



UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

“EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO HIDRÁULICO DEL ACUÍFERO PASTOR ORTIZ, CON ATENCIÓN EN PURUÁNDIRO”

TESIS

Para obtener el título de:

INGENIERO CIVIL

P r e s e n t a

IVON CORTÉS LEÓN

Director de tesis:

SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE

Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos

Co-director de tesis:

MARIO ALBERTO HERNÁNDEZ HERNÁNDEZ

Doctor en Ingeniería del Agua y Medio Ambiente



Morelia, Michoacán. Junio de 2017.





ÍNDICE

RESUMEN	8
ABSTRACT	10
1.- INTRODUCCIÓN	11
2.- ANTECEDENTES	13
2.1. Modelos Hidrológicos.....	14
2.2. Clasificación de los modelos matemáticos en hidrología.....	14
2.2.1. Modelos Estocásticos	15
2.2.2. Modelos Determinísticos.....	16
2.3. Modelación Subterránea.....	16
2.4. Software empleado para la modelación.....	17
2.4.1. Modelo AQUIVAL	17
3.- OBJETIVOS	24
3.1. Objetivo General	24
3.2. Objetivos Particulares	24
4.- ZONA DE ESTUDIO	25
4.1 Localización del Acuífero Pastor Ortiz	25
4.2. Municipios sobre el acuífero Pastor Ortiz	26
4.3 Localización de Puruándiro.....	27
4.4. Hidrogeología	28
4.5. Fisiografía	30
4.6. Clima.....	31
4.7. Geología	33
4.8. Topografía	34
4.9. Edafología.....	35
3.10 Geomorfología	38



3.11 Uso de Suelo	38
5.- MATERIALES Y MÉTODOS	40
5.1. Caracterización de la zona de estudio	40
5.2. Recopilación y análisis de datos	41
5.2.1. Extracciones en el acuífero Pastor Ortíz	41
5.2.2. Recargas en el acuífero Pastor Ortíz	41
5.2.3. Niveles Piezométricos	42
5.3. Modelación Hidrológica Subterránea	42
5.3.1. Configuración conceptual del modelo	42
5.4. Análisis de resultados	45
6. RESULTADOS	46
6.1. Caracterización de la zona de estudio	46
6.2. Análisis y recopilación de datos	46
6.2.1. Extracciones	46
6.2.2. Recargas	48
6.2.3. Niveles Piezométricos	51
6.3. Modelación Hidrológica Subterránea	52
6.3.1. Definición de la geometría	53
6.3.2. Parámetros Hidrogeológicos	55
6.3.3. Condiciones de contorno	59
6.3.4. Acciones Elementales	60
6.3.5. Parámetros de Control	67
6.3.6. Simulación	70
6.3.7. Calibración	74
7.- CONCLUSIONES	80



8.- REFERENCIAS.....	81
----------------------	----



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Clasificación de los modelos matemáticos en hidrología.....	15
Figura 4.1. Ubicación del acuífero Pastor Ortiz en el Estado de Michoacán.....	25
Figura 4.2. Municipios asociados al acuífero Pastor Ortiz.....	26
Figura 4.3. Ubicación geográfica del municipio de Puruándiro en el acuífero Pastor Ortiz.....	27
Figura 4.4. Hidrología del municipio de Puruándiro.....	29
Figura 4.5. Geología en el municipio de Puruándiro.....	34
Figura 4.6. Edafología en el municipio de Puruándiro.....	35
Figura 4.7. Suelos vertisoles en el municipio de Puruándiro.....	36
Figura 4.8. Suelos Feozem en terrenos deforestados del Cerro la Rinconada, al sur de la ciudad de Puruándiro.....	38
Figura 4.9. Principales Usos de Suelo en el municipio de Puruándiro.....	39
Figura 5.1. Esquema de la metodología empleada.....	40
Figura 6.1. Usos de los volúmenes de extracción del acuífero Pastor Ortiz, representado en porcentaje.....	47
Figura 6.2. Área de influencia del distrito de riego 087.....	51
Figura 6.3. Red de monitoreo de niveles piezométricos en el acuífero Pastor Ortiz.....	52
Figura 6.4. Malla que cubre el acuífero Pastor Ortiz.....	53
Figura 6.5. Malla en hoja de cálculo del acuífero Pastor Ortiz.....	54
Figura 6.6. Tipo de celda en el acuífero Pastor Ortiz.....	54
Figura 6.7. Valores de transmisividad en el modelo acuífero Pastor Ortiz.....	58
Figura 6.8. Valores de coeficiente de almacenamiento en el modelo acuífero Pastor Ortiz.....	59
Figura 6.9. Condiciones de contorno en el modelo del acuífero Pastor Ortiz.....	60
Figura 6.10. Acciones elementales en el modelo del acuífero Pastor Ortiz.....	61
Figura 6.11. Distribución de la recarga en el modelo del acuífero Pastor Ortiz.....	62
Figura 6.12. Distribución de la recarga por riego en el módulo Pastor Ortiz.....	63
Figura 6.13. Distribución de la recarga por riego en el módulo Angamacutiro.....	64



Figura 6.14. Aprovechamiento en el acuífero Pastor Ortíz.....	65
Figura 6.15. Distribución de los volúmenes de extracción en el acuífero Pastor Ortíz.....	66
Figura 6.16. Monitoreo Piezométrico 2014 en el acuífero Pastor Ortíz.....	67
Figura 6.17. Interfaz de ArcGis 10.1 para realizar la distribución de los niveles estáticos.....	68
Figura 6.18. Distribución de los niveles estáticos.....	69
Figura 6.19. Series de recargas de las acciones elementales.....	70
Figura 6.20. Archivo “AV4ECO”.....	71
Figura 6.21. Archivo “AV2ERES”, series de resultados de simulación.....	71
Figura 6.22. Valores finales de transmisividad en el modelo.....	73
Figura 6.23. Valores finales de coeficiente de almacenamiento en el modelo.....	73
Figura 6.24. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 3.....	74
Figura 6.25. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 4.....	75
Figura 6.26. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 5.....	75
Figura 6.27. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 6.....	75
Figura 6.28. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 7.....	76
Figura 6.29. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 3.....	76
Figura 6.30. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 4.....	77
Figura 6.31. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 5.....	77
Figura 6.32. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 6.....	77
Figura 6.33. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 7.....	78



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 4.1. Extensión de sub provincias fisiográficas en el municipio de Puruándiro.....	30
Tabla 4.2. Extensión de unidades de topoformas en el municipio de Puruándiro.....	31
Tabla 4.3. Climas en el municipio de Puruándiro.....	32
Tabla 4.4. Extensión de unidades litológicas en el municipio de Puruándiro.....	33
Tabla 6.1. Usos de volúmenes de extracción del acuífero Pastor Ortiz.....	47
Tabla 6.2. Dimensiones de las celdas del acuífero Pastor Ortiz.....	55
Tabla 6.3. Valores orientativos de conductividad hidráulica horizontal.....	56
Tabla 6.4. Tipos de geología y rangos de conductividad hidráulica.....	57
Tabla 6.5. Series de resultados de los parámetros de control en Excel.....	72
Tabla 6.6. Diferencias de los niveles estáticos de control, simulados y Medidos.....	78



RESUMEN

El agua subterránea es un recurso indispensable no solo para el desarrollo social y económico de una región, sino también para la vida misma y su importancia se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El acuífero Pastor Ortiz (Michoacán) es de los más sobreexplotados del país, debido a la excesiva extracción de agua que se da a través de pozos profundos, destinados para la agricultura principalmente. Este recurso es enviado a través de canales de riego hacia las zonas productivas del municipio de Puruándiro, lo que ha llegado a contaminar y a afectar el suelo y el agua que posteriormente es infiltrada al subsuelo.

En la presente investigación se desarrolla la modelación del acuífero Pastor Ortiz con el programa AQUIVAL, centrado principalmente en el área que abarca el municipio de Puruándiro. Para hacer dicha modelación, primero se deberá acotar la zona a estudiar, después se ha de recopilar información hidrogeológica y de la distribución de los pozos de extracción (con sus niveles piezométricos), para finalmente establecer las condiciones iniciales del acuífero y realizar el proceso de calibración. Teniendo todos los datos que se requieren para realizar la modelación subterránea del acuífero de interés, el programa sigue una metodología definida (calibración y validación del modelo de acuífero) y una vez finalizada, los resultados obtenidos por el modelo son: (i) los niveles estáticos que se presentan en el acuífero, útiles para entender el funcionamiento y proponer un aprovechamiento sustentable; (ii) las descargas por manantiales y celdas de nivel de descarga constante, para determinar la relación entre las extracciones y las modificaciones en las descargas naturales de los manantiales en la zona; (iii) los volúmenes de variación anual en el modelo de acuífero, útil para realizar balances anuales de agua en la zona de estudio.

Como se sabe, la sobreexplotación de acuíferos es un problema que compromete la disponibilidad de recurso hídrico en los acuíferos en los años venideros, por lo que la importancia de su cuidado y explotación responsable no puede ser menospreciada.



El conocer el funcionamiento del acuífero Pastor Ortíz debe servir como una herramienta donde se pueda analizar reglas de operación sustentable o evaluar el impacto de implementación de medidas de recarga inducida, con objeto de extraer anualmente una cantidad de agua igual o menor a la de la recarga media anual de la zona de estudio.

Palabras Claves: Sobreexplotación, acuífero, modelación, simulación, calibración, niveles estáticos.



ABSTRACT

Groundwater is an indispensable resource not only for the social and economic development of a region, but also for life itself and its importance is manifested in the magnitude of the volume used by the main users. The Pastor Ortiz aquifer (Michoacán) is one of the most overexploited in the country, due to the excessive extraction of water through deep wells, mainly used for agriculture. This resource is sent through irrigation channels to the productive areas of the municipality of Puruándiro, which has come to contaminate and affect the soil and water that is subsequently infiltrated to the subsoil.

In the present research the modeling of the aquifer Pastor Ortiz is developed with the program AQUIVAL, focused mainly in the area that includes the municipality of Puruándiro. In order to do this modeling, the area to be studied must first be defined, then the hydrogeological information and the distribution of the extraction wells (with their piezometric levels) must be collected, finally to establish the initial conditions of the aquifer and to carry out the process of calibration. Taking all the data required to perform the underground aquifer modeling, the program follows a defined methodology (calibration and validation of the aquifer model) and once completed, the results obtained by the model are: (i) the levels Static that are present in the aquifer, useful to understand the operation and propose a sustainable use; (ii) discharges by springs and cells of constant discharge level, to determine the relationship between extractions and changes in natural discharges from the springs in the area; (lii) volumes of annual variation in the aquifer model, useful for annual water balances in the study area.

As is well known, overexploitation of aquifers is a problem that compromises the availability of water resources in aquifers in the coming years, so the importance of responsible care and exploitation can not be underestimated. Knowing the operation of the Pastor Ortiz aquifer should serve as a tool where it is possible to analyze sustainable operation rules or evaluate the impact of the implementation of measures of induced recharge, in order to extract annually a quantity of water equal to or less than that of recharge Average of the study area.



1.- INTRODUCCIÓN

El agua subterránea es un recurso indispensable, no solo para el desarrollo social y económico sino para la vida misma y su importancia se manifiesta en la magnitud del volumen utilizado por los principales usuarios. El interés en el desarrollo de estudios relacionados con este vital líquido ha sido de gran importancia en México y en particular en Michoacán y la zona de estudio. Por tal motivo, a lo largo de la historia ha crecido la necesidad de obtener agua con cada vez mayor facilidad, desarrollando y perfeccionando técnicas y métodos que permitan asegurar su disponibilidad y abastecimiento, así como su calidad (tanto para uso doméstico como industrial y agrícola). Es por ello que el buen manejo del agua se ha convertido en una de las principales preocupaciones para asegurar la calidad de vida y el desarrollo económico sostenible de una sociedad.

Por otro lado, debido al crecimiento poblacional en México, la demanda del agua está creciendo continuamente. En este sentido, Salas (2009) indica que para manejar adecuadamente el recurso subterráneo, es necesario conocerlo ampliamente y de una manera cuantitativa, lo cual es un problema para los acuíferos, ya que cada vez es más difícil que se puedan recargar de manera natural.

Para un buen manejo, aprovechamiento o explotación de los sistemas de aguas subterráneas de una zona, es necesaria la realización de una secuencia de estudios que permitan caracterizar estos sistemas y así obtener una mejor comprensión del acuífero estudiado.

Para evaluar y comprender el comportamiento del acuífero en el área de estudio, es importante obtener la mayor cantidad de datos sobre la forma de ocurrencia del agua subterránea; profundidades del nivel del agua subterránea; espesores de los materiales, características químicas, parámetros hidráulicos y otros datos técnicos de relevancia (Salas, 2009).

En esta investigación se implementa el uso de un modelo matemático, el cual se puede usar como una herramienta muy útil en la predicción del comportamiento del acuífero ante acciones externas.



Los modelos numéricos son importantes ya que permiten integrar los datos hidrológicos y predecir de qué manera los niveles de agua en un acuífero responderán a la extracción; simulan la relación estímulo–respuesta en los acuíferos, en donde el estímulo puede ser el bombeo en pozos y la respuesta el abatimiento de los niveles de agua.

La aplicación de la tecnología de la modelación matemática de acuíferos contribuye a mejorar el conocimiento de las disponibilidades de estos recursos y a desarrollar políticas racionales de administración que garanticen su desarrollo sustentable (Salas, 2009).



2.- ANTECEDENTES

En las últimas décadas el uso de modelos matemáticos en hidrología se ha incrementado considerablemente, ayudando a comprender de una manera más real los fenómenos hidrológicos que ocurren en los sistemas hidrológicos. Actualmente los modelos matemáticos relacionados con la hidrología subterránea son aplicables y conocidos, lo que les da un alto grado de aceptación.

Aunque en México la carencia de datos ha limitado la aplicación de modelos matemáticos, sigue aumentando de manera considerable la recopilación de ellos para lograr mejores calibraciones en los modelos hidrológicos usados. Aún recientemente, el análisis de datos con diferentes metodologías era prácticamente imposible, debido sobre todo, a la imposibilidad de procesamiento y poca confiabilidad de los datos.

El uso de computadoras ha contribuido a la solución de muchos problemas que anteriormente no habían podido ser solucionados desde el punto de vista técnico y a la aplicación de diferentes modelos que permiten tener información más certera.

En hidrología, la práctica de los modelos matemáticos pretende representar una visión idealizada y simplificada de los fenómenos hidrológicos. Existen múltiples trabajos realizados sobre gestión hidrológica bajo una gran variedad de modelos que logran la determinación del recurso hídrico superficial y/o subterráneo (Instituto Nacional de Sismología, 1982); sin embargo, en México la mayoría de las modelaciones se limitan sólo a la parte superficial, otorgando como resultados, datos de escurrimientos e infiltraciones, lo cual sirve como referente para conocer lo que ocurre subterráneamente en un acuífero. De acuerdo a Almanza (2013), a partir del reporte de las infiltraciones y otros datos es posible complementar toda la información que requiere la modelación subterránea. Considerando además que el número de acuíferos sobreexplotados han aumentado de manera significativa y que su concentración se da principalmente en las regiones hidrológicas de Baja California, Noroeste, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo y Lerma-Santiago-Pacífico (CONAGUA, 2012), es necesario conocer de manera apropiada todos los



factores que intervienen en cada sistema con el fin de precisar el modelo más apto a utilizar.

2.1. Modelos Hidrológicos

Un modelo matemático es una representación simplificada que trata de simular el comportamiento de un sistema hidrológico, expresándolo por medio de ecuaciones, que indican relaciones entre variables y parámetros. Una variable se expresa como una característica de un sistema, la cual puede asumir diferentes valores cuando es medida a través del tiempo. Un parámetro es una cantidad característica de un sistema el cual es constante a través del tiempo. Un sistema es definido como cualquier estructura, proyecto, esquema o procedimiento real o abstracto que interrelaciona en un tiempo dado una variable de entrada con una variable de salida. Se puede tener un sistema real y un sistema abstracto. El sistema real es un proceso que se realiza como ocurre (por ejemplo, en el ciclo hidrológico y todas sus facetas); el sistema abstracto es el que pretende representar al sistema real mediante alguna estructura, mecanismo o procedimiento (por ejemplo, un modelo matemático del ciclo hidrológico) (Instituto Nacional de Sismología, 1982).

En el caso de la modelación de los sistemas hidrológicos, el objetivo consiste en determinar (en los puntos de estudio o interés) el recurso hídrico y su distribución en el tiempo, a través de una reproducción lo más fiel posible de los fenómenos ligados al ciclo hidrológico (Sahuquillo, 2010).

2.2. Clasificación de los modelos matemáticos en hidrología

Los modelos matemáticos se pueden clasificar de acuerdo al tipo de fenómeno u aplicación considerada (Estrela, 1992). Fundamentalmente existen dos tipos de modelos; aquellos que tienden a representar algún proceso y aquellos que tratan de condensar una serie de estadísticas. Pueden los modelos también ser estocásticos o determinísticos, según contemplen o no consideraciones probabilísticas (Instituto

Nacional de Sismología, 1982). En la Figura 2.1 se presenta un esquema de la clasificación de modelos matemáticos en hidrología.

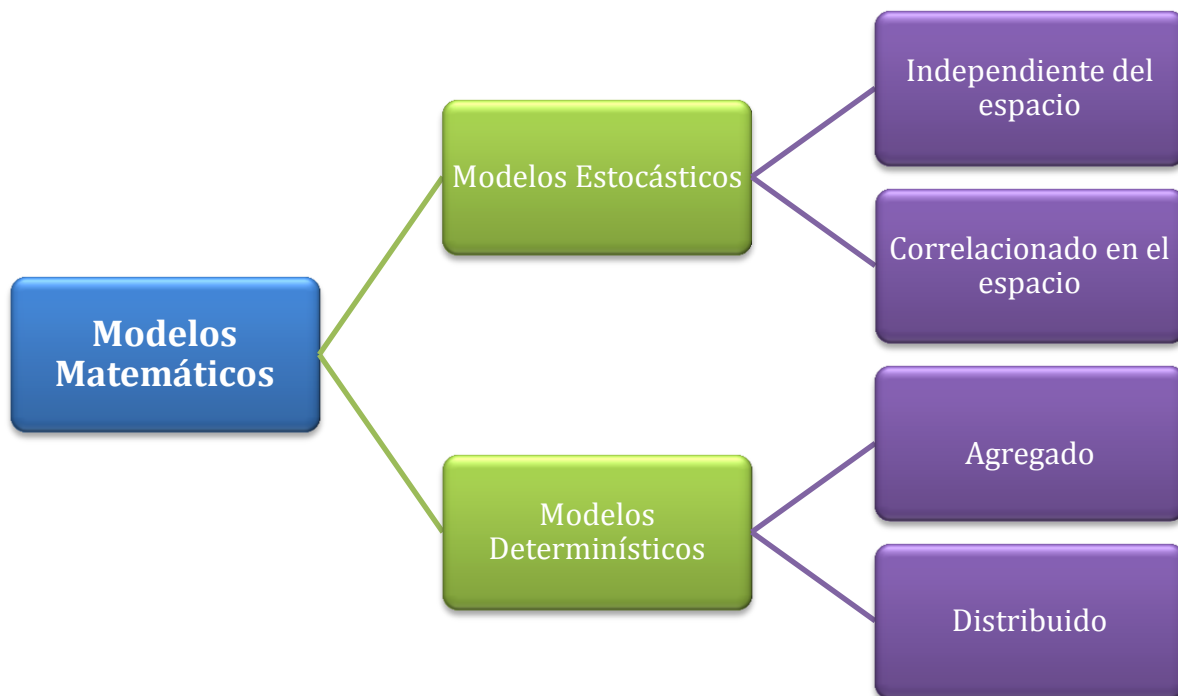


Figura 2.1. Clasificación de los modelos matemáticos en hidrología.

2.2.1. Modelos Estocásticos

Los modelos estocásticos son aquellos mediante los cuales no puede predecirse un resultado sino que indica la probabilidad de que este sea obtenido. Es decir, que su objetivo principal es hacer una simulación de la respuesta del sistema.

La utilización de un modelo estocástico implica escoger el modelo apropiado para describir el fenómeno, estimar la distribución de los datos de entrada, estimar los parámetros y la distribución probabilística de los datos de salida cuando el sistema y la distribución de entrada son conocidos.

Estos modelos generalmente se han empleado para la simulación de series de tiempo hidrológico, cuya probabilidad de ocurrencia sea igual a la de la serie histórica observada (Instituto Nacional de Sismología, 1982).



2.2.2. Modelos Determinísticos

Los modelos determinísticos son aquellos en que, una vez fijados los valores de sus parámetros y demás componentes, la respuesta del modelo a un estímulo dado, puede predecir con certeza.

Los primeros modelos matemáticos usados en hidrología fueron modelos paramétricos simples de precipitación, es decir, modelos calibrados con la información proveniente de los registros de datos existentes. Estos primeros modelos usualmente involucraban ecuaciones empíricas y procedimientos sencillos para obtener la información deseada. Con el tiempo los modelos se han vuelto más complejos, lo que hace necesario el uso de computadoras para su manejo (Instituto Nacional de Sismología, 1982).

2.3. Modelación Subterránea

Los modelos de aguas subterráneas desempeñan un papel importante en el desarrollo y gestión de los recursos de aguas subterráneas, y en la predicción de los efectos de las medidas de gestión. Con el rápido incremento en el poder computacional y la amplia disponibilidad de computadoras y software, el modelado de aguas subterráneas se ha convertido en una herramienta estándar de hidrogeólogos para llevar a cabo con eficacia la mayoría de las tareas (Zhou y Li, 2011).

Para simular el flujo subterráneo (que suele ser complejo y de carácter distribuido), se usan los modelos determinísticos, que como ya se mencionó con anterioridad se clasifican en "agregados" y "distribuidos".

En los modelos agregados se proporciona una visión de la variación del acuífero en el tiempo, mediante acciones externas a través del uso de pocos parámetros que generalizan el sistema, de tal manera que puedan reproducir de manera sencilla los intercambios de flujo entre río y acuífero y su almacenamiento a lo largo del tiempo, pero no en distribución espacial. El modelo unicelular que representa el acuífero



como una celda con un volumen almacenado con entradas y salidas aplicadas, es uno de los modelos agregados más utilizado.

Los modelos distribuidos de flujo subterráneo consideran la distribución espacial del acuífero así como las propiedades hidrodinámicas, localización y características de límites y la posición de los efectos externos, puntuales o distribuidos. Estos modelos resultan de la solución de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales.

En la modelación distribuida de flujo subterráneo con parámetros agregados se buscan soluciones analíticas de la ecuación que describe el movimiento del flujo del acuífero, considerando un acuífero bidimensional, homogéneo, de geometría sencilla, contorno sencillo y de comportamiento lineal.

Por otra parte los modelos distribuidos de parámetros distribuidos resuelven la ecuación diferencial de flujo subterráneo en derivadas parciales, describiendo así el movimiento del flujo en régimen transitorio en el acuífero, esto para acuíferos bidimensionales; cuando se presenta el caso de geometría y contorno complicada así como comportamiento no homogéneo del acuífero se requiere el uso de métodos numéricos, siendo el de diferencias y elementos finitos los más aplicados (Sahuquillo, 2010).

2.4. Software empleado para la modelación

En el presente trabajo se utilizó como herramienta de trabajo el modelo de AQUIVAL, el cual se describe a continuación.

2.4.1. Modelo AQUIVAL

AQUIVAL es un módulo incorporado al sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hidráulicos incluyendo uso conjunto, llamado AQUATOOL (Andreu et al. 1991), desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (España), ha sido desarrollado con el propósito de ayudar al usuario en la elaboración de un modelo de simulación de acuíferos por el método de Autovalores (Sahuquillo, 1983), facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico.



El método de los Autovalores (MAV) sirve para modelar acuíferos de comportamiento lineal (confinados) en forma distribuida, resulta conveniente para su integración en un modelo de simulación de recursos hídricos por el bajo esfuerzo computacional que requiere.

Un acuífero bidimensional, discretizado con diferencias finitas y con una discretización del tiempo en intervalos regulares, utiliza una ecuación de flujo del agua en medios porosos expresada como la siguiente ecuación matricial:

$$[T] * H + Q = [SF] \frac{\Delta H}{\Delta t}$$

Donde:

$T(n,n)$: matriz simétrica en banda, que depende de la discretización hecha del acuífero y de la transmisividad de las celdas en las dos direcciones perpendiculares ($m^2 / \text{día}$).

$H(n)$: vector de alturas piezométricas. (m).

$Q(n)$: vector de flujos exteriores. ($m^3/\text{día}$).

$SF(n,n)$: matriz diagonal que depende de la discretización hecha del acuífero, de las condiciones de contorno y del coeficiente de almacenamiento de cada celda. (m^2).

Si las matrices T y SF son independientes de H y constantes en el tiempo, la ecuación anterior es lineal, y por ello aplicable el principio de superposición. Esta condición se cumple en los acuíferos confinados siempre que permanezcan completamente saturados, y en forma aproximada en los acuíferos libres en los cuales los descensos piezométricos son despreciables respecto al espesor saturado.

La solución de la ecuación original con Q constante en el tiempo es:

$$H_k = U + A * E * A^T * SF(H_{k-1} - U) + A * |I - E| * |\alpha|^{-1} * A^T * Q$$

Donde:



H_k número del período de tiempo a evaluar. Cada período tiene una longitud Δt (por lo general 1 mes).

$U(n)$ vector de alturas piezométricas para régimen estacionario y $Q = 0$. [m].

n es la cantidad de celdas en que se discretizó el acuífero.

$A(n, n)$ es la matriz de autovectores del problema $T \cdot A = SF \cdot A \cdot |\alpha|$. Cada Autovector ocupa una columna. [m-1].

$|\alpha|$ es el vector de Autovalores del problema $T \cdot A = SF \cdot A \cdot |\alpha|$. Todos los elementos son positivos. [día-1].

$AT(n, n)$ es la traspuesta de la matriz A . [m-1].

$E(n, n)$ es una matriz diagonal, donde cada elemento de la diagonal vale:

$$e_{ii} = \exp^{-\alpha_i \cdot \Delta} [\text{adimensional}]$$

Cada vez que se produzca un cambio en el vector Q de flujos externos, se considera este instante como el instante inicial con sus alturas mentes como $H_{k-1} = H_0$ y se aplica la ecuación para H_k .

Aquí se abren dos caminos, según el valor de U :

Si $U = 0$ es conveniente aplicar el Método de la L . Esta caso se produce cuando todas las celdas de altura constante son de $h=0$ y no hay flujos impuestos en los bordes, eliminándose el primer término de la para H_k , si se define un vector L , tal que: $H_k = A \cdot L_k$.

La ecuación se reduce a:

$$L_k = E * L_{k-1} + X * Q_k$$

$$L_0 = A^T * SF * H_0$$

Donde:

$L(n)$ es un vector auxiliar (m2). Este vector es denominado vector de estado

$X(n,n)$, es igual a: $X = [I - E] * |\alpha|^{-1} * AT * (\text{día/m})$



Si $U \neq 0$ hay que usar el Método de la U, en el que hay que calcular además el vector U (de estado estacionario), resolviendo el sistema de ecuaciones lineales que queda planteado al aplicar el balance de masa en cada nudo y la ecuación de flujo de Darcy. Una vez realizado esto, es necesario utilizar la ecuación de H_K para el cálculo de las alturas donde la notación puede simplificarse ya que algunos productos de matrices no se modifican posteriormente teniendo entonces:

$$H_K = U + M_{ZFija1} * (H_{K-1} - U) + M_{ZFija2} * Q$$

Donde:

$(n,)$, igual a: $M_{ZFija1} = A \cdot E \cdot AT \cdot [adimensional]$

$M_{ZFija2}(n,n)$, es igual a: $M_{ZFija2} = A \cdot |I - E| \cdot |\alpha| - 1 \cdot AT \cdot [dia/m^2]$

Cuando se incorpora un modelo de acuífero a un modelo de gestión, no hace falta conocer la altura piezométrica en todas las celdas, sino tener una idea más bien global del estado del acuífero.

Así surge el concepto de parámetro de control, que es justamente un valor indicador del estado del acuífero simulado. El caso más simple es que los parámetros de control sean las alturas piezométricas, pero también pueden ser el volumen almacenado alguna u algunas celdas, las salidas del acuífero, etc.

En lugar de usar la definición $H_k = A * L_k$ utilizamos la siguiente expresión:

$$PC_k = A_R * L_K$$

Donde:

PC (npc) es el vector de parámetros de control del acuífero [m].

A_R (npc, n) es la matriz A reducida. Si los parámetros de control son alturas piezométricas A_R contiene las filas de A de las celdas cuya altura es parámetro de control. [m⁻¹]. Si los parámetros de control son todas las alturas piezométricas, $A_R = A$.



Los parámetros de control pueden ser también volúmenes almacenados en un conjunto de celdas, salidas del acuífero, etc. Este concepto de los parámetros de control solo es aplicable si se usa el método de L.

Un concepto análogo aplicado a las acciones exteriores se denomina acción elemental las acciones externas sobre el acuífero suelen tener más o menos la misma configuración espacial, variando de un período a otro en su magnitud. Usando este concepto. La ecuación de H_k se simplifica quedando así:

$$L_k = E * L_{k-1} + X * Q_{AE} * I_k$$

$$L_k = E * L_{k-1} + \varphi * I_k$$

Donde:

$Q_{AE}(n, nae)$ matriz de acciones elementales en la que cada columna es una acción elemental, y por ende los elementos de cada columna deben sumar 1 [adimensional].

$\varphi (n,nae)$ es igual a: $\psi = X * Q_{AE}$ [dia/m].

$I (nae)$ es el vector de intensidades de las acciones elementales [m³/día].

(El concepto de acciones elementales se pueden aplicar tanto para el caso de $U=0$ como para el caso de $U \neq 0$).

El método de los Autovalores requiere de la discretización del acuífero, las condiciones de contorno y las propiedades de transmisividad y almacenamiento de cada celda así como numerar las celdas activas de izquierda a derecha y de arriba a abajo.

Obtención de las matrices T y SF del Método de Autovalores

$$SF(ii) = \text{almacenamiento}_i * \Delta x * \Delta y$$

Para cada celda i analizada, j toma los números de celdas de arriba, abajo, derecha izquierda de la celda analizada, únicamente cuando estén sean celdas activas.

$$t_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}}$$
$$t_{ij} = - \frac{1}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}}$$

Después se construye la matriz C (simétrica):

$$c_{ij} = sf_{ii} * t_{ij} * sf_{jj}$$

Y se obtienen los n autovalores α y autovectores Y de C . Esto se calcula generalmente con alguna librería estándar, preparada para este fin, así como también los autovectores A que cumplen

$$T * A = \alpha * SF * A$$

Luego se asignan los datos a las matrices: $Ho, e I$, y se calculan las matrices fijas que correspondan según el método y las simplificaciones elegidas, calculándose ulteriormente los valores de L o H para los diversos pasos de tiempo. Finalmente para calcular el caudal transferido entre dos celdas vecinas se emplea la fórmula de Darcy en medios discretizados:

$$q_{1-2} = T_{1-2} * \frac{\Delta x}{\Delta y} * \Delta h$$

La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizados. Esto lo hace idóneo para incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de simulación.



El método requiere de la calibración de datos hidrodinámicos necesarios, realizables previamente mediante modelos matemáticos en diferencias finitas o elementos finitos, ya que el modelo de Autovalores no es, en principio, eficaz en el proceso de calibración (Sahuquillo *et al.*, 2010)..



3.- OBJETIVOS

3.1. Objetivo General

El objetivo principal de este trabajo es elaborar un modelo matemático de simulación hidrodinámica a partir del estudio hidrogeológico del acuífero Pastor Ortiz, con el que se pueda conocer y analizar el funcionamiento hidráulico y para conocer la disponibilidad del recurso hídrico que se tiene en el municipio de Puruándiro

3.2. Objetivos Particulares

- Caracterizar la zona de estudio, para conocer sus características hidrogeológicas, fisiográficas, geológicas, topográficas, edafológicas y geomorfológicas.
- Recopilar la información necesaria para alimentar al modelo hidrogeológico.
- Elaborar un modelo hidrológico subterráneo.
- Simular y calibrar el modelo para conocer el funcionamiento piezométrico de la zona en estudio.
- Analizar y comparar los resultados obtenidos.

4.- ZONA DE ESTUDIO

4.1 Localización del Acuífero Pastor Ortiz

El acuífero Pastor Ortiz se localiza al norte de estado de Michoacán, colindando por la margen izquierda con el río Lerma. Geográficamente está ubicado entre las coordenadas $19^{\circ} 48'57.6''$ y $20^{\circ} 19'22.8''$ de latitud Norte, y entre $101^{\circ} 22'48''$ y $101^{\circ} 56'38.4''$ de longitud Oeste. Cuenta con una superficie total de $1,798 \text{ km}^2$ (Figura 4.1).

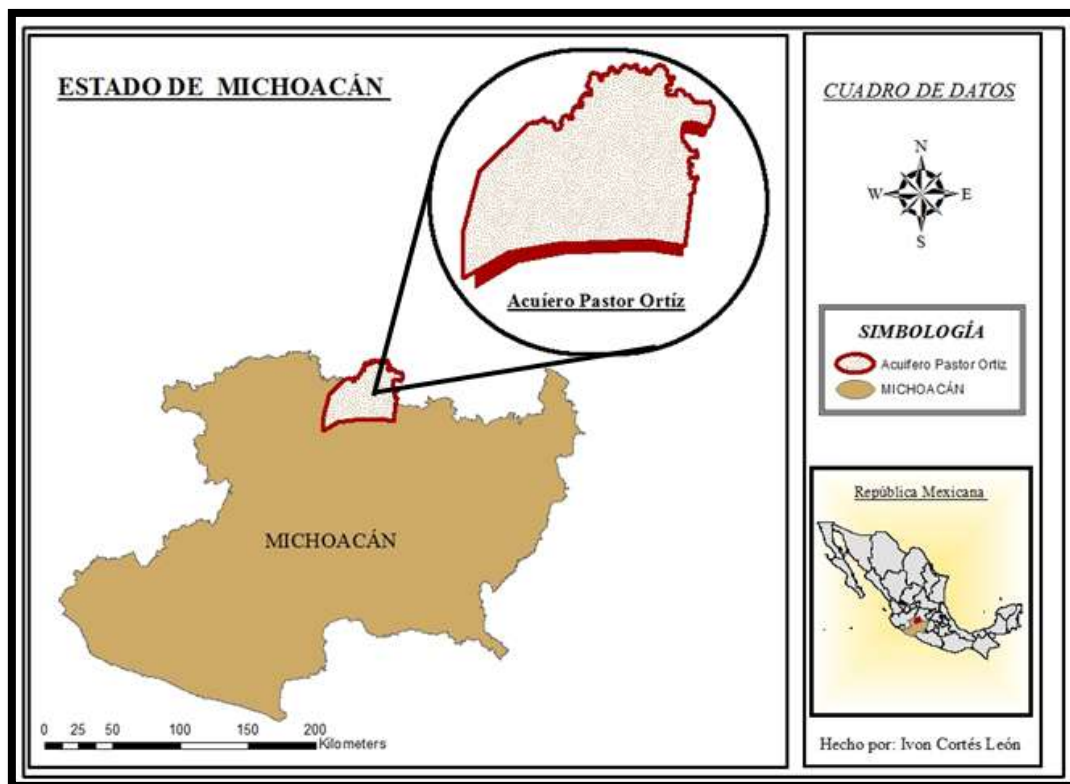


Figura 4.1. Ubicación del acuífero Pastor Ortiz en el Estado de Michoacán

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

4.2. Municipios sobre el acuífero Pastor Ortiz

Los municipios que quedan dentro del acuífero Pastor Ortiz son: José Sixto Verduzco, Puruándiro, Angamacutiro, Panindícuaro y una parte de Penjamillo, Villa Morelos, Villa Jiménez y Zacapu (Figura 4.2).

De estos municipios, la investigación realizada se centra en el municipio de Puruándiro.

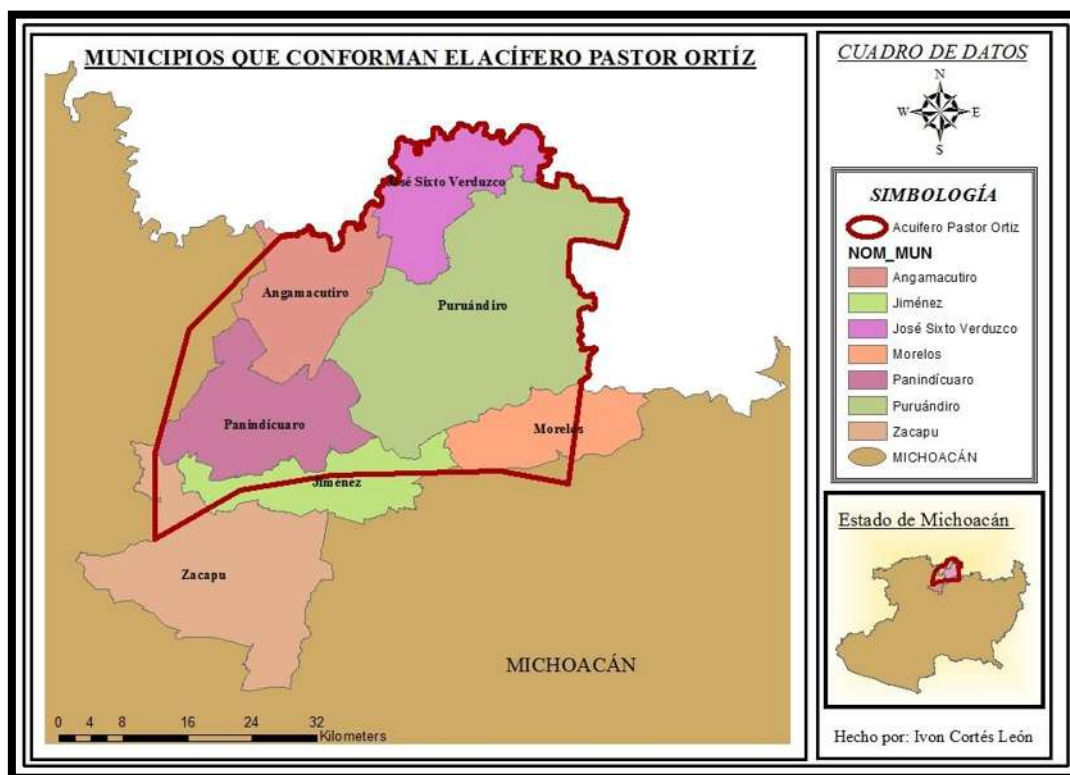


Figura 4.2. Municipios asociados al acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

4.3 Localización de Puruándiro

El municipio de Puruándiro se ubica al norte del Estado de Michoacán. La distancia carretera a la capital del Estado es de aproximadamente 90 km. Se trata de uno de los 113 municipios que conforman el Estado de Michoacán y uno de los 17 municipios que integran la Región II “BAJIO”. El municipio de Puruándiro tiene una extensión de 722.48 km² y representa el 1.22% del territorio estatal.

El municipio colinda al norte con el municipio de Sixto Verduzco, al Oriente con el Estado de Guanajuato; al Poniente con el municipio de Angamacutiro y al Sur con los municipios de Panindícuaro, Villa Jiménez y Morelos.

El municipio se ubica entre las coordenadas 101°31' de longitud Oeste y 20°05' de latitud Norte, a una altura de 1,890 metros sobre el nivel de mar (Figura 4.3).

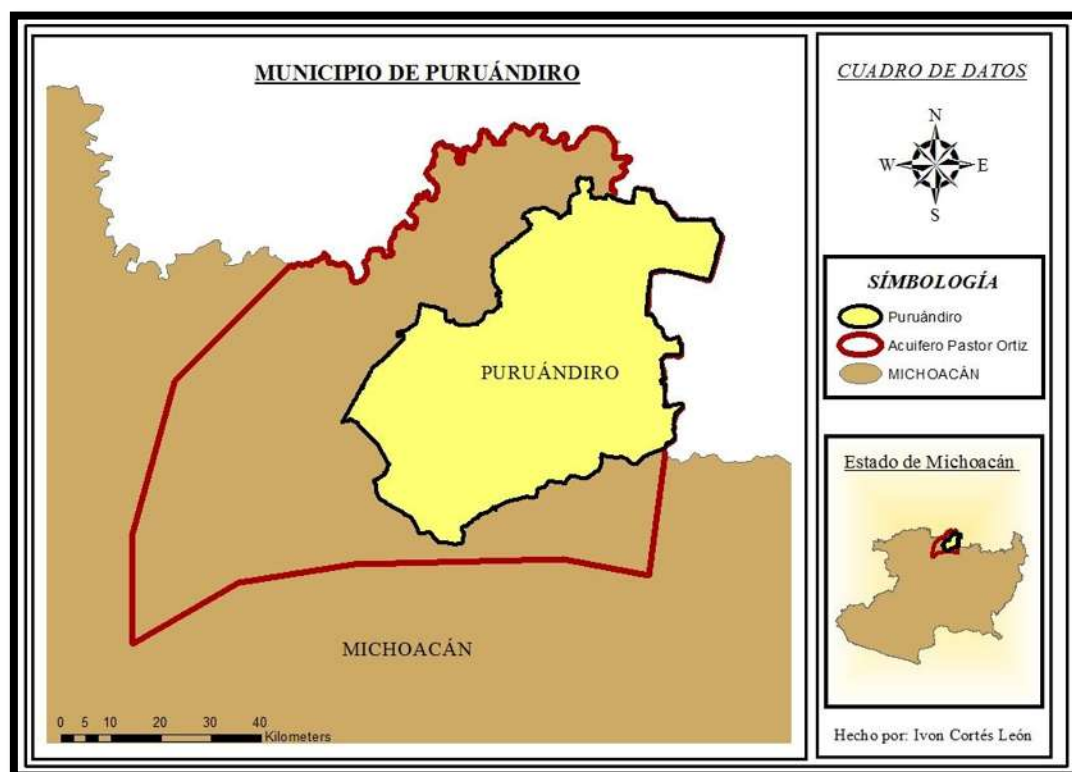


Figura 4.3. Ubicación geográfica del municipio de Puruándiro dentro del acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.



De acuerdo al Censo 2010, el Municipio cuenta con una población de 67,837 habitantes, distribuidos en 48 localidades, de las cuales la cabecera municipal (del mismo nombre), es donde se concentra el mayor número de habitantes (30,571 habitantes), lo que representa una concentración de la población del 45.06%. El resto de la población del municipio se distribuye en diversas localidades, entre las que destacan Villachuato (3,986hab.), Galeana (2,962hab.), Santa Clara (2,633hab.), Isaac Arriaga con 2,182; Janamuato con 1,992; Manuel Villalongín con 1,906; San Lorenzo 1,598; Janambo 1,245; Las Letras 1,221; El Pilar con 1,061 y Las Ranas 1,047; además de 16 localidades ente los 500 y 950 habitantes; 12 más entre 100 y los 470 habitantes y 9 pequeñas localidades con una población menor a los 100 habitantes.

4.4. Hidrogeología

El municipio de Puruándiro como ya se mencionó anteriormente se encuentra en su totalidad dentro del acuífero Pastor Ortiz y está inmerso dentro de la Región Hidrológica N°12 “Lerma- Chápala –Santiago”; corresponde a la cuenca del río Lerma-Salamanca y Río Lerma–Chapala; perteneciente a las subcuencas L. Pátzcuaro, L. de Yuriria, R. Salamanca – R. Angulo y R. Angulo. (Figura 4.4)

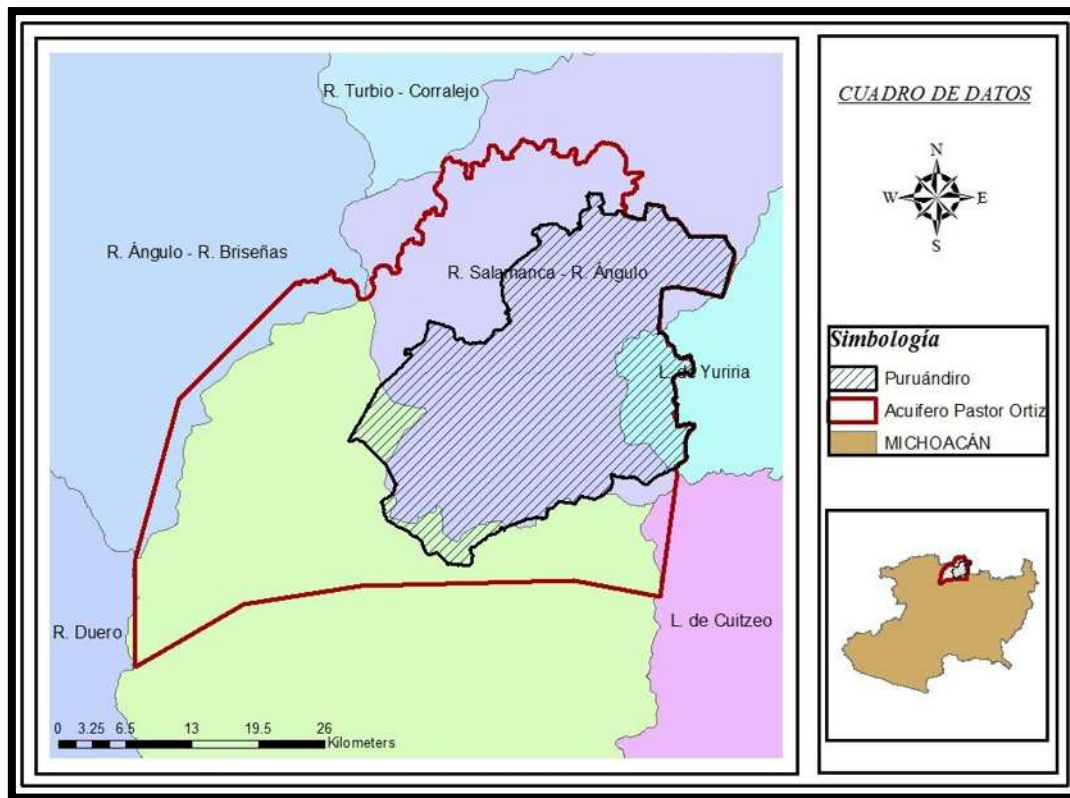


Figura 4.4. Hidrogeología del municipio de Puruándiro.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

Puruándiro cuenta con cinco sistemas de redes hidrológicas: la cuenca “Los Cachiripos” con una extensión de 43.22 km², la cuenca “El Salto” con un área de 22.2 km², la cuenca “El Prieto” con 37.6km², la cuenca “Las Palmas” con 25.93 km² en extensión, la cuenca “Las Mancuernas” con 146.97km² y cuenca “El Alto”.

Los escurrimientos más sobresalientes son: La Cofradía, El Tablón, La Laguna, Agua Tibia, que cruzan el extenso Valle de Puruándiro así como el arroyo del Durazno y Las Mancuernas al norte del municipio. Entre los manantiales más representativos se encuentran: Ojo Santo, Carano, Salitrillo, Agua Tibia, Jeroche, El Piojo y El Carrizo.

El municipio de Puruándiro se localiza principalmente en tres unidades hidrogeológicas: una primera unidad de materiales consolidados con posibilidades bajas (que se encuentra en un 52% del territorio); una segunda unidad que abarca el



18% del territorio de posibilidades medias y una tercera unidad más con el 22 % del territorio de materiales consolidados con posibilidades altas.

El 8% restante representa unidades hidrogeológicas de materiales no consolidados con posibilidades medias y bajas.

4.5. Fisiografía

El municipio de Puruándiro se encuentra dentro de la Provincia fisiográfica del Eje Neovolcánico, dentro de dos Subprovincias. El 92.5% del municipio corresponde a sierras y bajíos michoacanos (con sierras de “laderas tendidas con lomeríos”, “llanura de inter montaña” y un conjunto de sierras al sur); una pequeña porción (7.5%) al Noroeste corresponde a la subprovincia del “Bajío guanajuatense”, caracterizada por ser de Gran Llano (Tabla 4.1).

Tabla 4.1. Extensión de sub provincias fisiográficas en el municipio de Puruándiro.

UNIDAD	ÁREA (Has)	ÁREA (%)
Sierras y bajíos Michoacanos	66616.7	92.5
Bajío Guanajuatense	5412.4	7.5

Fuente: Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puruándiro, 2011.

En la zona de estudio se identifican 4 topoformas:

- i. La “sierra volcánica de laderas tendidas con lomeríos” (la de mayor extensión con 56.8% y la más representativa en el municipio), la cual corresponde a volcanes tipo escudo y semiescudo que definen las principales elevaciones topográficas del área, con altitudes que van de los 2,650msnm (C. Grande) en el Oriente y Poniente de Puruándiro (cabecera Municipal); elevaciones de 1,930 msnm en el Centro y Noreste del Municipio en correspondencia con conos y flujos de lavas (CENAPRED, 2012).



- ii. En la parte central de este municipio se extiende de forma alargada (de Noreste a Suroeste), la topoforma llamada “vaso lacustre”, que corresponde a zonas de antiguos lagos (CENAPRED, 2012).
- iii. En la parte Sureste se extiende la topoforma “sierra volcánica de laderas de escarpa de falla” que corresponde al 19.8% de la superficie del municipio dominando el edificio volcánico del cerro El Varal con una altitud de 2,760 msnm (CENAPRED, 2012).
- iv. También se localiza una topoforma de llanura aluvial que abarca un área de 5412 has, que representa el 7.5% del área total (CENAPRED, 2012).

Tabla 4.2. Extensión de unidades de topoformas en el municipio de Puruándiro.

UNIDAD	ÁREA (Has)	ÁREA (%)
Sierra volcánica de laderas tendidas con lomerío	40902	56.8
Sierra con laderas de escarpa de falla	14236.3	19.8
Vaso lacustre	11478.4	15.9
Llanura aluvial	5412.4	7.5

Fuente: Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puruándiro, 2011.

4.6. Clima

De acuerdo a la clasificación de Köppen modificado por Enriqueta García en 1964, el Municipio de Puruándiro presenta tres tipos de climas, los cuales se presentan a continuación en la tabla 4.3:

Tabla 4.3. Climas en el municipio de Puruándiro.

SÍMBOLO	CLIMA	LLUVIA	DESCRIPCIÓN
(A)C(w1)(w)	Semicálido	En verano	Intermedio en cuanto a humedad con porcentaje de lluvia invernal respecto al total anual <5mm.
(A)C(w0)(w)	Semicálido	En verano	Seco con un porcentaje de lluvia invernal < 5mm.
C(w1)(w)	Templado Humedo	En verano	Intermedio en cuanto a humedad con un cociente PT entre 43.2 y 55.

Fuente: Instituto de Información para el Desarrollo, Compendios Estadísticos municipales, 2001.

Entre los meses de Mayo y Octubre, en el municipio se presentan hacia los valles de Manuel Villalongín y Villachuato isothermas medias máximas entre los 27° y los 30°, que envuelven a las comunidades más próximas. Así también, se presenta la isoterma media máxima de 24° al sur del municipio, envolviendo los cerros del Varal y los Negros. Finalmente, la isoterma media máxima de 21° se presenta hacia el centro del municipio.

En la zona de estudio, los vientos dominantes provienen del Noreste (CENAPRED, 2012). La frecuencia de heladas es de 1 a 8 en los meses de noviembre, enero y marzo y más de 9 en los meses de diciembre y febrero.

Esta frecuencia de heladas se presenta principalmente al sur del municipio y en las partes altas del cerro de Villachuato. El resto del territorio municipal tiene una frecuencia 1 a 8 heladas en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero (CENAPRED, 2012).

4.7. Geología

El Municipio de Puruándiro se localiza en el sector septentrional del Cinturón Volcánico Trans Mexicano (CVTM), el cual ha dado origen al vulcanismo del Campo Volcánico de Michoacán y Guanajuato, donde se han desarrollado más de 1,200 volcanes durante los últimos 4 millones de años (CENAPRED, 2012). Solo en el área de estudio se distinguen al menos 32 estructuras volcánicas, sin antecedentes volcánicos recientes.

Las unidades litológicas asociadas a este vulcanismo corresponden a basaltos y brechas volcánicas, en conos de lavas y volcanes escudo del Pleistoceno superior-medio, localizadas en la mayor parte de la superficie municipal (Tabla 4.4). También existen en la zona dacitas de Puruándiro, correspondientes a relativos flujos piroclásticos que controlan el relieve abrupto del Sur del Municipio (CENAPRED, 2012).

En general la geología de la región se caracteriza por rocas volcánicas del terciario, representadas por rocas extrusivas ácidas y rocas extrusivas básicas; las rocas más representativas son el basalto, tobas básicas, riolitas, tobas ácidas, brechas básicas (Figura 4.5). Las fracturas son representativas al sur del municipio y norte del mismo. Corren dos grandes fallas; una sobre el cerro El Sauz con dirección suroeste-noreste y otra entre los cerros de Los Puercos y El Varal (CENAPRED, 2012).

Tabla 4.4. Extensión de unidades litológicas en el municipio de Puruándiro, Mich.

CLAVE	UNIDAD	ÁREA (Has)	ÁREA (%)
B	Basalto	46,680.40	64.81
Al	Aluvial	10,530.0	14.62
R-Ta	Riolita-Toba ácida	7,315.30	10.16
B-Bvb	Basalto-Brecha 14 volcánica básica	2,457.90	3.41
Al	Andesita	1,349.0	1.87
ar	Arenisca	1,150.40	1.60
re	Residual	530.3	0.74
Da	Dacita	514.2	0.71
Cg	Conglomerado	210.6	0.29
N/A	Sin Clasificación	1291.1	1.79

Fuente: Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puruándiro, 2011.

Se cree que la geología regional y local (estructuras fisiográficas, sistemas de fallas, etc.), condicionan las características hidrotermales que se presentan en el municipio de Puruándiro, por lo que es importante para este estudio, determinar la relación física de la situación geológica y los afloramientos termales en la zona.

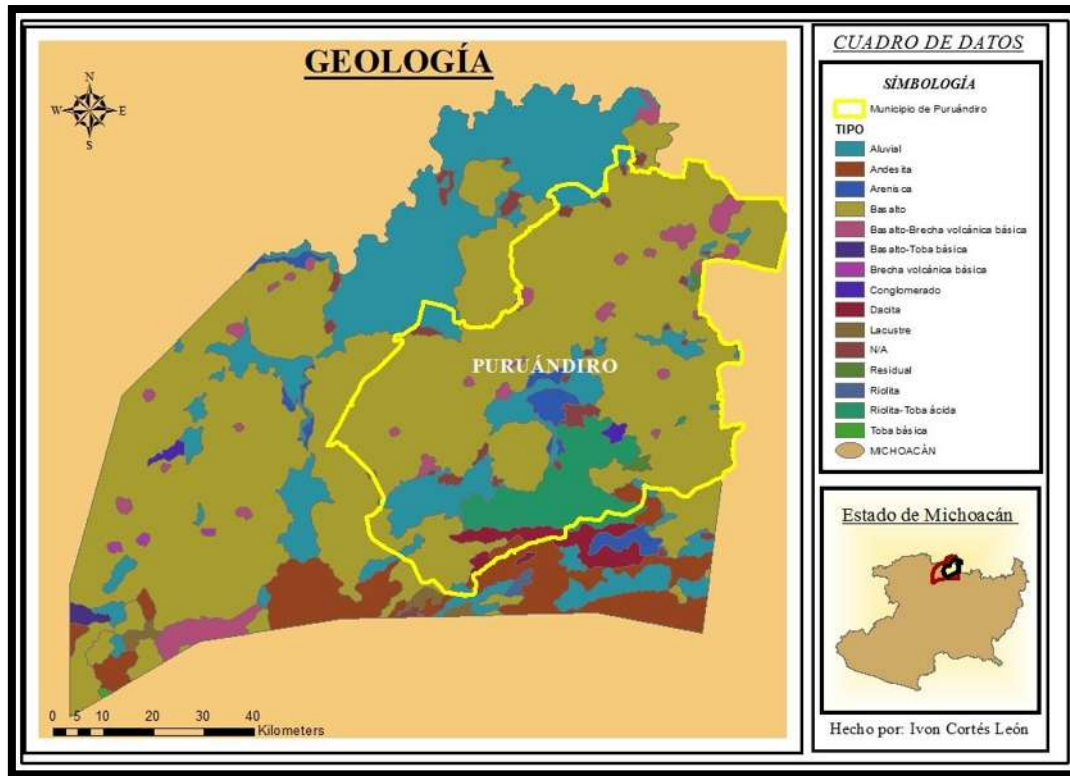


Figura 4.5. Geología en el municipio de Puruándiro.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

4.8. Topografía

Los rangos altitudinales en el municipio oscilan entre los 1850 y los 2200 metros sobre el nivel del mar. Las pendientes más representativas son aquellas entre los 2 y el 15%, seguidas de aquellas por arriba del 15% y finalmente con menos representatividad superficial, aquellas pendientes entre el 0 y 2% (CENAPRED, 2012).

4.9. Edafología

De acuerdo a (CENAPRED), el tipo de suelo que predomina en el municipio de Puruándiro es del tipo vertisol con más del 83.33 % del territorio. El resto del municipio presenta cambisol, luvisoles y feozem. Este último, es decir, el suelo feozem, se presenta tan solo en el 9% del territorio, localizándose principalmente al sur del municipio. (Figura 4.6)

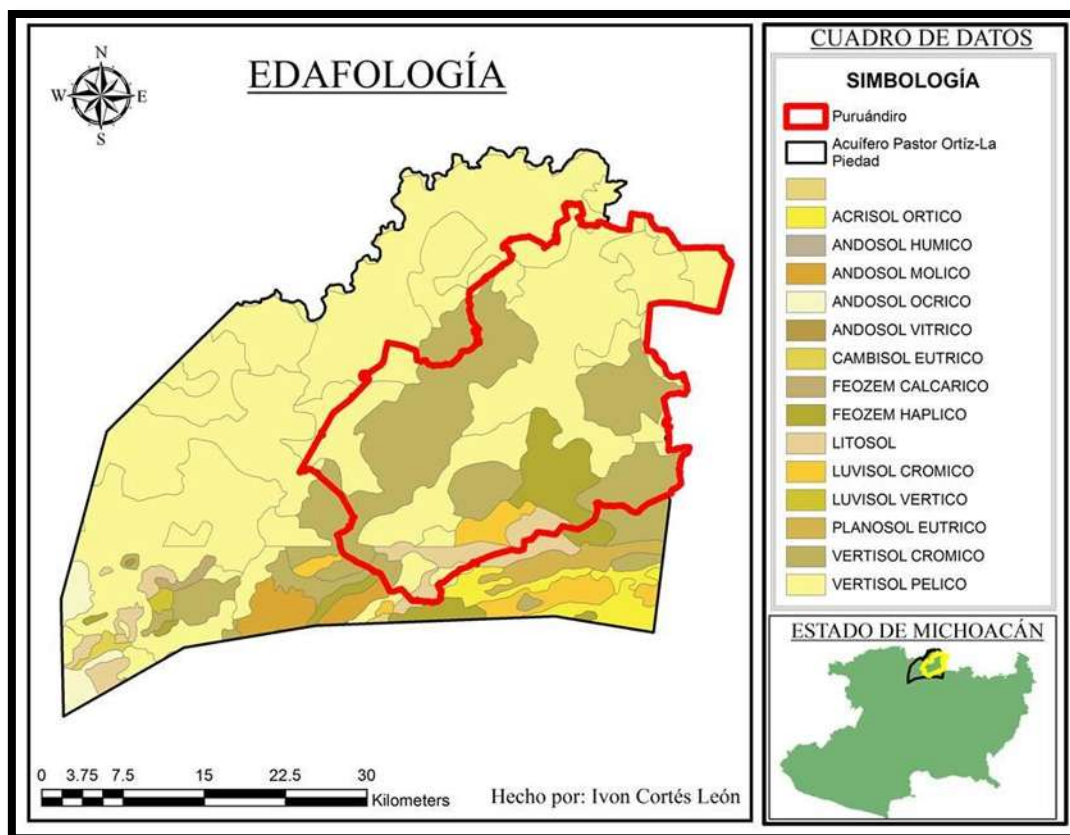


Figura 4.6. Edafología del municipio de Puruándiro.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

Vertisoles (VR)

Suelos muy arcillosos y pesados, de color negro o gris, con alta proporción de arcillas expansivas (Figura 4.7). Cuando se secan durante la temporada de estiaje, favorecen el desarrollo de grietas anchas y profundas. Son suelos muy fértiles pero

de difícil manejo, debido a su gran adhesividad en estado húmedo y dureza en estado seco. Lo cual genera grandes problemas en la ingeniería civil, asociados a hundimientos o asentamientos diferenciales. Ocupan el 71.8% del territorio municipal. Se distribuyen preferencialmente en terrenos bajos y planos, particularmente en las zonas Centro, Norte y Noroeste del Municipio; hacia el Oeste y Suroeste de la cabecera municipal, destacan localidades asentadas en este tipo de suelos como son Janamuato y las Ánimas. Al Noroeste Villachuato, San Isidro de la Cuesta. Al Norte Benito Juárez, San Nicolás, La Excusa, Huatajo, Janambo, San José del reparo, Santa Rosa de Lima, Manuel Villalongín, Isaac Arriaga, El Rodeo de las Rosas, Sanguijuelas. Hacia el Noreste las localidades de Santa Clara (Norte de la localidad); el Sureste Rincón de Don Pedro.



Figura 4.7. Suelos vertisoles en el municipio de Puruándiro.

Fuente: *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puruándiro, 2011.*

**Cambisol (CM)**

Estos suelos se caracterizan por ser claros, con desarrollo débil, y cambios en su consistencia debido a su exposición a la intemperie. Generalmente existe una diferenciación de color, estructura o el de lavado de carbonatos, entre otros. Se desarrollan sobre materiales de alteración de procedencia rocosa; en especial, el horizonte B se caracteriza por una débil alteración del material original, hay ausencia apreciable de arcilla y materia orgánica. De manera general estos son buenos como tierra agrícola y son usados intensamente; la ganadería también se desarrolla eficazmente en este tipo de suelos. Sus principales limitaciones están asociadas a la topografía, bajo espesor y pedregosidad. En zonas de grandes pendientes se recomienda que el uso del suelo sea únicamente forestal. En el Municipio los podemos encontrar hacia las partes media-alta del Cerro Grande, al Oeste de la cabecera municipal; al Suroeste en Cerro Blanco; así como al Este-Sureste en la localidad de La Barranca y el Cerro El Caballito.

Luvisol (LV)

Se localizan en el sector montañoso del sur del municipio. Son de fertilidad media, presentan buen drenaje y fácil manejo, razón por la que han sido incorporados paulatinamente a la agricultura y ganadería. Sin embargo, son muy susceptibles a la erosión. Presentan acumulación de arcilla en el subsuelo y se vinculan frecuentemente con bosques de coníferas y selvas caducifolias. En el Municipio los podemos localizar en las cumbres de las sierra al Sur de Puruándiro, extendiéndose hacia los municipios contiguos de Jiménez y Morelos, así como en la parte alta del C. Grande al Noroeste de la cabecera municipal.

Feozem (PH)

Son suelos que se caracterizan por tener un horizonte superior con alto contenido en materia orgánica, pedregosos en su interior y llegan a manifestar lixiviación de arcilla,

a la vez que presentan procesos importantes de humificación. Se asocian al uso forestal, soportando buenas formaciones de matorral o bosques de encinos. En el Municipio, se aprecian sobre laderas y pequeñas elevaciones donde se practica la agricultura de temporal. Específicamente se observan al sur de la cabecera municipal, en los Cerros de Los Flojos, La Cruz y La Rinconada. (Figura 4.8)



Figura 4.8. Suelos Feozem en terrenos desforestados del Cerro La Rinconada, al sur de la ciudad de Puruándiro.

Fuente: *Atlas de Riesgos Naturales del Municipio de Puruándiro, 2011.*

3.10 Geomorfología

Las formas de relieve que predominan en el territorio municipal van desde montañas de conformación basáltica hasta lomeríos de brechas volcánicas y llanuras o valles de aluvión. Así también se presentan conos volcánicos aislados.

3.11 Uso de Suelo

Las principales comunidades vegetales representativas en el municipio de Puruándiro son: El bosque de encino, El bosque de pino, la selva baja caducifolia o matorral subtropical, el bosque espinoso o matorral espinoso con leguminosas espinosas, el mezquital y el bosque de galería. De acuerdo a la Unidad de Manejo para la Conservación de la Vida Silvestre “Bajío Michoacano” existen un total de 60

familias de angiospermas (plantas con flores) con 142 especies y una sola familia de especies de gimnospermas en una superficie de 18, 144.75 hectáreas que comprende los municipios de Puruándiro, Sixto Verduco y Angamacutiro en terrenos de régimen ejidal.

Al Sur- Sureste del territorio municipal, el uso actual del suelo corresponde al tipo silvícola, caracterizado por Bosques de Encinos; y solo en las zonas más altas y menos perturbadas de las principales elevaciones se localizan aun asociaciones de pino-encino. El sector oriental del municipio se caracteriza por una Selva Baja Caducifolia (Matorral Subtropical), cuyo uso principal es el abastecimiento de leña para uso doméstico. La mayor superficie dentro del territorio es de uso agrícola, tanto de temporal, como de riego, esta última gracias a la presencia de canales y arroyos, así como al tipo de suelo que la caracteriza. (Figura 4.6)

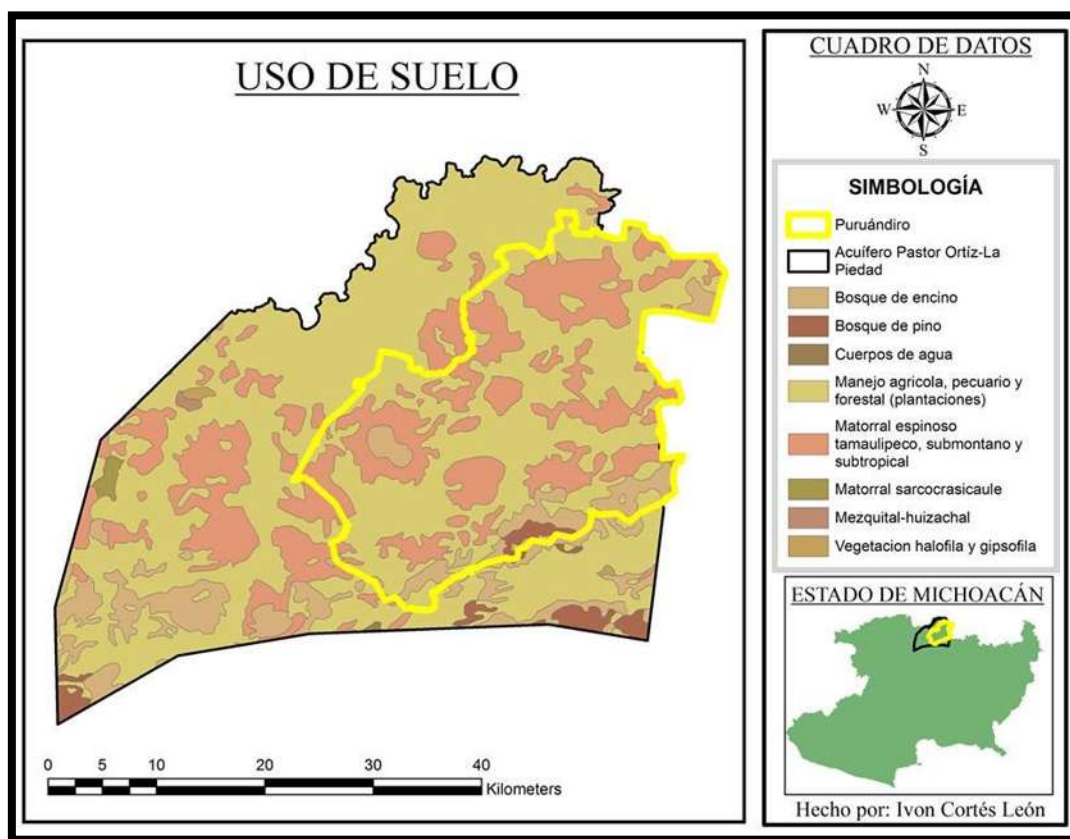


Figura 4.6. Principales Usos de Suelo en el municipio de Puruándiro.

Fuente: Elaboración propia, con el programa ArcMap 10.1.

5.- MATERIALES Y MÉTODOS

La metodología propuesta para este trabajo se desarrolló en varias etapas, empezando por la caracterización de la zona de estudio, la recopilación de datos, hasta la modelación y el análisis de resultados. A continuación se muestra un esquema de la metodología seguida y se hace una descripción de cada apartado.



Figura 5.1. Esquema de la metodología empleada.

Fuente: Elaboración propia.

5.1. Caracterización de la zona de estudio

En este primer apartado se realiza la ubicación geográfica y se describen las principales características de la zona en estudio. En este apartado se han desarrollado mapas con la ubicación espacial, la hidrogeología, la geología, edafología, uso de suelo, etc. de la zona de estudio. Estos mapas han servido para tener un panorama y entendimiento más claro de la zona que se está analizando y el



funcionamiento hidrogeológico del agua subterránea en la zona, lo cual es muy importante a la hora de realizar los cálculos de simulación del acuífero estudiado.

Para poder elaborar estos mapas se requiere el uso de modelos digitales de elevación (MDE), shapes y rasters, obtenidos de las bases de datos de INEGI y CONABIO. Dichos archivos se ingresan en el software ArcGis, que es un Sistema de Información Geográfica en el que se puede manipular la información digital y a través de ello, poder generar los mapas que sean requeridos.

5.2. Recopilación y análisis de datos

Inicialmente se realiza una recopilación de múltiples tipos y fuentes de información, que serán requeridos para realizar el trabajo de modelación subterránea. Con la realización de este apartado se puede establecer una idea general de la zona en estudio, particularmente características del acuífero y niveles piezométricos, así como el alcance y limitaciones en la modelación, dada la cantidad, calidad, distribución, tipo y frecuencia de registro de datos con que se cuenta.

5.2.1. Extracciones en el acuífero Pastor Ortíz

Los valores de los volúmenes de extracción concesionados en el acuífero, se obtienen de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) perteneciente a la Comisión Nacional del Agua.

5.2.2. Recargas en el acuífero Pastor Ortíz

En este apartado se toman los datos de recarga obtenidos en una investigación paralela y complementaria, que se ha realizado en conjunto con este trabajo. Dicha investigación se enfoca en determinar el comportamiento hidrológico superficial dentro de la misma zona en estudio, obteniéndose a partir de este estudio, los



valores de recarga media mensual y anual que son utilizados como datos de entrada para el modelo de acuífero simulado.

5.2.3. Niveles Piezométricos

Contar con registros de los niveles piezométricos en la zona de estudio es indispensable para la modelación subterránea que se realiza en el acuífero, ya que sin ellos no es posible realizar la calibración del modelo propuesto.

Para este trabajo, los valores de los niveles piezométricos se obtuvieron del estudio “Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia – Queréndaro y Pastor Ortiz en el estado de Michoacán” realizado por la Comisión Nacional del Agua en 2007. Sin embargo, en este estudio sólo se presenta un registro de niveles en la zona, lo que resulta insuficiente para lograr una buena calibración, por lo que en 2014 se realizó (de manera independiente), una campaña de medición de los niveles piezométricos en pozos de la red de monitoreo (establecida por CONAGUA en 2007), para la zona del acuífero en estudio.

5.3. Modelación Hidrológica Subterránea

La modelación hidrológica tiene como objeto principal el identificar y cuantificar los procesos que representen de manera adecuada el comportamiento real de un sistema. Es por eso que, en esta investigación, se quiere conocer el comportamiento (actual y/o futuro) de los niveles piezométricos en el acuífero estudiado; para ello se ha realizado una modelación hidrológica subterránea utilizando como herramienta el software AQUIVAL, el cual requiere la calibración de parámetros hidrogeológicos utilizando el método de Autovalores.

5.3.1. Configuración conceptual del modelo

La modelación del acuífero en AQUIVAL sigue la siguiente metodología:



1.- Definición de la geometría del acuífero

Esta etapa es la primera que se realiza para poder llevar a cabo la modelación subterránea de un acuífero, discretizando al acuífero en celdas que abarque toda el área de estudio. La malla (discretización) se elabora con el software SIG ArcGis y es útil para lograr un mejor panorama y entendimiento del comportamiento de los niveles estáticos en la zona.

Una vez establecido dicho mallado en todo el acuífero, se identifica el número de filas y columnas que lo componen y se traslada a una hoja de cálculo (Excel) para empezar la construcción del modelo. Posteriormente se ingresan en la misma hoja de cálculo las dimensiones de cada una de las celdas que conforman la malla, es decir, el ancho tanto de las filas como de las columnas.

2.- Parámetros Hidrogeológicos

Una vez que ya se tiene el mallado en la hoja de cálculo, se ingresan los valores de los parámetros hidrogeológicos para cada una de estas celdas. Dichos parámetros (transmisividad y coeficiente de almacenamiento) dependen del tipo de geología que se presenta en la zona y la capacidad de movimiento del agua de los estratos que componen esa geología. Para trasladar estas propiedades al modelo de acuífero, se les asigna un valor de cada parámetro en la malla del acuífero, basándose en valores de literatura, encontrados en tablas previamente establecidos por estudios de distintos autores.

3.- Condiciones de contorno

Las características de las condiciones de contorno del acuífero (tipos de celdas y/o condición que se tiene en cada celda del modelo) también se ingresan en la misma hoja de cálculo, es decir, se deben poner los tipos de celda que se tienen dentro del modelo, especificando si las celdas son activas o inactivas en el modelo, de tipo normal, de tipo manantial o de descarga por un nivel constante.



4.- Acciones elementales

Las acciones elementales son de gran importancia para el modelo, ya que se considera que son los datos de entrada del modelo, es decir, las series de datos que se tienen registrados (tanto de recarga como de extracciones en el acuífero), los cuales definen las acciones que modifican el flujo del agua en un acuífero.

Ya que se tienen los valores de las acciones elementales para un periodo de años consecutivos, se procede a determinar los pesos o intensidades con que cada una de estas acciones se presenta en cada una de las celdas que conforman el modelo de acuífero.

5.- Parámetros de Control

Una vez que se cuenta con los datos antes mencionados, se procede a ingresar los parámetros de control, los cuales hacen referencia a los niveles estáticos en una o varias celdas, el volumen almacenado, entre otros. Estos valores que son arrojados por el programa sirven para comprobar la eficiencia del modelo y poder comparar su comportamiento con los valores que ya se tienen registrados.

6.- Simulación

Para realizar la simulación del modelo de acuífero en Aquival se requiere contar con todas las series de datos de las acciones elementales, es decir, los volúmenes para el periodo que se quiere calibrar. Se ingresan dichos valores a la hoja de cálculo en unidades de $\text{m}^3/\text{día}$, considerando el uso de una columna para cada acción elemental.

7.- Calibración

La etapa final de la modelación del acuífero es el proceso de calibración, que consiste en demostrar que el modelo es capaz de simular los registros observados en la realidad (niveles piezométricos, volúmenes de descarga, variación del volumen del acuífero, etc.). Actualmente esta calibración debe realizarse mediante el ensayo de prueba y error, ya que no se cuenta con un calibrador automático para utilizar en el propio modelo. En esta apartado se deben estar modificando los valores de la



transmisividad y el coeficiente de almacenamiento en cada celda para así lograr la calibración del modelo.

Una vez que se hace lo anterior, se considera que se ha llegado a una buena calibración cuando los valores de los niveles estáticos obtenidos con el programa son similares a los datos históricos correspondientes a esos mismos años.

Existen distintas formas de calibrar un modelo de acuífero, dadas las condiciones de escasez de datos que se presentan en la zona de estudio. Una de ellas es la comparación directa de valores observados y simulados de los niveles estáticos en distintas zonas del acuífero; otra forma es considerar que el acuífero es capaz de reproducir la tendencia de descenso o ascenso de los niveles estáticos medios las zonas de observación; una tercera forma es considerar que en media, los valores volumétricos de extracción y recarga están en balance, sin considerar con gran rigor los resultados de niveles piezométricos.

5.4. Análisis de resultados

En este apartado se revisan los distintos resultados que pueden obtenerse del modelo hidrológico subterráneo en Aquival, entre ellos, los niveles estáticos, los volúmenes de descarga por manantial o el cambio de almacenamiento en el acuífero. El análisis de resultados considera una comparación con los valores históricos que se han obtenido de distintas fuentes (CONAGUA, REPDA, campañas de muestreo, etc), y con ello es posible determinar si el funcionamiento del acuífero es representativo de la realidad.



6. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados de la aplicación de la metodología planteada en el capítulo anterior.

6.1. Caracterización de la zona de estudio

Para realizar la caracterización de la zona en estudio se buscó información del acuífero Pastor Ortiz y más a detalle del municipio de Puruándiro, que es en donde se concentró la investigación. Todos los resultados relacionados con este apartado ya fueron descritos con anterioridad en el capítulo 4 de este documento.

6.2. Análisis y recopilación de datos

Durante esta etapa se recopiló información que pudiera servir para saber cuál es el comportamiento histórico y actual del acuífero. Se buscó información de las extracciones, recargas y niveles estáticos para la zona de estudio.

6.2.1. Extracciones

Para conocer el historial de extracciones por bombeo se ingresó a la base de datos REPDA (Registro Público de Derechos de Agua), perteneciente a CONAGUA, que son los encargados de otorgar las concesiones de las aguas nacionales. Se encontró registro de 417 pozos de extracción, dentro de los límites del acuífero Pastor Ortiz, de los cuales se reporta un volumen total de extracción de las aguas subterráneas de $76.83 \text{ hm}^3/\text{año}$, repartido para diferentes usos como se observa en la Tabla 6.1. En la Figura 6.1 se puede apreciar dicha distribución pero en porcentaje.

Tabla 6.1. Usos de los volúmenes de extracción del acuífero Pastor Ortíz.

USO	POZOS	VOLUMEN DE EXTRACCIÓN (hm ³ /año)
Agrícola	246	45.32
Pecuario	34	6.26
Público Urbano	121	22.29
Industrial	16	2.95
<u>TOTAL</u>	<u>417</u>	<u>76.83</u>

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.1. Usos de los volúmenes de extracción del acuífero Pastor Ortíz, representado en porcentaje.

Fuente: Elaboración propia.



6.2.2. Recargas

Para obtener este volumen de infiltración en el acuífero se ha realizado un trabajo alterno y en conjunto con éste, en el cual se utilizó una herramienta de simulación hidrológica superficial, llamada EvalHid, desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia. Con esta herramienta se simuló el recurso superficial que se produce de acuerdo a las condiciones hidrológicas la zona, junto con los valores de infiltración o recarga que se tienen en cada una de las cuencas simuladas, localizadas sobre todo el acuífero analizado.

Otra importante fuente de agua que se infiltra en el acuífero es la que se genera con la actividad agrícola (riegos). En este caso se consideró la aportación del distrito de riego 087 Rosario-Mezquite que se describe posteriormente. Este distrito se divide en diversos módulos, de los cuales sólo se consideraron las aportaciones del módulo de Pastor Ortiz y el módulo Angamacutiro, ya que tienen una mayor influencia y son los más cercanos a nuestra zona en estudio.

DISTRITO DE RIEGO 087- Rosario-Mezquite, Michoacán

- **Ubicación**

El distrito de riego 087 se encuentra ubicado en la parte central del país, ocupando parte de los estados de Michoacán (al Noroeste), Guanajuato (al Suroeste) y Jalisco (Este-Centro), dentro de la cuenca Lerma – Chapala – Santiago. Su zona está comprendida dentro de los municipios de Ayotlan, la Barca y Atotonilco, en Jalisco; Yurécuaro, Tanhuato, Vista Hermosa, Angamacutiro, Pastor Ortiz, Puruandiro, Numaran, La Piedad, Penjamillo, Sixto Verduzco, Huaniqueo, Coneo, Villa Jiménez y Zacapu en Michoacán; Penjamo y Abasolo en Guanajuato.

Su localización geográfica está en el meridiano 20° 18' de longitud noreste y 102° 25' de latitud oeste; a una altitud entre 1680 m.s.n.m. en el valle de la Piedad y 1520



m.s.n.m. en la zona de Poncitlan, en el río Santiago, considerándose de 1,587 m en promedio (SARH, 1982).

- **Clima**

El clima en la zona del distrito se interpreta como semiseco, con primavera seca, semi cálido, sin estación invernal definida. La temperatura media anual es de 21.4° C; en la unidad Zacapu se registra una temperatura media de 17.6° C. Se tiene el registro de temperaturas mínimas de hasta 0° C.

La precipitación media anual oscila en los 784 mm, de la cual el 80% se concentra en los meses de junio a septiembre. La evaporación media anual es de 2,135.5 mm (SARH, 1982).

- **Geología y Edafología**

Presenta formaciones rocosas basálticas y andesíticas (cenizas, tobas) del periodo terciario y cuaternario – cenozoico, y otras de origen lacustre.

La topografía es plana con ligera pendiente hacia el río Lerma. Es a nivel parcelario donde se presenta en forma irregular, siendo necesaria la nivelación. Por lo mismo, el drenaje es deficiente.

Desde el punto de vista agrícola, el suelo del distrito de riego 087 es generalmente de tipo vertisol, delimitándose las siguientes series: Corrales, Cuenqueño, Yurécuaro, Ocotes, Villachuato, Lerma y La Piedad, siendo los dos primeros los principales. Presenta diversas texturas; suelos franco-arcillosos en las unidades Angamacutiro y La Barca; suelos arcillo-limosos en las unidades La Piedad y Pastor Ortiz; Estimación del riesgo de contaminar mantos freáticos por infiltración de herbicida Atrazina en distritos de riego en México 525.

Descripción de distritos de riego suelos arcillosos en la unidad de Yurécuaro; suelos arcillo-arenosos en la unidad Vista Hermosa y suelos orgánicos en la unidad Zacapu.



- **Hidrología**

El distrito de riego 087 cuenta con una fuente principal de abastecimiento, el río Angulo, cuyos escurrimientos son controlados mediante la presa “Melchor Ocampo”. También se aprovechan las aguas del subsuelo mediante pozos. El distrito de riego 087 cuenta con 422 pozos para uso agrícola (Angamacutiro, 16; La Barca, 86; La Piedad, 94; Pastor Ortiz, 91; Yurécuaro, 85; Vista Hermosa, 50 y la unidad Zacapu, 0) y 91 pozos para consumo humano (Angamacutiro, 6; La Barca, 8; La Piedad, 40; Pastor Ortiz, 18; Yurécuaro, 14; Vista Hermosa, 6 y la unidad Zacapu, 0). La mayoría de estos pozos aprovechan los escurrimientos del río Lerma. El río Angulo es el afluente izquierdo de mayor importancia del río Lerma. Su origen se encuentra situado a 18.5 Km. de Zacapu, Michoacán, en altitudes que llegan a los 3200 m.s.n.m. (cerro Nahuatzen). En cuanto a niveles de manto freático, las unidades Angamacutiro tiene un promedio de 12.0 m; Barca, 18.0 m; La Piedad, 80.0 m; Pastor Ortiz, 33.0 m; Yurécuaro, 20.0 m; Vista Hermosa, 17.0 m y la unidad Zacapu presenta un manto freático promedio de 0.0 m.

- **Agricultura**

El padrón de cultivos está diversificado en 8 productos que se comercializan en el mercado nacional, que son materia prima de agroindustrias locales. Son típicos de esta región la cebada, el frijol, el garbanzo, la lenteja, el trigo, el sorgo, la fresa, entre otros cultivos. El distrito de riego cuenta con una superficie de 63,100 hectáreas y 13,402 usuarios; la tenencia de la tierra está compuesta por productores del sector social en un 80 a 90 % y por pequeños propietarios en un 10 a 20 %. El total de módulos de riego son los siguientes: Módulo de Riego I - Angamacutiro, Módulo de Riego II – La Piedad, Módulo de Riego III – J.A. Yurécuaro, Módulo de Riego IV – Vista Hermosa, Módulo de Riego V – La Barca, Módulo de Riego VI – Pastor Ortiz, y Módulo de Riego VII – Zacapu (Figura 6.2).

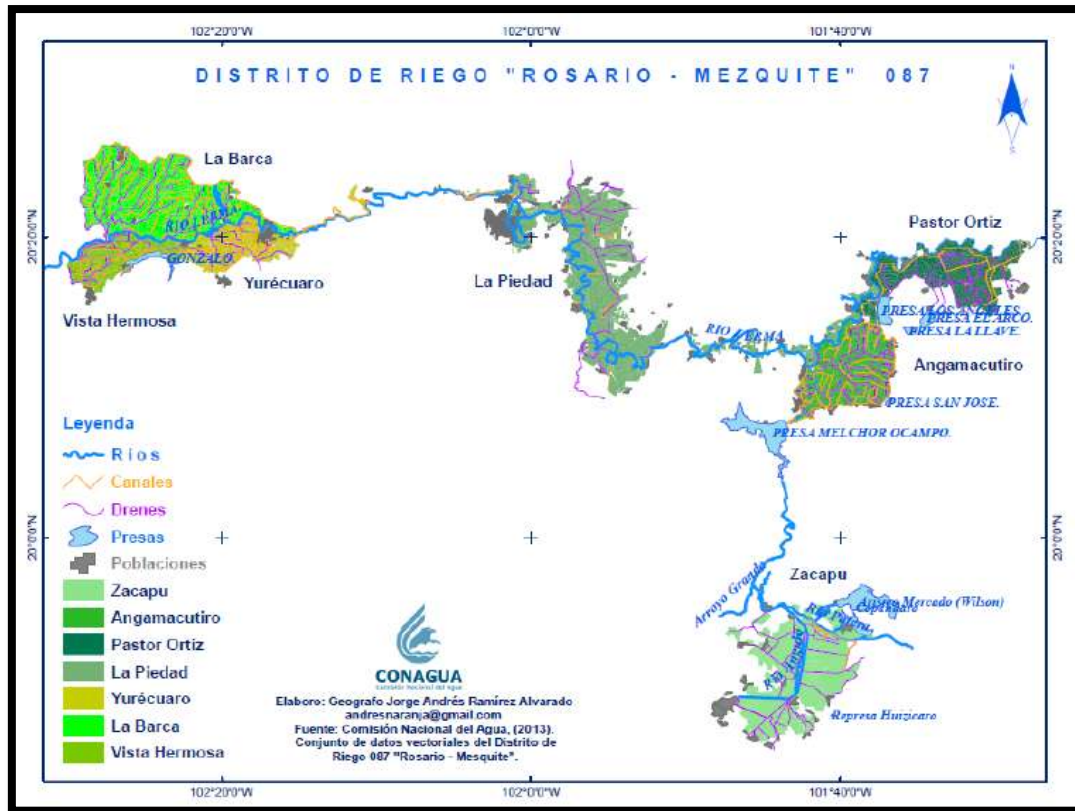


Figura 6.2. Área de influencia del distrito de riego 087.

Fuente: Comisión Nacional del Agua, 2013.

6.2.3. Niveles Piezométricos

Los niveles piezométricos son útiles para conocer el estado actual, así como los procesos de evolución y dinámica del acuífero. Es una representación gráfica y esquemática de los niveles de agua subterránea con respecto al nivel de referencia, usualmente el nivel medio del mar, de tal forma que se pueden detectar fácilmente las áreas donde el acuífero se encuentra sobreexplotado o, por el contrario, delimitar zonas de recarga.

Según estudios realizados por CONAGUA (fecha), el acuífero Pastor Ortíz tiene un censo de 417 aprovechamientos y una red de monitoreo que se forma de 50 pozos (Figura 6.3).

Una vez que se tiene los datos de la red de monitoreo se procede a ubicarlos espacialmente utilizando sus coordenadas correspondientes. Es importante resaltar que para poder realizar la calibración del modelo subterráneo en AQUIVAL se necesitan datos para al menos un periodo histórico de los niveles piezométricos suficientemente largos.

En el caso de estudio, sólo se cuenta con datos históricos del año 2007 (realizados por CONAGUA) y datos del 2014 (realizados por alumnos de la Universidad Michoacana con apoyo de CONAGUA); es importante resaltar que no se cuenta con datos en toda la red de monitoreo, sino de sólo de unos cuantos pozos (Figura 6.3).

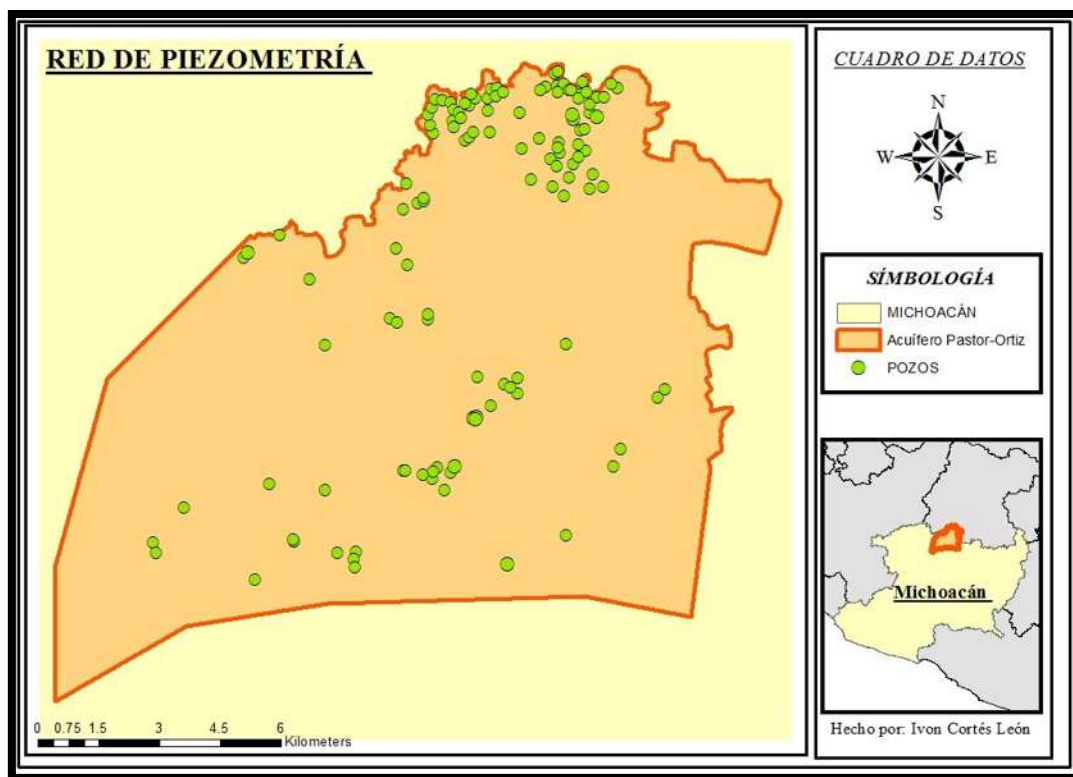


Figura 6.3. Red de monitoreo de niveles piezométricos en el acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: Elaboración Propia.

6.3. Modelación Hidrológica Subterránea

Para realizar la modelación del acuífero estudiado, con la herramienta de simulación Aquival, se debe seguir la siguiente estructura:

6.3.1. Definición de la geometría

El primer paso consiste en definir la geometría del modelo, utilizando el programa SIG ArcGis 10.1. El modelo consta de un área a simular de 1780.74 km², dentro de una malla con celdas de 4000x4000m y una discretización con celdas de 1000x1000m en la parte central de la cabecera municipal. El mallado está compuesto por un total de 248 celdas de las cuales 16 son filas y 21 son columnas cubriendo así todo el acuífero (Figura 6.4).

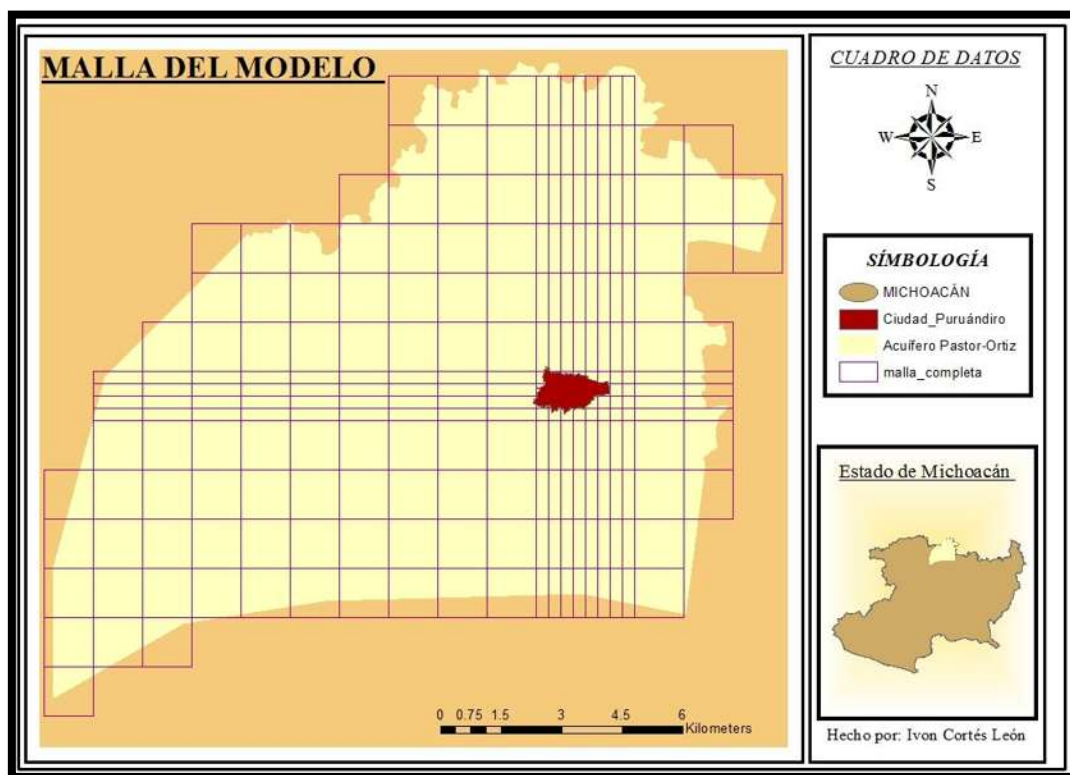


Figura 6.4. Malla que cubre el acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: Elaboración Propia.

Una vez realizado lo anterior, se procede a pasar este mallado a una hoja de procesamiento de cálculo en Excel, para empezar a trabajar con la calibración del modelo.

Se coloca la misma cantidad de celdas dándole la misma forma que la malla que se tiene en el mapa anterior y se le asigna la misma numeración, de forma que quede el mismo mallado representado en la hoja de cálculo (Figura 6.5).

CELDA DE ACUÍFERO																					
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1								1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11			
2								12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
3							25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
4				40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57
5				58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73		
6			74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	
7		92	93	94	95	96	97	98	99	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109	110	
8		111	112	113	114	115	116	117	118	119	120	121	122	123	124	125	126	127	128	129	
9		130	131	132	133	134	135	136	137	138	139	140	141	142	143	144	145	146	147	148	
10		149	150	151	152	153	154	155	156	157	158	159	160	161	162	163	164	165	166	167	
11		168	169	170	171	172	173	174	175	176	177	178	179	180	181	182	183	184	185	186	
12	187	188	189	190	191	192	193	194	195	196	197	198	199	200	201	202	203	204	205	206	
13	207	208	209	210	211	212	213	214	215	216	217	218	219	220	221	222	223	224	225		
14	226	227	228	229	230	231	232	233	234	235	236	237	238	239	240	241	242	243	244		
15	245	246	247																		
16	248																				

Figura 6.5. Malla en hoja de cálculo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración Propia.

Además de colocar el mallado, también se especifican cuáles celdas serán activas, no activas, de descarga de nivel constante o de tipo manantial. En este modelo, a las celdas activas se le colocó el número 1 y a las celdas no activas se les colocó el número 0 (Figura 6.6). La configuración de celdas tipo manantial se registra en un apartado independiente dentro de la hoja de cálculo Excel. Otro tipo de celda no es considerado en el presente modelo.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
<df_TipoCeldas>																					
1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
4	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
5	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
6	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
7	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
8	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
9	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
10	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
11	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
12	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
13	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
14	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0
15	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
16	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.6. Tipo de celda en el acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración Propia.

Posteriormente, dentro de la hoja de cálculo, existe un apartado para registrar las dimensiones de las celdas del acuífero que se modelará, las cuales deben registrarse en metros y kilómetros, colocando como dato el ancho de fila y el ancho de columna (Tabla 6.2)

Tabla 6.2. Dimensiones de las celdas en el acuífero Pastor Ortiz.

		<df_AnchoFilas>																			
m	km	4000	4000	4000	4000	4000	4000	1000	1000	1000	1000	4000	4000	4000	4000	4000					
		4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	4	4	4	4	4	4				
		<df_AnchoColumnas>																			
m	km	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	4000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	1000	4000	4000	4000
		4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1	1	1	1	4	4	4

Fuente: Elaboración Propia.

6.3.2. Parámetros Hidrogeológicos

Los parámetros hidrogeológicos son la transmisividad (T), la conductividad hidráulica (K), el coeficiente de almacenamiento (S) y el rendimiento específico (Sy). Para este trabajo se tomaron en cuenta los valores de transmisividad y del coeficiente de almacenamiento, asignándose a cada una de las celdas antes mencionadas, un valor para cada uno de estos parámetros, en función de la geología, permeabilidad de suelos y rocas, etc..

1.- Transmisividad (T)

La transmisividad es el producto de la permeabilidad o conductividad y el espesor saturado del subsuelo, representando la cantidad de agua que fluye en todo el acuífero. Sin embargo, al desconocer el espesor saturado que tiene el acuífero en la zona estudiada, se optó por proponer un espesor medio de 314m y multiplicarlo por el valor de la conductividad hidráulica.



- **Conductividad Hidráulica (K)**

Se obtuvieron los valores de conductividad a partir de la geología que se tiene en la zona de estudio, basándose en los valores orientativos que se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3. Valores orientativos de conductividad hidráulica horizontal (USGS, 2002).

Propiedades de las Rocas					
Material del Acuífero	Extremo Kmin, m/d	Probable Kmin, m/d	Probable Kmax, m/d	Extremo Kmax, m/d	Tipo de Roca
Grava	296	985	9850	9850	Roca Sedimentaria no consolidada
Mezcla de Arena y Grava	3.3	99	985	985	Roca Sedimentaria no consolidada
Arena Gruesa	164	230	985	985	Roca Sedimentaria no consolidada
Arena Media	3.3	66	230	657	Roca Sedimentaria no consolidada
Arena Fina	1.64E-01	10	66	66	Roca Sedimentaria no consolidada
Sistemas Acuíferos Costa del Golfo	6.57E+00	99	657	2627	Roca Sedimentaria no consolidada
Corriente terraza de deposito	3.28E-02	3.3	328	985	Roca Sedimentaria no consolidada
Acuífero Superficial	3.28E-02	3.28E-01	0	164	Roca Sedimentaria no consolidada
Limos	9.85E-04	3.28E-03	0.33	20	Roca Sedimentaria no consolidada
Pilas de sedimentos variados de origen glaciar	9.85E-07	9.85E-03	0.99	2	Roca Sedimentaria no consolidada
Suelos Arcillosos	3.28E-02	3.28E-02	3.3	3.3	Roca Sedimentaria no consolidada
Arcilla	3.28E-06	3.28E-05	3.28E-04	3.28E-03	Roca Sedimentaria no consolidada
Arcilla Marina protegida de la intemperie	6.57E-07	6.57E-07	1.97E-03	1.97E-03	Roca Carbonatada
Zona de Piedra Caliza	9.85E-01	33	3283	32833	Roca Carbonatada
Caliza de Arrecifes	9.85E-01	33	3283	19700	Roca Carbonatada
Piedra Caliza, Dolomita	9.85E-04	1.31E-02	3.28E-01	7	Roca Carbonatada
Arenisca de Grano Fino	3.28E-04	3.28E-03	3.3	19.7	Roca sedimentaria consolidada
Arenisca de Grano Medio	3.28E-03	3.3	33	263	Roca sedimentaria consolidada
Roca sedimentaria	3.28E-06	3.28E-05	1.64E-02	1.31E-01	Roca sedimentaria consolidada
Roca Arcillosa	9.85E-09	3.28E-06	3.28E-05	9.85E-05	Roca sedimentaria consolidada
Anhidrita	3.28E-07	3.28E-07	1.97E-02	1.97E-02	Roca sedimentaria consolidada
Esquistos	3.28E-08	3.28E-07	3.28E-04	3.3	Roca metamórfica o volcánica
Basalto Permeable	0.328	3.3	328	19700	Roca metamórfica o volcánica
Ígneas Fractura y Roca Metamórfica	0.003	0.164	33	328	Roca metamórfica o volcánica
Granito degradado	0.328	3.3	33	66	Roca metamórfica o volcánica
Gabro Resistido	0.328	0.328	3.28	3.28	Roca metamórfica o volcánica
Basalto	0	9.85E-02	3.28E-01	3.28E-01	Roca metamórfica o volcánica
Ígneas no fracturadas y roca metamórficas	0	2.96E-08	1.97E-04	1.97E-04	Roca metamórfica o volcánica
Ígneas no fracturadas y roca metamórficas	0	2.96E-08	1.97E-04	1.97E-04	

Fuente: USGS, 2002; Custodio y Llamas, 1983.

En la zona de estudio se tiene un total de 13 geologías diferentes (Tabla 6.4), por lo que para cada geología se asignó un valor diferente de acuerdo a los rangos observados en la tabla anterior, la mayor geología que se presenta en la zona corresponde a roca basáltica.

Tabla 6.4. Tipos de geología y rangos de conductividad hidráulica.

Tipo de Geología	Valores de Conductividad		
	MÍN	MED	MÁX
Aluvial	99	542	985
Andesita	0.164	17	33
Arenisca	3.3	18	33
Basalto	3.3	166	328
Basalto-Brecha volcánica básica	3.3	166	328
Basalto-Toba básica	3.3	166	328
Brecha volcánica básica	3.3	166	328
Conglomerado	985	5418	9850
Dacita	0.164	17	33
Lacustre	3.3	166	328
Residual	99	542	985
Riolita-Toba ácida	0.164	17	33

Fuente: Elaboración propia.

- **Espesores**

Para el caso de los espesores se tomaron en cuenta los cortes litológicos del reporte de CNA ya que no se cuenta con información espacial sobre el espesor de cada uno de los estratos presentes en la zona, a partir de esta información se asumen valores probables de espesor de acuerdo a la capa de depósitos lacustres que es donde podría almacenarse el agua debido a sus propiedades permeables.

En la mayor parte del acuífero se presenta una transmisividad en promedio de $7.90 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($6825 \text{ m}^2/\text{día}$), en la parte central varía entre 3.47 y $4.51 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ (2999 a $3900 \text{ m}^2/\text{día}$) y en la parte este se tienen valores de $1.73 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$ ($1999 \text{ m}^2/\text{día}$) (Figura 6.7).



<df,T>																				
0	0	0	0	0	0	0	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6823	6823	6823	0.00	0.00	0
0	0	0	0	0	0	0	6825	6825	6823	6825	6825	6825	6825	6823	6826	6823	6826	6826	6823	0
0	0	0	0	0	0	6825	6825	6823	6823	6823	6823	6823	6823	6823	6826	6826	6826	6823	6823	6824
0	0	0	6826	6826	6826	6825	6823	6823	6823	6826	6826	6826	6826	6826	6823	6823	6823	6823	6825	6823
0	0	0	6823	6826	6823	6823	6823	6823	6823	6826	1499	1499	1499	6823	6823	6823	6823	6823	0	0
0	0	6824	6824	6823	6824	6826	2999	2999	2999	6826	1499	1499	1499	6826	6826	6826	6823	6823	6824	0
0	6823	6823	6826	6823	6826	6826	2999	2999	2999	6825	1499	1499	1499	6823	6826	6826	6826	6826	6826	0
0	6826	6823	6826	6823	6823	6826	2999	2999	2999	6825	6825	6825	6825	6826	6826	6826	1999	1999	1999	0
0	6826	6824	6823	6823	6823	6823	3900	3900	3900	6825	6825	6850	6850	6825	6825	6825	1999	1999	1999	0
0	6826	6826	6823	6823	6826	6823	3900	3900	3900	6823	6825	6825	6825	6825	6825	6850	1999	1999	1999	0
0	6825	6823	6826	6824	6823	6823	3900	3900	3900	6825	6825	6850	6850	6825	6825	6825	6825	6823	6826	0
6826	6823	6826	6823	6823	6823	6823	6826	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6823	6824	6823
6826	6826	6826	6826	6824	6824	6824	6823	6823	6825	6826	6823	6823	6826	6823	6826	6826	6826	6823	0	0
6823	6826	6825	6823	6823	6823	6825	6825	6826	6823	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	0
6823	6826	6825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.7. Valores de transmisividad en el modelo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración propia.

2.- Coeficiente de Almacenamiento (S)

Este parámetro representa la cantidad de agua que puede ser obtenida por bombeo o drenaje; se ocupa para estudios cuantitativos de agua subterránea; corresponde a acuíferos semi-confinados o confinados. El agua se libera al alterarse las condiciones iniciales de presión efectiva y de poro. Los valores del coeficiente de almacenamiento en el acuífero varían entre 0.006 y 0.03 (Figura 6.8).

<df,S>																					
0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	
0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	
0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	
0	0	0	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.06	0.06	0.01	0	
0	0	0.013	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.013	0	
0	0.008	0.056	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	0	
0	0.008	0.056	0.01	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.018	0	
0	0.008	0.013	0.01	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.01	0.02	0.02	0.018	0	
0	0.008	0.008	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.018	0
0	0.006	0.008	0.01	0.01	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.008	0	
0.01	0.008	0.008	0.01	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	0	
0.01	0.008	0.008	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0	
0.06	0.008	0.006	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0	
0.06	0.008	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	

Figura 6.8. Valores de coeficiente de almacenamiento en el modelo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.3. Condiciones de contorno

Para este modelo se utilizaron condiciones de contorno de nivel externo tipo manantial, las cuales contemplan solamente la salida del caudal del acuífero al manantial pero no al revés.

Se consideran dos celdas de tipo manantial, las cuales tienen el número 125 y 158 dentro de la malla del modelo. A estas también se les dio un nivel de conexión con el manantial (nivel de descarga) de 1804 y 1800m respectivamente.

A estas dos celdas se les asignó un mismo valor de conductancia de $0.75 \text{ m}^2/\text{día}$.

Lo anteriormente descrito puede apreciarse en la figura 6.9.

datos para condiciones de contorno con nivel externo	
<ccManantial_NumC>	
2	
<ccManantial_Celdas>	
125	158
<ccManantial_Cond>	
0.75	0.75
<ccManantial_Nivel>	
1804	1800

Figura 6.9. Condiciones de contorno en el modelo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.4. Acciones Elementales

Las acciones elementales del modelo de acuífero se considera que son las entradas y salidas que tiene el sistema; para el caso que se está analizando, se usaron las siguientes acciones:

- ENTRADAS:
 - Recarga en el acuífero Pastor Ortíz
- SALIDAS:
 - Módulos del distrito de riego 087 (Rosario-Mezquite)
 - Angamacutiro
 - Pastor Ortíz
 - Bombeo en el acuífero Pastor Ortíz

Para el modelo AQUIVAL se especifican y etiquetan de manera individual todas las acciones elementales (Fig. 6.10).

Datos para acciones elementales:	
<NumAcciones>	4
<NombresAcciones>	REC_ACUÍFERO "DRPO" "DRANG" "BOMPO"

Figura 6.10. Acciones elementales en el modelo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: *Elaboración propia.*

En el acuífero Pastor Ortíz se encuentran los módulos de riego Angamacutiro y Pastor Ortiz. Las demandas para estos módulos fueron obtenidas mediante los programas mensuales que elaboran los diferentes órganos de gobierno implementados y suministrados por el Distrito de riego 087, Yurecuaro, y a través del software “Plan DR-2” de CNA se obtuvo la distribución mensual de las demandas.

Ya que se tienen los valores de las acciones elementales se hace una distribución de pesos por cada celda de manera uniforme para la recarga por lluvia (Figura 6.11) y recargas agrícolas de los dos módulos, el módulo de riego de Pastor Ortíz (Figura 6.12) y el módulo de riego de Angamacutiro (Figura 6.13).



	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323		
2								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
3								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
4								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
5								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
6								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
7								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
8								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
9								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
10								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
11								0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
12	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
13	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
14	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
15	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	
16	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	0.0040323	

Figura 6.11. Distribución de la recarga en el modelo del acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración propia.

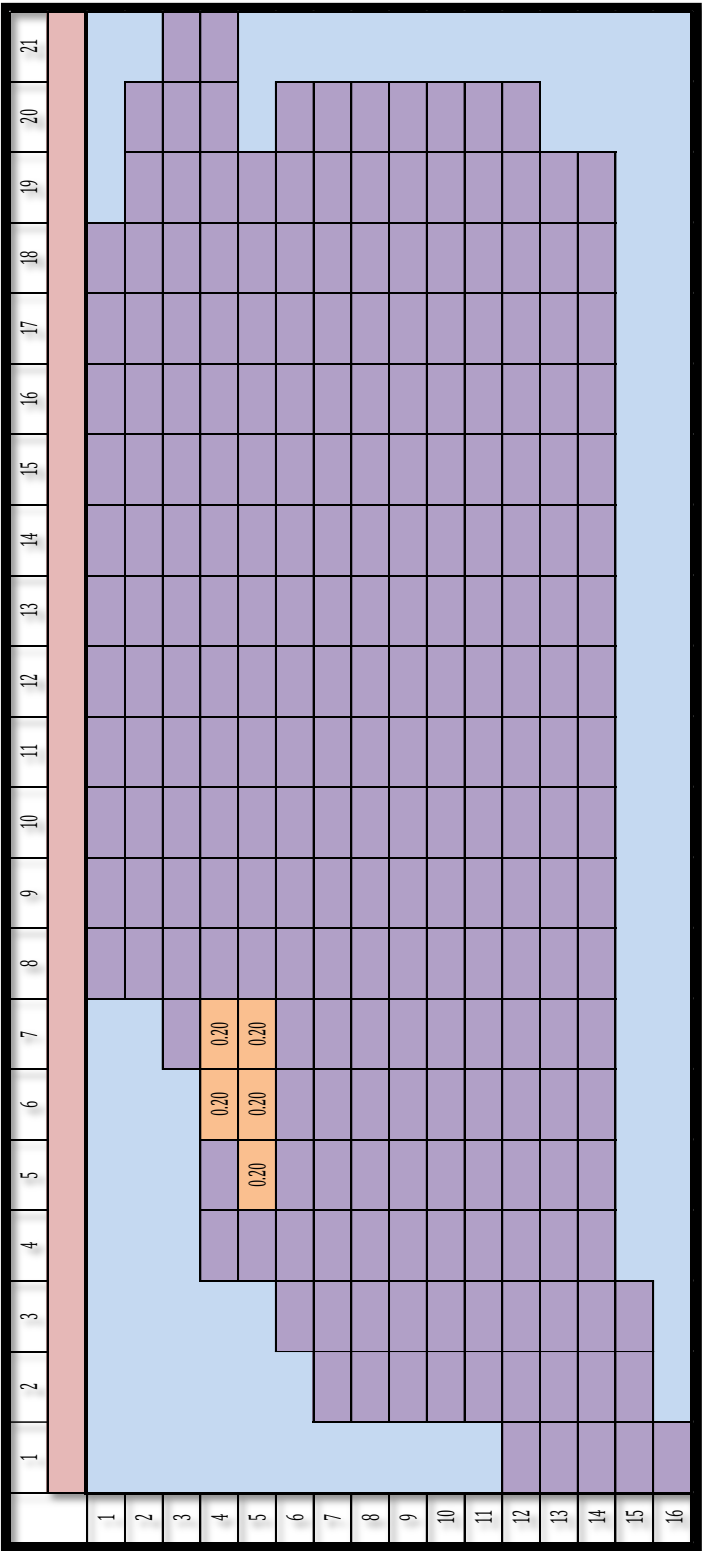


Figura 6.13. Distribución de los valores de recarga por riego del módulo Angamacutiro.

Fuente: Elaboración propia.

De acuerdo a la distribución espacial del volumen que se tiene de los pozos (Figura 6.14), es como se les asigna el peso, considerando todos aquellos que estén activos en cada celda.

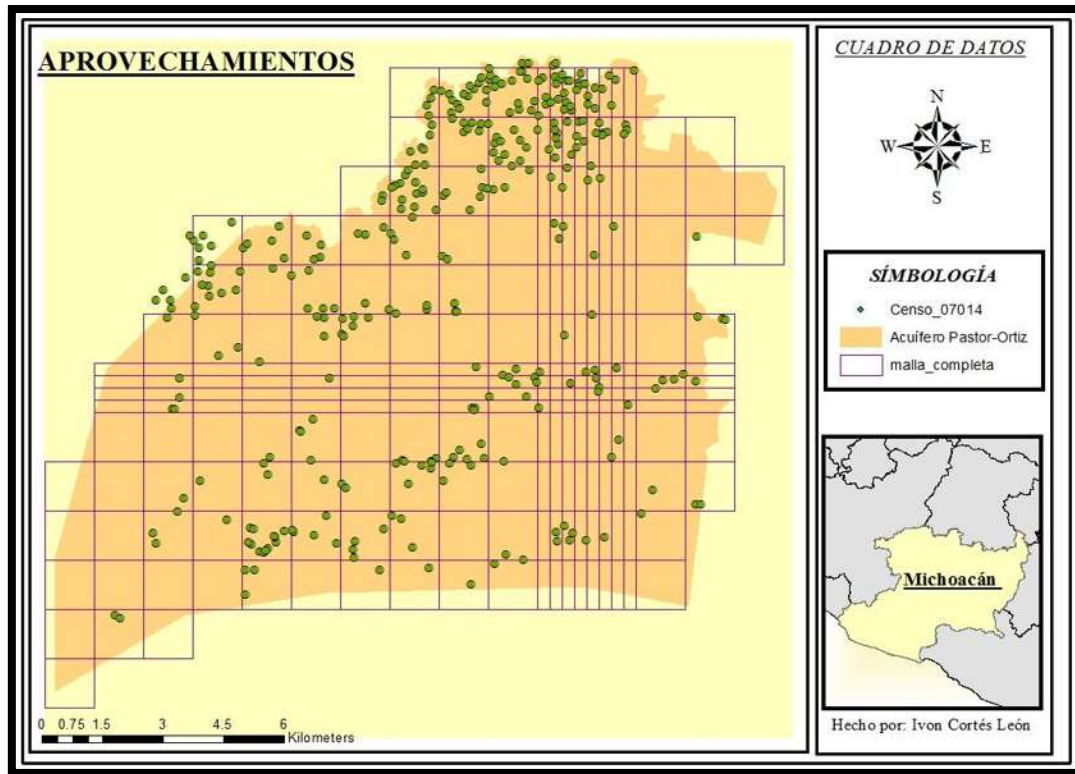


Figura 6.14. Aprovechamientos en el acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: *Elaboración propia.*

La información de los volúmenes de extracción de los pozos se obtuvo de la base de datos de REPDA. Una vez obtenidos estos valores se introducen al modelo AQUIVAL y se distribuyen en todo el acuífero como se puede apreciar en la Figura 6.15.

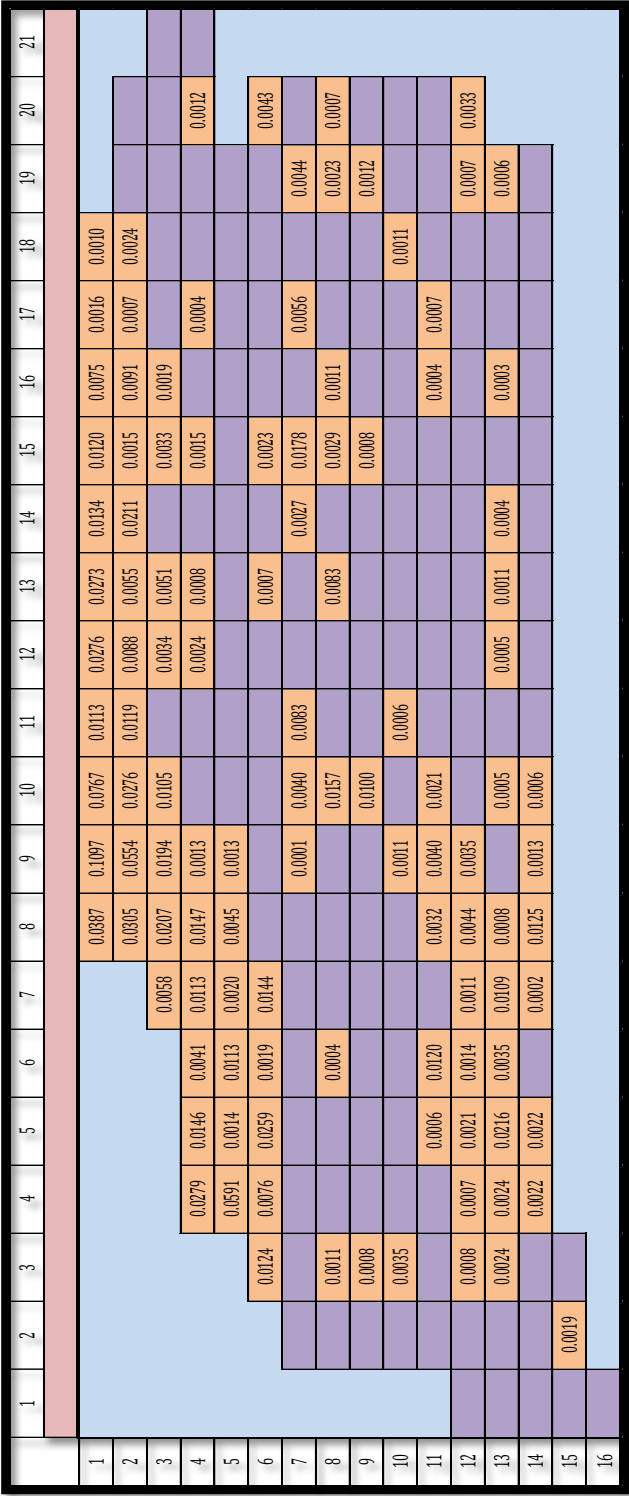


Figura 6.15. Distribución de los volúmenes de extracción en el acuífero Pastor Ortíz.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.5. Parámetros de Control

Los parámetros de control utilizados en el modelo de acuífero son cada uno de los resultados que se espera obtener de la simulación del acuífero, considerándolos también como aquellos resultados que permitirán comparar y calibrar los valores simulados y observados del modelo de acuífero analizado..

Para este modelo se consideraron los siguientes parámetros:

- Variación de los niveles estáticos
- Variación del volumen total del acuífero
- Descargas por manantiales

Como forma de contraste y calibración, se estableció un conjunto de niveles estáticos (medidos en campo en 2007 y en el 2014), (Figura 6.16), también se estableció el volumen total almacenado en el acuífero y el volumen de descarga por los manantiales.

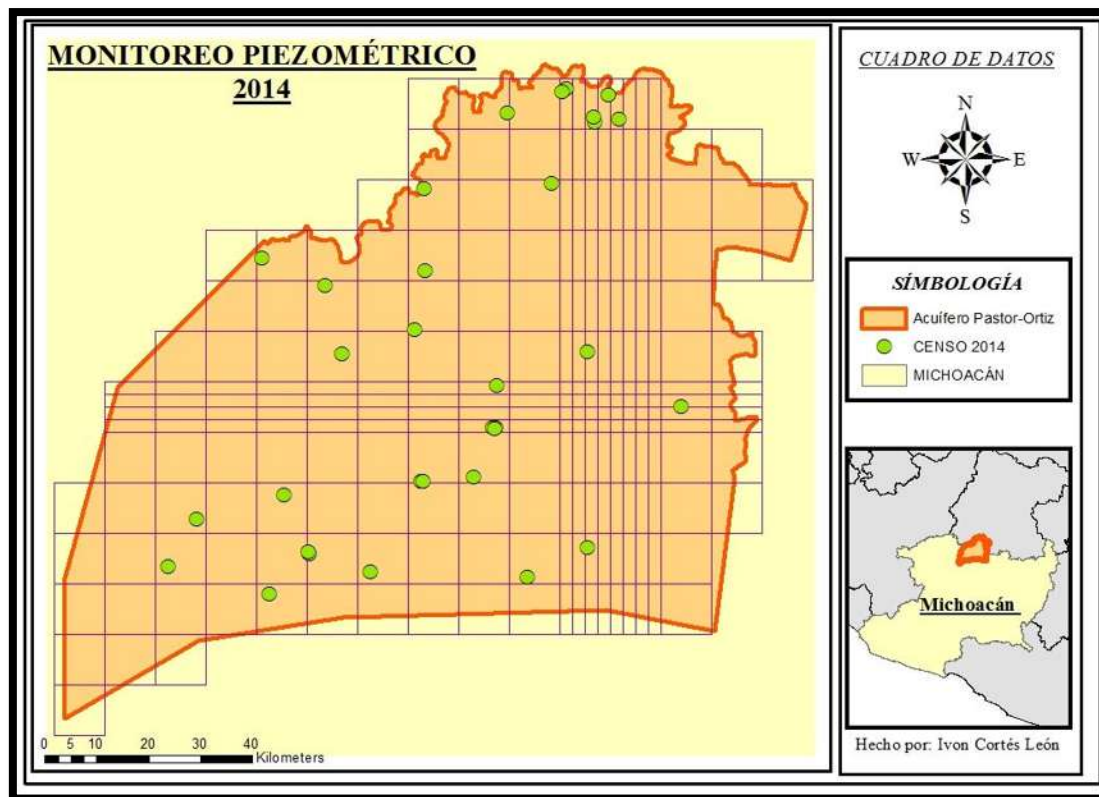


Figura 6.16. Monitoreo Piezométrico 2014 en el acuífero Pastor Ortiz.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se cuenta con los datos anteriores, se realiza una distribución aproximada de los niveles estáticos, con objeto de tener información para todas las celdas del modelo, para poder ingresar los valores que necesita el modelo de acuífero para su funcionamiento por Autovalores.

Para realizar la distribución de los niveles estáticos se construyó una tabla en la que se ingresó la información de los censos registrados por CONAGUA. A partir de que se tiene dicha tabla, se ubican espacialmente los puntos dentro del acuífero, utilizando la herramienta SIG ArcGis 10.1. Posteriormente, se genera un archivo dentro de la herramienta, el cual se convierte en formato “.shp”, para poder comenzar a determinar los probables niveles estáticos en toda la superficie del acuífero.

Se utilizó la herramienta llamada Kriging (Figura 6.17) que tiene la herramienta SIG, con objeto de poder hacer la interpolación sobre todo el mallado del acuífero.

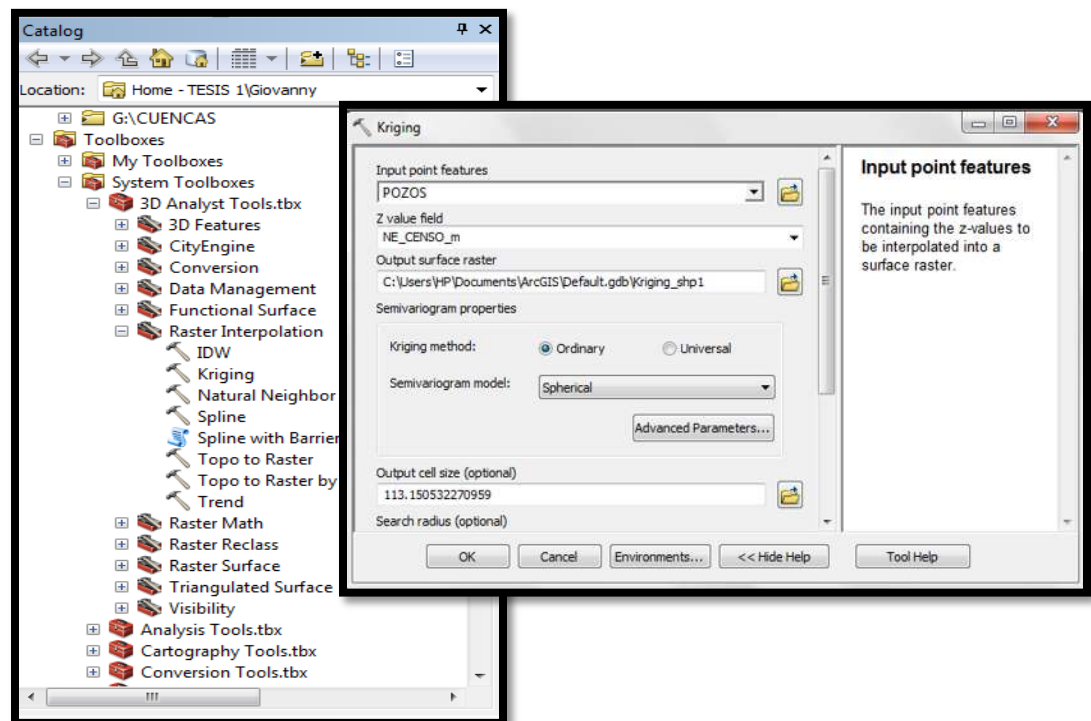


Figura 6.17. Interfaz de ArcGis 10.1 para realizar la distribución de los niveles estáticos..

Fuente: ArcGis 10.1.

Finalmente se obtuvo la distribución de los valores aproximados de los niveles estáticos en cada celda del acuífero (Figura 6.18).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
1								1682	1669	1657	1657	1660	1681	1690	1656	1659	1662	1808			
2								1653	1689	1730	1685	1665	1761	2011	2007	2005	1674	1660	1655	1658	
3							1688	1693	1645	1799	1919	1998	2005	2004	1681	1662	1653	1665	1674	1674	1765
4								1699	1699	1687	1677	1691	1748	1870	1875	1875	1989	1988	1876	1879	1702
5								1851	1869	1877	1983	1987	1954	1908	1875	1731	1731	1746	1983		
6								1925	2087	1944	1905	1844	1770	1741	1739	1930	1922	1917	1960	1921	
7								1832	1773	1819	1930	1790	2031	2156	2150	2238	2239	2091	2083	1892	
8								2018	2129	2265	2237	2097	2078	2061	2073	2116	1975	1980	1980	1980	
9								1996	1978	2025	1978	1984	1986	1984	1993	2003	2011	2027	2091	1990	
10								1998	1992	2005	2020	2046	1988	1987	1984	1981	1982	1984	1995	2040	
11								1984	1982	1990	1991	2015	2027	2030	2032	2082	2120	2129	2435	2346	
12								2120	2122	2593	2518	2396	2394	2218	2058	2130	2627	2579	2490	2409	
13								2049	1972	1968	1996	2005	2004	1986	1984	1986	1803	1971	1966		
14								1636	1637	2254	2241	2247	2278	2293	2264	2093	1971	1861	1828		
15																					
16																					

Figura 6.18. Distribución de los niveles estáticos.

Fuente: Elaboración propia.

6.3.6. Simulación

Para llevar a cabo la simulación del modelo de acuífero en AQUIVAL, se necesita contar con las series de las acciones elementales propuestas con anterioridad.

Se utilizó un periodo de simulación de 18 años (1998-2016), ingresando los datos mensuales de la recarga en el acuífero, de las demandas de los distritos de riego y su infiltración por retornos, así como de los bombeos (Figura 6.19).

		1	2	3	4
		REC_ACUÍFERO	DRPO	DRANG	BOMPO
		<SeriesRecarga>			
oct-98	1	232	154634.7774	0	3500
nov-98	2	233	0	0	4200
dic-98	3	234	0	58700	4500
ene-99	4	235	0	55000	45000
feb-99	5	236	0	61800	29500
mar-99	6	237	0	58700	34220
abr-99	7	238	0	37900	52755
may-99	8	239	0	71520	54600
jun-99	9	240	123408.53	20900	46200
jul-99	10	241	367841.6385	0	18300
ago-99	11	242	730454.3277	0	700
sep-99	12	243	3101.292458	0	0
oct-99	13	244	0	0	3500
nov-99	14	245	0	0	4200
dic-99	15	246	0	58700	4500
ene-00	16	247	0	55000	45000
feb-00	17	248	0	61800	29500
mar-00	18	249	0	58700	34220
abr-00	19	250	0	37900	52755
may-00	20	251	5080.4287	71520	54600
jun-00	21	252	331038.4107	20900	46200
jul-00	22	253	669784.6485	0	18300

Figura 6.19.Series de recargas de las acciones elementales.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se cuenta con todos los datos mencionados anteriormente, se procede a comenzar la simulación y calibración del modelo de acuífero. Como resultados, el programa arroja una serie de archivos. Primeramente, se debe ingresar al archivo llamado "AV4ECO" para revisar que el programa haya realizado correctamente la simulación sin presentar ningún error (Figura 6.20).

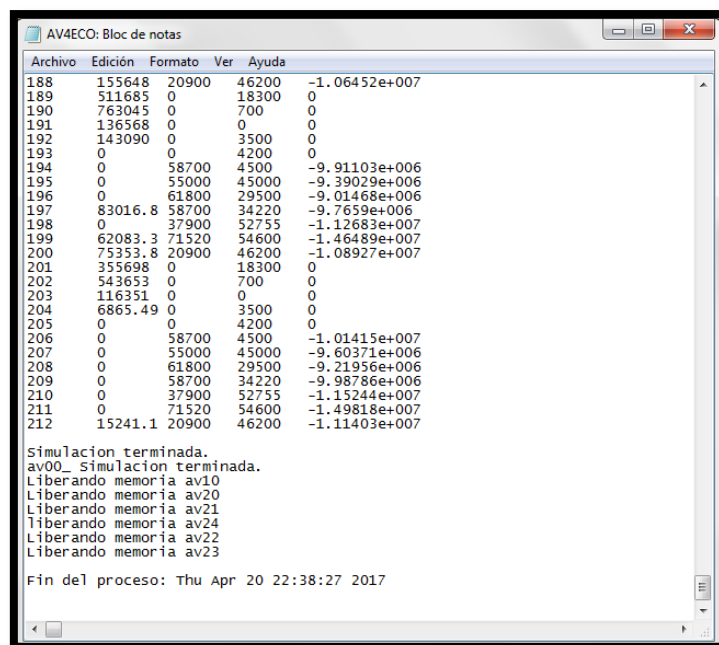


Figura 6.20. Archivo "AV4ECO".

Fuente: Bloc de notas.

Posteriormente se ingresa al archivo que lleva por nombre "AV2RES", para poder ver las series de resultados de los parámetros de control (niveles, variación volumétrica del acuífero y caudal de descarga), que se obtuvieron con la simulación (Figura 6.21).

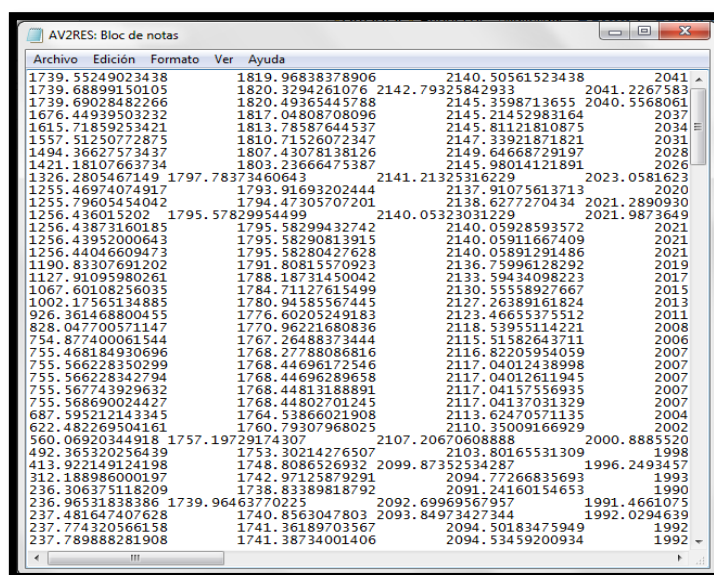


Figura 6.21. Archivo "AV2RES", series de resultados de la simulación.

Fuente: Bloc de notas.



Los resultados de los parámetros de control se copian y se pegan en la hoja de cálculo que se está utilizando de apoyo para la construcción del modelo de acuífero (Tabla 6.5). Las primeras tres columnas de resultado representan un paso de tiempo (año, mes, fecha) y en las filas posteriores muestran los niveles piezométricos en las celdas que se eligieron para calibrar y/o monitorear (NE8, NE7, NE6, etc.). Otros resultados que se muestran en este archivo son la variación del volumen total del acuífero y los valores correspondientes a las descargas por manantiales.

Tabla 6.5. Series de resultados de los parámetros de control en Excel.

AÑO	MES	FECHA	NE8	NE7	NE6	NE5	NE4	NE3	NE2	NE1	VOLUMEN	MANANTIAL
1998	10	oct-98	1739.713	1820.346	2142.7	2041.281	1822.531	2018.351	2257.999	1742.646	7.7906E+10	333.347688
1998	11	nov-98	1739.715	1820.501	2145.117	2040.651	1822.114	2018.027	2257.993	1742.647	7.7906E+10	351.171642
1998	12	dic-98	1674.673	1815.242	2142.975	2036.09	1818.18	2009.463	2253.101	1741.086	7.7477E+10	358.405646
1999	1	ene-99	1612.223	1810.245	2141.602	2031.55	1814.321	2001.159	2248.412	1739.598	7.7068E+10	370.329871
1999	2	feb-99	1552.366	1805.502	2141.153	2026.961	1810.455	1993.069	2243.907	1738.168	7.6675E+10	388.203254
1999	3	mar-99	1487.429	1800.401	2141.249	2021.836	1806.165	1984.224	2239.024	1736.617	7.6249E+10	411.871729
1999	4	abr-99	1412.174	1794.534	2141.734	2015.822	1801.154	1973.964	2233.383	1734.824	7.5756E+10	441.962993
1999	5	may-99	1314.585	1786.879	2141.897	2008.125	1794.714	1960.691	2226.054	1732.494	7.5115E+10	477.625528
1999	6	jun-99	1241.786	1781.634	2146.15	2001.52	1789.38	1950.448	2220.671	1730.793	7.4642E+10	533.268627
1999	7	jul-99	1242.173	1783.041	2159.29	1998.702	1787.639	1949.252	2220.89	1730.908	7.4656E+10	626.038837
1999	8	ago-99	1242.922	1785.28	2176.86	1995.318	1785.634	1948.012	2221.341	1731.129	7.4681E+10	747.431403

Fuente: Elaboración propia.

Como el modelo AQUIVAL no cuenta con un calibrador, esto se debe trabajar a prueba y error, es decir, que se tienen que estar modificando los parámetros hidrogeológicos para lograr aproximarnos a buenos resultados.

Para obtener una mejor simulación del modelo se optó por modificar los parámetros de transmisividad (Figura 6.22) y el coeficiente de almacenamiento (Figura 6.23), para ello se determinaron los valores de estos parámetros para cada una de las celdas que conforman el mallado del acuífero.



<df_T>																				
0	0	0	0	0	0	0	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6823	6823	6823	0.00	0.00	0
0	0	0	0	0	0	0	6825	6825	6823	6825	6825	6825	6825	6823	6826	6823	6826	6826	6823	0
0	0	0	0	0	0	6825	6825	6823	6823	6823	6823	6823	6823	6823	6826	6826	6826	6823	6823	6824
0	0	0	6826	6826	6826	6825	6823	6823	6823	6826	6826	6826	6826	6826	6823	6823	6823	6823	6825	6823
0	0	0	6823	6826	6823	6823	6823	6823	6823	6826	1499	1499	1499	6823	6823	6823	6823	0	0	0
0	0	6824	6824	6823	6824	6826	2999	2999	2999	6826	1499	1499	1499	6826	6826	6826	6823	6823	6824	0
0	6823	6823	6826	6823	6826	6826	2999	2999	2999	6825	1499	1499	1499	6823	6826	6826	6826	6826	6826	0
0	6826	6823	6826	6823	6823	6826	2999	2999	2999	6825	6825	6825	6825	6826	6826	6826	1999	1999	1999	0
0	6826	6824	6823	6823	6823	6823	3900	3900	3900	6825	6825	6850	6850	6825	6825	6825	1999	1999	1999	0
0	6826	6826	6823	6823	6826	6823	3900	3900	3900	6823	6825	6825	6825	6825	6825	6850	1999	1999	1999	0
0	6825	6823	6826	6824	6823	6823	3900	3900	3900	6825	6825	6850	6850	6825	6825	6825	6825	6823	6826	0
6826	6823	6826	6823	6823	6823	6823	6826	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6825	6823	6824	6823
6826	6826	6826	6826	6824	6824	6824	6823	6823	6825	6826	6823	6823	6826	6823	6826	6826	6826	6823	0	0
6823	6826	6825	6823	6823	6823	6825	6825	6826	6823	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	6824	0	0
6823	6826	6825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6825	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.22. Valores finales de transmisividad en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

<df_s>																					
0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.03	0.06	0.06	0.06	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	
0	0	0	0	0	0	0	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.008
0	0	0	0.01	0.01	0.01	0.03	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.006	0.008
0	0	0	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.06	0.06	0.01	0	0
0	0	0.013	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.013	0	0
0	0.008	0.056	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.04	0.04	0.04	0.05	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	0	0
0	0.008	0.056	0.01	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.018	0	0
0	0.008	0.013	0.01	0.06	0.06	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.03	0.01	0.01	0.01	0.03	0.01	0.02	0.02	0.018	0	0
0	0.008	0.008	0.01	0.06	0.01	0.01	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.01	0.02	0.02	0.018	0
0	0.006	0.008	0.01	0.01	0.06	0.06	0.02	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.01	0.01	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.008	0
0.01	0.008	0.008	0.01	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03	0.03	0.03	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.008	0
0.01	0.008	0.008	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.06	0.06	0.01	0.06	0.01	0.01	0.01	0.06	0	0	0
0.06	0.008	0.006	0.06	0.06	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0	0
0.06	0.008	0.006	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0.01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 6.23. Valores finales de coeficiente de almacenamiento en el modelo.

Fuente: Elaboración propia.

Ya que se empezaron a hacer las simulaciones utilizando los valores de estos parámetros se pudo apreciar que el coeficiente de almacenamiento figuraba como el parámetro de mayor sensibilidad por lo cual se tuvo que realizar un ajuste en los valores que estaban cercanos a las celdas de calibración.

Se estuvieron realizando una gran cantidad de simulaciones, hasta que los valores simulados fueron lo más parecidos posibles a los observados en campo.

6.3.7. Calibración

Para el proceso de calibración se requirió una gran inversión de tiempo para lograr que los procesos de prueba y error llevaran a determinar cuáles parámetros son los que tienen una mayor influencia sobre los resultados del modelo. Este proceso de calibración y análisis de sensibilidad del modelo ayuda a poder tener un entendimiento y una visión más clara del funcionamiento del acuífero, con objeto de poder hacer una comparativa entre los resultados que arroja el modelo respecto de los que se tienen medidos en campo.

De las ocho celdas de niveles estáticos usadas originalmente para el proceso de calibración, en este caso sólo se tomarán como buenas cinco de ellas, que son las que se encuentran más cerca del área de estudio, cerca de la ciudad de Puruándiro.

Se observaron los resultados de los parámetros de control NE3, NE4, NE5, NE6 y NE7 (Figura 6.24, Figura 6.25, Figura 6.26, Figura 6.27 y Figura 6.28) de manera individual, lo que fue necesaria debido a que la diferencia de elevaciones entre cada uno de los niveles estáticos hace difícil apreciar el cambio en el tiempo de la piezometría.

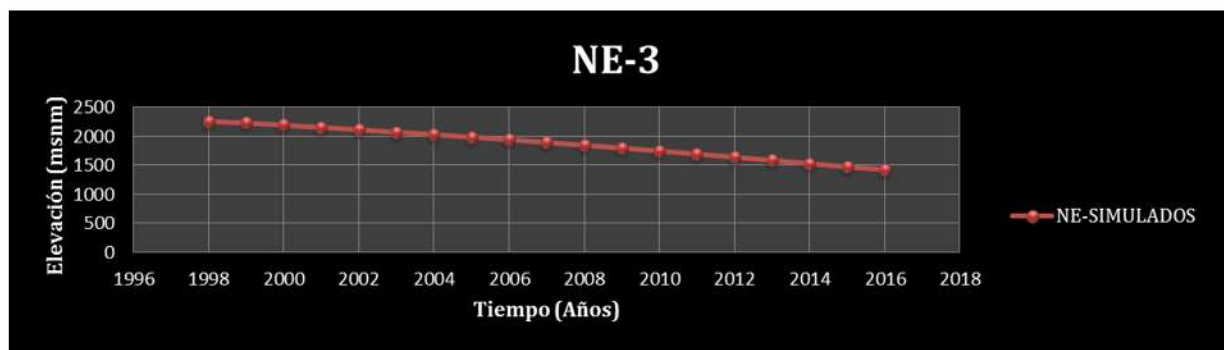


Figura 6.24. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 3.

Fuente: Elaboración propia.

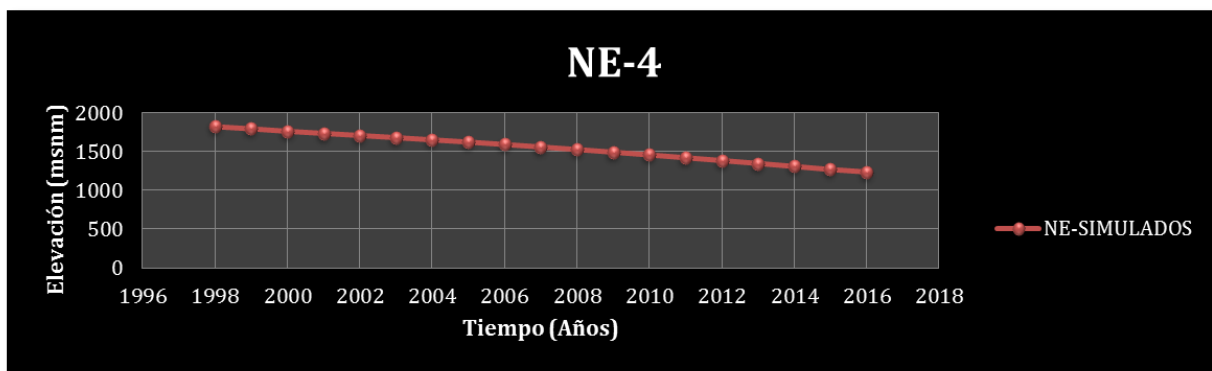


Figura 6.25. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 4.

Fuente: Elaboración propia.

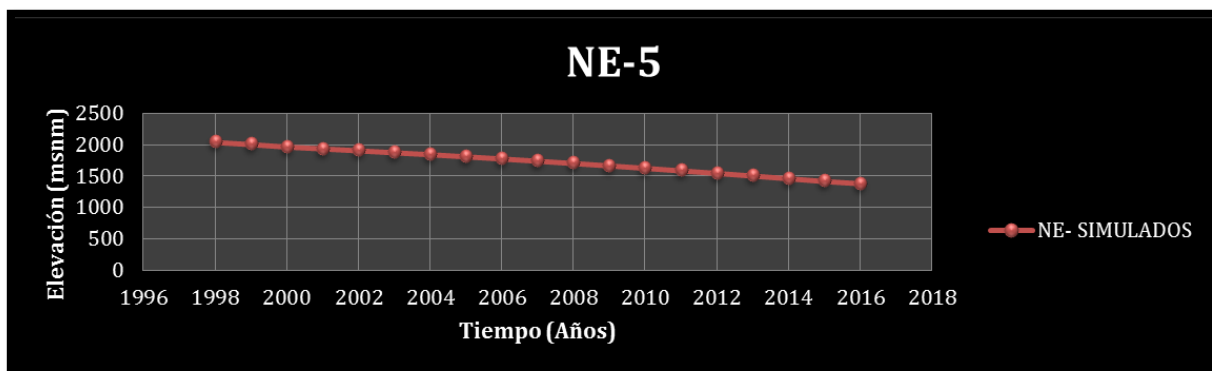


Figura 6.26. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 5.

Fuente: Elaboración propia.

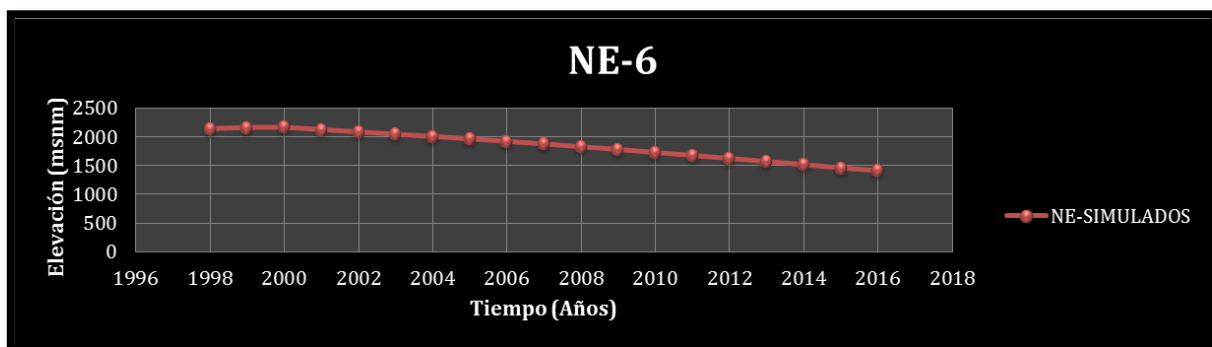


Figura 6.27. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 6.

Fuente: Elaboración propia.

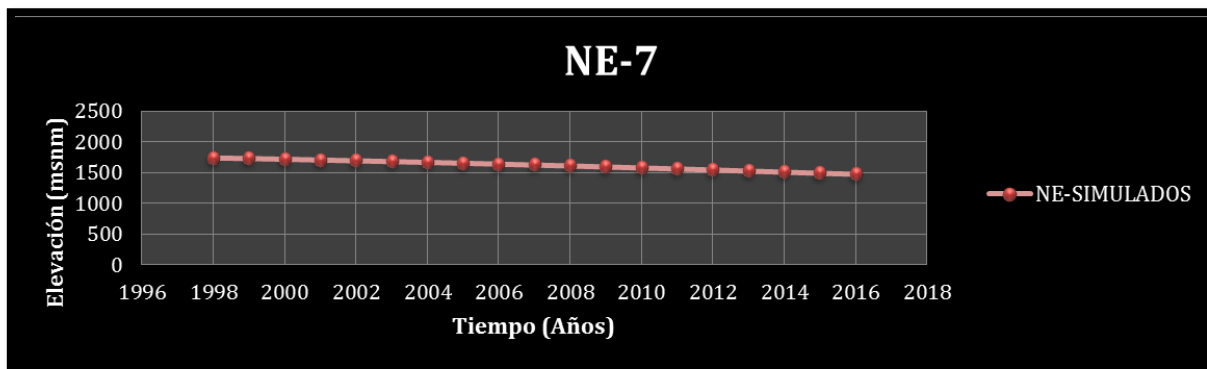


Figura 6.28. Resultados de los niveles estáticos en la celda de calibración 7.

Fuente: Elaboración propia.

Una vez que se obtienen los niveles estáticos simulados se realiza una comparativa visual con los valores medidos u observados en campo, revisando que tengan la misma tendencia y comparando la variación en las elevaciones de los niveles estáticos tanto de los simulados como de los observados en campo (Figura 6.29, Figura 6.30, Figura 6.31, Figura 6.32 y Figura 6.33).



Figura 6.29. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 3.

Fuente: Elaboración propia.

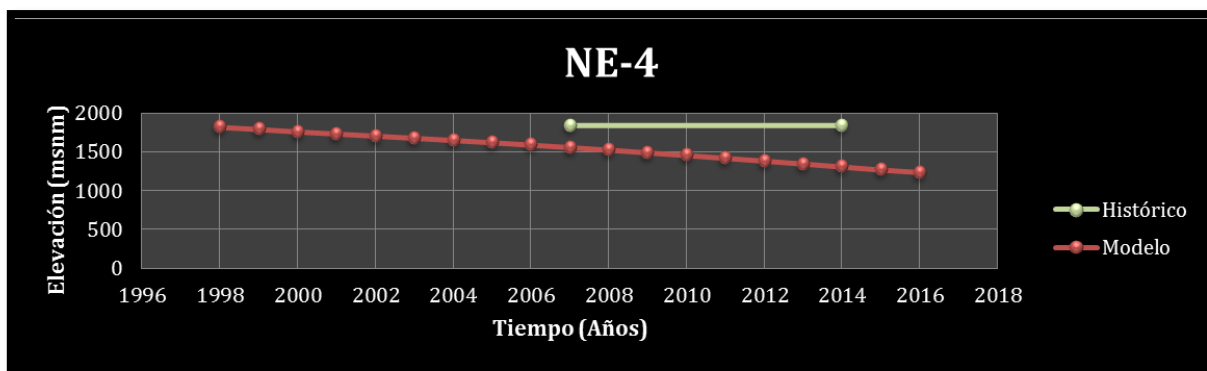


Figura 6.30. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 4.

Fuente: Elaboración propia.



Figura 6.31. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 5.

Fuente: Elaboración propia.

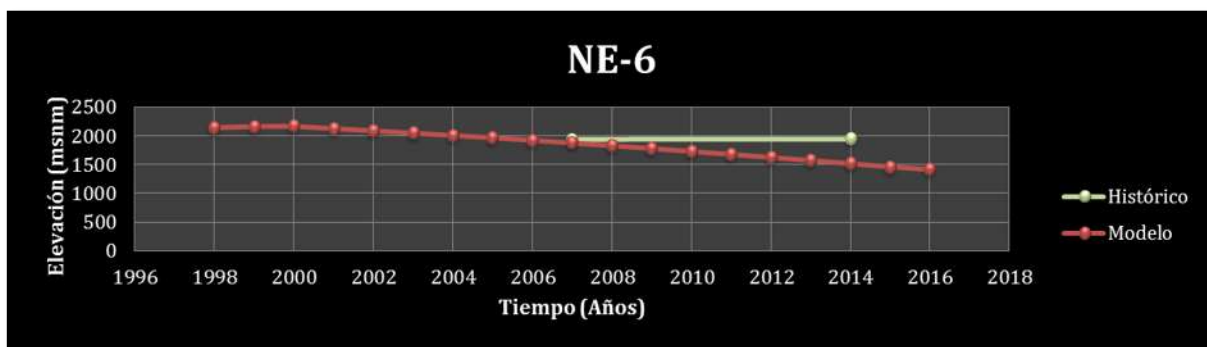


Figura 6.32. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 6.

Fuente: Elaboración propia.

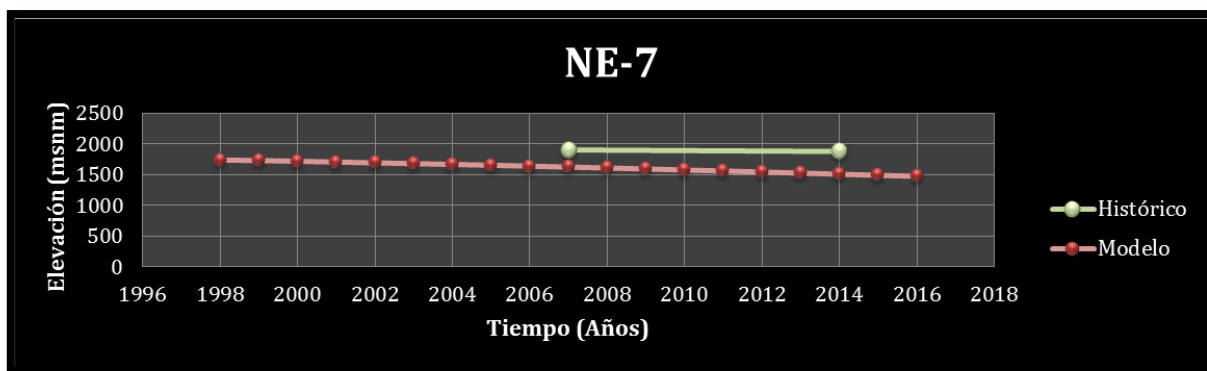


Figura 6.33. Comparativa de los niveles estáticos de última simulación y los valores medidos en campo realizada en la celda de calibración 7.

Fuente: Elaboración propia.

“En general, se observa una tendencia de descenso del nivel piezométrico en la celda 3,, la que mayor pendiente de descenso presenta (44%). La celda de menor pendiente de descenso en el nivel estático se presenta en la celda Y, con un 14%.

Después de la visualización de los resultados, se presenta también la comparativa numérica entre los niveles medidos y simulados de los parámetros de control para el año 2007 y 2014 en la tabla 7.45.

Tabla 6.6. Diferencias de los niveles estáticos de control, simulados y medidos.

NE	MEDIDOS EN CAMPO			SIMULADOS		
	NE-2007	NE-2014	Δ NE	NE-2007	NE-2014	Δ NE
NE-7	1905.88	1881.88	24	1627.05	1611.75	15.30
NE-6	1942.01	1947.33	-5.32	1878.78	1519.35	359.43
NE-5	1910.12	1909.58	0.54	1739.66	1459.60	280.06
NE-4	1845.2	1845.2	0	1558.79	1308.31	250.49
NE-3	1953.06	1953.03	0.03	1891.88	1526.50	365.38

Fuente: Elaboración propia.



Se puede apreciar que los niveles simulados para 2014 siguen un comportamiento similar al de los medidos a diferencia de un punto en la zona media en el que el descenso es bastante considerable (esto posiblemente debido a las extracciones para uso urbano de la cabecera municipal de Puruándiro). En la sección final se observa una tendencia de disminución de los niveles piezométricos, por lo que se cree que en esta zona podría requerirse una calibración más fina, con el fin de ajustar mucho más los niveles simulados en AQUIVAL respecto a lo registrado en campo.

Se puede apreciar que hay una diferencia bastante considerable entre los niveles estáticos simulados y los medidos en campo, por lo tanto podría requerirse una calibración más fina con el fin de ajustar mucho más dichos valores.

Ante los resultados anteriores, es posible pero intrincado producir una calibración mucho más fina principalmente por la complejidad que supone la discretización del modelo y la falta de datos que se tiene para realizar una buena comparación. Aún así, el tiempo invertido para llevar a cabo tal calibración más fina, lo dejan fuera de consideración dentro de los tiempos de trabajo del proyecto, por lo cual se descarta la posibilidad y se deja como tema que puede seguir mejorándose y complementándose, para lograr un mejor entendimiento del funcionamiento del sistema acuífero analizado.



7.- CONCLUSIONES

En México se tiene una escasa información sobre el recurso hídrico, es por eso que para nuestra zona en estudio no se tienen valores confiables, en este caso de los niveles estáticos y los volúmenes de extracción.

Para poder realizar una buena calibración del modelo se requiere tener valores históricos de por lo menos dos años para poder hacer una comparativa con los valores que simule el programa. En este trabajo fue difícil hacer esta comparación en los resultados ya que solo se tienen registrados valores del año 2007 y 2014, por lo tanto no se puede apreciar bien la tendencia. Otro problema que se tiene es que probablemente esos valores no son tan confiables ya que fueron realizados diferentes grupos de personas por lo cual pudieron haber usado técnicas diferentes en las mediciones de los niveles estáticos. Observando los valores que se tiene de los niveles también se sospecha que las mediciones pudieron llevarse a cabo en diferente temporada del año, lo que puede ocasionar una variación considerable en los resultados de las mediciones.

El uso de la herramienta computacional Aquival es de gran utilidad para la modelación, ya que es posible predecir resultados mediante modificaciones a los datos de entrada y salida del modelo y en el periodo de años que se requiere. Pero este proceso resulta tardado, ya que el modelo no cuenta con un calibrador y se tiene que trabajar a prueba y error lo que hace que sea más fácil la modelación.

De acuerdo a los resultados obtenidos se observa que los niveles estáticos han sido muy variados a lo largo de los años, en la mayoría han disminuido de manera considerable, por lo que es de gran importancia desarrollar e implementar técnicas que nos ayuden a gestionar y operar el recursos hídrico sin alterar el equilibrio del acuífero.

En las variaciones que se tienen de los resultados también influye la falta de datos que se tiene sobre los datos geológicos, ya que muchos de los valores se tuvieron que suponer.



8.- REFERENCIAS

- 1.- Almanza, 2013. Modelación de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz La Piedad para la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Angulo, municipio de Nahuatzen. Tesis de Licenciatura de la Fac. de Ing. Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
- 2.- Andreu J. J. et al. 1991. AQUATOOL: a computer assisted support system for water resource research management including conjunctive use. In Loucks and da Costa, eds. Decision Support Systems. Berlin: Springer-Verlag.
- 3.- Armas, F. J. 2010. Modelación y simulación Hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, en Michoacán México. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.
- 4.- Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED). 2012. *Atlas de riesgos naturales del municipio de Puruándiro*. Puruándiro, Michoacán. 87 pp.
- 5.- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). 2002. *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Pastor Ortíz-La Piedad (1605), Estado de Michoacán*. Diario Oficial de la Federación, actualización con fecha de 20 de abril de 2015.
- 6.- CONAGUA, IMTA, SEMARNAT. 2007. Actualización hidogeológica de los acuíferos: Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia - Queréndaro y Pastor Ortiz en el estado de Michoacán. Convenio de Colaboración CNA-OCLSP-JAL-CONV-008-2007. Informe Final. México.
- 7.- CONAGUA. 2012. Atlas Digital del agua México 2012. Recuperado el 21 de noviembre de 2014 de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/>



8.-Comisión Nacional del Agua. Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS). <http://www.conagua.gob.mx>.

9.-Comisión Nacional del Agua. Registro Público de Derechos de Agua (REPD). www.conagua.gob.mx.

10.-Custodio E., Llamas M.R., 2001. Hidrología Subterránea. (2 tomos). España.

11.-Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. AQUIVAL Módulo para el preproceso y simulación de acuíferos. Manual de Usuario. Valencia, España.

12.-Estrela, 1992. Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos. CEDEX, Madrid, España.

13.-Flores, G. C. 2016. *Evaluación del cambio climático en el funcionamiento hidráulico de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz*. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.

14.-García, E. 2004. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. México.

15.-Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidráulica. "Aplicación de modelos matemáticos hidrológicos para la determinación de hidrogramas de diseño. 1982. Guatemala.

16.-Madrigal, J. J. 2015. *Modelo de gestión hídrica de la cuenca del río Angulo, para uso conjunto: superficial y subterráneo*. Tesis de maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.



17.-Sahuquillo A., Cassiraga E. et al. 2010. Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. Instituto Geológico y Minero, España.

18.-Salas, M. A. 2009. Análisis para opciones de manejo de la subcuenca del río Turbio en el estado de Guanajuato. Tesis de maestría. Universidad Nacional Autónoma de México. México, D.F.

19.-USGS. 2002. Basic Ground-Water Hydrology. North Carolina. EUA.