud con respecto a la configuración de carga hidráulica de 2007, mostrando en óvalos las zonas influenciadas por el abatimiento derivado del bombeo. Para la subcuenca Cañada de los Once Pueblos y la localidad del valle de Guadalupe (al noreste de Tangancicuaro), siguen siendo la excepción porque se conservaron los mismos comportamientos estáticos. En el valle de Tangancicuaro seguirán presentándose disminuciones hasta por 3 m; para el valle central de Zamora-Jacona donde se ubican los puntos de control (PC) 5 y 6 se presentarán abatimientos entre 1 y 3 m; y el PC-7 presentará 2 m por encima del nivel estático de referencia. Para la zona de Chavinda e Ixtlán (PC-8, PC-11 y PC-9) los niveles ascenderán por encima del nivel piezométrico de 2007 en 1 y 2 m, a excepción del PC-10 con 5 m de ascenso.

Escenario 3

Este escenario propone el disminuir en un 20% el volumen de extracción, cantidad hipotética que esta relacionada a posibles situaciones del entorno (descenso poblacional, pérdida de carga hidráulica por mal diseño en el pozo, clausura del pozo, cambio de uso agrícola a urbano, etc.) por lo que para el periodo que se tiene

proyectado (2030) el acuífero extraerá 52,107,222 m³ de agua generando con ello un ahorro en el volumen de 14,780,724 m³ de agua. Anualmente el volumen de extracción simulado será del orden de 978,723 m³ de agua.

La configuración de salida (Figura 32) principalmente en el óvalo que encierra a los valles de Zamora-Jacona, hay un reacomodo en la línea equipotencial 1570 provocando un ascenso en el nivel piezométrico, misma situación pero no tan notable sucede en el resto del área. Debido a la incipiente extracción de agua subterránea en la parte alta de la cuenca, el nivel piezométrico en el punto de control PC-1 ascendió 1 m, manteniéndose sin variabilidad en el PC-2 y en el valle de Guadalupe (PC-3) seguirá conservando ascensos hasta en 2 m. Para el valle central de Tangancicuaro el nivel estático estará 2 m por debajo del nivel de referencia, pese a esto en la periferia del valle de Zamora (PC-5) y (PC-7) habrá recuperaciones del orden de 7 m; a excepción del punto de control PC-6 donde se identifica la mayor concentración de pozos, el nivel estático se recuperará en 1 m. Para el valle de Chavinda (PC-8) e Ixtlán (PC-9 y PC-11) ascenderán los niveles en 2 y 1 m respectivamente y para el punto de control PC-10, situado a la entrada del valle de Ixtlán tendrá una recuperación considerable en los niveles hasta por 9 m.

Escenario 4

Es un escenario interesante, por tal razón antes de describir los resultados de la simulación, es conveniente introducir las implicaciones de este fenómeno climático.

¿**Cambio Climático Global?** es un cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición de la atmósfera mundial. Este cambio es asociado principalmente con aumentos en temperatura y alteraciones en el ciclo hidrológico (lluvias) principalmente. Este aumento de temperatura superficial del planeta es atribuible a la contaminación atmosférica global que resulta del uso de combustibles fósiles (gasolinas, diesel, carbón, gas natural y combustibles derivados del petróleo), así como la deforestación (por los gases que resultan de las quemadas). Al aumentar la concentración de los llamados gases de efecto invernadero (GEI), como el bióxido de carbono (CO₂) o el metano (CH₄), aumenta la cantidad de energía atrapada en la atmósfera, con lo que la temperatura del planeta tiende a subir y de seguir con las emisiones de estos contaminantes el planeta se seguirá calentando (Gay y Estrada, 2007; PEMBU-CCA-UNAM, 2009).

En México se prevé una variación en la disponibilidad del agua, con variaciones en los patrones de lluvia y sequía, así como posibles afectaciones a la actividad agrícola. Para implementar este escenario de simulación fue necesario utilizar de acuerdo a Gay *et al.* (2008) los escenarios de cambio climático mapas de contorno (modelo **MPIECHAM5–A2**) para temperatura y precipitación con proyección hasta el año 2030. De lo anterior se estimaron los siguientes valores promedio: 1.01 °C como incremento en la temperatura y 6% de alteración en la precipitación pluvial. Con esta información se generó un nuevo balance hidrogeológico en la región, modificando los componentes de entrada y salida en el sistema (Tabla 18). La asignación del nuevo balance se hizo a partir del último año 2007, adjuntando al modelo transitorio un nuevo periodo de simulación definido de 23 años.

Tabla 18. Componentes del balance hidrogeológico a implementar en escenario 4.

| VOLUMEN ANUAL CON EFECTO CAMBIO CLIMÁTICO | |
|--|--------------------|
| ENTRADAS m³/año | |
| APORTE RÍO = | 103,785,576 |
| SUBTERRÁNEA = | 104,442,568 |
| LLUVIA Y RIEGO = | 219,108,480 |
| TOTAL IN = | 427,336,624 |
| SALIDAS m³/año | |
| MANANTIALES = | 147,939,120 |
| FLUJO BASE = | 94,535,920 |
| EVAPOTRANSPIRACIÓN = | 138,942,624 |
| SUBTERRÁNEA = | 45,958,124 |
| TOTAL OUT = | 427,375,788 |

La Tabla 18 muestra el volumen de recarga anual de 427,336,624 m³ de agua distribuido en diferentes rubros, que con respecto al volumen de entrada de la Figura 20 hay una diferencia de 8,890,290 m³ de agua, cifra que se atribuye al efecto inducido del cambio climático. Para comparar los niveles piezométricos producidos por este escenario 4, se optó por representar las mismas condiciones de extracción del escenario 1 (con volumen acumulado de 66,887,947 m³ de agua) y así tener un mejor referente del efecto generado en la disminución de la recarga.

Para los puntos de control (PC-1 y PC-2) municipio de Chilchota los niveles estáticos permanecerán sin variaciones y para el punto PC-3 en el valle de Guadalupe el nivel estará 2 m por encima del nivel piezométrico de referencia (2007). Pese a la cuestión desfavorable del cambio climático esta zona sigue presentando gran estabilidad en los niveles, debido a que es la región alta de la cuenca con precipitaciones pluviales arriba del promedio (con 1025 mm); además

de que se sitúa sobre materiales de origen volcánico de buena permeabilidad como basalto y flujos piroclásticos. En los valles centrales de Tangancícuaro (PC-4) y Zamora (PC-6) el nivel estático descenderá en un 1 m siendo de las localidades más influenciadas por el fenómeno climático. El punto PC-5 situado como a 5 km al este del valle central de Zamora no presenta variabilidad en el nivel estático con respecto al de referencia (2007). Para el PC-7 y PC-10 se verán mermados en su recuperación; descendiendo los niveles en 1 y 2 m con respecto al del escenario 1 (línea verde claro), aun así estarán los niveles piezométricos calculados por encima del nivel de referencia unos 4 y 5 m respectivamente.

En los valles de Chavinda (PC-8) e Ixtlán (PC-9 y PC-11) habrá recuperaciones del orden de 2 m y al mismo tiempo con respecto al escenario 1 no presentará variabilidad piezométrica, al parecer son áreas sensibles al bombeo aunque no presenten gran aglomeración de pozos. La Figura 33 presenta comportamiento similar al escenario 1, con estabilidad piezométrica en la parte alta de la cuenca, con descensos en Tangancícuaro y Zamora y recuperaciones en Chavinda e Ixtlán.

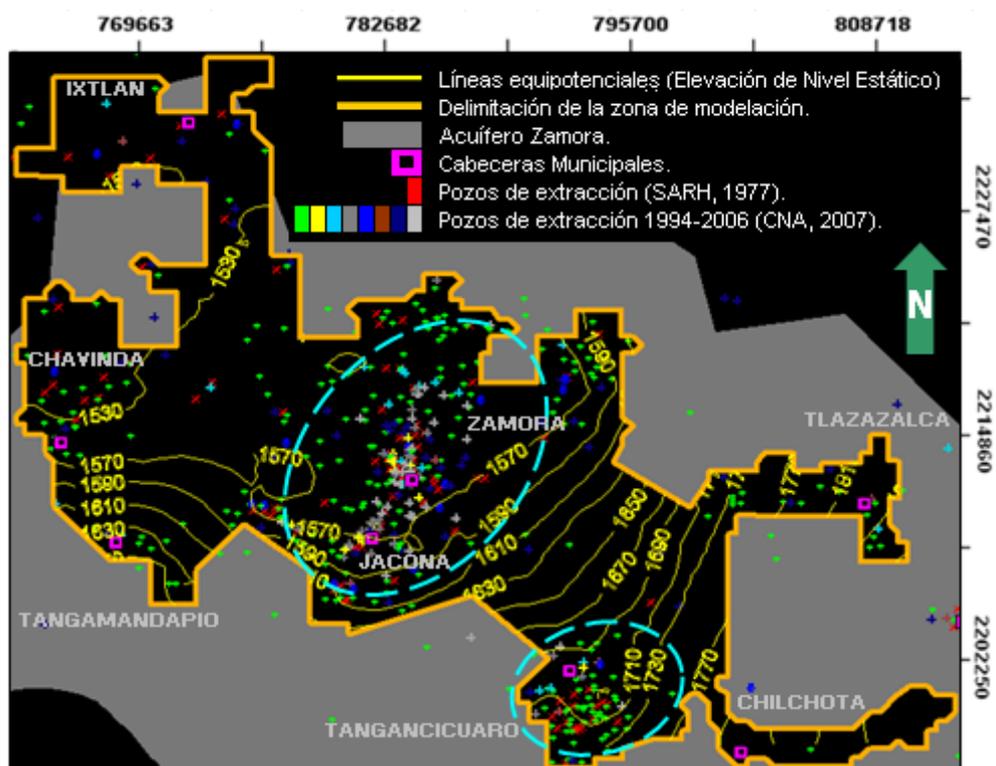


Figura 30. Elevación del nivel estático, escenario 1 (capa 2). En el óvalo inferior se presentarán zonas con ambos comportamientos (ascensos en el valle de Guadalupe y descensos en el valle de Tangancícuaro), en el óvalo superior se presentarán descensos en el valle central de Zamora-Jacona.

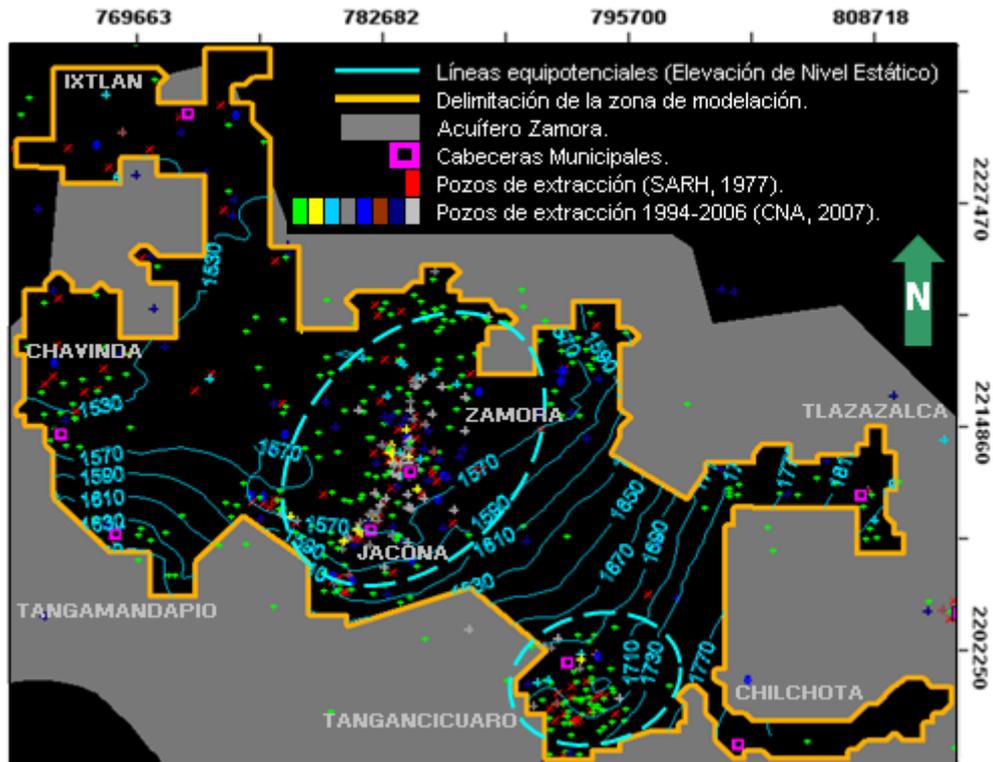


Figura 31. Elevación del nivel estático, escenario 2 (capa 2). Dentro de ambos óvalos se generaron descensos de nivel estático en los valles centrales.

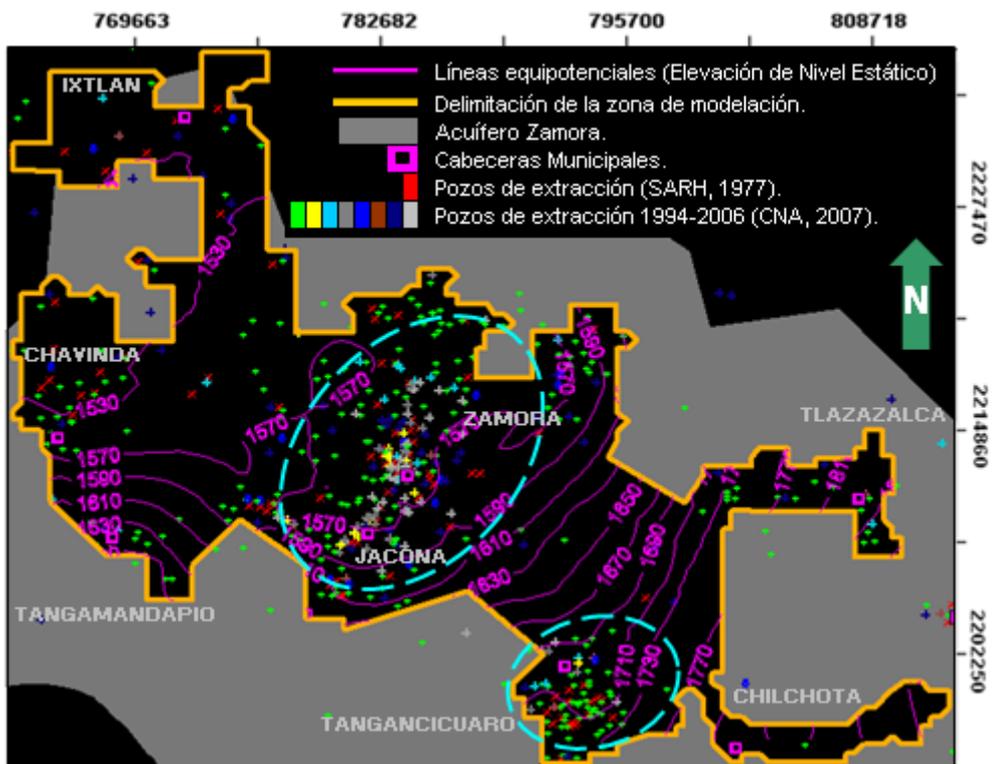


Figura 32. Elevación del nivel estático, escenario 3 (capa 2). Dentro de ambos óvalos se generaron recuperaciones en el nivel estático, pese a la alta concentración de pozos de extracción.

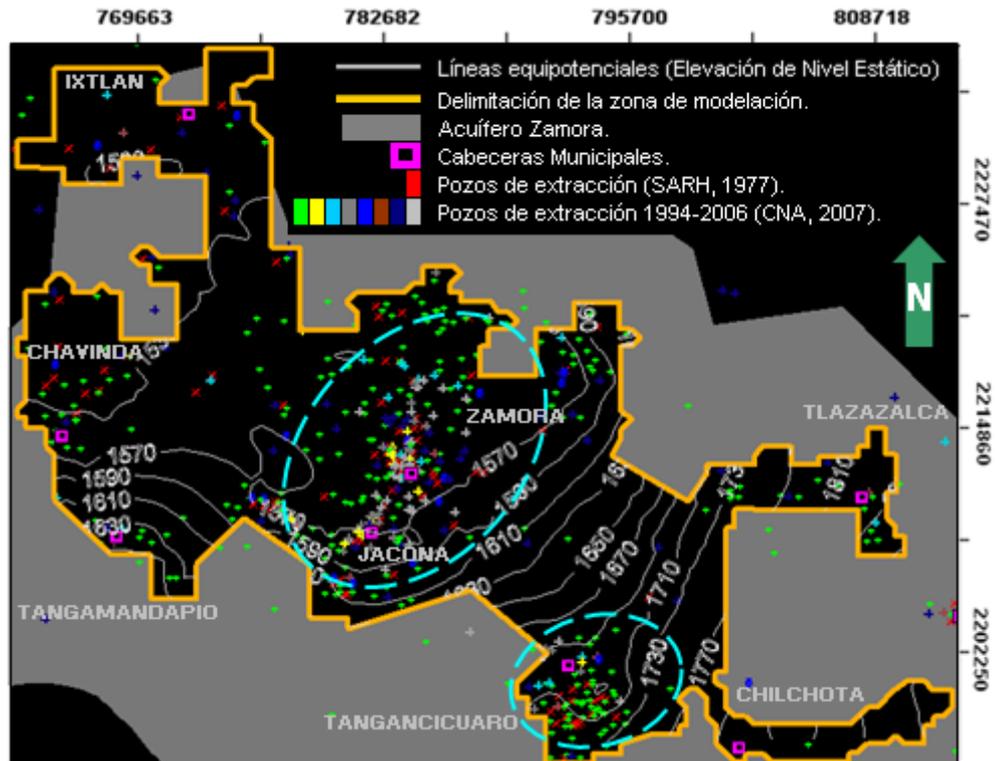


Figura 33. Elevación del nivel estático, escenario 4 (capa 2). En el óvalo inferior se presentaron zonas con ascensos y descensos; para el óvalo 2 se presentaron descensos.

Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad en un modelo hidrodinámico consiste en variar parámetros hidráulicos y componentes hidrológicos de entrada, de manera sistemática a lo largo de un rango razonable y observar los cambios en la respuesta del modelo; por consiguiente esto ayudará a identificar y cuantificar la incertidumbre en el modelo (Foster *et al.* 2002; Rajapakse, 2009).

Las variaciones que se realizaron dentro del rango razonable fue: -20, -10, +10 y +20%, consistiendo en evaluar los porcentajes por separado en cada uno de los parámetros hidráulicos y componentes hidrológicos (cada elemento de prueba se vario en el rango porcentual, dejando a los demás constantes y así, para el resto de los elementos en estudio, como muestran las Figuras 34 y 35). Después de hacer las variaciones a los componentes del modelo se generaron configuraciones piezométricas de salida, las cuales se compararon con las configuraciones del año (2007) y con las del primer escenario de simulación; cuantificándose estas comparaciones con la raíz del error cuadrático medio (RMS).

Rushton (2003) propone la recarga (**RCH**), conductancia en ríos (**RIV**), condiciones de frontera (**GHB-General Head Boundary**), rendimiento específico (**S_y**) y conductividad hidráulica (**K_h**, **K_v**) como principales elementos a utilizar en un análisis de sensibilidad. Sin embargo para Herrera *et al.* (2007) la conductividad hidráulica, el rendimiento específico y la recarga son los parámetros en los que más incertidumbre se tiene, mismos que se optaron por utilizar para el análisis del presente modelo.

La Figura 34 muestra los resultados del análisis de sensibilidad entre los niveles piezométricos calibrados en 2007 y los niveles piezométricos producidos por la variación porcentual aplicado a cada parámetro hidráulico (**S_y**, **K_h**, **K_v**) y elemento hidrológico (**RCH**). La lectura de las curvas se interpreta de la siguiente forma: cuando el porcentaje es cero se entiende que el modelo está calibrado, en el caso de la recarga cuando el valor es -10% la raíz del error medio cuadrático (RMS) será de 0.7 m de diferencia con respecto del origen, si ahora el valor es -20% el error cuadrático aumentará a 0.9 m con respecto al origen y 0.2 m con respecto a la lectura anterior. Ahora, cuando el valor aumenta a +10% el error cuadrático es de 0.5 m de diferencia con respecto a cero y si el valor se aumenta a +20% el error será del orden de 1 m de variación. En suma, se interpreta que la carga hidráulica calibrada en 2007 tendrá un error cuadrático del orden de 1 m para el valor asignado de +20%, siendo éste el que presenta mayor error sobre los demás parámetros en comparación, acentuándose sensiblemente más con aumentos que

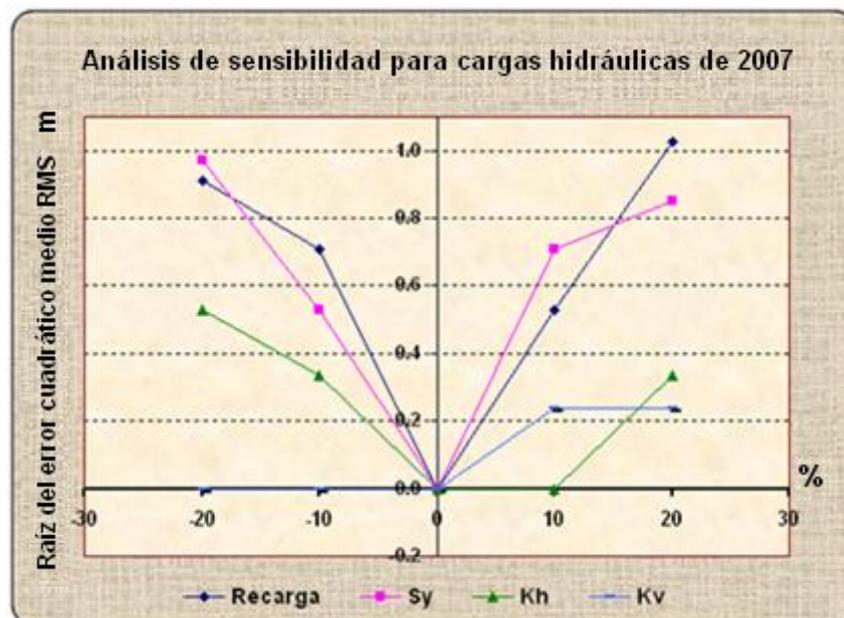


Figura 34. Análisis de sensibilidad para cargas hidráulicas calibradas del año 2007 (promedio entre las 3 capas) (Recarga, Sy-coeficiente de rendimiento específico, Kh-conductividad hidráulica horizontal, Kv-conductividad hidráulica vertical)

con disminuciones. En otras palabras, con este análisis se identifica y se prevé como podría variar la carga hidráulica calibrada con situaciones de aumento y disminución porcentual en los parámetros

En lo que respecta al rendimiento específico (S_y) el error cuadrático varia entre 0.8 y 0.9 m presentando sensibilidad en disminuciones y aumentos. Para la conductividad hidráulica horizontal (K_h) el error cuadrático presento la mayor diferencia con 0.5 m cuando se disminuyo el valor porcentual en -20%, en el intervalo de cero a +10% no presento sensibilidad y en +20% alcanzo un error cercano a 0.4 m. El error cuadrático medio en la conductividad hidráulica vertical (K_v) es cero en todo el tramo negativo, que se interpreta que no hay variabilidad en los niveles piezométricos al momento de compararlos, por el contrario en el tramo porcentual de +10 a +20% presenta sensibilidad estable con un error cuadrático de 0.22 m. En suma, el parámetro de menor sensibilidad es la K_v con respecto a disminuciones y la recarga es el parámetro de mayor sensibilidad con respecto a aumentos porcentuales (Figura 34).

Por otra parte, la Figura 35 representa al escenario 1 que simula continuar extrayendo un volumen acumulado de $66,887,947 \text{ m}^3$ de agua, para el cual se observa lo siguiente: la curva recarga presenta mayor error cuadrático al aumento de +20% cercano a 3.6 m. Por el contrario el rendimiento específico (S_y) es ahora el

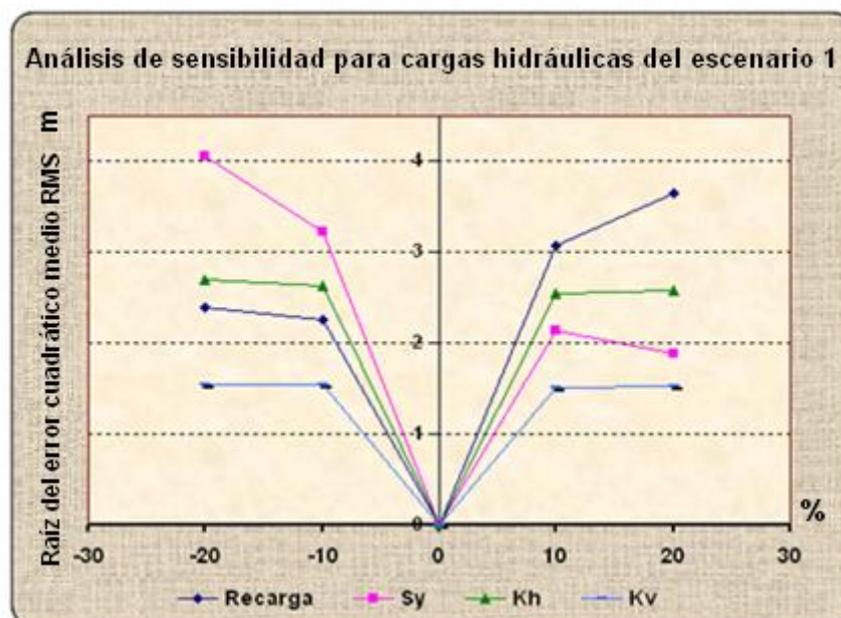


Figura 39. Análisis de sensibilidad para cargas hidráulicas del escenario 1 (promedio entre las 3 capas) (Recarga, S_y -coeficiente de rendimiento específico, K_h -conductividad hidráulica horizontal, K_v -conductividad hidráulica vertical)

parámetro de mayor error (con 4 m), siendo más sensible a las disminuciones que a los aumentos porcentuales. En cuanto a los parámetros de conductividad hidráulica horizontal (K_h) y vertical (K_v) los errores cuadráticos se mantienen del orden de los 2.5 y 1.5 m respectivamente, además ambos parámetros presentan sensibilidad estable tanto en disminuciones como en aumentos, lo cual indica que dentro de esos intervalos la carga hidráulica no varía más de lo que ya varía. Cabe indicar que el análisis de sensibilidad de la Figura 35 no tiene porque parecerse al de la Figura 34 debido a que son situaciones distintas, por ejemplo para el escenario 1 el bombeo se mantiene constante durante un nuevo periodo de tiempo de 23 años, por lo cual cambia las condiciones originales al modelo calibrado en 2007. Para los demás escenarios de simulación los análisis de sensibilidad se presume serán de comportamiento semejante al escenario 1, esto por emplear el mismo periodo de simulación (23 años).

“Lo blando es más fuerte que lo duro; el agua es más fuerte que la roca, el amor es más fuerte que la violencia”.
Hermann Hess ^[4]

“Agua, que es utilísima, preciosa, casta y humilde”.
San Francisco de Asís ^[5]

CONCLUSIONES

Con respecto al modelo:

- >> Se logró reproducir en el modelo de simulación el comportamiento hidráulico de los niveles piezométricos a partir de 1977 hasta el año 2007.
- >> La calibración del modelo se realizó al comparar las cargas hidráulicas medidas en campo y las estimadas por el modelo, obteniendo de ello un error cuadrático medio normalizado $nRMS=3.8\%$ referente al año 1999 y para 2007 un $nRMS=4.1\%$.
- >> Del análisis de sensibilidad realizado al último periodo de calibración del modelo transitorio, se concluye que la recarga es el esfuerzo más sensible con un error cuadrático medio de 1 m con respecto al origen calibrado en cero y la conductividad hidráulica vertical (K_v) es el parámetro de menor sensibilidad con un error cuadrático medio que varía de cero a 0.2 m. Y para el primer modelo de simulación el parámetro de mayor sensibilidad fue el rendimiento específico (S_y) con un error cuadrático medio de 4 m, y el parámetro de menor sensibilidad es la conductividad hidráulica vertical (K_v) con un error cuadrático medio de 1.5 m.

Con respecto al sitio:

- >> La configuración piezométrica realizada en campo en 2007, no refleja desplazamientos bruscos en sus direcciones equipotenciales con respecto a las configuraciones piezométricas referentes a 1977 y 1999, por lo que permite suponer que el acuífero dispone de gran estabilidad.
- >> De los escenarios propuestos se concluye que para los municipios de Tlazazalca y Chilchota (localidades de Carapan y Acachuen) los niveles piezométricos se mantendrán estables sin fluctuaciones importantes con respecto al nivel de referencia 2007, para el valle de Guadalupe y al norte de éste, los niveles estáticos presentarán ascensos menores a 2 m; en los valles centrales de Tangancícuaro y Zamora-Jacona los niveles estáticos se abatirán en 1.5 m promedio; y en las subcuencas media-baja (localidad de Ario de

Rayón al noroeste de la ciudad de Zamora y en los municipios de Chavinda e Ixtlán) los niveles estáticos ascenderán 5 m en promedio

- >> De mantenerse el actual ritmo de extracción (año 2006), no se presentarán abatimientos de mayor consideración y los niveles piezométricos en los valles se mantendrán estables; por el contrario si se tiende a incrementar el bombeo se incrementarán a futuro los efectos negativos
- >> La tasa promedio de abatimiento de los niveles estáticos en la región es del orden de los 5 cm/año y de 6 cm/año en la recuperación.
- >> Del balance hidrogeológico que se planteó para el periodo de 1977 a 2007, se estimó que la recarga total promedio en el acuífero es de 436×10^6 m³/año, distribuidos en: infiltración del río al acuífero con 110.7×10^6 m³/año; infiltración por lluvias en sierras y montañas con 105.6×10^6 m³/año; infiltración por lluvias en planicies con 60.6×10^6 m³/año e infiltración por riego de 159.1×10^6 m³/año.
- >> A pesar de los abatimientos generados por la actividad del bombeo, el acuífero Zamora no se encuentra sometido a sobreexplotación, por dos razones, la recarga es superior a la extracción y los niveles piezométricos se han mantenido con tendencia estable después de 53 años.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ▶ [1], [2], [3], [4], [5], 2005. **Lo que se dice del agua**, CONAGUA, México 2006 IV Foro Mundial del Agua, Ed. Unidad de Comunicación Social Conagua, 148 p.

- ▶ Anderman, E., 2000. **MODFLOW-2000: A Timely Update!**, IGMC-International Groundwater Modeling Center, Newsletter, vol. XVIII, 6 p.

- ▶ Anderson, M. P., and Woessner, W. W., 1992. **Applied Groundwater Modeling: simulation of flow and advective transport**. Editorial Academic Press - UK, 381 p.

- ▶ Aparicio, M. F. J., 1999. **Fundamentos de Hidrología de Superficie**. Ed. Limusa, Grupo Noriega Editores, México D. F. 303 p.

- ▶ ASCE, 1996. **Hydrology Handbook, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 28**. Second Edition, American Society of Civil Engineers, 784 p.

- ▶ Barnett, B. G., and Muller, J., 2008. **Upper Condamine Groundwater, Model Calibration Report**. A report to the Australian Government from the CSIRO Murray-Darling Basin Sustainable Yields Project. CSIRO, Australia. 51 p.

- ▶ Blanco, A. A., Martínez, R. S., Cisneros, C. C., 1998. **Un modelo de balances hídricos para cuencas hidrográficas: discusión, propuesta y aplicaciones**. Revista Temas de Ciencia y Tecnología. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Oaxaca México, no. 6, s/n.

- ▶ Beach, J., 2006. **Groundwater Availability Modeling (GAM)**, Groundwater availability models help Texas plan for the future. Government Engineering, p. 54–56.

- ▶ Bear, J., Beljin, M. S., Ross R. R., 1992. **Fundamentals of Ground-Water Modeling**, United States Environmental Protection Agency, EPA-Ground Water Issue, EPA/540/S-92/005, 11 p.

- ▶ Bocco, G., y Mendoza, M., 1999. **Evaluación de los cambios de la cobertura vegetal y uso del suelo en Michoacán (1975-1995). Lineamientos para la ordenación ecológica de su territorio**. Departamento de Ecología de los Recursos Naturales Instituto de Ecología, UNAM Campus Morelia, Michoacán, 57 p.

- ▶ CEAMAEM, 2005. **Modelo de ordenamiento ecológico y por riesgo eruptivo del territorio del volcán Popocatepetl y su zona de influencia**. Comisión Estatal

del Agua y Medio Ambiente del Estado de Morelos, Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, 337 p.

► Chow, V. T., Maidment, R. D., Mays, W. L., Saldarriaga, G. J., 1994. **Hidrología Aplicada**, Ed. McGraw-Hill; 584 p.

► CNA, 1992. **Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del Acuífero de Zamora, Michoacán**. Servicios, Estudios, Proyectos de Ingeniería y Ciencias de la Tierra, S.A de C.V., s/n.

► CNA, 2001. **Estudio de reactivación de redes de monitoreo piezométrico de los acuíferos de la Meseta Tarasca**. Grupo de Ingeniería en Consultoría y Obras, S.A. de C.V., vol. I/V y III/V, s/n.

► CNA, 2002. **Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Zamora, estado de Michoacán**. Subgerencia Evaluación y Modelación Hidrogeológica, 25 p.

► CNA, 2007. Documento digital proporcionado por la Comisión Nacional del Agua. (Disponible en formato Excel).

► Corona-Chávez, P., Reyes-Salas, M., Garduño-Monroy, V. H., Israde-Alcántara, I., Lozano-Santa, C. R., Morton-Bermea, O., Hernández-Álvarez E., 2006. **Asimilación de xenolitos graníticos en el Campo Volcánico Michoacán-Guanajuato: el caso de Arócutin Michoacán, México**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 23, no. 2, p. 233-245.

► Cotler, A. H., Mazari, H. M., Sánchez, J. A., 2006. **Atlas de la Cuenca Lerma-Chapala**. Instituto Nacional de Ecología-Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales. 1ra. Edición, p.196.

► Cué-Bär, E. M., Villaseñor, J. L., Arredondo, A. L., Cornejo-Tenorio, G., Ibarra-Manríquez, G., 2005. **La flora arbórea de Michoacán, México**. Boletín de la Sociedad Botánica de México, D. F., no. 78. p. 47-81.

► Díaz, D. C., Esteller, A. M. V., López-Vera, F., 2006. **Recursos Hídricos, conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica**. CIRA-UAEM, Centro Interamericano de Recursos del Agua, Universidad Autónoma del Estado de México. 747 p.

► Díaz, N. J. J., 2001. **Simulación numérica del flujo subterráneo en el acuífero del Soconusco, Chiapas**. Tesis de Maestría, División de Estudios de Posgrado, Facultad de Ingeniería, UNAM. 96 p.

- ▶ Dutton, R. A., and Mace, E. R., 2002. **Evolución de los modelos numéricos de flujo de agua subterránea en el acuífero de Ogallala en Texas**. Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, UNAM, Campus Querétaro. año/vol. 19, no. 002, p.107-120.
- ▶ EA, 2002. **Groundwater resources modelling: Guidance notes and template project brief (Version 1)**. Environment Agency, Research and Development Guidance Notes. Bristol United Kingdom, W213; 211 p.
- ▶ Escolero, F. O. A., 2004. **Aplicación de modelos de simulación para la gestión del agua subterránea. En la gestión del agua en México: Los retos para el desarrollo sustentable**. UAM, México. p. 33-38.
- ▶ ESRI, 2009. **ArcGIS Explorer**, GIS Software that gives you-The Geographic Advantage. Disponible en: <http://www.esri.com/software/arcgis/explorer/index>
- ▶ FAO, 2005. **Estrategia para el desarrollo regional del noroeste de Michoacán**. Organización de las Naciones Unidas para la agricultura y la alimentación, Oficina Regional para América Latina y el Caribe, 63 p.
- ▶ Fernández, T. M. A., 2004. **Estudio y modelización de la contaminación del acuífero del Río Najerilla. Aplicación de la microextracción en fase sólida para la determinación de los contaminantes**. Tesis Doctoral, Universidad de la Rioja, España. 415 p.
- ▶ Ferrari, L., 2000. **Avances en el conocimiento de la Faja Volcánica Transmexicana durante la última década**. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Instituto de Geología, UNAM, v. LIII, p. 84-92.
- ▶ Flores, O. A., y Vilchis, F. R., 2002. **Realización de un Modelo Hidrogeológico**. [resúmenes]: Unión Geofísica Mexicana, A. C., III Reunión Nacional de Ciencias de la Tierra, v. 22, no.2, p. 119.
- ▶ Foster, S., Hirata, R., Gomes, D., D'Elia, M., Paris, M., 2002. **Protección de la calidad del agua subterránea, guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. GW-MATE-Groundwater Management Advisory Team, en colaboración con Global Water Partnership, 117 p.
- ▶ Foster, S., 2002-2006. **Caracterización de sistemas de agua subterránea**. Banco Mundial-Programa asociado de la GWP, Serie de notas informativas-Nota 2.
- ▶ Fuentes, R. E., 2000. **Fundamentos de geohidrología**. Tesis de Licenciatura UNAM-Escuela Nacional de Estudios Profesionales, Acatlán México, 187 p.

- ▶ Garduño-Monroy, V. H., Corona-Chávez, P., Israde-Alcántara, I., Arreygue, E., Pasquare, G., Bigioggero, B., Chiesa, S., Menella, L., González, J. M., 1999. **Carta geológica de Michoacán**. esc. 1:250,000. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Instituto de Investigaciones Metalúrgicas y Departamento de Geología y Mineralogía.

- ▶ Gay, C., y Estrada, F., 2007. **Cambio Climático en México**. Centro de Ciencias de la Atmosfera, UNAM. 31 p.

- ▶ Gay, C., Conde, C., Sánchez, O., 2008. **Escenarios de Cambio Climático para México. Temperatura y Precipitación**. [Documento en línea]. Disponible desde internet en: http://www.atmosfera.unam.mx/gcclimatico/index.php?option=com_content&view=article&id=61&Itemid=74

- ▶ GDF, 2002. **Diagnóstico geológico y geohidrológico preliminar de la microcuenca del río Magdalena**. Gobierno del Distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente. 18 p.

- ▶ Gómez, R. V. H., 1987. **Calidad del agua del río Duero**. Tesis de Licenciatura Facultad de Ingeniería, UNAM, México D.F. 177 p.

- ▶ Gómez-Tuena, A., Orozco-Esquivel, Ma. T., Ferrari, L., 2005. **Petrogénesis ígnea de la Faja Volcánica Transmexicana**. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo LVII, no. 3, p. 228-232.

- ▶ Gortari, P. A., Navarrete, G. C., Vázquez, M.A., 2006. **Ordenamiento Ecológico Territorial Chilchota Michoacán, Localidad Acachuen**. UNAM-DGOSE, 109 p.

- ▶ GSN, 1997. **An introduction to hydrogeological and geochemical models and modeling**. Geological Survey of Norway, Report no. 97.117, 116p.

- ▶ Harbaugh, W. A., 2002. **A data-input program (mfi2k) for the U.S. Geological survey modular groundwater model (MODFLOW-2000)**. U.S. Geological Survey, Open-File Report 02-41; 55 p.

- ▶ Herrera, Z. G., Simuta, C. R., Bravo, J. A., 2007. **Modelo de flujo del agua subterránea y diseño de red de monitoreo del acuífero del valle de Querétaro**. 4to. Congreso Internacional-2do Congreso Nacional de Métodos Numéricos en Ingeniería y Ciencias Aplicadas, 9 p.

- ▶ Hsieh, A. P., 2001. **Topodrive and Particleflow-Two computer models for simulation and visualization of groundwater flow and transport of fluid particles in two dimensions**. U.S Geological Survey, Open File Report 01-286; 30 p.

- ▶ Hsieh, A. P., and Winston, B. R., 2002. **User's Guide to Model Viewer, a program for three-dimensional visualization of groundwater model results**. U.S Geological Survey, Open File Report 02-106; 18 p.

- ▶ IGEOF, 1994. **Diagnostico del estado presente de las aguas subterráneas de la ciudad de México y determinación de sus condiciones futuras**. Instituto de Geofísica, Depto. Recursos Naturales, UNAM, 106 p.

- ▶ IMTA, 2003. **Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS)**. 8 cds. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec Morelos, México.

- ▶ IMTA, 2005. **Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III)**, 1 cd. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec Morelos, México.

- ▶ INEGI, 2000. **Carta Topográfica Michoacán**. Condensado Estatal, esc. 1:500,000. 2ª impresión, México.

- ▶ INEGI, 2007. **Descarga gratuita de El Continuo de Elevaciones Mexicano (CEM)**. esc. 1: 50 000, Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Disponible en: <http://www.inegi.org.mx/lib/usuarios/default.aspx?s=geo&sistema=mde>

- ▶ King, M., Carey, G., Abbey, D., Baechler, F., 2003. **Groundwater and contaminant transport modelling at the Sydney tar ponds**. IAH-International Association of Hydrogeologists, Conference Winnipeg, Canada. 8 p.

- ▶ Konikow, L. F., 1996. **Uso de modelos numéricos para simular el flujo y el transporte subterráneo**. USGS-Instituto Geológico Norteamericano, Reston, Virginia, USA. Editado por Isótopos Ambientales en el Ciclo Hidrológico IGME, p. 533-558.

- ▶ Lafragua, J., Gutiérrez, A., Aguilar, E., Aparicio, J., Mejía, R., Santillán, O., Suárez, M.A., Preciado, M., 2003. **Balance hídrico del valle de México**. IMTA-Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, p. 40-46.

- ▶ Llorens, G. P., 2003. **La evaluación y modelización del balance hidrológico a escala de cuenca**. Ecosistemas, Revista Científica de Ecología y Medio Ambiente, Alicante España, vol. XII, no. 1, 5 p.

- ▶ López-Blanco, J., y Flores, L. N., 2008. **Caracterización de las unidades ambientales biofísicas para el ordenamiento territorial de la cuenca del Río Duero, México**. XXIII Congreso Panamericano de Valuación, San José de Costa Rica, 15-18 de abril; 23 p.

- ▶ López, H. M., 1997. **Caracterización limnológica del río Duero, Michoacán.** Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias UNAM, 105, [85] p.
- ▶ Lugo-Hubp, J., 1990. **El Relieve de la República Mexicana.** Instituto de Geología UNAM. Revista, v. 9, no. 1. p. 82-111.
- ▶ Martínez-Alfaro, P. E., Martínez, S. P., Castaño, C. S., 2006. **Fundamentos de Hidrogeología.** Ed. Mundi-Prensa, Madrid-Barcelona-Méx. 284 p.
- ▶ National Research Council, 2001. **Conceptual models of flow and transport in the fractured vadose zone.** NRC of U.S - National Committee for Rock Mechanics. National Academy Press Washington, D.C., 374 p.
- ▶ Núñez, M. J. L., 2001. **Aplicación de los modelos matemáticos de flujo y transporte de contaminantes para el diseño de sistemas de remediación.** IGME-Instituto Geológico y Minero de España. Tema 5, p. 361-370.
- ▶ Ordaz, A. A., y Velázquez, A. L., 1993-1994. **Provincias hidrogeológicas de México.** Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, Tomo. 52, no. 1-2; p. 15-33.
- ▶ PEMBU-CCA-UNAM, 2009. **El Cambio Climático en México-Información por Estado y Sector.** Programa de Estaciones Meteorológicas del Bachillerato Universitario, Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM.
- ▶ Pulido, B. A., 2007. **Nociones de hidrogeología para ambientólogos.** Editorial Universidad de Almería, 492 p.
- ▶ Rajapakse, R., 2009. **Numerical groundwater flow and solute transport modelling: A case study of Sardon Catchment, Spain.** ITC - International Institute for Geo-Information science and earth observation Enschede, the Netherlands. 94 p.
- ▶ Ramos, E. N. A., 1989. **Distribución y abundancia de la entomofauna acuática en el río Duero, Michoacán.** Tesis de Licenciatura, Fac. de Ciencias UNAM, 79 p.
- ▶ Rejani, R., Jha, M. K., Panda, S. N., Mull, R., 2007. **Simulation modeling for efficient groundwater management in Balasore coastal basin, India.** Water Resour Manage, Ed. Springer Netherlands. v. 22, no. 1; .p. 23-50.
- ▶ Rivera, C. J. H., 1997. **Geología de la región de Cotija, Michoacán.** Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería UNAM, México D.F.; 183 p.

- ▶ Romero, B. A., y Lovera, D. D., 2005. **Aplicación de las diferencias finitas para el flujo de contaminantes en el acuífero de Ayamonte**. Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica; Universidad Nacional Mayor de San Marcos, v. 8, no. 15; 101 p.

- ▶ Rushton, K. R., 2003. **Groundwater hydrology conceptual and computational models**. Ed. John Wiley & Sons, England. 416 p.

- ▶ Ruvalcaba, G. A., 2009. **Modelación matemática del comportamiento hidrogeológico de la zona lacustre de Xochimilco, México**. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. 107 p.

- ▶ Salas, M. M. A., 2009. **Análisis para opciones de manejo de la subcuenca del Río Turbio en el estado de Guanajuato**. Tesis de Maestría, Posgrado en Ciencias de la Tierra, Instituto de Geofísica, UNAM. 255 p.

- ▶ SARH, 1977. **Estudio geohidrológico de evaluación y censo en el estado de Michoacán**. Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos. Contratista: Servicios Geológicos, S.A; 163 p.

- ▶ Schwartz, F. W., and Zhang, H. 2003. **Fundamentals of ground water**. Ed. John Wiley & Sons, INC. 583 p.

- ▶ Spitz, K., and Moreno, J., 1996. **A practical guide to groundwater and solute transport modeling**. Ed. Wiley-Interscience. 461 p.

- ▶ Todd, D. K., and Mays, L. W. 2005. **Groundwater hydrology**. Ed. John Wiley & Sons, INC. 636 p.

- ▶ Tóth, J. 2004. **Gravitational systems of groundwater flow: Principles, Evaluation y Utilization**. Department of Earth and Atmospheric Science, University of Alberta, Edmonton Canada, 166 p.

- ▶ TWDB-GAM, 2004. **Groundwater Availability Modeling for the Queen City and Sparta Aquifers**. Texas Water Development Board-Groundwater Availability Modeling. Incorporated, University of Texas Bureau of Economic Geology, y R.J. Brandes Company, Austin, Texas; 67 p.

- ▶ USGS, 1997. **Modeling Ground-Water Flow with MODFLOW and Related Programs**. United States Geological Survey- Fact Sheet FS-121-97, s/n.

- ▶ Vargas, S. A., 2002. **Manantiales de una parte del valle central de Costa Rica**. Instituto Costarricense de Electricidad-Centro Servicio de Exploración Subterránea, Revista Geológica de America Central, 27, p. 39-52.
- ▶ Velasco, A. L., 2006. **Geografía y estadística del estado de Michoacán**. CIDEM–Centro de Investigaciones y Desarrollo del Estado de Michoacán, México. 232 p.
- ▶ Velázquez, M. M. A., y otros 9. 2005. **Diagnostico para el saneamiento del río Duero**. Consejo Estatal de la Fresa de Michoacán (COEFREM), Colegio de Postgraduados, El Colegio de Michoacán A. C, 191 p.
- ▶ Waterloo Hidrogeologic Inc. 1999. **Users manual for visual Modflow**. Waterloo Ontario Canada, 280 p.
- ▶ Woessner, W. W., and Anderson, M. P., 1990. **Setting calibration targets and assessing model calibration–Room for improvement: An example from North America**. Calibration and Reliability in Groundwater Modelling. Ed. K. Kovar USA. IAHS Pub. 125; p. 279–290.

ANEXO

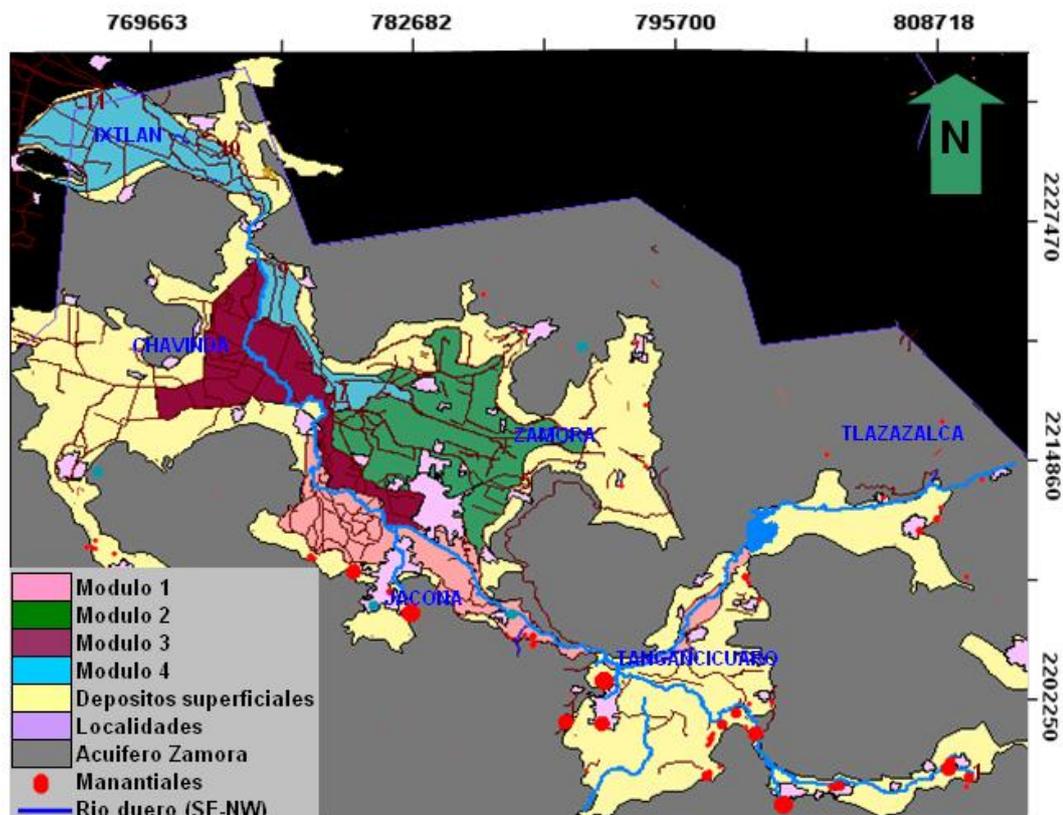


Figura A. Ubicación de los módulos de riego que componen el Distrito de Riego 061, además de la distribución de los principales manantiales al sureste del valle de Zamora.

Tabla A. Proyección población para el periodo 2000-2030.

| Clave | Municipio | 1970 | 1980 | 1990 | 2000 | 2010 | 2020 | 2030 |
|-------|---------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|
| 16070 | Purépero | 15,491 | 16,133 | 14,674 | 15,666 | 14,302 | 11,800 | 9,484 |
| 16025 | Chilchota | 17,363 | 17,620 | 21,900 | 26,180 | 30,460 | 29,455 | 27,684 |
| 16094 | Tlaxazalca | 10,670 | 11,735 | 9,813 | 7,890 | 5,968 | 4,761 | 4,178 |
| 16085 | Tangancicuaro | 29,528 | 30,947 | 29,893 | 28,840 | 27,786 | 22,684 | 18,598 |
| 16084 | Tangamandapio | 21,338 | 16,503 | 21,267 | 26,245 | 22,505 | 18,436 | 15,002 |
| 16108 | Zamora | 82,943 | 113,474 | 134,748 | 156,023 | 177,297 | 180,496 | 175,213 |
| 16043 | Jacona | 26,078 | 35,247 | 45,578 | 55,909 | 66,240 | 75,532 | 80,854 |
| 16023 | Chavinda | 10,980 | 12,354 | 11,147 | 9,940 | 8,733 | 7,048 | 5,939 |
| 16042 | Ixtlán | 13,897 | 14,870 | 13,842 | 12,814 | 11,786 | 9,594 | 7,920 |
| | | 228,288 | 268,883 | 302,862 | 339,507 | 365,077 | 359,806 | 344,872 |

~ Año 1970, para Purépero y Tangamandapio (en negrito) son promedio de 1980 a 2000.

~ Años de 1980 a 2000, para Purépero y Tangamandapio (en cursiva), Velázquez, 2005.

~ Años de 1970 a 2000, para el resto de los municipios corresponden al trabajo de Gómez, 1987.

~ Las proyecciones de 2010 a 2030, corresponden a la CONAPO, 2009.

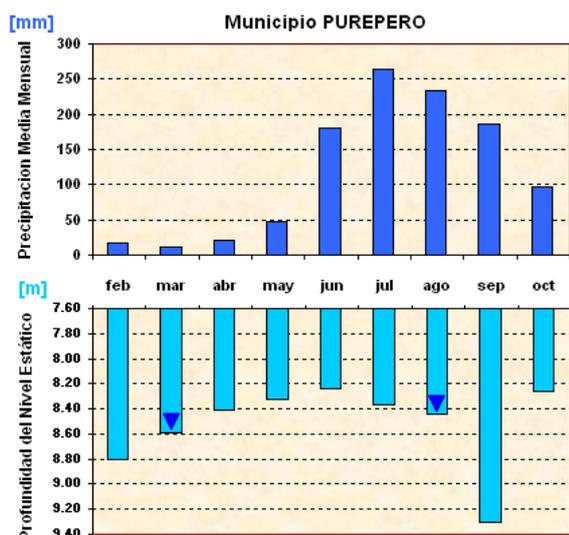


Figura B1

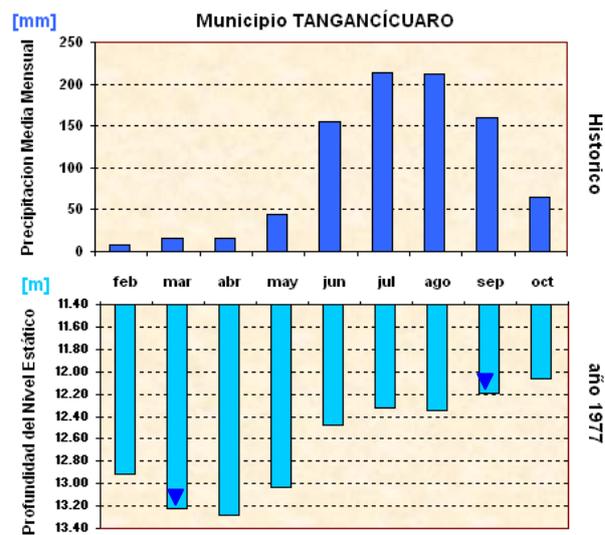


Figura B2

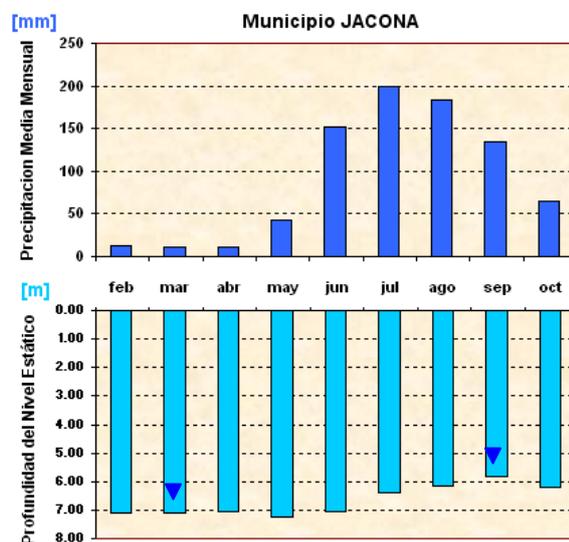


Figura B3

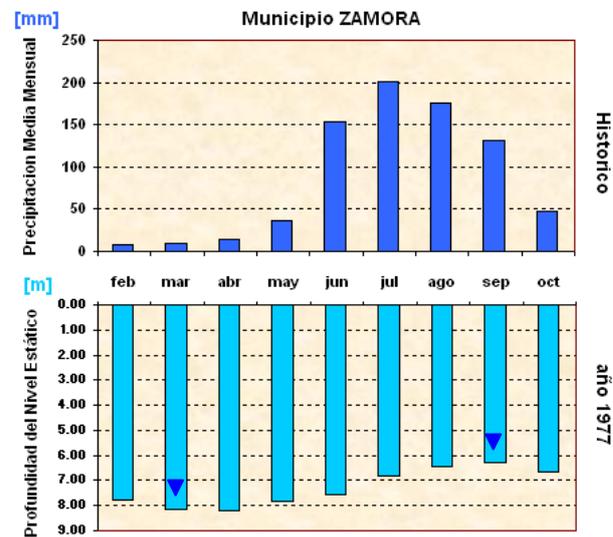


Figura B4

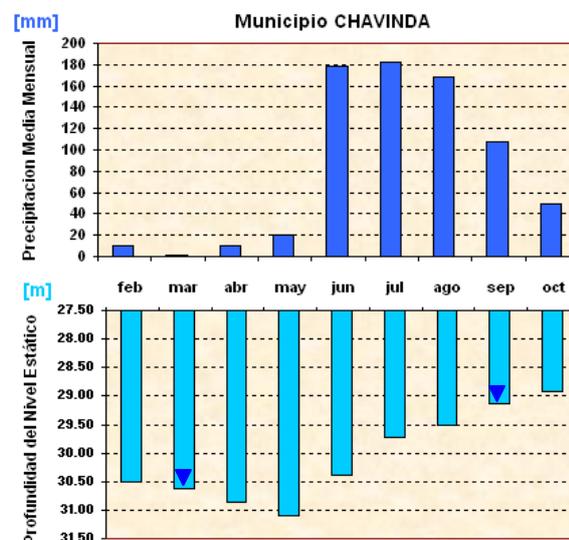


Figura B5

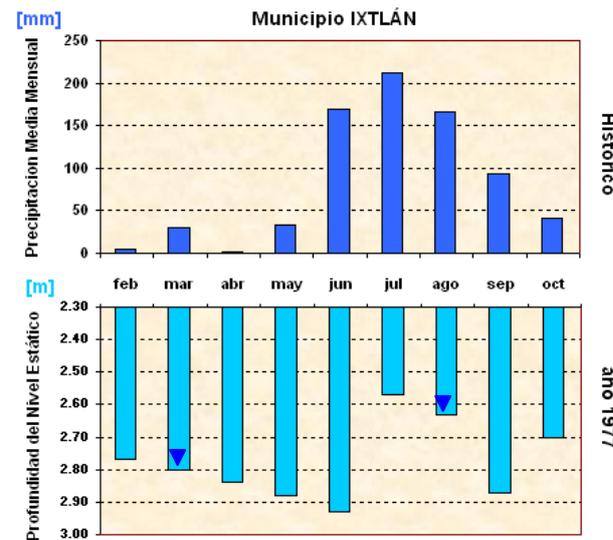


Figura B6

Ejemplos que ilustran el comportamiento lluvia-nivel estático, del año 1977. Estos niveles son en buena medida representativos de cada municipio, y nos dan una idea de cómo se comportan los niveles en el subsuelo en cada zona.

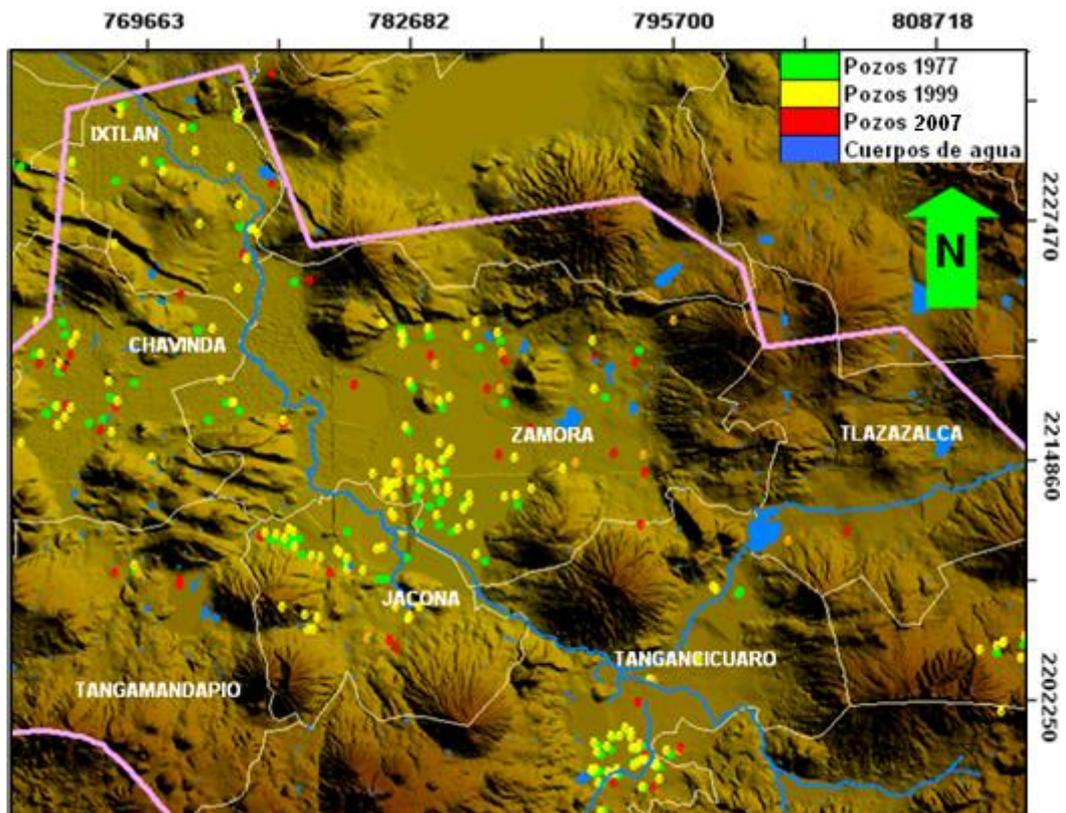


Figura C. Pozos de observación sobre la zona de estudio, mostrando la falta de continuidad en el seguimiento de una sola base de datos. Da la impresión de que cuando se inicia un proyecto también se inicia la búsqueda de nuevos pozos.

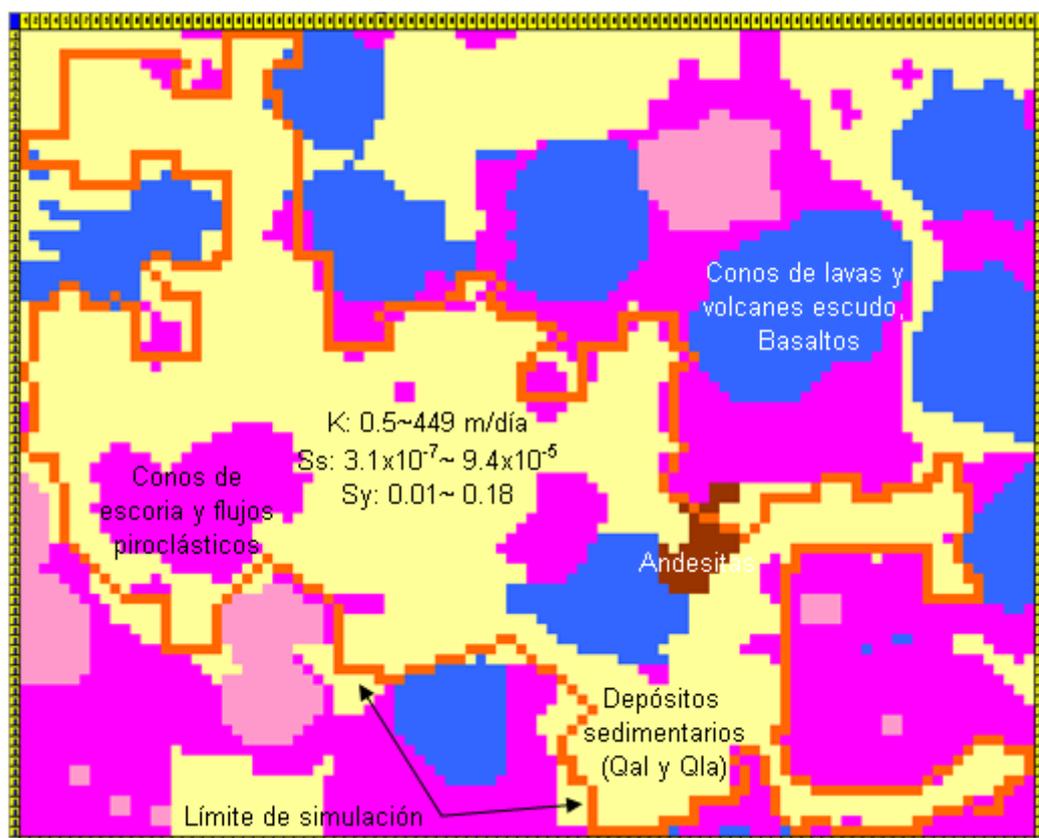


Figura D. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 1 del sistema acuífero Zamora. Diseño previo hecho en hoja de cálculo para subir al modelo.

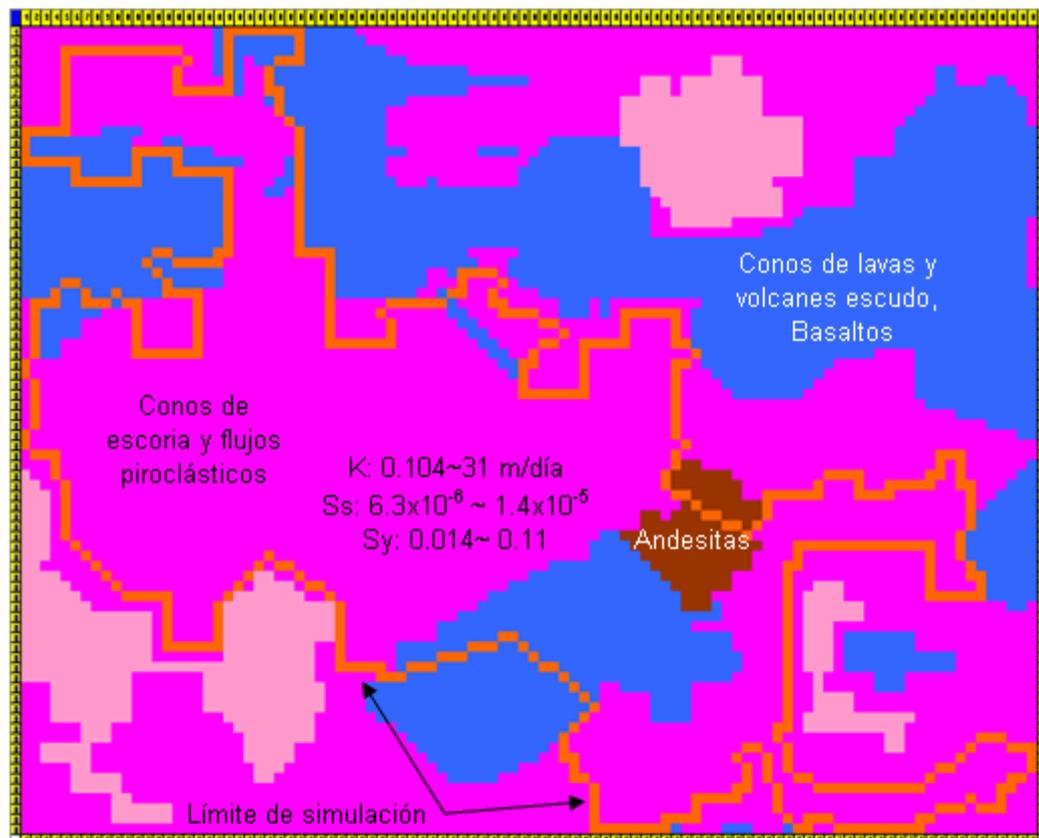


Figura E. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 2 del sistema acuífero Zamora. Diseño previo hecho en hoja de cálculo para subir al modelo.

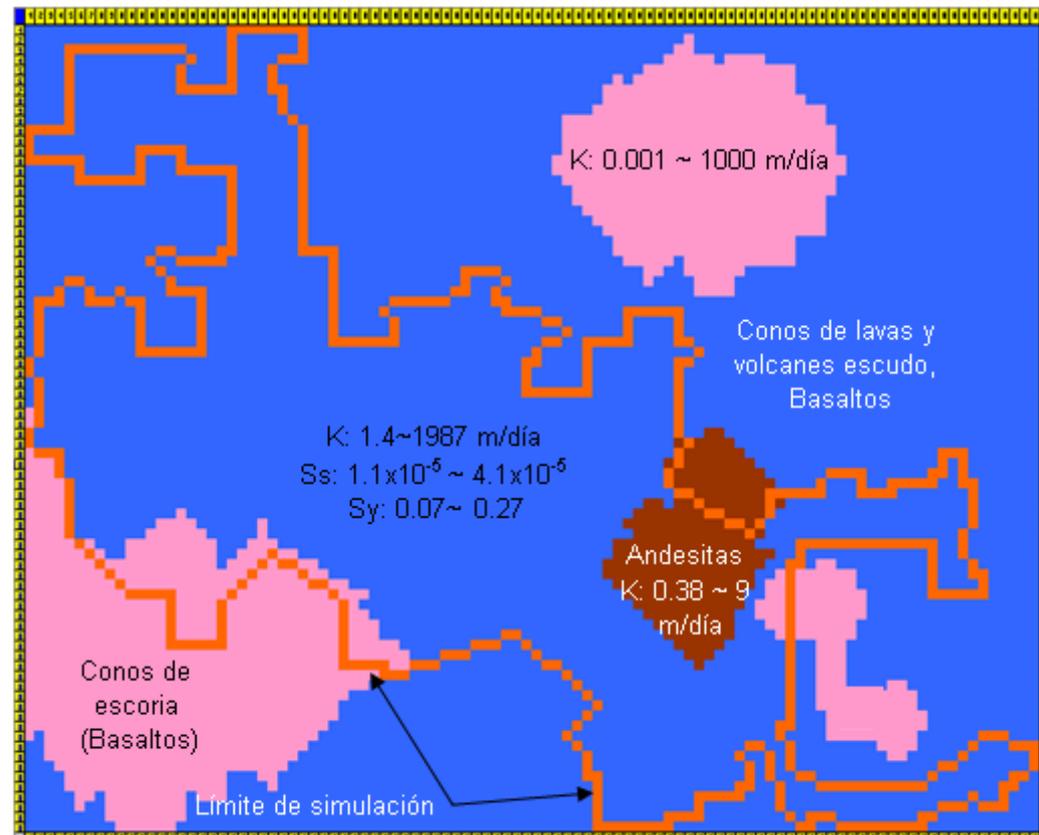


Figura F. Materiales geológicos y características hidráulicas que componen la Capa 3 del sistema acuífero Zamora. Diseño previo hecho en hoja de cálculo para subir al modelo.