

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE CHIHUAHUA

FACULTAD DE INGENIERÍA

SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO



**MODELO DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO LAGUNA DE
HORMIGAS, CHIHUAHUA, MÉXICO**

POR:

ING. GLORIA Z Aidith Cisneros Zamora

TESIS PRESENTADA COMO REQUISITO PARA OBTENER EL GRADO DE

MAESTRO EN INGENIERÍA



Modelo de Flujo del Agua Subterránea del Acuífero Laguna de Hornigas, Chihuahua, México. Tesis presentada por Gloria Zaidith Cisneros Zamora como requisito parcial para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, ha sido aprobada y aceptada por:



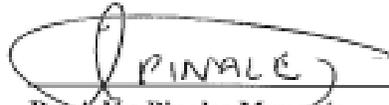
M.I. Javier González Cantú
Director de la Facultad de Ingeniería



Dr. Alejandro Villalobos Aragón
Secretario de Investigación y Posgrado



M.I. Miguel Ángel González Núñez
Coordinador(a) Académico



Dr. Adán Pinales Munguía
Director(a) de Tesis

Noviembre 2019

Fecha

Comité:

Dr. Adán Pinales Munguía
Dra. María Socorro Espino Valdés
Dra. María de Lourdes Villalba
M.I. Rodrigo De la Garza Aguilar

© Derechos Reservados
**Gloria Zaidith Cisneros
Zamora**
Circuito No.1, Campus
Universitario 2 Chihuahua, Chih.
México

Noviembre 2019



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

19 de noviembre de 2019

ING. GLORIA ZAIDITH CISNEROS ZAMORA

Presente

En atención a su solicitud relativa al trabajo de tesis para obtener el grado de Maestro en Ingeniería, nos es grato transcribirle el tema aprobado por esta Dirección, propuesto y dirigido por el director Dr. Adán Pinales Munguía para que lo desarrolle como tesis, con el título: "MODELO DE FLUJO DEL AGUA SUBTERRÁNEA DEL ACUÍFERO LAGUNA DE HORMIGAS, CHIHUAHUA, MÉXICO".

ÍNDICE

I Dedicatoria

II Agradecimientos

III Resumen

IV Abstract

V Contenido

VI Índice de Tablas

VII Índice de Figuras

1. Introducción

1.2 Antecedentes

1.3 Justificación

1.4 Objetivo general

1.5 Objetivos específicos

2. Descripción de la zona de estudio

2.1 Localización

2.2 Fisiografía

2.3 Topografía

2.4 Clima

2.5 Geología

2.6 Uso de suelo y vegetación

2.7 Edafología

2.8 Recarga y descarga

2.9 Hidrografía superficial

2.10 Hidrografía subterránea

3. Metodología

3.1 Recopilación de información

3.2 Modelo conceptual

3.3 Simulador numérico

3.4 Diseño del modelo

3.5 Calibración



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE
CHIHUAHUA

- 4. Resultados
 - 4.1 Modelo conceptual
 - 4.2 Diseño de la malla
 - 4.3 Parámetros de entrada
 - 4.4 Calibración
- 5. Predicción
- 6. Balance de aguas subterráneas
 - 6.1 Entradas (E)
 - 6.2 Salidas (S)
 - 6.3 Cambio de almacenamiento
 - 6.4 Disponibilidad de agua subterránea
- 7. Conclusiones
- 8. Recomendaciones
- 9. Referencias

Solicitamos a Usted tomar nota de que el título del trabajo se imprima en lugar visible de los ejemplares de las tesis.

ATENTAMENTE

"Naturam subiecit aliis"

EL DIRECTOR

EL SECRETARIO DE INVESTIGACIÓN
Y POSGRADO

M.I. JAVIER GONZALEZ CANTÚ

DR. ALEJANDRO VILLALOBOS ARAGÓN



I DEDICATORIA

A mis padres Gloria Zamora Ceceñas y Santiago Cisneros Lavalle por ser los principales promotores de mis sueños. A mis hermanos Earvin, Erick y Rudi que siempre me han enseñado que todo es posible con dedicación y esfuerzo. A mi esposo Asdrubal que pese a las adversidades siempre estuvo apoyándome y a mis hijas Ariadne y Regina que son toda mi vida.

II AGRADECIMIENTOS

Son muchas las personas que han contribuido al proceso y conclusión de este trabajo. Primeramente, quiero agradecerle a Dios que siempre está presente en mi vida y que sin él no habría podido llegar hasta donde estoy, a la Universidad y a todos los maestros que compartieron su conocimiento conmigo durante mis estudios y que fueron parte fundamental para la realización de mi tesis. También quiero agradecerle a mi director de tesis, el Dr. Adán Pinales Munguía que fue el primero que creyó en este trabajo, que me apoyó de manera personal e institucional compartiendo sus grandes conocimientos y me alentó para que concluyera esta tesis; a la Facultad de Zootecnia, a la Facultad de Ciencias Agrotecnológicas y a las dependencias de gobierno junto con los docentes de cada facultad y el personal, estoy agradecida con todos ellos por brindarme su tiempo e información necesaria, también a todas las personas que me brindaron su apoyo de manera indirecta, fuera de la escuela pero que sin ese gran apoyo habría sido más complicado concluir, a mis amigos y vecinos que aunque una de ellas ya no está con nosotros, le estaré agradecida toda la vida.

III RESUMEN

El agua subterránea es un recurso vital para el desarrollo de México. En efecto, en muchos de los casos los acuíferos son la única fuente permanente de agua en sus extensas regiones áridas, aportan el agua para el riego de la agricultura, satisfacen gran parte de las demandas de agua de los desarrollos industriales y son la principal fuente de abastecimiento de la población rural.

La modelación matemática del flujo subterráneo es una herramienta importante para simular el comportamiento de un acuífero, que permite visualizar el sistema de una forma más clara para encontrar soluciones a problemas de acuíferos sobreexplotados en los que es notorio el descenso de los niveles piezométricos; por eso, se realizó un modelo matemático del flujo de agua subterránea para el acuífero Laguna de Hormigas.

El acuífero Laguna de Hormigas se localiza en la porción centro oriental del Estado de Chihuahua y cubre una superficie aproximada de 6,014 km². Colinda al norte con los acuíferos Laguna Tres Castillos y Laguna de Tarabillas; al este con Bajo Rio Conchos; al sur con Potrero del Llano, Aldama-San Diego, Tabalaopa-Aldama y al oeste con Laguna El Diablo y el Sauz-Encinillas.

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios Chihuahua, Aldama, Ahumada y Coyame del Sotol (CONAGUA, 2015). El clima predominante es muy seco templado, con una temperatura media anual de 16.3° C y precipitación media anual de 321.8 mm, (JCAS- UACH, 2015).

El acuífero se recarga gracias a la infiltración; recibe aportaciones laterales procedentes de la precipitación de las partes altas con elevaciones de 1500 a 2400 msnm. donde las rocas de carácter volcánico tienen permeabilidad alta en rocas fracturadas y de media o baja donde no lo están, tratándose de calizas, riolitas, tobas y lutitas. Una parte de agua se infiltra a través de las rocas fracturadas y otra parte escurre de estas zonas serranas a través de las corrientes naturales de agua superficial como los arroyos intermitentes hacia el valle de material aluvial

con elevaciones de 1000 a 1500 msnm, para posteriormente infiltrarse, evaporarse y evapotranspirarse. La zona de la laguna es de material lacustre por lo que puede suponerse una baja conductividad hidráulica.

En la zona de estudio existen localidades pequeñas donde la mayoría de las personas se dedican a la agricultura y a la ganadería. El agua subterránea ha sido explotada por bombeo durante años principalmente para fines agrícolas, en segundo nivel para uso ganadero-agrícola y en tercer lugar para uso doméstico agrícola. Para el año 2012 se nota un incremento considerable en el número de aprovechamientos al norte del acuífero; aproximadamente en el año 2008 es cuando comienza este incremento, el volumen de extracción también aumentó y aunado a esto, el descenso de los niveles piezométricos (CONAGUA, 2011).

Para la construcción del modelo de flujo se generó una configuración de cargas iniciales, luego se zonificó la conductividad hidráulica y el almacenamiento con base a la geología, y posteriormente la recarga, se organizaron las extracciones de agua subterránea y la información de pozos de observación. Con ayuda del programa Visual MODFLOW se reprodujo el comportamiento del sistema calibrando el modelo a base de “prueba y error” y con el código para calibración automatizada “PEST”, obteniendo un error máximo residual de -13.05 m para el año 1981, -15.32 para el año 2005, -16.19 para el año 2006, -10.12 para el año 2011 y -15.91 m para el año 2012 y una raíz del error cuadrático medio normalizado de 1.109%, 3.943%, 2.872%, 4.004% y 3.319% respectivamente. Finalmente se realizaron predicciones para el año 2022, 2027 y 2032, es decir a 10, 15 y 20 años aumentando el bombeo un 20, 50 y 110% en el primer escenario y un 110% del año 2022 al 2032 para el segundo escenario, mostrando el abatimiento de varios pozos, principalmente en la zona norte.

IV ABSTRACT

Groundwater is a vital resource for the development of Mexico. In fact, in many cases, aquifers are the only permanent source of water in their extensive arid regions, provide water for irrigation of agriculture, meet much of the water demands of industrial developments and are the main source of supply of the rural population.

The mathematical modeling of the underground flow is an important tool to simulate the behavior of an aquifer, which allows to visualize the system in a clearer way to find solutions to problems of overexploited aquifers in which the decrease in piezometric levels is noticeable; Therefore, a mathematical model of the groundwater flow was made for the Laguna de Hormigas aquifer.

The Laguna de Hormigas aquifer is located in the eastern central portion of the State of Chihuahua and covers an area of approximately 6,014 km². It borders to the north with the Laguna Tres Castillos and Laguna de Tarabillas aquifers; to the east with Bajo Rio Conchos; to the south with Potrero del Llano, Aldama-San Diego, Tabalaopa-Aldama and to the west with Laguna El Diablo and Sauz-Encinillas.

Geopolitically partially includes the municipalities Chihuahua, Aldama, Ahumada and Coyame del Sotol (CONAGUA, 2015). The predominant climate is very dry temperate, with an average annual temperature of 16. 3° C and an average annual rainfall of 321.8 mm, (JCAS-UACH, 2015).

The aquifer is recharged thanks to infiltration; receives lateral contributions from the precipitation of the high parts with elevations of 1500 to 2400 meters above sea level. where volcanic rocks have high permeability in fractured rocks and medium or low rocks where they are not, in the case of limestones, rhyolites, tuffs, and shales. A part of water infiltrates through fractured rocks and another part drains from these mountain areas through natural currents of surface water such as intermittent streams to the valley of alluvial material with elevations of 1000 to 1500 meters above sea level, to subsequently infiltrate, evaporate and

evapotranspirate. The area of the lagoon is made of lacustrine material, so low hydraulic conductivity can be assumed.

In the study area, there are small towns where most people are engaged in agriculture and livestock. Groundwater has been exploited by pumping for years primarily for agricultural purposes, second level for livestock-agricultural use and thirdly for domestic agricultural use. For the year 2012, there is a considerable increase in the number of uses north of the aquifer; approximately in the year 2008 is when this increase begins, the volume of extraction also increased and coupled with this, the decrease in piezometric levels (CONAGUA, 2011).

For the construction of the flow model, an initial load configuration was generated, then the hydraulic conductivity and the geology-based storage were zoned, and subsequently, the recharge, groundwater extractions and observation well information were organized. With the help of the Visual MODFLOW program, the system behavior is reproduced by calibrating the model based on "trial and error" and with the code for automated calibration "PEST", obtaining a maximum residual error of -13.05 m for the year 1981, -15.32 for the year 2005, -16.19 for the year 2006, -10.12 for the year 2011 and -15.91 m for the year 2012 and a root of the mean normalized square error of 1,109%, 3,943%, 2,872%, 4,004% and 3,319% respectively . Finally, predictions for the year 2022, 2027 and 2032 are updated, that is, at 10, 15 and 20 years, the pumping is modified by 20, 50 and 110% in the first scenario and 110% from the year 2022 to 2032 for the second scenario, showing the depletion of several wells, mainly in the north zone.



V CONTENIDO

I DEDICATORIA	1
II AGRADECIMIENTOS.....	2
III RESUMEN	3
IV ABSTRACT.....	5
V CONTENIDO.....	7
VI ÍNDICE DE TABLAS	10
VII ÍNDICE DE FIGURAS	12
1 INTRODUCCIÓN	16
1.2 Antecedentes	18
1.3 Justificación.....	21
1.4 Objetivo general	23
1.5 Objetivos específicos.....	23
2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	24
2.1 Localización	24
2.2 Fisiografía.....	27
2.3 Topografía	27
2.4 Clima	29
2.5 Geología	32
2.5.1 Geología superficial	32
2.5.2 Geología subterránea.....	32
2.5.3 Geología estructural	32
2.6 Uso de suelo y vegetación	36
2.7 Edafología	46
2.8 Recarga y descarga.....	52



2.9 Hidrografía superficial.....	52
2.10 Hidrografía subterránea.....	53
2.10.1 Usos del agua subterránea	54
2.10.2 Calidad del Agua.....	58
2.10.3 Elevación, profundidad y evolución del nivel estático.....	65
3 METODOLOGÍA	71
3.1 Recopilación de Información	71
3.2 Modelo Conceptual	72
3.3 Simulador numérico	72
3.3.1 Modelo Matemático	72
3.4 Diseño del Modelo	75
3.4.1 Discretización de la malla	75
3.4.2 Parámetros iniciales del modelo.....	75
3.4.2.1 Zonificación y estimación previa de los parámetros.....	76
3.4.2.1.1 Parámetros Hidráulicos.....	77
3.4.2.1.2 Condiciones de Frontera.....	81
3.4.2.1.3 Pozos de bombeo y Observación.....	81
3.4.2.1.4 Condiciones iniciales.....	82
3.4.2.1.5 Periodos de esfuerzo.....	82
3.5 Calibración	82
4 RESULTADOS	86
4.1 Modelo conceptual	86
4.2 Diseño de la Malla.....	86
4.3 Parámetros de entrada	90
4.3.1 Unidades hidrogeológicas	90
4.3.2 Parámetros hidráulicos	96



4.3.3 Fronteras del modelo	100
4.3.4 Pozos de observación y bombeo	100
4.3.5 Condiciones iniciales.....	103
4.3.6 Periodos de esfuerzo.....	104
4.3.7 Zonificación de la recarga	104
4.4 Calibración	108
5 PREDICCIÓN.....	118
6 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS	140
6.1 Entradas (E).....	141
6.2 Salidas (S)	152
6.3 Cambio de almacenamiento	159
6.4 Disponibilidad de agua subterránea	160
7 CONCLUSIONES	162
8 RECOMENDACIONES.....	165
9 REFERENCIAS.....	166



VI ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: ESTUDIOS REALIZADOS EN LA ZONA DE ESTUDIO (JCAS-UACH, 2015).....	21
TABLA 2: COORDENADAS GEOGRÁFICAS DE LA POLIGONAL SIMPLIFICADA DEL ACUÍFERO (CONAGUA, 2015).....	25
TABLA 3: LISTA DE CARTAS GEOLÓGICAS UTILIZADAS (SGM)	33
TABLA 4: TIPOS DE CULTIVO POR AÑO (JCAS-UACH, 2015).....	37
TABLA 5: CLASIFICACIÓN DEL CULTIVO POR DISPONIBILIDAD DE AGUA (SCIT, 2009).....	38
TABLA 6: CLASIFICACIÓN DEL CULTIVO POR TEMPORALIDAD EN EL TERRENO (SCIT, 2009)	38
TABLA 7: CLASIFICACIÓN DEL CULTIVO POR TEMPORALIDAD DEL USO AGRÍCOLA (SCIT, 2009)	39
TABLA 8: VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN PARA LOS AÑOS 1985, 2005 Y 2011 (JCAS-UACH, 2015).....	54
TABLA 9: FAMILIA DE AGUA Y PORCENTAJE DE ERROR EN BALANCE IÓNICO ADAPTADA DE JCAS-UACH,2015.....	60
TABLA 10: LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE DE PARÁMETROS EN AGUA POTABLE PARA CONSUMO HUMANO. (SALUD AMBIENTAL)	60
TABLA 11: RESULTADOS ANALÍTICOS DE MUESTRAS DE AGUA DEL ACUÍFERO ADAPTADA DE JCAS-UACH, 2015... 61	
TABLA 12: RESULTADOS DE LA PRUEBA DE BOMBEO Y UBICACIÓN (JCAS-UACH,2015).....	77
TABLA 13: RANGO DE VALORES DE ALMACENAMIENTO ESPECÍFICO (ANDERSON & WOESSNER, 1991).....	79
TABLA 14: COEFICIENTE DE ALMACENAMIENTO PARA DIFERENTES TIPOS DE TERRENOS Y ACUÍFEROS (IGLESIAS, 1984).....	79
TABLA 15: RANGOS DE POROSIDAD EFECTIVA (Sy) SEGÚN MORRIS & JOHNSON, 1967.....	80
TABLA 16: RANGOS DE POROSIDAD EFICAZ CUSTODIO Y LLAMAS, 1983	80
TABLA 17: UNIDADES HIDROGEOLÓGICAS.....	93
TABLA 18: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA.....	96
TABLA 19: VOLÚMENES DE EXTRACCIÓN DE LOS POZOS DE BOMBEO POR AÑO	100
TABLA 20: PERIODOS DE ESFUERZO.....	104
TABLA 21 RECARGA POR RETORNO DE RIEGO PARA VISUAL MODFLOW	106
TABLA 22: PERIODOS PARA CADA ÁREA DE RETORNO DE RIEGO.....	107
TABLA 23: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 2, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW	127
TABLA 24: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA CENTRO DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 2, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW	128
TABLA 25: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 2, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW	129
TABLA 26: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 3, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW	135



<i>TABLA 27: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA CENTRO DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 3, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW</i>	136
<i>TABLA 28: ABATIMIENTO POR POZO EN LA ZONA SUR DEL ACUÍFERO, ESCENARIO 3, ADAPTADA DE VISUAL MODFLOW</i>	136
<i>TABLA 29: CÁLCULO DE INFILTRACIÓN</i>	142
<i>TABLA 30: CÁLCULO DEL CAMBIO DE ALMACENAMIENTO</i>	143
<i>TABLA 31: CÁLCULO DEL VOLUMEN DE RETORNO DE RIEGO POR AÑO</i>	144
<i>TABLA 32: CÁLCULO DE ENTRADAS SUBTERRÁNEAS PARA EL AÑO DE 1981</i>	146
<i>TABLA 33: CÁLCULO DE ENTRADAS SUBTERRÁNEAS PARA EL AÑO DE 2005</i>	147
<i>TABLA 34: CÁLCULO DE ENTRADAS SUBTERRÁNEAS PARA EL AÑO DE 2012, (CENSO CONAGUA, 2012)</i>	148
<i>TABLA 35: CÁLCULO DE SALIDAS DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL AÑO 2005, CALCULADAS EN BASE A CONFIGURACIONES DEL CENSO DE CONAGUA, 2005</i>	153
<i>TABLA 36: CÁLCULO DE SALIDAS DE AGUA SUBTERRÁNEA PARA EL AÑO 2011, CALCULADAS EN BASE A CONFIGURACIONES DEL CENSO DE CONAGUA, 2011</i>	154
<i>TABLA 37: DESCARGA POR EVAPORACIÓN EN EL ACUÍFERO PARA LOS AÑOS 1981, 2005 Y 2011</i>	156
<i>TABLA 38: CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL POR FREATOFÍTAS.</i>	158
<i>TABLA 39: TOTAL DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS</i>	159
<i>TABLA 40: DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA CON VOLUMEN CONCESIONADO DE AGUA SUBTERRÁNEA NOM-011-CNA-2000</i>	160
<i>TABLA 41: DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA REGISTRADO EN EL DOF 04/01/2018</i>	160
<i>TABLA 42: BALANCE DE MASAS OBTENIDO DE VISUALMODFLOW</i>	163



VII ÍNDICE DE FIGURAS

<i>FIGURA 1: LOCALIZACIÓN DEL ACUÍFERO LAGUNA DE HORMIGAS (ARCGIS).....</i>	<i>26</i>
<i>FIGURA 2: TOPOGRAFÍA Y FISIOGRAFÍA DEL ACUÍFERO LAGUNA DE HORMIGAS (ARCGIS).....</i>	<i>28</i>
<i>FIGURA 3: CLIMA (ARCGIS).....</i>	<i>31</i>
<i>FIGURA 4: GEOLOGÍA, SHAPE DE LITOLOGÍA DEL SGM, ELABORADO EN ARCGIS.....</i>	<i>34</i>
<i>FIGURA 5: SECCIONES GEOLÓGICAS ADAPTADAS DE JCAS- UACH, 2015 (AUTOCAD).....</i>	<i>35</i>
<i>FIGURA 6: USO DE SUELO Y VEGETACIÓN, SHAPE (VECTORIAL), ESCALA 1:250,000 DE INEGI. (ELABORADO EN ARCGIS).....</i>	<i>45</i>
<i>FIGURA 7: EDAFOLOGÍA. SHAPE EDAFOLOGÍA ESCALA 1:250 000 : SERIE III DE INEGI, ELABORADO EN ARCGIS.....</i>	<i>51</i>
<i>FIGURA 8: GRÁFICAS DE PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE ACUERDO A SU USO PARA LOS AÑOS 1981, 2005 Y 2011, ADAPTADA DE CONAGUA.....</i>	<i>55</i>
<i>FIGURA 9: GRÁFICA DE COMPARACIÓN DEL NÚMERO DE APROVECHAMIENTOS EN EL TIEMPO, ADAPTADA DE CONAGUA.....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 10: GRÁFICA DE COMPARACIÓN DEL VOLUMEN DE EXTRACCIÓN POR BOMBEO PARA USO AGRÍCOLA EN EL TIEMPO, ADAPTADA DE CONAGUA.....</i>	<i>56</i>
<i>FIGURA 11: HIDROGRAFÍA SUPERFICIAL. SHAPE HIDROGRAFÍA, ESCALA 1:50,000 DE INEGI, ELABORADO EN ARCGIS.....</i>	<i>57</i>
<i>FIGURA 12: LOCALIZACIÓN DE 15 FUENTES ESTUDIADAS PARA CALIDAD DE AGUA, ADAPTADA DE JCAS-UACH, 2015.....</i>	<i>59</i>
<i>FIGURA 13: DIAGRAMAS DE COLLINS (MEQ/L), (JCAS-UACH, 2015).....</i>	<i>62</i>
<i>FIGURA 14: DIAGRAMAS DE COLLINS (%), (JCAS-UACH, 2015).....</i>	<i>63</i>
<i>FIGURA 15: DIAGRAMA DE PIPER (JCAS-UACH, 2015).....</i>	<i>64</i>
<i>FIGURA 16: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 1981 (AUTOCAD Y ARCGIS).....</i>	<i>68</i>
<i>FIGURA 17: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2005 (AUTOCAD Y ARCGIS).....</i>	<i>69</i>
<i>FIGURA 18: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2012 (AUTOCAD Y ARCGIS).....</i>	<i>70</i>
<i>FIGURA 19: DISCRETIZACIÓN DE UN SISTEMA ACUÍFERO EN TRES DIMENSIONES MEDIANTE DIFERENCIAS FINITAS CENTRALES (MCDONALD Y HARBAUGH, 1988).....</i>	<i>74</i>
<i>FIGURA 20: RANGO DE VALORES DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA (ANDERSON & WOESSNER, 1991).....</i>	<i>78</i>
<i>FIGURA 21: PERFIL DE LA MALLA DEL MODELO (SECCIÓN LONGITUDINAL, RENGLÓN 104, VISUAL MODFLOW).....</i>	<i>87</i>
<i>FIGURA 22: PERFIL DE LA MALLA DEL MODELO (SECCIÓN TRANSVERSAL, COLUMNA 104, VISUAL MODFLOW).....</i>	<i>88</i>
<i>FIGURA 23: MALLA DEL MODELO VISTA EN PLANTA (ARCGIS).....</i>	<i>89</i>
<i>FIGURA 24: UNIDADES HIDROGEOLOGÍCAS, ADAPTADO DE SHAPE DE LITOLOGÍA DEL SGM, ELABORADO EN ARCGIS.....</i>	<i>95</i>



FIGURA 25: CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA INICIAL, DATOS DE VISUAL MODFLOW, ELABORADO EN ARCGIS.....	98
FIGURA 26: COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO Ss Y RENDIMIENTO ESPECÍFICO Sy INICIALES, DATOS DE VISUAL MODFLOW, ELABORADO EN ARCGIS.....	99
FIGURA 27: POZOS DE BOMBEO, (ARCGIS).....	101
FIGURA 28: POZOS DE OBSERVACIÓN, (ARCGIS).....	102
FIGURA 29: CONDICIONES INICIALES (VISUAL MODFLOW).....	103
FIGURA 30: ZONAS DE RECARGA (VISUAL MODFLOW).....	105
FIGURA 31: NUEVA ZONIFICACIÓN DE CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA, DATOS DE VISUAL MODFLOW, ELABORADO EN ARCGIS	109
FIGURA 32: RECTA DE CALIBRACIÓN, TIEMPO 1 DÍA CORRESPONDIENTE AL AÑO 1981, (VISUAL MODFLOW)....	110
FIGURA 33: RECTA DE CALIBRACIÓN, TIEMPO 8918 DÍAS CORRESPONDIENTE AL AÑO 2005, (VISUAL MODFLOW)	110
FIGURA 34: RECTA DE CALIBRACIÓN, TIEMPO 9283 DÍAS CORRESPONDIENTE AL AÑO 2006, (VISUAL MODFLOW)	111
FIGURA 35: RECTA DE CALIBRACIÓN, TIEMPO 11109 DÍAS CORRESPONDIENTE AL AÑO 2011, (VISUAL MODFLOW)	111
FIGURA 36: RECTA DE CALIBRACIÓN, TIEMPO 11674 DÍAS CORRESPONDIENTE AL AÑO 2012, (VISUAL MODFLOW)	112
FIGURA 37: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS EN LA ZONA NORTE DEL ACUÍFERO, (VISUAL MODFLOW).....	112
FIGURA 38: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS EN LA ZONA CENTRO DEL ACUÍFERO, (VISUAL MODFLOW).....	113
FIGURA 39: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS EN LA PARTE SUR DEL ACUÍFERO, (VISUAL MODFLOW).....	113
FIGURA 40: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 1981 REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW ...	115
FIGURA 41: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2005 REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW ...	116
FIGURA 42: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2012 REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW ...	117
FIGURA 43: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2022 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW) .	119
FIGURA 44: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2027 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW) .	119
FIGURA 45: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2032 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW) .	120
FIGURA 46: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL NORTE DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW)	120
FIGURA 47: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL CENTRO DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW)	121



FIGURA 48: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL SUR DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 1, (VISUAL MODFLOW)121

FIGURA 49: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2022, ESCENARIO 1, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW122

FIGURA 50: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2027, ESCENARIO 1, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW123

FIGURA 51: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2032, ESCENARIO 1, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW124

FIGURA 52: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2022 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW) .125

FIGURA 53: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2027 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW) .125

FIGURA 54: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2032 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW) .126

FIGURA 55: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL NORTE DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW)126

FIGURA 56: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL CENTRO DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW)127

FIGURA 57: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL SUR DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 2, (VISUAL MODFLOW)128

FIGURA 58: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2022, ESCENARIO 2, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW130

FIGURA 59: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2027, ESCENARIO 2, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW131

FIGURA 60: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2032, ESCENARIO 2, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW132

FIGURA 61: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2022 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 3, (VISUAL MODFLOW) .133

FIGURA 62: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2027 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 3, (VISUAL MODFLOW) .133

FIGURA 63: RECTA DE CALIBRACIÓN PARA EL AÑO 2027 DE PREDICCIÓN, ESCENARIO 3, (VISUAL MODFLOW) .134

FIGURA 64: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL NORTE DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 3, (VISUAL MODFLOW)134

FIGURA 65: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL CENTRO DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 3, (VISUAL MODFLOW)135

FIGURA 66: HIDRÓGRAFOS DE POZOS DE OBSERVACIÓN UBICADOS AL SUR DEL ACUÍFERO PARA PREDICCIÓN DEL ESCENARIO 3, VISUAL MODFLOW136

FIGURA 67 CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2022, ESCENARIO 3, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW137



<i>FIGURA 68: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2027, ESCENARIO 3, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW</i>	138
<i>FIGURA 69: CONFIGURACIONES PARA EL AÑO 2032, ESCENARIO 3, REPRESENTADAS POR EL PROGRAMA VISUAL MODFLOW</i>	139
<i>FIGURA 70: CELDAS DE FLUJO LATERAL</i>	145
<i>FIGURA 71: ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO PARA EL AÑO 1981 (ARCGIS)</i>	149
<i>FIGURA 72: ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO PARA EL AÑO 2005 (ARCGIS)</i>	150
<i>FIGURA 73: ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO PARA EL AÑO 2012 (ARCGIS)</i>	151
<i>FIGURA 74: PORCENTAJE DE LA EVAPORACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA CON RESPECTO A LA PROFUNDIDAD DE LA SUPERFICIE FREÁTICA (CNA, 1994)</i>	155



1 INTRODUCCIÓN

En nuestro planeta el 70% de la superficie terrestre se encuentra cubierta de agua, de la cual el 97.73% es agua salada y se distribuye entre los océanos mientras que el 2.055% corresponde a los casquetes polares y glaciares y el 0.015% corresponde a agua dulce que se encuentra a nivel superficial en forma de ríos y arroyos; una parte de esta agua superficial escurre y otra se infiltra a través de la zona no saturada hasta llegar a los acuíferos naturales de donde es extraída por el hombre a través de pozos para sus necesidades básicas y para riego de cultivos. El mayor volumen de extracción de agua es para uso agrícola y ha ido aumentando año con año, lo que ha generado que los niveles freáticos no alcancen a recuperarse a su nivel original, ocasionando un descenso continuo (Astudillo, 2006).

Al bajar los niveles freáticos estamos modificando la cantidad con la que contamos en los acuíferos y aunado a esto, su calidad, ya que al estar el agua a mayor profundidad se recurre a perforaciones más profundas en donde aumenta el costo de extracción además de que el agua tiene más tiempo en contacto con el medio geológico, por lo tanto, es agua que ya hizo reacción con los minerales de la roca y generalmente es agua no potable.

También es importante mencionar que no sólo estamos modificando las características físicas y químicas del agua, sino que también estamos modificando las propiedades hidrogeológicas del acuífero, el ciclo hidrogeológico, el clima, la erosión del suelo y también la flora y la fauna; al modificar uno de los recursos se modifica todo a su alrededor, afectando a todos los recursos en general.

La humanidad ha ido deteriorando rápidamente estos recursos en los últimos años y el agua es un ejemplo que refleja el mal uso de los mismos.

Sin reconocer que la vida en el planeta depende del agua, los humanos hemos influido con acciones concretas que han ido modificando la naturaleza y aunque se acepta que la existencia depende del agua y de su calidad, pocos colectivos sociales valoran y cuidan el agua como tal (Morandin y Contreras, 2017).



Nuestro cuerpo, al igual que el planeta, está compuesto de agua en un 70% y subsistiremos solo a su utilización moderada y a la pureza que se mantenga a través del tiempo; por tanto, de su cuidado y calidad dependen nuestro equilibrio y salud.

Actualmente el estudio del agua subterránea ha tomado más importancia debido a la presencia de concentraciones de parámetros en grandes cantidades fuera del límite permisible (Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO), Demanda Química de Oxígeno (DQO) y Sólidos Suspendidos Totales (SST) (CONAGUA, 2018) y también se debe a la posibilidad de llegar a un punto en el que ya no se cuente con agua potable para satisfacer las necesidades domésticas, industriales y agropecuarias, (Hernández, 2012).

La disponibilidad del agua en el Estado de Chihuahua padece en la actualidad, según lo indican los datos, una de las peores crisis de su historia reciente. Una combinación de múltiples factores antropogénicos y naturales ha colocado la disponibilidad del recurso hídrico (superficial y subterráneo) en una situación crítica, y esto conduce de forma natural a una serie de problemas socioeconómicos al Estado de Chihuahua (Reyes et al., 2009).

Por esta razón, todos debemos colaborar con nuevas ideas y tecnologías ambientales que permitan disminuir el uso y contaminación del agua. Solo el eficiente uso de este recurso hará posible regenerar hasta cierto punto el curso original del ciclo hidrológico para dejar un planeta ambientalmente estable a futuras generaciones.

En este trabajo de tesis de maestría se estudia la modelación del flujo del agua subterránea del acuífero Laguna de Hormigas, ya que constituye una herramienta para la gestión y administración del recurso.

La creciente demanda de agua subterránea y su lenta renovación propiciaron en los últimos 10 años aproximadamente, la sobreexplotación del acuífero Laguna de Hormigas del Estado de Chihuahua, con efectos en la disminución del rendimiento de los pozos y el aumento de la mala calidad del agua y con ello el decremento del nivel estático acelerado del



acuífero probablemente debido al aumento considerable en el número de pozos perforados y del volumen de extracción para uso agrícola; principal fuente de sustento económico de la región (JCAS-UACH, 2015), por tal motivo se realizará una evaluación hidrogeológica y un modelo matemático que nos permita analizar de forma más exacta el comportamiento del sistema.

Para elaborar la evaluación del acuífero Laguna de Hormigas se realizó un estudio previo para recopilar información tal como clima, datos de ubicación y piezometría de pozos, vegetación, geología, hidrología, uso de suelo, topografía, etc., factores que influyen directa e indirectamente en el comportamiento del acuífero; es de suma importancia el conocimiento de dichos factores y sobre todo su confiabilidad para realizar un estudio más verídico que nos permita encontrar una solución óptima.

La realización de este modelo será de suma importancia para conocer el comportamiento del acuífero, probablemente también para proponer la reubicación de algunos pozos que estén abatiendo alguna zona y para que se tomen decisiones acertadas en cuanto al permiso de nuevas concesiones posteriores al estudio ya que de esto depende principalmente el decremento del nivel estático y también se llevará a cabo para definir flujos en la zona de estudio.

1.2 Antecedentes

En México existen 653 acuíferos considerados administrativamente de los cuales 102 se encuentran sobreexplotados (Jiménez y Galizia, 2012). La sobreexplotación de los acuíferos puede manifestarse como un valor negativo en el cambio de almacenamiento, mismo que se refleja en un descenso del nivel potenciométrico con respecto al tiempo, creando una situación no sustentable y aunado a esto, un deterioro en la calidad del agua. En Chihuahua se ha presentado sobreexplotación en varios acuíferos de la parte central del estado, entre ellos está Laguna de Hormigas, el Sauz Encinillas, Laguna del Diablo,



Tabaloapa Aldama, Chihuahua Sacramento, Aldama San Diego, Meoqui Delicias y Cuauhtémoc (Gutiérrez et al., 2016); de aquí surge la necesidad de administrar de manera óptima la explotación de los acuíferos con ayuda de un software como VISUAL MODFLOW para realizar un modelo matemático en el que influyen diferentes factores como la topografía del terreno, conductividad hidráulica, fuentes y sumideros, fronteras y unidades hidroestratigráficas que en conjunto representan una simulación del flujo subterráneo para posteriormente hacer una predicción (Anderson y Woessner, 1992). En el acuífero Laguna de Hormigas se han realizado cuatro censos. El primero se realizó en el año de 1981 por InGeo S.C. para la Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos específicamente para el Departamento de Exploración de la Subdirección de Geohidrología y Zonas Áridas, con un total de 112 aprovechamientos, pero no se reporta extracción. Posteriormente el segundo y tercer censo fueron en 2005 reportando 130 aprovechamientos con una extracción de 11.43 hm³/año y 2006-2007 reportando 63 aprovechamientos, donde no se estimó la extracción, ambos realizados por la empresa Estudios y Proyectos en Agua Subterránea y el Servicio Geológico Mexicano, por encargo de la Comisión Nacional del Agua. Y el último, en el año 2011, realizado por la Universidad Autónoma de Chihuahua, encomendado por la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS-UACH, 2015).

A través de imágenes de satélite, con las superficies agrícolas y los tipos de cultivos en la zona de estudio, se recalcularon los volúmenes totales en los cuales se estimaron 147 aprovechamientos para el censo de 1981, con una extracción de 20.36 hm³/año, para 2005 los aprovechamientos fueron 132 con una extracción de 21.59 hm³/año, y por último para el año 2011 los aprovechamientos fueron **394 con una extracción de 92.65 hm³/año**, (JCAS-UACH, 2015)



La recarga total para el año 2011 en el acuífero es de $69.94 \text{ hm}^3/\text{año}$ incluida la recarga por precipitación media anual y la recarga por retorno de riego, mientras que las extracciones son de $107.35 \text{ hm}^3/\text{año}$, resultando en un cambio de almacenamiento negativo de $-37.41 \text{ hm}^3/\text{año}$. Si se respetaran las extracciones al volumen concesionado, inscrito en el Registro Público de Derechos de Agua de $16.72 \text{ hm}^3/\text{año}$ según datos publicados en el DOF el 20/12/2013, con una descarga natural comprometida de $3.44 \text{ hm}^3/\text{año}$, la disponibilidad sería de $42.44 \text{ hm}^3/\text{año}$; es importante resaltar que la disponibilidad física sería negativa, es decir, se tendría un déficit de $-37.41 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras la disponibilidad oficial sería positiva con valor de $42.44 \text{ hm}^3/\text{año}$ (JCAS-UACH, 2015).

De acuerdo con lo anterior, el acuífero Laguna de Hormigas del estado de Chihuahua, actualmente se encuentra sobrexplotado (JCAS-UACH, 2015), y no existe evidencia de que anteriormente se haya realizado algún modelo matemático para este acuífero.



Tabla 1: Estudios Realizados en la Zona de Estudio (JCAS-UACH, 2015)

AÑO	EMPRESA	DEPENDENCIA	ESTUDIO	CONTRATO	TIPO	RESULTADOS	VOL. DE EXTRACCIÓN
1981	InGeo, S.C.	SARH	Servicios de Prospección y levantamientos Geológicos y Geofísicos en la cuenca de la Laguna del Cuervo, estado de Chihuahua	GZA-81-074-ED	Geológico y Geofísico	Se realizó un censo de un total de 121 aprovechamientos, 95 pozos, 15 norias y 11 manantiales, así como muestreo y análisis fisicoquímico de 82 muestras, 59 de pozos, 12 norias y 11 manantiales. Se realizó geofísica con un total de 104 sondeos, conformando siete perfiles y la descripción de cada uno de ellos, también se hizo la clasificación de unidades permeables e impermeables.	No se reporta extracción
2005	Estudios y Proyectos en Agua Subterránea y SGM	CNA	Censo de aprovechamientos y monitoreo piezométrico de los acuíferos el sabinal, laguna tres castillos, los moscos, josefa ortiz de domínguez, las palmas, el cuarenta, los lamentos, laguna de hormigas y aldama-el cuervo, en el estado de Chihuahua	SGT-RB-CHI-05-GAS-067-RF-13	Censo de Aprovechamientos y Monitoreo Piezométrico	Se realizó un censo en este año, el cual arrojó un total de 154 aprovechamientos, 142 pozos y tres norias. Se obtuvo también la piezometría de 93 pozos, y se hizo la configuración de la profundidad y elevación del nivel estático para el año de 2005.	11.43 hm ³ /año
2007	Estudios y Proyectos en Agua Subterránea y SGM	CNA	Elaboración del estudio de respaldo para el cálculo de la disponibilidad media anual de aguas subterráneas del acuífero laguna de hormigas, edo. de Chihuahua.	Bajo convenio de colaboración	Cálculo de Disponibilidad	Se realizó un censo parcial con un total de 65 aprovechamientos, 63 corresponden a pozos y 2 a norias, así como también pruebas de bombeo de 6 pozos y determinación de la disponibilidad.	No se estimó la extracción
2011	UACH	JCAS	Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria			Se registraron 217 pozos activos y 8 norias	92.65 hm ³ /año

1.3 Justificación

De acuerdo con los resultados reportados para el año 2011, se registraron un total de 394 obras en el acuífero Laguna de Hormigas que aprovechan las aguas subterráneas, de las cuales 217 están activas y las 177 restantes inactivas. Del volumen de extracción, el 97.81% se destina a las actividades agrícolas, 0.02% es para uso doméstico, 0.73% para uso doméstico-agrícola, 0.23% para uso ganadero, 1.18% para uso ganadero-agrícola y el 0.005% restante para satisfacer las necesidades de uso público-urbano (JCAS-UACH, 2015). Es importante recalcar que la mayor parte del volumen extraído se destina a actividades



agrícolas y que el volumen concesionado de agua subterránea es de $16.72 \text{ hm}^3/\text{año}$ con fecha de 20 de diciembre de 2013, publicado en el [DOF el 20/12/2013](#), es decir, se notó un incremento en las extracciones por bombeo en pozos de $21.59 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el año 2005 a $92.65 \text{ hm}^3/\text{año}$ para 2011; esto representa un incremento de alrededor del 330%, lo que provocó que este acuífero en un corto tiempo cambiara su estatus ([JCAS-UACH 2015](#)), catalogado ahora como un acuífero sobreexplotado.

Para determinar la evolución del acuífero no se puede considerar únicamente la extracción actual y asumir que el volumen de extracción permanece constante, lo que es un error debido a que intervienen otros factores importantes. Según ([JCAS-UACH, 2015](#)) si tomamos en cuenta una tendencia del incremento de las extracciones de $1.772 \text{ hm}^3/\text{año}$, para el año 2030 se tendría un volumen de extracción de $126.27 \text{ hm}^3/\text{año}$, por lo tanto, una evolución de -2.09 m/año y un abatimiento acumulado del año 2011 a 2030 de -30.8m . Es importante mencionar que la disponibilidad física sería negativa para el año 2011, es decir se tendría un déficit de $-34.41 \text{ hm}^3/\text{año}$, obteniendo este resultado de tomar en cuenta un volumen de extracción real de $92.65 \text{ hm}^3/\text{año}$, mientras que la disponibilidad oficial es de $42.44 \text{ hm}^3/\text{año}$ tomando en cuenta el volumen concesionado de $16.72 \text{ hm}^3/\text{año}$ y no el volumen de extracción real; cabe mencionar que si se extrajera el volumen concesionado se tendría una recuperación del acuífero aproximadamente de 1.13 m/año ([JCAS-UACH, 2015](#)). Por lo anterior, es necesario hacer un modelo que incluya ecuaciones diferenciales como las ecuaciones usadas en Visual MODFLOW que son una aproximación de la solución ([Anderson y Woessner, 1992](#)) pero que aun así es una solución óptima, más acertada a la realidad y que a su vez coadyuva a proponer medidas de administración del agua de una manera más consciente. El software que usa este tipo de ecuaciones es adecuado ya que simula, predice y pronostica el resultado del comportamiento futuro del agua subterránea y con ello podemos entender el comportamiento del sistema.



1.4 Objetivo general

Construir un modelo de flujo del agua subterránea empleando el software VISUAL MODFLOW para simular las cargas hidráulicas en el acuífero Laguna de Hormigas, basado en datos hidrogeológicos reales, y así predecir el comportamiento del flujo subterráneo en el tiempo.

1.5 Objetivos específicos

- Construir el modelo de flujo del acuífero.
- Realizar predicciones ante diversos escenarios.
- Determinar las condiciones hidráulicas del acuífero.
- Cuantificar la recarga y descarga del acuífero.
- Determinar si existe una disponibilidad de agua subterránea.



2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

2.1 Localización

El Acuífero Laguna de Hormigas definido con la clave 0824 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo del Agua Subterránea (SIGMAS) de la CONAGUA, se localiza en la porción centro oriental del Estado de Chihuahua, entre los paralelos 28° 48' 10.6" y 29° 53' 41.6" de latitud norte y los meridianos 106°34' 40.8" y 105°18' 38.6" de longitud oeste; cubre una superficie aproximada de 6 014 km² (figura 1). Colinda al norte con los acuíferos Laguna Tres Castillos y Laguna de Tarabillas; al este con Bajo Rio Conchos; al sur con Potrero del Llano, Aldama-San Diego, Tabalaopa-Aldama y al oeste con Laguna El Diablo y el Sauz-Encinillas.

Geopolíticamente comprende parcialmente los municipios Chihuahua, Aldama, Ahumada y Coyame del Sotol (CONAGUA, 2015).



Tabla 2: Coordenadas geográficas de la poligonal simplificada del acuífero (CONAGUA, 2015)

Vértice	Longitud oeste			Longitud este		
	Grados	Minutos	Segundos	Grados	Minutos	Segundos
1	105	24	30.3	29	9	45.4
2	105	35	9.5	29	2	34.2
3	105	34	7.5	28	59	39.9
4	105	41	10.2	28	58	15.3
5	105	44	48.6	28	56	15.6
6	106	0	19.5	28	51	45.2
7	106	2	7.6	28	56	50.5
8	106	3	29.6	29	0	9.3
9	106	5	14.4	29	3	46.1
10	106	4	54.9	29	7	4.7
11	106	7	8.8	29	9	18
12	106	6	25.4	29	12	22.1
13	106	9	34.6	29	18	32.4
14	106	13	24.6	29	20	54.1
15	106	15	59.8	29	27	6.9
16	106	15	15.3	29	31	7.5
17	106	13	28.1	29	34	41.4
18	106	13	26	29	39	2.5
19	106	14	45	29	47	12.2
20	106	3	8.2	29	50	44.7
21	105	59	13.6	29	47	26.7
22	105	54	30.1	29	47	12
23	105	50	11.3	29	39	52.7
24	105	36	51.5	29	34	50.9
25	105	29	59.1	29	39	35.1
26	105	22	46.3	29	42	32.7
27	105	27	6.5	29	28	13.9
28	105	24	24	29	26	21.8
29	105	25	57.1	29	11	23
1	105	24	30.3	29	9	45.4

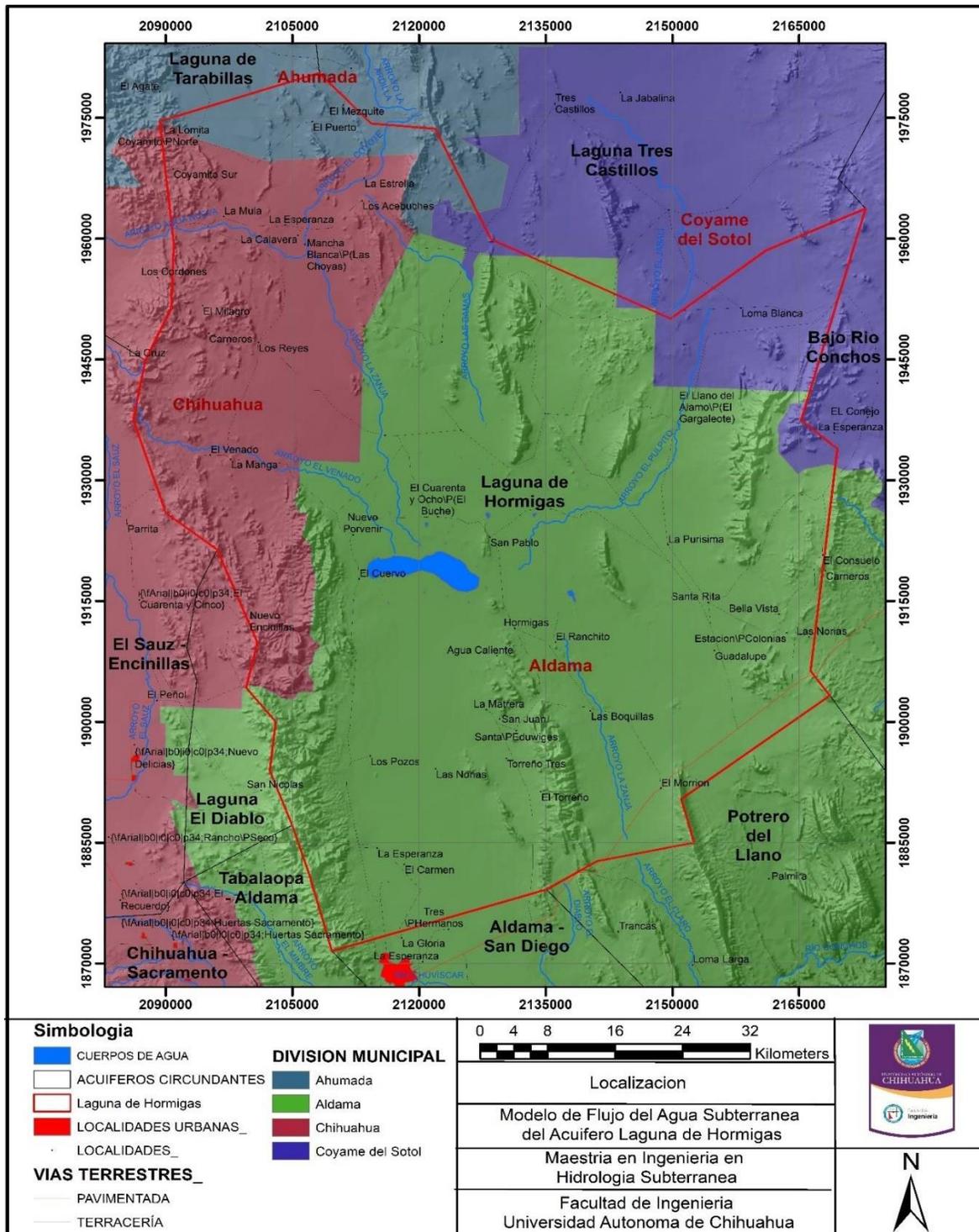


Figura 1: Localización del Acuífero Laguna de Hormigas (ARCGIS)



2.2 Fisiografía

El acuífero Laguna de Hormigas se encuentra dentro de la Provincia Fisiográfica Sierras y Llanuras del Norte (Raisz, 1964), conformada por topofomas bajas y abruptas, con orientación noroeste-sureste. Al oriente se localiza la Subprovincia Sierras Plegadas del Norte y al poniente la Subprovincia del Bolsón de Mapimí.

El origen de la provincia está relacionado con el plegamiento de las secuencias marinas del Mesozoico que se desarrollaron sobre un basamento Paleozoico y Precámbrico, así como con el relleno de fosas tectónicas con sedimentos continentales y algunos derrames lávicos, lo cual dio lugar a la formación de cuencas endorreicas. Al poniente de la zona dominan rocas volcánicas ácidas, calizas en el oriente y norte con dos grandes unidades. En el llano se encuentran los aluviones que generalmente tienen acumulaciones salitrosas o barriales.

La subprovincia Sierras Plegadas del Norte, muestra una orientación preferencial noroeste sureste, constituida por sierras alargadas formadas por estructuras anticlinales de rocas carbonatadas cuya edad va desde el Paleozoico al Cretácico. Este tipo de topofomas tienen la característica de tener extensas bajadas y algunos lomeríos. Otra de sus características es que forman escarpes y presentan ramificación. Las llanuras de esta subprovincia, al igual que la subprovincia Bolsón de Mapimí, son de relleno aluvial (CONAGUA, 2015).

2.3 Topografía

La zona de estudio está conformada por llanuras y sierras, en el sureste y en el noroeste son más espaciadas mientras que al suroeste y oeste son más estrechas, tratándose de sierras con pendientes abruptas que van desde 500 a 1000 m sobre las llanuras y de 2000 a 3000 m sobre el nivel del mar en zonas de mayor altitud, las serranías son de naturaleza ígnea y muestran generalmente una morfología de mesetas escalonadas con cortes acantilados; las sierras con estructuras plegadas de rocas calcáreas en la Sierra el Torreño, La Tasajera, El

Pulpito y La Escaramuza se encuentran alineadas paralelamente en una dirección preferente N-NE a SSE, con una elevación de hasta 2200 m sobre el nivel del mar (JCAS-UACH, 2015).

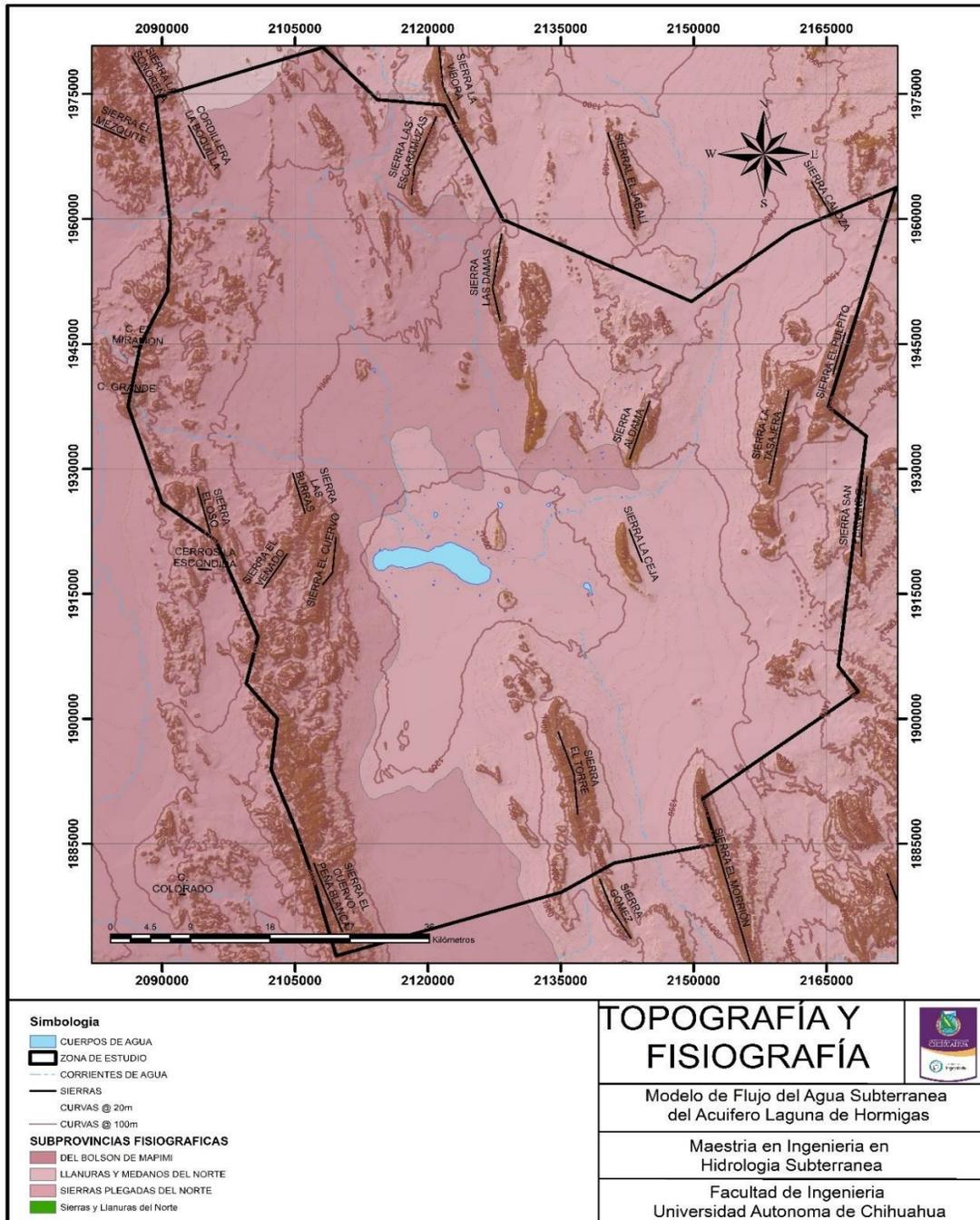


Figura 2: Topografía y Fisiografía del Acuífero Laguna de Hormigas (ARCGIS)



2.4 Clima

En la zona del acuífero Laguna de Hormigas existen cuatro diferentes tipos de climas, BWhw(w), BWkw, BWkw(w) y BS0kw(w), que van desde el tipo muy seco semicálido hasta seco templado y a continuación se describe cada uno de ellos, según Köppen modificada por Enrique -García (Figura 13) (JCAS- UACH, 2015):

2.4.1 BWhw(w). - *Muy seco semicálido*

Este clima se presenta mayormente al sur del acuífero, corresponde a un clima muy seco o desértico, semicálido con invierno fresco, temperatura media anual entre 18 y 22 °C y la temperatura del mes más frío mayor a 18°C. El régimen de lluvias de verano es por lo menos 10 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el más seco del año y un porcentaje de lluvia invernal menor del 5% de la anual (JCAS- UACH, 2015).

2.4.2 BWkw. - *Muy seco templado*

Se presenta en la zona norte del área del acuífero, se trata de un clima muy seco o desértico, templado con verano cálido con una temperatura media anual entre 12 y 18°C, la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente mayor de 18°C, presenta invierno fresco con precipitación invernal oscila entre 5 y 10.2%. El régimen de lluvias de verano es por lo menos 10 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco del año (JCAS- UACH, 2015).

2.4.3 BWkw(w). - *Muy seco templado*

Abarca principalmente la zona centro del acuífero y algunas porciones del sur, corresponde a un clima muy seco y desértico. Templado con verano cálido, temperatura media anual entre 12 y 18°C, la del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más caliente mayor de 18°C. El régimen de lluvias de verano es por lo menos 10 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco del año y un porcentaje de lluvia invernal menor del 5% de la anual (JCAS- UACH, 2015).



2.4.4 BS0kw(w). - Seco templado

Este clima está presente en una pequeña parte al suroeste y este del área del acuífero, es el clima estepario más seco, templado con lluvias en verano, el porcentaje de precipitación invernal es menor de 5%, es decir, presenta sequía en esta época del año, verano cálido. Temperatura media anual entre 12 y 18°C, del mes más frío entre -3 y 18°C y la del mes más cálido mayor a 18°C. El régimen de lluvias de verano es por lo menos 10 veces mayor la cantidad de lluvia en el mes más húmedo que en el mes más seco del año (JCAS- UACH, 2015).

De acuerdo con la clasificación de Köppen, modificada por E. García (1964), el clima que predomina en la zona es árido y extremo; donde las precipitaciones se sitúan entre un 0 % y un 50 % del umbral mencionado anteriormente, alrededor de 300 mm anuales. Bajo estas condiciones la vegetación es muy escasa o nula. Se da en los desiertos y en algunos semidesiertos.

El valor de la temperatura media anual y de la precipitación se determinó a partir del análisis de temperaturas medias mensuales para las estaciones meteorológicas contempladas en el área, dando como resultado una temperatura media anual de 16.3° C (JCAS- UACH, 2015).

Las lluvias se caracterizan por ser aisladas, de alta intensidad y de poca duración, ocurriendo con mayor frecuencia en los meses de junio, julio, agosto, septiembre y octubre. En los meses de diciembre, enero y febrero se presentan lluvias intensas y aguanieve originadas por masas de aire frío, de baja intensidad, provenientes de la zona norte. La precipitación media anual es de 321.8 mm (JCAS- UACH, 2015).

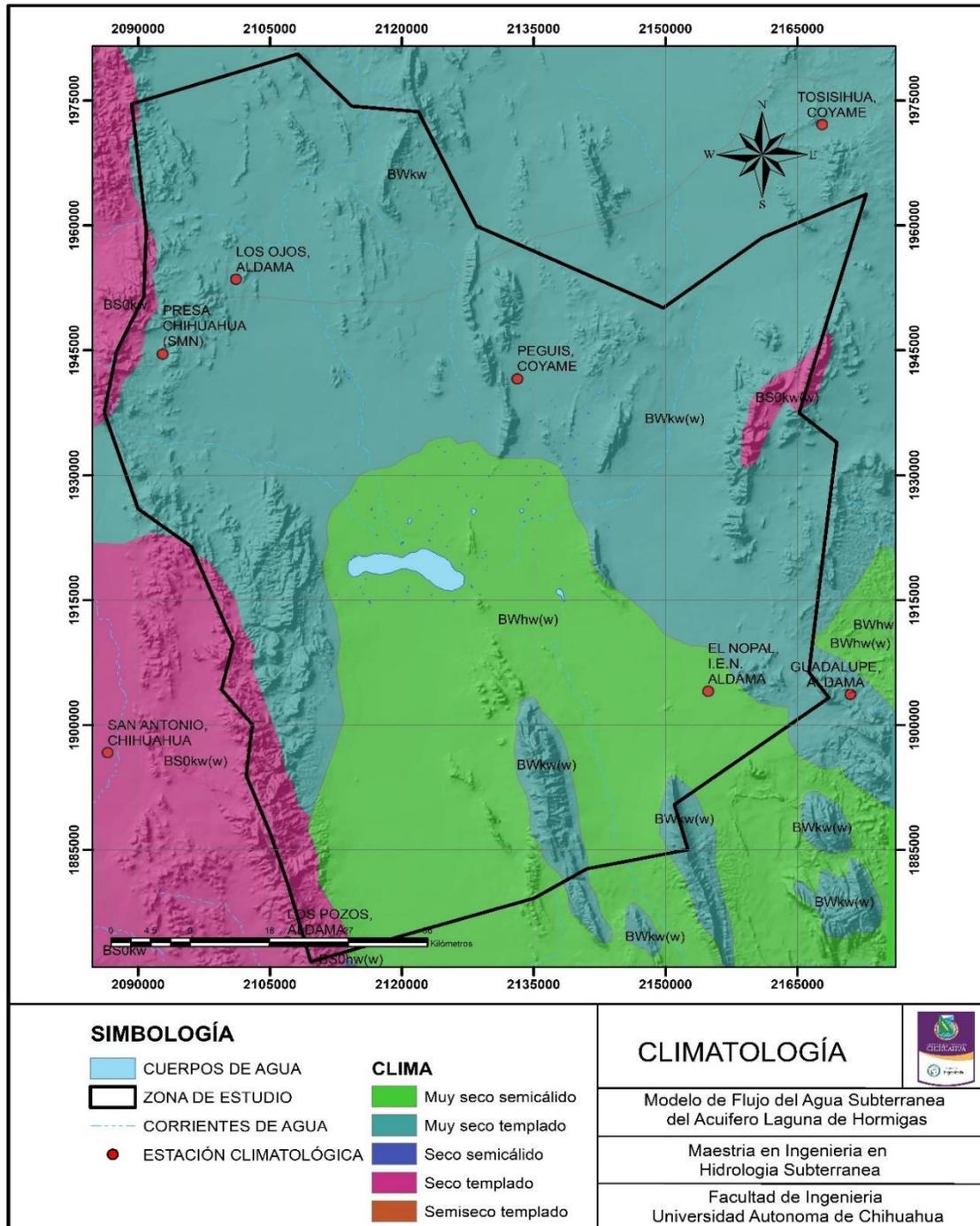


Figura 3: Clima (ARCGIS)



2.5 Geología

2.5.1 Geología superficial

En la geología superficial podemos observar relleno de material aluvial en los valles, así como también material lacustre en la zona de la laguna; estos valles están rodeados por sierras de carácter volcánico como calizas, riolitas, tobas y lutitas.

2.5.2 Geología subterránea

De acuerdo a su geología subterránea, la cuenca se encuentra rellena en su mayor parte por sedimentos aluvio-fluviales, característicos de las zonas de cuencas y valles que descansa sobre rocas volcánicas. El espesor de estos sedimentos es variable llegando a medir de 100 a 250 m; compuesto principalmente de gravas, arenas de grano grueso, arenas de grano medio a fino, limos y arcillas.

La capa impermeable es de espesor variable llegando a medir hasta 4000 m; la Formación Benavides está compuesta por lutitas, así como también las formaciones Del Río Ojinaga y el depósito de tobas de la Formación El Cuervo. La capa impermeable está conformada principalmente por estructuras anticlinales y sinclinales constituidas en su mayoría por estratos de caliza, caliza-lutita, caliza-arenisca, etc. (JCAS-UACH, 2015).

2.5.3 Geología estructural

Dentro de la zona de estudio, se encuentran diversos tipos de fallas, las cuales han influido en la morfología del área del acuífero Laguna de Hormigas; existen fallas normales en los costados de las sierras y profundos valles rellenos por aluvión cuaternario.

También se observan cuatro pliegues importantes en las rocas calcáreas cretácicas (Cerros Prietos, Las Choyas, Las Damas y La Tasajera). La mayoría de las fallas tienen una orientación NNO-SSE, afectando tanto a las rocas carbonatadas cretácicas como a las rocas ígneas terciarias. Las principales fallas son: Ágata, Cordón La Boquilla, El Dos, Las Choyas y Las Escaramuzas (cabalgadura), así como cuatro fallas laterales (Cordón la Boquilla, Las Choyas y un par en la sierra Las Damas) probablemente formadas debido a esfuerzos de



cizalla relacionadas con el acomodo de esfuerzos tectónicos en la zona (JCAS- UACH, 2015).

Al sur se observan varias fallas importantes con la misma orientación NNO-SSE (Hormigas, El Torre, La Zanja) así como varias fallas pequeñas que afectan a las rocas ígneas de las sierras.

En la porción occidental (sierras El Cuervo, El Venado, etc.) existe un grupo de fallas normales importante y fracturamiento en las rocas ígneas, también se observan dos fallas laterales (sierras El Oso, El Venado) en la porción SO. Se localizaron tanto una falla inversa cerca de la Tasajera, como un klippe (posiblemente debido a fallas de cabalgadura en el área) cerca del Placer de Guadalupe y en la sierra de Gómez se presentan tres fallas laterales con una dirección similar NW-SE y casi perpendiculares a las fallas El Torre y La Zanja (JCAS-UACH, 2015).

En la porción oriental (Placer de Guadalupe) donde predominan las rocas sedimentarias del Cretácico inferior no se presenta la misma densidad de fallas, pero se aprecia un gran número de pliegues (El Morrión, La Tasajera), (Figura 4) (JCAS-UACH, 2015).

Tabla 3: Lista de cartas geológicas utilizadas (SGM)

CARTA	CLAVE	DEPENDENCIA	DATUM
DELICIAS	H13-11	SGM	ITRF-2008
BUENAVENTURA	H13-7	SGM	ITRF-2008
OJINAGA	H13-8	SGM	ITRF-2008
CHIHUAHUA	H13-10	SGM	ITRF-2008

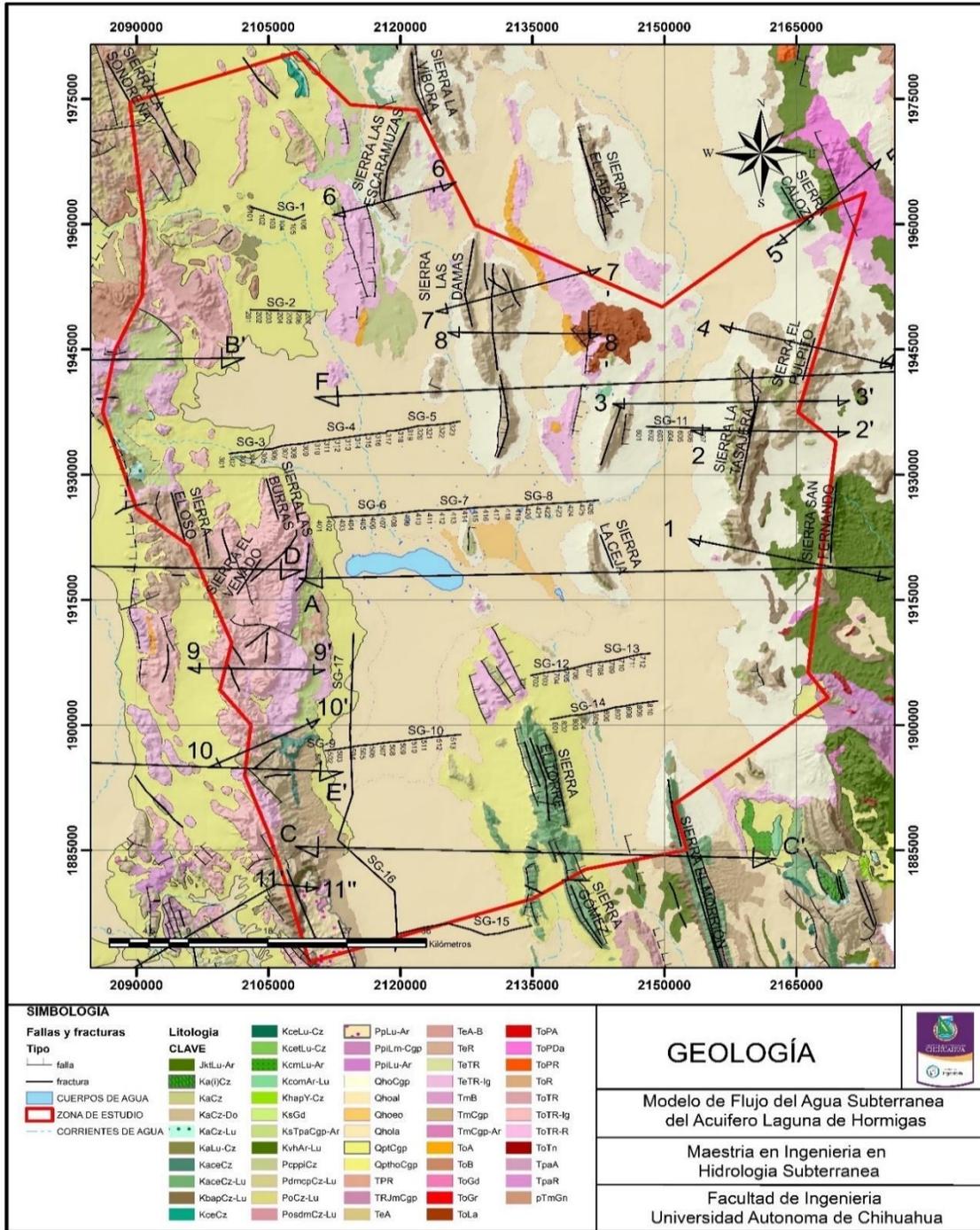


Figura 4: Geología, Shape de litología del SGM, elaborado en ARCGIS

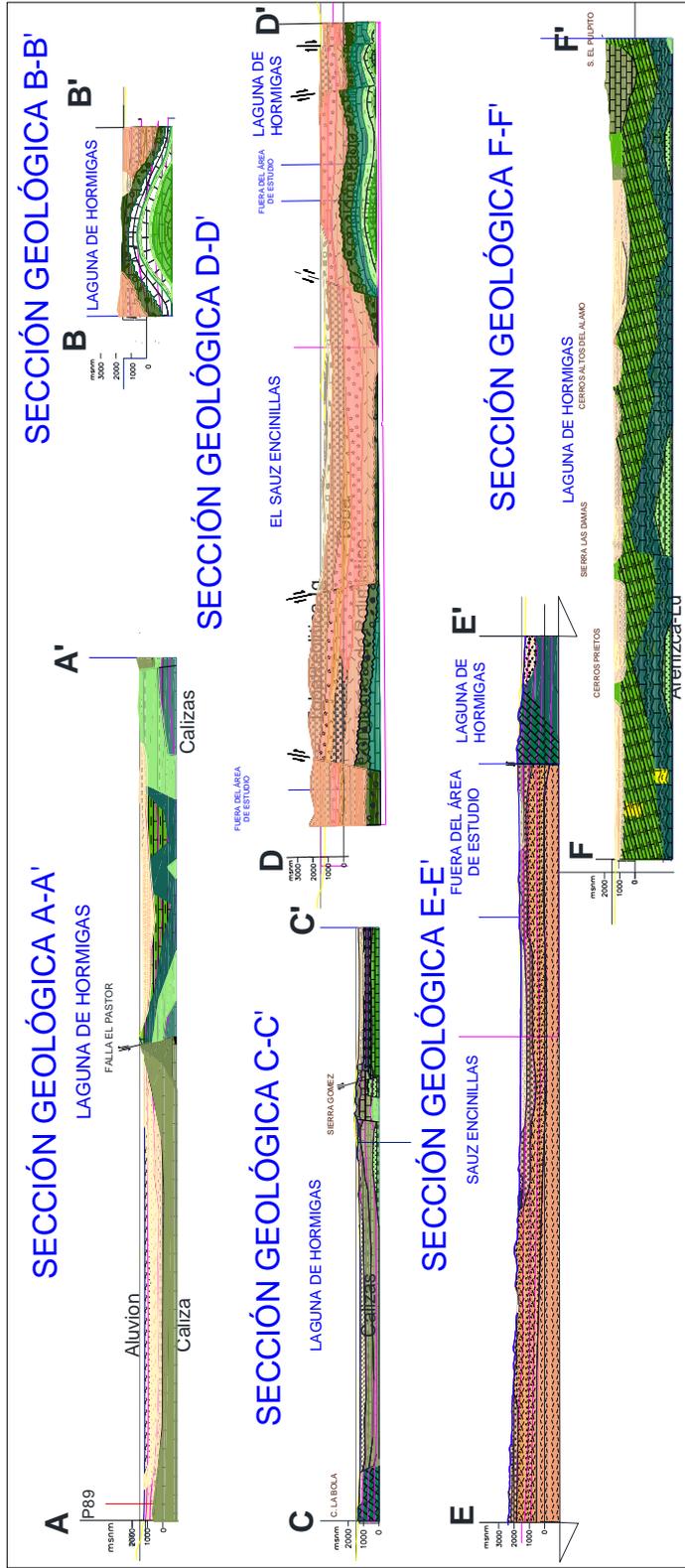


Figura 5: Secciones Geológicas adaptadas de JCAS- UACH, 2015 (AutoCAD)



2.6 Uso de suelo y vegetación

La cantidad de precipitación que llega a la superficie terrestre depende en gran medida de la cobertura vegetal. Ésta cubierta intercepta gran parte de la precipitación y la almacena temporalmente, donde es devuelta a la atmósfera por medio de la evapotranspiración, la distribución de la vegetación es importante para determinar distintos factores que intervienen de forma directa e indirectamente con la infiltración del agua a través del suelo y el escurrimiento que a su vez son necesarios para determinar las entradas de agua a un acuífero en cuestión (García et al, 2018). Los cambios en la cobertura y uso del suelo afectan los sistemas globales (por ej. atmósfera, clima y nivel del mar), dichos cambios ocurren en un modo localizado en suficientes lugares para sumar un total significativo (Meyer and Turner, 1992). En este caso la vegetación que se encuentra en el área de estudio del acuífero Laguna de Hormigas es la siguiente:

2.6.1 Asentamiento Humano

Se refiere a las localidades urbanas principales, de las cuales se considera que cuentan con un mínimo poblacional de 2500 habitantes, englobando los distintos usos de suelo que se pueden configurar en el área denotada. El área que cubre esta clasificación en uso de suelo y vegetación, se localiza al oeste de la porción central del acuífero y representa únicamente el 0.01% del área en cuestión, corresponde a la localidad de Nuevo Porvenir. Destacan, además, poblaciones rurales de importancia en el acuífero, como son: La Esperanza ubicada al noroeste del acuífero y Estación Colonias localizada al este del acuífero (CONAPO, 2017).

2.6.2 Cultivos

Existen tres tipos de clasificación para los cultivos dentro de la zona de estudio, estos son: por la disponibilidad de agua del cultivo, por temporalidad del cultivo principal y por temporalidad del uso agrícola (SICT, 2009).

Los principales cultivos que se cosechan son los siguientes:



- Para la temporada de otoño invierno: avena forrajera, avena grano, cebolla, lechuga, rye grass, trigo y triticale.
- Para la temporada primavera verano: algodón, avena, cebolla, chile verde, frijol, lechuga, maíz forrajero, maíz grano, sorgo y tomate rojo.
- Los cultivos que se cosechan permanentemente son alfalfa y nuez (SIAP, 2017).

Los cultivos se encuentran ubicados de manera esporádica; En el extremo sur del acuífero con una superficie correspondiente al 0.87% de la superficie total, siendo aquí en donde se presenta en mayor proporción y al oeste de la zona central en colindancia con el asentamiento urbano y cerca del extremo noroeste, (Tabla 4) (JCAS-UACH, 2015).

Tabla 4: Tipos de cultivo por año (JCAS-UACH, 2015)

CULTIVOS POR AÑO		
1985	2005	2007
Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa
Algodón	-	Algodón
Avena i	-	Avena i
Avena v	Avena v	Avena v
Cebolla i	-	-
Cebolla v	-	-
Chile	-	-
-	Frijol	Frijol
Lechuga	-	-
Maíz	Maíz	Maíz
Nogal	Nogal	Nogal
<u>Reygrass</u>	<u>Reygrass</u>	-
Sorgo	Sorgo	Sorgo
Tomate	-	-
Trigo	Trigo	Trigo
-	<u>Tricalate</u>	-



2.6.2.1 Disponibilidad de agua del cultivo

Se define como la forma en que a un cultivo se le suministra agua para su desarrollo.

Tabla 5: Clasificación del cultivo por Disponibilidad de Agua (SCIT, 2009)

DISPONIBILIDAD DE AGUA DEL CULTIVO	CARACTERÍSTICAS
Temporal	Es el tipo de agricultura en el que el ciclo vegetativo del o los cultivos depende del agua de lluvia, independientemente del tiempo que dure el cultivo.
Riego	Tipo de agricultura en el que se proporciona agua suplementaria a los cultivos durante el ciclo agrícola.
Humedad	Es la agricultura que se desarrolla aprovechando la humedad del suelo e incluye a los terrenos de zonas inundables o con materiales amorfos que retienen agua y que aún en época de sequía requieren humedad.

2.6.2.2 Temporalidad del cultivo principal

Este clasificador también está relacionado con las prácticas de cultivo, se relaciona con su duración en el terreno (Tabla 6).

Tabla 6: Clasificación del cultivo por Temporalidad en el terreno (SCIT, 2009)

TEMPORALIDAD DEL CULTIVO	CARACTERÍSTICAS
Anual	El cultivo permanece sembrado un tiempo que no excede de un año. Puede haber rotación de cultivos en la misma zona en el mismo ciclo agrícola o en diferentes ciclos agrícolas (p.ej. rotación de cultivos maíz en el ciclo primavera-verano; cebada en el ciclo otoño-invierno).
Semipermanente	El desarrollo del cultivo dura entre dos y diez años (p.ej. alfalfa, caña de azúcar).
Permanente	Los cultivos permanecen sembrados más de diez años (nopal, manzana, mango). En este tipo se considera el cultivo de agave tequilero aunque tenga una duración menor.



2.6.2.3 Temporalidad del uso agrícola

La temporalidad del uso agrícola se refiere al manejo que se le da al uso del suelo agrícola. Los criterios que aplican para este clasificador se muestran en la Tabla 7.

Tabla 7: Clasificación del cultivo por Temporalidad del Uso Agrícola (SCIT, 2009)

TEMPORALIDAD DEL USO AGRÍCOLA	CARACTERÍSTICAS
Fijo	El terreno donde se practica la agricultura permanece sembrado más de cinco años.
Itinerante	Las áreas de cultivo se siembran por periodos que van de 1 a 5 años y luego son abandonadas.

2.6.3 Matorral

Este tipo de vegetación se presenta distribuido en la porción nororiental del estado de Chihuahua; comprende parte de los municipios de Aldama, Ahumada, Chihuahua y Coyame. Su asiento geológico data del periodo Cenozoico Superior Clástico, constituido por aluviones; la topografía del terreno es de planos con ondulaciones y planos inclinados con pendientes que no pasan del 5%; pertenece a la clase “a nivel” o “casi a nivel” y se encuentran desde 1250 a 1400 metros de altitud. El suelo es de origen aluvial profundo (más de 50cm), de color pardo oscuro y pardo rojizo oscuro y gris rosáceo, la textura franco-arcillosa a franco-arenosa, con grava y poca piedra en el perfil y en la superficie. El clima que domina es muy seco templado con verano cálido, con temperatura anual de 15° a 18° C y precipitación media anual de 250 a 300 mm; con régimen de lluvias en verano, época seca de 8 a 9 meses y periodo libre de heladas de 230 a 250 días. Las especies que caracterizan este sitio son: gobernadora *Larrea tridentata*, hojasén *Flourensia Cernua*, Mariola *Parthenium incanum*, guayule *Parthenium argentatum*, tecomblate *Microrhamnus ericoides*; en arroyos y pequeños cerriles entran largoncillo *Acacia constricta*, mezquite *Prosopis juliflora* y junco *koerberlinia spinosa*; también también se encuentra agrillo *Rhus spp.*, salvia *Salvia adenophora* y oreganillo *Sida spp.* (SARH, 1978).



2.6.3.1 Matorral desértico rosetófilo

Esta vegetación se distingue por tener hojas en forma de roseta, se presenta en laderas de cerros de origen sedimentario, en las partes altas de abanicos aluviales o sobre conglomerados en zonas áridas y semiáridas en mayor proporción en el noreste y sureste en el municipio de Aldama, encontrando algunas de las especies anteriormente mencionadas como el guayule (*Parthenium argentatum*) y palma samandoca (*Yucca camerosana*) (JCAS-UACH, 2015).

2.6.3.2 Matorral desértico micrófilo

Este tipo de vegetación tiene hojas diminutas, se presenta en terrenos aluviales y puede estar formado por asociaciones de especies sin espinas, con espinas o mezclados, en época de estiaje prácticamente desaparece, mientras que en periodo de lluvia germina rápidamente, el matorral *Larrea tridentata* y *Flourensia cernua* son los más abundantes en la zona de estudio. Se encuentra distribuido en la mayor parte del acuífero, pero es más acentuado en la zona norte, esta cobertura vegetal es la de mayor dominancia en la zona con 3231.96 km² de superficie correspondientes al 53.73% del área total (JCAS-UACH, 2015).

2.6.3.3 Matorral secundario

Conformada principalmente por arbustos o árboles bajos, inermes o espinosos, este tipo de vegetación ha sido presa de la alteración antropogénica y degradación producida por la expansión de la ganadería. Dentro de este tipo de matorrales se clasifican principalmente el matorral submontano, desértico rosetófilo y desértico micrófilo. Se encuentra distribuido en la franja central y este en zonas con topografía menos pronunciada que el matorral, con 12.2% de superficie correspondiente (JCAS-UACH, 2015).

2.6.4 Pastizal

Son comunidades vegetales caracterizadas por la dominancia de gramíneas (pastos o zacates) o graminoides en las cuales se incluyen pastizales determinados tanto por condiciones



naturales de clima y suelo, así como aquéllos establecidos por influencia humana (INEGI, 2013).

En la entidad se presentan dos tipos de pastizales naturales y uno propiciado por las actividades humanas. Los primeros dos se refieren al pastizal natural, asentado en gran medida por las condiciones climáticas (CONABIO, 2014).

Los pastizales cubren 24% del territorio chihuahuense. Su composición natural está integrada por plantas herbáceas de tipo graminiforme. Constituyen uno de los ecosistemas pastoriles más adecuados para dar sustento a los animales herbívoros domésticos, que a su vez sirven para el consumo humano. La diversidad que se halla en el pastizal natural se encuentra seriamente amenazada por el cambio de uso de suelo, la presión demográfica y el acelerado avance de la agricultura (CONABIO, 2014); estos cambios tienen una influencia directa en el escurrimiento superficial, la infiltración del agua hacia el subsuelo y la evapotranspiración.

2.6.4.1 Pastizal natural

La principal vegetación de este tipo de pastizal son las gramíneas o gramínoideas (zacates o pastos) formando una comunidad en conjunto con hiervas o arbustos de otras familias, su altura media es entre 20 y 70 cm, su presencia se determina ya sea positiva o negativamente por el clima, condiciones del suelo y las interacciones antropogénicas. El conjunto de esta manera delimitado incluye biocenosis diversas, tanto en su composición florística, como a sus condiciones ecológicas, a su papel en la sucesión, a su dependencia de las actividades humanas y aún a su fisonomía. Su presencia se acentúa en zonas semiáridas y de clima fresco, en zonas con pendiente suave y suelos de origen volcánico, están localizados en zonas de transición entre los matorrales y el límite inferior de los bosques, para altitudes entre los 110 y 2500 m, con temperaturas medias anuales alrededor de 12 a 20 °C y precipitaciones entre 300 y 600 mm, las especies frecuentemente dominantes encontradas en la zona son las del género de *Bouteloua*, siendo la de mayor predominancia la *Bouteloua gracilis*, en suelos abundantemente pedregosos se encuentra la *Bouteloua curtipendula* y *Bouteloua hirsuckii*, *Bouteloua radicata*,



Bouteloua repens, *Bouteloua eriopoda*, y *Bouteloua chondrosioides* con alturas desde 20 a 70 cm, desarrollándose en suelos con pH de 6 a 8. Los suelos salino-sódicos son aptos para el desarrollo de pastizales halófilos, se encuentran mayormente en los fondos de las cuencas en zonas áridas y semiáridas, en suelos arcillosos con pH entre 7 y 8.5, con una altura entre 40 y 70 cm. Su presencia en la zona central y este, es dispersa y mínima, mientras que, en la zona oeste su densidad aumenta, abarcando un 14.86% de la superficie total del acuífero (JCAS-UACH, 2015).

2.6.4.2 Pastizal halofito o halofilo abierto

Este tipo de vegetación cubre extensas áreas en la región sur y oriental del estado, donde ocupa la mayor parte de las cuencas cerradas de la zona, como la de Hormigas, que es de las más grandes; este pastizal está distribuido en los municipios de Ahumada, Coyame, Ojinaga, Aldama, por la carretera Chihuahua- Durango, entre otros. Se encuentra sobre terrenos que datan del periodo Cenozoico Superior Clástico (Csc), constituido por aluviones; la topografía del terreno es de llanuras planas con inclinaciones leves que no exceden el 4%, pertenece a la clase de “a nivel” o “casi a nivel” y su altitud es de 1250 a 1300 metros. El suelo es de origen aluvial, profundo (más de 50 cm), de color pardo grisáceo muy oscuro a negro, la textura es franco-arcillosa a areno-limosa, de estructura blocoso-angular y columnar, de consistencia dura, drenaje interno y escurrimiento superficial lento. Se presenta dentro de rangos de clima seco y muy seco BSok, BWk y BW_h; la variación en temperatura media anual es de 15 a 20°C y en precipitación pluvial de 250 a 400 mm al año, con régimen de lluvias en verano, época seca de 7 a 8 meses y periodo libre de heladas de 200 a 225 días. La especie que caracteriza este sitio es el toboso *Hilaria mutica* y, en menor proporción, el toboso chino *Hilaria jamesii*; en todos los casos se presentan, aunque en forma escasa, los pastos navajita *Bouteloua gracilis*, navajita velluda, *B. hirsuta*, navajita negra *B. eriopoda*, navajita china *B. breviseta* y algunos otros (SARH, 1978).



2.6.4.3 Pastizal halófito o halofilo arbosufrutescente

Se localiza en la región norte central y oriental del estado, ocupando áreas marginales al pastizal halófito abierto y otras de pequeñas corrientes en las cuencas cerradas de su área de distribución; cubre parte de los municipios de Chihuahua, Aldama, Coyame y Ahumada. Ocupa terrenos que datan del periodo Cenozoico Superior Clástico (Csc); la topografía del terreno es de planos con pendientes que varían de 0 a 4%, pertenece a la clase de “a nivel” o “casi a nivel” y se encuentran entre los 1250 a 1350 metros de altitud. El suelo es de origen aluvial profundo (más de 50 cm), de color pardo grisáceo muy oscuro a negro, la textura franco-arcillosa a areno-limosa, estructura blocoso-angular a columnar, el pH es alcalino en todos los casos superior al 7.5 y el suelo tiene tendencia a la acumulación de sales de sodio. El clima que domina en el área de distribución, es muy seco templado con verano cálido BWk, donde la temperatura media anual varía de 15° a 16°C y la precipitación pluvial de 250 a 300mm anuales, con régimen de lluvias en verano, época seca de 8 a 9 meses y período libre de heladas de 210 días. En menor proporción se presenta el clima muy seco semicálido BWh, en el cual la diferencia se presenta por los rangos de temperatura media anual de 18° a 21°C y período libre de heladas de 245 días. Las gramíneas dominantes son: toboso *Hilaria mutica* y zacate galleta *H. jamesii*; la población de otras especies de gramíneas es muy baja, aunque invariablemente se presentan navajita *Bouteloua gracilis* y navajita velluda *B. hirsuta* (SARH, 1978).

2.6.4.4 Pastizal inducido

Los pastizales inducidos se constituyen de gramíneas que se establecen cuando es eliminada la cubierta vegetal original. Este pastizal puede aparecer como consecuencia de desmontes en cualquier tipo de vegetación, también puede establecerse en áreas agrícolas abandonadas, o bien en terrenos que se incendian con frecuencia. Su distribución en el estado abarca diferentes condiciones naturales, pues se desarrollan tanto en las partes altas de la sierra,



donde ocupan espacios que sostenían vegetación de bosque, como también en la llanura, en terrenos propios de matorral xerófilo, además de en lomeríos, valles y mesetas (INEGI, 2013).

Este sitio de productividad forrajera está constituido por praderas de gramíneas, de talla mediana (0.5 metros promedio), perennes y blandas; este pastizal se formó por sucesión secundaria, después de que fueron eliminados los bosques aciculifolio, aciculiesclerófilo, para usar las tierras en agricultura de temporal. Los lugares abandonados dieron origen al establecimiento de este pastizal. Se localiza en áreas pequeñas y aisladas, generalmente en mesetas y planos. El asiento geológico data del periodo Cenozoico Medio volcánico (Cmv). La topografía del terreno consiste en mesetas, lomeríos y bajíos, con pendientes uniformes que varían de 0 a 6%, dentro de las clases de “a nivel” o “casi a nivel” y “ondulado”, se encuentra de 2000 a 2700 metros de altitud. El suelo es de formación in-situ y aluvial con profundidad media (25 a 50cm), de color pardo muy oscuro a pardo grisáceo oscuro a pardo rojizo oscuro; la textura es franco-arcilloso a franco-arenosa, con grava y en ocasiones piedra en la superficie y en el perfil, la estructura es blocoso-angular, la consistencia dura a muy dura, el drenaje interno varía de lento a medio, con escurrimiento superficial moderado, y el pH es por lo general ligeramente ácido. Las gramíneas dominantes son navajita *Bouteloua gracilis*, navajita velluda *B. hirsuta*, benderilla *B.*, *curtipendula*, lobero *Lycurus phleoides*, triguillo *Piptochaetium fimbriatum*, bromo *Bromus carinatus*, testuca *Festuca* spp., y bulboso *Panicum bulbosum* (SARH, 1978).

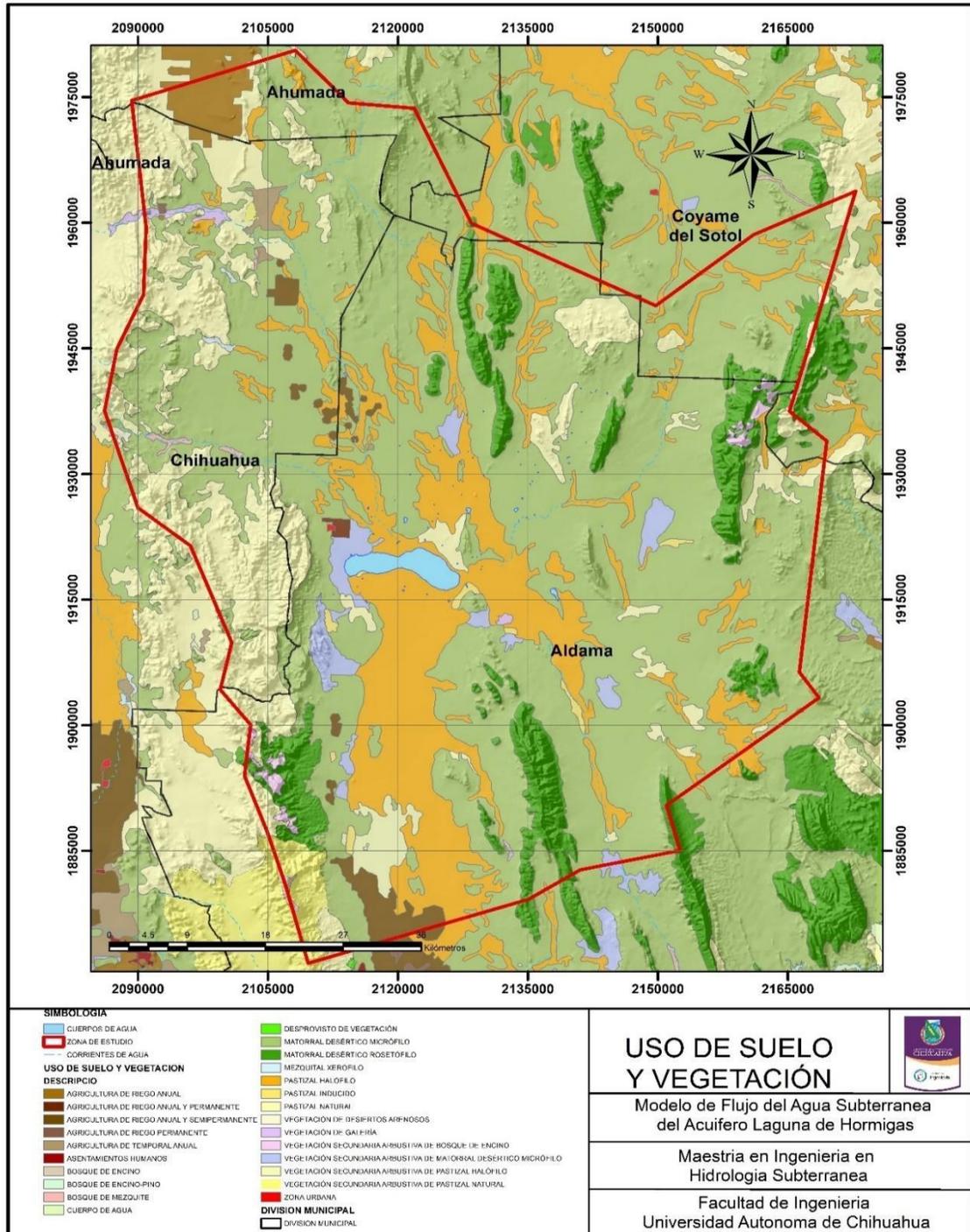


Figura 6: Uso de suelo y vegetación, shape (Vectorial), escala 1:250,000 de INEGI. (elaborado en ArcGIS)



2.7 Edafología

El suelo es resultado de la interacción de una serie de factores activos como el clima y los organismos vivos, que inciden sobre factores pasivos (roca madre y relieve) a través del tiempo. Los suelos están formados por horizontes o capas que están acomodadas en forma paralela a la superficie. La mayoría de los suelos presentan tres o cuatro horizontes, caracterizados principalmente por el color, textura, estructura, contenido en materia orgánica, presencia de carbonatos y sales solubles, estas características son resultado de los factores formadores del suelo y sirven de base para la clasificación y denominación de los suelos. El análisis de estas características nos permitirá saber aspectos como profundidad y drenaje.

En el acuífero Laguna de Hormigas están presentes nueve unidades de suelos, dentro de las cuales existen ocho diferentes subunidades de suelos, todas ellas se describen a continuación (Figura 7):

2.7.1 Castañozem

Del latín castanea, castaño y del ruso zemlja, tierra, su símbolo es K. Suelos de clima árido o semiárido, con climas más lluviosos como sierras o llanuras, con una capa superficial gruesa de color pardo oscuro y rica en carbono orgánico, ricos en magnesio, potasio y carbonatos en el subsuelo. Requieren fertilizantes fosfatados y un buen programa de riego que evite riesgos de salinización. Son susceptibles a la erosión hídrica y eólica especialmente si son terrenos agrícolas en descanso o tierras de sobrepastoreo (INEGI, 2008).

Esta unidad se encuentra en la parte sur del acuífero. En promedio tienen más de 70 cm de profundidad y son caracterizados por presentar una capa superior de color pardo o rojizo obscuro, puede presentar en el subsuelo caliche ligeramente sementado o suelto. La vegetación que podemos encontrar en la zona de estudio haciendo referencia a este tipo de suelo está conformada principalmente por pastizales, por lo que el uso general que se le asigna es para el pastoreo en pastizales inducidos o cultivados. Este tipo de suelo es óptimo



para cultivos de granos, oleaginosas y hortalizas, debido a su alta fertilidad natural y baja tendencia a la erosión (JCAS-UACH, 2015).

2.7.2 Feozem

Del griego, phaeo: pardo; y del ruso, zemljá: tierra. Literalmente, tierra parda, su símbolo es H en la carta edafológica. Son suelos que se pueden presentar en cualquier tipo de relieve y clima, excepto en regiones tropicales lluviosas y zonas muy desérticas; en la zona de estudio, podemos encontrarlo presente en la porción noroccidental del acuífero. Es el cuarto tipo de suelo más abundante en el país y se caracteriza por tener una capa superficial oscura, suave y rica en materia orgánica y nutrientes; su profundidad es variable dependiendo de las características topográficas en donde se encuentre, cuando son profundos, se encuentran generalmente en terrenos planos y se utilizan para agricultura de riego y temporal de granos, legumbres y hortalizas con altos rendimientos, en cambio cuando son poco profundos tienen rendimientos bajos ya que son susceptibles a erosión ya que presentan como principal limitante la roca o alguna cementación muy fuerte en el suelo, sin embargo, pueden utilizarse para el pastoreo o la ganadería, aunque su uso dependen de la disponibilidad de agua para riego así como de las características del terreno (INEGI, 2008).

2.7.3 Fluvisol

Del latín, fluvius: río. Literalmente, suelo de río, su símbolo es J. Se localiza a lo largo de los arroyos, principalmente en la parte noroeste del acuífero. Son suelos acarreados por el agua por lo que siempre se encuentran cercanos a los cauces, de mediana profundidad y estructura débil, presentando capas alternadas de arena con piedras o gravas redondeadas a consecuencia de la corriente y crecida del agua en los ríos, algunos subtipos como los mólicos y calcáricos son de considerable importancia en la agricultura por su disponibilidad de nutrientes (INEGI, 2008).



2.7.4 Litosol

Proviene del latín, lithos: piedra. Literalmente, suelo de piedra, su símbolo es I. Este suelo se distribuye principalmente en el extremo occidental y al norte del acuífero y un poco menos acentuado en el este y sur del acuífero, así como en la porción centro-norte. Son los suelos más abundantes del país, ya que ocupan 22 de cada 100 ha de suelo, puede presentarse en cualquier tipo de clima y con diferentes tipos de vegetación, está presente en todas las sierras de México, barrancas, lomeríos y en algunos terrenos planos, su profundidad es menor a 10 cm, limitada por la presencia de roca, tepetate o caliche endurecido. El uso de estos suelos depende de la vegetación que los cubre, la susceptibilidad a la erosión que presentan se da en función de los factores ambientales. No tiene subunidades y puede ser destinado a la agricultura para el cultivo de maíz o nopal, si existe el suministro suficiente de agua, también puede emplearse para pastoreo más o menos limitado cuando hay matorrales o pastizales y en bosques y selvas su uso es forestal (INEGI, 2008).

2.7.5 Regosol

Del griego, reghos: manto, cobija o capa de material suelto que cubre la roca, su símbolo es R. Esta unidad, mayormente se localiza enseguida del litosol, en las partes altas, se encuentra distribuida de manera similar a este último, dentro del acuífero. Suelos ubicados en diversos tipos de clima, vegetación y relieve. Tienen poco desarrollo y no presentan capas muy diferentes entre sí, son de color claro y pobres en materia orgánica con mucha similitud a la roca de origen. Son poco profundos, su fertilidad es variable y su productividad está condicionada a la pedregosidad y profundidad que presentan (INEGI, 2008).

2.7.6 Solonchak

Del ruso, sol: sal, Literalmente, suelos salinos, su símbolo es Z. Dentro del acuífero se distribuye en la porción central extendiéndose hacia el sur, su localización coincide con el área que cubre la Laguna el Cuervo. Se presentan en zonas donde se acumula el salitre, como lagunas, lagos o en las partes bajas de valles y llanos de las regiones secas, donde



generalmente presentan alto contenido de sales en todo o una parte representativa de estos. Debido a su alto contenido de sal la vegetación característica son matorrales y o pastizales halófilos, por ellos su desempeño agrícola es muy limitado a cultivos resistentes a sales o donde se ha disminuido la concentración de salitre por medio del lavado de suelo o la erosión (INEGI, 2008).

2.7.7 Vertisol

Viene del latín *vertere*: voltear. Literalmente, suelo que se revuelve o se voltea, su símbolo es V. Se encuentran agrupaciones pequeñas distribuidas en todo el acuífero, principalmente en la porción centro-norte. Son suelos de climas templados y cálidos, especialmente en zonas con un periodo largo de lluvia y otro de estiaje bien definidas. La vegetación natural va de selvas bajas a pastizales y matorrales. Contiene un alto contenido de arcillas, las cuales le otorgan la propiedad de ser expandible y húmedo formando superficies de deslizamiento llamadas facetas y que por ser colapsables en seco forman grietas en la superficie o determinada profundidad, su color es generalmente negro o gris llegando a ser café rojizo. Su uso agrícola es variado y productivo ya que son suelos muy fértiles, sin embargo, debido al alto contenido de arcilla son difíciles de trabajar. En la agricultura se utilizan para producir caña, cereales hortalizas y algodón, son poco susceptibles a la erosión y tienen un alto riesgo de salinización (INEGI, 2008).

2.7.8 Xerosol

Del griego, *xeros*: seco. Literalmente, suelo seco. Característico de zonas áridas y semiáridas, su símbolo es X, su vegetación natural es de matorral y pastizal, es el tercer tipo de suelo más frecuentemente encontrado en el territorio. Es la unidad más abundante dentro del acuífero, se localiza alrededor de la zona de la Laguna el Cuervo, abarcando la mayor parte del llano. Tienen una capa superficial de color claro debido al bajo contenido de materia orgánica y debajo de esta capa puede existir un subsuelo rico en arcillas que generalmente presentan aglomeraciones de cal, cristales de yeso o caliche con algún grado de dureza. Su



rendimiento agrícola se encuentra en función de la disponibilidad de agua, tienen baja susceptibilidad a la erosión la cual se incrementa en terrenos abruptos, su vegetación natural es el pastizal y matorral (INEGI, 2008).

2.7.9 Yermosol

Del español, yermo: desértico, desolado. Literalmente, suelo desolado, su símbolo es Y. Dentro del acuífero se pueden observar pequeñas porciones de esta unidad distribuidas y alineadas que van desde la parte central del noroeste hacia el sur en la parte baja del acuífero. Esta localizado en zonas áridas, principalmente en la región norte de la república. En ocasiones presentan capas de cal, yeso y sales en la superficie o en alguna parte del subsuelo, la capa superficial es pobre en contenido orgánico. Su uso agrícola depende de la dotación de agua que se pueda asignar, sin embargo, tiene buenos rendimientos en la agricultura, es común encontrar vegetación como la candelilla, nopal y lechuguilla (INEGI, 2008).

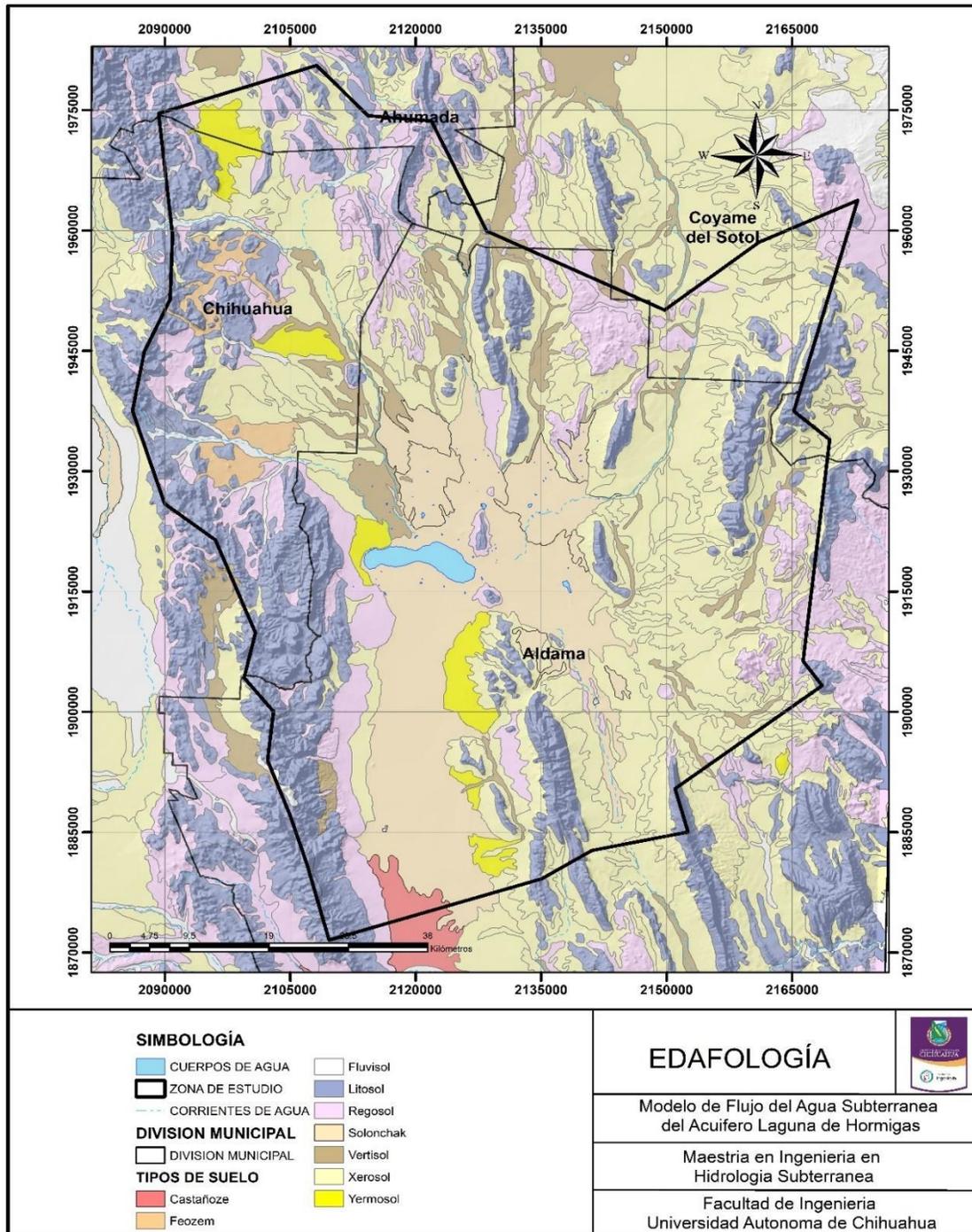


Figura 7: Edafología. Shape edafología escala 1:250 000 : serie III de INEGI, elaborado en ArcGIS



2.8 Recarga y descarga

La recarga subterránea del acuífero proviene de la infiltración de la precipitación; esta infiltración se lleva a cabo en el pie de monte y en sierras de roca fracturada con permeabilidad adecuada; el acuífero en cuestión también recibe aportaciones laterales procedentes de las partes altas donde las rocas tienen permeabilidad media o baja, por lo tanto, el agua se escurre de estas zonas serranas hacia el valle de material granular para posteriormente infiltrarse, evaporarse y evapotranspirarse (CONAGUA, 2015).

La infraestructura hidráulica en la zona se concentra en el extremo sur y norte del acuífero. Existen sistemas de riego ubicados en las zonas de cultivo, donde se encuentran pivotes de riego al norte, presas pequeñas y una serie de canales no revestidos al sur que transportan agua hacia las zonas de cultivo; en donde una parte del volumen de agua de uso Agrícola es infiltrada de regreso al subsuelo por retorno de riego. No existen presas grandes de almacenamiento de agua superficial, ni distritos de riego, ni tampoco obras de recarga artificial del acuífero (JCAS-UACH, 2015).

La descarga se efectúa por medio de pozos de bombeo y de manantiales, los cuales se encuentran distribuidos principalmente en el noroeste del acuífero, así como en la zona de la laguna (JCAS-UACH, 2015).

2.9 Hidrografía superficial

El Acuífero se ubica en la Región Hidrológica 34, Cuencas Cerradas del Norte, constituida por pequeñas cuencas que depositan el agua pluvial en lagunas. Pertenece al a la Subregión Cuencas Cerradas del Norte y a la cuenca hidrológica Arroyo El Carrizo y otros y a la subcuenca Laguna el Cuervo (Laguna de Hormigas).

Todos los arroyos que se encuentran dentro del área de estudio son intermitentes; es decir, solo llevan agua en épocas de lluvia (JCAS- UACH, 2015).

La planicie lacustre está representada por la Laguna de Hormigas ubicada en la parte centro-sur, de tipo intermitente y endorreica, la cual recibe aportaciones principalmente de



los arroyos El Venado, El Pulpito, Las Ranas, La Zanja y Las Damas, que también son de tipo intermitente, por lo que sólo contiene agua en época de lluvias (CONAGUA, 2015).

Las corrientes naturales de agua superficial forman parte de la recarga del acuífero, principalmente en el valle conformado por material aluvial, donde la conductividad hidráulica es favorable; aunque también en las sierras donde la roca está fracturada debido a las fallas y fracturas tiene buena conductividad hidráulica (CONAGUA, 2015).

2.10 Hidrografía subterránea

El acuífero Laguna de Hormigas, es heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos lacustres hacia las partes más bajas de la cuenca y está conformado por un medio granular y otro fracturado subyacente (CONAGUA, 2015).

En su parte superior, existe un medio granular con amplia distribución espacial, cubriendo toda la planicie del interior del valle, caracterizado por la presencia de depósitos clásticos y conglomerados con espesor de varios cientos de metros. Los rellenos que están por encima de los niveles de saturación actúan como transmisores del agua hacia las formaciones subyacentes, especialmente en las sierras que delimitan el acuífero, en donde funcionan como zonas de recarga; en caso contrario actúan conjuntamente con los depósitos de relleno de valles, como una sola unidad geohidrológica (CONAGUA, 2015).

La porción inferior está alojada en un medio fracturado desarrollado en rocas volcánicas, que permite funcionar como un acuífero de bajo rendimiento. A mayor profundidad las rocas calizas de las Formaciones Buda y Aurora constituyen horizontes acuíferos que no han sido explorados en la zona, pero que en otras regiones han mostrado un potencial favorable. Debido a que estas formaciones que se encuentran sobreyacidas por lutitas o secuencias de lutitas y areniscas, pueden presentar condiciones de confinamiento (CONAGUA, 2015).



2.10.1 Usos del agua subterránea

En la zona de estudio existen localidades pequeñas donde la mayoría de las personas se dedican a la agricultura y a la ganadería, el agua subterránea ha sido explotada por bombeo durante años principalmente para fines agrícolas, en segundo nivel para uso ganadero-agrícola y en tercer lugar para uso doméstico agrícola (CONAGUA, 2011). Del año 1985 al 2005 no se notó mucha diferencia en cuanto a volumen de extracción, pero a partir del año 2008 aproximadamente comenzaron a aumentar el volumen de pozos por lo tanto aumentó considerablemente el volumen de extracción (GOOGLE EARTH, 2018).

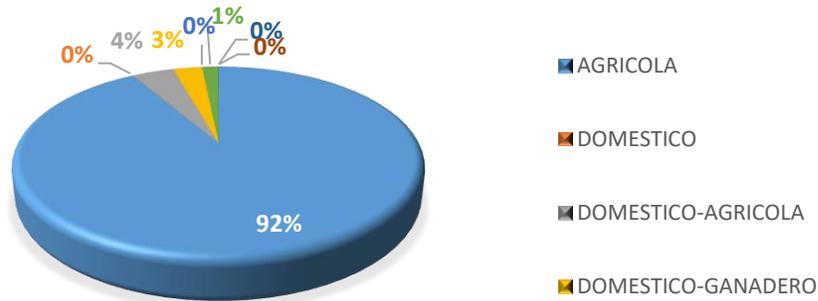
La estimación de volumen agrícola considera el total de pozos censados y pozos agregados que de acuerdo con la imagen de satélite corresponden a un área agrícola activa para ese año (JCAS-UACH, 2015).

Tabla 8: Volúmenes de extracción para los años 1985, 2005 y 2011 (JCAS-UACH, 2015)

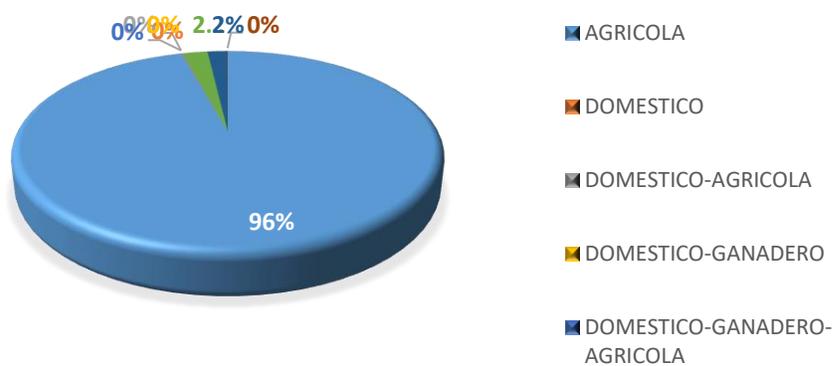
USO	VOLUMEN 1985 (m ³ /año)	VOLUMEN 2005 (m ³ /año)	VOLUMEN 2011 (m ³ /año)
AGRÍCOLA	18652527.04	20680033.82	90629242.59
DOMÉSTICO	9470	14700	19900
DOMÉSTICO-AGRÍCOLA	806768	0	676858.2609
DOMÉSTICO-GANADERO	567870	0	0
DOMÉSTICO-GANADERO- AGRÍCOLA	5300	0	0
GANADERO	309548	491080	216480
GANADERO-AGRÍCOLA	7800	387827.4971	1101751.211
PÚBLICO-URBANO	0	12000	5200
TOTAL	20359283.04	21585641.31	92649432.06



PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE ACUERDO A SU USO PARA EL AÑO 1985



PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE ACUERDO A SU USO PARA EL AÑO 2005



PORCENTAJE DE EXTRACCIÓN DE AGUA DE ACUERDO A SU USO PARA EL AÑO 2011

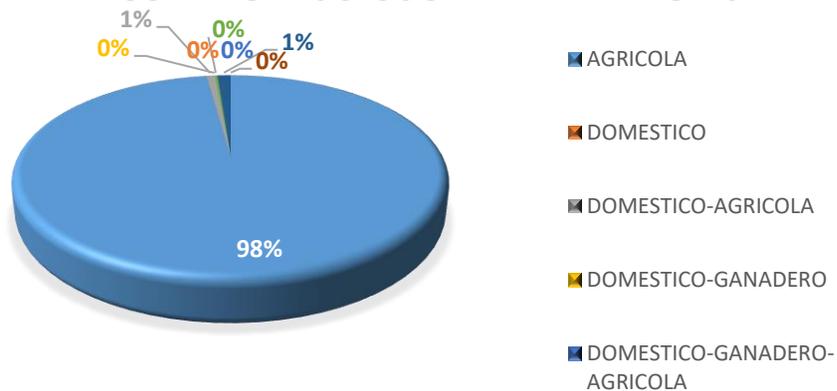


Figura 8: Gráficas de porcentaje de extracción de agua de acuerdo a su uso para los años 1981, 2005 y 2011, adaptada de CONAGUA

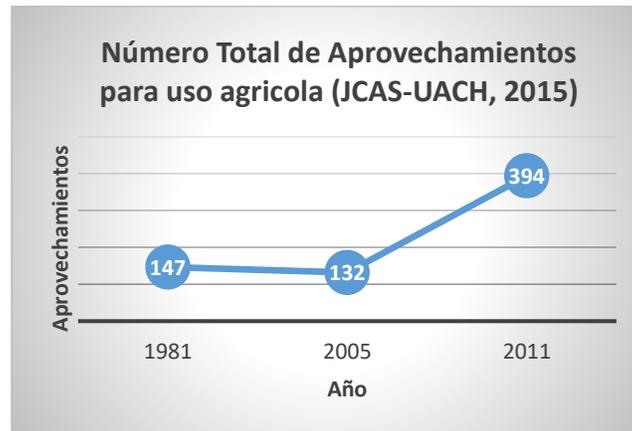


Figura 9: Gráfica de Comparación del número de Aprovechamientos en el tiempo, adaptada de CONAGUA

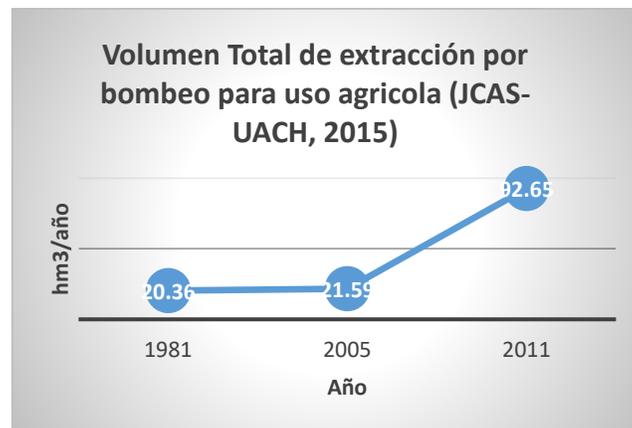


Figura 10: Gráfica de Comparación del volumen de extracción por bombeo para uso Agrícola en el tiempo, adaptada de CONAGUA

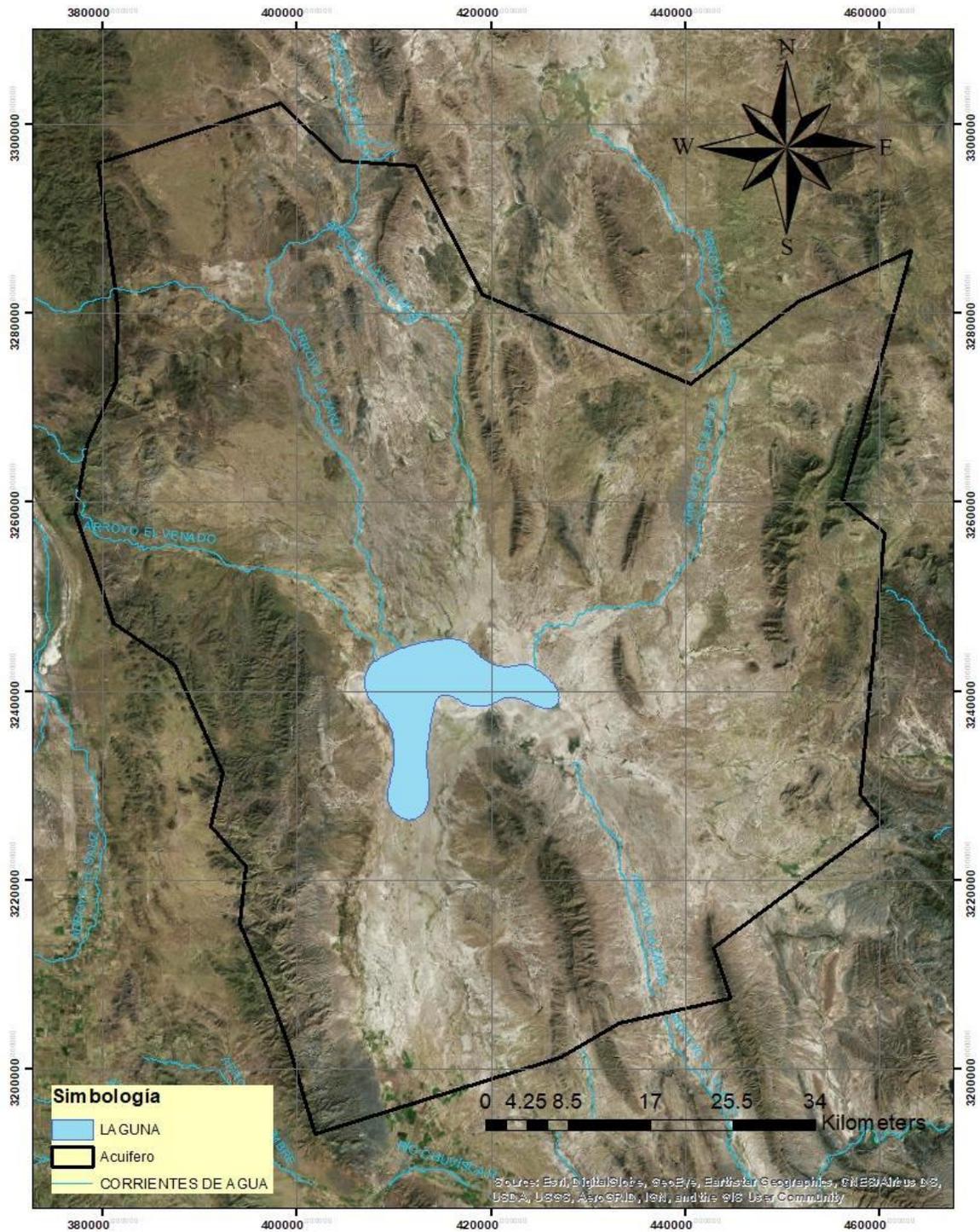


Figura 11: Hidrografía Superficial. Shape hidrografía, escala 1:50,000 de INEGI, elaborado en ARCGIS.



2.10.2 Calidad del Agua

La información que se presenta a continuación corresponde al estudio realizado en la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH) para la Junta Central de Agua y Saneamiento del Estado de Chihuahua (JCAS). Se tomaron muestras de agua de 15 pozos (Figura 12) en el mes de junio de 2012; los resultados se muestran en la Tabla 11, en la cual se resaltaron en rojo los datos que no cumplen con los valores máximos permisibles establecidos en la Modificación a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994. Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización (Tabla 10). también se presenta un balance iónico, así como las clasificaciones de tipo de familia correspondientes a cada muestra (Tabla 9) y diagramas de Collins y Piper (Figuras 13, 14 y 15) (JCAS-UACH, 2015).

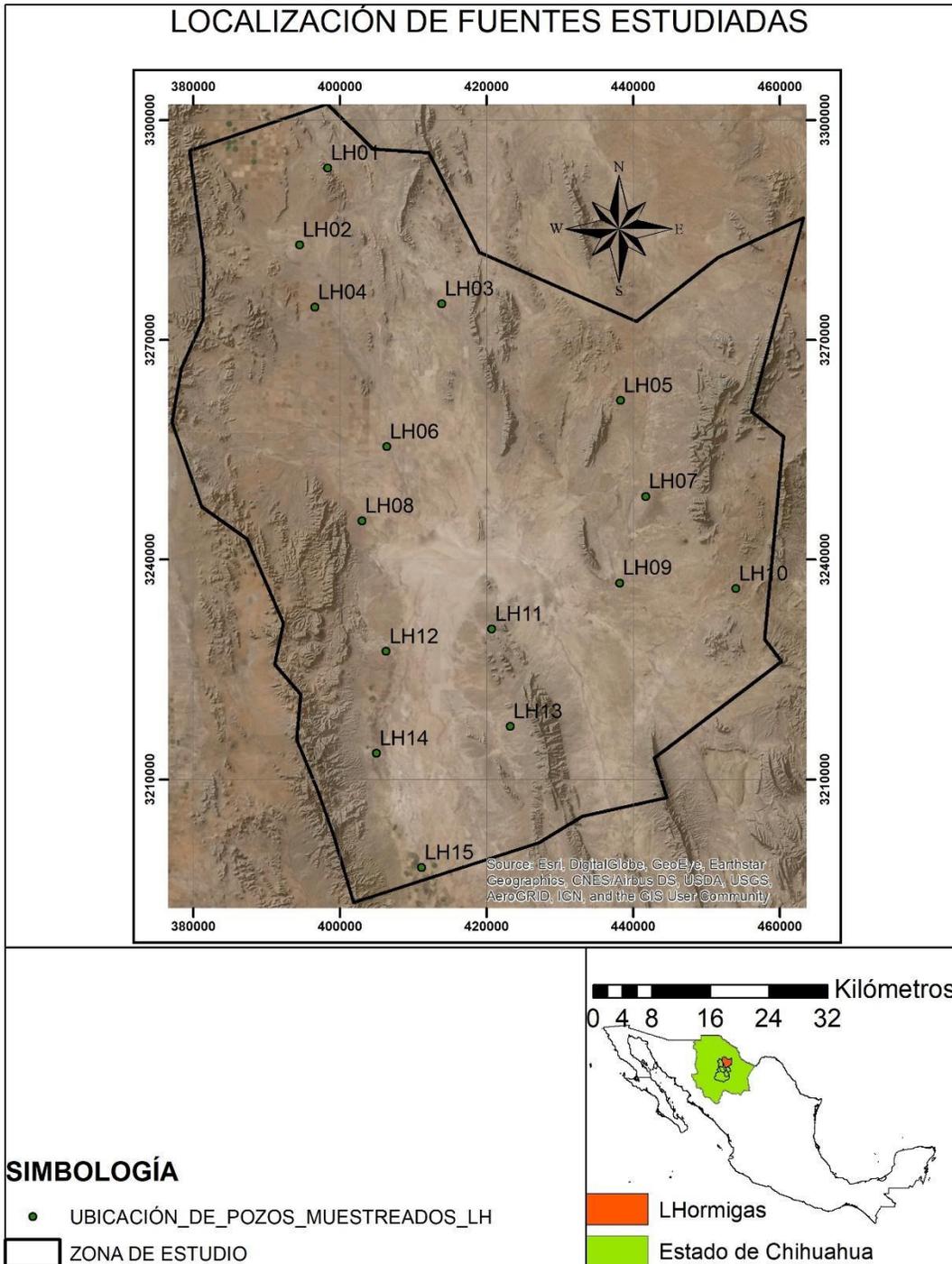


Figura 12: Localización de 15 fuentes estudiadas para calidad de agua, adaptada de JCAS-UACH, 2015



Tabla 9: Familia de agua y porcentaje de error en balance iónico adaptada de JCAS-UACH,2015

ID	CLAVE MUESTREO	POZO	FECHA MUESTREO	COORDENADAS UTM		FAMILIA DE AGUA	ERROR "e"
				X	Y		%
LH01	MALH11	P-122	18/06/2012	398344	3293457	Na-HCO3-CO3	8.69
LH02	MALH10	P-121	18/06/2012	394510	3282968	Na-HCO3-SO4	9.06
LH03	MALH05	P-112	18/06/2012	413895	3274906	Na-HCO3	9.45
LH04	MALH12	P-277	18/06/2012	396596	3274469	Na-HCO4	8.59
LH05	MALH13	P-231	18/06/2012	438286	3261713	Na-SO4	9.1
LH06	MALH07	P-169	18/06/2012	406377	3255420	Na-HCO3	2.73
LH07	MALH14	P-225	18/06/2012	441700	3248626	Na-Mg-Ca-HCO3	13.35
LH08	MALH08	P-77	18/06/2012	403024	3245286	Na-HCO3	9.57
LH09	MALH15	P-222	18/06/2012	438174	3236808	Na-SO4	9.6
LH10	MALH16	P-145	18/06/2012	453963	3236038	Ca-Mg-Na-SO4	8.18
LH11	MALH03	P-213	18/06/2012	420726	3230514	Na-HCO3-SO4	8.9
LH12	MALH09	P-47	18/06/2012	406302	3227490	Na-HCO3	9.04
LH13	MALH04	P-90	18/06/2012	423245	3217244	Na-Ca-HCO3	14.56
LH14	MALH01	P-155	18/06/2012	404969	3213557	Ca-Na-HCO3-SO4	7.39
LH15	MALH02	P-148	18/06/2012	411124	3197982	Na-Ca-HCO3	20.54

No hay un límite exacto para el error en un balance iónico, varía el criterio, algunos consideran que en general, el valor de “e” debe ser menor que el 2 % (Matthes, 1982). Sin embargo, Hem (1985) estableció que errores excediendo el 5 % son inevitables algunas veces cuando el total de cationes y aniones es menor que 5 meq/L; en este caso se tomó como aceptable un error de hasta 15%.

Tabla 10: Límite máximo permisible de parámetros en agua potable para consumo humano. (Salud ambiental)

PARÁMETRO	UNIDADES	LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE
pH	unidades de pH	6.5 - 8.5
Aluminio	mg/L	0.2
Arsénico	mg/L	0.025
Cloruros	mg/L	250
Dureza total	mg/L como CaCO3	500
Fierro	mg/L	0.3
Fluoruros	mg/L	1.5
Manganeso	mg/L	0.15
Nitratos	mg/L como N	10
Sodio	mg/L	200
Sólidos disueltos totales	mg/L	1000
Sulfatos	mg/L	400

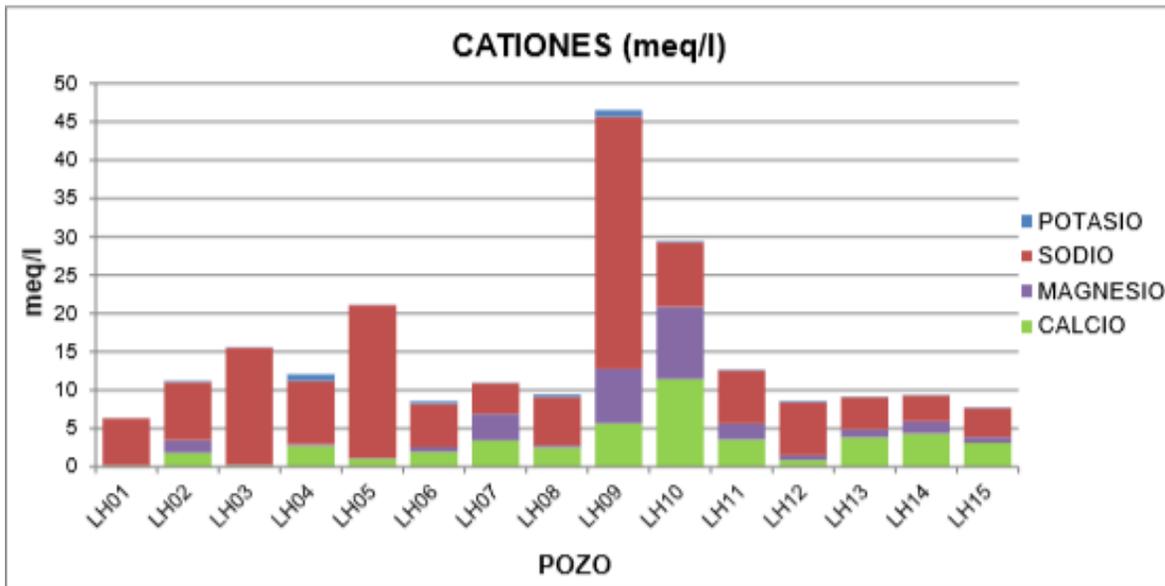


Tabla 11: Resultados analíticos de muestras de agua del acuífero adaptada de JCAS-UACH, 2015

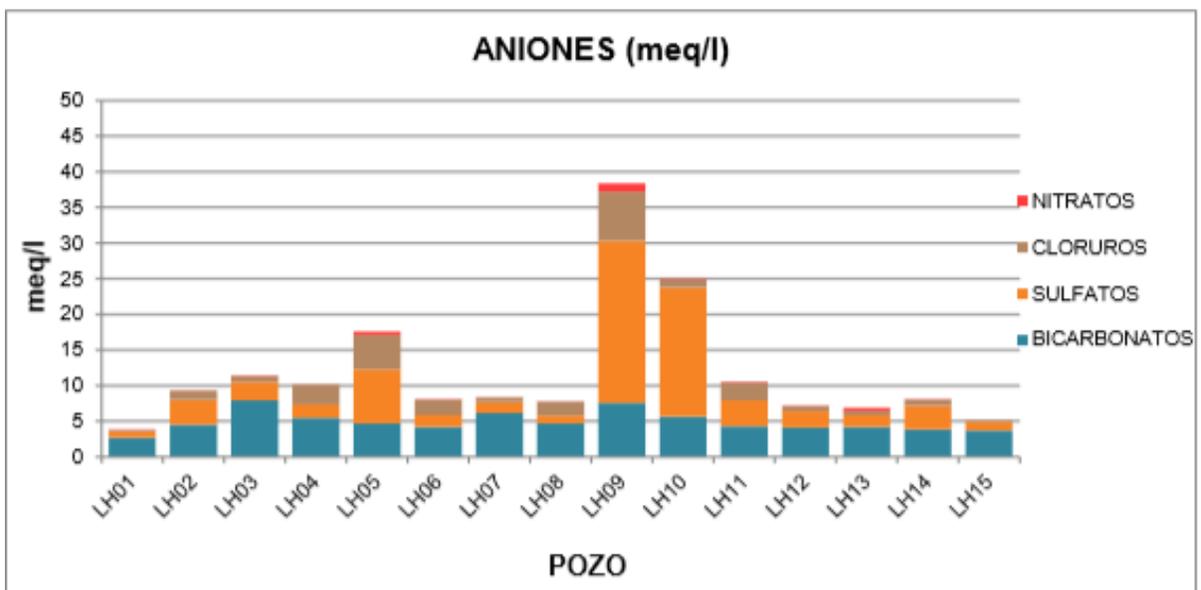
ID	pH	ALUMINIO mg/l	ARSENICO mg/l	CALCIO mg/l	CLORUROS mg/l	DUREZA TOTAL mg/l CaCO3	FIERRO mg/l	FLÚOR mg/l	MAGNESIO mg/l	MANGANESO mg/l	N- NITRATOS mg N- NO3/l	NITRATOS mg NO3/l	POTASIO mg/l	SODIO mg/l	SDT mg/l	SULFATOS mg CaCO3/l	BICARBONA TOS mg HCO3/l	CARBONA TOS mg CaCO3/l
LH01	8.8	0.016	0.026	3.14	9	ND	0.042	8.06	0.2	ND	1.13	5	1.27	142	354	40.7	163.5	45
LH02	8.2	0.013	0.02	36.6	44.99	141	ND	2.58	20.09	ND	0.56	2.47	7.17	174	604	169.3	275.7	ND
LH03	9.2	0.061	0.078	3.38	30.99	25	0.296	7.56	1.15	0.003	1.08	4.76	2.73	351	746	122.6	440	43
LH04	8	0.365	0.045	54.68	97.97	127	0.156	4.75	2.66	0.016	0.43	1.89	33.38	191	637	91.3	334.3	ND
LH05	8.7	0.366	0.041	22.12	169.95	59	1.055	5.42	0.88	0.023	7.46	33.03	2.05	458	1091	363.4	287.9	ND
LH06	8.3	1.088	0.058	39.04	77.98	121	2.774	4.51	7.61	0.061	1.33	5.88	13.98	130	511	77.6	257.4	ND
LH07	7.9	0.009	0.021	69.2	21.99	294	0.416	1.63	42.2	0.004	0.27	1.2	2.5	91.2	490	75.7	375.8	ND
LH08	8.3	0.021	0.041	50.34	68.98	119	ND	5.75	3.52	0.007	0.51	2.28	12.15	145	492	52	287.9	ND
LH09	8.2	0.011	0.08	114	244.92	509	0.264	7.75	86.34	0.007	16.02	70.97	33.26	756	2456	1092.4	462.4	ND
LH10	7.7	0.007	0.007	229.7	39.99	875	0.237	1.39	114.7	0.005	1.54	6.84	5.76	193	1656	868.5	345.3	ND
LH11	8.1	0.006	0.022	71.97	90.97	235	ND	3.29	24.89	ND	1.91	8.47	4.75	160	644	172.9	263.5	ND
LH12	8.5	0.008	0.056	17.43	23.49	70	0.024	1.22	7.75	ND	1.34	5.95	6.74	159	436	11.4	250.1	ND
LH13	8	0.012	0.025	77.39	21.99	186	ND	4.71	12.44	ND	5.656	25.057	2.788	97.5	456	77.6	257.4	ND
LH14	8	0.006	0.031	87.5	30.49	225	0.095	1.53	18.87	0.005	0.888	3.936	3.953	77.9	496	159.8	235.5	ND
LH15	8	0.006	0.007	62.79	6	149	ND	1.19	9.31	ND	0.398	1.761	3.82	87.2	320	59.4	255.7	ND

ND=NO DETECTADO

LOS NÚMEROS EN ROJO ESTÁN FUERA DEL LÍMITE MÁXIMO PERMISIBLE

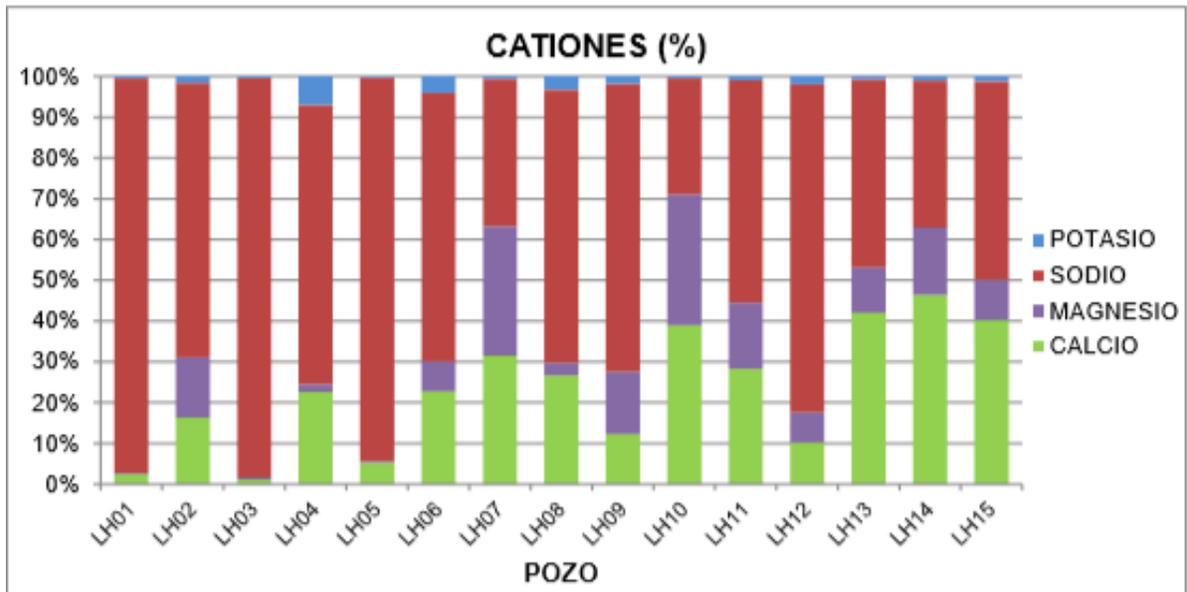


(a)

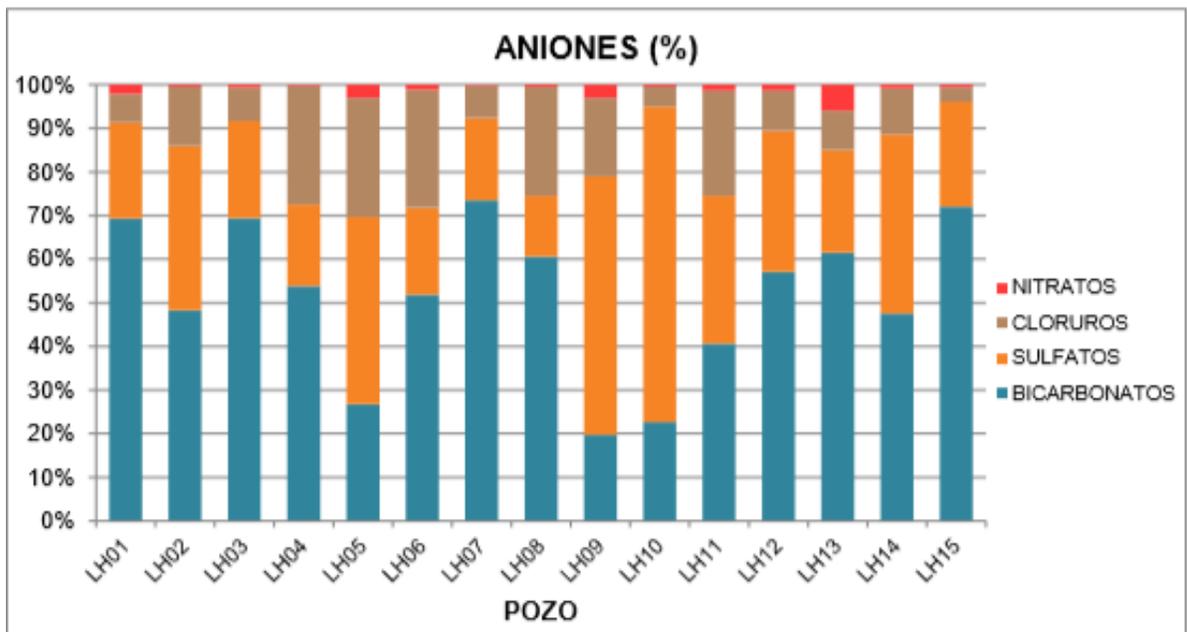


(b)

Figura 13: Diagramas de Collins (meq/L), (JCAS-UACH, 2015)



(a)



(b)

Figura 14: Diagramas de Collins (%), (JCAS-UACH, 2015)

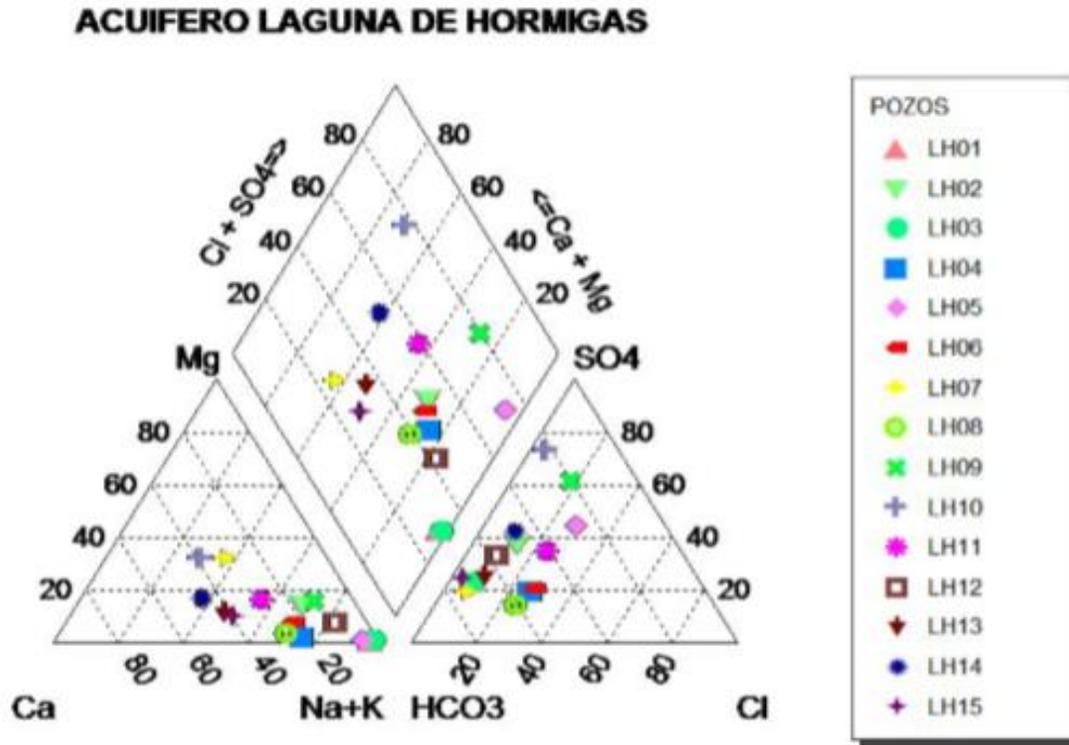


Figura 15: Diagrama de Piper (JCAS-UACH, 2015)

Se observa alto contenido de arsénico y flúor en casi todo el acuífero en la mayoría de las muestras. Los pozos LH05, LH06 y LH09 destacan por sobrepasar otras concentraciones, además de arsénico y flúor. En cuanto a las familias de agua, las que predominan son la bicarbonatada sódica al norte y al poniente del acuífero y la de tipo sulfatada al oriente (JCAS-UACH, 2015).

El origen de las aguas bicarbonatadas puede ser por disolución de calizas; las aguas con NaHCO_3 (bicarbonato de sodio) son malas para el riego ya que fijan Na en el terreno y crean un medio alcalino por la presencia de sales. Las aguas sulfatadas probablemente se deben a la oxidación de rocas ígneas, metamórficas o sedimentarias, encontrándose probablemente en suelos yesosos.



2.10.3 Elevación, profundidad y evolución del nivel estático

La piezometría es importante a la hora de realizar un modelo de agua subterránea, ya que representa el estado en el que se encuentra un acuífero en cuanto a disponibilidad de agua; con ello podemos identificar si se trata de un acuífero en estado estacionario o transitorio. Para el modelo del acuífero Laguna de Hormigas existe información piezométrica de 1981, 2005 y 2012.

El acuífero se caracteriza por tener varios niveles piezométricos, el somero se encuentra en los primeros 20 m de profundidad, seguido por un nivel piezométrico que puede alcanzar hasta los 200 m, donde actualmente se extrae la mayor cantidad de agua en el sistema acuífero y posteriormente un nivel profundo, relacionado a un medio acuífero compuesto en su mayoría por rocas carbonatadas.

Para el año de 1981 se observan niveles que van desde 1520 y 1540 msnm., en las zonas de mayor altitud al este y oeste del acuífero en las sierras el venado, el oso, la tasajera, el pulpito y las damas y todas ellas convergen en el centro del acuífero con elevaciones de 1140msnm., siendo esta zona donde el agua se encuentra más somera, llegándose a encontrar a profundidades de hasta 20m., en la zona de inundación. La dirección general del flujo local sigue la trayectoria del flujo superficial, es decir, convergen, desde las partes altas hacia el centro, cabe mencionar que, cuando su descenso no es interrumpido por unidades con permeabilidad baja, alimenta sus diferentes niveles piezométricos. El flujo regional, está definido por una entrada lateral de agua subterránea en el norte del acuífero, aportación que recibe del acuífero circundante Aldama San Diego y Potrero del Llano, y una salida lateral de flujo subterráneo al sur, en este caso el acuífero Laguna de tarabillas recibe aportaciones del acuífero Laguna de Hormigas.

Del año 1981 al 2005, de manera general, el comportamiento de los niveles estáticos tiene similitud, hubo un aumento mínimo en el número de aprovechamientos y en el volumen de extracción, podríamos decir que se mantuvieron de cierta forma estables los niveles



estáticos, excepto en el sur del acuífero, en donde se nota un cono de abatimiento debido a ese incremento de pozos que se concentró en esta zona con elevación de 1180 msnm. De igual forma, el flujo local sigue la trayectoria del flujo superficial, de las sierras hacia la laguna El Cuervo, el flujo regional; al sur existe una entrada por flujo lateral, proveniente del acuífero Aldama San Diego y al norte una salida por flujo lateral hacia el acuífero Laguna de Tarabillas (JCAS-UACH,2015).

Para el año 2012 se nota un incremento considerable en el número de aprovechamientos al norte del acuífero, aproximadamente en el año 2008 es cuando se da este incremento, el volumen de extracción también aumentó y aunado a esto el descenso de los niveles piezométricos, se pueden observar claramente una diferencia en los valores de elevación del nivel estático, donde se encontraba la elevación de 1160 msnm, en la zona centro del acuífero que corresponde al año 2005, para el año 2012 es la elevación 1140 msnm, es decir, se notó un aumento en la profundidad a la que se encuentra el nivel piezométrico. También se observa un cono de abatimiento en la parte norte-central del acuífero ocasionado por este incremento de pozos y otro más al norte donde es muy notoria la magnitud del descenso de los niveles piezométricos ya que se forma un cono de abatimiento importante en esta zona. En el cono de abatimiento existente desde el año 2005, ubicado al sur del acuífero, también se nota un aumento en área, con una elevación de 1180 msnm., ya que nunca se detuvo el crecimiento de número de aprovechamientos en esta zona, aunque en menor cantidad comparada con la zona norte. El flujo local sigue una dirección de las partes altas hacia el centro-norte del acuífero, concentrándose en el cono de abatimiento que se generó (JCAS-UACH, 2015).

Igualmente, para la profundidad del nivel estático se tomó información de los años 1981, 2005 y 2012. Para el año 1981, se observa que el agua se encuentra somera en la zona de inundación a una profundidad de 20 m. y en las serranías, donde se encuentra a mayor profundidad el nivel estático se observan valores de 60 m. Para el año 2005, el área de la



zona de inundación disminuyó en la parte sur, en donde anteriormente el nivel estático se encontraba a una profundidad de 20 m. para el año 1981, posteriormente aumentó a una profundidad de 40 m. para el año 2005. Para el año 2012 la zona de inundación aumenta considerablemente a comparación de los años anteriores, encontrándose el agua más somera a una profundidad de 40 m., y la más profunda a 100 m. en la zona norte donde se genera el cono de abatimiento (JCAS-UACH, 2015).

Para determinar la evolución de niveles piezométricos con respecto al tiempo fueron tomados en cuenta valores de profundidad para el periodo 1981 y 2012. En todo el acuífero se pueden observar valores negativos que van desde -5 en el centro donde se encuentra el área de la laguna hasta -20 en el oriente.

El nivel estático muestra alteraciones del flujo natural del agua subterránea, probablemente causado por el aumento de pozos perforados. Por lo que se puede decir que el nivel del agua subterránea ha sufrido alteraciones muy importantes y por lo tanto el cambio de almacenamiento tenderá a ser negativo (JCAS-UACH, 2015).

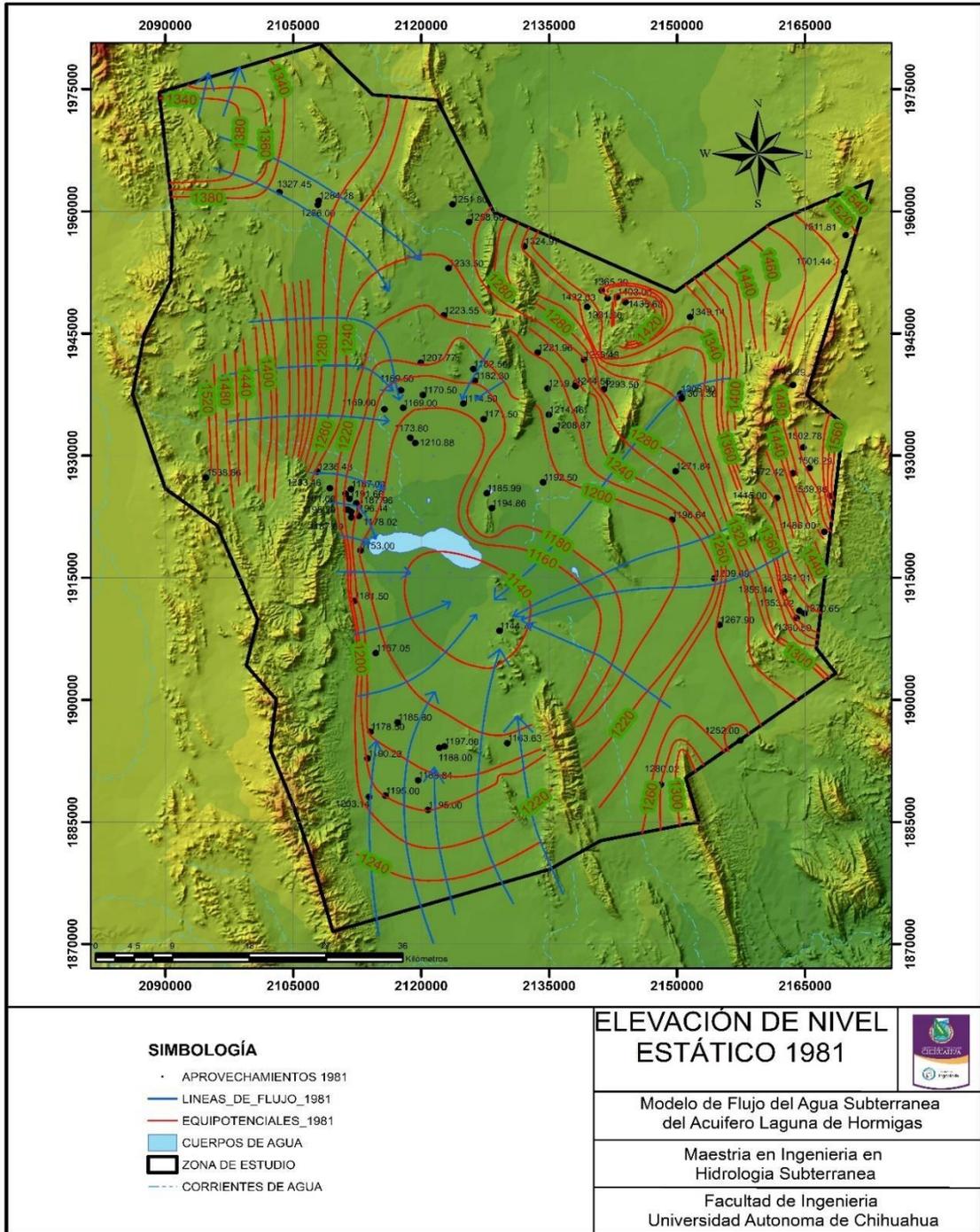


Figura 16: Configuraciones para el año 1981 (AutoCAD y ARCGIS).

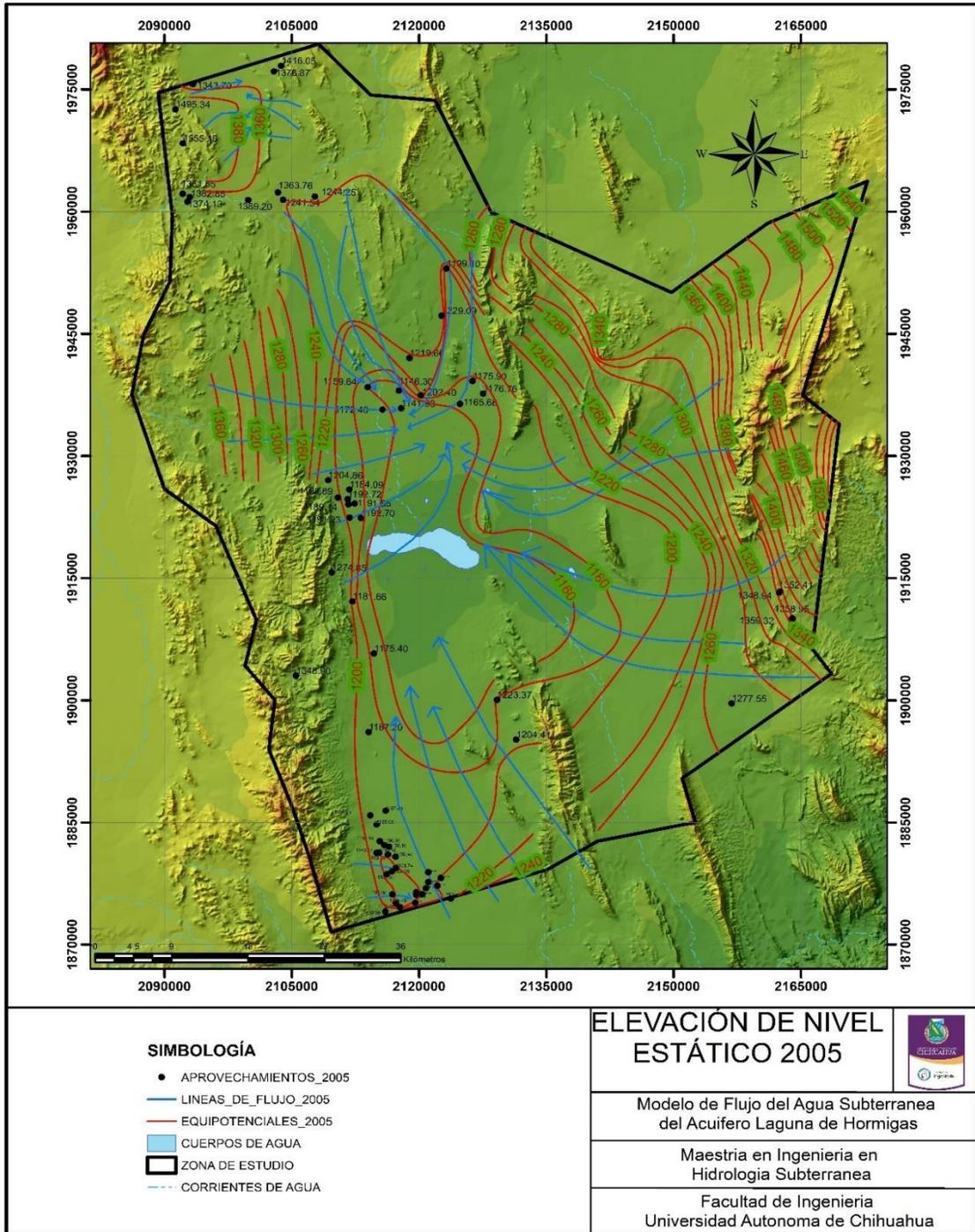


Figura 17: Configuraciones para el año 2005 (AutoCAD y ARCGIS).

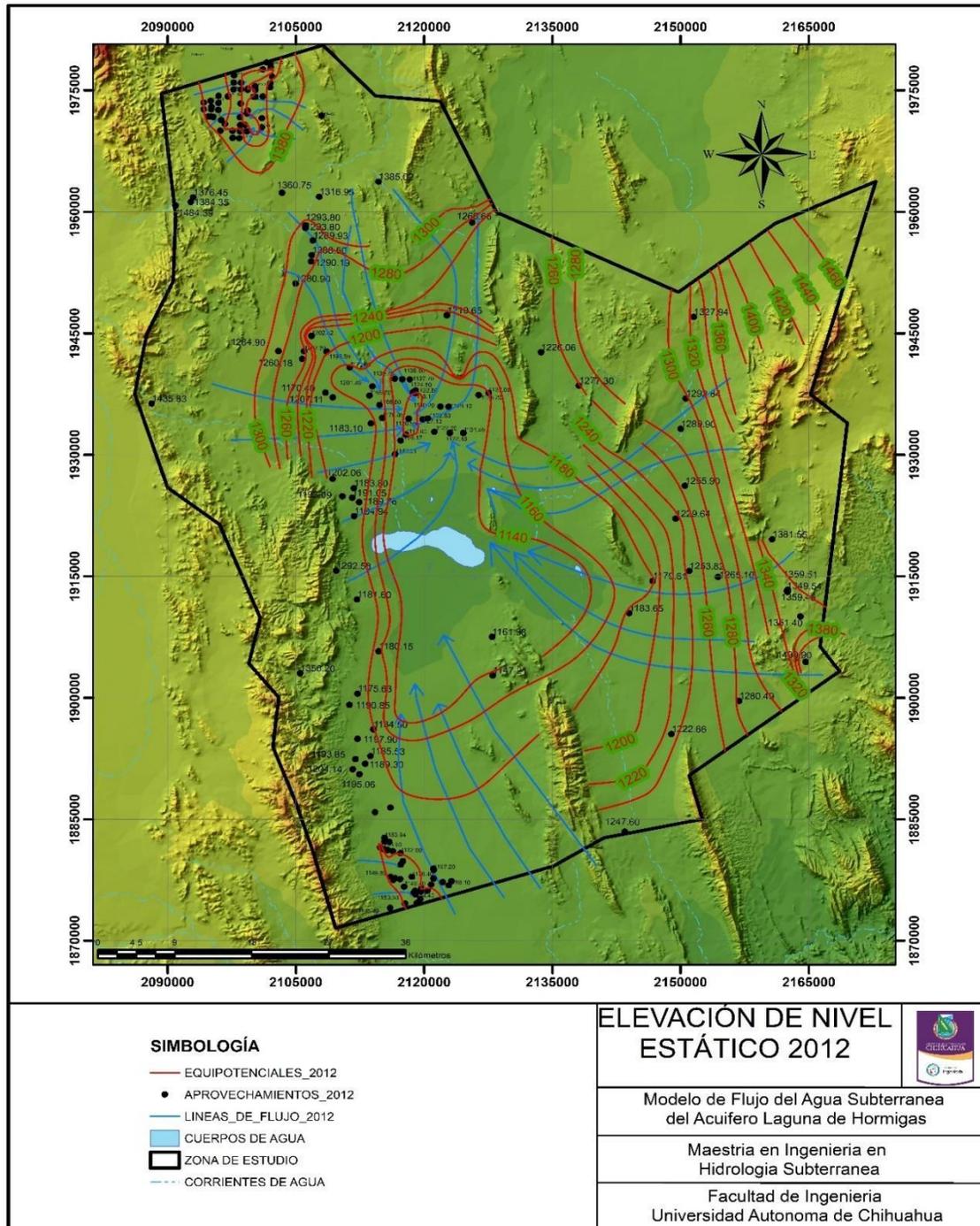


Figura 18: Configuraciones para el año 2012 (AutoCAD y ARCGIS).



3 METODOLOGÍA

Para la realización del modelo de flujo del agua subterránea del acuífero Laguna de Hormigas se implementó la metodología propuesta por Anderson y Woessner (1992); la forma en que fue aplicada al modelo en cuestión se describe a continuación:

3.1 Recopilación de Información

Para realizar un modelo en el que el resultado sea lo más acertado a la realidad es necesario contar con información previa al estudio, por ello, debe ser confiable; es decir, su procedencia debe ser de fuentes en las que esté avalada por instituciones u organismos públicos autónomos responsables de normar la información. Para la obtención de esta información se recurrirá a fuentes como la Comisión Nacional del Agua (CNA), para solicitar datos de precipitación, evaporación, temperatura, hidrometría, datos de pozos de extracción tal como la localización, límite de acuíferos, volumen de extracción histórica, elevación del nivel estático histórico, pruebas de bombeo y cortes litológicos; se consultó también archivos de shapefile como topografía, edafología, uso de suelo y vegetación, climatología, fisiografía e hidrografía en el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI); así como también información de geología, perfiles geoelectricos y secciones geológicas del Servicio Geológico Mexicano (SGM), tesis de la Facultad de Ingeniería UACH y el programa Eric III, además será necesario realizar consultas en otras dependencias de gobierno tales como CONABIO, CONAPO, INIFAP, SICT, entre otras. Para complementar parte de la información que se recopiló, se consultó el proyecto titulado: Evaluación de las fuentes actuales de abastecimiento a la ciudad de Chihuahua, estudio de factibilidad de fuentes alternas y anteproyecto de infraestructura hidráulica necesaria, elaborado para la Junta Central de Agua y Saneamiento (JCAS) por la Universidad Autónoma de Chihuahua (UACH).



3.2 Modelo Conceptual

Para poder representar el funcionamiento del sistema hidrológico del acuífero es necesario conocer la estratigrafía que conforma el acuífero así como también, la topografía del terreno, la hidrología superficial, el clima, las unidades hidrogeológicas y con ello la conductividad hidráulica o transmisividad, la edafología, el uso de suelo y vegetación, la evapotranspiración, cómo se lleva a cabo la recarga y descarga del agua subterránea y cómo es la interacción del agua superficial y subterránea. Esta representación del sistema sirve para simplificar el problema y organizar los datos de campo asociados, para que pueda ser analizado más fácilmente.

3.3 Simulador numérico

MODFLOW es un programa de computadora desarrollado por The U.S. Geological Survey que simula el flujo subterráneo tridimensional usando una técnica de diferencia finita para la solución de la ecuación de flujo (Narayanan, 2015).

El paquete Visual MODFLOW incluye tres softwares principales y muchos módulos de soporte. MODFLOW es usado para calcular el volumen, calidad y distribución del flujo del agua subterránea. La función de MODPATH es calcular la dirección y velocidad del flujo cuando se mueve a través del sistema acuífero y MT3D es usado para calcular difusión y transporte con reacciones químicas de solutos en el sistema de flujo de agua subterránea (Narayanan, 2015).

En este trabajo, con ayuda del programa Visual MODFLOW podremos conocer cantidad, distribución, dirección y velocidad del flujo del agua subterránea para así poder proponer una solución al problema.

3.3.1 Modelo Matemático

Las ecuaciones matemáticas que describen los procesos de flujo y transporte subterráneo se pueden determinar a partir del principio fundamental de conservación de la masa de un fluido o de un soluto, establecen que este principio (ecuación de continuidad) se



puede combinar con una expresión matemática (Ley de Darcy) para obtener la ecuación diferencial de flujo subterráneo, conformada por el coeficiente de almacenamiento específico, la conductividad hidráulica, las entradas y salidas de agua (Armas, 2010).

De acuerdo a la necesidad que se tenga por resolver, la ecuación de flujo se puede establecer en estado estacionario o transitorio (Anderson y Woessner, 1992).

Un programa computacional o un código resuelve un conjunto de ecuaciones algebraicas generadas de la aproximación de la ecuación diferencial parcial (ecuación de flujo, condiciones de frontera y condiciones iniciales) las cuales conforman un modelo matemático; las ecuaciones producidas pueden ser expresadas como una ecuación de una matriz resultante y son resueltas rápidamente por medio de una computadora. Para realizar el procedimiento primero se aplica la técnica de diferencias finitas al modelo matemático original y luego se resuelve la ecuación de la matriz resultante, (Anderson y Woessner, 1992), estos pasos permiten cuantificar el movimiento del agua en tres dimensiones a través de un medio poroso saturado; considerando un dominio heterogéneo, anisotrópico y en estado transitorio a través de la ecuación diferencial parcial de flujo (McDonald y Harbaugh, 1988):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K_{xx} \frac{\partial h}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_{yy} \frac{\partial h}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_{zz} \frac{\partial h}{\partial z} \right) = S_s \frac{\partial h}{\partial t} - W^*$$

Dónde:

- x, y, z son las coordenadas cartesianas alineadas a lo largo de los ejes principales de la conductividad hidráulica.
- K_{xx}, K_{yy}, K_{zz} son los valores del tensor de la conductividad hidráulica.
- h es la carga hidráulica.
- W^* es el flujo volumétrico por unidad de volumen y representa las fuentes y/o sumideros de agua.
- S_s es el coeficiente de almacenamiento del medio poroso.
- t es el tiempo.



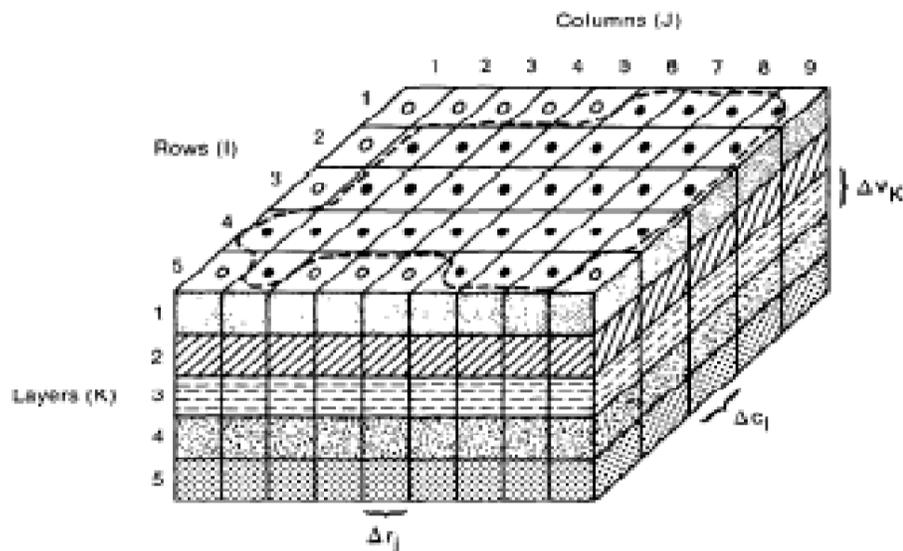
Esta ecuación es comúnmente usada por los códigos MODFLOW, PLASM Y AQUIFEM-1; los códigos PLASM y MODFLOW son utilizados para técnicas de diferencias finitas en dos y tres dimensiones, y AQUIFEM-1 se aplica a técnicas de elementos finitos en dos dimensiones (Anderson y Woessner, 1992).

Para la simulación del flujo de agua subterránea en la zona de estudio, se utilizará el código MODFLOW utilizando la técnica de diferencias finitas la cual consiste en diseñar una malla formada por celdas definidas por filas, columnas y capas, donde el nodo central sirve para aplicar la ecuación diferencial de flujo en este punto para representar el comportamiento del flujo en cada celda ante diferentes estímulos tales como la recarga, extracción por medio de pozos de bombeo, etc., (Figura 20).

--- Límite del Acuífero ● Celda Activa ○ Celda Inactiva

Δr_j Dimensión de la celda en a lo largo de la dirección de la Fila.

Δc_i Dimensión de la celda en a lo largo de la dirección de la Columna.



Δr_k Dimensión de la celda en a lo largo de la dirección Vertical.

Figura 19: Discretización de un sistema acuífero en tres dimensiones mediante diferencias finitas centrales (McDonald y Harbaugh, 1988).



3.4 Diseño del Modelo

De acuerdo con (Anderson y Woessner, 1992). “El modelo conceptual deberá tener formato adecuado para ser modelado. Este paso incluye el diseño de la malla, selección de los periodos de esfuerzo, asignar las condiciones iniciales y de frontera, y seleccionar los valores preliminares de los parámetros de acuífero y los esfuerzos hidrogeológicos”.

3.4.1 Discretización de la malla

En un modelo numérico, el dominio del problema continuo se reemplaza por un dominio discretizado que consiste en una matriz de nodos y bloques de diferencias finitas (celdas). La malla nodal forma el área del modelo numérico. El modelo conceptual y el diseño del modelo determinará las dimensiones generales de la malla; la selección del código también influye en la estructura de la misma. El código MODFLOW para diferencias finitas calcula las cargas para cada una de las celdas generando una serie de ecuaciones algebraicas que son resueltas por técnicas matriciales en los nodos centrales, así el análisis se facilita gracias a este tipo de malla (Anderson y Woessner, 1992).

La selección del tipo de modelo y el modelo conceptual determinan las capas y unidades hidroestratigráficas que son necesarias, si se tiene un gradiente vertical grande, se debe de usar dos o más capas para representar una sola unidad hidroestratigráfica.. Es importante considerar las áreas de recarga, el bombeo y las áreas de recarga o descarga a los ríos para definir el espaciamiento nodal (Anderson y Woessner, 1992).

En un modelo de diferencias finitas, es importante orientar la malla de forma que se minimice el número de nodos que se encuentran fuera de los límites del área modelada (nodos o celdas inactivas), no son parte de la solución, pero sigue usando espacio de almacenamiento en la matriz necesaria para el código (Anderson y Woessner, 1992).

3.4.2 Parámetros iniciales del modelo

La información necesaria para el modelo se obtiene de archivos existentes en las distintas dependencias de gobierno, sin embargo, es necesario complementar la información



con trabajo adicional de campo en algunos casos y se debe verificar la confiabilidad de la información ya existente debido a que también cuenta con algo de incertidumbre (Hernández, 2012).

Se definió un mapa base del área de estudio, conductividad hidráulica horizontal y vertical, unidades hidroestratigráficas, porosidad, coeficientes de almacenamiento específico y rendimiento específico, así como las cargas iniciales del año más antiguo (Narayanan, 2015).

3.4.2.1 Zonificación y estimación previa de los parámetros

Existen dos grupos de parámetros iniciales:

- El Marco Físico. Define la geometría del sistema incluyendo el espesor y área de cada unidad hidroestratigráfica
- Parámetros Hidrogeológicos. Incluyen información de cargas iniciales y configuraciones de flujo mismos que fueron necesarios para formular el modelo conceptual y revisar la calibración del modelo. Los parámetros hidrogeológicos también definen las propiedades del acuífero y los esfuerzos hidrológicos.

La transmisividad y el coeficiente de almacenamiento son obtenidos generalmente de pruebas de bombeo, la conductividad hidráulica puede obtenerse de pruebas de bombeo o de análisis de laboratorio y pruebas de permeabilidad de laboratorio usando permeámetros si se trata de material no consolidado o sedimentos. En ausencia de un laboratorio o trabajo de campo, se pueden tomar valores de tablas usados generalmente en modelación, siendo una compilación de parámetros de valores que ya han sido analizados. Es importante obtener estos valores para definir unidades hidrogeológicas las cuales son agrupaciones de material que poseen rangos de valores similares de conductividad hidráulica con las que se asigna un valor de conductividad hidráulica equivalente para cada unidad hidrogeológica (Anderson y Woessner, 1992).



3.4.2.1.1 Parámetros Hidráulicos

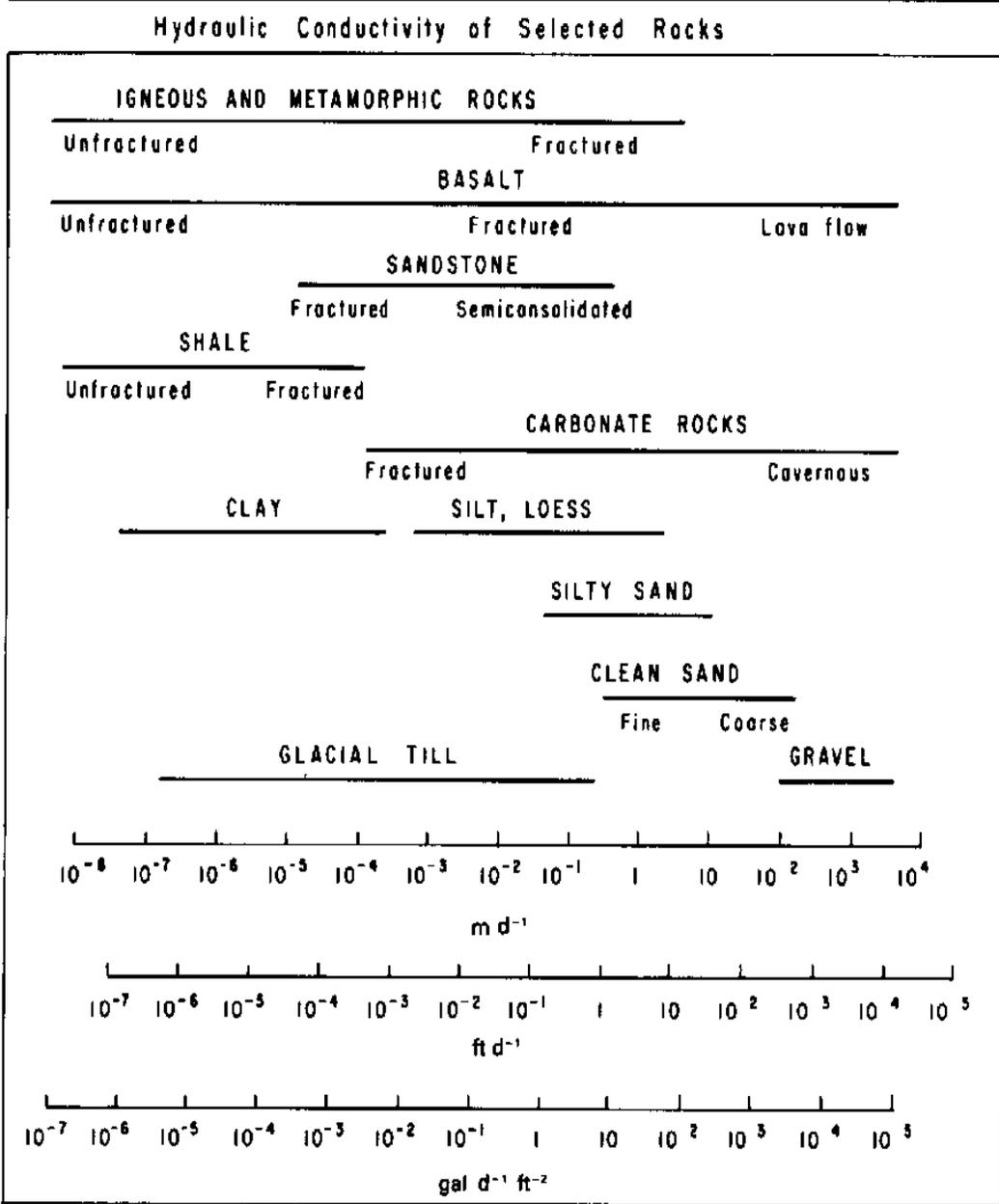
Sólo se obtuvo información de una prueba de bombeo realizada previamente en el acuífero Laguna de Hormigas misma que fue útil para asignar valores de transmisividad y coeficiente de almacenamiento específico al modelo, pero además se consultaron valores ya establecidos, (Tabla 12).

Tabla 12: Resultados de la prueba de bombeo y ubicación (JCAS-UACH,2015)

Nombre de Aprovechamiento	Tipo de Acuífero	X	Y	Profundidad Total (m)	Profundidad de N. E. (m)	Espesor Saturado (m)					
P-165 RANCHO PALOMAS	Semiconfinado	405918	3222212	300	55.9	244.1					
Nombre de Aprovechamiento	2 CAPAS BOMBEO					AQT_B			LOGAN BOMBEO		
	S (capa 1)	Sy	S (capa 2)	K (m/d)	$T(m^2/d)$	$T(m^2/d)$	K (m/d)	Sy	S	$T(m^2/d)$	K (m/d)
P-165 RANCHO PALOMAS	0.00	0.05		0.90	219.70	150.0	0.6		0.0058	564.5	0.5



Ranges of Values for Hydraulic Conductivity



From Heath, 1983.

Figura 20: Rango de valores de conductividad hidráulica (Anderson & Woessner, 1991)



Tabla 13: Rango de valores de almacenamiento específico (Anderson & Woessner, 1991)

Table 3.4
Ranges of Values of Specific Storage (S_s)

Material	Specific storage (S_s) (m^{-1})
Plastic clay	2.0×10^{-2} – 2.6×10^{-3}
Stiff clay	2.6×10^{-3} – 1.3×10^{-3}
Medium-hard clay	1.3×10^{-3} – 9.2×10^{-4}
Loose sand	1.0×10^{-3} – 4.9×10^{-4}
Dense sand	2.0×10^{-4} – 1.3×10^{-4}
Dense sandy gravel	1.0×10^{-4} – 4.9×10^{-5}
Rock, fissured, jointed	6.9×10^{-5} – 3.3×10^{-6}
Rock, sound	Less than 3.3×10^{-6}

Adapted from Domenico, 1972.

Tabla 14: Coeficiente de almacenamiento para diferentes tipos de terrenos y acuíferos (Iglesias, 1984)

Material Permeable	Acuífero	S (Valores medios)
Kárstico: Calizas y dolomías jurásicas	Libre	2.10^{-2}
	Semiconfinado	5.10^{-4}
	Confinado	5.10^{-5}
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	2.10^{-2} – 6.10^{-2}
	Semiconfinado	10^{-3} – 5.10^{-4}
	Confinado	10^{-4} – 5.10^{-5}
Poroso intergranular gravas y arenas	Libre	5.10^{-2} – 15.10^{-2}
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos Calcarenitas marinas terciarias	Libre	10.10^{-2} – 18.10^{-2}

(1) Pozos y acuíferos. IGME (1984)

El coeficiente de almacenamiento específico (S^*) es el volumen de agua que es capaz de liberar un prisma de acuífero de base unitaria y altura la del espesor saturado, cuando el potencial hidráulico varía la unidad, Iglesias (1984)., y es expresado como:

$$S = S^* b$$



Tabla 15: Rangos de porosidad efectiva (S_y) según Morris & Johnson, 1967

Material	No. of analyses	Range	Arithmetic mean
Sedimentary materials			
Sandstone (fine)	47	0.02–0.40	0.21
Sandstone (medium)	10	0.12–0.41	0.27
Siltstone	13	0.01–0.33	0.12
Sand (fine)	287	0.01–0.46	0.33
Sand (medium)	297	0.16–0.46	0.32
Sand (coarse)	143	0.18–0.43	0.30
Gravel (fine)	33	0.13–0.40	0.28
Gravel (medium)	13	0.17–0.44	0.24
Gravel (coarse)	9	0.13–0.25	0.21
Silt	299	0.01–0.39	0.20
Clay	27	0.01–0.18	0.06
Limestone	32	0–0.36	0.14
Wind-laid materials			
Loess	5	0.14–0.22	0.18
Eolian sand	14	0.32–0.47	0.38
Rock			
Schist	11	0.22–0.33	0.26
Tuff	90	0.02–0.47	0.21

From Morris and Johnson, 1967.

Tabla 16: Rangos de porosidad eficaz Custodio y Llamas, 1983

Material		Porosidad total %	Porosidad eficaz %
Tipo de roca	Descripción	(m)	(m _e)
R. plutónicas	Granito fresco	0,01 - 1	$0,5 \cdot 10^{-3}$
	Granito meteorizado	1 - 10	$0,5 \cdot 10^{-4}$ - 0,01
R. volcánicas	Basaltos densos	0,1 - 1	0,1 - 2
	Basaltos vacuolares	5 - 50	1 - 10
	Basaltos fracturados	1 - 10	$0,5 \cdot 10^{-4}$ - 0,01
	Piroclastos y tobas	10 - 50	0 - 20
	Pumitas	50 - 90	0 - 20
	Escorias	10 - 80	1 - 50
R. metamórficas	Sin fracturar	0,01 - 1	$0,5 \cdot 10^{-3}$
	Fracturadas	1 - 10	$0,5 \cdot 10^{-4}$ - 0,01
R. sedimentarias consolidadas	Calizas y dolomías no karstificadas	0,1 - 25	0,1 - 5
	Calizas arrecifales y karst	5 - 50	5 - 40
	Creta	5 - 45	0,05 - 0,5
	Areniscas	5 - 35	0,5 - 10
R. sedimentarias no consolidadas	Arcillas	40 - 60	0 - 5
	Limos	35 - 50	3 - 19
	Arenas finas o limosas	20 - 50	10 - 28
	Arenas gruesas o bien seleccionadas	20 - 50	20 - 35
	Gravas	25 - 40	13 - 26
	Aluviones	20 - 40	5 - 35
R. evaporíticas	Anhidrita	0,5 - 5	0,05 - 0,5
	Halita	0,1 - 0,5	0,1



3.4.2.1.2 Condiciones de Frontera

Las condiciones de frontera determinan la variable dependiente (cargas) o direcciones de flujo. La correcta selección de condiciones de frontera son un paso crítico y también es el paso que puede tener más error a la hora de diseñar el modelo. Los límites de un sistema de flujo de agua subterránea están conformados por límites físicos, es decir, zonas impermeables de roca o por zonas grandes de agua superficial y por condiciones hidrológicas formadas por límites hidráulicos que dividen el flujo subterráneo (Anderson y Woessner, 1992).

Las condiciones de frontera como carga constante, ríos, drenes, barreras, recarga y evapotranspiración definen los límites del modelo (Narayanan, 2015).

3.4.2.1.3 Pozos de bombeo y Observación

Los pozos de bombeo o sumideros se asignan al modelo para determinar las cargas hidráulicas a partir de datos como ubicación geográfica, gasto de bombeo anual, tramo ranurado y elevación del brocal; en el modelo de diferencias finitas se representa simbólicamente con un círculo pequeño que simula el volumen de agua extraído en la celda ocupada. La función de los pozos de observación es ayudar en el proceso de calibración para que el modelo pueda simular las cargas hidráulicas de tal manera que sea lo más real o cercano a los datos de campo; para asignar la información de los pozos de observación al modelo se necesita información como nombre del pozo, ubicación geográfica, profundidad total del pozo, carga hidráulica (elevación del nivel estático) y una elevación Z ubicada aproximadamente a la mitad de la elevación del nivel estático y la profundidad total. La información necesaria tanto de los pozos de bombeo como los de observación o monitoreo requieren de especial revisión ya que existen pozos que tienen datos en varios años y que no coinciden, por lo que se analiza de manera minuciosa el nombre, la cercanía de pozos, la elevación del nivel estático y el gasto o volumen de extracción.



3.4.2.1.4 Condiciones iniciales

Para que el modelo comience a representar el comportamiento del sistema es necesario indicarle mediante datos de carga hidráulica de dónde debe partir, lo ideal es que sean datos obtenidos de un régimen estacionario pero como es difícil conocer las cargas hidráulicas del acuífero estando en estado estacionario, se opta por recaudar la información más antigua y asumir que no ha sufrido modificaciones debido a esfuerzos hidrogeológicos o de extracción, una vez obtenidos datos de elevación del nivel estático y ubicación geográfica de todos los pozos es necesario realizar las configuraciones y hacer una interpolación tomando en cuenta las coordenadas (x, y, z) de cada punto de las curvas y las coordenadas (x, y, z) de cada pozo para conocer las cargas hidráulicas en todas las celdas.

3.4.2.1.5 Periodos de esfuerzo

En un modelo matemático el tiempo total que se está analizando es separado con el código MODFLOW mediante bloques o periodos de esfuerzo de tiempo variable que permiten cambiar algunos de los esfuerzos o parámetros como: condición de carga lejana, río, dren, evapotranspiración, recarga y bombeo; este cambio puede realizarse mientras la simulación está en progreso (Anderson y Woessner, 1992).

3.5 Calibración

La calibración se refiere al proceso de encontrar los valores correctos que interactúan en un modelo matemático para reproducir los valores o cargas medidas en campo, tales como parámetros, condiciones de frontera y esfuerzos, una opción para lograr la calibración del modelo es determinar valores de parámetros y esfuerzos hidrológicos partiendo de datos de carga hidráulica (problema inverso) y otra opción es partir de los valores de conductividad hidráulica, almacenamiento específico y esfuerzos hidrológicos como la recarga para calcular las cargas hidráulicas; uno de los problemas que se tiene a la hora de calibrar partiendo de la distribución de cargas hidráulicas es que generalmente esta información se encuentra incompleta.



Existen dos formas de encontrar los parámetros para lograr la calibración del modelo en un problema inverso; una es ajustando los parámetros a base de prueba y error y otra es haciendo uso de la calibración automatizada. La calibración por prueba y error es de dudosa confiabilidad, se lleva a cabo por medio del método iterativo en donde el modelador hace uso de su intuición y de su capacidad para relacionar los parámetros de tal forma que al comparar los resultados con lo medido en campo sean lo más cercano posibles, si bien es una forma aceptable de calibración no deja de tener incertidumbre ya que no conocemos el grado de error que pueda tener, en caso contrario, la calibración automatizada detecta la sensibilidad de los parámetros del modelo, la desviación estándar de los parámetros, la relación entre ellos y la desviación estándar en la predicción, permitiendo que el modelador haga un análisis para conocer si los parámetros del modelo y las predicciones fueron calculados de manera confiable con los datos disponibles, y también si son necesarios datos adicionales para mejorar el modelo (Hernández, 2012).

Actualmente se cuenta con dos códigos universales de calibración automatizada que pueden ser utilizados para cualquier tipo de modelo matemático: PEST (Doherty, 2018) que viene incluido en el software VISUAL MODFLOW el cual utiliza como algoritmo de optimización no lineal el método de Gauss-Marquardt-Levenberg y UCODE (Poeter y Hill, 1998).

El valor residual que se obtiene como resultado de la calibración se calcula restándole el valor del potencial hidráulico medido en campo en pozos de observación al valor calculado por el simulador y es útil para identificar las regiones del modelo donde la calibración es menos satisfactoria y para determinar si el modelo está sobre-estimando o sub-estimando los valores observados (Hernández, 2012).

3.5.1 Evaluación de la Calibración

Los resultados de la calibración deben ser evaluados tanto cualitativamente como cuantitativamente. La comparación entre las líneas potenciométricas medidas y las simuladas



es una evaluación cualitativa entre la similitud de ambas, de este modo dan una idea del error de la distribución espacial de error en la calibración, sin embargo, las configuraciones de datos de campo pueden ser erróneas por lo que no deben ser usadas como única prueba de calibración. Una gráfica de dispersión de mediciones de campo contra cargas simuladas es otra forma de revisar el ajuste de la calibración y esta diferencia es utilizada para cuantificar el error promedio, siendo este el objetivo de la calibración del modelo.

El error medio o residual medio (RM), es la diferencia media entre las cargas medidas (h_m) y las cargas simuladas (h_s) (Anderson y Woessner, 1992), y se define como:

$$RM = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i$$

Donde:

h_m es el valor medido de la carga hidráulica

h_s su valor simulado

n es el número de pozos de observación.

El RM deberá ser aproximado a cero, a fin de obtener un modelo virtualmente insesgado, es decir, que no tienda a subestimar ni a sobrestimar las cargas hidráulicas observadas.

La raíz del residual cuadrático medio ($RRCM$ o RMS por sus siglas en inglés), o desviación estándar mide el grado de dispersión de los residuales. Se le llama “residual” al promedio de la diferencia cuadrada del valor observado y el calculado de la carga hidráulica (Anderson y Woessner, 1992). La $RRCM$ se define como:



$$RRCM = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (h_m - h_s)_i^2 \right]^{0.5}$$

Estos estadísticos evalúan únicamente el error promedio en el modelo calibrado. El valor máximo aceptable del criterio de calibración depende de la magnitud del cambio de las cargas hidráulicas en el dominio del problema. Si el cociente de la *RRCM* y la pérdida total de carga en el sistema (*PTCS*) es pequeño, entonces los errores son solamente una porción pequeña de la respuesta global del modelo. En la práctica, la *PTCS* se calcula como la diferencia entre la mayor y la menor de las cargas hidráulicas observadas ([Anderson y Woessner, 1992](#)).



4 RESULTADOS

4.1 Modelo conceptual

El acuífero Laguna de Hormigas, es heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos lacustres hacia las partes más bajas de la cuenca. El acuífero se recarga gracias a la infiltración del agua; recibe aportaciones laterales procedentes de la precipitación de las partes altas con elevaciones de 1500 a 2400 msnm., donde las rocas de carácter volcánico tienen permeabilidad alta en rocas fracturadas y de media o baja donde no lo están, tratándose de calizas, riolitas, tobas y lutitas; una parte de agua se infiltra a través de las rocas fracturadas y la otra escurre de estas zonas serranas a través de las corrientes naturales de agua superficial como lo son los arroyos intermitentes; esta agua se desplaza hacia el valle de material aluvial con elevaciones de 1000 a 1500 msnm., y de varios cientos de metros de espesor para posteriormente infiltrarse, evaporarse y evapotranspirarse, la zona de la laguna es de material lacustre por lo que puede suponerse una baja conductividad hidráulica. A mayor profundidad las rocas calizas de las Formaciones Buda y Aurora, sobreyacidas por lutitas o secuencias de lutitas y areniscas que pueden presentar condiciones de confinamiento.

4.2 Diseño de la Malla

Para el acuífero Laguna de Hormigas se diseñó una malla vertical en diferencias finitas, orientada hacia el norte, de 174 columnas y 219 renglones siendo 38,106 celdas cuadradas de 500 x 500 m de lado, esta malla o grid se obtuvo con ayuda de un interpolador, en donde se le asignó coordenadas UTM: $X_{min}= 376,500$, $X_{max}=463,500$, $Y_{min}= 3,193,000$ y $Y_{max}= 3,302,500$ usando interpolación kriging. Esta distribución nos permite tener un buen espaciamiento para el cálculo de las cargas hidráulicas, así como también una mejor interacción del agua superficial con el agua subterránea y reduce el grado de error del cálculo ocasionado por la aglomeración de aprovechamientos en las celdas. Para la distribución vertical se obtuvieron cuatro capas en donde la malla de las tres capas suprayacentes cuenta



con las mismas dimensiones de las celdas y distribución espacial y los espesores de las capas corresponden aproximadamente al límite de los estratos de material predominante de las secciones geológicas y geofísicas, se obtuvo las coordenadas (x, y, z) de las capas de las secciones mediante CivilCAD, AutoCAD y siendo interpolados se obtuvieron los datos faltantes.

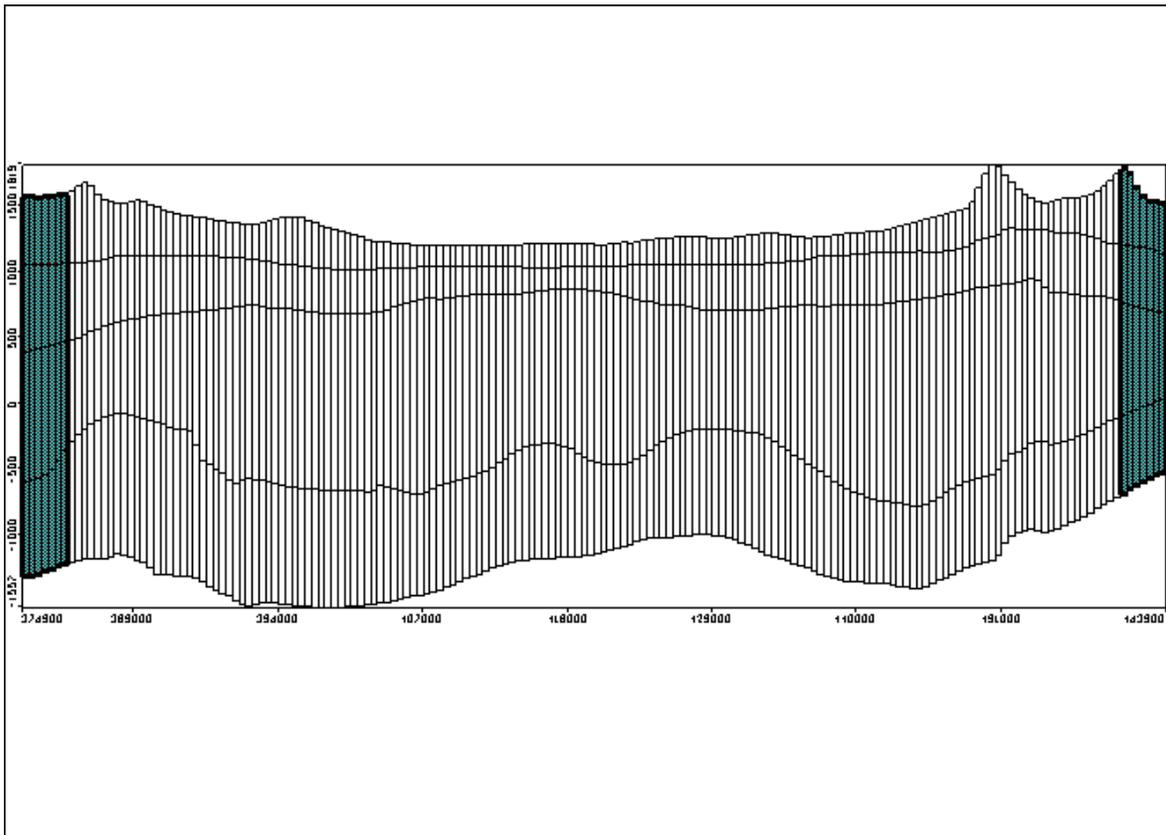


Figura 21: Perfil de la malla del modelo (Sección longitudinal, renglón 104, Visual MODFLOW)

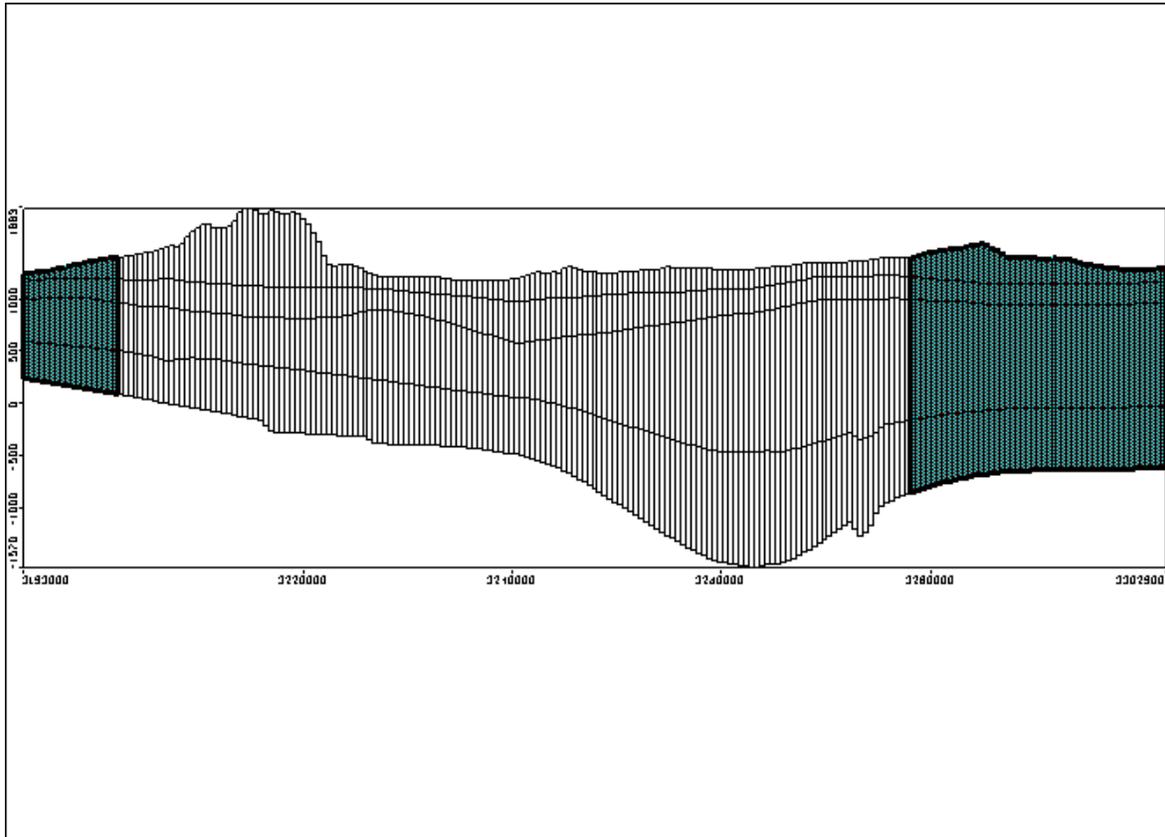


Figura 22: Perfil de la malla del modelo (Sección transversal, columna 104, Visual MODFLOW)

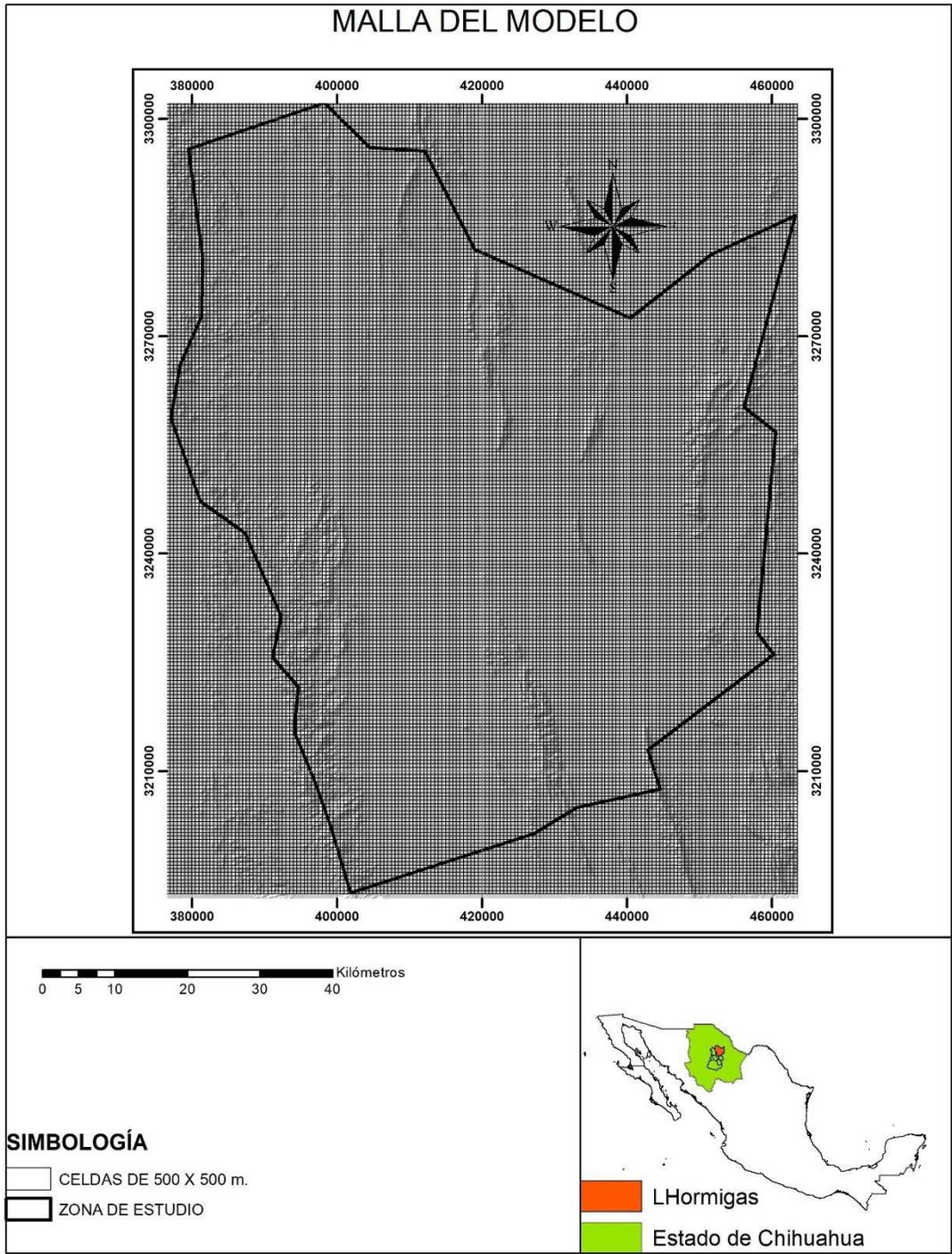


Figura 23: Malla del modelo vista en planta (ArcGIS)



4.3 Parámetros de entrada

4.3.1 Unidades hidrogeológicas

Para la distribución vertical del modelo se obtuvieron cuatro capas, los espesores de las capas corresponden a las secciones geológicas y geofísicas, la primer capa está constituida en su mayor composición por arenas, gravas, limos y arcillas tratando de seguir la beta del material; la segunda capa corresponde a intercalaciones de calizas, material aluvial y tobas; la tercer capa está constituida por caliza-lutita, tobas, caliza, andesita y conglomerado polimíctico; y la última capa la conforman calizas, areniscas-lutitas y caliza-lutita (JCAS-UACH, 2015).

Las unidades hidrogeológicas se agruparon de acuerdo a la similitud de las características hidrogeológicas de cada tipo de material, principalmente la conductividad hidráulica, (Figura 25), (Tabla 17):

Unidad 1.- Esta unidad es conformada por formaciones geológicas de calizas (Ka(i)Cz (Caliza), KaceCz (Caliza), KaCz (Caliza), kceCz (Caliza), PcppiCz (Caliza), Khapy-Cz (Yeso-Caliza) y ToTn (Tonalita)) las cuales se encuentran en algunos sitios al norte y suroeste dentro del acuífero; de espesor considerable (Secciones Geológicas E – E' y en la 10 – 10'), llegando a tener unos 150 ó 200 m de profundidad bajo el valle del acuífero. Posee porosidad secundaria por fracturamiento y disolución. Esta unidad puede ser considerada de permeabilidad baja a media según su grado de disolución y fracturamiento (JCAS-UACH, 2015).



Unidad 2.- En ésta unidad se dejó únicamente a la Caliza-Dolomía (kaCz-Do); este tipo de material se origina como consecuencia de procesos post-sedimentarios de las calizas que pueden ponerse en contacto con aguas enriquecidas en magnesio, a diferencia de las calizas, las calizas- dolomías no son solubles en agua y tienen una capacidad de almacenamiento de fluidos relacionada con la porosidad secundaria que desarrollan durante el proceso de dolomitización, su permeabilidad puede ser de baja a media (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 3.- Esta unidad se conforma por varias unidades litoestratigráficas, (KaceCz-Lu, KaCz-Lu, KbpCz-Lu, PdmcpCz-Lu, PoCz-Lu y PosdmCz-Lu). Todas ellas calizas – lutitas presentes al norte del acuífero, en las sierras Las Damas y El Pulpito (Secciones Geológicas F – F’ 7 – 7’ y 8 – 8’) con espesores considerables. Presentan un medio poroso fracturado con intercalaciones de materiales granulares, volcánicos y clásticos. Su permeabilidad se considera de baja a media (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 4.- Esta unidad comprende las formaciones geológicas basálticas con cierto grado de fracturamiento por vesicularidad y zonas de brechamiento (TeA (Andesta), ToA (Andesita), KcmLu-Ar (Lutita-Arenizca), KaLu-Cz (Lutita-Caliza), TmB (Basalto), ToB(Basalto)) se extiende en algunas porciones al oeste del acuífero así como al suroeste. Al suroeste se tienen afloramientos de la Formación Rara y secuencias de lutitas y areniscas. En la porción occidental se encuentran algunas andesitas y basaltos. Esta unidad puede ser de permeabilidad baja a media según su grado de fracturamiento (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 5.- Esta unidad está compuesta por (KcomAr-Lu y KvAr-Lu (Arenisca-Lutita), Estas areniscas y lutitas se encuentran presentes en el extremo oriental del acuífero (Sección Geológica 1 – 1’) y puede ser de permeabilidad baja a media (JCAS-UACH, 2015).



Unidad 6.- Está agrupada por ToTR(Toba Riolítica), TeTR-Ig, ToTR-Ig (Toba Riolítica- Ignimbrita), ToR (Riolitas), se encuentran al occidente de la sierra El Venado con presencia de tobas riolíticas – ignimbritas correspondiendo a las zonas topográficamente más elevadas con espesores superiores a los 500 m (Sección Geológica 9 – 9' y 6 – 6'), En la porción occidental y al norte del acuífero afloran formaciones de riolitas – tobas riolíticas. Las formaciones que integran esta unidad se consideran zonas potenciales de recarga menor, con una permeabilidad media, considerando posibles variaciones debido al grado de fracturamiento de las mismas (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 7.- En el norte y al extremo occidental se encuentra un depósito de conglomerados polimícticos (QhoCgp, QptCgp y QpthoCgp) en el pie de monte, con espesores inferiores a los 100m (Sección Geológica F – F'), Constituyen zonas de recarga en un medio poroso fracturado y granular, con permeabilidades medias (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 8.- Esta unidad tiene poca presencia dentro del acuífero, comprende las formaciones geológicas como conglomerados polimícticos (TmCgp y Ks?Tpa?Cgp) en áreas al occidente dentro del acuífero (Sección Geológica D – D'). Esta misma formación aflora en sierra El Venado. Constituyen zonas de recarga en un medio poroso fracturado, con permeabilidades bajas (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 9.- Comprende material eólico, (Qhoeo) con espesores mayores a 600 m, se encuentra principalmente en el centro del acuífero, justo al norte de la laguna. Esta formación constituye el acuífero productor de la región. Representa un medio poroso granular de porosidad y permeabilidad de mediana a elevada, con pozos de buena producción. Sin embargo, dado el medio sedimentario de depósito es de esperar zonas de baja permeabilidad debido a facies lagunares o de llanura de inundación propias de este medio (JCAS-UACH, 2015).



Unidad 11.- Esta unidad está compuesta únicamente por material lacustre; es decir limos y arcillas (Qhola) con espesores de hasta 800 m en la porción central del acuífero (Sección Geológica A – A’), el espesor va disminuyendo conforme se acerca a las sierras con elevaciones mayores. Estas formaciones se encuentran en la zona de la laguna y representan un medio de permeabilidad baja (JCAS-UACH, 2015).

Unidad 12.- Comprende los sedimentos clásticos de relleno de valle, material aluvial (Qhoal) con espesores de 300 m en promedio en la porción central del acuífero conformado por arenas (Sección Geológica A – A’). Estas formaciones también constituyen el acuífero productor de la región. Representan un medio poroso granular de permeabilidad mediana a elevada, con pozos de buena producción (JCAS-UACH, 2015).

Tabla 17: Unidades hidrogeológicas

LITOLOGIA	CLAVE	UH
Caliza	Ka(i)Cz	1
Caliza	KaceCz	1
Caliza	KaCz	1
Caliza	KceCz	1
Caliza	PcppiCz	1
Yeso-Caliza	KhapY-Cz	1
Tonalita	ToTn	1
Conglomerado poligénico-Arenisca	TmCgp-Ar	1
Caliza-Dolomía	KaCz-Do	2
Caliza-Lutita	KaceCz-Lu	3
Caliza-Lutita	KaCz-Lu	3
Caliza-Lutita	KbapCz-Lu	3
Caliza-Lutita	PdmcpCz-Lu	3
Caliza-Lutita	PoCz-Lu	3
Caliza-Lutita	PosdmCz-Lu	3
Andesita	TeA	4
Andesita	ToA	4
Andesita	TpaA	4
Andesita-Basalto	TeA-B	4
Lutita-Arenisca	JktLu-Ar	4
Lutita-Arenisca	KcmLu-Ar	4
Lutita-Arenisca	PpilLu-Ar	4
Lutita-Arenisca	PplLu-Ar	4



Lutita-Caliza	KaLu-Cz	4
Lutita-Caliza	KceLu-Cz	4
Lutita-Caliza	KcetLu-Cz	4
Pórfido andesítico	ToPA	4
Pórfido dacítico	ToPDa	4
Pórfido riolítico	ToPR	4
Pórfido riolítico	TPR	4
Basalto	TmB	4
Basalto	ToB	4
Gneis	pTmGn	4
Granito	ToGr	4
Granodiorita	KsGd	4
Granodiorita	ToGd	4
Latita	ToLa	4
Limolita-Conglomerado poligénico	PpiLm-Cgp	4
Arenisca-Lutita	KcomAr-Lu	5
Arenisca-Lutita	KvhAr-Lu	5
Riolita	TeR	6
Riolita	ToR	6
Riolita	TpaR	6
Toba riolítica	TeTR	6
Toba riolítica	ToTR	6
Toba riolítica-Ignimbrita	TeTR-Ig	6
Toba riolítica-Ignimbrita	ToTR-Ig	6
Toba riolítica-Riolita	ToTR-R	6
Conglomerado poligénico-Arenisca	KsTpaCgp-Ar	6
Conglomerado poligénico	QhoCgp	7
Conglomerado poligénico	QptCgp	7
Conglomerado poligénico	QpthoCgp	7
Conglomerado poligénico	TmCgp	8
Conglomerado poligénico	TRJmCgp	8
Eólico	Qhoeo	9
No aplicable	H2O	10
Lacustre	Qhola	11
Aluvial	Qhoal	12

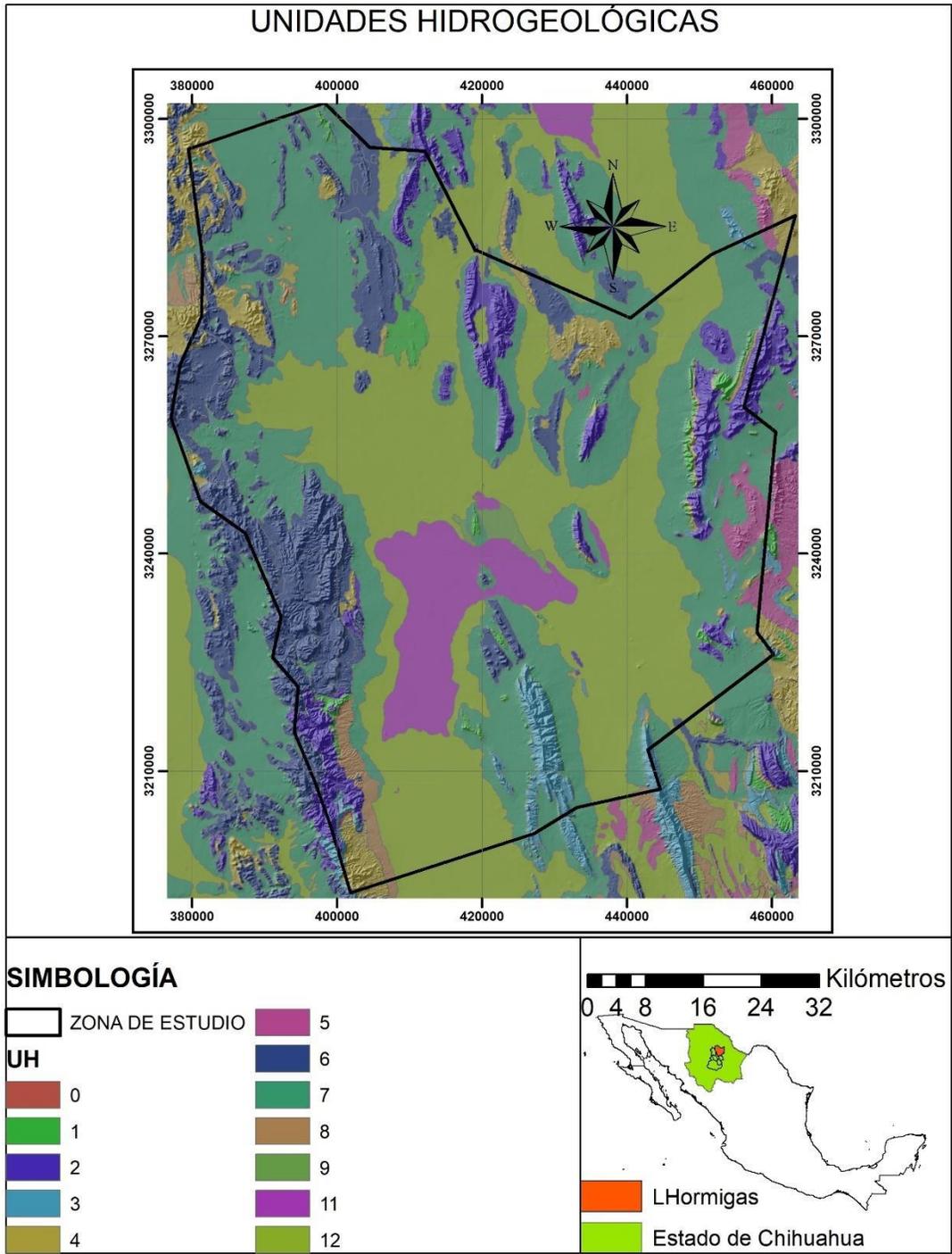


Figura 24: Unidades hidrogeológicas, adaptado de shape de litología del SGM, elaborado en ArcGIS



4.3.2 Parámetros hidráulicos

Debido a que solo se cuenta con una prueba de bombeo de un solo pozo, se recurrió a la literatura de Anderson y Woessner (1992), IGME (1984) e Iglesias (1984) para definir los parámetros iniciales para el modelo del acuífero Laguna de Hormigas. Para el almacenamiento específico (Ss) y rendimiento específico (Sy) se tomaron valores para Ss de 1×10^{-3} , 1×10^{-4} , 1×10^{-5} y 1×10^{-7} (1/m) y para Sy valores de 0.09 y 0.001. La distribución de la conductividad hidráulica (K) se muestra en la Tabla 18 y Figura 26.

Tabla 18: Conductividad hidráulica

LITOLOGIA	CLAVE	UH	CONDUCTIVIDAD HIDRÁULICA
Caliza	Ka(i)Cz	1	0.00001
Caliza	KaceCz	1	0.00001
Caliza	KaCz	1	0.00001
Caliza	KceCz	1	0.00001
Caliza	PcppiCz	1	0.00001
Yeso-Caliza	KhapY-Cz	1	0.00001
Tonalita	ToTn	1	0.00001
Conglomerado poligénico-Arenisca	TmCgp-Ar	1	0.00001
Caliza-Dolomía	KaCz-Do	2	0.0001
Caliza-Lutita	KaceCz-Lu	3	0.000001
Caliza-Lutita	KaCz-Lu	3	0.0001
Caliza-Lutita	KbapCz-Lu	3	0.0001
Caliza-Lutita	PdmcpCz-Lu	3	0.0001
Caliza-Lutita	PoCz-Lu	3	0.0001
Caliza-Lutita	PosdmCz-Lu	3	0.0001
Andesita	TeA	4	0.01
Andesita	ToA	4	0.01
Andesita	TpaA	4	0.01
Andesita-Basalto	TeA-B	4	0.01
Lutita-Arenisca	JktLu-Ar	4	0.01
Lutita-Arenisca	KcmLu-Ar	4	0.01
Lutita-Arenisca	PpilLu-Ar	4	0.01
Lutita-Arenisca	PpLu-Ar	4	0.01
Lutita-Caliza	KaLu-Cz	4	0.01
Lutita-Caliza	KceLu-Cz	4	0.01
Lutita-Caliza	KcetLu-Cz	4	0.01



Pórfido andesítico	ToPA	4	0.01
Pórfido dacítico	ToPDa	4	0.01
Pórfido riolítico	ToPR	4	0.01
Pórfido riolítico	TPR	4	0.01
Basalto	TmB	4	0.01
Basalto	ToB	4	0.01
Gneis	pTmGn	4	0.01
Granito	ToGr	4	0.01
Granodiorita	KsGd	4	0.01
Granodiorita	ToGd	4	0.01
Latita	ToLa	4	0.01
Limolita-Conglomerado poligénico	PpiLm-Cgp	4	0.01
Arenisca-Lutita	KcomAr-Lu	5	0.01
Arenisca-Lutita	KvhAr-Lu	5	0.01
Riolita	TeR	6	5
Riolita	ToR	6	5
Riolita	TpaR	6	5
Toba riolítica	TeTR	6	5
Toba riolítica	ToTR	6	5
Toba riolítica-Ignimbrita	TeTR-Ig	6	5
Toba riolítica-Ignimbrita	ToTR-Ig	6	5
Toba riolítica-Riolita	ToTR-R	6	5
Conglomerado poligénico-Arenisca	KsTpaCgp-Ar	6	5
Conglomerado poligénico	QhoCgp	7	0.1
Conglomerado poligénico	QptCgp	7	0.1
Conglomerado poligénico	QpthoCgp	7	0.1
Conglomerado poligénico	TmCgp	8	0.001
Conglomerado poligénico	TRJmCgp	8	0.001
Eólico	Qhoeo	9	0.00001
No aplicable	H2O	10	
Lacustre	Qhola	11	0.000001
Aluvial	Qhoal	12	10

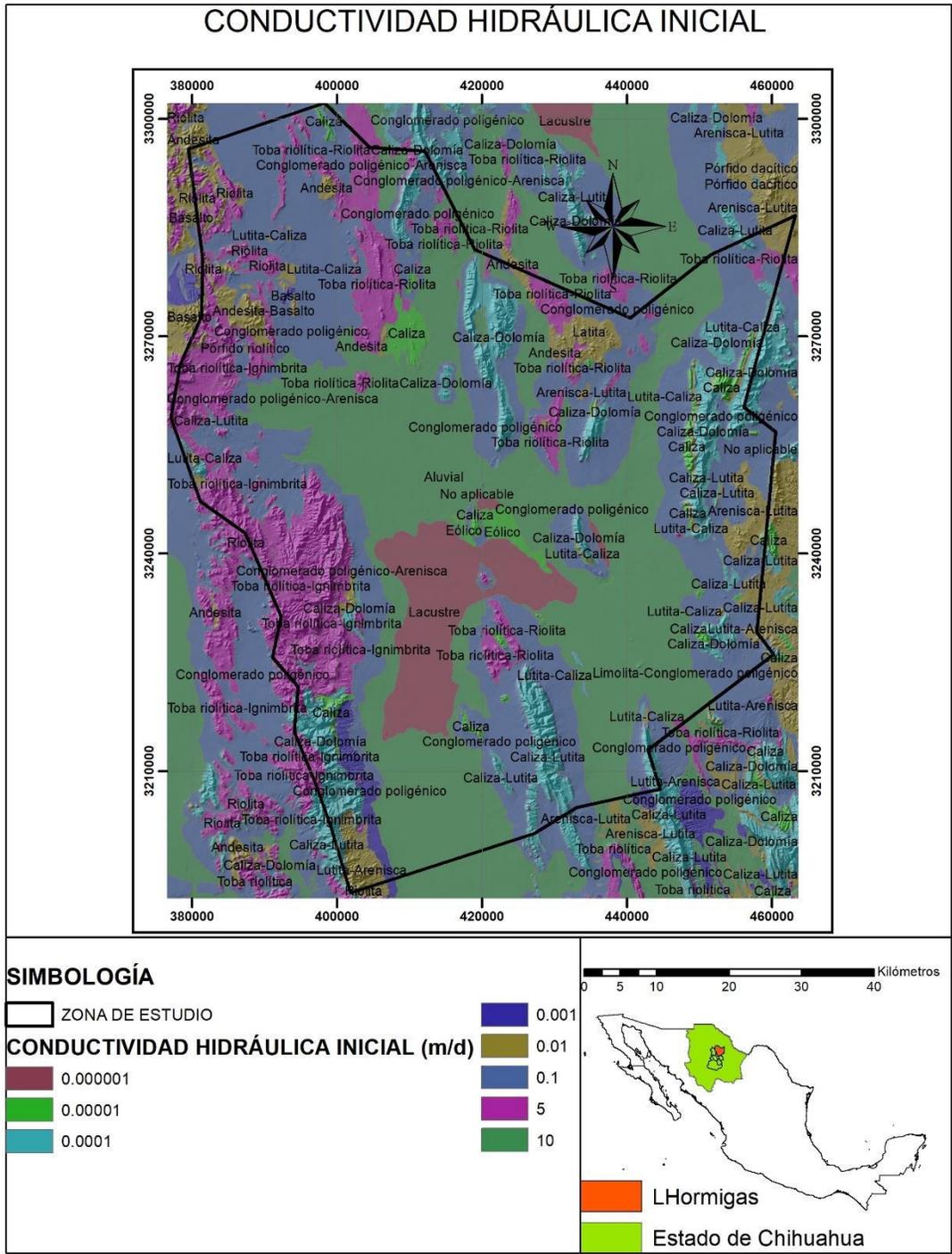


Figura 25: Conductividad hidráulica inicial, datos de Visual MODFLOW, elaborado en ArcGIS

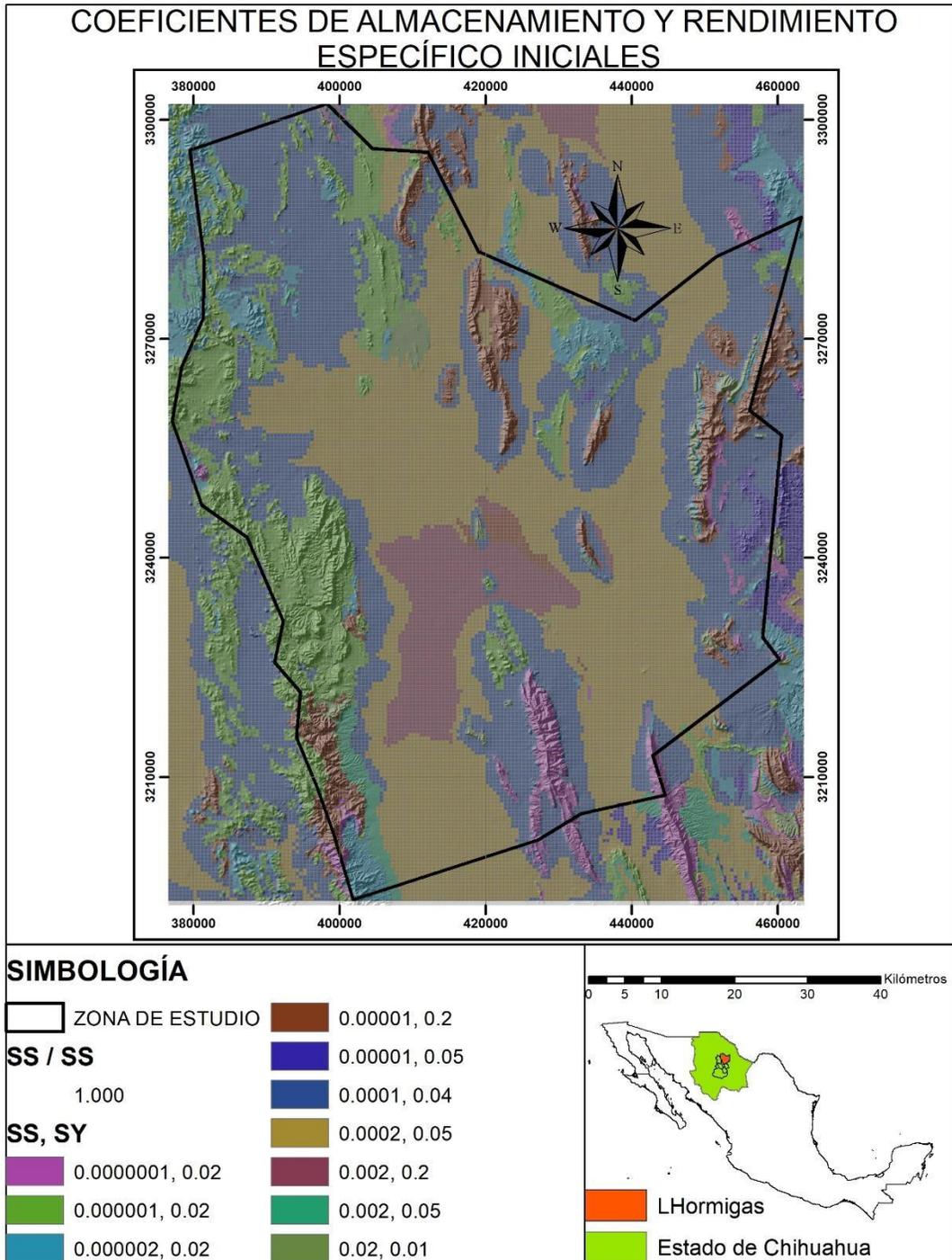


Figura 26: Coeficientes de almacenamiento S_s y rendimiento específico S_y iniciales, datos de Visual MODFLOW, elaborado en ArcGIS



4.3.3 Fronteras del modelo

Las fronteras naturales que existen al este y al oeste del modelo de la zona de estudio son de flujo nulo, siendo delimitada por sierras masivas de baja permeabilidad, por lo que no hay intercambio de flujo de agua entre los acuíferos circundantes en esas zonas; otro tipo de frontera que se tiene en este acuífero es el que está delimitado por cuencas superficiales al norte, en donde se tiene una entrada por flujo lateral y al sur una salida, éste límite está definido por la CONAGUA para fines administrativos y en VISUAL MODFLOW está asignado mediante celdas activas e inactivas y por las zonas impermeables de roca que coadyuvaron en la determinación de las direcciones de flujo del modelo; estas fronteras también fueron establecidas tomando en cuenta diferentes factores como: carga constante, recarga y evapotranspiración.

4.3.4 Pozos de observación y bombeo

En total se asignaron 487 pozos de bombeo, algunos de ellos activos en algunos años e inactivos en otros mientras que algunos otros permanecieron activos en todos los años, suman una extracción de 194.36 hm³/año. Se asignó un total de 141 pozos de observación al modelo para los años de 1981, 2005, 2006, 2011 y 2012, obtenidos de información y piezometría de los censos, (Tabla 19).

Tabla 19: Volúmenes de extracción de los pozos de bombeo por año

AÑO	Q (hm ³ /año)
1981	12.62
1985	22.47
2005	24.92
2006	41.71
2012	92.64
TOTAL	194.36

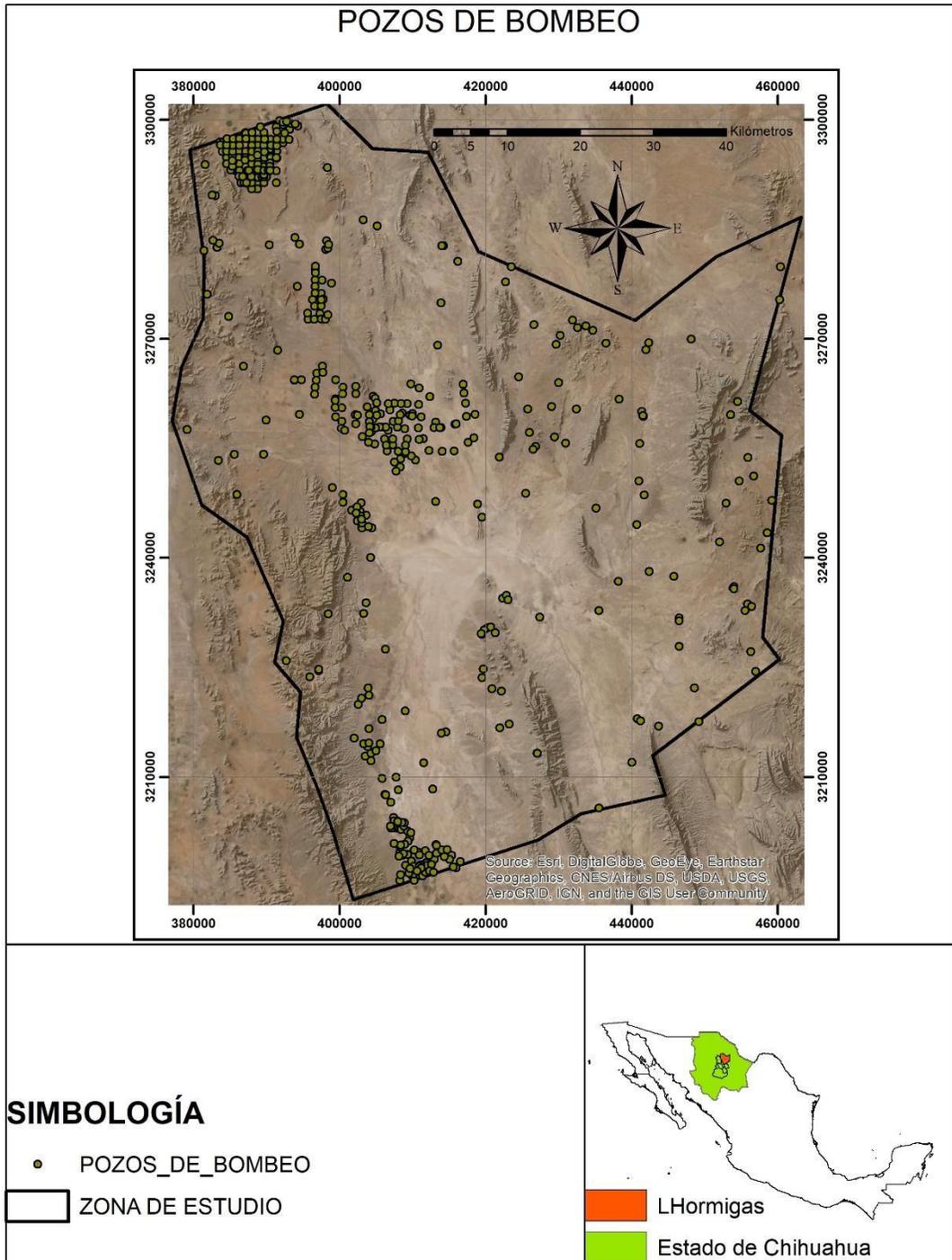


Figura 27: Pozos de bombeo, (ArcGIS)

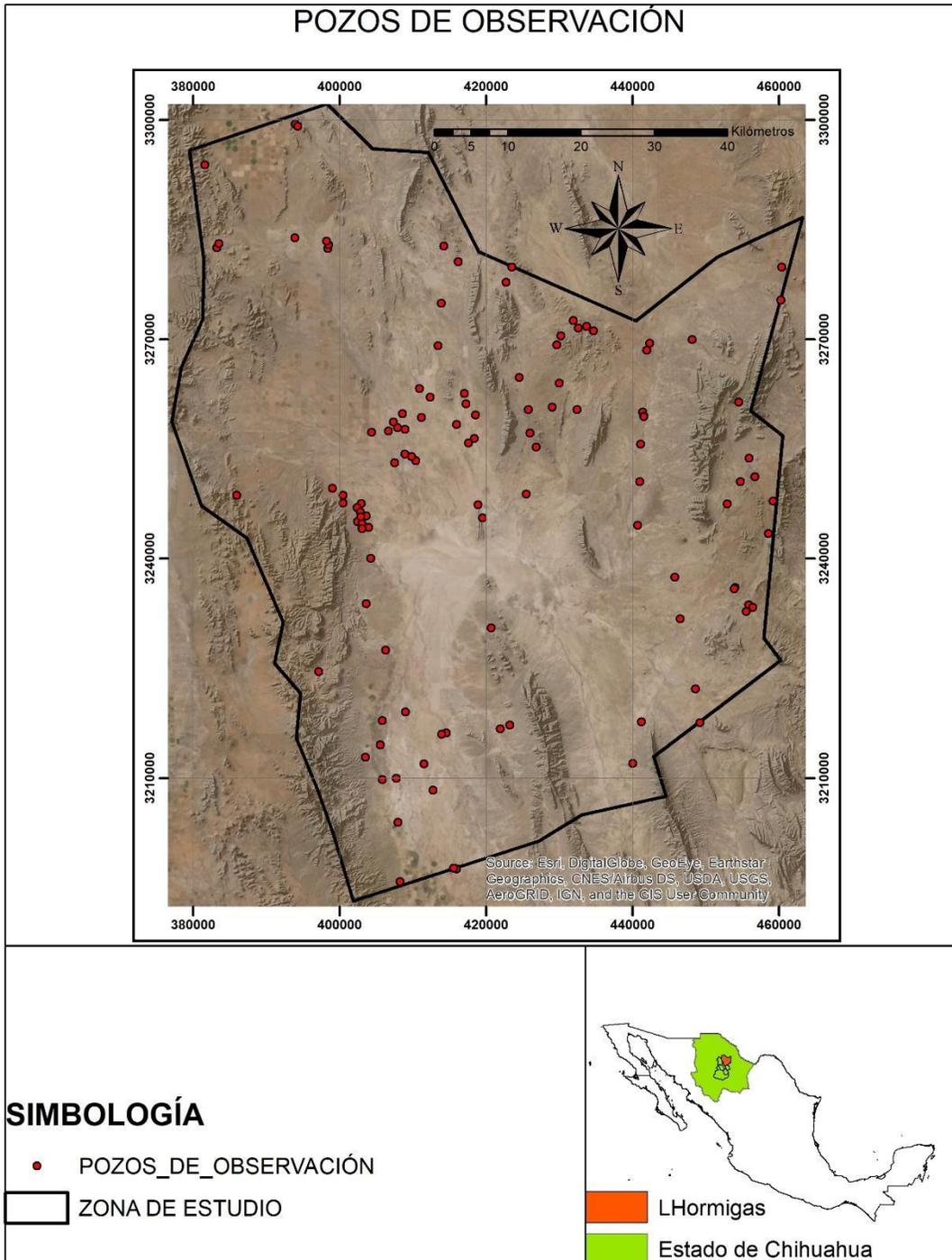


Figura 28: Pozos de observación, (ArcGIS)



4.3.5 Condiciones iniciales

Los valores iniciales que se asignaron al modelo son los más antiguos y corresponden al año 1981, primero se hizo una configuración con la elevación piezométrica del nivel del agua de los pozos, posteriormente se obtuvieron coordenadas de los puntos que conforman las líneas equipotenciales con sus respectivos valores de elevación y con ellas se realizó una interpolación con el método de kriging para tener valores en toda el área, es importante mencionar que no se tomaron en cuenta norias que no son representativas del nivel del acuífero por tratarse probablemente de lentes colgados y algunos otros pozos rechazados por coincidir la misma ubicación y valores de elevación del nivel estático con otros pozos, siendo estos valores muy similares entre sí, (Figura 29).

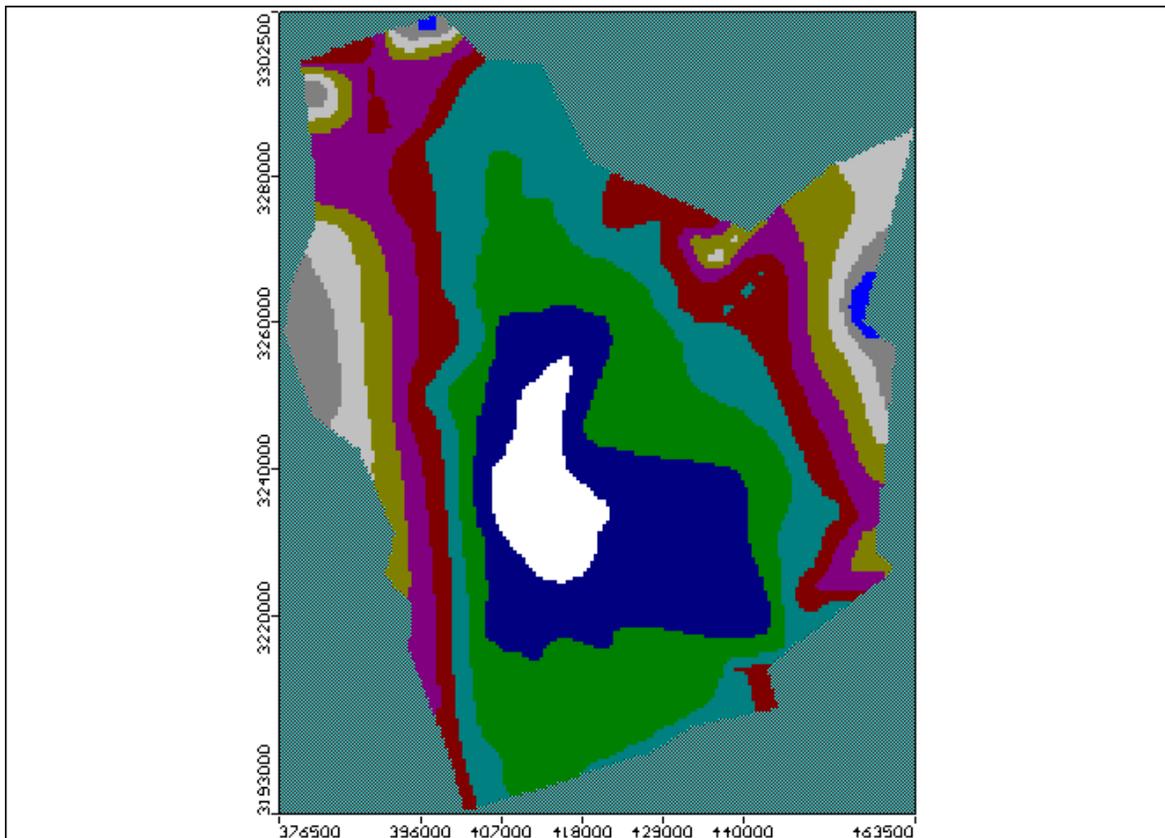


Figura 29: Condiciones iniciales (VISUAL MODFLOW)



4.3.6 Periodos de esfuerzo

El tiempo total que se analizó en el modelo, fue separado en bloques o periodos de esfuerzo de tiempo variable con el código MODFLOW y fueron necesarios para hacer cambios en algunos de los esfuerzos. En este modelo se definieron 8 periodos de esfuerzo que fueron discretizados por el aumento del volumen de extracción y la variación de la recarga por retorno de rego; el tiempo total abarca un periodo que va del año 1981 a 2012, (Tabla 20).

Tabla 20: Periodos de esfuerzo

PERIODO	AÑO DEL PERIODO	PERIODO EN DÍAS
1	0-1981	0-152
2	1981-1985	152-1613
3	1985-2005	1613-8918
4	2005-2006	8918-9283
5	2006-2008	9283-10014
6	2008-2009	10014-10379
7	2009-2010	10379-10744
8	2010-2012	10744-11674

4.3.7 Zonificación de la recarga

En el modelo del acuífero Laguna de Hormigas se asignaron dos tipos de recarga, una por precipitación y la otra por retorno de riego; la recarga por precipitación permanece constante en la mayor parte del acuífero siendo de 6.8 mm/año (Tabla 21 y 22), mientras que la recarga por retorno de riego se clasificó en tiempos tomando en cuenta que los pozos de la parte sur estuvieron perforados desde el año 1981 al 2012, a diferencia de los pozos del centro que fueron perforados en el año 2008, permaneciendo activos hasta el 2012 y los del norte cambiaron constantemente partiendo del año 2008 al 2012, incrementando el área debido al aumento de pozos de extracción (Figura 30).

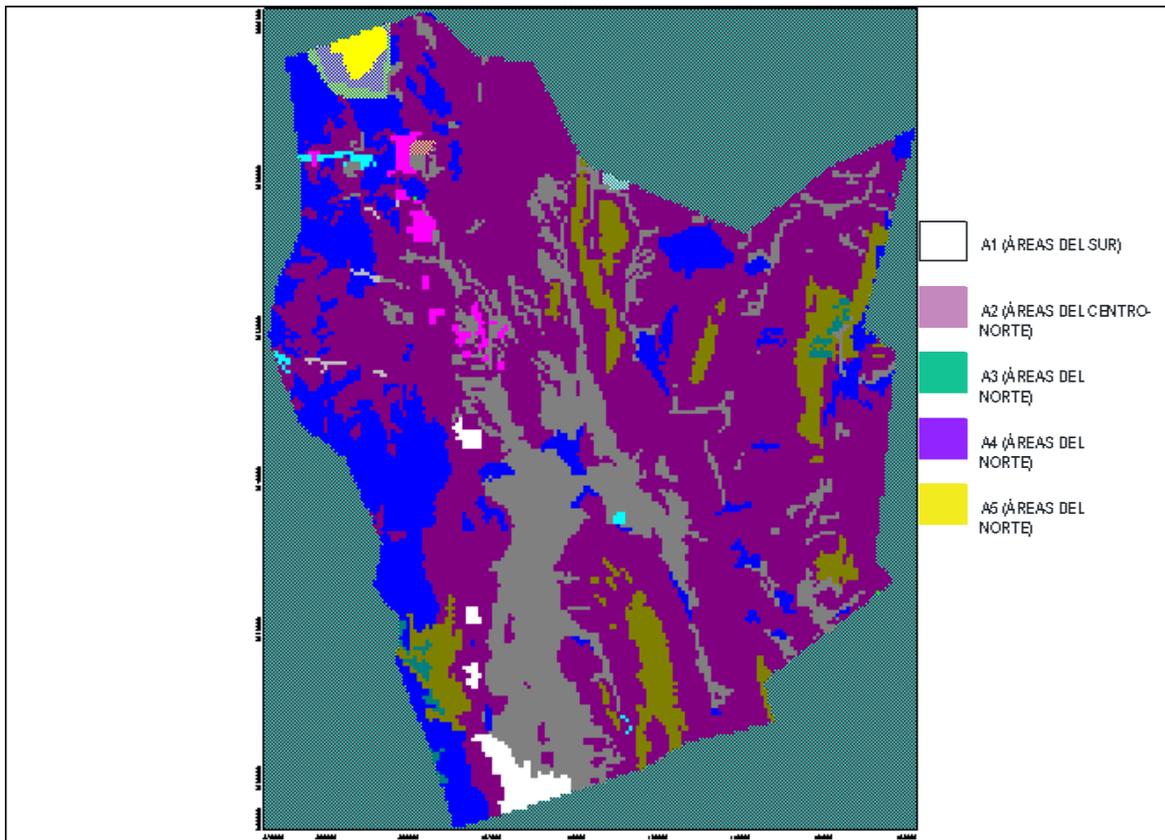


Figura 30: Zonas de recarga (Visual MODFLOW)



Tabla 21 Recarga por retorno de riego para Visual

RECARGA POR RETORNO DE RIEGO PARA EL ACUÍFERO LAGUNA DE HORMIGAS													
DESCRIPCIÓN	AREA (m2) AÑO 0-2012	AREA (m2) AÑO 2008-2009	AREA (m2) AÑO 2009-2011	AREA (m2) AÑO 2011-2012	AREA (m2) AÑO 2008-2012	AREA TOTAL (m2) 2005-2012	RECARGA (mm/año) AREAS DE 0 A 2005	RECARGA (mm/año) AREAS DE 2005 A 2011	RECARGA (mm/año) AREAS DE 2008 A 2011	RECARGA (mm/año) AREAS DE 2011 A 2012	RECARGA (mm/año) AÑO 2008-2011	RECARGA (mm/año) AÑO 2009-2011	RECARGA (mm/año) AÑO 2011-2012
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL		31726719.4	25356544	15479899	371269.6	371269.6414	0.050504704	0.22133441					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y PERMANENTE	4689367.7					72565162.28							
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	46411514.66					4689367.722	0.599871369	0.665076649					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	2377894.8					46411514.66	5.694179779	6.313130127					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE	2750963.0					2377894.774	0.291741402	0.323453334					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						2750963.014	0.337512751	0.374196972					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						599368.4	0.081527778	0.357291523					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						879009.3	0.11967613	0.524474822					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						879009.282	0.076849479	0.344171554					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						572317.1	0.334474279	1.465817264					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						2456916.2	0.179293199	0.785743728					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						1318089.3	0.12739473	0.559812029					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						939087.6	0.074480264	0.326406224					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						547548.2	0.33471255	1.466861474					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						2460667.9	0.66061592	2.895117143					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						4856574.3	0.241084994	1.056543261					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						1772356.9	1.357047614	5.947195178					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						9976451.3	0.083504118	0.40977251					
AGRICULTURA DE RIEGO ANUAL Y SEMIPERMANENTE						687403.5	0.0339656629	0.173794124					
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE						291540.6	0.134378755	0.568908356					
AGRICULTURA DE RIEGO PERMANENTE						887896.9	0.02628218	0.115180375					
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL						193215.7	0.059401214	0.260322931					
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL						436693.1	0.283043906	1.284250669					
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL						2154337.3	1.887386813	8.271389692					
AGRICULTURA DE TEMPORAL ANUAL						13875289.9	6.172662219	27.05139201					
						174373755.3	6.9233053	7.675860063					
						9062942.6							
						18125946.5							
						0.000005981							
						174373755.3							
						20680033.82							
						4136006.764							
						0.0000001360							
						174373755.3							
						18652527.04							
						3730505.408							
						0.0000001227							

ÁREAS DE LA ZONA SUR QUE VAN DE 1981 A 2012 PARA USO AGRÍCOLA+ RECARGA POR PRECIPITACIÓN PLUVIAL
 SIENDO LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE 66 MM/AÑO + RECARGA POR RETORNO DE RIEGO CORRESPONDIENTE AL ÁREA CORROBORADA CON IMÁGENES SATELITALES

ÁREAS DE LA ZONA NORTE, DE 0 A 2008 NO HABIA CULTIVOS, SE DEJÓ SOLO LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN PLUVIAL, CAMBIÓ SU ÁREA PARA 2008, 2009 Y 2011
 SIENDO LA RECARGA POR PRECIPITACIÓN PLUVIAL DE 66 MM/AÑO + RECARGA POR RETORNO DE RIEGO CORRESPONDIENTE AL ÁREA CORROBORADA CON IMÁGENES SATELITALES

ÁREAS DE LA ZONA SUR QUE VAN DE 1981 A 2012 PARA USO AGRÍCOLA+ RECARGA POR PRECIPITACIÓN PLUVIAL

TOTAL DE RECARGA EN mm/año



Tabla 22: Periodos para cada área de retorno de riego

Recarga por áreas para retorno de riego			
Poligonos del sur del acuífero A1			
Periodo en días	Periodo en años	Área (m2)	Recarga (mm/año)
0-11,674	1981-2012	-	6.8 (PMA)
0-8,918	1981-2005	-	6.92 (Retorno de riego)
8,919-11674	2005-2012	-	7.67 (Retorno de riego)
Poligonos del centro- norte A2			
Periodo en días	Periodo en años	Área (m2)	Recarga (mm/año)
0-11,674	1981-2008	-	6.8 (PMA)
10,014-11,109	2008-2011	-	6.17 (Retorno de riego)
11,109-11,674	2011-2012		27.05 (Retorno de riego)
Poligonos norte A3			
Periodo en días	Periodo en años	Área (m2)	Recarga (mm/año)
0-11,674	1981-2008	-	6.8 (PMA)
10,014-10,379	2008-2009	31,726,719.37	4.31(Retorno de riego)
10,379-11,109	2009-2011	31,726,719.37	3.44 (Retorno de riego)
11,109-11,674	2011-2012	31,726,719.37	9.22 (Retorno de riego)
Poligonos norte A4			
Periodo en días	Periodo en años	Área (m2)	Recarga (mm/año)
0- 11,674	1981-2008	25,358,543.90	6.8 (PMA)
10,014- 10,379	2008-2009	25,358,543.90	4.31 (Retorno de riego)
10,379- 11,109	2009-2011	25,358,543.90	3.44 (Retorno de riego)
Poligonos norte A5			
Periodo en días	Periodo en años	Área (m2)	Recarga (mm/año)
0- 11,674	1981- 2011	15,479,899.00	6.8 (PMA)
11,109-11,674	2011- 2012	15,479,899.00	9.22 (Retorno de riego)



4.4 Calibración

Para llevar a cabo la calibración del modelo del acuífero Laguna de Hormigas se utilizó el método de ensayo y error y con apoyo del método automatizado usando el código PEST incluido en el programa Visual MODFLOW se procedió al mejoramiento del comportamiento del sistema reduciendo el error máximo residual, para ello también fue necesario modificar zonas y valores de conductividad hidráulica misma que depende de la dirección del flujo, coeficientes de almacenamiento y rendimiento específico así como condiciones iniciales y recarga por precipitación pluvial, también fue necesario depurar información de pozos que no tenían similitud con los demás ya que probablemente fue un error de medición del nivel estático cuando se realizó el censo o alguna otra razón que se desconoce, no se tomaron en cuenta ya que el resultado sería erróneo, así como también es necesario mencionar que el modelo presenta mayor grado de incertidumbre en los valores de los parámetros y fronteras, (Figura 31).

Se realizaron más de 150 pruebas, revisando los hidrógrafos del modelo para llegar a una calibración que se encontrara dentro del rango de lo aceptable para un modelo de tipo regional, ya que siendo uno de los más grandes del estado de Chihuahua, fue más complicado lograrlo. Los resultados obtenidos de la calibración se evaluaron de forma cualitativa y cuantitativa, la primera se realizó revisando de forma subjetiva el ajuste entre el modelo y la realidad. También se evaluó la comparación entre las configuraciones de cargas observadas y simuladas con la distribución del error en la calibración y la segunda se realizó revisando la recta de calibración buscando que la distribución de los puntos en la recta de calibración se encontrará distribuida aleatoriamente dentro del rango aceptable, (Figuras 32, 33, 34, 35 y 36).

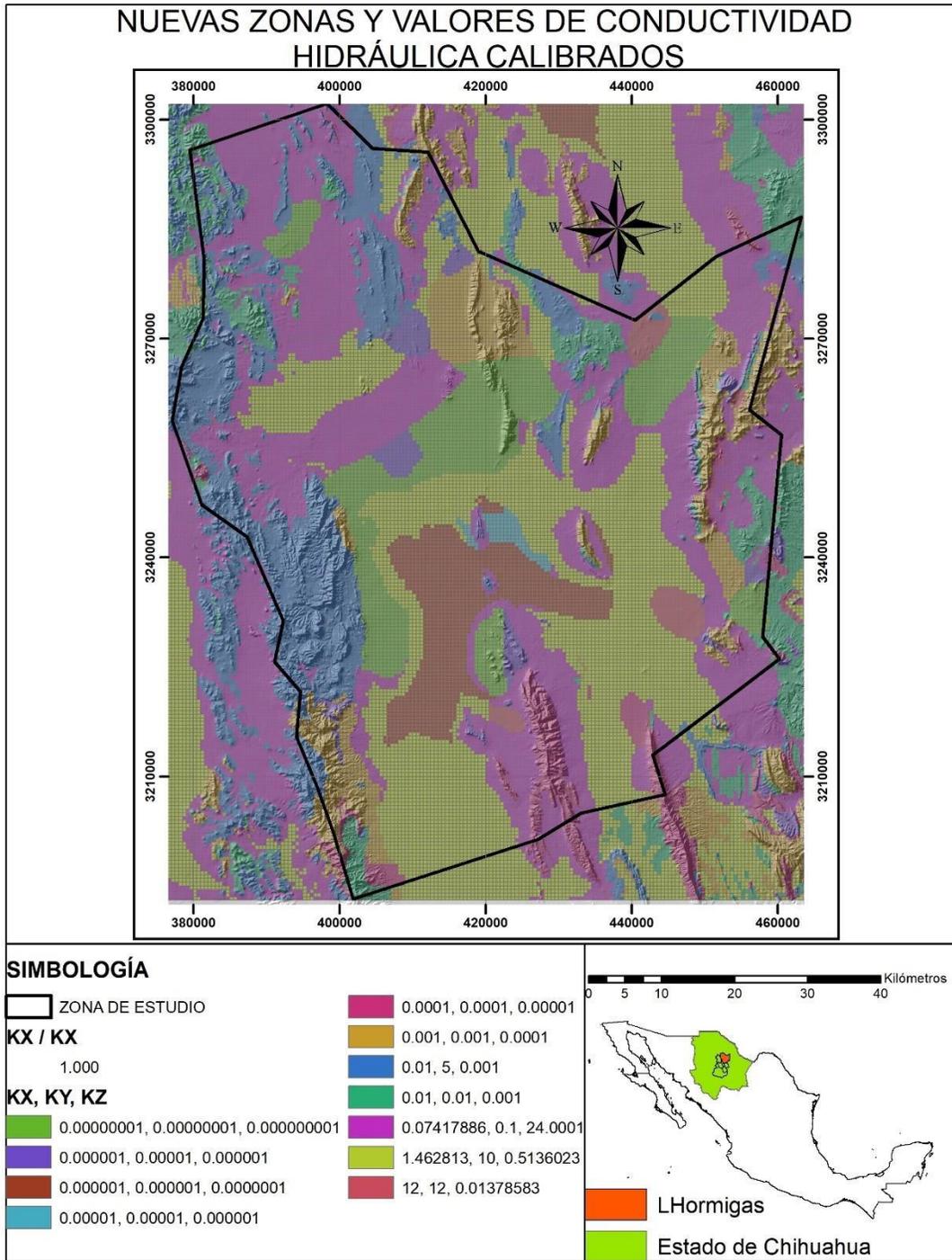


Figura 31: Nueva zonificación de conductividad hidráulica, datos de Visual MODFLOW, elaborado en ArcGIS

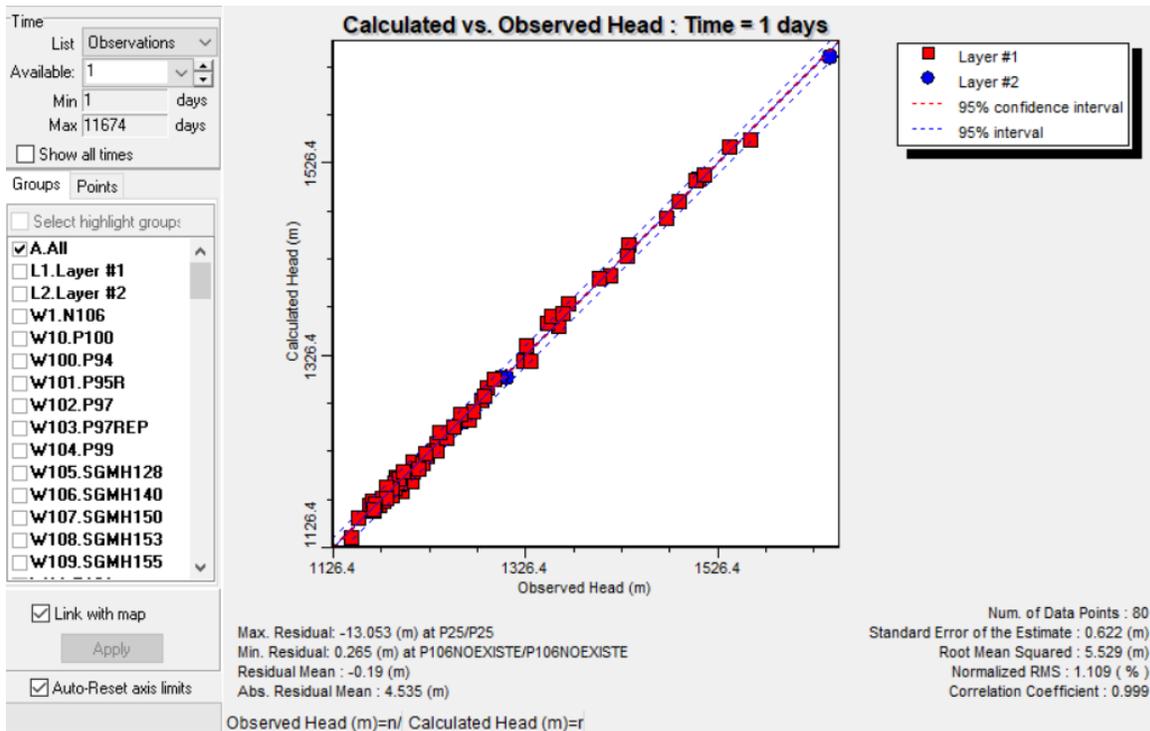


Figura 32: Recta de calibración, tiempo 1 día correspondiente al año 1981, (Visual MODFLOW)

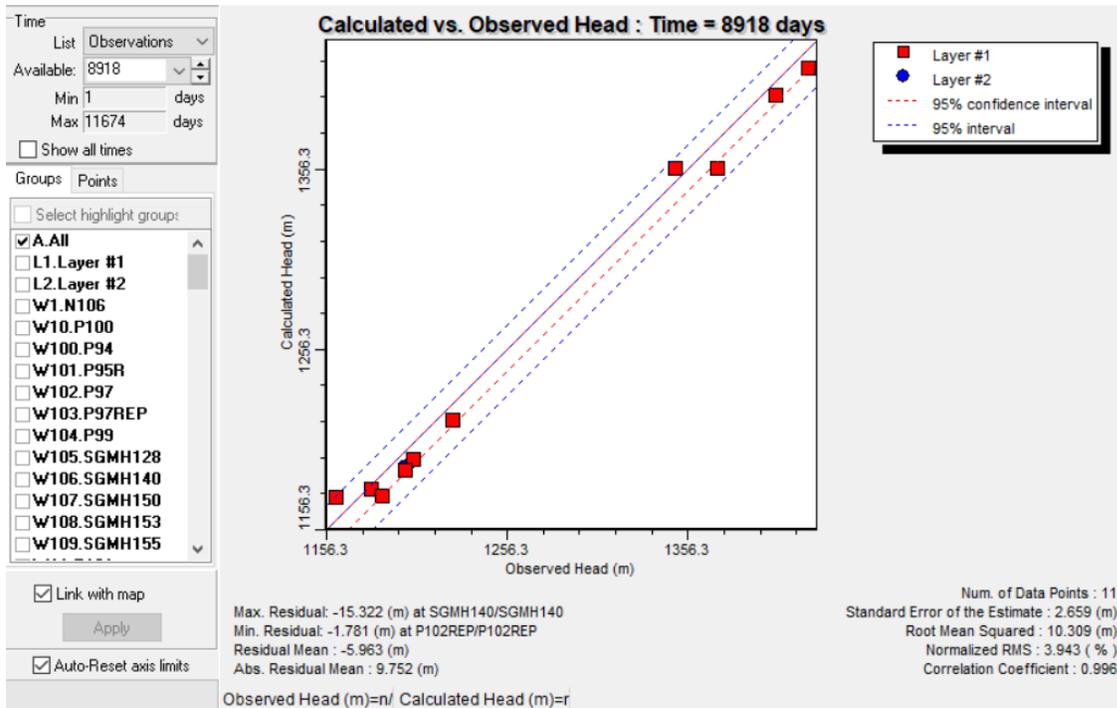


Figura 33: Recta de calibración, tiempo 8918 días correspondiente al año 2005, (Visual MODFLOW)

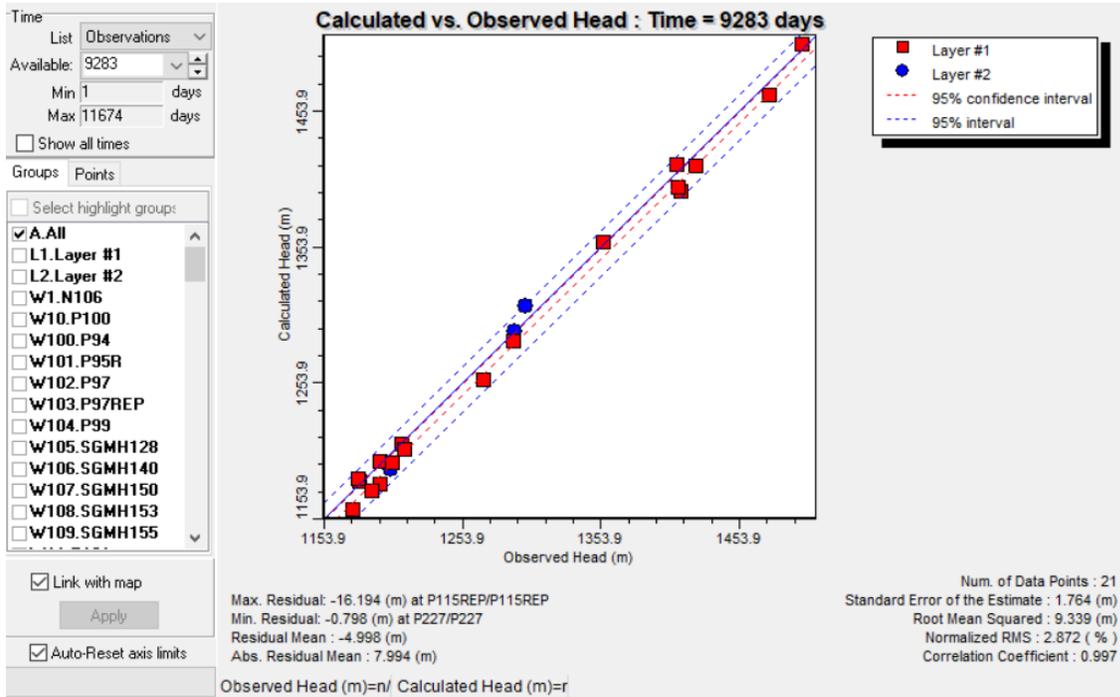


Figura 34: Recta de calibración, tiempo 9283 días correspondiente al año 2006, (Visual MODFLOW)

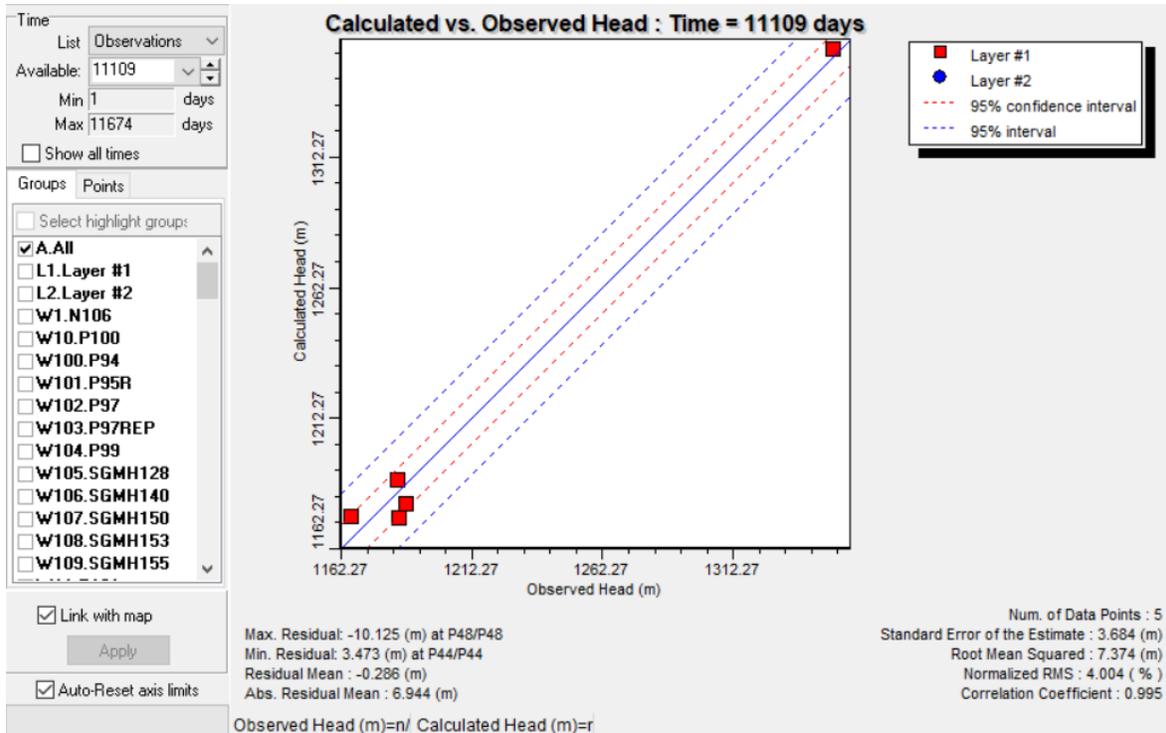


Figura 35: Recta de calibración, tiempo 11109 días correspondiente al año 2011, (Visual MODFLOW)

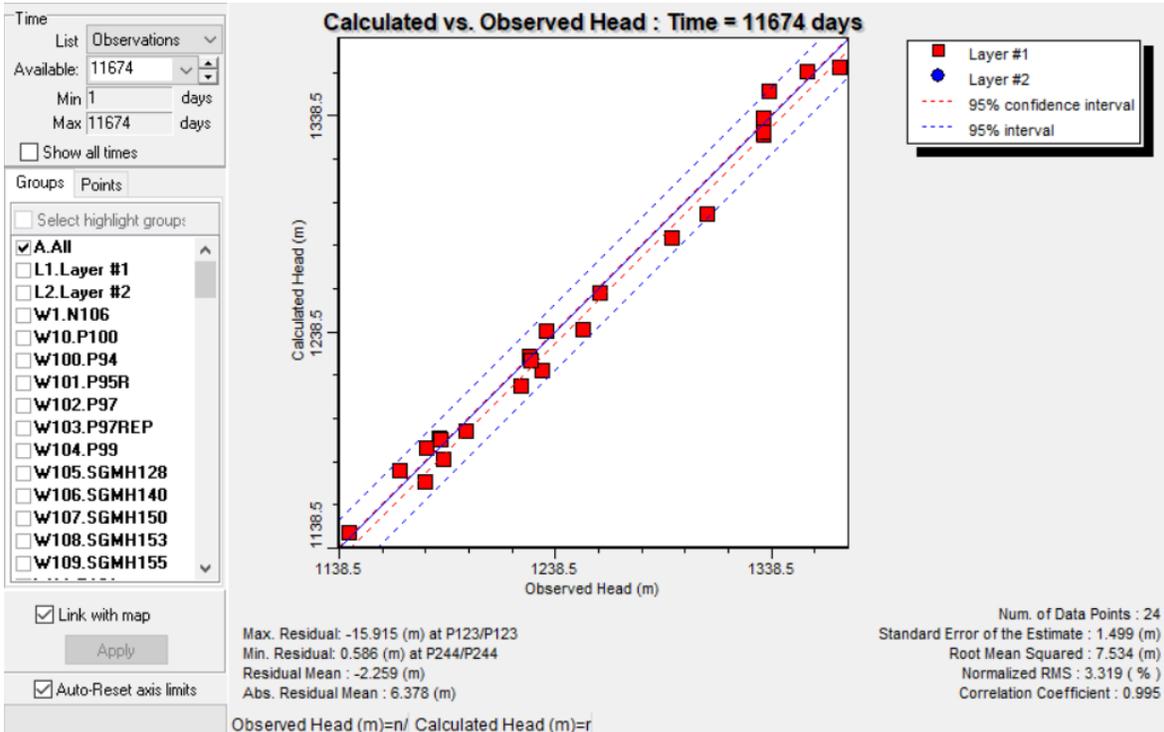


Figura 36: Recta de calibración, tiempo 11674 días correspondiente al año 2012, (Visual MODFLOW)

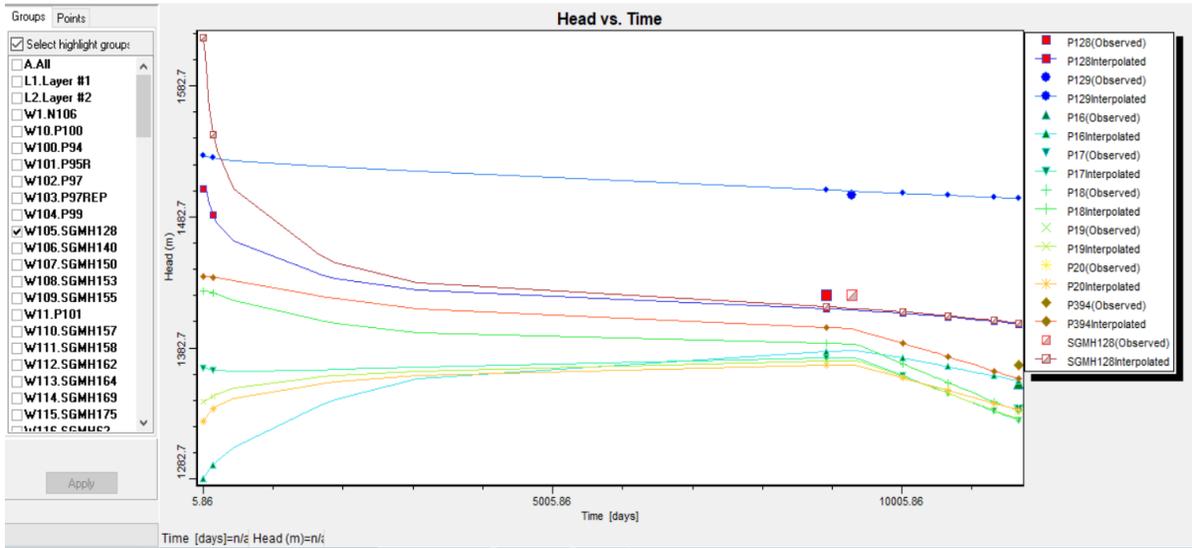


Figura 37: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados en la zona norte del acuífero, (Visual MODFLOW)

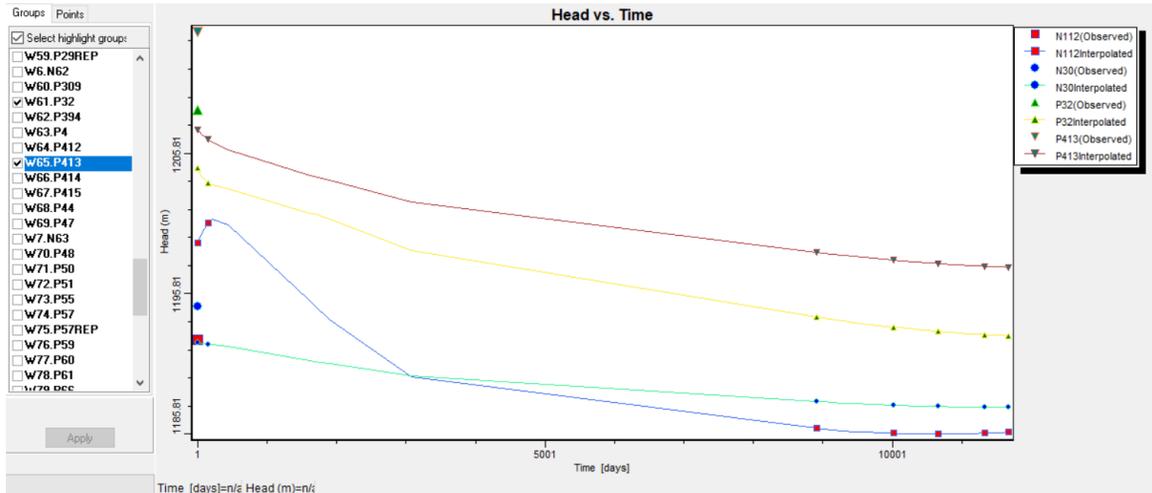


Figura 38: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados en la zona centro del acuífero, (Visual MODFLOW)

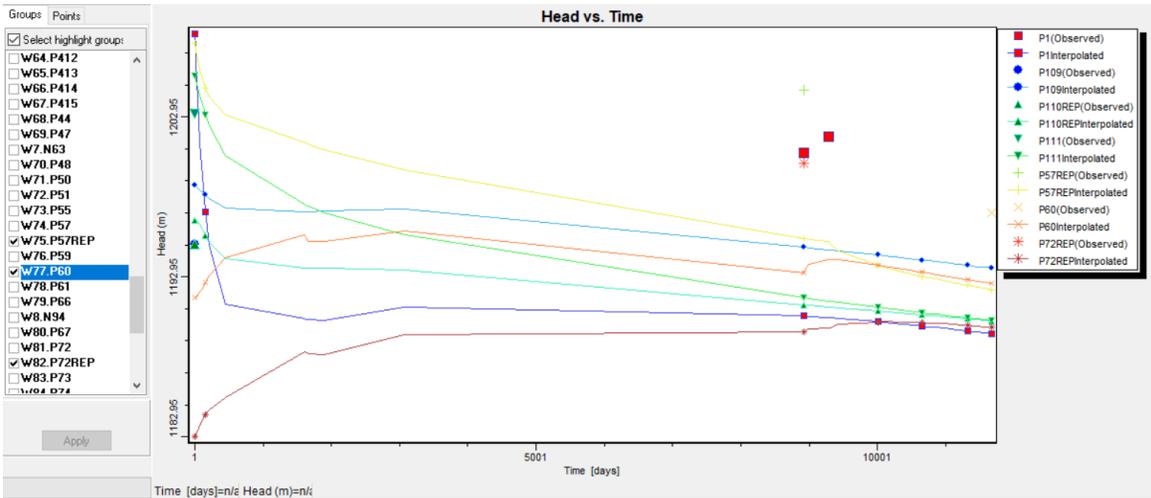


Figura 39: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados en la parte sur del acuífero, (Visual MODFLOW)



También se obtuvieron mapas del programa Visual MODFLOW que muestran las configuraciones del año 1981, 2005 y 2012 con sus líneas equipotenciales y líneas de flujo en donde se visualiza de manera gráfica cómo se comporta el flujo del agua subterránea.

El flujo local proviene de las sierras para finalmente concentrarse en el valle, en algunas partes también se concentra en zonas con mayor número de pozos y mayor volumen de bombeo creando conos de abatimiento, se puede observar este comportamiento en la parte sur, donde se encuentra el pozo 72REP, en la parte Nor - Central, donde está la concentración de varios pozos y en la parte Norte; zona en la que se dio más notorio el cambio por el aumento considerable de número de pozos. En cuanto al flujo regional, existe un flujo entrante en el Sur proveniente del acuífero vecino Aldama San Diego y Potrero del Llano y un flujo saliente al Norte hacia el acuífero Laguna de Tarabillas.

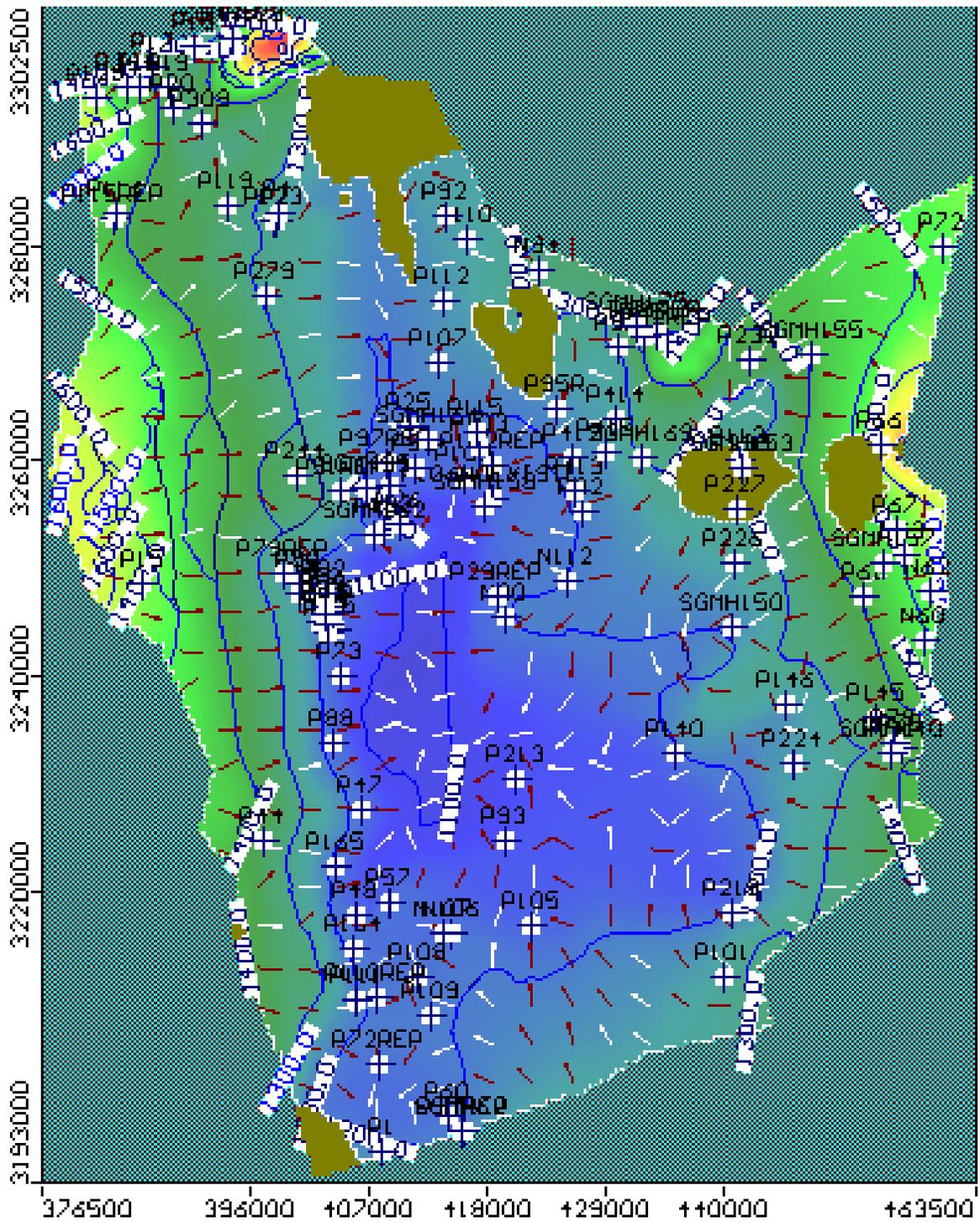


Figura 40: Configuraciones para el año 1981 representadas por el programa Visual MODFLOW

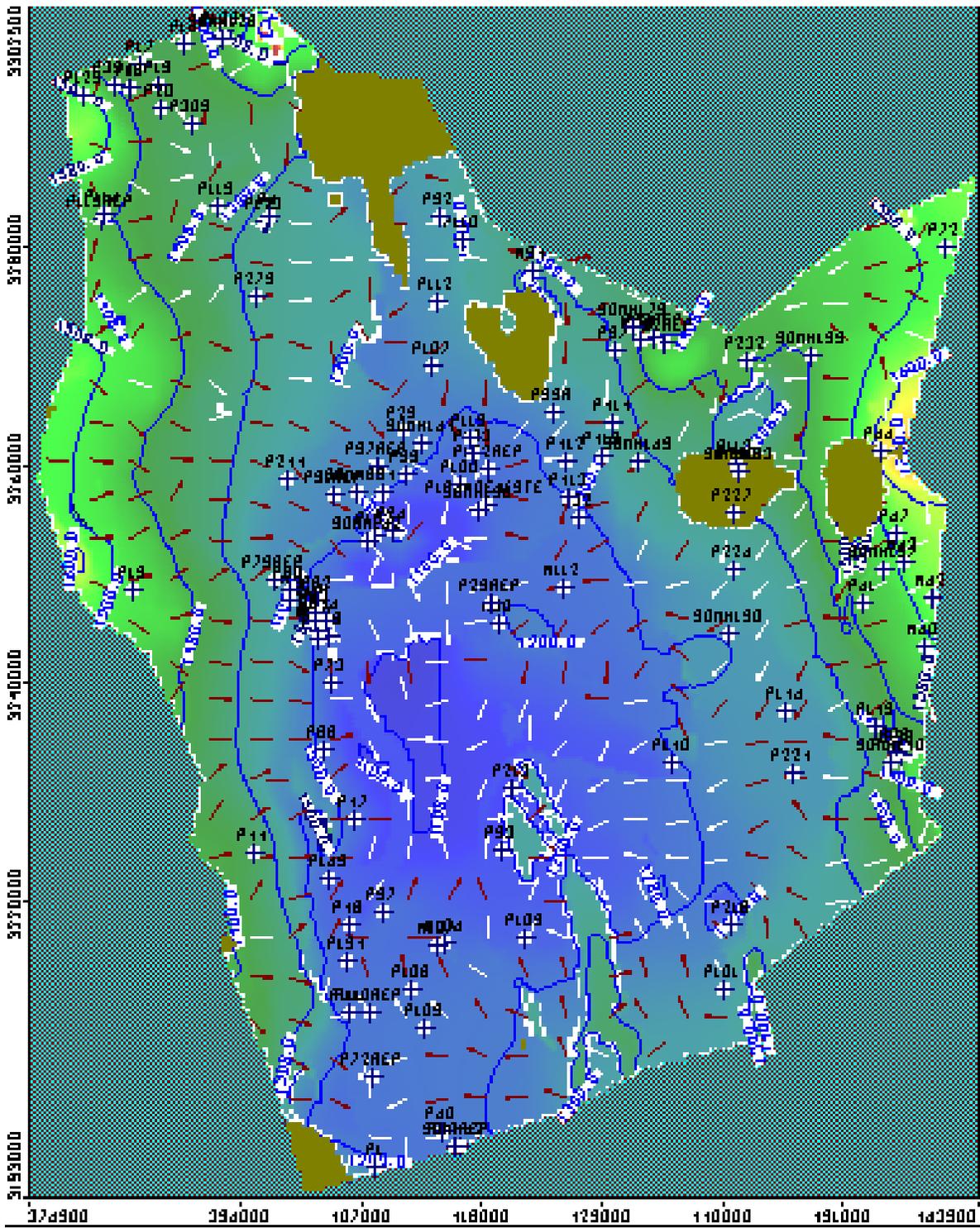


Figura 41: Configuraciones para el año 2005 representadas por el programa Visual MODFLOW

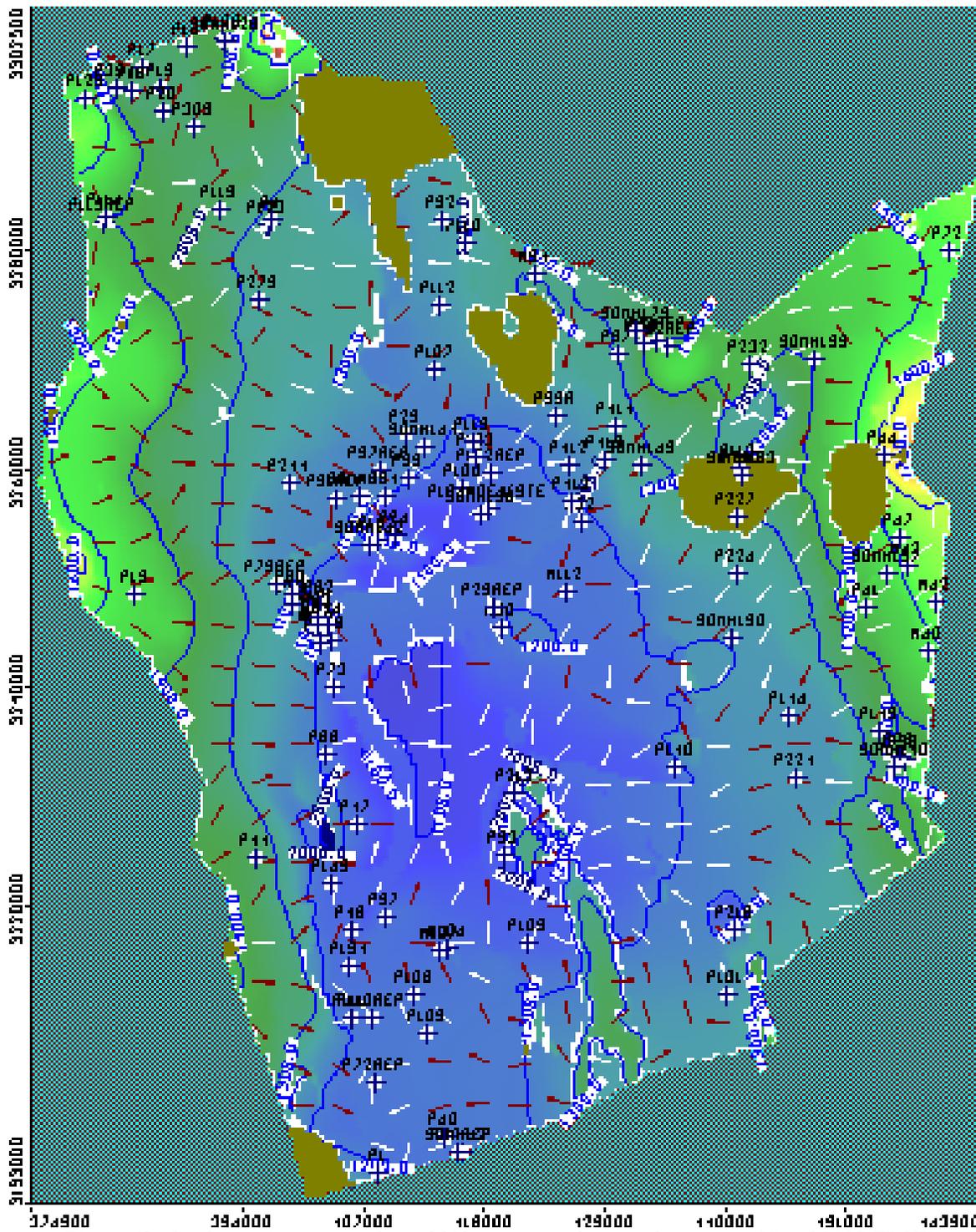


Figura 42: Configuraciones para el año 2012 representadas por el programa Visual MODFLOW



5 PREDICCIÓN

Una vez que se logró calibrar el modelo del acuífero Laguna de Hormigas, se realizaron predicciones ante diferentes escenarios una a 10 años, correspondiente al 15 de diciembre de 2022, otra a 15 años correspondiente al 15 de diciembre de 2027 y por último a 20 años correspondiente al 15 de diciembre de 2032.

En el primer escenario se consideraron los bombeos constantes para tomarlo como base para poder realizar los otros dos escenarios, dejando el error máximo residual en cero para los tres años de predicción.

En el segundo escenario se buscó reproducir el comportamiento hidrológico del acuífero en un tiempo de 10, 15 y 20 años aumentando el volumen de bombeo en un 20%, 50% y 110% respectivamente con la finalidad de simular el incremento del número de concesiones hasta llegar al volumen de extracción registrado en el DOF 04/01/2018 de 209.68 hm³/año.

Para el tercer escenario se mantuvo constante el bombeo hasta los 10 años, posteriormente se aumentó al 110% para los 10 años restantes, simulando que otorgarán todas las concesiones registradas en el DOF 04/01/2018 correspondientes a 209.68 hm³/año en el año 2022 y a partir de ahí permanecieran constantes hasta el año 2032.

A continuación, se muestran los hidrógrafos, rectas de calibración y mapas de las configuraciones para cada año de predicción resultantes con sus respectivos valores.

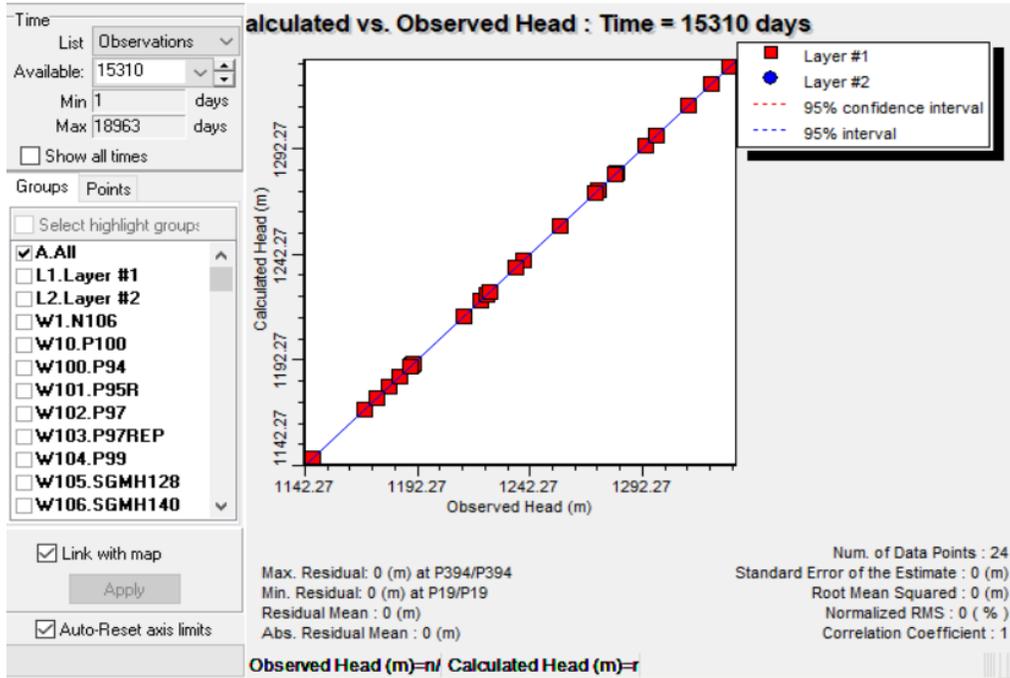


Figura 43: Recta de calibración para el año 2022 de predicción, escenario 1, (Visual MODFLOW)

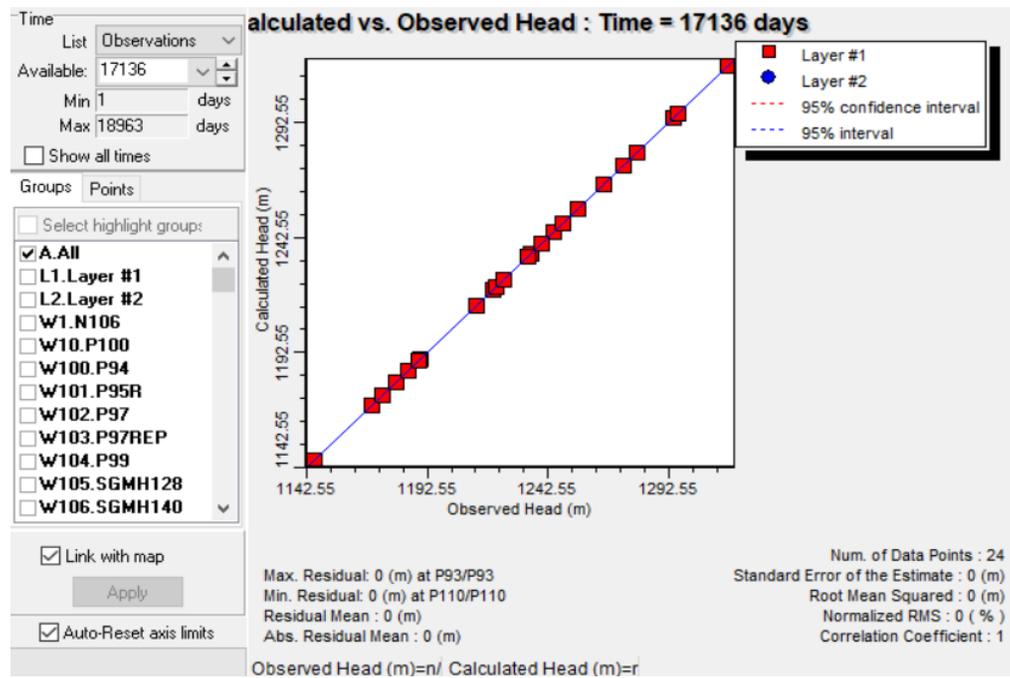


Figura 44: Recta de calibración para el año 2027 de predicción, escenario 1, (Visual MODFLOW)

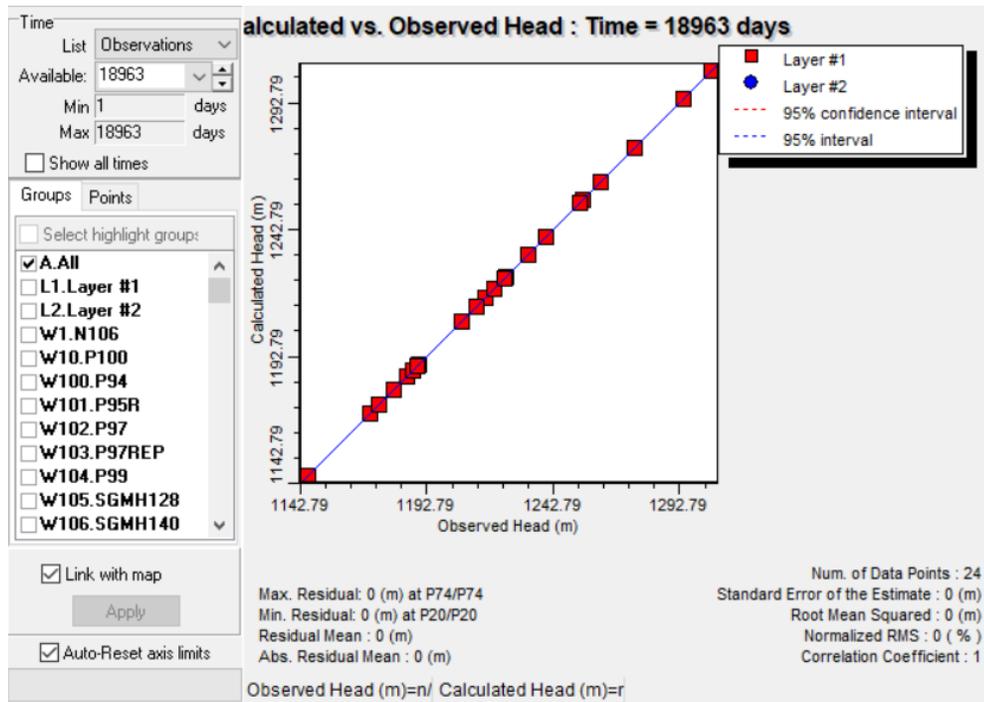


Figura 45: Recta de calibración para el año 2032 de predicción, escenario 1, (Visual MODFLOW)

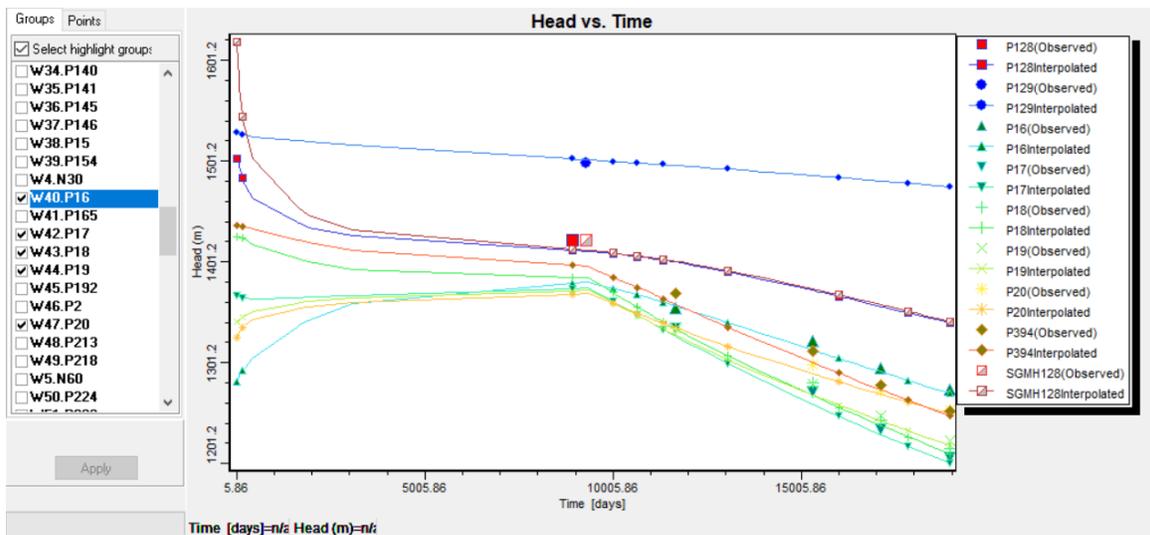


Figura 46: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Norte del acuífero para predicción del escenario 1, (Visual MODFLOW)

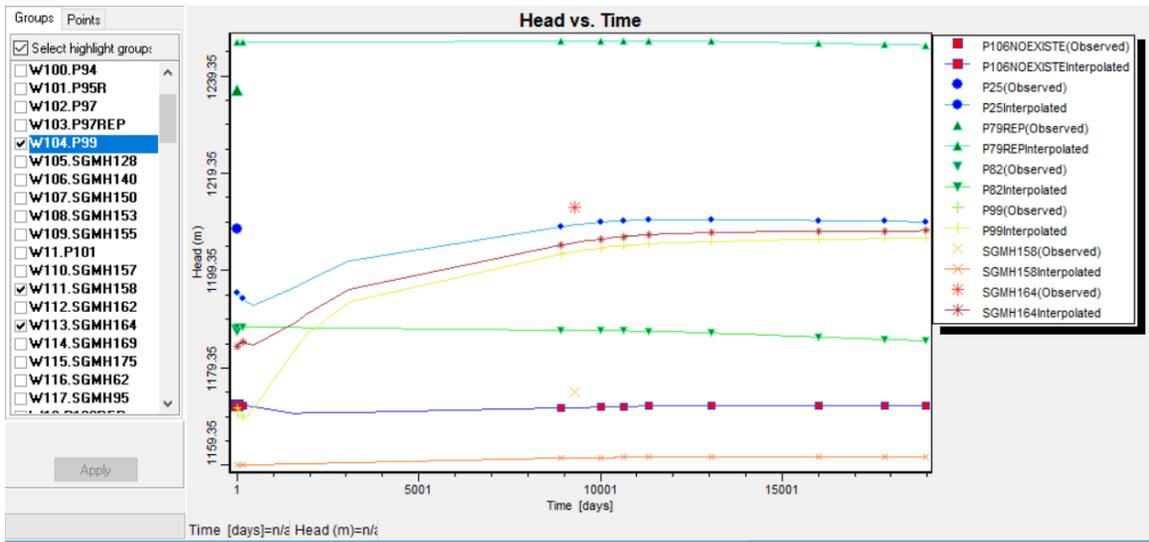


Figura 47: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Centro del acuífero para predicción del escenario 1, (Visual MODFLOW)

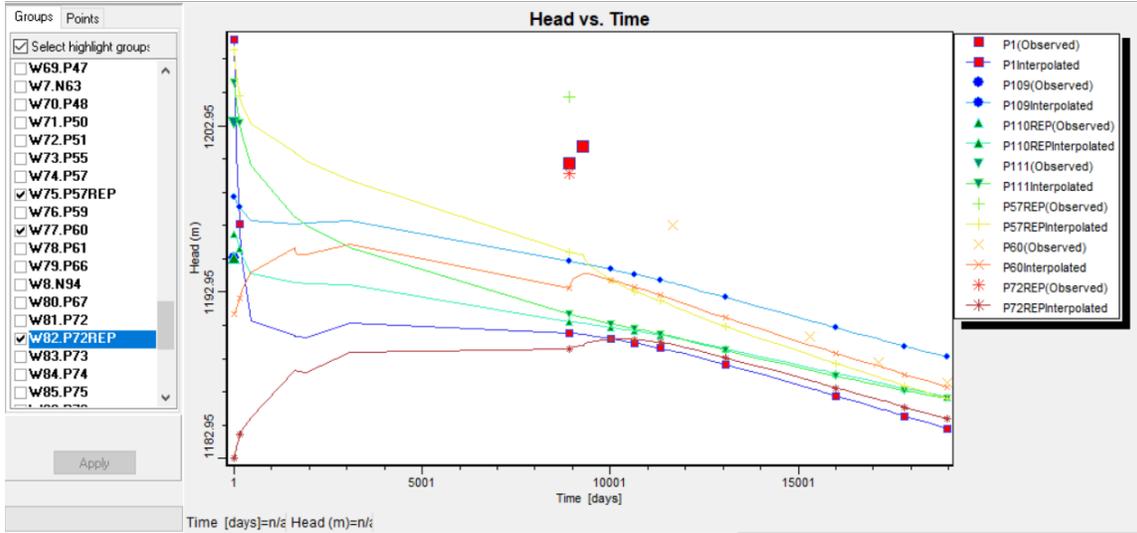
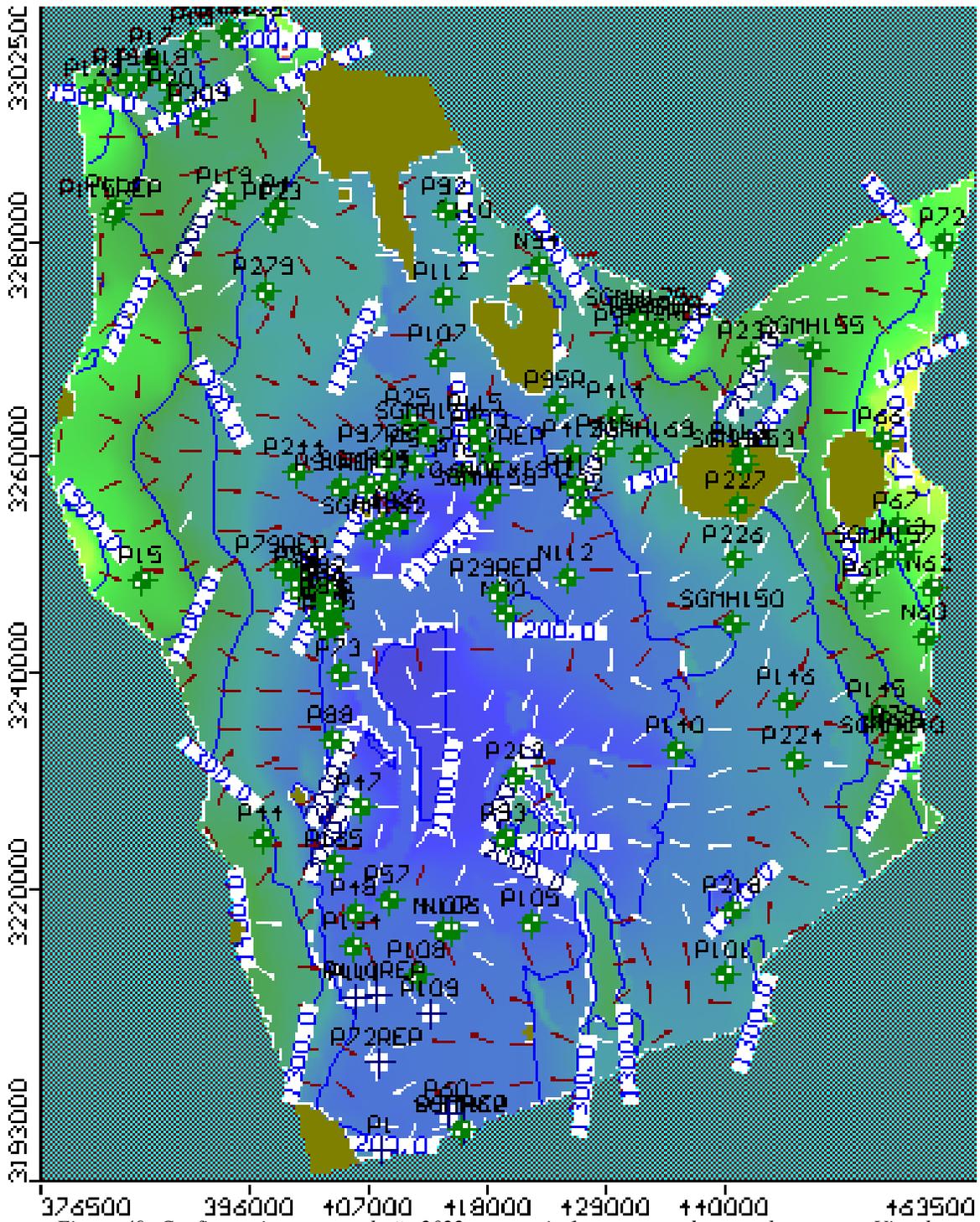


Figura 48: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Sur del acuífero para predicción del escenario 1, (Visual MODFLOW)



MODFLOW

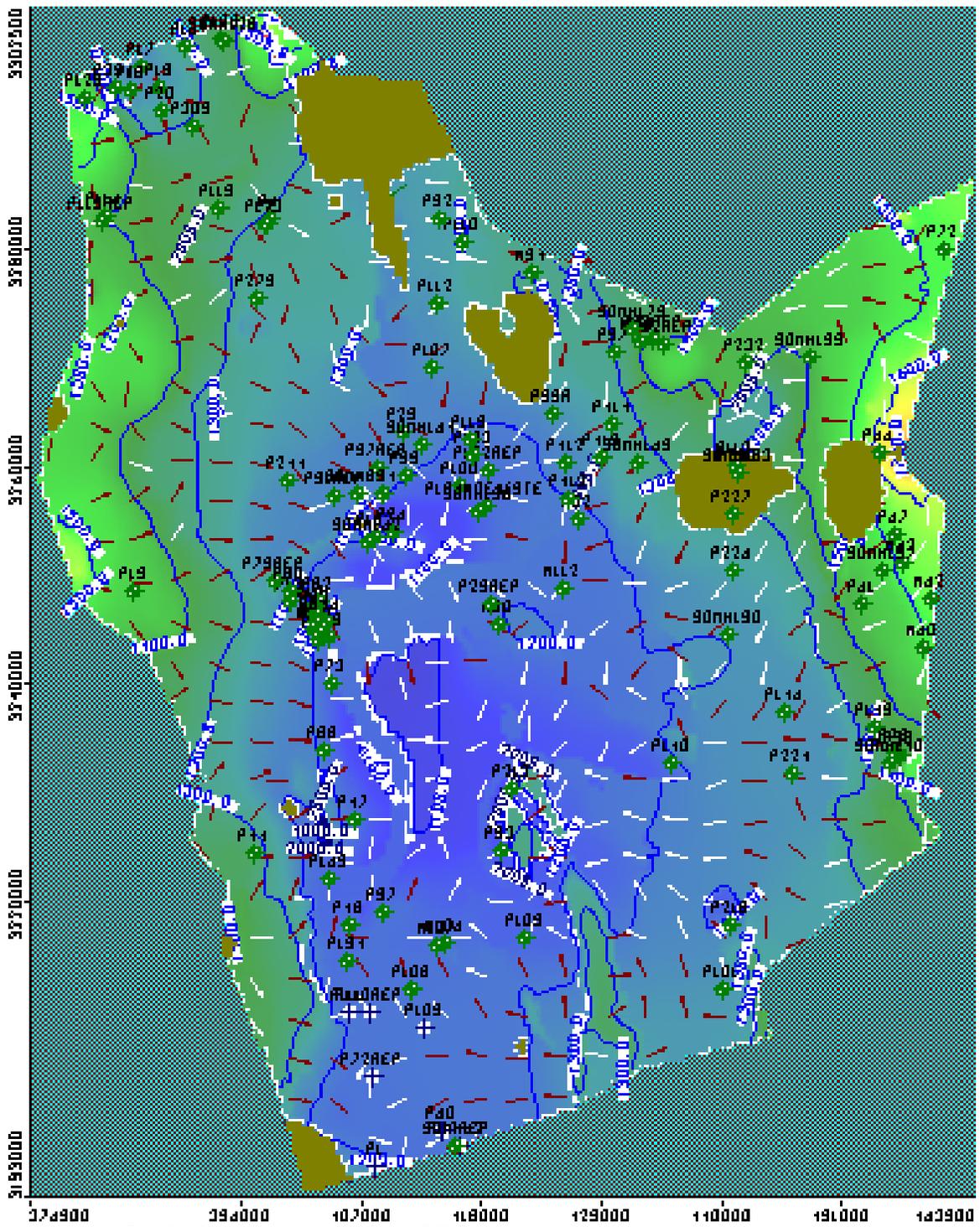


Figura 50: Configuraciones para el año 2027, escenario 1, representadas por el programa Visual

MODFLOW

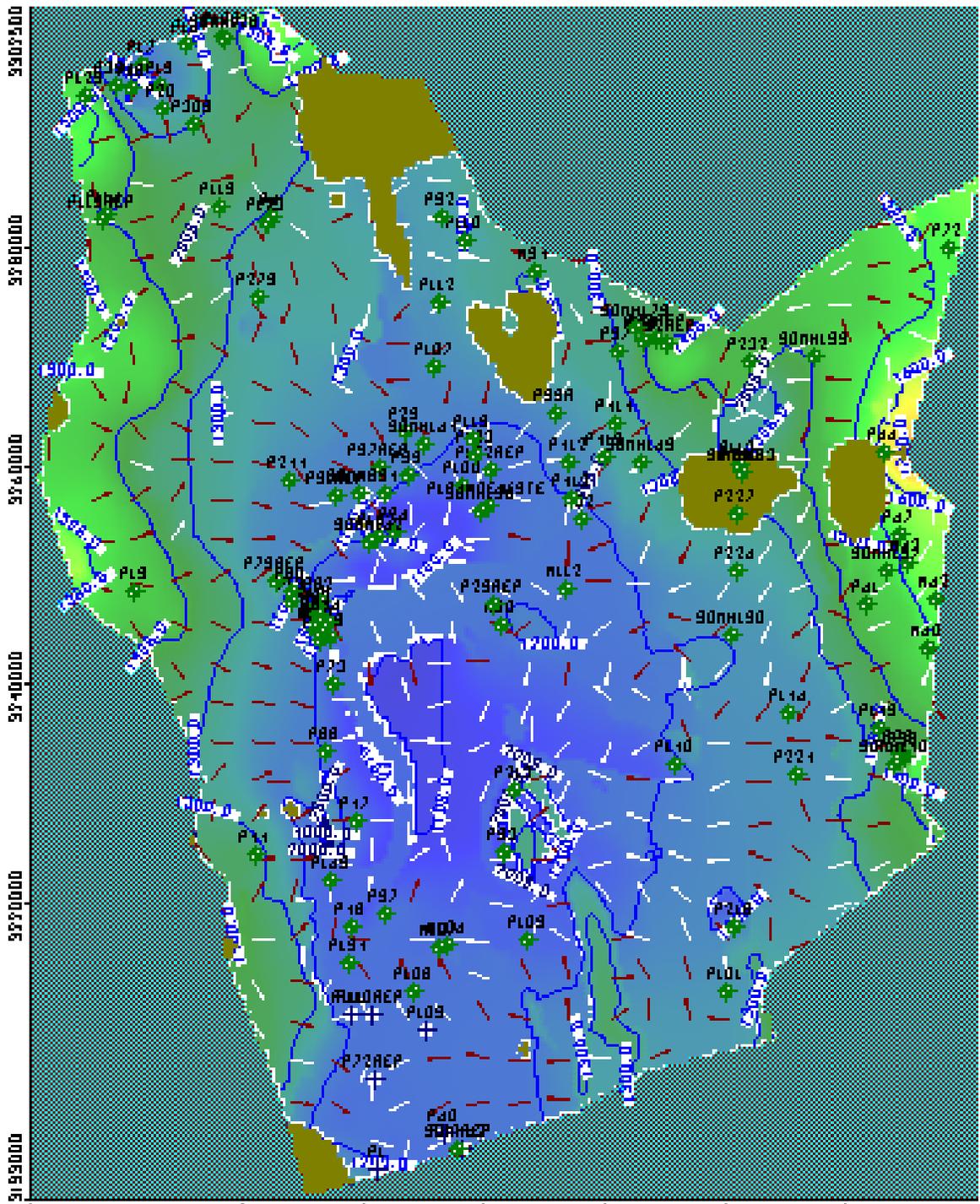


Figura 51: Configuraciones para el año 2032, escenario 1, representadas por el programa Visual

MODFLOW

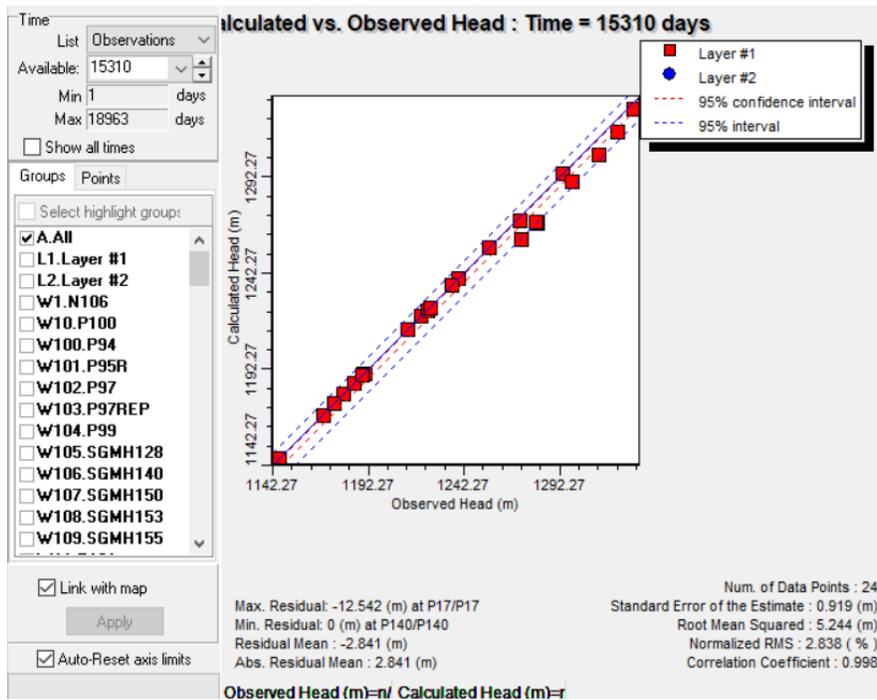


Figura 52: Recta de calibración para el año 2022 de predicción, escenario 2, (Visual MODFLOW)

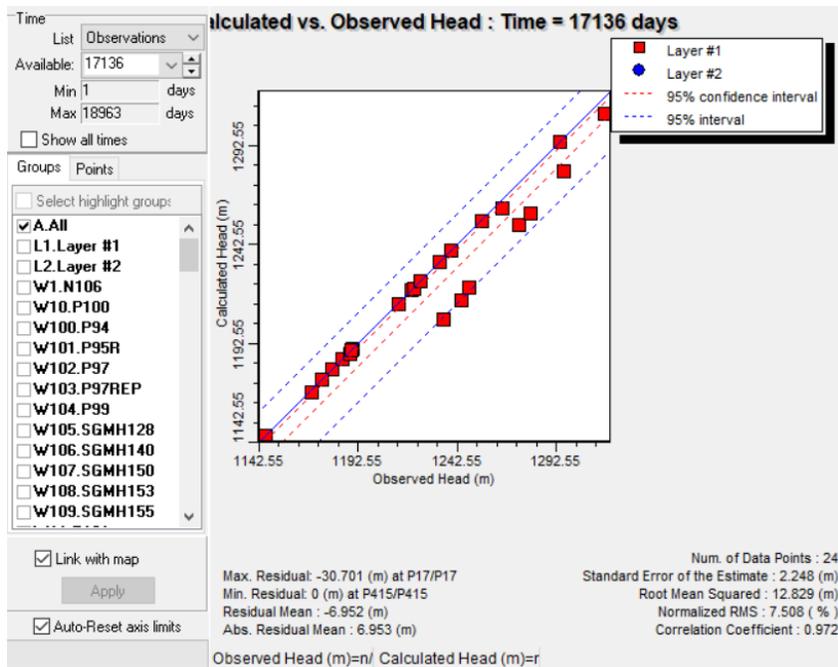


Figura 53: Recta de calibración para el año 2027 de predicción, escenario 2, (Visual MODFLOW)

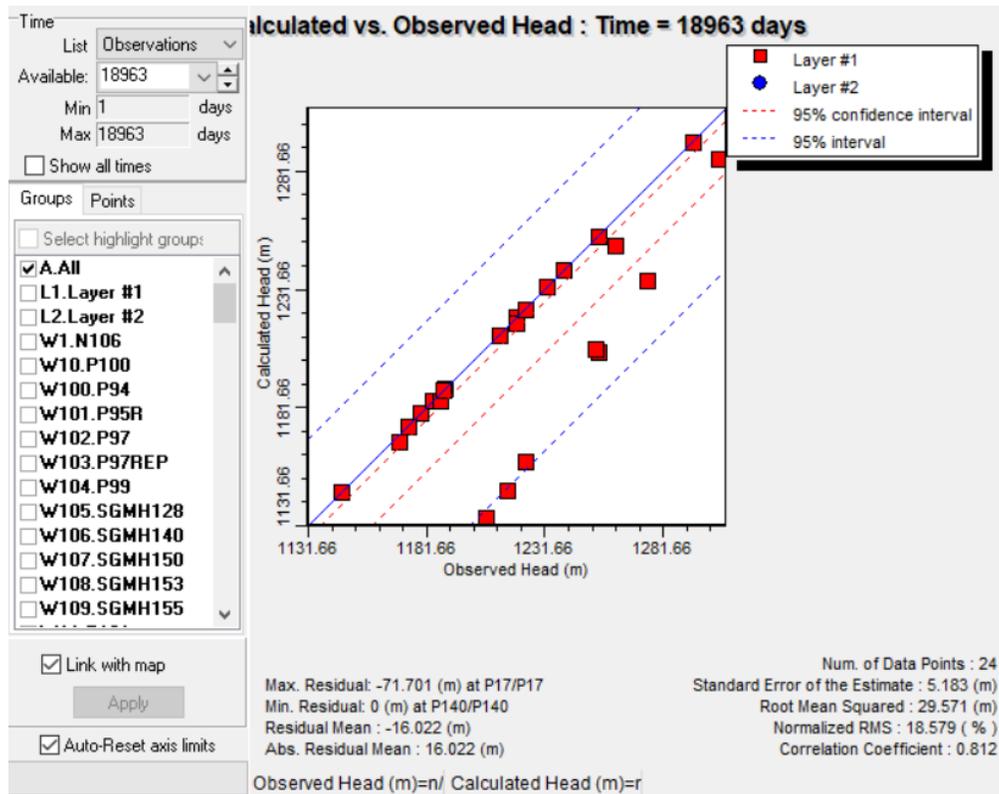


Figura 54: Recta de calibración para el año 2032 de predicción, escenario 2, (Visual MODFLOW)

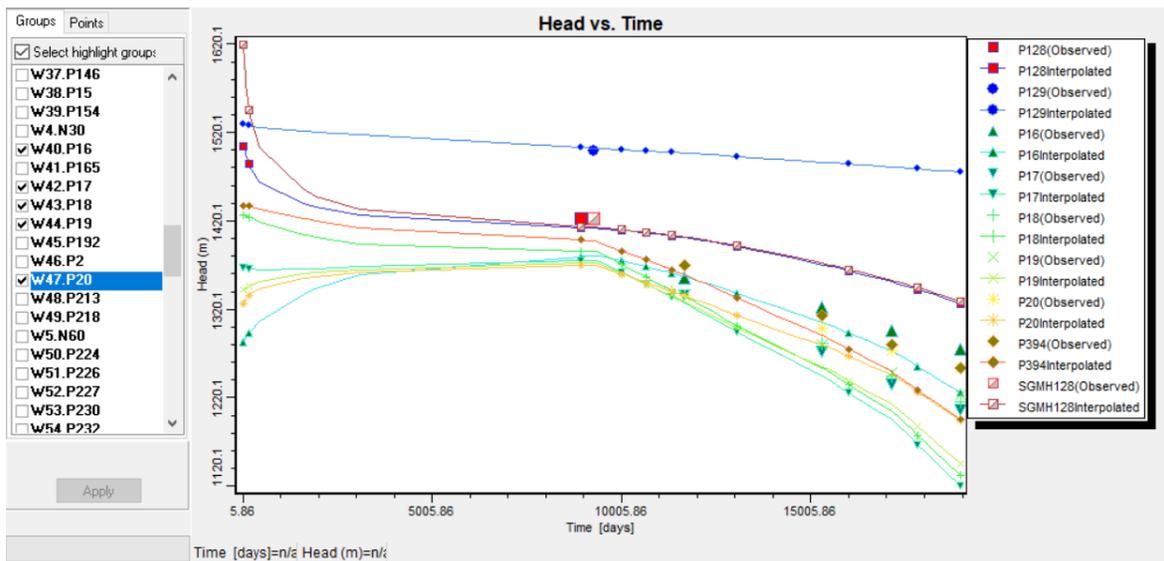


Figura 55: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Norte del acuífero para predicción del escenario 2, (Visual MODFLOW)



Tabla 23: Abatimiento por pozo en la zona Norte del acuífero, escenario 2, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA NORTE				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
P128	1400.97	1370.43	1351.03	1326.57	-74.4
P129	1496.71	1486.63	1481.03	1474.96	-21.75
P394	1359.18	1290.45	1250.05	1195.52	-163.66
SGMH128	1401.77	1371.87	1352.74	1328.63	-73.14
P16	1357.36	1305.28	1272.86	1225.89	-131.47
P17	1327.16	1244.42	1195.15	1120.1	-207.06
P18	1334.42	1253.37	1204.41	1131.73	-202.69
P19	1328.46	1255.29	1212.15	1145.62	-182.84
P20	1335.57	1279.65	1246.13	1194.66	-140.91

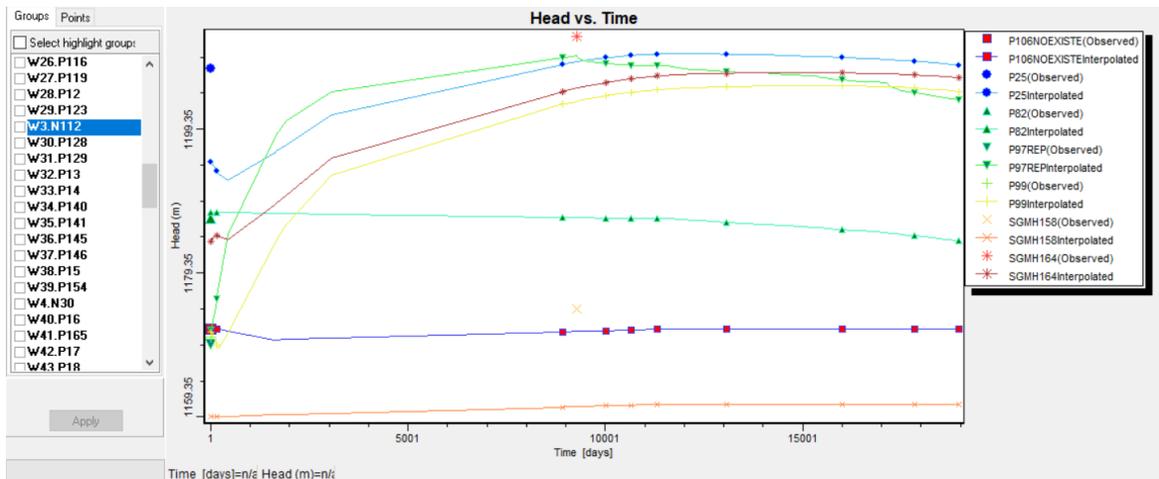


Figura 56: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Centro del acuífero para predicción del escenario 2, (Visual MODFLOW)



Tabla 24: Abatimiento por pozo en la zona Centro del acuífero, escenario 2, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA CENTRO				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
SGMH158	1164.31	1161.13	1161.13	1161.13	-3.18
P106NOEXISTE	1171.54	1171.57	1171.57	1171.57	0.03
P25	1209.84	1209.44	1209.02	1208.19	-1.65
SGMH164	1206.87	1207.19	1207.03	1206.47	-0.4
P82	1186.86	1185.67	1184.92	1183.82	-3.04

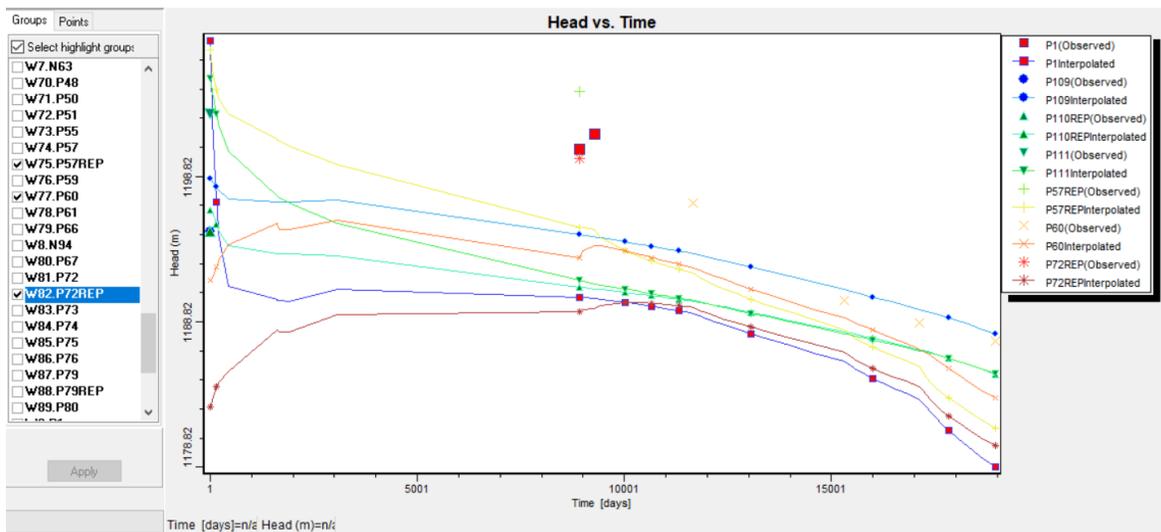


Figura 57: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Sur del acuífero para predicción del escenario 2, (Visual MODFLOW)



Tabla 25: Abatimiento por pozo en la zona Sur del acuífero, escenario 2, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA SUR				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
P1	1189.38	1186.05	1183.47	1178.82	-10.56
P109	1193.49	1191.01	1189.65	1187.98	-5.51
P111	1190.26	1188.01	1186.81	1185.27	-4.99
P57REP	1192.12	1188.28	1185.75	1181.49	-10.63
P60	1192.52	1189.05	1186.91	1183.54	-8.98
P72REP	1189.79	1186.7	1184.35	1180.27	-9.52

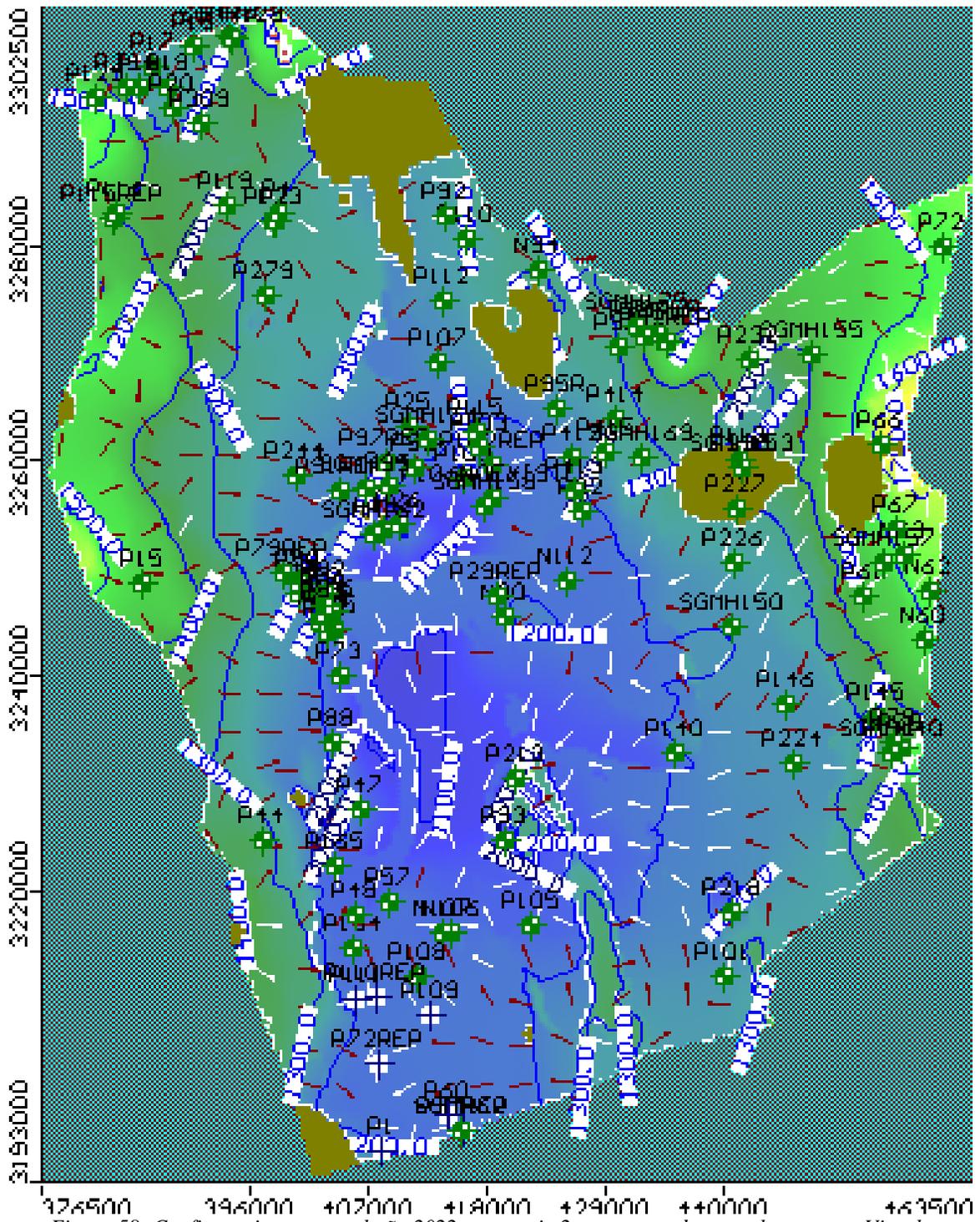


Figura 58: Configuraciones para el año 2022, escenario 2, representadas por el programa Visual

MODFLOW

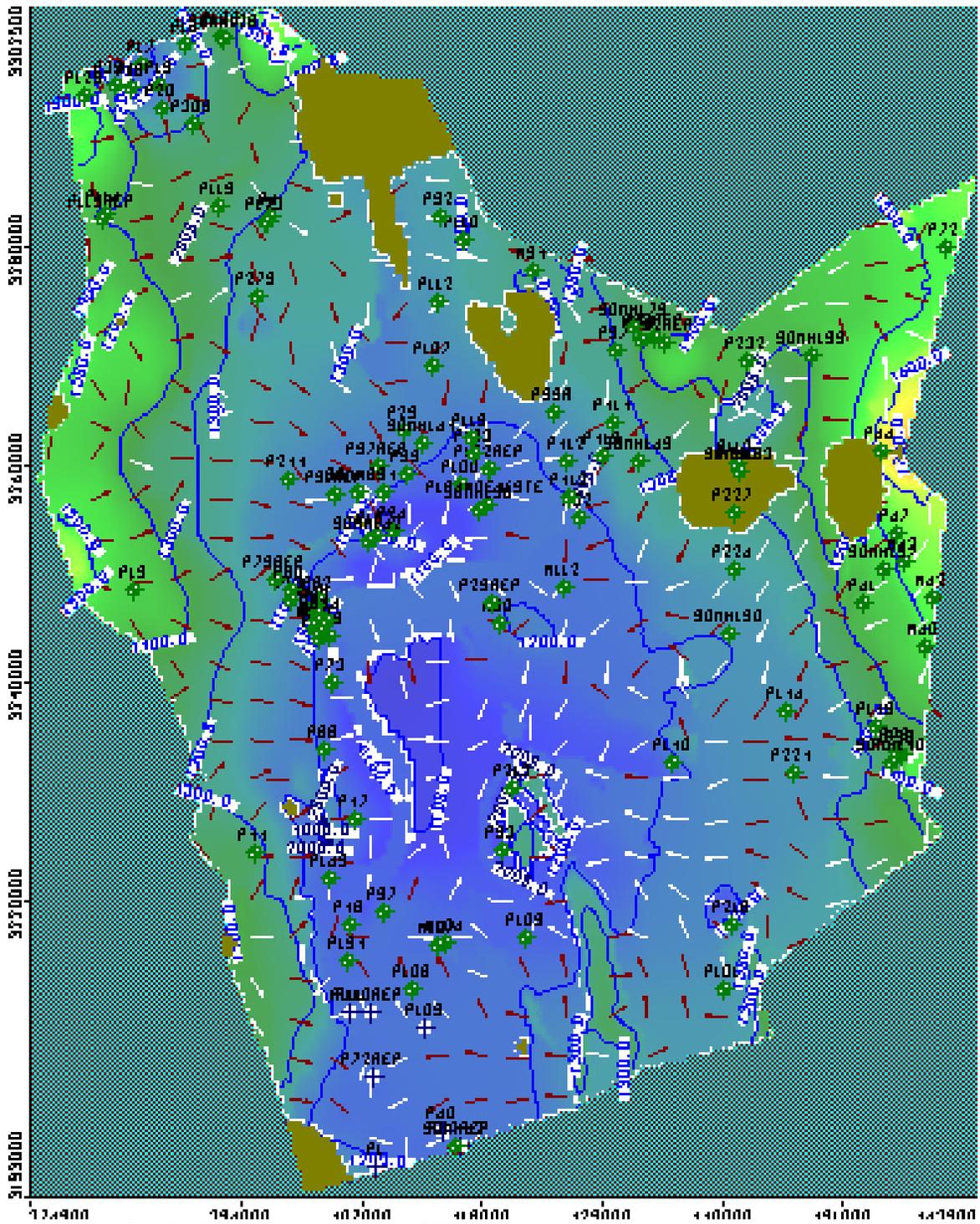


Figura 59: Configuraciones para el año 2027, escenario 2, representadas por el programa Visual

MODFLOW

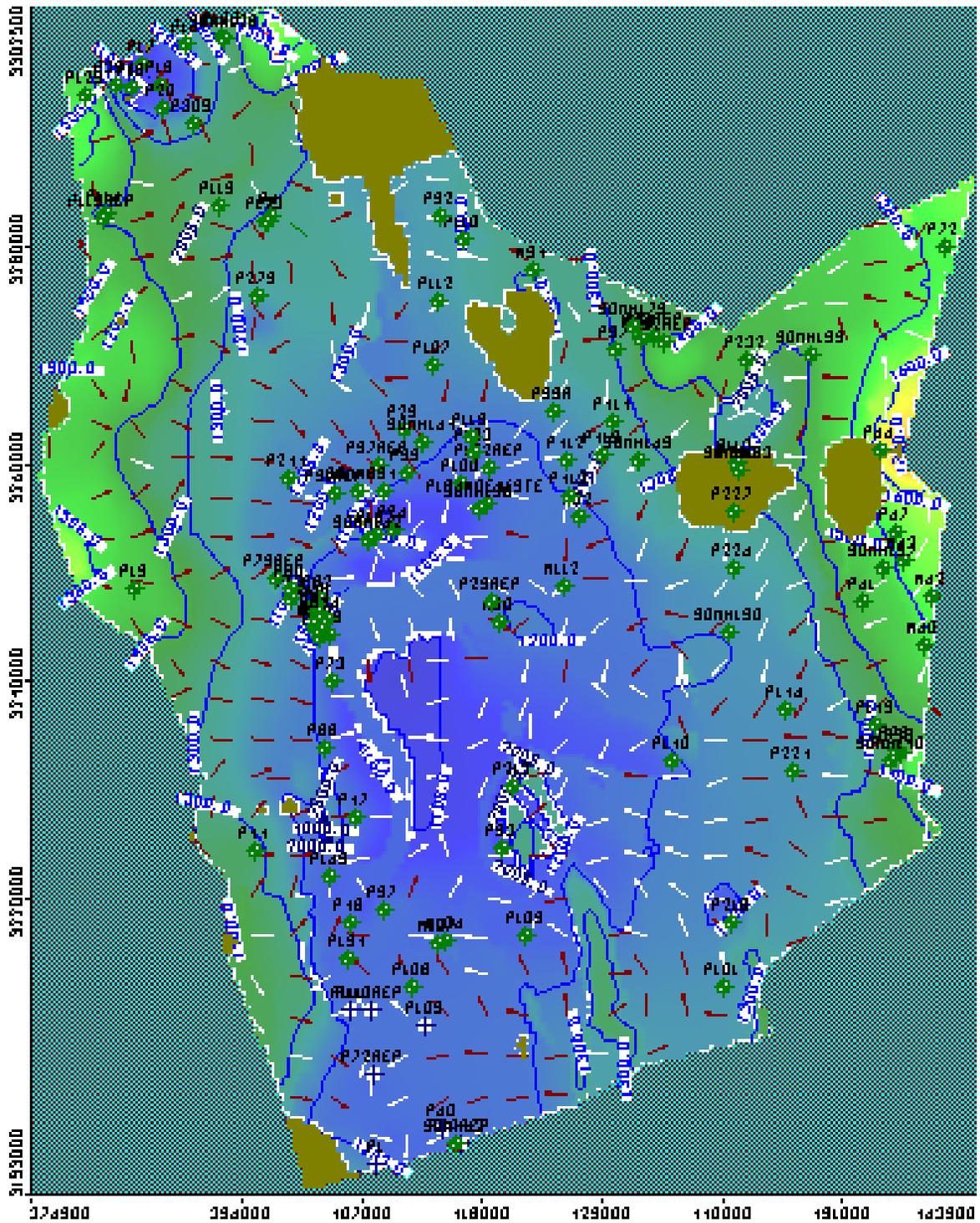


Figura 60: Configuraciones para el año 2032, escenario 2, representadas por el programa Visual

MODFLOW

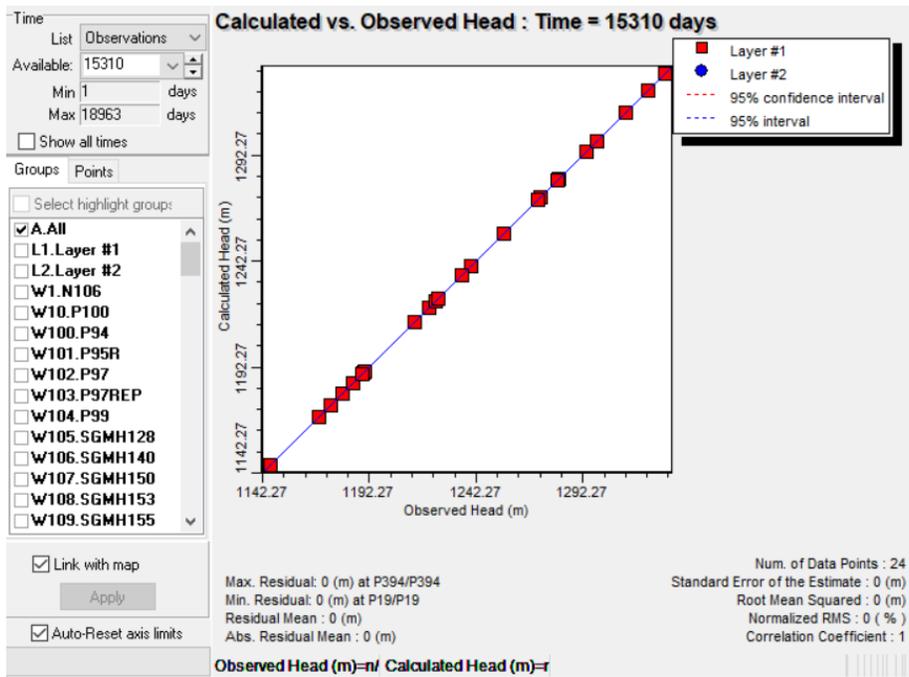


Figura 61: Recta de calibración para el año 2022 de predicción, escenario 3, (Visual MODFLOW)

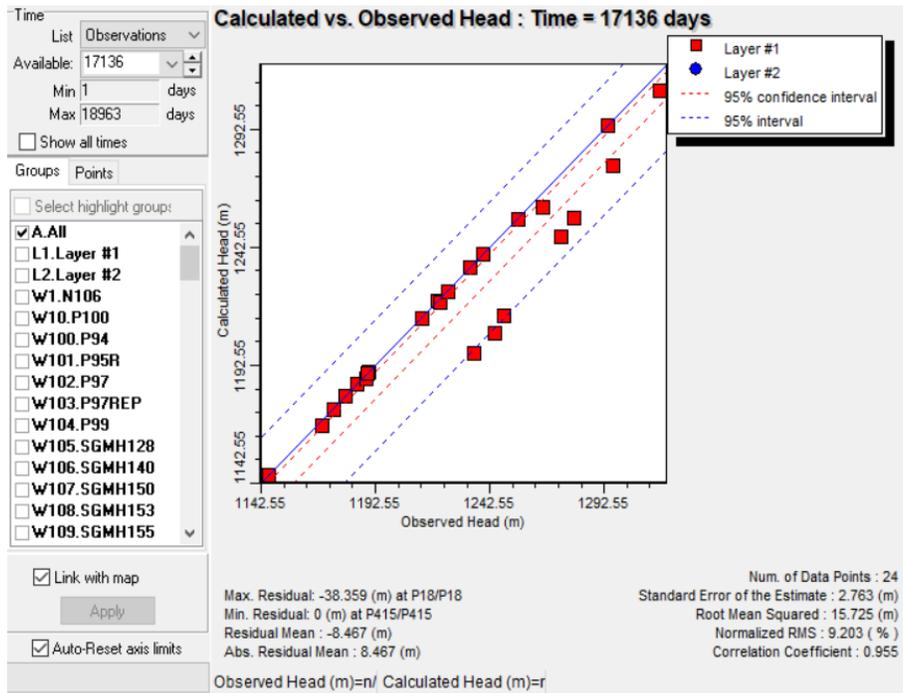


Figura 62: Recta de calibración para el año 2027 de predicción, escenario 3, (Visual MODFLOW)

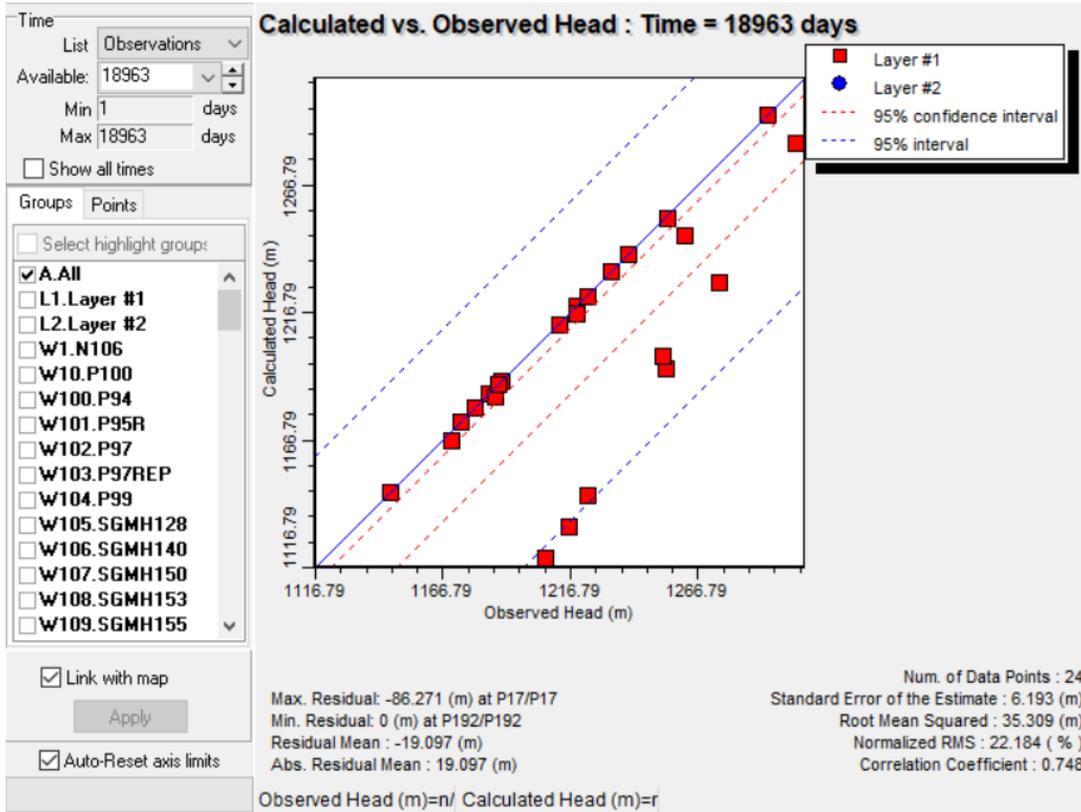


Figura 63: Recta de calibración para el año 2027 de predicción, escenario 3, (Visual MODFLOW)

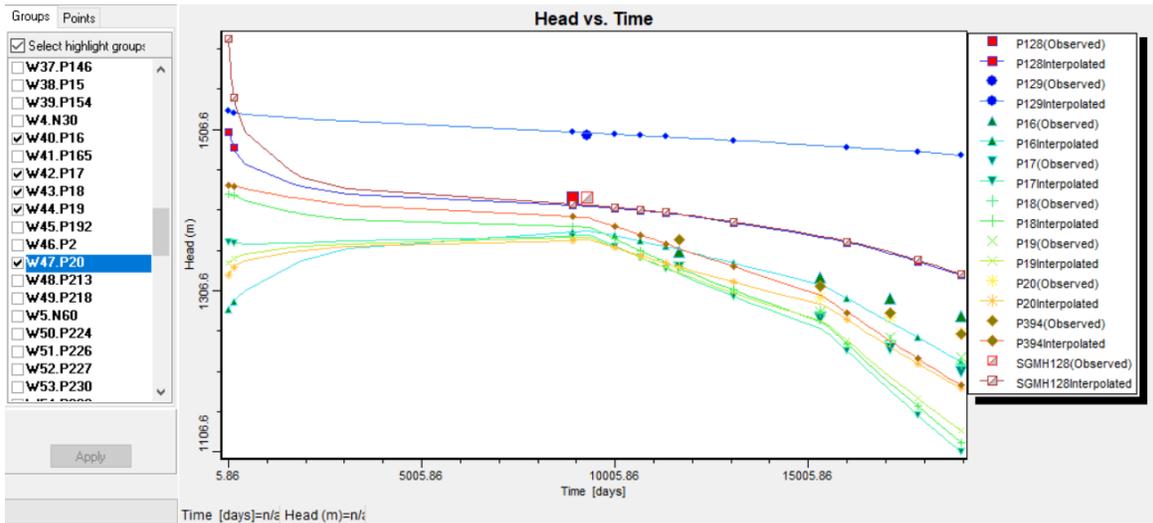


Figura 64: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Norte del acuífero para predicción del escenario 3, (Visual MODFLOW)



Tabla 26: Abatimiento por pozo en la zona norte del acuífero, escenario 3, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA NORTE				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
P128	1400.97	1372.97	1352.6	1325.55	-75.42
P129	1496.71	1486.74	1481.26	1475.2	-21.51
P394	1359.18	1301.43	1243.63	1188.98	-170.2
SGMH128	1401.77	1374.33	1354.28	1327.69	-74.08
P16	1357.36	1313.85	1267.32	1218.99	-138.37
P17	1327.16	1259.94	1182.1	1106.6	-220.56
P18	1334.42	1268.7	1191.27	1118.24	-216.18
P19	1328.46	1269.43	1199.33	1132.58	-195.88
P20	1335.57	1290.36	1236.18	1185.11	-150.46

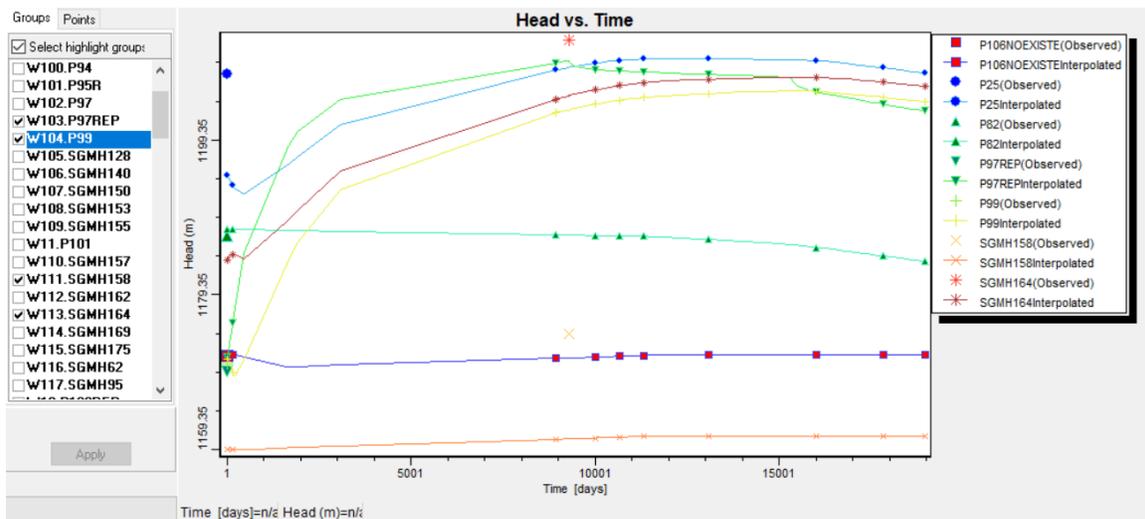


Figura 65: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Centro del acuífero para predicción del escenario 3, (Visual MODFLOW)



Tabla 27: Abatimiento por pozo en la zona centro del acuífero, escenario 3, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA CENTRO				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
SGMH158	1161.13	1161.13	1161.13	1161.13	0
P106NOEXISTE	1171.57	1171.57	1171.57	1171.57	0
P25	1209.84	1209.68	1209.03	1207.95	-1.89
SGMH164	1206.87	1207.4	1207.07	1206.26	-0.61
P82	1186.86	1185.87	1184.77	1183.67	-3.19

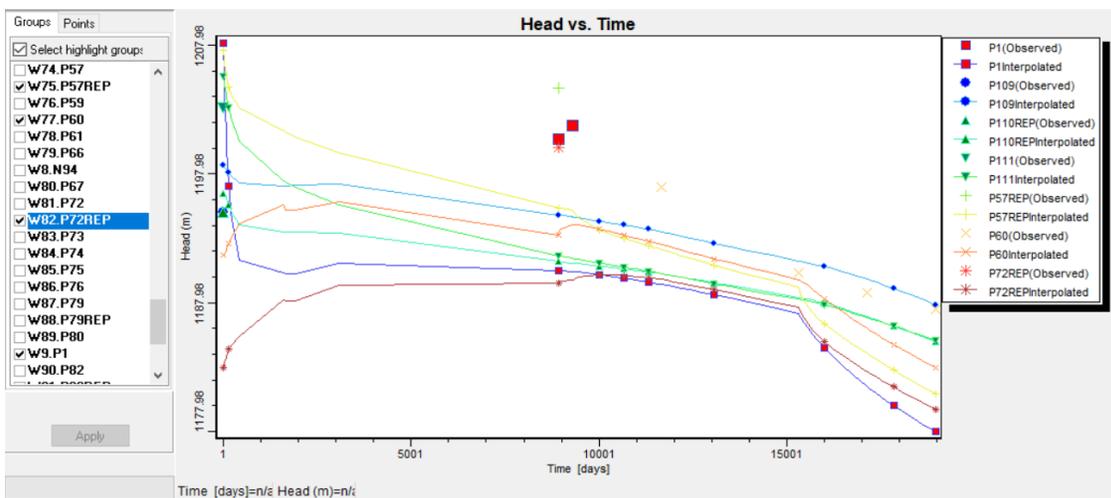


Figura 66: Hidrógrafos de pozos de observación ubicados al Sur del acuífero para predicción del escenario 3, Visual MODFLOW

Tabla 28: Abatimiento por pozo en la zona sur del acuífero, escenario 3, adaptada de Visual MODFLOW

POZO	ZONA SUR				ABATIMIENTO (m)
	ELEV. NE. POR AÑO				
	2012 (11674 días)	2022 (15310 días)	2027 (17136 días)	2032 (18963 días)	
P1	1189.38	1187.16	1181.49	1177.97	-11.41
P109	1193.49	1191.21	1189.79	1187.3	-6.19
P110REP	1190.22	1188.39	1186.89	1184.95	-5.27
P111	1190.26	1188.25	1186.84	1185.07	-5.19
P57REP	1192.12	1189.16	1184.03	1180.9	-11.22
P60	1192.52	1189.76	1185.99	1182.93	-9.59
P72REP	1189.79	1187.62	1182.64	1179.67	-10.12

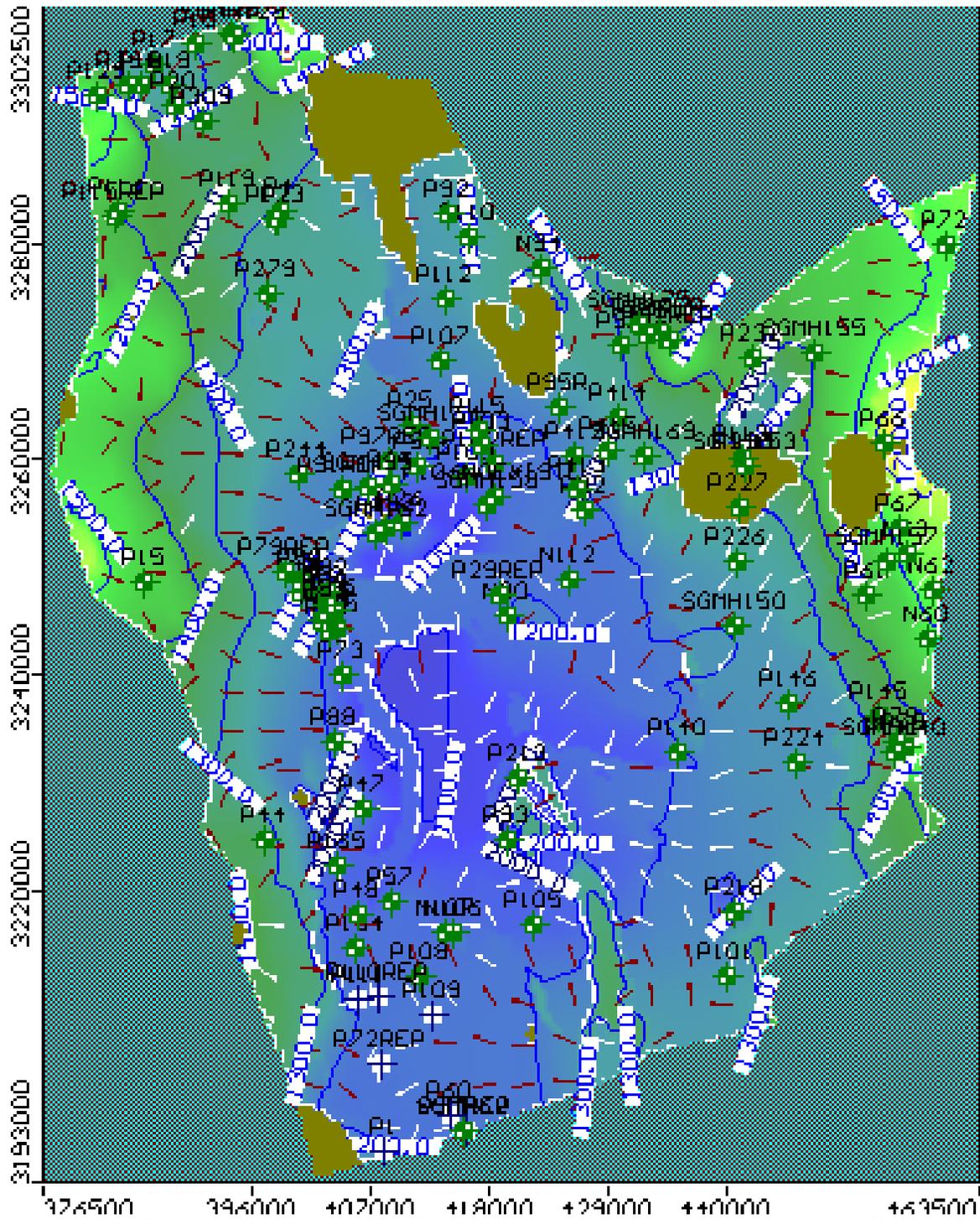


Figura 67 Configuraciones para el año 2022, escenario 3, representadas por el programa Visual

MODFLOW

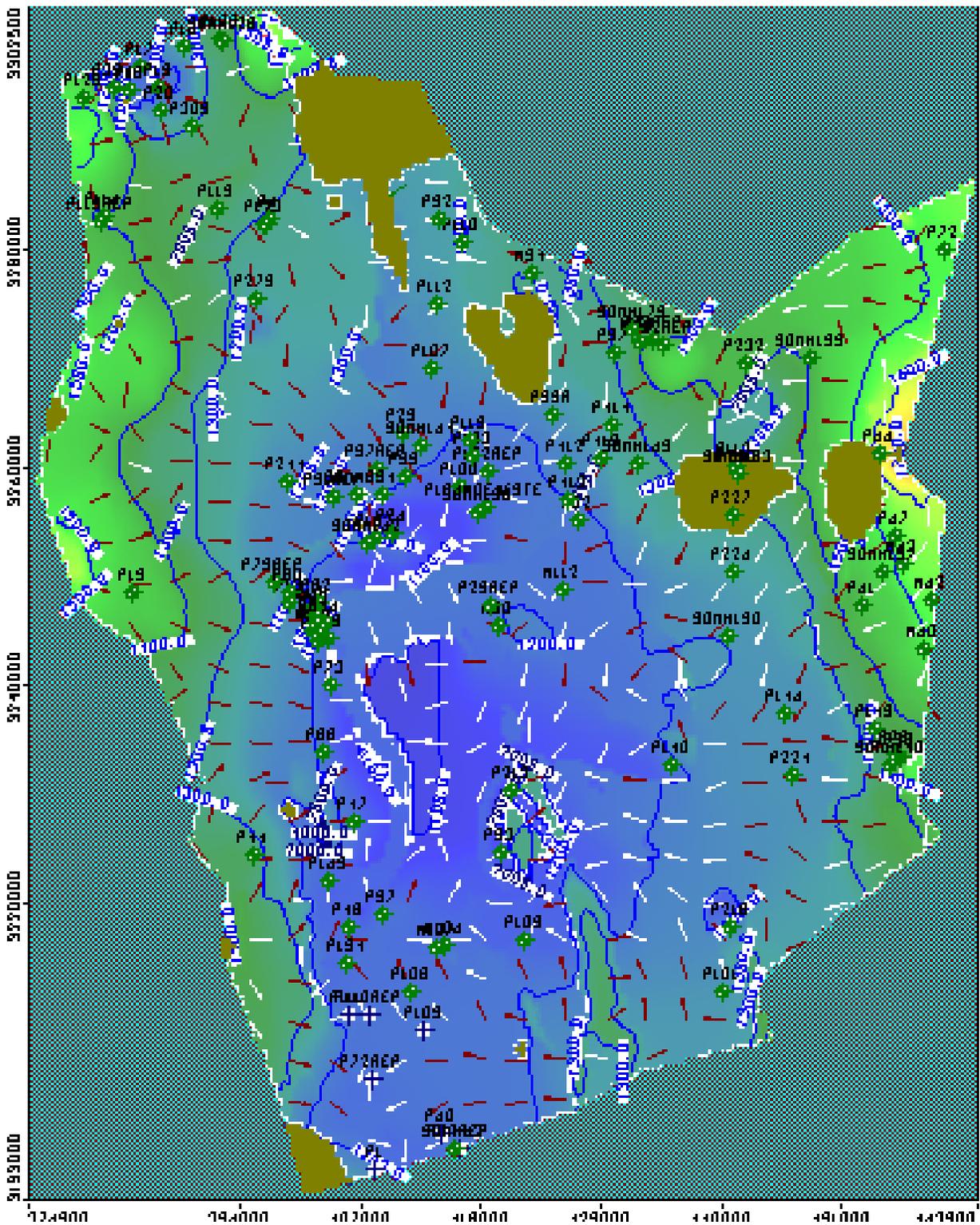


Figura 68: Configuraciones para el año 2027, escenario 3, representadas por el programa Visual

MODFLOW

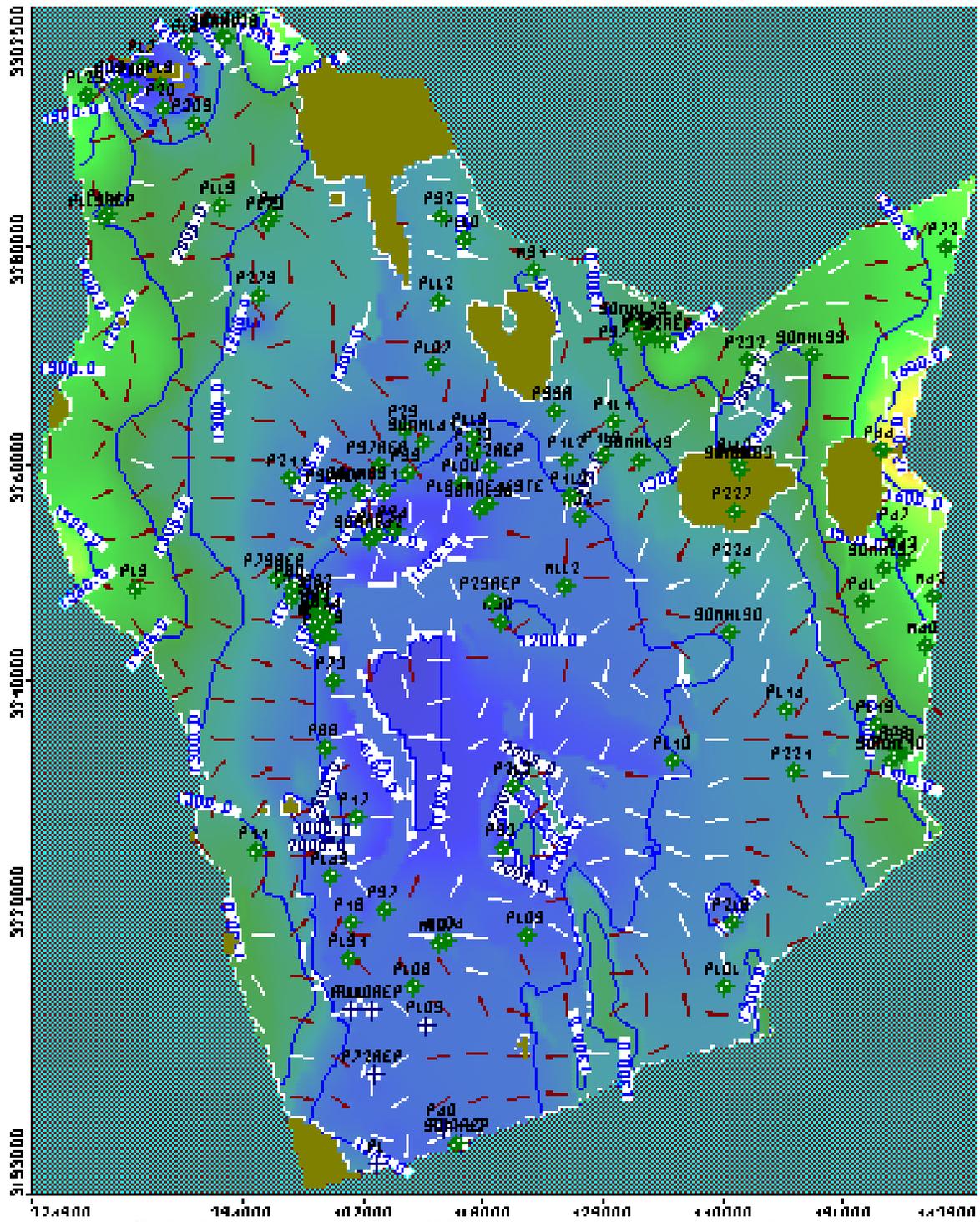


Figura 69: Configuraciones para el año 2032, escenario 3, representadas por el programa Visual

MODFLOW



6 BALANCE DE AGUAS SUBTERRÁNEAS

Se realizará el balance de agua subterránea del acuífero para los años 1981, 2005 y 2011.

La ecuación de balance de aguas subterráneas se planteó con base en el modelo conceptual del acuífero, es decir, en el total de entradas y salidas que actúan en él y se expresa como:

$$E - S = \Delta V(S) \quad (1)$$

Dónde:

E = Entrada de agua al acuífero en hm^3/a .

S = Salidas de agua al acuífero en hm^3/a .

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento del acuífero en hm^3/a .

Ahora bien, desglosando cada una de las anteriores componentes y con relación al modelo conceptual del acuífero, se tiene:

Entradas (E)

R_p = Recarga por precipitación pluvial, en hm^3/a .

R_r = Recarga por retorno de riego, en hm^3/a .

E_h = Entradas por flujo lateral, en hm^3/a .

Salidas (S)

S_h = Salidas por flujo lateral, en hm^3/a .

DET = Salida por evapotranspiración en zonas someras, en hm^3/a .

DEA = Salida por evaporación en zonas someras, en hm^3/a .

B = Salidas por extracción por bombeo del agua subterránea, en hm^3/a .



Al considerar cada una de las componentes mencionadas anteriormente, se puede plantear la ecuación de balance hidrogeológico para el acuífero Laguna de Hormigas, de la siguiente manera:

$$Rp + Rr + Eh - Sh - D_{ET} - D_{EA} - B = \Delta V(S) \quad (2)$$

6.1 Entradas (E)

6.1.1 Infiltración por precipitación pluvial

La recarga por precipitación pluvial, es originada por la infiltración del agua de lluvia a través los escurrimientos superficiales y de las zonas montañosas. Este valor se calculó a partir de la ecuación de balance (CONAGUA, 2015)

Para determinar la infiltración es necesario conocer la lámina de precipitación media anual por estación climatológica, misma que se obtuvo a partir de datos existentes de precipitación, en donde fueron consideradas ocho estaciones climatológicas (JCAS-UACH, 2015).

Los arroyos que se encuentran en la zona de estudio son intermitentes; una parte del agua que transita por estos arroyos escurre hacia la laguna y otra se infiltra a través del trayecto, no existen entradas superficiales y el cambio de almacenamiento se desprecia, haciendo una simplificación de la ecuación de balance, quedando de la siguiente manera:

$$P = ETR + I \quad (3)$$

Dónde:

P = Precipitación

ETR= Evapotranspiración

I= Infiltración

El fenómeno de evapotranspiración es necesario para determinar la infiltración y fundamental para la evaluación del comportamiento de la interacción suelo-atmósfera con



presencia de cubierta vegetal, estando directamente relacionado al contexto hidrológico (balance hídrico) y al geotécnico (suelos no saturados) (Mendes et al.). Dentro de ese contexto, la determinación cuantitativa de los valores evapotranspirados es de extrema importancia para determinar las pérdidas de agua por evapotranspiración real y para ello se usó la fórmula propuesta por Turc, ecuación (4):

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}} \quad (4)$$

Dónde:

ETR = Evapotranspiración (mm)

P = Precipitación (mm)

T= Temperatura Media Anual (°C)

L= $300 + 25T + 0.05T^3$

Los datos de evapotranspiración y de precipitación, resultado de la aplicación de la ecuación (3) son presentados en la Tabla 29, obtenidos desde el año 1950 hasta el 2010. Según los cálculos realizados el volumen total infiltrado es de 6.8 mm/año.

Tabla 29: Cálculo de infiltración

RESUMEN DE PARAMETROS POR ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA CON DATOS DEL AÑO 1950 A 2010									
ESTACIÓN	COORDENADAS FINALES WGS84				ELEVACIÓ N (msnm)	PRECIPITACIÓN (mm)	TEMPERATURA (°C)	EVAPOTRANSPIRACIÓN TURC Tmed (mm/año)	INFILTRACIÓN (mm/año)
	X	Y	LAT	LONG					
COYAME	490856	3259188	29.46	-105.09	1220.00	280.22	18.39	284.74	-4.52
EL CUERVO, ALDAMA	404215	3239965	29.28	-105.99	1199.03	286.92	18.18	290.73	-3.81
GALLEGOS, VILLA AHUMADA	365990.57	3300108.62	29.82	-106.39	1619.00	348.76	14.69	335.86	12.89
GUADALUPE, ALDAMA	463019	3226018	29.16	-105.38	1420.15	293.25	17.63	295.70	-2.46
LA MESA, ALDAMA	405920	3183273	28.77	-105.96	1311.00	272.79	15.12	272.40	0.39
LOS POZOS	399270	3195462	28.88	-106.03	1574.62	285.56	18.46	289.88	-4.32
PARRITA, CHIHUAHUA	377019	3245583	29.33	-106.27	1537.61	306.99	15.97	304.62	2.37
SAN ANTONIO, CHIHUAHUA	378343	3217863	29.08	-106.25	1557.00	340.29	14.62	328.74	11.54
TOTAL=								6.80	

6.1.2 Recarga por precipitación pluvial

De la ecuación de cambio de almacenamiento se puede calcular la recarga por precipitación pluvial, expresada como:

$$\Delta V(S) = S * A * h \quad (5)$$



Dónde:

$\Delta V(S)$ = Cambio de almacenamiento $hm^3/año$.

S_y = Rendimiento específico.

h = Es la evolución del nivel estático en el área de balance (m).

A = Es el área que abarca la zona de balance (km^2).

Sustituyendo los valores calculados para los siguientes periodos se tiene que:

Tabla 30: Cálculo del cambio de almacenamiento

Período	Curva de evolución	Área de influencia	S	$\Delta vs (hm^3)$
1981-1985	-0.05	352.4	0.035	-0.6167
1985-2005	-0.205	321.8	0.035	-2.308915
2005-2011	-1.1	989.7	0.035	-38.10345
Suma:				-41.029065

De la ecuación (2), podemos calcular la recarga por precipitación pluvial en la zona de balance (R_p):

$$R_p = -R_r - E_h + S_h + D_{EA} + D_{ET} + B + \Delta V(S)$$

Para 1985:

$$R_p = -3.7 - 38.39 + 0.0 + 27.88 + 6.44 + 20.36 - 0.61 = 12.00 hm^3/año$$

Para 2005:

$$R_p = -4.1 - 39.63 + 2.62 + 28.75 + 10.58 + 21.6 - 2.3 = 17.52 hm^3/año$$

Para 2011:

$$R_p = -18.1 - 40.17 + 4.8 + 9.07 + 1.14 + 92.6 - 38.1 = 11.24 hm^3/año$$

6.1.3 Recarga por retorno de riego

Cada tipo de cultivo demanda una cantidad específica de agua subterránea para su crecimiento, sin embargo, una parte de esta agua es evaporada y otra regresada al acuífero como retorno de riego, la cual según Jacob Bear (1970) varía entre el 20 y 40 % del volumen



usado en la irrigación, y para nuestro caso se utilizó el límite inferior, considerando la geología y la climatología, principalmente.

Tabla 31: Cálculo del volumen de retorno de riego por año

RECARGA POR RETORNO DE RIEGO POR AÑO		
AÑO	VOL USO AGRÍCOLA (hm ³ /año)	RECARGA 20% (hm ³ /año)
1985	18.65	3.7
2005	20.68	4.1
2011	90.63	18.1

Según los datos existentes de CONAGUA referentes a cada año correspondiente hubo un volumen de extracción de 18.65 hm³/a para el año de 1985 destinado para uso agrícola, 20.68 hm³/a en el año 2005 y 90.63 hm³/a en el año 2011 (Tabla 8). De acuerdo a los datos anteriores se tendría una recarga por retorno de riego correspondiente al 20% del volumen de extracción para uso agrícola de 3.7 hm³/a para el año de 1985, 4.1 hm³/a para el año de 2005 y finalmente un volumen de 18.1 hm³/a para el año 2011, (Tabla 31).

6.1.4 Entrada por flujo lateral

Una fracción del volumen de lluvias que se precipita en las zonas topográficamente más altas del acuífero se infiltra por las fracturas de las rocas que forman parte de ellas y a través del pie de monte, recargando al acuífero en forma de flujos subterráneos que alimentan la zona de explotación. La recarga al acuífero tiene su origen en la precipitación pluvial sobre el valle y en la infiltración de los escurrimientos superficiales. El cálculo de entradas por flujo horizontal se realizó con base en la Ley de Darcy, partiendo de las configuraciones de elevación del nivel estático para los años 1981, 2005 y 2012, mediante la siguiente expresión (Figura 70):

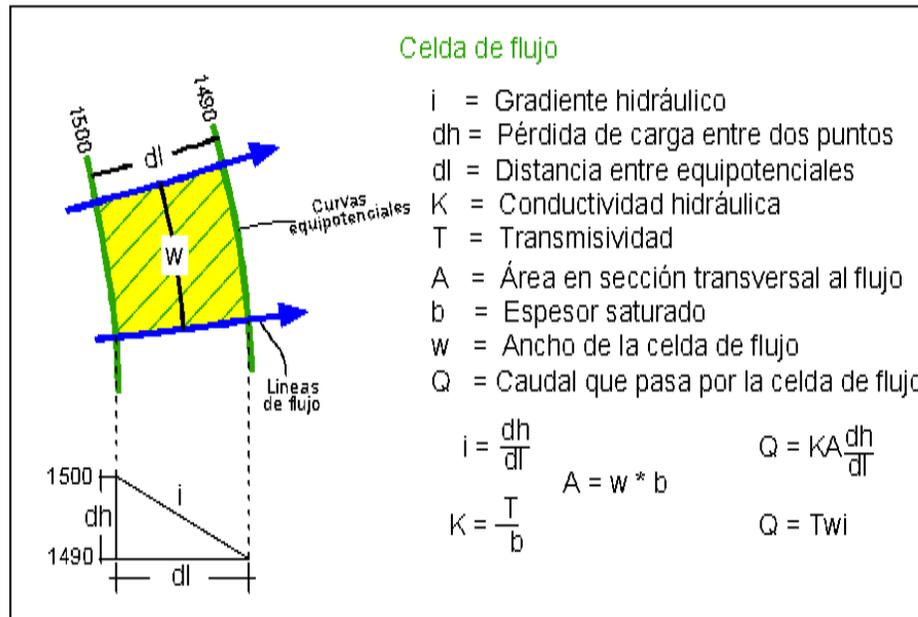


Figura 70: Celdas de flujo lateral

A partir de las configuraciones se selecciona un canal de flujo para calcular el caudal “Q” que entra al área de balance y el volumen total de entrada es la suma de los caudales de todas las celdas calculadas. El valor de transmisividad fue calculado mediante la fórmula para determinar la conductividad, despejando la variable T. Los cálculos de flujo de entrada de agua subterránea del acuífero Laguna de Hormigas para los años de 1981, 2005 y 2012, se muestran en la Tabla 32, Tabla 33 y Tabla 34 respectivamente.



Tabla 32: Cálculo de entradas subterráneas para el año de 1981

Entradas de agua subterránea (1981)										
Celda	k (m/d)	Area (m2)	Long. (m)	Ancho(m)	b (m)	dh	i	T (m2/s)	Q (m3/d)	Vol (hm3/año)
C1	2	26081319	6355.28	4103.88	110	20	0.00315	0.0025	2843.99	1.04
C2	2	21589644	4519.05	4777.47	110	20	0.00443	0.0025	4656.12	1.7
C3	2	22022584	4269.41	5158.23	110	20	0.00468	0.0025	5310.91	1.94
C4	2	18742595	3218.43	5823.52	110	20	0.00621	0.0025	7956.09	2.9
C5	0.1	22942111	4198	5465.01	110	20	0.00476	0.0001	286.15	0.1
C6	2	9510735.4	5922.48	1605.87	110	20	0.00338	0.0025	1194.12	0.44
E7	2	8165731.5	1650.94	4946.11	90	20	0.01211	0.0021	10781.53	3.94
E8	2	2363934.8	873.19	2707.24	90	20	0.0229	0.0021	11159.24	4.07
E9	2	1386281.1	648.6	2137.34	90	20	0.03084	0.0021	11864.8	4.33
E10	0.1	13099164	3931.3	3332.02	90	20	0.00509	0.0001	152.64	0.06
E11	0.1	10030603	2397.91	4183.06	90	20	0.00834	0.0001	313.98	0.11
E12	0.1	6979501.5	1623.06	4300.21	90	20	0.01232	0.0001	476.81	0.17
E13	0.1	3799547.9	1082.86	3508.81	90	20	0.01847	0.0001	583.27	0.21
E14	0.1	5441775.2	1998.04	2723.56	90	20	0.01001	0.0001	245.37	0.09
E15	0.1	6846700.4	2195.94	3117.89	90	20	0.00911	0.0001	255.64	0.09
E16	2	9612041.3	2085.33	4609.36	90	20	0.00959	0.0021	7956.68	2.9
E17	2	6944859.5	2082.52	3334.83	90	20	0.0096	0.0021	5762.59	2.1
E18	2	15885083	5125.44	3099.26	90	20	0.0039	0.0021	2175.68	0.79
E20	2	10165065	4561.88	2228.26	110	20	0.00438	0.0025	2147.15	0.78
E21	2	13626871	3832.95	3555.19	110	20	0.00522	0.0025	4082.78	1.49
E22	2	6422063.5	3377.05	1901.68	110	20	0.00592	0.0025	2476.75	0.9
E23	2	6870550.3	4048.18	1697.19	110	20	0.00494	0.0025	1844.51	0.67
E24	2	8219137.4	3466.65	2370.92	90	20	0.00577	0.0021	2462.44	0.9
E25	0.7	17924659	3909.88	4584.45	90	20	0.00512	0.0007	1478.76	0.54
E26	0.7	20560346	4276.77	4807.45	90	20	0.00468	0.0007	1417.43	0.52
E27	2	13732432	2824.76	4861.45	90	20	0.00708	0.0021	6195.43	2.26
E28	0.6	11377463	2636.01	4316.17	90	20	0.00759	0.0006	1769.03	0.65
E29	0.6	12800889	2929.64	4369.44	90	20	0.00683	0.0006	1611.54	0.59
E30	1	13027675	2307.18	5646.58	110	20	0.00867	0.0013	5385.14	1.97
E32	0.1	4122452.6	1373.27	3001.92	90	20	0.01456	0.0001	393.37	0.14
Total entradas									22247.38	38.39



Tabla 33: Cálculo de entradas subterráneas para el año de 2005

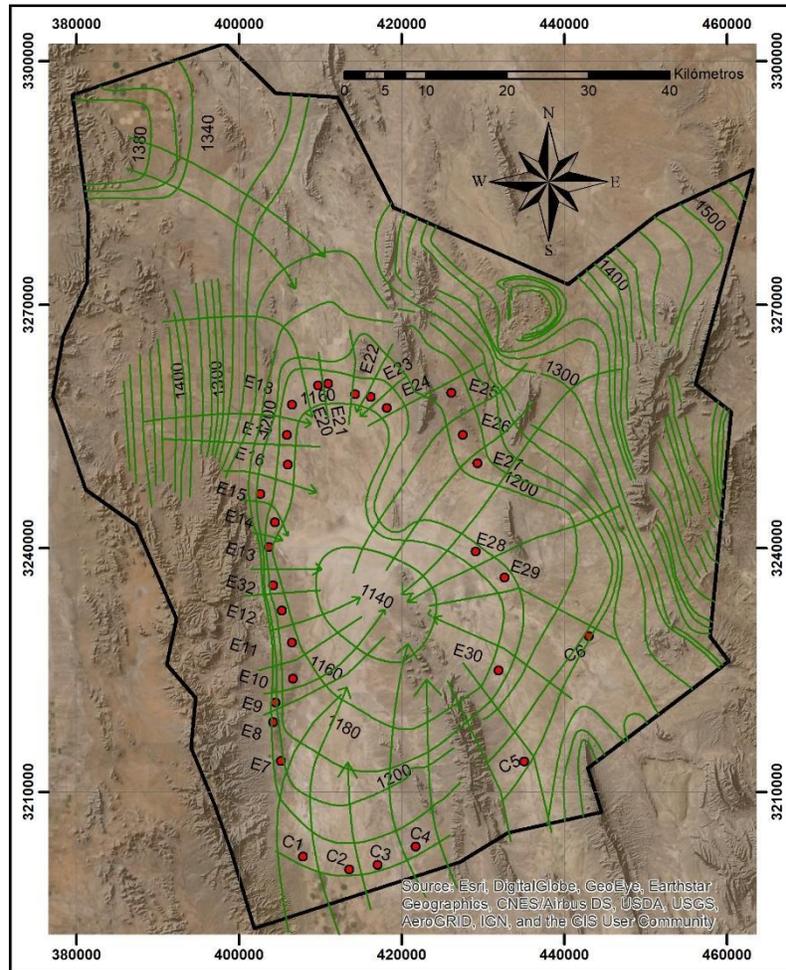
Entradas de agua subterránea (2005)										
Celda	k (m/d)	Area (m ²)	Long. (m)	Ancho(m)	b (m)	dh	i	T (m ² /s)	Q (m ³ /d)	Vol (hm ³ /año)
E1	2	11349686	2438.45	4654.47	110	20	0.0082	0.0025	8396.66	3.06
E2	2	25365031	3678.55	6895.39	110	20	0.00544	0.0025	8252.4	3.01
E3	2	13125445	3284.14	3996.62	110	20	0.00609	0.0025	5354.67	1.95
E4	2	24081954	5311.31	4534.09	110	20	0.00377	0.0025	3760.57	1.37
E5	2	19882829	4989.36	3985.05	110	20	0.00401	0.0025	3515.61	1.28
E6	2	18681312	4412.38	4233.84	110	20	0.00453	0.0025	4219.44	1.54
E7	2	25629314	3867.29	6627.2	110	20	0.00517	0.0025	7537.78	2.75
E8	2	8517904.4	2419.69	3520.25	110	20	0.00827	0.0025	6404.74	2.34
E9	2	61708328	8972.16	6877.76	110	20	0.00223	0.0025	3374.23	1.23
E10	2	9216700	2521.47	3655.29	110	20	0.00793	0.0025	6377.02	2.33
E11	0.1	8107243.3	1742.57	4652.46	90	20	0.01148	0.0001	480.69	0.18
E12	0.1	4207353.3	1285.87	3271.99	90	20	0.01555	0.0001	457.92	0.17
E13	0.1	2845106.1	807.01	3525.49	90	20	0.02478	0.0001	786.25	0.29
E14	0.1	2527143.6	738.31	3422.88	90	20	0.02709	0.0001	834.53	0.3
E15	0.1	7601086.4	1103.5	6888.16	90	20	0.01812	0.0001	1123.32	0.41
E16	0.1	9894932.3	2641.78	3745.56	90	20	0.00757	0.0001	255.19	0.09
E17	2	20637268	3142.63	6566.88	90	20	0.00636	0.0021	7517.76	2.74
E18	2	7572328.1	2291.22	3304.93	90	20	0.00873	0.0021	5193.37	1.9
E19	2	10802973	2175.22	4966.38	90	20	0.00919	0.0021	8215.39	3
E20	0.1	12341562	2788.76	4425.47	90	20	0.00717	0.0001	285.58	0.1
E21	2	1018751.9	692.05	1472.08	110	20	0.0289	0.0025	9359.48	3.42
E22	2	1213270.2	1268.28	956.63	110	20	0.01577	0.0025	3318.93	1.21
E23	2	3830296.9	1384.23	2767.1	110	20	0.01445	0.0025	8796.61	3.21
E24	0.1	28321144	3912.48	7238.67	110	20	0.00511	0.0001	406.89	0.15
E29	2	10134190	3084.1	3285.95	110	20	0.00648	0.0025	4396.69	1.6
Total entradas									57193.12	39.63



Tabla 34: Cálculo de entradas subterráneas para el año de 2012, (Censo CONAGUA, 2012)

Entradas de agua subterránea (2012)										
Celda	k (m/d)	Area (m2)	Long. (m)	Ancho(m)	b (m)	dh	i	T (m2/s)	Q (m3/d)	Vol (hm3/año)
C1	0.000001	3801128.9	2118.1	1794.59	110	20	0.00944	0	0	0
C2	0.000001	6486702.3	2190.5	2961.29	110	20	0.00913	0	0	0
C3	0.000001	10717403	2281.26	4698.02	110	20	0.00877	0	0	0
C4	2	16122044	3522.84	4576.43	110	20	0.00568	0.0025	5718.71	2.09
C5	2	12609102	2659.41	4741.32	110	20	0.00752	0.0025	7844.04	2.86
C6	2	12015047	2627.63	4572.58	110	20	0.00761	0.0025	7655.41	2.79
C7	2	10097789	2709.62	3726.64	110	20	0.00738	0.0025	6050.57	2.21
E8	2	8103178.9	16640.08	486.97	90	20	0.0012	0.0021	105.19	0.04
E9	2	12566148	2786.53	4509.6	90	20	0.00718	0.0021	5828.21	2.13
E10	2	24421079	5446.59	4483.74	90	20	0.00367	0.0021	2961.96	1.08
E11	2	18231439	3290.05	5541.39	90	20	0.00608	0.0021	6064.5	2.21
E12	0.1	5333388.4	1353.85	3939.42	90	20	0.01477	0.0001	523.67	0.19
E13	0.1	4161774.1	1163.88	3575.78	90	20	0.01718	0.0001	552.89	0.2
E14	0.1	6256410.7	2385.17	2623.05	90	20	0.00839	0.0001	198.07	0.07
E15	2	5852400	2026.98	2887.25	90	20	0.00987	0.0021	5129.49	1.87
E16	0.000001	7992734.4	2205.6	3623.84	90	20	0.00907	0	0	0
E17	0.000001	9315165.9	1876.37	4964.46	90	20	0.01066	0	0	0
E18	2	4447390.5	1783.83	2493.17	90	20	0.01121	0.0021	5030.72	1.84
E19	0.1	8328984.9	2305.96	3611.94	90	20	0.00867	0.0001	281.84	0.1
E20	2	8458337.3	2205.79	3834.61	90	20	0.00907	0.0021	6260.38	2.29
E21	2	6984973.3	1917.33	3643.07	90	20	0.01043	0.0021	6839.5	2.5
E22	2	6311980.2	1796.36	3513.76	90	20	0.01113	0.0021	7039.47	2.57
E23	2	8328984.9	2330.86	3573.35	90	20	0.00858	0.0021	5518.68	2.01
E24	2	10131587	1509.88	6710.19	90	20	0.01325	0.0021	16003.8	5.84
E25	0.1	7187058.9	1233.02	5828.83	90	20	0.01622	0.0001	850.89	0.31
E26	0.1	6788288.5	1401.99	4841.9	90	20	0.01427	0.0001	621.85	0.23
E27	2	30621769	4783.74	6401.22	90	20	0.00418	0.0021	4816.28	1.76
E28	2	7026509.6	1759.09	3994.4	90	20	0.01137	0.0021	8174.94	2.98
Total entradas									27268.73	40.17

ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO



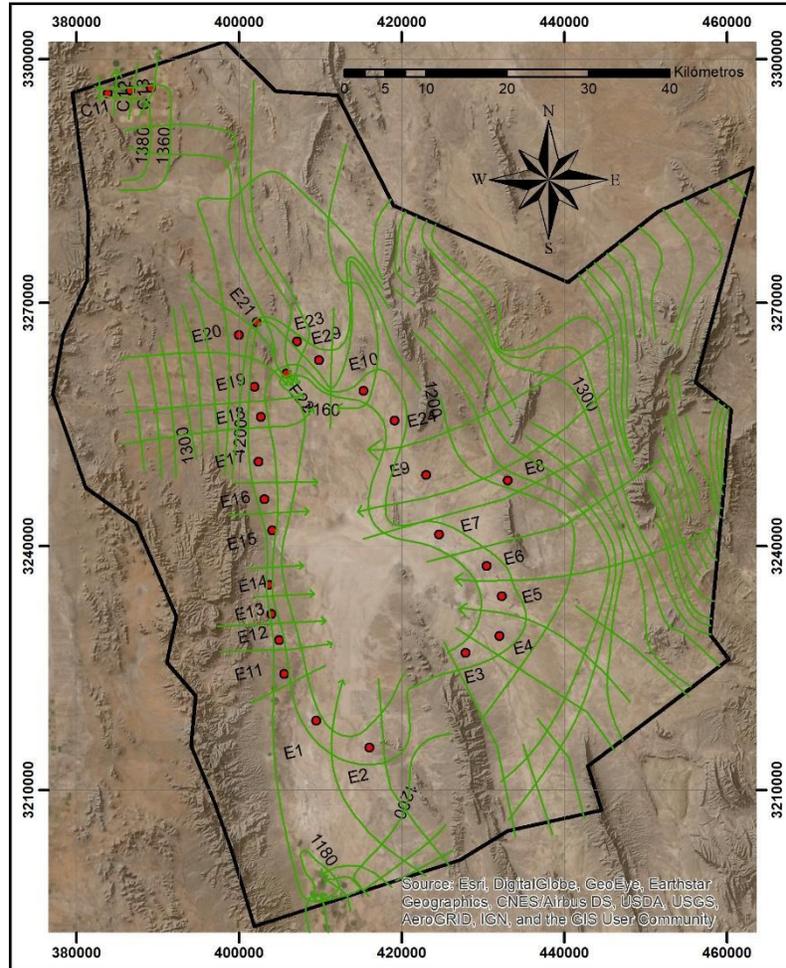
SIMBOLOGÍA

- EQUIP. Y LÍNEAS DE FLUJO AÑO 1981
- CELDAS_1981
- ZONA DE ESTUDIO



Figura 71: Entradas y salidas de flujo subterráneo para el año 1981 (ArcGIS)

ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO



SIMBOLOGÍA

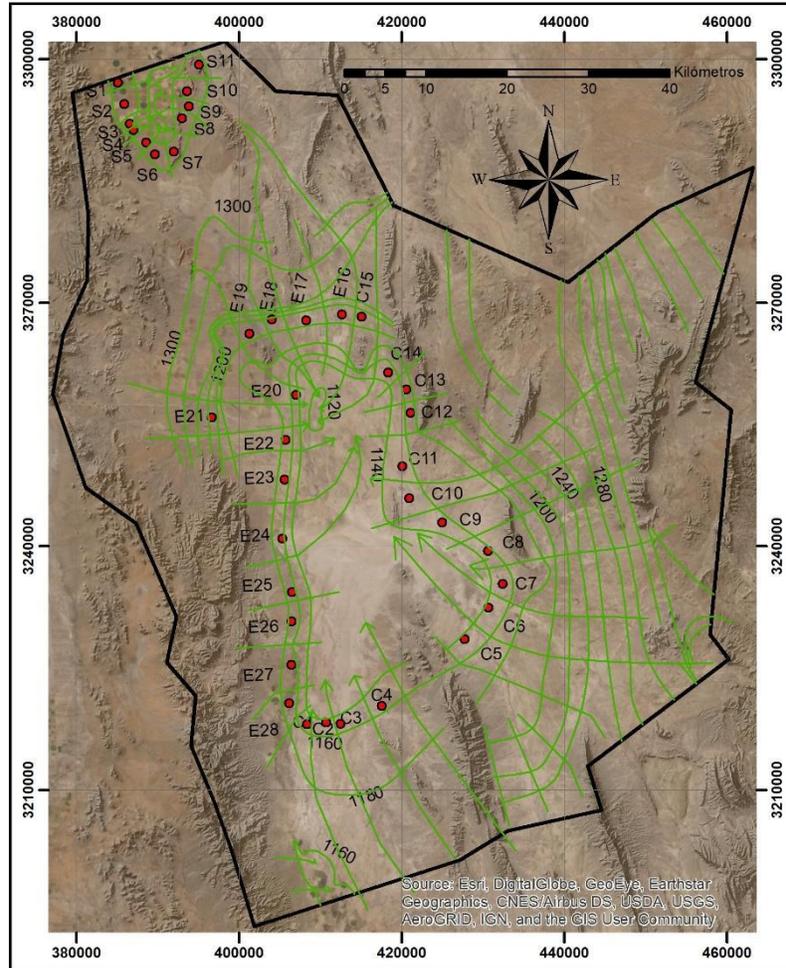
- EQUIPOTENCIALES Y LÍNEAS DE FLUJO 2005
- CELDAS AÑO 2005
- ZONA DE ESTUDIO



- LHormigas
- Estado de Chihuahua

Figura 72: Entradas y salidas de flujo subterráneo para el año 2005 (ArcGIS)

ENTRADAS Y SALIDAS DE FLUJO SUBTERRÁNEO



SIMBOLOGÍA

- EQUIPOTENCIALES Y LÍNEAS DE FLUJO 2012
- CELDAS AÑO 2012
- ZONA DE ESTUDIO



Figura 73: Entradas y salidas de flujo subterráneo para el año 2012 (ArcGIS)



Los volúmenes de entrada por flujo lateral quedan de la siguiente manera: para los años de 1981 de $38.39 \text{ hm}^3/\text{a}$, para el año 2005 de $39.63 \text{ hm}^3/\text{a}$ y para el 2011 de $40.17 \text{ hm}^3/\text{a}$. Debido a que los valores obtenidos para los años de 1981 y 2005 son muy similares, se tomará el valor del año 1981 para el año de 1985.

6.1.5 Recarga total media anual

La recarga total media anual (R_T), es el volumen total de agua que se concentra en una unidad hidrogeológica en un tiempo específico, siendo la suma de la recarga por precipitación pluvial, retorno de riego y el flujo lateral, este valor queda de la siguiente manera:

$$R_T = R_p + R_r + Eh$$

Para 1985:

$$R_T = 12.00 + 3.7 + 38.39 = 54.09 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Para 2005:

$$R_T = 17.52 + 4.1 + 39.63 = 61.25 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Para 2011:

$$R_T = 11.24 + 18.1 + 40.17 = 69.51 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Recarga total media anual:

$$R_{TMA} = (54.09 + 61.25 + 69.51)/3 = 61.6 \text{ hm}^3/\text{año}$$

Por lo que la recarga promedio anual considerando los resultados anteriores resultaría en: $R_T = 61.6 \text{ hm}^3/\text{año}$.

6.2 Salidas (S)

Existen diferentes procesos de salidas de agua subterránea en la zona de estudio; uno de ellos es la descarga por flujo lateral (Sh), ubicada al norte del acuífero, por evaporación (D_{EA}), por evapotranspiración real por freatofitas (D_{ET}) y una última es la extracción por bombeo (**B**).



6.2.1 Extracción del agua subterránea por bombeo

El valor de salida que más impacto tiene en el balance es el volumen de extracción por bombeo. Para el año de 1985 se tiene registrado un volumen de extracción de 20.36 hm³/a, para el año 2005 de 21.6 hm³/a y para el año de 2011 de 92.6 hm³/a (JCAS-UACH, 2015) (Tabla 8).

6.2.2 Salidas de agua subterránea por flujo lateral

Las salidas se calcularon con base en la Ley de Darcy, partiendo de la configuración de elevación del nivel estático para los años de 1981, 2005 y 2011. Sin embargo, en el año 1981 no se da este proceso por lo que se tomarán como iguales o constantes hasta 1985, quedando los volúmenes de salida por flujo lateral de frontera de la siguiente manera: para los años de 1985 se tomaron iguales a 0.0 hm³/a, para el año de 2005 igual a 2.62 hm³/a y para el año 2011 de 4.8 hm³/a (Tabla 35 y Tabla 36).

Tabla 35: Cálculo de salidas de agua subterránea para el año 2005, calculadas en base a configuraciones del censo de CONAGUA, 2005

Salidas de agua subterránea (2005)										
Celda	k (m/d)	Area (m2)	Long. (m)	Ancho(m)	b (m)	dh	i	T (m2/s)	Q (m3/d)	Vol (hm3/año)
S11	0.6	1867626.7	914.53	2042.17	110	20	0.02187	0.0008	2947.71	1.08
S12	0.6	2463064.2	1139.4	2161.72	110	20	0.01755	0.0008	2503.92	0.91
S13	0.6	3935082.2	1738.73	2263.19	110	20	0.0115	0.0008	1717.76	0.63
Total salidas									7169.39	2.62



Tabla 36: Cálculo de salidas de agua subterránea para el año 2011, calculadas en base a configuraciones del censo de CONAGUA, 2011

Salidas de agua subterránea (2011)										
Celda	k (m/d)	Area (m2)	Long. (m)	Ancho(m)	b (m)	dh	i	T (m2/s)	Q (m3/d)	Vol (hm3/año)
S1	0.6	4255554.1	3146.08	1352.65	110	20	0.00636	0.0008	567.79	0.21
S2	0.6	11476355	3317.12	3459.73	110	20	0.00603	0.0008	1376.9	0.5
S3	0.6	2374605.3	1690.4	1404.76	110	20	0.01183	0.0008	1096.81	0.4
S4	0.6	1571326.1	1387.75	1132.28	110	20	0.01441	0.0008	1076.87	0.39
S5	0.6	4642302.4	2280.13	2035.98	110	20	0.00877	0.0008	1178.47	0.43
S6	0.6	7369688.2	2806.94	2625.52	110	20	0.00713	0.0008	1235.52	0.45
S7	0.6	7866661.3	2192.9	3587.33	110	20	0.00912	0.0008	2159.29	0.79
S8	0.6	6457074	2369.5	2725.08	110	20	0.00844	0.0008	1517.98	0.55
S9	0.6	5430884.6	3428.28	1584.14	110	20	0.00583	0.0008	609.55	0.22
S10	0.6	10996478	4234.16	2597.09	110	20	0.00472	0.0008	809.05	0.3
S11	0.6	7670404.9	2566.22	2988.99	110	20	0.00779	0.0008	1536.76	0.56
Total salidas									3041.5	4.8

6.2.3 Evaporación desde zonas someras (D_{EA})

La evaporación de agua también se puede llevar a cabo cuando se encuentra a una profundidad menor a cinco m por debajo del nivel del terreno y es producida por efecto de la radiación solar (JCAS-UACH, 2015), (Figura 74).

Para determinar su valor fue necesario marcar áreas en donde la profundidad del agua varía de entre algunos centímetros hasta 15 m y con ayuda de las configuraciones de la profundidad al nivel del agua de 1981, 2005 y 2011 estas áreas fueron seleccionadas en el centro del acuífero en donde el agua se encuentra más somera en la Laguna del Cuervo. Para ello se usó la siguiente expresión:

$$D_{EA} = \% ev (EP - P)AS_n + \% ev (EP - P)AS_n + \% ev (EP - P)AS_n \quad (21)$$

Dónde:

DEA = Es la descarga por evaporación en el acuífero

% ev = porcentaje de la evaporación en el evaporímetro, está en función de la profundidad del nivel del agua

AS_n = Área de la superficie n, con una profundidad promedio

EP = Evapotranspiración potencial.



P = Precipitación media de la cuenca.

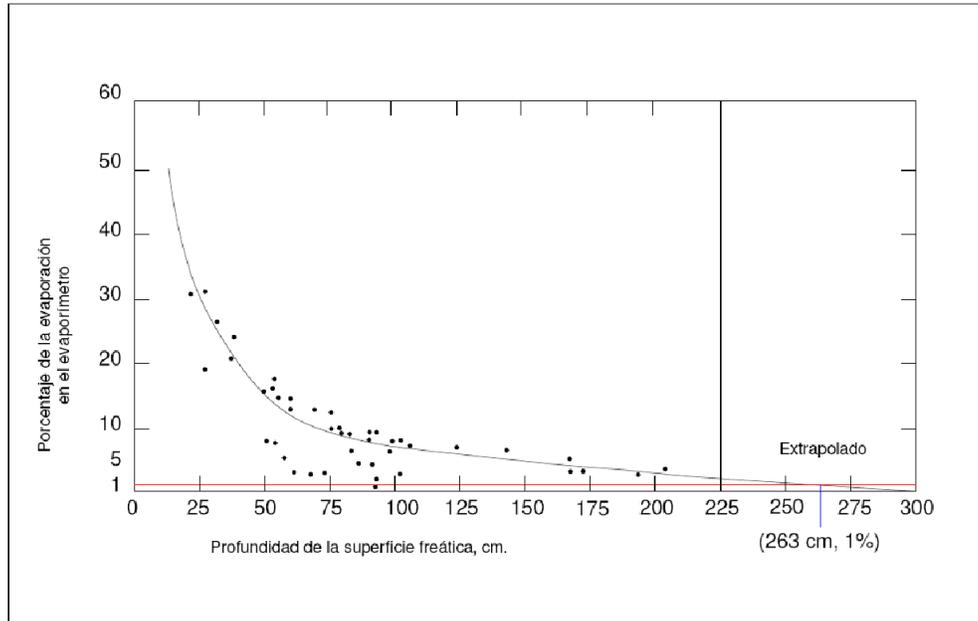


Figura 74: Porcentaje de la evaporación del agua subterránea con respecto a la profundidad de la superficie freática (CNA, 1994).



Tabla 37: Descarga por evaporación en el acuífero para los años 1981, 2005 y 2011

1981		EP (mm)	P (mm)	ÁREA MATORRAL (m ²)	DEA MATORRAL (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL NATURAL (m ²)	DEA PASTIZAL NATURAL (m ²)	DEA PASTIZAL N. (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL HALOFILO (m ²)	DEA PASTIZAL H. (hm ³ /año)	TOTAL DEA (hm ³ /año)
0.25	0.31	1753.13	296.12	10365128.89	4.681649898	9620160.023	0	4.3451675	11118588.65	5.021967401	
0.5	0.158	1753.13	296.12	1083067.081	0.249330252	627492.1752	0	0.144453455	31444672.80	7.23880203	
1	0.074	1753.13	296.12	2020678.437	0.217867003	1445186.672	0	0.155818206	34139183.83	3.680843785	
2	0.03	1753.13	296.12	2401920.819	0.104988688	1525285.934	0	0.066670706	40611571.56	1.775143976	
3	0.001	1753.13	296.12	0	0	2197397.365	0	0.00320163	68427952.03	0.09970021	
4	0.0002	1753.13	296.12	0	0.01601274	0	0	0	54950687.23	0.01601274	
5	0.0005	1753.13	296.12	13847746.82	0.010088153	0	0	0	72673586.51	0.052943071	
10	0.000003	1753.13	296.12	20280867.96	8.86483E-05	0	0	0	40363190.00	0.000176429	
15	0.00000002	1753.13	296.12	16497244.86	4.80733E-07	0	0	0	25881249.80	7.54185E-07	
				66496654.87	5.28	15415522.17		4.72	379610682.39	17.89	27.881
2005											
Prof. (m)	%Ev	EP (mm)	P (mm)	ÁREA MATORRAL	DEA MATORRAL (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL NATURAL	DEA PASTIZAL NATURAL	DEA PASTIZAL N. (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL HALOFILO	DEA PASTIZAL H. (hm ³ /año)	TOTAL DEA (hm ³ /año)
0.25	0.31	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	28715800.41	12.97015459	
0.5	0.158	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	41046174	9.449140384	
1	0.074	1753.13	296.12	0	0	896238.0448	0	0.096631257	23381991.77	2.521016891	
2	0.03	1753.13	296.12	63281.4643	0.002766052	748565.3077	0	0.032720014	79183712.35	3.461143822	
3	0.001	1753.13	296.12	612262.0361	0.000892072	3006622.417	0	0.004380679	117494212.8	0.171190243	
4	0.0002	1753.13	296.12	528582.6417	0.00015403	1013270.218	0	0.000295269	97494212.84	0.028410009	
5	0.0005	1753.13	296.12	968129.621	0.000705287	2310424.719	0	0.001683156	104495212.8	0.017033898	
10	0.000003	1753.13	296.12	22768405.94	9.95214E-05	8462659.297	0	3.69905E-05	87494212.84	0.000346114	
15	0.00000002	1753.13	296.12	51931455.86	1.51329E-06	491472.4787	0	1.43216E-08	77494212.84	3.4238E-06	
				76872117.57	0.0046	16929252.48		0.1357	656799742.7	28.62	28.759
2011											
Prof. (m)	%Ev	EP (mm)	P (mm)	ÁREA MATORRAL	DEA MATORRAL (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL NATURAL	DEA PASTIZAL NATURAL	DEA PASTIZAL N. (hm ³ /año)	ÁREA PASTIZAL HALOFILO	DEA PASTIZAL H. (hm ³ /año)	TOTAL DEA (hm ³ /año)
0.25	0.31	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	13375120.08	6.041181951	
0.5	0.158	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	7635926.914	1.757848256	
1	0.074	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	8965148.031	0.966610965	
2	0.03	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	6314541.599	0.276010508	
3	0.001	1753.13	296.12	0	0	0	0	0	5913612.491	0.008616193	
4	0.0002	1753.13	296.12	114773.4633	8.3613E-05	0	0	0	5895338.542	0.001717913	
5	0.0005	1753.13	296.12	169779.7832	7.42113E-07	1259607.132	0	5.50578E-06	24954852.76	0.018179735	
10	0.000003	1753.13	296.12	941221.3316	2.74274E-08	2000305.397	0	5.82893E-08	13740732.97	6.00612E-05	
15	0.00000002	1753.13	296.12	1225774.578	8.44E-05	3259912.528	0	5.56E-06	17441970.09	5.08262E-07	
									104237243.5	9.07	9.070



Con ayuda de las configuraciones de la profundidad del nivel estático de cada año, se marcaron varias áreas de profundidades promedio para cada tipo de vegetación respectivamente, Tabla 37. El valor de la pérdida por evaporación para el año 1981 será igual para el año de 1985 ya que no se cuenta con datos para este año y de acuerdo a los cálculos anteriores corresponde a $27.88 \text{ hm}^3/\text{año}$, $28.75 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el año 2005 y $9.07 \text{ hm}^3/\text{año}$ para el año 2011.

6.2.4 Evapotranspiración de zonas someras (DET)

Al igual que el proceso para calcular la evaporación en la zona de estudio, para el cálculo de la evapotranspiración en zonas someras se tomaron en cuenta las configuraciones de la profundidad del nivel estático de cada año y con las mismas áreas que representan a cada tipo de vegetación (pastizal halófilo, matorral disperso y pastizal natural), así como los consumos anuales reportados por Thomas et al. (1989) y CNA (1996). Se obtuvo la descarga por evapotranspiración real por freatofitas (D_{ET}) para posteriormente sumar este valor con la descarga por evaporación en el acuífero (D_{EA}), teniendo como resultado la descarga natural total (D_{NA}), Tabla 38.



Tabla 38: Cálculo de evapotranspiración real por freatofitas.

EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL EN ZONAS SOMERAS 1981					
TIPO DE VEGETACIÓN FREATOFITA	EVAPOTRANSPIRACIÓN ANUAL (M)	AREAS M2	DESCARGA PROMEDIO (DET) ANUAL HM ³ /AÑO	EVAPORACIÓN (DEA) HM ³ /AÑO	EVAPOTRANSPIRACION TOTAL (DNA) HM ³ /AÑO
Pastizal Halófilo disperso	0.01	296428929.6	2.96	17.8855904	20.85
Matorral disperso	0.05	66496654.87	3.32	5.280025854	8.60
Pastizal Natural	0.01	15415522.17	0.15	4.715311497	4.87
			6.44		34.32

EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL EN ZONAS SOMERAS 2005					
TIPO DE VEGETACIÓN FREATOFITA	EVAPOTRANSPIRACIÓN ANUAL (M)	AREAS M2	DESCARGA PROMEDIO (DET) ANUAL HM ³ /AÑO	EVAPORACIÓN (DEA) HM ³ /AÑO	EVAPOTRANSPIRACION TOTAL (DNA) HM ³ /AÑO
Pastizal Halófilo disperso	0.01	656799742.7	6.57	28.61843938	35.19
Matorral disperso	0.05	76872117.57	3.84	0.004618476	3.85
Pastizal Natural	0.01	16929252.48	0.17	0.13574738	0.31
			10.58		39.34

EVAPOTRANSPIRACIÓN TOTAL EN ZONAS SOMERAS 2011					
TIPO DE VEGETACIÓN FREATOFITA	EVAPOTRANSPIRACIÓN ANUAL (M)	AREAS M2	DESCARGA PROMEDIO (DET) ANUAL HM ³ /AÑO	EVAPORACIÓN (DEA) HM ³ /AÑO	EVAPOTRANSPIRACION TOTAL (DNA) HM ³ /AÑO
Pastizal Halófilo disperso	0.01	104237243.5	1.04	9.070226089	10.11
Matorral disperso	0.05	1225774.578	0.06	8.43826E-05	0.06
Pastizal Natural	0.01	3259912.528	0.03	5.56407E-06	0.03
			1.14		10.21

DET= Descarga por evapotranspiración real por freatofitas

DEA= Descarga por evaporación en el acuífero

DNA= Descarga natural total

El valor de la evapotranspiración del año 1981 será igual para el año de 1985 ya que no se cuenta con datos para este año y de acuerdo a los cálculos anteriores corresponde a 34.32 hm³/año, 39.34 hm³/año para el año 2005 y 10.21 hm³/año para el año 2011.

6.2.5 Descarga natural comprometida

La descarga natural comprometida se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, más las descargas que se deben conservar para no afectar a los acuíferos adyacentes, sostener el gasto ecológico, y prevenir la migración de agua de mala calidad. Para el caso del acuífero Laguna de Hormigas, y debido a los cambios en las direcciones de flujo al norte del acuífero, se presenta una salida por flujo subterráneo para



distintos años, las cuales son de 4.8 hm³/año y 2.62 hm³/año, por lo que se tomará un promedio de ambas quedando como resultado 3.71 hm³/año.

6.2.6 Volumen concesionado de agua subterránea

La cifra de volumen concesionado es de 16.72 hm³/año con fecha de 20 de diciembre de 2013, publicado en el DOF el 20/12/2013.

6.3 Cambio de almacenamiento

$$\Delta V(S) = E - S$$

Tabla 39: Total de entradas y salidas para el balance de aguas subterráneas

CÁLCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL AÑO 1985			
ENTRADAS hm ³ /año		SALIDAS hm ³ /año	
Rp	12	B	20.36
Rr	3.7	Sh	0
Eh	38.39	DET	6.44
		DEA	27.88
RECARGA TOTAL	54.09	TOTAL	54.68
CÁLCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL AÑO 2005			
ENTRADAS hm ³ /año		SALIDAS hm ³ /año	
Rp	17.52	B	21.6
Rr	4.1	Sh	2.62
Eh	39.63	DET	10.58
		DEA	28.75
RECARGA TOTAL	61.25	TOTAL	63.55
CÁLCULO DE ENTRADAS Y SALIDAS PARA EL AÑO 2011			
ENTRADAS hm ³ /año		SALIDAS hm ³ /año	
Rp	11.24	B	92.6
Rr	18.1	Sh	4.8
Eh	40.17	DET	1.14
		DEA	9.07
RECARGA TOTAL	69.51	TOTAL	107.61
RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	61.6	DESCARGA TOTAL MEDIA ANUAL	75.28

$$\Delta V(S) = 61.6 - 75.28 = -13.68 \text{ hm}^3/\text{año}$$



6.4 Disponibilidad de agua subterránea

La disponibilidad media anual de agua subterránea se determinó conforme al procedimiento que se establece en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000, Conservación del recurso agua-Que estable las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales (numeral 4.3 de la norma).

Incorporando las cifras detalladas con anterioridad a la ecuación general de disponibilidad, nos queda la siguiente expresión en $\text{hm}^3/\text{año}$:

Tabla 40: Disponibilidad media anual de agua subterránea con volumen concesionado de agua subterránea NOM-011-CNA-2000

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	VOLUMEN CONCESIONADO DE AGUA SUBTERRÁNEA
41.17	=	61.6	-	3.71	-	16.72

La disponibilidad de agua subterránea para la zona del acuífero Laguna de Hormigas tiene un valor positivo, que representa una disponibilidad de 41.17 millones de metros cúbicos anuales, sin embargo, las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales cambiaron, y se encuentran establecidas en la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 publicada en el Diario Oficial de la Federación el 27 de marzo de 2015, misma que entró en vigor el 26 de mayo de 2018, quedando la expresión de la siguiente manera:

Tabla 41: Disponibilidad media anual de agua subterránea registrado en el DOF 04/01/2018

CLAVE	ACUIFERO	R	DNC	VEAS				DMA	
				VCA\$	VEALA	VAPTYR	VAPRH	POSITIVA	NEGATIVA (DÉFICIT)
CIFRAS EN MILLONES DE METROS CÚBICOS ANUALES									
0824	LAGUNA DE HORMIGAS	25.5	0.0	15.995057	209.681907	5.209300	0.000000	0.000000	- 205.386264



R: recarga total media anual; **DNC:** descarga natural comprometida; **VEAS:** volumen de extracción de aguas subterráneas; **VCAS:** volumen concesionado/asignado de aguas subterráneas; **VEALA:** volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente; **VAPTYR:** volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en el REPGA; **VAPRH:** volumen de agua correspondiente a reservas, reglamentos y programación hídrica; **DMA:** disponibilidad media anual de agua del subsuelo.

La disponibilidad media anual de agua subterránea conforme al procedimiento que establece la Norma Oficial Mexicana NOM-011-CONAGUA-2015 es la siguiente:

DISPONIBILIDAD MEDIA ANUAL DE AGUA SUBTERRÁNEA EN UNA UNIDAD HIDROGEOLOGICA	=	RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL	-	DESCARGA NATURAL COMPROMETIDA	-	VEALA	-	VAPTYR	-	DET	-	DEA	-	VOLUMEN CONCESIONADO DE AGUA SUBTERRÁNEA
-175.78	=	69.74	-	3.71	-	209.68	-	5.2	-	1.14	-	9.07	-	16.72

Con esta disponibilidad negativa de $-175.78 \text{ hm}^3/\text{año}$ podemos comprobar que el acuífero se encuentra en déficit.



7 CONCLUSIONES

El acuífero Laguna de Hormigas es uno de los más grandes del estado de Chihuahua y también uno de los más modificados en cuanto a su estado hidrológico en los últimos años.

El diseño del modelo resultó adecuado, aunque es importante mencionar que la falta de información genera incertidumbre en algunas zonas; concretamente, las zonas de interés que son en donde ha crecido significativamente el número de pozos, aun así, tiene suficiente información para la conclusión de este modelo.

Las configuraciones que se utilizaron por ser las más antiguas y completas fueron las elaboradas con datos del censo del año 1981, siendo modificadas durante la calibración del modelo, aunque también es cierto que no se puede afirmar que sean las más cercanas a la realidad debido a la falta de información de la red de monitoreo y es importante mencionar que fueron uno de los parámetros con mayor sensibilidad, sin embargo, se puede observar que el modelo reproduce el comportamiento real del acuífero.

También se corroboró el sentido del flujo con la realización del modelo de flujo subterráneo en donde la recarga por precipitación pluvial proviene de las sierras y fluye hacia el valle como ya se había mencionado en un principio; en cuanto al flujo regional, existen entradas por flujo lateral al sur y salidas al norte. La precipitación y la recarga por retorno de riego son parte importante de las aportaciones que recibe el acuífero, sin embargo, la extracción de agua por medio de pozos de bombeo es la salida más importante o que más impacto tiene en el sistema hidrológico del acuífero y aunado a esto, el descenso o abatimiento de los pozos, que, aunque la recarga es una cantidad importante con la que se esperarían una recuperación, no es suficiente para contrarrestar la cantidad de extracción.

Se obtuvo una disponibilidad media anual de $-175.78 \text{ hm}^3/\text{año}$ tomando en cuenta el volumen de extracción de agua en las zonas de suspensión provisional de libre alumbramiento y los inscritos en el Registro Nacional Permanente (VEALA) de $209.68 \text{ hm}^3/\text{año}$; así como el volumen de extracción de agua pendiente de titulación y/o registro en



el REPDA (VAPTYR) de 5.2 hm³/año, además de las salidas por evapotranspiración y evaporación. Este resultado nos indica que el acuífero está sobreexplotado y esto se debe al aumento de pozos de bombeo en la zona norte del acuífero en donde se pueden observar abatimientos importantes.

También se obtuvo un balance de masas del programa Visual MODFLOW en donde se muestra mayor cantidad de salidas que de entradas, teniendo un déficit de -59.49 hm³/año.

Tabla 42: Balance de masas obtenido de VisualMODFLOW

AÑO 2012 (11674 DÍAS)		ENTRADAS (m ³ /d)	SALIDAS (m ³ /d)
	POZOS	5049.3286	253808.2192
	RECARGA	85793.8672	
	ET		24.6758
		90843.1958	253832.895
	TOTAL (hm ³ /año)=	33.15776647	92.64900668

Se reprodujo el comportamiento del sistema calibrando el modelo a base de “ensayo y error” y con el código “PEST”, para calibración automatizada obteniendo un error residual medio de -0.19 m para el año 1981, -5.96 m para el año 2005, -4.99 m para el año 2006, -0.28 m para el año 2011 y -2.25 m para el año 2012 y una raíz del error cuadrático medio normalizado de 1.109%, 3.943%, 2.872%, 4.004% y 3.319% respectivamente.

De acuerdo con la predicción del primer escenario en donde se incrementó el bombeo un 20, 50 y 110%, hasta llegar al volumen de extracción de 209.68 hm³/año en 20 años se observan abatimientos considerables al norte del acuífero, especialmente en el pozo P17 de hasta -207.06 m, igualmente para el tercer escenario en donde se supone un volumen de



extracción concesionado de 209.68 hm³/año para el periodo de 2022 al año 2032, mismo que actualmente se encuentra registrado en el DOF como (VEALA), se observan abatimientos de hasta -220.56 m en el mismo pozo.

La sobreexplotación del acuífero probablemente puede generar diversos efectos perjudiciales tales como: la eliminación de vegetación nativa y pérdida de ecosistemas, la disminución del rendimiento de los pozos, el incremento de los costos de extracción, el agrietamiento del terreno y la contaminación del agua subterránea.

No obstante, el crecimiento demográfico y el desarrollo de los sectores productivos siguen generando demandas crecientes de agua. En varios de los acuíferos que se encuentran en estado crítico, los efectos de la sobreexplotación progresan a pesar de las acciones emprendidas para detenerla; el suministro de agua al sector agrícola es cada vez más difícil de satisfacer ya que es la principal fuente de economía de la región y el uso competitivo del agua subterránea también. Esta competencia ya ha provocado enfrentamientos físicos y legales entre ejidatarios barzonistas y mormones LeBaron como el del 30 de Abril de 2018 en el rancho La Mojina, municipio de Buenaventura del estado de Chihuahua por el agua de la cuenca del Río del Carmen, ubicada en el noreste de la entidad.

A todo esto, se suma la seria amenaza del impacto del cambio climático sobre los recursos hídricos. Este fenómeno global provocará la disminución de la precipitación pluvial y el incremento de la temperatura en varias regiones de México, factores que a su vez se reflejarán en un decremento del escurrimiento superficial y de la recarga de los mantos acuíferos; así como la ocurrencia de sequías más severas, prolongadas y frecuentes.



8 RECOMENDACIONES

Los datos de piezometría de los años anteriores desafortunadamente no se pueden corroborar, aun así, es recomendable realizar estudios actuales de censo para revisar el nivel de brocal, la localización y el volumen de extracción en pozos de bombeo, así como la localización, nivel de brocal y elevación del nivel estático en pozos de observación ya que hay algunas discrepancias en los valores, de esta forma se puede disminuir el grado de incertidumbre de los mismos y tener actualizados los datos de la red de monitoreo.

También es importante realizar pruebas de bombeo para determinar parámetros como coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico, valores de conductividad hidráulica y transmisividad.

Posteriormente se recomienda recalibrar el modelo con los datos actuales para que el modelo sea capaz de reproducir el comportamiento real del sistema hidrogeológico.

También se recomienda hacer una pos-auditoría a futuro en los años en que se realizó la predicción, empezando con el año 2022, luego con el año 2027 y por último en el año 2032 para verificar que las predicciones se cumplan, en caso contrario es recomendable rediseñar y volver a recalibrar el modelo con nuevos datos de campo de tal forma que el modelo sea capaz de reproducir estos mismos valores.

Y, por último, es recomendable tomar en cuenta los resultados tanto del modelo como del balance de aguas subterráneas del acuífero Laguna de Hormigas para la toma de decisiones referentes con la administración del agua para que el trabajo realizado no sea en vano y sobre todo para mejorar la condición hidrológica actual del acuífero.



9 REFERENCIAS

- Anderson, M., & Woessner, W. (1992). *APPLIED GROUNDWATER MODELING*. San Diego, California: Academic Press.
- Armas, F. D. (2010). *Modelación y simulación hidrodinámica del sistema acuífero Zamora, en Michoacán*. México, D.F.: Universidad Autónoma de México.
- Astudillo Vimos, B. (2006). Búsqueda de la sostenibilidad del agua. *Researchgate*.
- CONABIO. (2014). *La biodiversidad en Chihuahua Estudio de Estado*. México: Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad.
- CONABIO. (2019). *Comisión Nacional para el conocimiento y uso de la Biodiversidad*. Obtenido de Portal de geoinformación, Sistema Nacional de Información sobre Biodiversidad. Shape municipios: <http://www.conabio.gob.mx/información/gis/>
- CONAGUA. (2015). *Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Laguna de Hormigas (0824), Estado de Chihuahua, México*. Mexico, DF.: Comisión Nacional del Agua.
- CONAPO. (2017). *La condición geográfica de las localidades menores a 2500 habitantes en México*. Obtenido de Gobierno de México: <https://www.gob.mx/conapo#2944>
- Custodio, E., & Llamas, M. R. (1996). *Hidrología Subterránea. Segunda Edición. Tomo I*. Barcelona: Ediciones Omega, S. A.
- DOF. (04 de 01 de 2018). *Diario Oficial de la Federación*. Obtenido de Acuerdo por el que se actualiza la disponibilidad media anual de agua subterránea de los 653 acuíferos de los Estados Unidos Mexicanos, mismos que forman parte de las Regiones Hidrológico-Administrativas que se indican.: http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5510042&fecha=04/01/2018
- Doherty, J. (2018). *PEST Model-Independent Parameter Estimation User Manual Part I: PEST, SENSAN and Global Optimisers. 7th Edition*. Australia: Watermark Numerical Computing.



- FAO. (2019). *Food and Agriculture Organization*. Obtenido de Utilización de la humedad ambiental por prosopis tamarugo phil.: <http://www.fao.org/docrep/006/AD315S/AD315S05.htm>
- García Iedezma, Y. W., Silva Cantú, I., González, R. H., & Yáñez Díaz, M. I. (2018). Pérdidas por intercepción de lluvia en el Matorral Espinoso Tamaulipeco bajo diferentes intensidades de raleo. *revista Mexicana de Ciencias Forestales Vol. 9 (49)*.
- GEOINFOMEX. (2019). *Sistema de consulta del Servicio Geológico Mexicano*. Obtenido de GEOINFOMEX-SGM: <https://www.sgm.gob.mx/GeoInfoMexGobMx/>
- Gorelic, S. M., & Zheng, C. (2015). Global change and the groundwater management challenge. *Water Resources Research*.
- Gutiérrez, M., Reyes Gómez, V., Alarcón Herrera, M., & Núñez López, D. (2016). Acuíferos en Chihuahua: Estudios Sobre Sustentabilidad. *Researchgate*.
- Hem, J. D. (1985). *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water 3rd ed.* Washington: U. S. Geological Survey Water.
- Hernández Guajardo, J. E. (2012). *Modelo de Flujo del Agua Subterránea del Acuífero Jiménez-Camargo*. Chihuahua: Universidad Autónoma de Chihuahua.
- Iglesias López, A., & Villanueva Martínez, M. (1984). *Pozos y acuíferos: técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. España: Instituto Geológico y Minero de España.
- INEGI. (1992). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Conjunto de datos vectoriales de la carta de Aguas superficiales. Escala 1:250 000. Serie I. Chihuahua: <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825684013>
- INEGI. (2008). *Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- INEGI. (2013). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Conjunto de datos vectoriales de la carta de Uso del suelo y vegetación serie V. Conjunto Nacional.



Chihuahua. Escala 1:250 000:

<https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825573492>

INEGI. (2015). *Instituto Nacional de Estadística y Geografía*. Obtenido de Guía para la interpretación de cartografía: edafología: escala 1:250 000: serie III: <https://www.inegi.org.mx/temas/edafologia/>

JCAS-UACH. (2015). *EVALUACIÓN DE LAS FUENTES ACTUALES DE ABASTECIMIENTO A LA CIUDAD DE CHIHUAHUA, ESTUDIO DE FACTIBILIDAD DE FUENTES ALTERNAS Y ANTEPROYECTO DE INFRAESTRUCTURA HIDRÁULICA NECESARIA CAPÍTULO 3, TOMO 5*. Chihuahua: JCAS-UACH.

Jiménez Cisneros, B., & Galizia Tundisi, J. (2012). *Diagnóstico del agua en las Américas*. México, Distrito Federal: Foro Consultivo científico y Tecnológico, AC.

Matthes, G. (1982). *The Properties of Groundwater*. New York: Department of Environmental Science, John Wiley and Sons Inc.

McDonald, M., & Harbaugh, A. (1988). *A Modular Three-Dimensional Finite-Difference Ground-Water Flow Model: Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6*. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey.

Mendes, T. A., Nóbrega Dantas, A., Reis, L., & Padrón Sánchez, N. (2019). Implementación de modelos de potencial de evapotranspiración usando el software SciLab. *Researchgate*.

Meyer, W., & Turner, B. (2009). Human Population Growth and Global Land-Use/Cover Change. *Annual Reviews*.

Morris, D., & Johnson, A. (1967). *Summary of hydrologic and physical properties of rock and soil materials, as analyzed by the hydrologic laboratory of the U.S. Geological Survey, 1948-60*. Washington: U.S. Geological Survey.



- Narayanan, R. (2015). Study on Groundwater modeling of Aquifers Using Visual Modflow. *Researchgate*.
- Poeter, E., & Hill, M. (1998). *Methods and Guidelines for Effective Model Calibration*. Denver, Colorado: U.S. Geological Survey.
- SARH. (1978). *Comisión técnico consultiva para la determinación regional de los coeficientes de agostadero, Chihuahua*. Chihuahua: Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos.
- Secretaría de Salud. (2019). *Salud Ambiental*. Obtenido de MODIFICACION a la Norma Oficial Mexicana NOM-127-SSA1-1994, Salud ambiental. Agua para uso y consumo humano. Límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización.: <http://www.salud.gob.mx/unidades/cdi/nom/m127ssa14.html>
- SIAP. (2017). *Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera*. Obtenido de Cierre Estadístico de la Producción Ganadera: <https://www.gob.mx/siap/es/articulos/cierre-estadistico-de-la-produccion-ganadera-2017?idiom=es>
- SICT. (2009). *Sistema de Información de la Cobertura de la Tierra*. Aguascalientes: Instituto Nacional de Estadística y Geografía.
- SINA. (2019). *Sistema Nacional de Información del Agua*. Obtenido de Acuíferos (nacional). CONAGUA. Subdirección General Técnica: <http://sina.conagua.gob.mx/sina/tema.php?tema=acuiferos&ver=mapa>