



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
FACULTAD DE BIOLOGÍA**

PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Evaluación del cambio climático en el funcionamiento hidráulico de los acuíferos

Zacapu y Pastor Ortíz.

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta:

Giovanni Carlo Flores Fernández

Ingeniero Civil

Director de Tesis:

Doctor en Ciencias de Ingeniería

Marco Antonio Martínez Cinco

Co-Director de Tesis:

Doctora en Ingeniería de Caminos Canales y Puertos

Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Morelia, Michoacan, Febrero de 2016

Agradecimientos

Agradezco profundamente a mi familia, especialmente a mis padres Mario e Irma por apoyarme en todo momento, por los valores inculcados y por darme la oportunidad de una excelente educación. Si el magnífico ejemplo a seguir, que ellos representan, jamás me hubiera sido posible conseguir tantos logros y felicidad en mi vida.

A mi pareja Itzel por su paciencia, alegría y afecciones que me han impulsado en momentos de adversidad.

Al Dr Marco Antonia y la Dra. Sonia Sánchez por permitirme participar en un proyecto de investigación bajo su asesoría, por su buena disposición, confianza y apoyo.

A mis amigos y compañeros de maestría, en especial a Liliana y Jaime por su constante auxilio y compañía a lo largo de mis estudios de maestría y proyecto de tesis.

A los estudiantes de licenciatura Marisela y Alberto por su asistencia en diversos puntos del proyecto.

A las facultades que incorporan el programa de maestría en ciencias en ingeniería ambiental, al personal administrativo y académico que labora en ellas, por facilitar el uso de sus instalaciones y darme la oportunidad de una mejor formación y crecimiento profesional.

Índice

1. Introducción.....	11
2. Antecedentes.....	13
2.1. Modelos Hidrológicos.....	14
2.1.1. Clasificación de Modelos.....	14
2.1.2 Modelación Superficial.....	15
2.1.3. Modelación Subterránea.....	16
2.1.4. Modelos y Software de modelación seleccionados.....	17
2.2. Cambio Climático.....	35
2.2.1. Modelos de Circulación General y escenarios de emisión.....	36
2.2.2. Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5).....	38
3. Objetivos.....	45
4. Hipótesis.....	46
5. Justificación.....	47
6. Metodología.....	49
6.1 Caracterización de la Zona de Estudio.....	50
6.2 Recopilación de datos.....	50
6.2.1 Demandas urbanas, agrícolas e industriales.....	50
6.2.2 Meteorológicos.....	54
6.2.3 Hidrométricos.....	55
6.2.4 Piezometría.....	55
6.2.5 Caracterización de Acuíferos.....	56
6.3 Análisis estadístico de datos – pruebas de homogeneidad.....	56
6.3.1 Prueba estadística de Helmert.....	57
6.3.2 Prueba de Secuencias.....	57
6.3.3. Independencia de Anderson.....	58
6.3.4 t de student.....	59
6.3.5 Prueba estadística de Cramer.....	59
6.3.6 Llenado de series de precipitación.....	60
6.4 Series Meteorológicas con Cambio Climático.....	63
6.4.1 Anomalía climática.....	64
6.5 Modelación Hidrológica Superficial – Modelo Evalhid.....	66

6.5.1 Configuración conceptual del modelo	66
6.5.2 Calibración	69
6.6 Modelación Hidrológica Subterránea – Modelo Aquival	71
6.6.1 Configuración conceptual del modelo	72
6.6.2 Simulación y Calibración.	75
6.7 Modelación con cambio climático.	77
6.8 Análisis de resultados.	77
7. Resultados	78
7.1 Caracterización de la zona	78
7.2 Recopilación de datos.....	84
7.3 Estaciones Meteorológicas	90
7.4 Estaciones Hidrométricas	94
7.5 Piezometría	96
7.6. Series Meteorológicas con cambio climático.....	98
7.8 Modelación Hidrológica Superficial – Modelo Evalhid.....	111
7.8.1 Configuración conceptual del modelo	111
7.8.2 Calibración	115
7.9 Modelación Hidrológica Subterránea – Modelo Aquival	119
7.9.1 Caracterización del acuífero Pastor Ortiz	119
7.9.2 Caracterización del acuífero Zacapu.....	132
7.9.3 Configuración conceptual del modelo	145
7.9.4 Simulación y Calibración	160
7.10 Simulación con cambio climático	171
8. Conclusiones	176
9. Documentos Consultados.....	178
Anexo 1	183

Índice de figuras

Figura 2. 1. Esquema de simulación del ciclo hidrológico	19
Figura 2. 2 Esquema de flujos y almacenamiento del modelo.....	20
Figura 2. 3. Transformación de precipitación en excedente.....	23
Figura 2. 4 Curva de excedentes.....	23
Figura 2. 5 Ecuación que relaciona la infiltración al acuífero con el excedente existente.....	25
Figura 2. 6 Producción de escorrentía subterránea	26
Figura 6. 1. Esquema de Modelación y Simulación de acuíferos considerando del efecto de cambio climático.....	49
Figura 6. 2. Esquema de metodología propuesta para la determinación de anomalía climática.	64
Figura 6. 3. Establecimiento de nuevo proyecto en EvalHid.....	67
Figura 6. 4. Definición de parámetros e información general de subcuencas	68
Figura 6. 5. Ventana principal de simulación en EvalHid.	69
Figura 6. 6. Menú de tipo de discretización y ventana de datos generales de ingreso del modelo por diferencias finitas en AQUIVAL.....	73
Figura 7. 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio	78
Figura 7. 2. Municipios comprendidos dentro de la zona de estudio.....	79
Figura 7. 3. Ubicación de la cuenca del Río Angulo y los Acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz dentro de la Región Hidrológica Lerma Santiago.	80
Figura 7. 4. Ecurrimientos principales y secundarios dentro de la cuenca.....	80
Figura 7. 5. Elevaciones dentro del sistema de cuenca y acuíferos	81
Figura 7. 6. Uso de suelo dentro de la región de cuenca y los acuíferos	81
Figura 7. 7. Tipo de suelo dentro de la región de cuenca y los acuíferos	82
Figura 7. 8. Geología presente en la región estudiada	83
Figura 7. 9. Tipos de clima en la Cuenca del Río Angulo	84
Figura 7. 10. Poblaciones dentro del área de estudio.....	85
Figura 7. 11. Área de influencia del distrito de riego 087	88
Figura 7. 12. Estaciones meteorológicas para la cuenca del Río Angulo	90
Figura 7. 13. Ubicación espacial de las estaciones principales seleccionadas	92
Figura 7. 14. Correlograma de estación 16050 mostrando la independencia temporal de acuerdo a los límites de Anderson	93
Figura 7. 15. Ubicación espacial de las estaciones hidrométricas	94
Figura 7. 16. Correlograma de dependencia de la estación hidrométrica 12713.	95
Figura 7. 17. Red de monitoreo de niveles piezométricos de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz.	96
Figura 7. 18. Niveles piezométricos probables de acuerdo a los aprovechamientos medidos en 2014.	97
Figura 7. 19. Estaciones INECC seleccionadas para el estudio y visualizadas en ArcMap.....	98

Figura 7. 20. Series históricas y proyecciones de temperatura media anual del INECC bajo los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.	99
Figura 7. 21. Series históricas y proyecciones de PTA media del INECC bajo los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.	99
Figura 7. 22. Series de datos climáticos futuros - PTA media para cada escenario de cambio climático para el periodo 2015-2039.	107
Figura 7. 23. Series de datos climáticos futuros - PTA media para cada escenario de cambio climático para el periodo 2075-2099.	107
Figura 7. 24. Series de PTA media histórica y de proyección de cambio climático.	108
Figura 7. 25. Series de datos climáticos futuros - TMA para cada escenario de cambio climático para el periodo 2015 - 2039.	108
Figura 7. 26. Series de datos climáticos futuros – TMA para cada escenario de cambio climático para el periodo 2075 – 2099.	109
Figura 7. 27. Series de datos actuales y futuros - TMA histórica y de cambio climático.	109
Figura 7. 28. Establecimiento de microcuencas dentro del sistema de cuenca del río Angulo.	111
Figura 7. 29. Zonas de calibración de acuerdo a estaciones hidrométricas.	112
Figura 7. 30. Polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas seleccionadas.	113
Figura 7. 31. Configuración final de microcuencas.	114
Figura 7. 32. Esgurrimientos de año medio resultantes (Hm ³) en Z1-12415.	115
Figura 7. 33. Esgurrimientos anuales resultantes (Hm ³) en Z1-12415.	115
Figura 7. 34. Esgurrimientos mensuales resultantes (Hm ³) en Z1-12415.	116
Figura 7. 35. Esgurrimientos de año medio resultantes (Hm ³) en Z2-12014.	116
Figura 7. 36. Esgurrimientos anuales resultantes (Hm ³) en Z2-12014.	116
Figura 7. 37. Esgurrimientos mensuales resultantes (Hm ³) en Z2-12014.	117
Figura 7. 38. Esgurrimientos de año medio resultantes (Hm ³) en Z3-12713.	117
Figura 7. 39. Esgurrimientos anuales resultantes (Hm ³) en Z3-12713.	117
Figura 7. 40. Esgurrimientos mensuales resultantes (Hm ³) en Z3-12713.	118
Figura 7. 41. Temperatura anual promedio en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	120
Figura 7. 42. Precipitación anual en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	121
Figura 7. 43. Evaporación anual en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	121
Figura 7. 44. Geología general del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	123
Figura 7. 45. Unidades hidrogeológicas del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	126
Figura 7. 46. Distribución de transmisividad del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	128
Figura 7. 47. Distribución de la conductividad hidráulica del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).	129
Figura 7. 48. Evolución de los niveles estáticos del acuífero Pastor Ortiz (1992-2007), (CNA-IMTA 2007).	131
Figura 7. 49. Temperatura anual promedio en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007).	133
Figura 7. 50. Precipitación anual en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007).	134
Figura 7. 51. Evaporación anual en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007).	135
Figura 7. 52. Geología general del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).	136
Figura 7. 53. Sección geológica A – A'	137

Figura 7. 54. Sección geológica B – B'	138
Figura 7. 55. Hidrogeología general del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).....	139
Figura 7. 56. Distribución de transmisividad del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).....	141
Figura 7. 57. Variación de la conductividad hidráulica del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).	142
Figura 7. 58. Evolución de los niveles estáticos del acuífero Zacapu (1982-2007), (CNA-IMTA 2007).144	
Figura 7. 59. Rejilla de 4000m por 4000m ajustada a los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz.....	145
Figura 7. 60. Niveles Estáticos Iniciales de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz para el año 2007.	146
Figura 7. 61. Valores de niveles estáticos iniciales por celda de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz para el año 2007.	147
Figura 7. 62. Especificación de tipo de celda y condiciones de contorno del modelo de acuíferos en AQUIVAL.....	148
Figura 7. 63. Transmisividad en los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.	148
Figura 7. 64. Transmisividad por celda de los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.....	149
Figura 7. 65. Asignación de Parámetros Hidrodinámicos en AQUIVAL.....	150
Figura 7. 66. Menú de entrada de acciones elementales del modelo AQUIVAL.....	151
Figura 7. 67. Ubicación espacial de módulos del distrito de riego 087 dentro del mallado.	151
Figura 7. 68. Distribución de la acción elemental que representa las recargas de los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu en el modelo AQUIVAL.....	152
Figura 7. 69. Distribución de la acción elemental que representa los módulos de riego de los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu en el modelo AQUIVAL.....	153
Figura 7. 70. Distribución espacial de los aprovechamientos en operación en el censo piezométrico CNA-IMTA del 2007 en la región que abarcan los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.	154
Figura 7. 71. Distribución de pesos por celda del volumen correspondiente a los aprovechamientos activos del censo piezométrico CNA-IMTA del 2007.	155
Figura 7. 72. Distribución de pesos de la acción elemental correspondiente a los aprovechamientos activos del censo piezométrico CNA-IMTA del 2007 en el modelo AQUIVAL.....	156
Figura 7. 73. Ubicación espacial de los niveles estáticos censados en campo en 2014.	157
Figura 7. 74. Distribución y valor de los niveles estáticos censados en 2014 y seleccionados como parámetro de control.....	158
Figura 7. 75. Especificación de los parámetros de control en el modelo AQUIVAL.....	158
Figura 7. 76. Distribución de los parámetros de control correspondientes a los niveles censados en 2014 en el modelo AQUIVAL.....	159
Figura 7. 77. Resultados de parámetros de control en msnm.	160
Figura 7. 78. Alturas piezométricas simuladas para todas las celdas.	161
Figura 7. 79. Piezometría de primera simulación de prueba sin consideración de niveles estáticos iniciales.....	161
Figura 7. 80. Piezometría simulada considerando NEI y celdas tipo manantial.....	162
Figura 7. 81. Isolneas de conductividad hidráulica en los acuíferos de acurdo al reporte CNA-IMTA 2007.	162
Figura 7. 82. Valores finales de conductividad hidráulica por celda.....	163
Figura 7. 83. Piezometría simulada para los parámetros de control bajo configuración de espesor y conductividad hidráulica.	165

Figura 7. 84. Piezometría de última calibración realizada con mayor correspondencia.	166
Figura 7. 85. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE1	167
Figura 7. 86. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE2	167
Figura 7. 87. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE3	167
Figura 7. 88. Simulación de piezometría periodo 1998-2099	168
Figura 7. 89. Trazo de perfil sobre las celdas de control e indicación de celdas de validación	169
Figura 7. 90. Perfil piezométrico que incluye los niveles de los parámetros de control	169
Figura 7. 91 Evolución piezométrica del PC NE1 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039)	172
Figura 7. 92. Evolución piezométrica del PC NE1 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039)	172
Figura 7. 93. Evolución piezométrica del PC NE2 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039).	173
Figura 7. 94. Evolución piezométrica del PC NE2 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039).	173
Figura 7. 95. Evolución piezométrica del PC NE3 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039).	174
Figura 7. 96. Evolución piezométrica del PC NE3 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039).	174
Figura 7. 97 Comparación de perfiles piezométricos simulado (RCP 8.5) y medido (2014) respecto al nivel del suelo.....	175

Índice de tablas

Tabla 2. 1 Rangos de los parámetros del modelo de Témez.....	28
Tabla 2. 2 Nuevos escenarios RCP. (Moss, et al. 2010)	40
Tabla 2. 3 Modelos de circulación General (MCG) utilizados para el CMIP5	41
Tabla 6. 1 Consumos domésticos per cápita dependiendo del tipo de clima	53
Tabla 6. 2 Temperatura predominante dependiendo del tipo de clima	53
Tabla 6. 3 Rangos de ponderación	54
Tabla 6. 4 Rangos de evaluación de consistencia para la prueba de secuencias	57
Tabla 6. 5 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriassi et al., 2007).	70
Tabla 6. 6 Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.	71
Tabla 6. 7 Valores de acciones elementales consideradas para el año hidrológico 1998-1999.	75
Tabla 7. 1 Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca del Río Angulo	78
Tabla 7. 2 Información de censos de acuerdo al INEGI	86
Tabla 7. 3 Proyecciones de población por municipio	86
Tabla 7. 4 Demandas proyectadas de acuerdo al método estadístico seleccionado.	87
Tabla 7. 5 Volúmenes de extracciones de tipo industrial en los acuíferos de Zacapu y Pastor Ortíz	87
Tabla 7. 6 Áreas dominadas y regables por módulo	88
Tabla 7. 7 Capacidades de las presas de las que depende el distrito de riego.....	89
Tabla 7. 8 Información descriptiva de las estaciones meteorológicas para la Cuenca del Río Angulo..	91
Tabla 7. 9 Selección de estaciones meteorológicas principales para la Cuenca del Río Angulo	91
Tabla 7. 10 Resultados de pruebas de homogeneidad	92
Tabla 7. 11 Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación para la estación meteorológica con clave 16050.....	93
Tabla 7. 12 Resultados de la prueba de Independencia de las estaciones seleccionadas	93
Tabla 7. 13 Comparación de estadísticos antes y después del llenado de la estación 16050	93
Tabla 7. 14 Estaciones hidrométricas seleccionadas de acuerdo a su ubicación en la cuenca.	95
Tabla 7. 15 Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación de las estación hidrométrica 12713.	95
Tabla 7. 16 Comparación de estadísticos básicos de la estación hidrométrica 12713	96
Tabla 7. 17 Coordenadas de las estaciones INECC.....	98
Tabla 7. 18 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para corto plazo	100
Tabla 7. 19 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para largo plazo	100
Tabla 7. 20 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para corto plazo.	101
Tabla 7. 21 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para largo plazo.	101
Tabla 7. 22 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para corto plazo.	101
Tabla 7. 23 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para largo plazo.	101
Tabla 7. 24 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para corto plazo.	102

Tabla 7. 25 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para largo plazo.....	102
Tabla 7. 26 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para corto plazo	102
Tabla 7. 27 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para largo plazo.....	102
Tabla 7. 28 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para corto plazo.	103
Tabla 7. 29 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para largo plazo.....	103
Tabla 7. 30 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	103
Tabla 7. 31 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	104
Tabla 7. 32 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	104
Tabla 7. 33 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	104
Tabla 7. 34 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	104
Tabla 7. 35 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	105
Tabla 7. 36 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas	105
Tabla 7. 37 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas	105
Tabla 7. 38 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	105
Tabla 7. 39 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	106
Tabla 7. 40 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	106
Tabla 7. 41 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.	106
Tabla 7. 42 Parámetros de calibración e indicadores de ajustes resultantes para las zonas de modelación.....	118
Tabla 7. 43 Valores de conductividad hidráulica de acuerdo al tipo de roca (USGS, 2002).....	164
Tabla 7. 44 Coeficiente de almacenamiento para diferentes tipos de terreno y acuíferos (Villanueva e Iglesias, 1984).	165
Tabla 7. 45 Diferencia en los niveles estáticos de control, medidos y simulados.	168
Tabla 7. 46 Diferencia en los niveles estáticos de celdas de validación.....	170
Tabla 7. 47 Resumen de infiltraciones determinadas para los acuíferos bajo los escenarios RCP.	171
Tabla 7. 48 Reducción de la infiltración para cada escenario RCP	171
Tabla 7. 49 Relación de disminución piezométrica para los diferentes escenarios y periodos de proyección.....	175

Resumen

Este trabajo consiste en evaluar efecto de cambio climático sobre los recursos hídricos subterráneos de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz, a través de series de temperatura y precipitación provenientes de escenarios radiativos, con cierta anomalía climática asociada a la región, que al implementarse dentro de un modelo hidrológico superficial para la cuenca del río Angulo y un modelo hidrológico subterráneo para los acuíferos ubicados al centro-norte del estado de Michocán en México, permiten evaluar la evolución piezométrica de estos sistemas para proyecciones a corto y largo plazo, resultando en reducciones de infiltración entre 1.5 y 23% que producen descensos de niveles estáticos entre 20 y 30 metros.

Abstract

This work evaluate climate change effect on groundwater resources of Zacapu and Pastor Ortiz aquifers through temperature and precipitation data from radiative scenarios with climatic anomaly region association, when implemented within a surface hydrological model for Angulo river basin and a groundwater model for the aquifers located at north-central of Michocán state in Mexico, allows to assess the piezometric evolution of these systems for short and long term projections, resulting in infiltration reductions between 1.5 and 23% producing an static level drop between 20 and 30 meters.

Palabras clave: Modelación, Cambio Climático, Hidrología, Acuíferos, Escenarios

1. Introducción

Ante la disminución de los recursos hídricos superficiales en México el aprovechamiento de agua subterránea surge como una medida para poder satisfacer las demandas, estas son variables de acuerdo a la región hidrológica así como la disponibilidad del recurso; diversas son las características que hacen deseable su uso, destacando su abundancia, naturaleza, calidad, y protección contra agresión de agentes contaminantes en función de la profundidad del acuífero.

Es por ello que es necesario gestionar adecuadamente el recurso hídrico garantizando su protección, disponibilidad y calidad ya que determinan las principales actividades económicas y de subsistencia del país. A través de la modelación de la evolución de los niveles piezométricos de los mantos freáticos, partiendo de la caracterización de la zona por medio de estudios y monitoreo, es posible determinar las recargas y descargas presentes en el acuífero, de esta manera administrar adecuadamente el recurso se hace posible. (Sauquillo et al. 2007)

En los últimos años la demanda de agua subterránea ha aumentado principalmente por el incremento de la población en las zonas urbanas, a su vez es mayor la cantidad de actividades antropogénicas que producen un cambio o alteran la protección natural de los acuíferos, por medio de efectos persistentes en el tiempo, como los originados por cambio climático. (Hernández et al. 2012)

El concepto de que el clima del planeta está sujeto a fluctuaciones de cambio naturales desde la era cenozoica, fue introducido por geólogos a en el siglo XIX, pero la noción de que las actividades humanas tienen un impacto sobre el clima global fueron aceptadas hasta finales de 1959 tras ser respaldada por evidencia científica que apuntaba a que la energía producida por las actividades del hombre perturban la evolución natural del clima, siendo las emisiones de gases de efecto invernadero la principal causa del calentamiento global. (Martinez et al. 2004)

La incertidumbre del efecto del cambio climático en las decisiones relacionadas a los recursos hídricos es caracterizado principalmente por los cambios de temperatura y variación de precipitación, influyendo a su vez en el escurrimiento, infiltración, recarga y volumen disponible del recurso hídrico subterráneo. (Pernia et al. 2009)

Aunado a lo anterior se prevé que la demanda hídrica subterránea será aún mayor, por aumento de temperatura y menor disponibilidad de agua superficial, lo cual conlleva a una probable disminución de la disponibilidad del agua subterránea, cambios en la composición físico-química y alteración de los ecosistemas dependientes al mismo. (IPCC 2007)

Resulta entonces fundamental tener en cuenta el efecto del cambio climático dentro del funcionamiento hidráulico de los acuíferos con el fin de evitar la alteración irreversible de los niveles freáticos llegando a generarse efectos de desertificación y en algunos casos de intrusión marina, en el caso de este trabajo la importancia radica en evaluar a través de modelación de qué manera afectan las alteraciones climatológicas a la evolución de acuíferos bajo un gran estrés hídrico, como lo son los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz, que son de vital importancia para la actividad agrícola de la región hidrológica Lerma-Chapala. (CONAGUA 2007)

2. Antecedentes

La práctica de la modelación hidrológica tiene en su haber múltiples trabajos realizados sobre gestión hidrológica bajo una gran variedad de modelos para la determinación del recurso hídrico superficial y/o subterráneo, sin embargo las investigaciones en las que se han incorporado los efectos del cambio climático en la modelación son reducidas, existen trabajos en los que se evalúa la incertidumbre de los efectos del cambio climático analizándolo desde los factores que intervienen en el ciclo hidrológico (Pernia J. 2009), otros a partir de ensambles de proyecciones de modelos de clima global (Jackson C. 2011), escenarios de cambio climático particulares a la zona estudiada (García D. 2012) o de aquellos más desfavorables (Tapia E. 2013).

En el caso de México la mayoría de estos trabajos se limitan a la modelación hídrica superficial otorgando un indicio de lo que podría pasar subterráneamente a partir del reporte de las infiltraciones y otros pocos se complementan con la descripción del cambio de los niveles freáticos como componente representativo del modelo pero sin contemplar el apartado de cambio climático (Almanza J. 2013); considerando además que desde los setenta el número de acuíferos sobreexplotados han aumentado de manera significativa (CONAGUA 2012) concentrándose en las regiones hidrológicas de Baja California, Noroeste, Cuencas Centrales del Norte, Río Bravo y Lerma-Santiago-Pacífico, hace menester conocer de manera apropiada los factores particulares que intervienen en cada sistema con el fin de precisar el modelo más apto a utilizar.

2.1. Modelos Hidrológicos

La modelación matemática tiene como objetivo reproducir fenómenos que forman parte de la realidad a partir de la simplificación de los mismos por medio de expresiones fácilmente asimilables a las leyes físicas de evolución en el tiempo que relacionan las variables y parámetros de los sistemas que resultan difíciles de observar en la realidad

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

A principios del siglo XIX se origina la modelación hidrológica, utilizado principalmente para diseño de obras hidráulicas siendo hasta la década de los 60's donde se enfocan en los mecanismos del ciclo hidrológico y con la llegada de la revolución digital vino también un mayor uso de equipos computacionales donde se desarrollaron modelos basados en métodos numéricos y solución de ecuaciones. (Sahuquillo A. 2010)

2.1.1. Clasificación de Modelos

Estos modelos pueden ser clasificados de acuerdo al tipo de fenómeno u aplicación considerada, encontrando entre ellos los modelos de simulación precipitación-aportación, calidad del agua, sistemas de distribución de agua, funcionamiento hídrico subterráneo, etc.

Al seleccionar el tipo de modelo con el que se trabajará se debe realizar partiendo del resultado que se quiera obtener de él, de los datos con que se cuente a cerca de características geológicas, hidrogeológicas, explotación histórica, herramientas disponibles, etc.

En la modelación se encuentra una distinción de acuerdo a las variables consideradas, dividiéndose en dos grupos:

- ❖ Determinísticos;
- ❖ Estocásticos.

Los determinísticos se caracterizan por determinar las variables a través de leyes físicas buscando explicar la variabilidad con exactitud, son usados principalmente en la simulación de aportaciones relacionadas las características físicas de la cuenca, reflejando los procesos esenciales del ciclo hidrológico en la fase terrestre.

Los modelos estocásticos o de series de tiempo se fundamentan en aprovechar al máximo la información de muestreos y sondeos, facilita la identificación de la incertidumbre de parámetros y variables de los procesos hidrológicos, pero debido a su sencillez la representación que realiza es limitada, utilizándose comúnmente para completado de series de precipitación y aportación así como en la generación de series sintéticas (Estrela T. 1992).

2.1.2 Modelación Superficial.

Abundando en los modelos determinísticos podemos encontrar a los:

- ❖ Agregados;
- ❖ Distribuidos;
- ❖ Cuasidistribuidos.

Los modelos agregados realizan la simulación del ciclo hidrológico de manera completa y continua en la fase terrestre, realizándose balances de la humedad en los procesos dentro del ciclo desde la precipitación hasta el escurrimiento en ríos, considerando el territorio como una sola unidad de cálculo, se pueden distinguir en aquellos que usan elevado número de parámetros de simulación, reproduciendo detalladamente el ciclo hidrológico a un escala horaria o diaria como el SWM-IV (Stanford Watershed Model IV), desarrollado en la Universidad de Stanford en 1966, y

por otro lado se tienen los que usan un número reducido de parámetros y con una reproducción más simple a escala semanal o mensual, entre los más conocidos se tienen el modelo de THORNTHWAITE T (Thornthwaite and Mather, 1955) y de TEMEZ (Témez, 1977).

Por otro lado los modelos distribuidos a través de la resolución de ecuaciones diferenciales de flujo y conservación de masa de los procesos hidrológicos para la simulación del sistema en la cuenca y se caracterizan por precisar un gran número de datos cuya disponibilidad es compleja para la mayoría de los estudios, que llegan a producir incertidumbre en las predicciones ante la ausencia de estos, dentro de los modelos más conocidos se tienen el S.H.E (Abbott et al, 1987).

En los modelos cuasi distribuidos se emplea para cada subdivisión de la cuenca un modelo agregado en lugar de la resolución de ecuaciones diferenciales de los procesos del ciclo hidrológico, destacando entre ellos el modelo SIMPA (Simulación Precipitación-Aportación), (Ruiz, 1998) que se basa en el modelo TEMEZ.

2.1.3. Modelación Subterránea

Los modelos determinísticos de igual manera se han utilizado para simular el flujo subterráneo que suele ser complejo y de carácter distribuido, estos pueden ser clasificados en:

- ❖ Agregados;
- ❖ Distribuidos de parámetros agregados;
- ❖ Distribuidos de parámetros distribuidos.

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

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

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

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

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

2.1.4. Modelos y Software de modelación seleccionados

Siendo la simulación hidrológica superficial y subterránea los puntos importantes del trabajo se describen a continuación los modelos a utilizar.

2.1.4.1. Módulo EVALHID

El programa EVALuación de los recursos HÍDricos (EVALHID) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión

AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos. (Paredes et al, 2011)

El módulo consta de varios tipos de modelos que deben seleccionarse en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y experiencia del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida, en los que la cuenca a ser modelada se subdivide en subcuencas y en cada una de ellas se plantea uno de los modelos disponibles en el programa, para ello es necesario contar con datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca.

Dentro de algunos de los modelos con los que cuenta el módulo se encuentran:

El modelo HBV (Bergström, 1995), de gran tradición en países nórdicos, permite la modelación hidrológica y de nieve (correspondiente al modelo Nieve 1) con un número no muy elevado de parámetros por lo que es bastante versátil en muchas ocasiones.

El modelo Sacramento, (Burnash et al., 1973) también conocido como “SAC-SMA” permite modelar en gran detalle los procesos hidrológicos debido al alto número de parámetros que maneja, hasta 16, llegando a producir mayor detalle cuando se tiene gran disponibilidad de datos.

Finalmente el modelo de Témez (Témez, 1977) es un modelo de pocos parámetros con una larga trayectoria de aplicación en España para la evaluación de recursos hídricos. Existe suficiente experiencia en su aplicación como para que tenga interés su consideración. Su bajo número de parámetros lo hace especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos.

2.1.4.2. Modelo TÉMEZ

Pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estrela, 1992). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. El proceso se rige por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

La valoración global que realiza el modelo, por no considerar la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, ya que estos son sustituidos por un valor medio, limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Si se desea realizar su aplicación en cuencas de mayor tamaño se debe realizar una subdivisión en cuencas más pequeñas, funcionando entonces el modelo como uno semi-agregado.

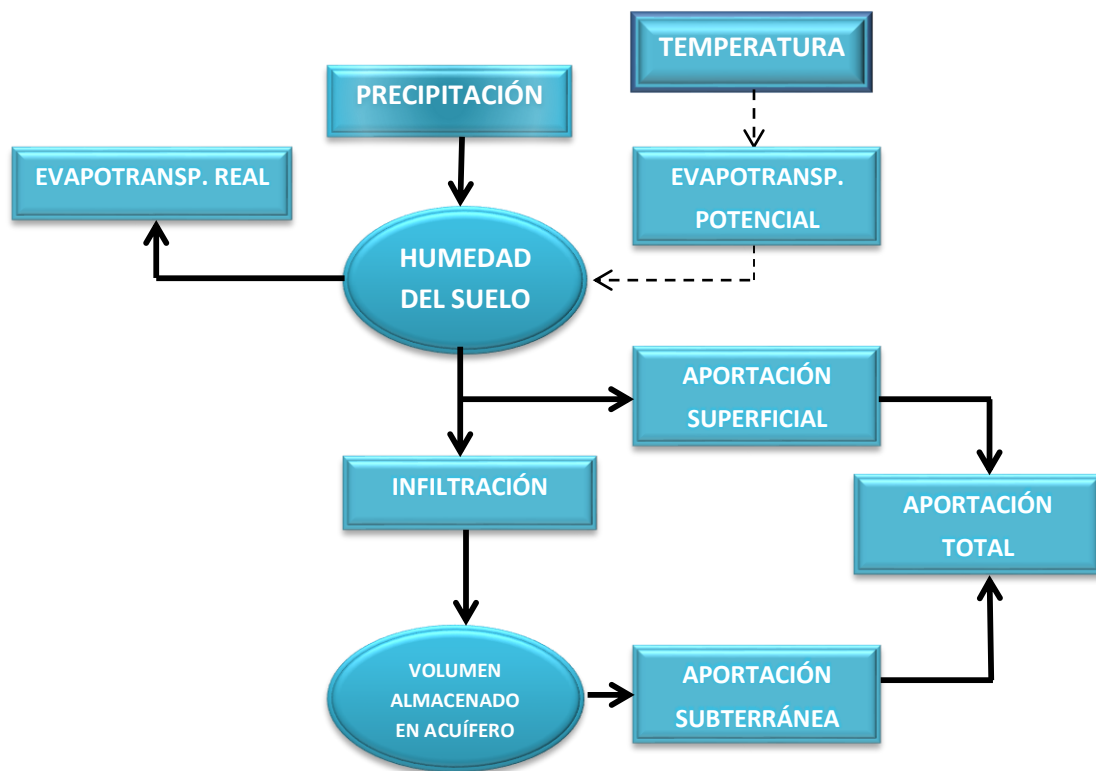


Figura 2. 1. Esquema de simulación del ciclo hidrológico

El intervalo temporal más empleado es el mensual, pero puede aplicarse a cualquier intervalo de tiempo (horario, diario, mensual, anual) por el desarrollo teórico de índole general del modelo, debiéndose verificar que los períodos temporales empleados proporcionen una respuesta coherente con la realidad física del sistema.

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- ❖ Una zona superior. Condición no saturada, en cuyos poros coexisten agua y aire, y su contenido de agua es asimilable a la humedad del suelo.
- ❖ Una zona inferior o acuífero. Condición saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El modelo realiza el balance de humedad constituido por una precipitación (P_i) que representa el flujo entrante que se reparte entre una serie de flujos salientes, de flujos intermedios y de almacenamientos intermedios. Los distintos componentes de flujos y almacenamientos se ilustran en la siguiente figura.

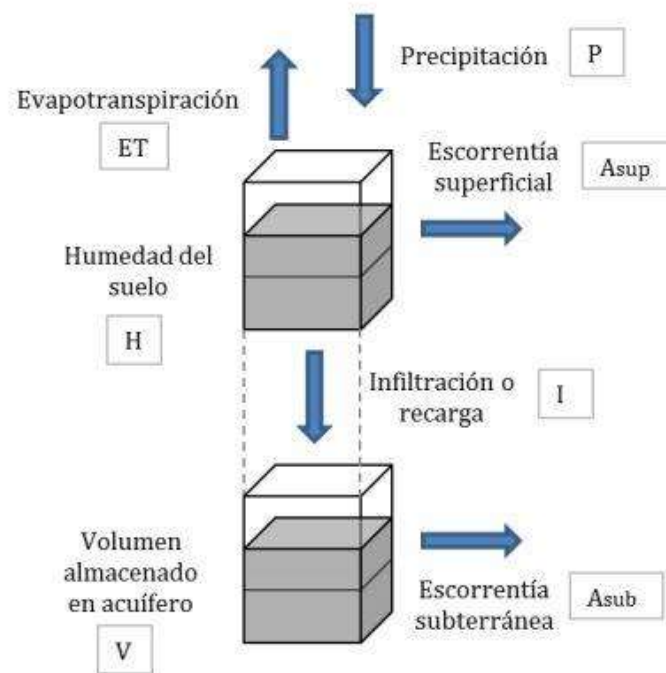


Figura 2. 2 Esquema de flujos y almacenamiento del modelo

- ❖ Flujos de entrada: la precipitación (P).
- ❖ Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (A_{sup}) y la aportación de origen subterráneo (A_{sub}).
- ❖ Flujos intermedios: únicamente la infiltración (I), agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes " t " (R_t).
- ❖ Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo (H_t), y el volumen almacenado en el acuífero (V_t).

En el modelo de Témez, el agua que procede de la precipitación (P) se distribuye de tres formas diferentes:

- ❖ El excedente (T), que a su vez se descompone en un flujo de infiltración al acuífero desde la zona superior del suelo (I_t), y en un flujo que discurre superficialmente (A_{sup}), este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del período presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (A_{subt}) y la otra parte permanece dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.
- ❖ La evapotranspiración real (E_t) de una parte o de toda la humedad almacenada en la zona superior del suelo (H_t).
- ❖ La humedad del suelo (H_t) que se almacena en la zona superior del suelo, cuyo límite es la capacidad máxima de almacenamiento hídrico del (H_{maxt}).

A continuación se desarrollan las ecuaciones de estado del modelo, ecuaciones que regulan los procesos de transferencia hídrica, y del resto del ciclo hidrológico.

Para el cálculo del excedente se considera que una fracción del agua que precipita sobre el terreno (P_t) es almacenada en la zona superior del suelo (H_t), y que el resto, el excedente (T_t), se distribuye entre la aportación de origen superficial (A_{supt}) y la infiltración hacia el acuífero (I_t) o recarga (R_t).

El excedente total (T_t) se calcula según la siguiente ley:

$$T_t = 0 \quad \text{si } P_t \leq P_0 \quad \text{Ecuación 1}$$

$$T_t = \frac{(P_t - P_0)^2}{P_t - \delta_t - 2P_0} \quad \text{si } P_t > P_0 \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + EPT_t \quad \text{Ecuación 3}$$

$$P_0 = C(H_{max} - H_{t-1}) \quad \text{Ecuación 4}$$

Siendo:

- ❖ Hmax la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de la textura, pendiente del terreno y espesor de la franja de suelo donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de Hmax aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención superficial de agua (poca pendiente, presencia de vegetación, cultivos en surcos o bancales) .
- ❖ Ht-1 el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante t-1.
- ❖ EPTt la evapotranspiración potencial (mm) en el intervalo de tiempo t. Es la máxima evapotranspiración que se produciría en condiciones óptimas de humedad.
- ❖ C el coeficiente de inicio de excedente. Un factor adimensional, que toma valores en torno a 0.30 (Témez, 1977) y permite obtener el valor umbral de precipitación P0 a partir del déficit de humedad del suelo (Hmax-Ht-1).

De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a P0t, toda el agua de lluvia se almacena como humedad del suelo, que puede transformarse en evapotranspiración, y el excedente total es nulo. El umbral P0t aumenta a medida que la humedad antecedente es menor, lo que significa que mayor será la capacidad del suelo para retener agua y no producir excedente. A partir del valor de P0t, el excedente y la componente de humedad del suelo se incrementan simultáneamente debido a la precipitación.

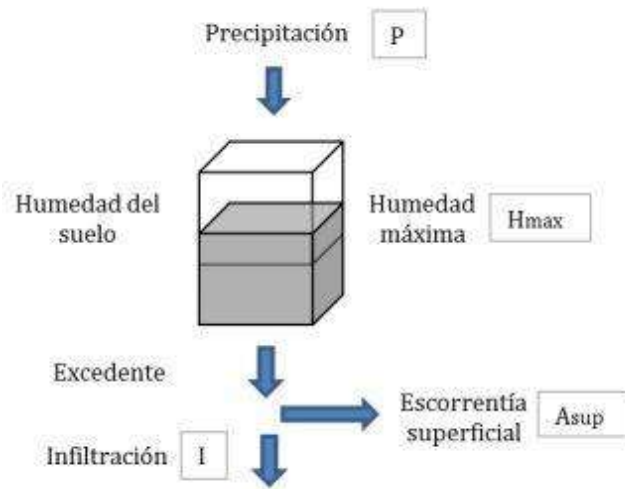


Figura 2. 3. Transformación de precipitación en excedente

La curva que expresa los excedentes no es lineal para lluvias bajas y tiende hacia una línea recta para lluvias elevadas. El valor δt se mantiene prácticamente constante para cualquier lluvia a partir de un cierto valor de la precipitación, y la diferencia entre la precipitación y el excedente es la evapotranspiración potencial en ese mes (ETPt), pues el suelo tendrá saturación de humedad.

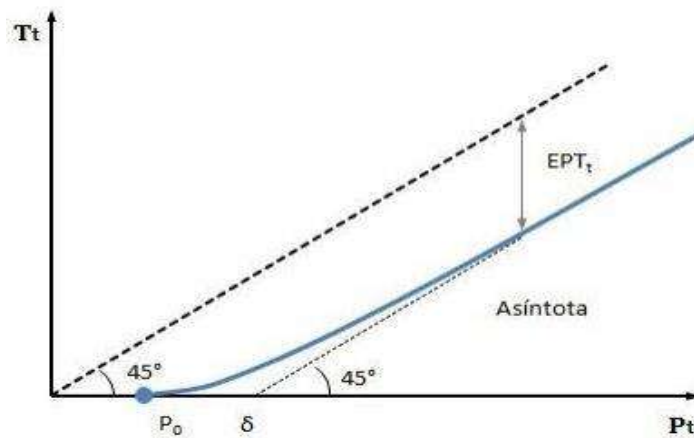


Figura 2. 4 Curva de excedentes

Cálculo del almacenamiento superficial e infiltración

Una vez estimado el excedente (T_t), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene con la ecuación 5:

$$H_t = \max \left\{ \begin{array}{l} 0 \\ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 5}$$

En la que se expresa que a la humedad existente en el suelo en el mes “t-1” se le añade el flujo entrante (la diferencia entre la precipitación P_t durante ese mes y el excedente T_t), y se le resta la evapotranspiración potencial en el mes “t”, ETP_t . Si el balance que se establece resulta negativo, entonces la humedad del suelo al final del periodo es nula, y la evapotranspiración potencial no se habrá concretado.

La evapotranspiración real que se produce (ET_t) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$ET_t = \min \left\{ \begin{array}{l} H_{t-1} + P_t - T_t \\ ETP_t \end{array} \right. \quad \text{Ecuación 6}$$

Siempre que exista suficiente agua en el suelo, la evapotranspiración se desarrolla hasta alcanzar la evapotranspiración potencial. Cuando esto no es así, la humedad en el suelo al final de mes será nula. Evapotranspirándose toda el agua disponible en la zona superior del suelo, teniendo como límite de la evapotranspiración potencial.

La infiltración producida en el mes t corresponde con la fracción de agua que penetra en el suelo y acaba recargando el acuífero, formando parte del excedente que no discurre superficialmente.

La infiltración al acuífero es función del excedente y del parámetro denominado infiltración máxima (I_{max_t}), este expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, descrita por la siguiente expresión:

$$I_t = I_{max_t} \cdot \frac{T_t}{T_t + I_{max_t}} \quad \text{Ecuación 7}$$

Mediante la ecuación 7 se deduce que a medida que el excedente aumenta también lo hace la infiltración y que ésta tiende asintóticamente a su valor máximo. La infiltración máxima (I_{max}) depende de las propiedades del terreno, así como de la intensidad y concentración de las precipitaciones. Tomando valores comprendidos entre 100 mm/mes y 400 mm/mes dependiendo del tipo de lluvia: esporádica o persistente (Témez, 1977).

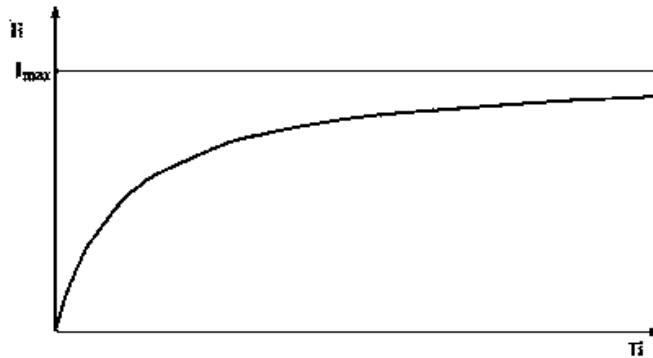


Figura 2. 5 Ecuación que relaciona la infiltración al acuífero con el excedente existente

Cálculo de la aportación superficial

Aquella parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial al final del mes “t”, descrita según la siguiente ecuación:

$$A_{sup_t} = T_t - I_t \quad \text{Ecuación 8}$$

Cálculo de la aportación subterránea

La aportación subterránea producida durante el mes “t” (A_{subt}) está formada por el drenaje del agua almacenada en el acuífero (V_t) por encima del umbral de salida a la red fluvial.

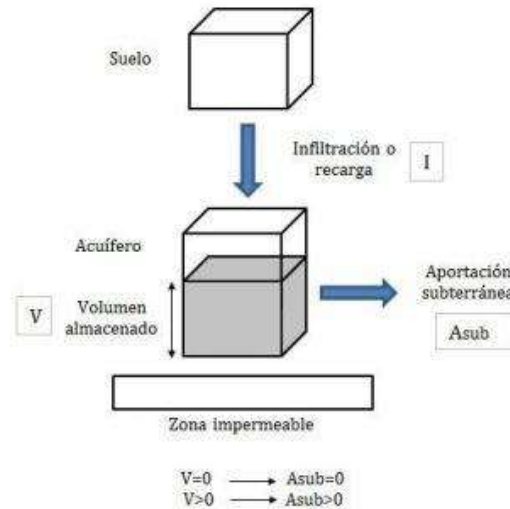


Figura 2. 6 Producción de escorrentía subterránea

El modelo unicelular es el implementado para la simulación del comportamiento del acuífero, el cual está basado en la hipótesis de proporcionalidad entre el volumen almacenado en el acuífero (V_t) y el caudal cedido a la red superficial (Q_t).

La expresión que relaciona el caudal y el volumen es la siguiente:

$$Q_t = \alpha \cdot V_t \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde:

- α es una constante con dimensiones de $[T^{-1}]$

Si se aplica al acuífero una ecuación de balance de masa representando por la ecuación diferencial ordinaria siguiente:

$$I_t - Q_t = \frac{dv_t}{dt} \quad \text{Ecuación 10}$$

Donde:

- $I(t)$ son las entradas al acuífero en el tiempo t (recargas);
- $Q(t)$ son las salidas del acuífero en el tiempo t (extracciones) ;
- $V(t)$ es el volumen almacenado en el acuífero en el tiempo t .

Sustituyendo la ecuación 9 en la 10 y considerando $R(t)$ como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo t se tiene:

$$R_t - \alpha \cdot V_t = \frac{dV_t}{dt} \quad \text{Ecuación 11}$$

La resolución de esta ecuación diferencial conduce, para la condición inicial de volumen inicial de acuífero, V_0 y para un caudal de recarga constante R , a:

$$V_t = V_0 e^{-\alpha \cdot t} + \frac{R}{\alpha} (1 - e^{-\alpha t}) \quad \text{Ecuación 12}$$

Expresando el volumen como una función del caudal y haciendo $R=0$ se obtiene una expresión que representa la curva de agotamiento del acuífero:

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t} \quad \text{Ecuación 13}$$

La recarga, R se puede expresar como $R = S \cdot I_t$ (siendo S la superficie de la cuenca), ya que está constituida por la cantidad de agua infiltrada al acuífero. De esta forma, la ecuación que determina el volumen en el acuífero en el mes t sería la siguiente:

$$V_t = V_{t-1} e^{-\alpha \cdot \Delta t} + \frac{S \cdot I_t}{\alpha} (1 - e^{-\alpha \Delta t}) \quad \text{Ecuación 14}$$

Este modelo subterráneo presenta la ventaja de la simplicidad de cálculo, pero la desventaja de que supone una simplificación excesiva del sistema. Su uso no es válido para modelación de acuíferos cársticos, donde se han identificado más de una rama de descarga en el agotamiento del acuífero.

Por tanto, el modelo de Témez contempla el ajuste de cuatro parámetros:

- Hmax y C. que regulan el almacenamiento de agua en el suelo.
- lmax. separa la escorrentía superficial de la subterránea
- α . regula el drenaje subterráneo.

En el modelo resulta importante la definición de las condiciones iniciales de simulación, es decir, la determinación de la humedad inicial del suelo (H_0) y del almacenamiento inicial en el acuífero ($V_0 = Q_0 / \alpha$). La siguiente tabla muestra un resumen de los parámetros del modelo y los rangos entre los que éstos pueden oscilar. (Paredes J. 2011).

Tabla 2. 1 Rangos de los parámetros del modelo de Témez.

	Hmax	C	lmax	α
Min	50	0.2	10	0.001
Max	250	1	150	0.008

2.1.4.3. Modelo AQUIVAL

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

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

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

$$[T] \cdot H + Q = [SF] \frac{\Delta H}{\Delta t} \quad \text{Ecuación 15}$$

Donde:

- $T(n,n)$: matriz simétrica en banda, que depende de la discretización hecha del acuífero y de la transmisividad de las celdas en las dos direcciones perpendiculares ($m^2 / \text{día}$).
- $H(n)$: vector de alturas piezométricas. (m).
- $Q(n)$: vector de flujos exteriores. ($m^3/\text{día}$).
- $SF(n,n)$: matriz diagonal que depende de la discretización hecha del acuífero, de las condiciones de contorno y del coeficiente de almacenamiento de cada celda. (m^2).

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

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

$$H_k = U + A \cdot E \cdot A^T \cdot SF(H_{k-1} - U) + A \cdot |I - E| \cdot |\alpha|^{-1} \cdot A^T \cdot Q \quad \text{Ecuación 16}$$

Donde:

- H_k número del período de tiempo a evaluar. Cada período tiene una longitud Δt (por lo general 1 mes).
- $U(n)$ vector de alturas piezométricas para régimen estacionario y $Q = 0$. [m].
- n es la cantidad de celdas en que se discretizo el acuífero.
- $A(n, n)$ es la matriz de autovectores del problema $T \cdot A = SF \cdot A \cdot |\alpha|$. Cada autovector ocupa una columna. [m^{-1}].
- $|\alpha|$ es el vector de autovalores del problema $T \cdot A = SF \cdot A \cdot |\alpha|$. Todos los elementos son positivos. [día^{-1}].
- $A^T(n, n)$ es la traspuesta de la matriz A . [m^{-1}].
- $E(n, n)$ es una matriz diagonal, donde cada elemento de la diagonal vale:

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

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

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

- si $U = 0$ es conveniente aplicar el Método de la L. Esta caso se produce cuando todas las celdas de altura constante son de $h=0$ y no hay flujos impuestos en

los bordes, eliminándose el primer término de la para H_K , si se define un vector L , tal que: $H_K = A \cdot L_K$.

La ecuación se reduce a:

$$L_K = E \cdot L_{K-1} + X \cdot Q_K \quad \text{Ecuación 17}$$

$$y L_0 = A^T \cdot SF \cdot H_0 \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde:

- $L(n)$ es un vector auxiliar (m2). Este vector es denominado vector de estado
 - $X (n,n)$, es igual a: $X = |I - E| \cdot |\alpha|^{-1} \cdot A^T \cdot (\text{dia/m})$
-
- Si $U \neq 0$ hay que usar el Método de la U, en el que hay que calcular además el vector U (de estado estacionario), resolviendo el sistema de ecuaciones lineales que queda planteado al aplicar el balance de masa en cada nudo y la ecuación de flujo de Darcy. Un vez realizado esto es necesario utilizar la ecuación de H_K para el cálculo de las alturas donde la notación puede simplificarse ya que algunos productos de matrices no se modifican posteriormente teniendo entonces:

$$H_K = U + MzFija1 \cdot (H_{K-1} - U) + MzFija2 \cdot Q \quad \text{Ecuación 19}$$

Donde:

- $Mzfija(n, n)$, es igual a: $MzFija1 = A \cdot E \cdot A^T \cdot SF$ [adimensional]
- $MzFija2(n, n)$, es igual a: $MzFija2 = A \cdot |I - E| \cdot |\alpha|^{-1} \cdot A^T \cdot [\text{dia/m}^2]$

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

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

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

$$PC_k = A_R \cdot L_k \quad \text{Ecuación 20}$$

Donde:

- PC (npc) es el vector de parámetros de control del acuífero [m].
- A_R (npc, n) es la matriz A reducida. Si los parámetros de control son alturas piezométricas A_R contiene las filas de A de las celdas cuya altura es parámetro de control. [m^{-1}]. Si los parámetros de control son todas las alturas piezométricas, $A_R = A$.

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

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

$$L_k = E \cdot L_{k-1} + X \cdot Q_{AE} \cdot I_k \quad \text{Ecuación 21}$$

$$L_k = E * L_{k-1} + \psi \cdot I_k \quad \text{Ecuación 22}$$

Donde:

- $Q_{AE}(n, nae)$ matriz de acciones elementales en la que cada columna es una acción elemental, y por ende los elementos de cada columna deben sumar 1 [adimensional].
- $\psi(n, nae)$ es igual a: $\psi = X * Q_{AE}$ [dia/m].
- $I(nae)$ es el vector de intensidades de las acciones elementales [m³/día].

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

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

Obtener las matrices T y SF del MAV.

$$SF(ii) = \text{almacenamiento}_i \cdot \Delta x \cdot \Delta y \quad \text{Ecuación 23}$$

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

$$t_{ii} = \sum_{j=1}^n \frac{1}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}} \quad \text{Ecuación 24}$$

$$t_{ij} = -\frac{1}{\frac{1}{T_i} + \frac{1}{T_j}} \quad \text{Ecuación 25}$$

Después se construye la matriz C (simétrica):

$$c_{ij} = sf_{ii} \cdot t_{ij} \cdot sf_{jj} \quad \text{Ecuación 26}$$

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

$$T \cdot A = \alpha \cdot SF \cdot A \quad \text{Ecuación 27}$$

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

$$q_{1-2} = T_{1-2} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \cdot \Delta h \quad \text{Ecuación 28}$$

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

El método requiere de la calibración de datos hidrodinámicos necesarios, realizables previamente mediante modelos matemáticos en diferencias finitas o elementos finitos, ya que el modelo de autovalores no es, en principio, eficaz en el proceso de calibración.

La interfaz gráfica de usuario permite visualizar y editar las características gráficas de la discretización sobre una imagen gráfica en la pantalla y permite, además, la inclusión de elementos gráficos ajenos a la modelación que facilitan la interpretación del esquema. Además se incluye la posibilidad de obtener informes, ampliaciones de la pantalla, definición de bombeos y parámetros de control, etc.

Una vez introducidos estos datos en la interfaz gráfica, las rutinas que forman parte de este modelo permiten obtener los autovalores y autovectores que caracterizan el acuífero así como las matrices que serán utilizadas para la simulación de la gestión del acuífero, para ello hay que definir las intensidades de las acciones elementales, a lo largo del periodo de simulación que se desee.

Los resultados de la simulación se pueden visualizar mediante gráficos o tablas. Y además se guardan en un archivo con formato definido para que se puedan utilizar en la realización de informes (Sahuquillo A. et al. 2010).

2.2. Cambio Climático

El clima es un estado cambiante de la atmósfera que depende de las interacciones mar-continente en diversas escalas de tiempo y espacio, cuando estos cambios llegan a presentar inestabilidades atmosféricas, determinadas por parámetros meteorológicos, se habla entonces de anomalías climáticas generadas por forzamientos externos que pueden producirse de manera natural o por influencias antropogénicas, ejemplo de esto es la mayor incidencia de radiación solar debido al aumento en la concentración de Gases de Efecto Invernadero (GEI) por actividades humanas.

De acuerdo al Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) en su Cuarto Informe de Evaluación (IPCC 2007), el futuro del planeta está en riesgo por el cambio climático, donde los efectos más percibidos son los causados por el calentamiento global, por ello se buscan medidas con el fin de mitigar y producir estrategias de adaptabilidad ante los mismos, es por tanto necesario determinar qué tan graves serán los efectos del cambio del clima a escala global.

2.2.1. Modelos de Circulación General y escenarios de emisión.

Con el fin de estimar la magnitud, ubicación y plazo de los impactos potenciales que puede producir el cambio climático se recurre a la modelación a partir de algoritmos matemáticos con los cuales se representan cuantitativamente el comportamiento y respuesta del clima a determinados forzantes al tiempo que se describe las relaciones de los componentes del sistema climático. Los modelos que acoplan la simulación atmósfera-océano y suelo, realizando además predicciones en una escala temporal mayor, son conocidos como Modelos de Circulación General (GCM's, por sus siglas en inglés).

Los GCMs permiten crear escenarios de la condición climática más probable y el IPCC es quien ha desarrollado escenarios que han servido de base para los modelos de circulación mundial, los cuales son los escenarios de emisiones IS92 (1992) y los escenarios del IE-EE/SRES, estos últimos se describen a partir de cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 B2) que exploran vías de desarrollo alternativas incorporando toda una serie de fuerzas causantes demográficas, sociales, económicas, tecnológicas y medioambientales, junto con las emisiones de GEI resultantes (IPCC, 2007).

Como un punto fundamental es obtener un cuadro más detallado de la gama de estados futuros posibles del clima que sea consistente con el conocimiento que se tiene del sistema, es deseable trabajar con diversos GCMs a través de experimentos numéricos que partan de condiciones iniciales ligeramente diferentes entre sí, llegando a lo que se conoce como ensamble multimodelo que permita conocer el rango más probable de condiciones futuras.

Estos ensambles producidos de GCM's es necesario transformarlos a otros de mayor resolución espacial que reflejen las características y tendencias del clima regional, pues resulta muy importante generar escenarios regionales para analizar con mayor detalle los impactos potenciales del cambio climático ya que la resolución espacial típica de los GCMs (300 km X 300 km) no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo).

En regiones de topografía marcada resulta importante analizar fenómenos de mesoescala que tienen un fuerte impacto en parámetros meteorológicos y en cantidades derivadas, como es la disponibilidad de agua o los rendimientos agrícolas, por ello se vuelve necesaria en la reducción de escala espacial de salidas de GCMs incorporar elementos que resultan en circulaciones de clima local en las proyecciones de cambios atmosféricos, adicionando un valor agregado a las salidas directas del GCM y que dependerá del entendimiento de los procesos que generan el clima local o regional y de la disponibilidad de datos para representarlo (Magaña V. 2010).

2.2.1.1. Reducción de Escala de GCM's

Los escenarios de cambio climático regional, se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (*downscaling*) dinámicas o estadísticas.

En las técnicas dinámica para la reducción de escala se utilizan los Modelos de Clima Regional (RCM), similares a los modelos de clima global pero de mayor resolución espacial y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos como la topografía o el uso de suelo dentro del dominio de interés. Los desarrollos dinámicos existentes para escenarios regionales más actualizados son del tipo del proyecto PRUDENCE en Europa, o NARCCAP para Norte América, utilizados para analizar simulaciones de cambio climático alta resolución espacial, con especial énfasis en los procesos y escenarios en el sentido probabilístico.

En las técnicas estadísticas las variables del clima regional o local (*predictandos*) se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general (*predictores*). Dentro de las herramientas más populares para la reducción de escala por técnicas estadísticas se encuentran el SDSM pues su esquema de reducción de escala se basa en la regresión lineal múltiple a un punto, ocupando campos precipitación, temperatura, radiación, globales del GCM y locales observados.

El Climate Predictability Tool (CPT) es otra herramienta de regionalización de salidas de GCMs de tipo estadística que permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR) y análisis de correlación canónica (CCA), contando además con aplicación de otras técnicas estadísticas como estandarización de campos de los GCM, muestreo de los datos, re-calibración de ecuaciones, normalización de campos, etc. (Magaña V. 2007)

Entonces para producir los escenarios futuros regionales más probables es necesario tener una muestra suficientemente grande de experimentos, pues es un elemento fundamental en la construcción probabilista de los escenarios del clima futuro, esencial para la gestión de riesgo, y los escenarios regionales construidos con CPT son comparables a algunos de los escenarios producidos usando modelos dinámicos de mesoescala, logrando capturar el efecto de circulaciones regionales que producen en estas escalas espaciales.

2.2.2. Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5)

Como parte del desarrollo y actualización de los escenarios de cambio climático regionales en México se llevó a cabo el proyecto CMIP5 (por sus siglas en inglés) con la participación de centros internacionales como el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

Estas instituciones llevaron a cabo el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”, un análisis regional del periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México mediante un conjunto de experimentos numéricos

para estudiar la predictibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos globales, siendo los resultados proyecciones climáticas bajo los diferentes escenarios de radiación (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5), utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de cambio Climático(IPCC).

La estrategia de CMIP5 incluye dos tipos de experimentos de modelación del clima: 1) integraciones de larga duración (escala de tiempo de siglos) y; 2) integraciones a corto plazo (10-30 años, experimentos decenales)

En ambos experimentos se utilizan modelos climáticos (AOGCM, por sus siglas en inglés). Para las simulaciones de largo plazo algunos de los modelos son acoplados con componentes biogeoquímicas que toman en cuenta los flujos de carbón entre la atmosfera, océano y las reservas de carbón en la biosfera terrestre, “cerrando” de este modo el ciclo de carbono en el modelo. Estos modelos son llamados modelos del Sistema Tierra (ESMs, por sus siglas en inglés), (Taylor, *et al.*2012).

Fueron utilizadas las integraciones de larga duración para dos periodos de tiempo: Futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). Considerando un escenario base (1961-2000) y seleccionando los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 para las proyecciones futuras.

El CMIP5 cuenta con una amplia gama de experimentos, los cuales se pueden agrupar en tres categorías para el caso de las integraciones de larga duración:

- 1) Evaluación de los modelos (para analizar su estabilidad, y considerar diferentes tipos de forzantes y periodos de tiempo).
- 2) proyecciones climáticas (donde se encuentran los nuevos escenarios RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, y algunos modelos con simulaciones hasta el 2300) y
- 3) entendimiento de los modelos (en la cual se hicieron diferentes tipos de simulaciones con diversos forzantes y periodos de tiempo).

El CMIP5 incorpora los cambios aplicados a los escenarios de emisiones SRES (B1-bajas emisiones, A2-altas emisiones), etc. La abreviación RCP de los nuevos escenarios significa: Trayectorias de Concentraciones Representativas (RCP, por siglas en inglés). Estos escenarios se dividen en cuatro grupos: RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, que se refieren a la radiación global de energía expresada en W/m^2 ; por ejemplo, RCP8.5 es el escenario más extremo que supone un valor de $8.5 W/m^2$ debido al aumento de gases de efecto de invernadero.

Tabla 2. 2 Nuevos escenarios RCP. (Moss, et al. 2010)

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	$>8.5 Wm^{-2}$ en 2100	$>1,370 CO_2$	Aumentando	MESSAGE (Austria)
RCP 6.0	$6 Wm^{-2}$ estable después de 2100	$850 CO_2$ estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM (Japón)
RCP 4.5	$4.5 Wm^{-2}$ estable después de 2100	$650 CO_2$ estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM (EU)
RCP 2.6	Pico en $3Wm^{-2}$ antes del 2100 y disminuye después	Pico en $490 CO_2$ antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países bajos)

Referencia. Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban y M. E. Bravo, 2013: ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN NACIONAL . Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

Los Modelos de Circulación General Acoplados son programas de cómputo que reproducen la dinámica atmosférica en diferentes escalas incluyendo los efectos del océano y los continentes. Con estas herramientas se realizan simulaciones bajo diferentes condiciones radiativas, incluidas las de cambio climático mediante

escenarios, como RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5, con las cuales se generan proyecciones a futuro.

Se utilizaron simulaciones de 15 MCG del CMIP5 Los cuales se recortaron a una malla de 0 a 40°N, y de 140W a 60W y se interpolaron en los puntos de malla de las observaciones (CRU), de 0.5° * 0.5°. Las variables en superficie utilizadas son Precipitación, Temperatura Máxima, Mínima y Promedio.

Tabla 2. 3 Modelos de circulación General (MCG) utilizados para el CMIP5

Modelos de Circulación General (MCG)		
1.-Max Plank Institute (MPI-ESM-LR)	6.-Beijing Climate Center (BCC-CSM1-1)	12.-Met Office Hadley (MOHC)
2.-Institute for Numerical Mathematics (INM)	7.-Institut Pierre-Simon Laplace (IPSL-cm5a-Ir)	13.-Meteorological Research Institute (MRI-CGCM3)
3.-Norwegian Climate Center (NorESM1)	8.-NASA Goddard Institute for Space Studies (GISS-E2-R)	14.-Geophysical Fluid Dynamics Laboratory (GFDL-CM3)
4.-Canadian Centre for Climate Modeling and Analysis (CanESM2)	9 y 10.-Japan Agency for Marine-Earth Science and Technology (MIROC.-esm-chem y MIROC-esm)	15.-Australian Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO-MK3-6)
5.-Centre National de Recherches Meteorologiques (CNRM-CM5)	11.-Atmosphere and Ocean Research Institute (MIROC5)	

Referencia. Cavazos, T., J. A. Salinas, B. Martínez, G. Colorado, P. de Grau, R. Prieto González, A. C. Conde Álvarez, A. Quintanar Isaías, J. S. Santana Sepúlveda, R. Romero Centeno, M. E. Maya Magaña, J. G. Rosario de La Cruz, Ma. del R. Ayala Enríquez, H. Carrillo Tlazazanatza, O. Santiesteban y M. E. Bravo, 2013: ACTUALIZACIÓN DE ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO PARA MÉXICO COMO PARTE DE LOS PRODUCTOS DE LA QUINTA COMUNICACIÓN NACIONAL . Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

La base de datos generada por la unidad de Investigación Climática (CRU por sus siglas en inglés), que es parte de la Escuela de Ciencias Ambientales en la Universidad del Anglia Oriental, Inglaterra (UEA, por sus siglas en inglés), es ampliamente reconocida como una de las instituciones líder dedicadas al estudio del cambio climático natural y antropogénico, cuyo principal objetivo es mejorar el entendimiento científico en tres áreas considerando tanto la historia del clima pasado y su impacto en la humanidad, el curso y las causas del cambio climático durante este siglo y los cambios esperados en el futuro.

Los datos de CRU utilizados tienen una resolución temporal mensual para el periodo de 1901-2009 y resolución espacial de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ para todo el mundo. Para este estudio se recortó a la región 0° a 40°N , y de 140°W a 60°W , para las variables temperatura media, mínima, máxima, precipitación. Esta base de datos se generó a partir de estaciones meteorológicas distribuidas en todo el mundo, más de 8000 para la temperatura y de 6000 para precipitación. Por ello CRU tiene datos solo sobre continente. Las fuentes potenciales de no homogeneidades en las estaciones climáticas y métodos de corrección fueron utilizando el método de Global Historical Climatology Network-Monthly (GHCN) de Peterson et al. (1998a).

El método de Fiabilidad del ensamble ponderado (REA) fue propuesto y desarrollado por Giorgi y Mearns (2001) con el objetivo de dar mayor peso a los MCG que contengan los errores y sesgos más pequeños en comparación con las variables observadas en un punto de malla dado.

El ensamble ponderado REA se calculó para las proyecciones de cambio y las simulaciones históricas de los 15 MCG empleados, por puntos de malla, mediante la ecuación siguiente:

$$\overline{\Delta T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad \text{Ecuación 29}$$

Donde R_i es el peso de cada modelo (i) por punto de malla, definido por el producto de dos criterios: el de tendencia ($R_{B,i}$) y el de convergencia ($R_{D,i}$), donde los parámetros m y n pueden ser usados para darle más peso a un criterio que a otro:

$$R_i = \left[(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{1/(m+n)} \quad \text{Ecuación 30}$$

El criterio de tendencia se refiere a qué tan diferente es el modelo “i” respecto a los datos observados, en el periodo 1961-2000. Por lo tanto entre menor sea la diferencia de las dos bases de datos, mayor es la confiabilidad de tal modelo. Para lo cual se requiere tener datos históricos de los modelos a utilizar. Este factor se da por la ecuación:

$$R_{B,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|B_i|} \right]^m \quad \text{Ecuación 31}$$

El criterio de convergencia es la distancia del modelo “i” respecto al resto de los modelos, es decir, del promedio REA. Este criterio es un método iterativo, en el que, en la primera iteración se toma en cuenta el promedio simple para calcular la distancia $[D_{i1}] = [\Delta T_i - (\Delta T_i)]$ usadas en la ecuación para ΔT y R_i

Con lo anterior se recalcula la distancia de cada modelo con el promedio REA $[D_{i2}] = [\Delta T_i - (\Delta T_i)]$, y así sucesivamente. El proceso iterativo se termina cuando se alcanza el criterio de convergencia (que en este caso se consideró cuando $[D_{in} - D_{in-1}] \leq 0.01$). Entre menor sea la distancia del modelo “i” mayor será el valor de éste criterio.

$$R_{D,i} = \left[\frac{\varepsilon}{|D_i|} \right]^n \quad \text{Ecuación 32}$$

El parámetro ε en las ecuaciones anteriores, es una medida de la variabilidad natural. Para calcular esta variabilidad se eliminó la tendencia del periodo 1961-2000 y se calculó el promedio móvil de 30 años. Finalmente ε se definió como la diferencia entre los valores máximos y mínimos de este promedio

Para estimar el rango (delta) de incertidumbre del ensamble promedio del REA, se calculó la raíz cuadrática media de la diferencia de los cambios utilizando los resultados de las ecuaciones ΔT (anomalía) y R_i (peso):

$$\bar{\delta}_{\Delta T} = \left[\frac{\sum_i R_i (\Delta T_i - \overline{\Delta T})^2}{\sum_i R_i} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 33}$$

Por lo tanto los límites superior e inferior de la incertidumbre están definidos por:

$$\begin{aligned} \Delta T_+ &= \overline{\Delta T} + \delta_{\Delta T} \\ \Delta T_- &= \overline{\Delta T} - \delta_{\Delta T} \end{aligned} \quad \text{Ecuación 34}$$

3. Objetivos

Objetivo General

Plantear una metodología que permita evaluar el funcionamiento hidráulico de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz, asociado a los efectos del cambio climático con base en los escenarios radiativos que parten del ensamble ponderado de modelos de circulación general.

Objetivos Específicos

Proponer una metodología para la obtención de series de precipitación y temperatura que contemplen la afectación de los escenarios de trayectorias de concentraciones representativas del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático manteniendo el comportamiento histórico de las estaciones meteorológicas en la región.

Simular el funcionamiento hidráulico y determinar la evolución piezométrica de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz, considerando el impacto de las anomalías climáticas.

4. Hipótesis

El efecto del cambio climático, concretamente los cambios de los parámetros climáticos de temperatura y precipitación en el funcionamiento de los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu llegará a reflejar un mayor déficit del recurso hídrico subterráneo en el corto y largo plazo, ya que el aumento de temperaturas y disminución de lluvia dificultarán la recarga natural.

La modelación y simulación hidrológica tanto superficial como subterránea permitirán conocer el comportamiento probable de los sistemas hídricos así como la evolución de niveles estáticos, ante diversas series de escenarios radiativos.

5. Justificación

Los sistemas de acuíferos conforman una parte importante en el desarrollo del ciclo hidrológico, pues parte del agua contenido en estos depósitos subterráneos es aportado a otros cuerpos de agua y escurrimientos superficiales o desembocan al mar, estos cuerpos dependen en gran parte de la forma en que los eventos climatológico se desarrollan y el aumento de temperatura en el planeta de las últimas décadas, han originado varios cambios muy significativos entre los que encontramos, mayor cantidad de precipitaciones, veranos con temperaturas altas, inviernos más crudos, incremento en el nivel del mar, deshielo de las masas polares, fractura de glaciares, mayor cantidad de incendios forestales, tormentas de arena de mayor intensidad y longitud y mayor nubosidad.

La preservación de estos cuerpos es fundamental para mantener a su vez los ecosistemas dentro de las cuencas, en el caso de la cuenca del río Angulo la CONABIO destaca la necesidad de reforestar y restaurarla sobre todo en las zonas lacustres, pues ha sido impactada por el establecimiento de drenes agropecuarios que redujeron el lago a un remanente, aunado a una intensa deforestación de la cuenca, azolvamiento deliberado del lago y el englobamiento del lago en la mancha urbana de Zacapu.

Esta problemática se ha visto intensificada en las últimas décadas por las modificaciones del uso de suelo, los procesos de degradación de la cuenca y la agricultura extensiva, las cuales han modificado sensiblemente el ambiente de la cuenca. El surgimiento de cientos de localidades que carecen de sistemas para el manejo de sus aguas residuales y otros contaminantes, han contribuido al deterioro progresivo de la calidad del agua de las principales corrientes superficiales que afectan también a los mantos acuíferos. Esto ha ocurrido junto con la afectación de múltiples especies vegetales y animales, los cuales ante el cambio de su hábitat, han modificado su patrón de vida, han emigrado o se han extinguido

Los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu, (ubicados en la parte centro-norte y norte del estado de Michoacán respectivamente, dentro del sistema de cuenca del Río Angulo ubicado en la región hidrológica Lerma – Chapala), presentan un constante descenso de los niveles piezométricos principalmente por la demanda del sector agrícola en la región y por el segundo uso más importante como agua potable para servir a las localidades dentro del sistema de acuíferos que dependen únicamente de este medio para la obtención del recurso, aunado a lo anterior se tiene una insuficiencia de registros sobre los niveles de agua e inexistencia de una red de monitoreo de pozos de extracción continua para definir correctamente los niveles piezométricos, produciendo entonces un desconocimiento alarmante del funcionamiento hidráulico del acuífero que se encuentran muy vulnerado y que bajo los escenarios climáticos actuales podría llegar a ser aún mayor por la relación entre elevación de temperatura, aumento de la evapotranspiración, reducción de cuerpos de agua y disminución de la infiltración a mantos acuíferos (CONAGUA, 2007).

Por ello se busca evaluar cuál será la posible evolución de los acuíferos ante los cambios meteorológicos que se producen a causa del cambio climático a través de modelación hidrológica superficial determinando el escurrimiento que se produce por la precipitación y cuanto de este recurso se filtra hacia el cuerpo permeable, permitiendo de esta manera realizar toma de decisiones y establecer reglas de operación que permitan determinar de manera eficiente la disponibilidad del recurso y su aprovechamiento.

6. Metodología

En el esquema siguiente (figura 6.1) se muestra el procedimiento a seguir para recabar la información necesaria para la generación de los modelos hidrológicos y su implementación para la simulación del comportamiento piezométrico en los acuíferos estudiados.

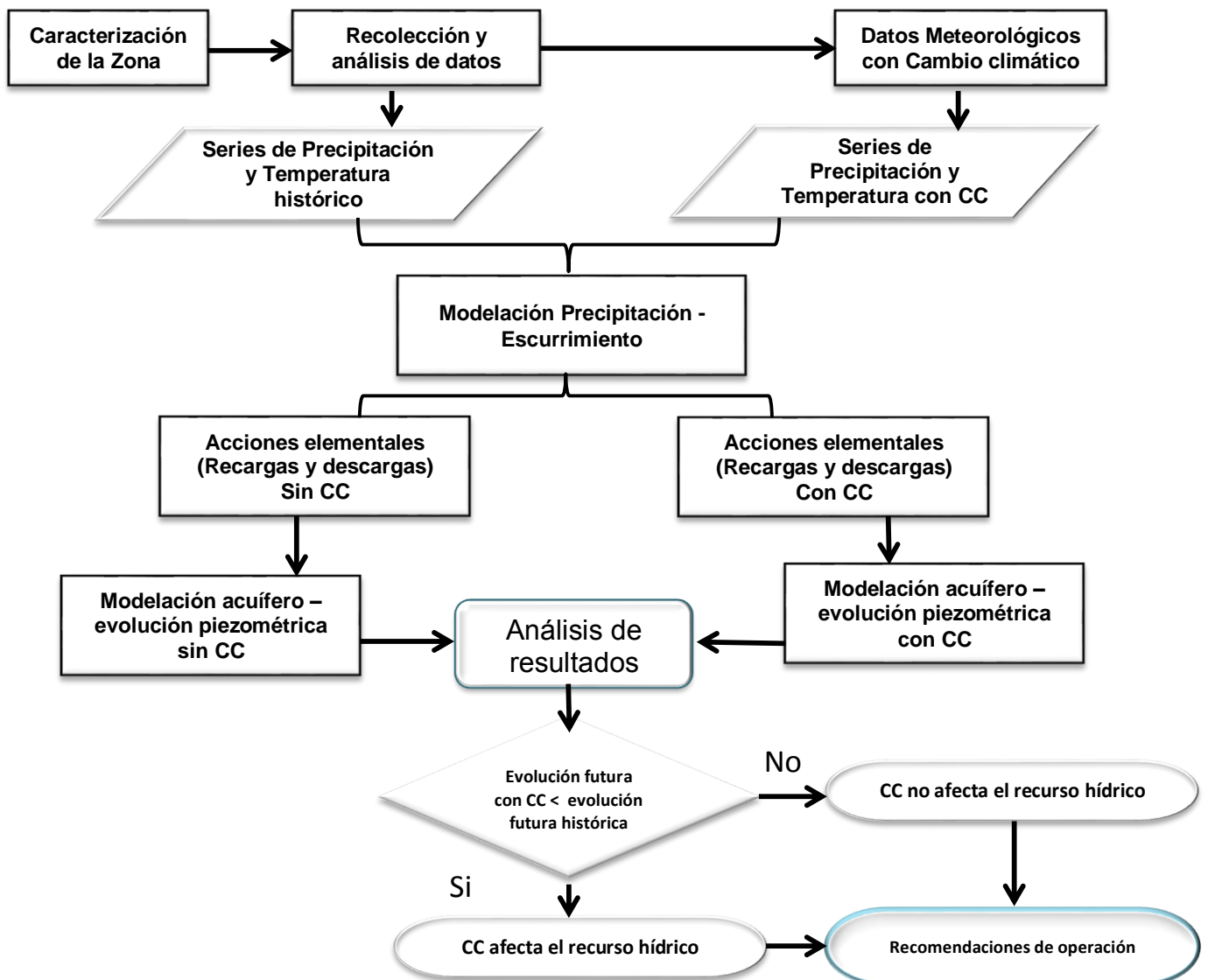


Figura 6. 1. Esquema de Modelación y Simulación de acuíferos considerando del efecto de cambio climático.

6.1 Caracterización de la Zona de Estudio

Corresponde a la generación de información particular bajo diversas disciplinas geológicas de la zona de estudio, para lo cual se utilizarán softwares de sistemas de información geográfica (SIG) como ArcGis, Global Mapper e Idrisi para el manejo y generación de información espacial referente al sistema de cuenca del río Angulo y los acuíferos de Zacapu y Pastor Ortíz.

El uso de modelos digitales de elevación (MDE) así como diferentes capas o temas de información espacial utilizadas dentro de ArcMap permitió ubicar la zona de estudio de acuerdo a la división política del país, regiones hidrológicas, geología, uso y tipo de suelo, hidrogeología, escurrimientos, cuerpos de agua, urbanidad, infraestructura y tipos de clima, generándose diversos mapas del sistema de cuenca y acuíferos estudiados, caracterizando así la zona de estudio.

6.2 Recopilación de datos

Es la información necesaria para determinar los balances hídricos, correspondientes a las bases de datos sobre los fenómenos naturales y antropogénicos que involucran al recurso hídrico y que son requeridos para la modelación y simulación.

6.2.1 Demandas urbanas, agrícolas e industriales

I. Demanda Urbana

El abastecimiento de agua potable parte de las consideraciones del consumo de las clases socioeconómicas y de las diversas actividades a las que se destina, dando lugar a las estimaciones de dotación a partir de estas contemplaciones.

Con la finalidad de tener un mejor manejo del recurso así como conocer cuál será el balance del recurso hídrico con proyección al futuro considerando el efecto que podría tener el cambio climático, se deben determinar los volúmenes de agua que consumirán los diversos sectores (urbana e industrial), a partir de una proyección futura de la población.

A través de la información espacial proveniente de CONABIO sobre las poblaciones en México y el uso de SIG se ubican las localidades que se encuentran dentro de los límites determinados por los sistemas de cuenca y acuíferos, después de acuerdo a la base de datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) se obtuvieron los censos poblaciones para dichas comunidades para los periodos de 1990, 1995, 2000, 2005 y 2010.

Con ellos se realizan las proyecciones de la población siguiendo los métodos:

- ❖ Método aritmético
- ❖ Método geométrico
- ❖ Método de los mínimos cuadrados
- ❖ Método de la curva exponencial

Método aritmético:

En este método se considera que el incremento de población es constante y consiste en obtener el promedio anual en años anteriores y aplicarlos al futuro en base a las formulas siguientes:

$$P_f = P_a + IN \quad \text{Ecuación 35}$$

Donde:

P_f = Población futura

P_a = Población actual

I = Incremento promedio: $\sum ID / nD$

$ID = (PD - P(D-1)) / N$

Donde:

ID = Incremento Decenal

PD = Población de Cada Decena

$P(D-1)$ = Población de la Decena Anterior

N = Años transcurridos desde P_D Y $P(D-1)$

Método Geométrico:

Consiste en considerar que la población tendrá un incremento análogo, al que sigue un capital aumentado en sus intereses, esto siguiendo la fórmula de interés compuesto en el que el rédito es el factor de crecimiento.

$$P_f = P_a (1 + r)^n \quad \text{Ecuación 36}$$

Donde:

P_f = Población futura

P_a = Población actual

r = Tasa de crecimiento

n = Años Transcurridos $(1 + r) = (P_D / (P_{(D-1)}))^{(1/n)}$

Donde:

P_D = Población de cada decena

$P_{(D-1)}$ = Población de la decena anterior

n = Años transcurridos desde P_D y $P_{(D-1)}$

Método de los mínimos cuadrados:

Sustituyendo en la fórmula del método aritmético; $p_f = p_a + i_n$, lo siguiente

$$\begin{array}{ll} Y_c = P_f; & X = N \\ a = I & b = P_a \end{array}$$

Se obtiene:

$$Y_c = b + ax \quad \text{Ecuación 37}$$

Que es la función de regresión lineal, para la línea recta, donde tenemos las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum Y_o = a \sum X_o + nb \quad \text{Ecuación 38}$$

$$\sum X_o Y_o = a \sum X_o^2 + b \sum X_o \quad \text{Ecuación 39}$$

Resolviendo las ecuaciones para "a" Y "b" obtenemos las siguientes formulas:

$$a = (n \sum X_o Y_o - \sum X_o \sum Y_o) / (n \sum Y_o^2 - \sum X_o^2) \quad \text{Ecuación 40}$$

$$b = ((\sum Y_o) / n) - ((\sum X_o) / n) a \quad \text{Ecuación 41}$$

Método de la curva exponencial

Sustituyendo en la fórmula del método geométrico; $P_f = P_a + (1 - r)^n$, lo siguiente:

$$\begin{aligned} a &= P_a & Y &= P_f \\ b &= (1 + r) & t &= N \end{aligned}$$

Se obtiene:

$$Y = a b^t \quad \text{Ecuación 42}$$

Que es la fórmula de regresión lineal, para la curva exponencial, donde tenemos las siguientes ecuaciones normales:

$$\sum \log Y_o = n \log a + \log b \sum t \quad \text{Ecuación 43}$$

$$\sum t \log Y_o = \log a \sum t + \log b \sum t^2 \quad \text{Ecuación 44}$$

Resolviendo las ecuaciones para "log a" Y "log b" obtenemos las siguientes formulas:

$$\log b = (n \sum t \log Y_o - \sum t \sum \log Y_o) / (n \sum t^2 - \sum t^2) \quad \text{Ecuación 45}$$

$$\log a = ((\sum \log Y_o) / n) - ((\sum t) / n) \log b$$

Ecuación 46

Para la determinación de la demanda urbana de recurso hídrico se requiere la cantidad de agua asignada por habitante, considerando todos los consumos de los servicios y las pérdidas físicas en el sistema, en un día medio anual, dichos consumos per cápita han sido determinados por CONAGUA de acuerdo al nivel socioeconómico y al tipo de clima (Tablas 6.1 y 6.2).

Tabla 6. 1 Consumos domésticos per cápita dependiendo del tipo de clima

Consumos domésticos per cápita			
CLIMA	CONSUMO POR CLASE SOCIOECONÓMICA (l/hab/día)		
	RESIDENCIAL	MEDIA	POPULAR
CALIDO	400	230	185
SEMICALIDO	300	205	130
TEMPLADO	250	195	100

NOTAS: Para los casos de climas semifrío se consideran los mismos valores para el clima templado. El clima se selecciona en función de la temperatura media anual.

Tabla 6. 2 Temperatura predominante dependiendo del tipo de clima

TEMPERATURA MEDIA ANUAL	TIPO DE CLIMA
Mayor que 22	CALIDO
De 18 a 22	SEMICALIDO
De 12 a 17.9	TEMPLADO
De 5 a 11.9	SEMIFRIO
Menor que 5	FRIO

Tomando en cuenta las características socioeconómicas de la zona, la dotación seleccionada es la que corresponde a la dotación media y residencial de acuerdo a los estándares de vida de la población. El incremento de la población se plantea en los horizontes de los escenarios de cambio climático para 30, 60 y 90 años, seleccionando las proyecciones de población que mejor describan la tendencia de crecimiento o decaimiento. Con estas proyecciones es posible determinar las demandas a nivel local, municipal y de cuenca.

II. Demanda Industrial

Referente a los volúmenes de extracción de tipo Industrial dentro de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz obtenidos a partir de los títulos y permisos de aguas nacionales del Registro Público de Derechos de Agua (REPDA-CONAGUA)

III. Demanda de distrito de riego

La información referente a los volúmenes de agua otorgados a los módulos de riego se obtendrá directamente de CNA, los cuales forman parte del Distrito de Riego 087, también conocido como “Rosario-Mezquite”, localizado dentro de distintos municipios de los Estados de Jalisco, Michoacán y Guanajuato, lo anterior por medio del Software - Plan de Riego 2.

6.2.2 Meteorológicos

Son los datos correspondientes a la temperatura y precipitación que ocurren dentro de la zona de estudio, los cuales son obtenidos de la base de datos de estaciones climáticas superficiales de México del CLImate COMputing project (CLICOM).

Las estaciones meteorológicas que formaran parte del estudio deberán ser ubicadas espacialmente con el uso de SIG y realizar una discretización con el fin de identificar cuales proporcionarán una adecuada descripción de precipitación y temperatura dentro del área de la cuenca.

A partir de esta información se procedió a realizar una selección de las estaciones principales a partir de una ponderación de peso diferente de variables, donde se establecen intervalos para cada variable tomando como límite los valores máximo y mínimo de ciertas variables bajo rangos de ponderación (Tabla 6.3).

Dichas variables son:

- ❖ Número de años
- ❖ Periodo de Información
- ❖ % de Vacíos

Tabla 6. 3 Rangos de ponderación

Intervalos de tiempo		Peso
1923	1937	1
1937	1951	2
1951	1965	3
1965	1979	4
1979	1993	5
1993	2007	6

%Vacíos		Peso
0	11.45875	8
11.45875	22.9175	7
22.9175	34.37625	6
34.37625	45.835	5
45.835	57.29375	4
57.29375	68.7525	3
68.7525	80.21125	2
80.21125	91.67	1

No. Años		Peso
0	23.5	1
23.5	39	2
39	54.5	3
54.5	70	4

Siendo las estaciones de mayor puntaje aquellas que presentan las mejores características de acuerdo a las variables consideradas, también debe considerarse la cobertura total de la cuenca con las estaciones.

6.2.3 Hidrométricos

A partir de los archivos espaciales de información geográfica de la CONABIO se pueden identificar las estaciones hidrométricas al interior del sistema de cuenca de las cuales se seleccionan aquellas que se ubiquen en posiciones a lo largo de la red hidrográfica, contando con una estación en la parte alta, media y en la salida de la cuenca, una vez localizadas las estaciones se procede a obtener la serie histórica de registros en estos puntos a través del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

6.2.4 Piezometría

La piezometría consiste en altura de la superficie libre de agua sobre el nivel del mar en los acuíferos libres, las medidas piezométricas instantáneas se realizan mediante la denominada "sonda de nivel" que se basan en la observación de la profundidad del agua mediante el cierre de un circuito eléctrico cuando un elemento detector establece contacto con el agua.

Las redes de monitoreo son una herramienta indispensable para la obtención de información de manera rápida y confiable. Sin embargo, operar y mantener un sistema de este tipo resulta ocasionalmente muy costoso.

El diseño de una red de monitoreo de un acuífero incluye todas las variables que permitan el estudio y actualización, y a su vez sea práctica cada vez que se requiera actualizar la información. Durante los meses de noviembre y diciembre del 2007 se realizó un levantamiento de censo de pozos por parte de CONAGUA e IMTA en el cual se estableció la red de monitoreo para futuros sondeos nivelándose el brocal para aquellos aprovechamientos seleccionados.

6.2.5 Caracterización de Acuíferos

Se compone de los elementos que ayudan a entender el comportamiento y particularidades de estos cuerpos subterráneos de agua, es la información referente a la meteorología, geología, hidrografía y parámetros hidrogeológicos fundamentales para la modelación (transmisividad, conductividad hidráulica, coeficiente de almacenamiento), así como el funcionamiento y balance hídrico de las diversas acciones que se llevan a cabo en estos sistemas de acuerdo a los reportes por parte de la CNA.

6.3 Análisis estadístico de datos – pruebas de homogeneidad

Las estaciones seleccionadas no cuentan con los datos de precipitación y temperatura en su totalidad por la naturaleza de captura de información que algunas de estas tienen, por lo cual se debe realizar un llenado de las mismas para lo cual primero se requiere realizar pruebas de consistencia entre las estaciones para poder mantener la homogeneidad de las variables.

A través de pruebas estadísticas se puede evaluar si la consistencia u homogeneidad con que debe contar toda serie temporal de precipitaciones está presente, pues están deben ser muestra de una única población. De igual manera se busca determinar qué tan confiables serán las series al momento de trabajar con ellas dentro de las modelaciones (J.B. Marco, 1989).

Las pruebas de homogeneidad en cuestión son regularmente el Test de Helmer y la prueba de secuencias en caso de no resultar favorables estas puede optarse por realizar las pruebas de t de Student y Cramer para demostrar su homogeneidad.

Otra prueba de consistencia comúnmente aplicada es el método de la curva masa doble, basada en que las precipitaciones acumuladas de una estación es afectada en demasía ante la presencia de cambios importantes mientras que la lluvia acumulada media es poco sensibles a las variaciones pues compensa sus propios errores, la prueba consiste de una interpretación gráfica de los datos acumulados anuales en una

estación donde se busca la homogeneidad al contrastar con los valores acumulados medios de las demás estaciones consideradas, la validación de los datos se da cuando la tendencia es lineal, en caso contrario se desecha la estación.

6.3.1 Prueba estadística de Helmert

Esta prueba consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie respecto a su valor medio. Si una desviación de un cierto signo es seguida por otra del mismo signo se dice que ha ocurrido una secuencia (S), en caso contrario se dice que ha ocurrido un cambio (C). Para que una serie sea homogénea, la diferencia entre el número de secuencias y cambios debe ser cero, o estar dentro de los límites de un cierto error probable (menor o igual).

$$S - C = \pm n - 1$$

Ecuación 47

6.3.2 Prueba de Secuencias

Este método requiere determinar la media de la precipitación anual de la estación analizada, posteriormente para cada año cuya precipitación anual este por debajo de la media se le asigna un valor negativo y cuando es mayor que la media se le asigna un valor positivo, después se contabiliza el número de cambios de signo comparando este valor con el de la tabla 6.4 para determinar la homogeneidad.

Tabla 6. 4 Rangos de evaluación de consistencia para la prueba de secuencias

DATOS (n)	μ	DATOS (n)	μ	DATOS (n)	μ	DATOS (n)	μ
12	5 a 8	24	9 a 16	36	15 a 22	80	35 a 47
14	5 a 10	26	10 a 17	38	16 a 23	100	45 a 47
16	6 a 11	28	11 a 18	40	16 a 25		
18	7 a 12	30	12 a 19	50	22 a 30		
20	8 a 13	32	13 a 20	60	26 a 36		
22	9 a 14	34	14 a 21	70	31 a 41		

6.3.3. Independencia de Anderson

Una serie de precipitación debe presentar un comportamiento aleatorio, para probar que lo es, se aplica la prueba de independencia de Anderson, la cual se basa en la determinación del coeficiente de autocorrelación serial r para diferentes tiempos de retraso. Cuando se analiza un solo registro $j=1$, y la ecuación para calcularlo es:

$$r_k^j = \frac{\sum_{i=1}^{n_j-k} (x_i^j - \bar{x}^j)(x_{i+k}^j - \bar{x}^j)}{\sum_{i=1}^{n_j} (x_i^j - \bar{x}^j)^2} \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde:

j – Muestra de datos analizada

k – Tiempo de retraso o desfase

n_j – Número de datos de la muestra j

\bar{x}^j – Media de la muestra j

Los límites al 95% de confianza para r se pueden obtener con la ecuación

$$r_k^j(95\%) = \frac{-1 \pm 1.96 \sqrt{(n_j - k - 1)}}{n_j - k} \quad \text{Ecuación 49}$$

Con los valores estimados para r (ordenadas) contra los tiempos de retraso k (abscisas) y los valores correspondientes a los límites de confianza, se elabora el correlograma de la muestra. Si solo el 10% de los valores se sobrepasan los límites de confianza, se considera que la muestra analizada es independiente y sigue las leyes de la probabilidad.

En caso de que las series de precipitación lleguen a mostrar error de Independencia indican que los datos no se comportan como una serie aleatorio, por lo cual no deben ser utilizadas dentro de la modelación.

6.3.4 t de student

Se considera que una muestra es homogénea si el valor del estadístico t_d de la prueba t de Student que se calcula con la siguiente ecuación:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[\frac{n_1 S_1^2 + n_2 S_2^2}{n_1 + n_2 - 2} \left(\frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right) \right]^{1/2}} \quad \text{Ecuación 50}$$

Donde:

\bar{X}_1	:	Media de la muestra uno
\bar{X}_2	:	Media de la muestra dos
n_1	:	Número de registros de la muestra uno
n_2	:	Número de registros de la muestra dos
S_1^2	:	Varianza de la muestra uno
S_2^2	:	Varianza de la muestra dos

resulta menor o igual al estadístico t_c de la distribución t de Student y con $n_1 + n_2 - 2$ grados de libertad.

6.3.5 Prueba estadística de Cramer

Para investigar la homogeneidad de una muestra, a veces es conveniente comparar la media de toda la serie con la media de una cierta parte del registro, es decir, realizar un análisis por bloques. Para ello es muy útil la prueba de H. Cramer, que además es complementaria de la prueba t de Student. La prueba de Cramer se determina con las siguientes ecuaciones

$$t_k = \left[\frac{n_1(n-2)}{n - n_1(1 + (\tau_k)^2)} \right]^{1/2} (\tau_k) \quad \text{Ecuación 51}$$

$$\bar{X}_k = \frac{\sum_{i=k+1}^{i=k+n} X_i}{n_1} \quad \text{Ecuación 52}$$

$$t_k = \frac{(\bar{X}_k - \bar{X})}{S} \quad \text{Ecuación 53}$$

Donde:

- n : Número de registros de toda la muestra
- \bar{X} : Media de toda la muestra
- S : Desviación estándar de toda la muestra
- n_1 : Número de registros de la submuestra
- \bar{X}_k : Media de la submuestra
- K : índice o contador, posterior al cual debe tomarse la submuestra, se determina como; $k = n - n_1$.
- t_k : Parámetro que relaciona las medias de la muestra y submuestra

6.3.6 Llenado de series de precipitación

La buena medición y registro de datos es indispensable para poder llevar a cabo una buena modelación, pero por diversas situaciones existen periodos temporales en los cuales no se realizaron los cuales se traducen en incertidumbre, al adicionar datos a la serie que no reproducen el comportamiento original se agrega un porcentaje más de incertidumbre, siguiendo este sentido los métodos de llenado permiten completar los vacíos con datos estadísticamente consistentes, mas no reproducir los datos perdidos.

A través de la correlación espacial se puede evaluar las estaciones que pueden servir para el llenado de otra serie considerando aquellas estaciones cercanas frente a la estación a llenar, los grados de correlación entre estaciones se arreglan en una matriz conocida como de correlación espacial, a partir de la cual se identifican aquellas estaciones con mayor correlación (> 0.75) que servirán para el llenado.

Este último proceso se llevó a cabo con el método de la distancia euclidiana al cuadrado para lo cual es necesario determinar los estadísticos básicos de las series y determinar la matriz de distancias euclidianas.

Las pruebas estadísticas básicas se componen de la media, desviación estándar y sesgo a través de las siguientes ecuaciones:

$$\text{Media} \quad \bar{Q}_\tau = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,\tau}}{N} \quad \text{Ecuación 54}$$

$$\text{Desviación Típica} \quad s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^2}{N-1}} \quad \text{Ecuación 55}$$

$$\text{Coeficiente de Sesgo} \quad g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)s_\tau^3} \quad \text{Ecuación 56}$$

Donde:

\bar{Q}_τ : Media mensual de los caudales del mes τ .

$Q_{v,\tau}$: Caudal del mes τ del año v ($v=1, \dots, N$).

N : Número total de años.

s_τ : Desviación típica mensual del mes τ .

g_τ : Coeficiente de sesgo mensual del mes τ .

La distancia euclidiana es la distancia ordinaria deducida a partir del teorema de Pitágoras, para determinar esta distancia es a partir de las coordenadas de cada estación y su respectiva elevación hasta la otra estación. Obteniéndose por tanto una matriz de distancias euclidianas de las estaciones principales y secundarias. De tal forma que la ecuación de la distancia Euclidiana queda de la siguiente manera:

$$\text{Dist. Euclidiana} = \sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]} \quad \text{Ecuación 57}$$

Siendo

x_i = Coordenada x estación i; x_j = Coordenada x estación j

y_i = Coordenada y estación i; y_j = Coordenada y estación j

z_i = Elevación estación i; z_j = Elevación estación j

Una vez determinada esta distancia se calcula su inverso y se prepara la matriz de inverso de la distancia euclidiana que permita manejar estos valores.

Para el llenado de datos es necesaria una inspección cuidadosa de la matriz de correlación, ubicación espacial de las estaciones respecto a la estación a llenar, y que las estaciones puedan llenar los datos faltantes, entre otros. De este análisis es posible identificar que estaciones pueden llenar un intervalo de datos faltantes y otras estaciones pueden llenar otro intervalo de datos faltantes. Esta parte del proceso de llenado es subjetiva y se basa fuertemente de la experiencia de la persona que realiza el análisis, es importante hacer notar que sigue dos condiciones importantes: la cercanía de las estaciones y la correlación con criterio de significación.

Con los datos de la matriz de la inversa de la distancia y la matriz de correlación donde son útiles solo las estaciones con correlación mayor a 0.75, se procede a determinar la ecuación de llenado para cada intervalo de datos faltantes a llenar de la estación principal, teniendo cuidado en que las estaciones seleccionadas para llenar contengan datos para el dato o intervalo de datos faltantes.

La ecuación de llenado del dato faltante requiere identificar el peso de cada estación. Este peso requiere el cálculo de suma del inverso de la distancia Euclidiana al cuadrado, de las estaciones útiles a llenar el intervalo de datos faltantes (es decir cuentan con información en el intervalo faltante de la estación a llenar). Se obtiene el peso de cada estación útil en el llenado, dividiendo el inverso de la distancia euclidiana al cuadrado de la estación a utilizar para llenar entre la suma del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado. Este peso se multiplicará por el valor de la precipitación en dicho periodo.

Y sumando el peso obtenido de las otras estaciones, se obtendrá el valor estimado de uno.

$$\text{Peso estación } i = \frac{(\text{Inv. Dist. Euclidiana est } i)^2}{\sum_{i=1}^n (\text{Inv. Dist. Euclidiana})^2} \quad \text{Ecuación 58}$$

$$\text{Dato faltante} = \sum_{i=1}^n [\text{peso estación } i * \text{precipitación } i] \quad \text{Ecuación 59}$$

Siendo

$i = 1, \dots, n$. Estaciones útiles a llenar la estación con vacíos. Si las estaciones utilizadas a llenar tuviesen vacíos en el periodo de tiempo de vacíos de la estación a llenar, se provoca un error en la determinación del dato faltante.

A través de este método se realizó el llenado de las estaciones meteorológicas dentro del área de estudio. Donde los estadísticos de la serie original son comparados con los de las series llenadas para determinar cuanta incertidumbre han generado al incorporarse en estas.

6.4 Series Meteorológicas con Cambio Climático

A partir de la actualización de escenarios de cambio climático presentados en el proyecto CMIP5 por parte de INECC junto a otras instituciones de investigación es posible proyectar las series de temperatura y precipitación bajo los escenarios RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5 con proyecciones de 2015 a 2039 y de 2075 a 2099 tomando la base de datos de la REA, esta información puede ser adquirida de la base de datos en línea de escenarios de INECC en donde se da a elegir entre un formato tipo plot (gráfico) o espacial, donde para ambos casos deben especificarse las coordenadas geográficas de la zona de interés.

Las estaciones que proporcionan la información de cambio climático dentro del portal electrónico de INECC se encuentran ubicados de forma equidistante creando una suerte de red, a partir de la ubicación espacial de dichas estaciones se determinan cuáles serán necesarias definir las series de datos para las modelaciones.

6.4.1 Anomalía climática

Las series obtenidas no pueden utilizarse directamente como dato de entrada para los escenarios dentro de los modelos, ya que parten de una base histórica que refleja un comportamiento distinto al de los datos de las estaciones meteorológicas de la región analizada, por tanto se propone aplicar una metodología para la determinación de la anomalía climática que podría ocurrir en la zona de estudio partiendo de los datos de INECC, la cual será aplicada a los datos climáticos CLICOM del periodo histórico a los que se tienen acceso, a continuación se esquematiza el procedimiento.

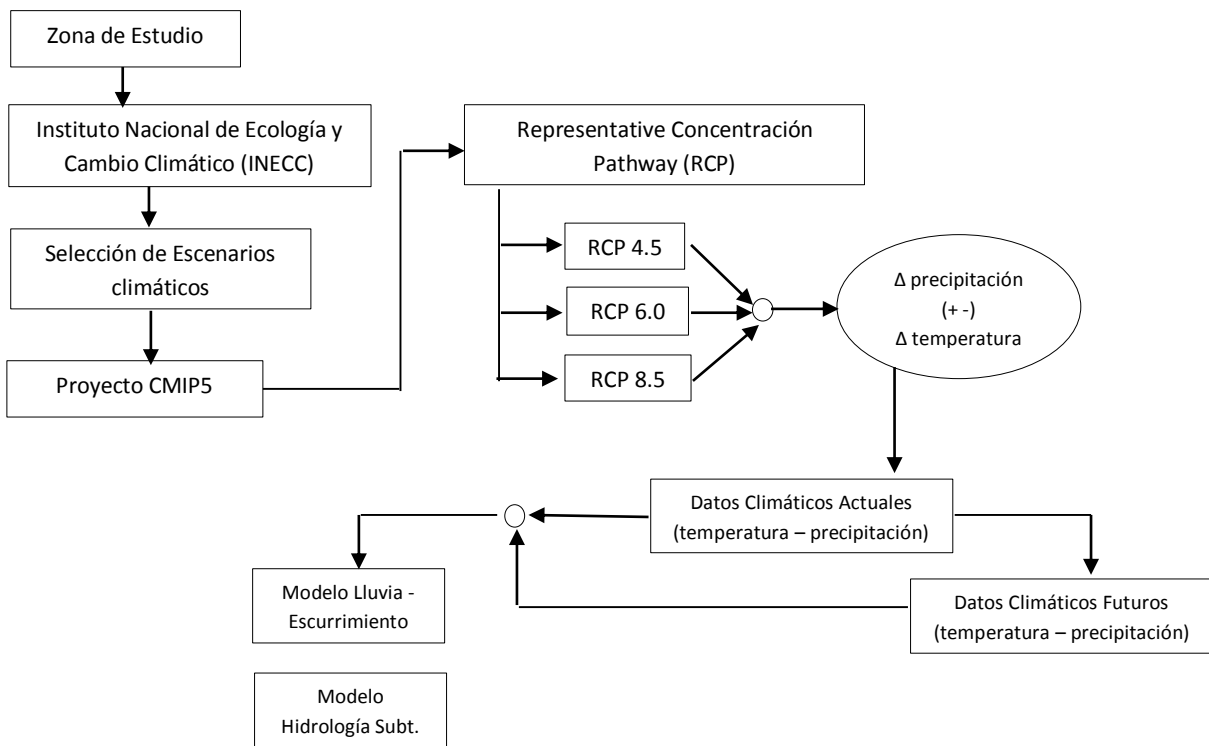


Figura 6. 2. Esquema de metodología propuesta para la determinación de anomalía climática.

Siendo la anomalía climática determinada con la siguiente expresión:

$$\Delta C_M = (\overline{DC}_{RCP} - \overline{DC}_{REA}) \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde:

ΔC_M – Anomalía climática mensual

\overline{DC}_{RCP} – Promedio mensual del dato climático de la proyección RCP

\overline{DC}_{REA} – Promedio mensual del dato climático de la base histórica REA

Una vez determinada la anomalía para los 12 meses en todas las estaciones y para todos los escenarios de proyección se procede a realizar la transferencia de la misma de manera espacial a las estaciones que serán utilizadas para la modelación precipitación-escorrentía, utilizando para ello el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, determinándose para cada estación meteorológica el peso que representan las provenientes de INECC de acuerdo a su posición espacial y el correspondiente valor del dato climático de acuerdo a estas equivalencias.

Las anomalías son entonces adicionadas al valor mensual correspondiente a las series de datos climáticos de las estaciones meteorológicas que comprenden un periodo histórico que equivalga en extensión al futuro, determinándose así las series climáticas con cambio climático.

6.5 Modelación Hidrológica Superficial – Modelo Evalhid

El objetivo de la modelación hidrológica superficial en este trabajo es poder determinar los volúmenes de recarga directa que se perciben de la precipitación hacia el acuífero, siendo esta una de las aplicaciones de los modelos lluvia - escurrimiento.

Dadas las ventajas que ofrece el modelo Témez (Témez, 1977) ante zonas con cierta homogeneidad paramétrica admite el uso de pocos parámetros y realizar una valoración agregada para cuencas de tamaño medio y pequeño, en el caso de cuencas de dimensiones más considerables el modelo también permite a través de la subdivisión del sistema en subcuencas trabajar como un modelo semi-distribuido.

En este modelo se considera el suelo funciona como un almacenamiento con entradas provenientes de la precipitación y salidas debidas a la evapotranspiración, cierto volumen de agua excedente se proyecta como escurrimiento superficial y otra se infiltra y almacena en los sistemas acuíferos y fluye en ellos hasta desembocar en otro medio superficial (Sahuquillo et al., 2010).

6.5.1 Configuración conceptual del modelo

El proceso de modelación hace necesario que partiendo de las condiciones que presenta el drenaje de sistema superficial establecer las microcuencas dentro de la zona estudiada los cuales pueden ser obtenidos a partir del procesamiento de la información del modelo digital de elevación de la región por medio del SIG ArcMap, por medio de la generación del orden de corrientes del cual se genera un tema de puntos que representan los vértices donde las corrientes se cortan complementado con la dirección de flujo bajo el comando de generación de cuencas, además de lo anterior es necesario para el modelo ubicar los puntos de monitoreo o aforo existentes en los ríos de mayor aportación en la cuenca.

De acuerdo a la posición de las estaciones hidrométricas se establecen las zonas de calibración donde los datos históricos aforados se utilizan para las etapas de calibración y validación del modelo; con el fin de modelar adecuadamente los procesos de escurrimientos es fundamental conocer el nivel o lámina de precipitación que se está recibiendo en la zona de estudio, para esto se deben establecer las zonas de influencia que pertenecen a las estaciones meteorológicas en dicha región por medio de la generación de polígonos de Thiessen

Una vez determinado lo anterior es posible discernir la influencia apropiada que tiene cada estación sobre las microcuencas, de tal forma que en aquellos casos en que se tengan más de una afectación para uno de los microsistemas se generen estaciones ficticias siguiendo el método de la distancia euclidiana al cuadrado ubicadas en su centro de gravedad a partir de los datos de las estaciones que están influyendo.

La modelación puede llegar a simplificarse en los casos en que más de una microcuenca se encuentre en una zona afectada por la misma estación meteorológica ya que pueden unirse en un solo sistema. Para la aplicación del modelo Témez se utiliza el módulo EvalHid que es parte del sistema de soporte a la decisión AQUATOOL, en el cual al establecer un nuevo proyecto se deben ingresar las series de precipitación, temperatura o evapotranspiración de acuerdo a los escenarios de simulación que se quieran producir (figura 6.3), esto bajo un formato propio del software (.inp).

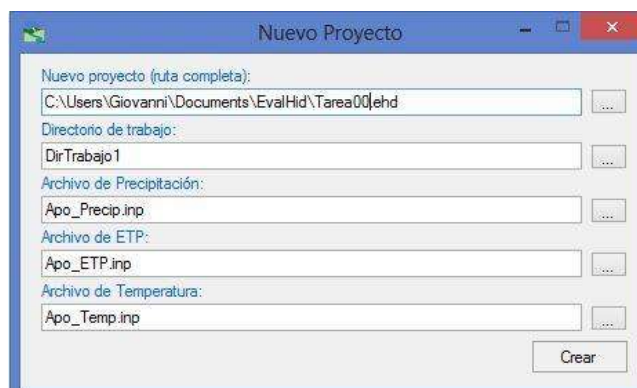


Figura 6. 3. Establecimiento de nuevo proyecto en EvalHid

Se deben además establecer los valores de los parámetros del modelo para cada una de las subcuencas consideradas en la simulación entre otras características como la columna de dato correspondiente, el tipo de modelo de simulación, el área y el punto de desagüe (figura 6.4).

Información de la subcuenca: 103

General | **Parámetros Témez**

Superficie (Km²): 110.860833379

Columna de Precipitación: E1

Columna de ETP: E1

Columna de Temperatura: E1

Tipo de Modelo: Témez

Punto de Desagüe Superficial: RIO ANGULO

¿Resultados Parciales?: No

Ajuste de Precipitación: 1

Ajuste de ETP: 1

Ajuste de Temperatura: 1

Modelo Nieve: Ninguno

Punto de Desagüe Subterráneo: Ninguno

Parámetros:

Nombre	Valor	Unidades
Hmax	150	mm
C	0.3	adim
lmax	230	mm
Alfa	0.23	1/tiempo

Variables de Estado:

Nombre	Valor	Unidades
H	20	mm
Vi	35	mm

Figura 6. 4. Definición de parámetros e información general de subcuencas

Para llevar a cabo una simulación se especifica el periodo a simular seguido de la revisión de la información indicada anteriormente, una vez que se ha comprobado que los datos han sido especificados adecuadamente se procede a calcular y escribir el archivo de resultados por medio de los mandos con estas etiquetas. Siendo los valores resultantes que se necesitan para comprobar la veracidad del modelo los correspondientes al caudal de escurrimiento en los puntos de desagüe.



Figura 6. 5. Ventana principal de simulación en EvalHid.

6.5.2 Calibración

En principio las zonas de calibración se establecen tomando en cuenta la ubicación de las estaciones hidrométricas donde las series registradas en estos puntos son comparadas con los valores de caudal obtenidos por las simulaciones en el modelo de EvalHid, los parámetros de calibración H_{max} , I_{max} , C y α son ajustados de manera automática bajo un algoritmo evolutivo, hasta encontrar una relación de valores que muestre un comportamiento similar al que registrado en las estaciones.

El calibrador automático hace uso del algoritmo SCE-UA UA (Shuffled Complex Evolution method developed at The University of Arizona), (Duan *et al.*, 1994), el cual utiliza una combinación de procesos deterministas y aleatorios, partiendo en diversos puntos de búsqueda (individuos) organizados en equipos (complex) y una solución óptima que se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (mutación, cruce) donde se realiza también una mezcla entre equipos (shuffled), (Casas, 2013)

A continuación se describen los indicadores de ajuste utilizados para la evaluación del modelo.

- **Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NS).** Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos medidos (Nash y Sutcliffe, 1970).

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - Y_{i\text{ sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{ obs}} - \bar{Y}_{\text{ obs}})^2} \right] \quad \text{Ecuación 61}$$

En la ecuación anterior $Y_{i\text{ obs}}$ representa el i -ésimo valor observado que está siendo evaluado, $Y_{i\text{ sim}}$ compone el i -ésimo valor simulado que está siendo evaluado, $\bar{Y}_{\text{ obs}}$ es la media de los datos observados, y n es el número total de observaciones (Moriasi et al., 2007).

- **Nash-Sutcliffe modificado.** Es la transformación logarítmica del flujo ($\ln NSE$); este indicador da mayor peso a los errores durante flujos escasos. Mediante esta transformación logarítmica, los picos se disminuyen y los valores más bajos se mantienen. El índice Nash-Sutcliffe modificado presenta mayor sensibilidad a las sobrevaloraciones y a las infravaloraciones del modelo.

$$NSE = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{ obs}}) - \ln(Y_{i\text{ sim}}))^2}{\sum_{i=1}^n (\ln(Y_{i\text{ obs}}) - \ln(\bar{Y}_{\text{ obs}}))^2} \right] \quad \text{Ecuación 62}$$

Los rangos para determinar la calidad de la modelación se presentan en la tabla 6.4.

Tabla 6. 5 Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales (Moriasi et al., 2007).

Calidad de ajuste	NSE
Muy buena	$0.75 < NSE \leq 1.00$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$
Satisfactoria	$0.50 < NSE \leq 0.65$
No satisfactoria	$NSE \leq 0.50$

- **Coefficiente de correlación de Pearson.** El coeficiente de Correlación de Pearson (r^2) mide la covariabilidad de valores observados y simulados sin penalización por sesgo. El valor de este coeficiente varía entre -1 y 1 . Cuando el coeficiente r^2 toma el valor de 1 se tiene una correlación completa positiva; es decir, todos los datos describen una línea recta con pendiente positiva.

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Qsim(t) - \bar{Qsim})(Qobs(t) - \bar{Qobs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Qsim(t) - \bar{Qsim})^2 \sum_{t=1}^n (Qobs(t) - \bar{Qobs})^2}} \quad \text{Ecuación 63}$$

Tabla 6. 6 Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.

Calidad de ajuste	r^2
Excelente	$0.90 < r^2 \leq 1.00$
Muy buena	$0.75 < r^2 \leq 0.89$
Buena	$0.50 < r^2 \leq 0.74$
No satisfactoria	$r^2 \leq 0.50$

6.6 Modelación Hidrológica Subterránea – Modelo Aquival

La simulación de la evolución de los niveles estáticos presentes en las unidades hidrogeográficas estudiadas de los acuíferos hace necesario implementar una representación de los mismos descritos a partir del método de diferencias finitas para definir la distribución potencial de manera más precisa, se abordó esta etapa con la generación de un modelo subterráneo utilizando el módulo AQUIVAL, el cual como parte de sus características requiere de una calibración de los parámetros hidrodinámicos utilizando el método de diferencias finitas, los cuales pueden ser exportados a MODFLOW, tomando esto en cuenta la posibilidad de generar un punto de comparación entre modelos es posible a futuro.

Se hace necesario entonces realizar una caracterización de las unidades subterráneas estudiadas refiriendo para esto al estudio: “Actualización hidrogeológica de los acuíferos Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia – Queréndaro y Pastor Ortiz estado de Michoacán. Informe final Convenio De Colaboración CNA-OCLSP-JAL-CONV-008-2007”, elaborado por el Organismo de Cuenca Lerma Santiago Pacífico de la Comisión Nacional del Agua (CNA) junto al Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) en noviembre del 2007, con el fin de establecer diversos parámetros necesarios para la modelación.

6.6.1 Configuración conceptual del modelo

El método de trabajo para la modelación de acuíferos con AQUIVAL sigue la siguiente estructura:

1. Definición de geometría y parámetros hidrodinámicos.

Similar a otros modelos matemáticos para la simulación de acuíferos, el modelo AQUIVAL requiere la definición de los parámetros geométricos e hidrodinámicos del acuífero por medio de celdas. Esta parte puede sustituirse por la importación de los mismos datos ya definidos y calibrados con otro programa, además permite realizar la discretización de los sistemas tanto por diferencias finitas como por elementos finitos. (Sahuquillo et al. 2010).

Para este caso con el fin de contar con una mejor visualización del comportamiento de los niveles estáticos se estableció una configuración de los acuíferos ajustando un mallado de 4000 x 4000 m a los mismos con el fin de obtener los parámetros de estos sistemas de acuerdo a esta rejilla auxiliado por los diferentes herramientas que ofrece el SIG ArcMap para tal acción.

Se debe establecer la configuración partiendo de la creación del mallado asegurándose que abarque a los sistemas subterráneos, identificando el número de filas y celdas que lo componen y determinando cuales celdas son las que contienen la geometría del acuífero.

A partir de la información espacial se pueden determinar los niveles estáticos para los acuíferos a partir de la interpolación kriging de los temas de curvas equipotenciales y las elevaciones de los almacenamientos subterráneos a partir de la extracción puntual de los valores del MDE de la zona, obteniéndose un archivo raster que contiene la información de niveles estáticos distribuidos a lo largo de las unidades hidrogeológicas (Anexo 1), para poder asignar un valor ponderado a cada celda se realiza un cambio del tamaño de pixel del tema de niveles estáticos generado de tal forma que estos se muestren de 4000x4000 con un único valor asignado de piezometría.

Estos valores deben ser a su vez adaptados a una hoja de cálculo en donde se emule la geometría de los acuíferos con el fin de facilitar el ingreso de datos en el modelo a generar en AQUIVAL.

Dentro del entorno del programa se deben establecer la base del modelo partiendo con las dimensiones del mallado y el nombre del proyecto utilizando la discretización de diferencias finitas (Figura 6.6).

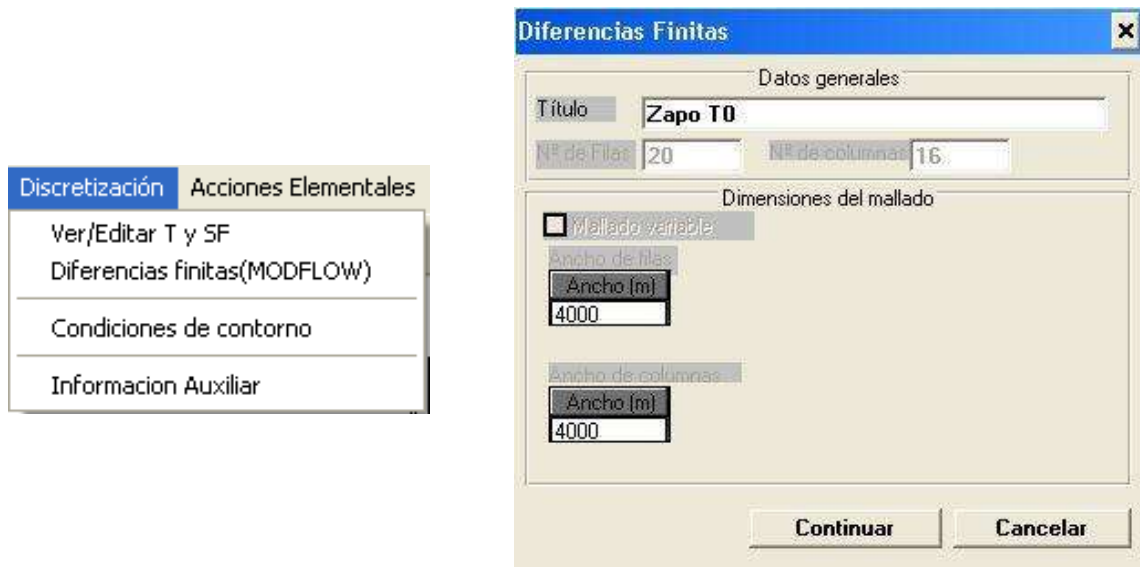


Figura 6. 6. Menú de tipo de discretización y ventana de datos generales de ingreso del modelo por diferencias finitas en AQUIVAL.

El parámetro de elevación inicial anteriormente descrito junto con la transmisividad son valores indispensables de entrada del modelo para poder realizar el cálculo de las matrices T y Sf, los cuales pueden ser introducidos como valores comunes o haciendo un distinción por celda asignada por el usuario.

Los valores de transmisividad por celda se generan a partir de interpolación de la información espacial de dicho parámetro, otra forma que ofrece el programa para el cálculo de la transmisividad es partiendo del valor de la conductividad hidráulica y del espesor del acuífero.

2. Definición de acciones elementales.

Consiste en identificar elementos o grupos de elementos que ejercen presiones sobre el acuífero es decir las series temporales de acciones exteriores al sistema que de una u otra forma afectan el esquema dinámico que de manera simple se traducen en entradas, cambios de almacenamientos y salidas, acciones tales como recargas o extracciones de agua.

3. Definición de parámetros de control.

Es la selección de muestra resultados por elementos de la malla o por grupos que se extraerán como un resumen de la simulación, los cuales pueden ser nivel en una celda caudal de entrada o salida a una o varias celdas, o volumen almacenado en un conjunto de celdas, entre otros.

A partir de estos valores es posible validar la veracidad del modelo al reproducir el comportamiento del acuífero y determinar si es necesario modificar algunas de sus condiciones para mejorar las simulaciones obtenidas.

4. Cálculo del autoproblema.

Una vez identificadas las acciones elementales y los parámetros de control, se puede utilizar el módulo de cálculo para calcular la formulación del modelo matemático de autovalores.

5. Simulación del acuífero.

El modelo AQUIVAL permite también la simulación aislada del acuífero. Para ello es necesario introducir las series temporales de acciones elementales, es decir los volúmenes correspondientes a las acciones elementales de acuerdo al paso de tiempo requerido para el periodo indicado.

Del paso anterior (cálculo del autoprotección) se obtiene el archivo de datos que define el modelo del acuífero en autovalores. Este archivo puede generarse también por otros medios, su contenido es:

- Los autovalores.
- Las filas de la matriz [AH] correspondientes a cada parámetro de control.
- Las columnas de la matriz correspondientes a cada acción elemental.
- El vector de estado inicial.

6.6.2 Simulación y Calibración.

Es necesaria la determinación de los volúmenes de recarga provenientes de EVALHID así como las descargas provenientes de los aprovechamientos que ejercen presión sobre el acuífero para comenzar las calibraciones del modelo hidrológico subterráneo en el software AQUIVAL, esta información es ingresada de forma mensual con unidades de m³/día considerando una columna por acción elemental (tabla 6.6)

Tabla 6. 7 Valores de acciones elementales consideradas para el año hidrológico 1998-1999.

		RECZAC	RECPO	DRPO	DRAN	DRZA	BPO	BAN	BZA	BOMPO	BOMZA	
(m ³ /día)		<SeriesRecarga>										
oct-98	1	486,397.69	272,199.79	0.00	3,500.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
nov-98	2	0.00	0.00	0.00	4,200.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
dic-98	3	0.00	0.00	58,700.00	4,500.00	0.00	-273,134.71	-22,532.95	-121,377.01	-327,077.67	-170,671.25	
ene-99	4	0.00	0.00	55,000.00	45,000.00	0.00	-212,300.16	-21,583.29	-116,261.51	-254,228.55	-163,478.21	
feb-99	5	0.00	0.00	61,800.00	29,500.00	63,233.00	-244,890.10	-23,137.28	-124,632.34	-293,254.87	-175,248.64	
mar-99	6	0.00	0.00	58,700.00	34,220.00	227,372.00	-247,683.52	-14,158.64	-76,267.55	-296,599.98	-107,241.71	
abr-99	7	0.00	0.00	37,900.00	52,755.00	0.00	0.00	-3,453.33	-18,601.84	0.00	-26,156.51	
may-99	8	0.00	0.00	71,520.00	54,600.00	0.00	-355,075.12	-23,309.95	-125,562.43	-425,200.97	-176,556.47	
jun-99	9	361,681.01	64,531.58	20,900.00	46,200.00	0.00	-300,448.18	-12,690.97	-68,361.77	-359,785.44	-96,125.19	
jul-99	10	656,422.74	424,909.44	0.00	18,300.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
ago-99	11	1,128,459.69	789,212.99	0.00	700.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
sep-99	12	169,422.55	5,658.89	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	

Al llevar a cabo una simulación el programa produce una serie de archivos de salida entre los cuales se encuentran el del establecimiento del modelo físico y el modelo de cálculo definidos a partir de los datos de entrada previamente ingresados, a su vez se genera el archivo de series de resultados de los parámetros de control seleccionados "avres.txt", en el que cada fila de resultados representa un paso de tiempo, y en cada fila los resultados están ordenados con el mismo orden en que se introdujeron los datos de parámetros de control, correspondiendo una columna por parámetro.

En los resultados de parámetros de control cada línea representa un paso de tiempo, cada dato es el resultado seleccionado para ese paso de tiempo. Los datos en cada línea están ordenados igual que fueron ordenados en la definición de parámetros de control para el proceso de formación del modelo de cálculo. De acuerdo al tipo de resultados, las unidades pueden venir dados en:

- metros (para niveles en una o varias celdas),
- m³ (para volumen almacenado)
- m³/día (para caudal de salida por un contorno).

En cuanto a los resultados de alturas piezométricas en las celdas el programa escribe las series de alturas piezométricas en todas las celdas activas. Estos resultados se encuentran en el archivo "alturas.txt". Este archivo contiene en cada fila las alturas para cada paso de la simulación. Cada columna contiene los niveles para cada celda activa ordenadas según la numeración de las mismas.

A partir de los resultados que se obtengan en la simulación se procede a la etapa de calibración donde se comparan los valores obtenidos del sondeo piezométrico de 2007 y 2014 con los descritos en la simulación de niveles por parte del modelo.

El proceso de calibración puede resultar paulatino y muy complejo ya que la caracterización del acuífero por celdas dificulta el determinar de forma ágil el valor adecuado de los parámetros hidrogeológicos, teniéndose la calibración simultanea de una cantidad considerable de celdas las cuales deben calibrarse por cada parámetro dentro del modelo.

6.7 Modelación con cambio climático.

Simulación con los datos climatológicos correspondientes a los escenarios de cambio climático del CMIP5 en el modelo hidrológico superficial y subterráneo, con el fin de encontrar de manera numérica y gráfica el grado de afectación al recurso hídrico dentro de cada escenario en comparación con el comportamiento esperado si no existiese alteración.

6.8 Análisis de resultados.

Determinar si es significativo el efecto del calentamiento global en la cantidad de agua subterránea disponible en los acuíferos estudiados a través de la comparación de las modelaciones con los datos históricos y proyectados, y de ser así determinar a futuro el comportamiento hidrológico de la cuenca y el acuífero.

7. Resultados

7.1 Caracterización de la zona

A continuación se presenta el producto de la aplicación de la metodología comenzando con la caracterización de los sistemas estudiados por medio de diversos mapas en los que se ubica la zona estudiada y se muestra la composición de la misma respecto a distintas ramas de la ciencia, comenzando por la ubicación geográfica de la cuenca y acuíferos analizados, presentes en la región centro norte del estado de Michoacán (figura 7.1), así como las propiedades geomorfológicas de la cuenca en la tabla 7.1.

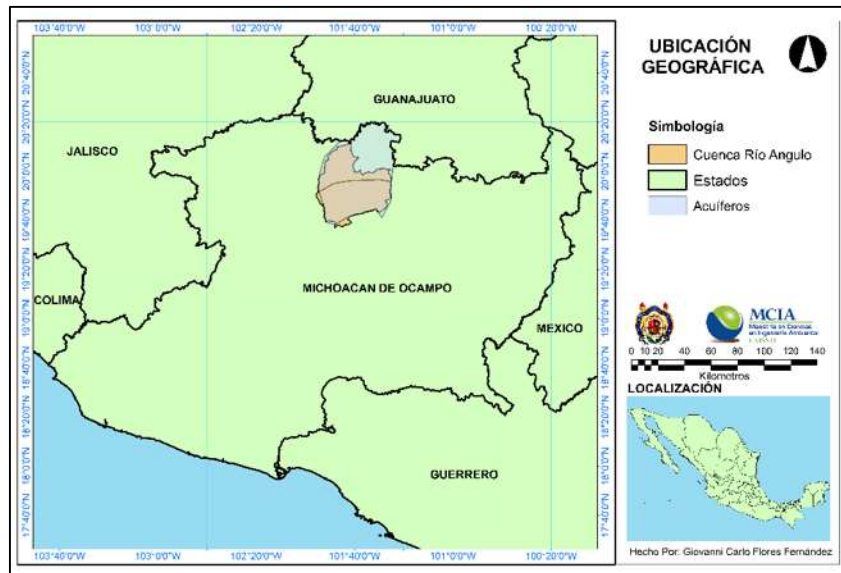


Figura 7. 1. Ubicación Geográfica de la Zona de Estudio

Tabla 7. 1 Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca del Río Angulo

Parámetros Geomorfológicos de la Cuenca						
Area (km ²)	Perimetro (km)	Zmin (km)	Zmax (km)	Centroide		Pendiente media(%)
				X	Y	
2088.74	354.185	1670	3385	220743	2201990	11.2926388

Se muestran de igual manera los sistemas estudiados a nivel municipal (figura 7.2), identificándose 12 municipios que pueden incurrir en el funcionamiento del medio, con respecto a la administración de los recursos hídricos en el país (figura 7.3) que se ubica en la región hidrológica Lerma Santiago.

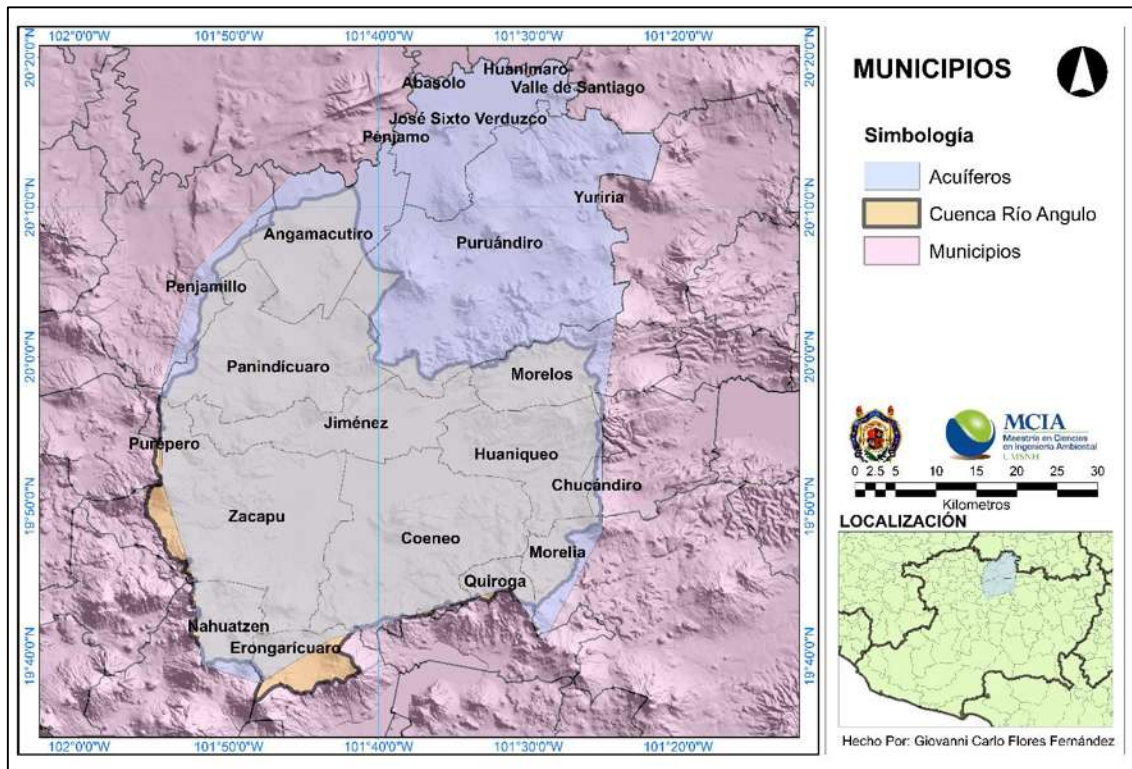


Figura 7. 2. Municipios comprendidos dentro de la zona de estudio

A partir del MDE de la región y las herramientas de hidrología de ArcMap es posible determinar la dirección, acumulación y orden de corrientes presentes en la cuenca del río Angulo, como se muestra en la figura 7.4 denotándose que el orden principal de corriente corresponde a los valores de 1 a 3 siendo estas en su mayor parte ríos perenes, así mismo a partir de los temas de información espacial para México generada por diferentes dependencias de gobierno se determinó el relieve (figura 7.5) cuyas elevaciones varían de 1669 a 3399 msnm, así mismo el tipo y uso de suelo (figura 7.6 y 7.7) , así como el clima que comúnmente se ha registrado (figura 7.8).

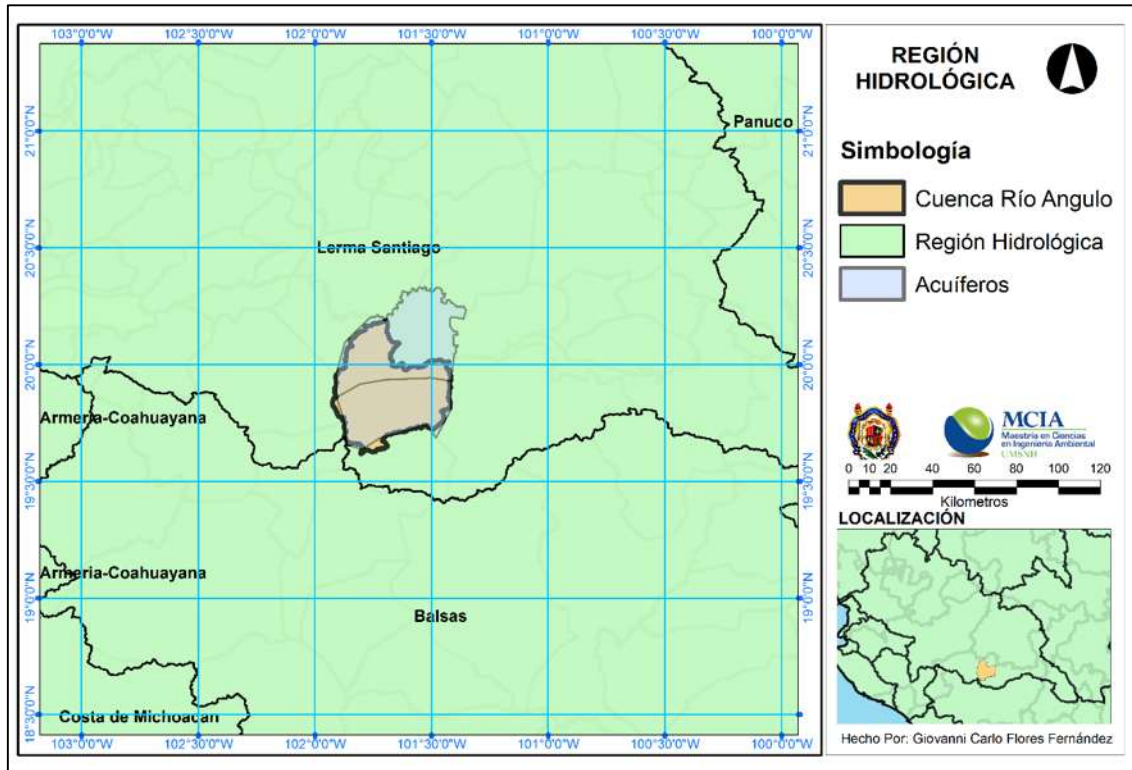


Figura 7. 3. Ubicación de la cuenca del Río Angulo y los Acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz dentro de la Región Hidrológica Lerma Santiago.

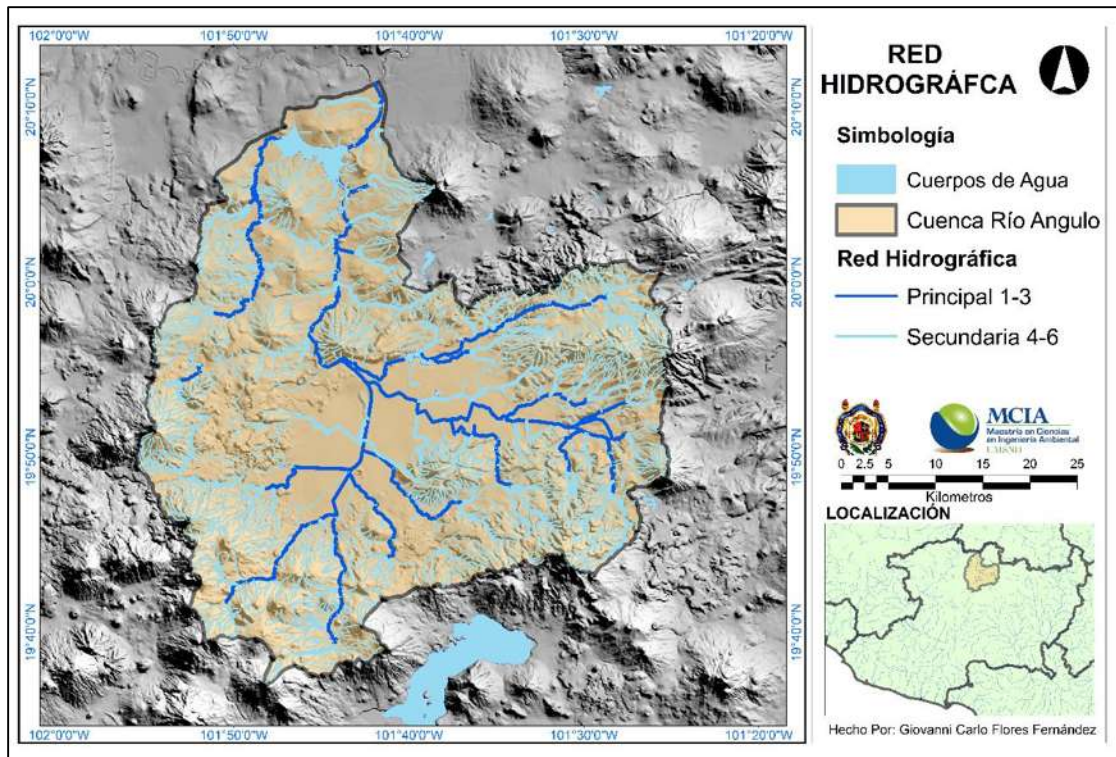


Figura 7. 4. Escurrimientos principales y secundarios dentro de la cuenca

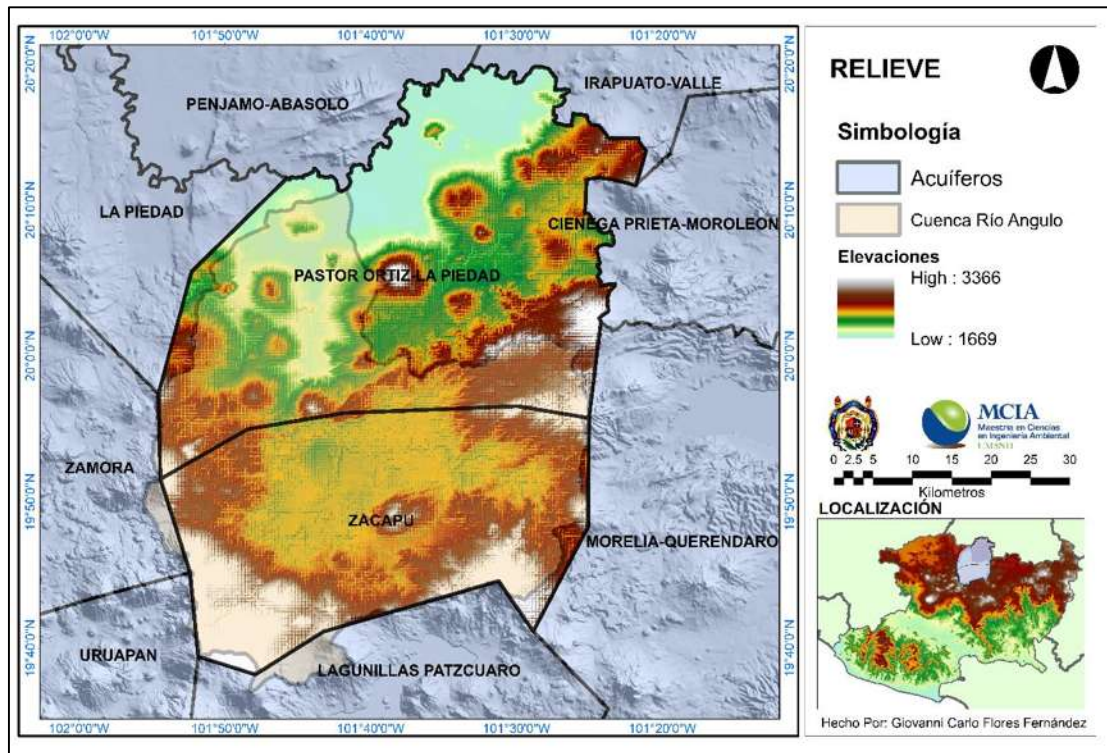


Figura 7. 5. Elevaciones dentro del sistema de cuenca y acuíferos

Se distingue en la figura 7.6 que la agricultura es uno de los principales usos del suelo de la región destacándose el de riego y temporal.

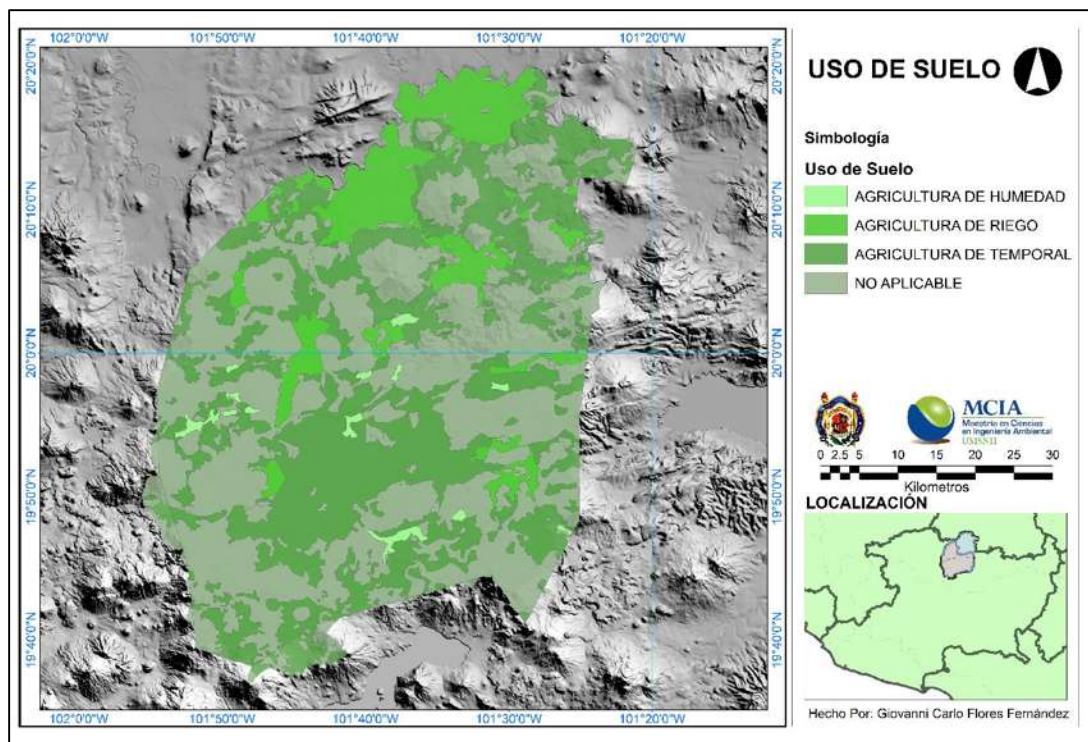


Figura 7. 6. Uso de suelo dentro de la región de cuenca y los acuíferos

Con respecto a los tipos de suelos se distinguen solo 3 tipos de acuerdo a la información de INEGI los cuales son el Andosol, Feozem y Vertisol (figura 7.7).

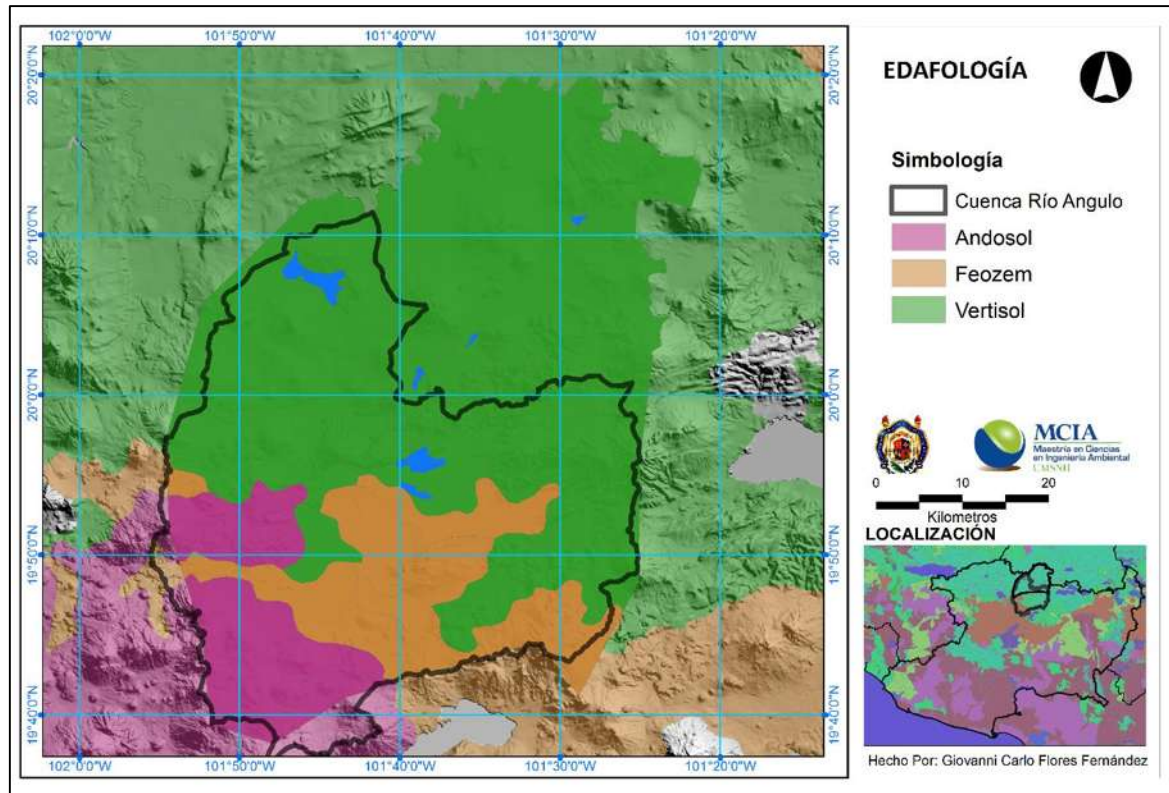


Figura 7. 7. Tipo de suelo dentro de la región de cuenca y los acuíferos

De acuerdo a la cartografía se muestra que la geología de manera general tiene una composición basáltica y andesítica con alternancia de derrames, brechas y piroclásticos finos a medios, aluviales, lacustres y areniscas (figura 7.8).

Se han distinguido 5 tipos de clima en la cartografía, prevaleciendo el templado, teniéndose al norte zonas semicalidas y semifrías al sur (figura 7.9), de acuerdo a la clasificación Köeppen (García, 1981) se describen como:

(A)C(wo) – Clima semicálido del grupo C con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T menor a 43.2 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual. El símbolo (A) denota la tendencia hacia el grupo cálido.

(A)C(w1) - Clima semicálido subhúmedo del grupo C con temperatura media anual mayor de 18°C, temperatura del mes más frío menor de 18°C y temperatura del mes más caliente mayor de 22°C. Precipitación del mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% anual. El símbolo (A) denota la tendencia hacia el grupo cálido.

C(w1) – Clima templado subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T entre 43.2 y 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5% al 10.2% del total anual.

C(w2) – Clima templado subhúmedo con lluvias en verano; temperatura media anual entre 12°C y 18°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano con índice P/T mayor de 55 y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

Cb(w2) - Semifrío con verano fresco largo; temperatura media anual entre 5°C y 12°C, temperatura del mes más frío entre -3°C y 18°C y temperatura del mes más caliente bajo 22°C. Precipitación en el mes más seco menor de 40 mm; lluvias de verano y porcentaje de lluvia invernal del 5 al 10.2% del total anual.

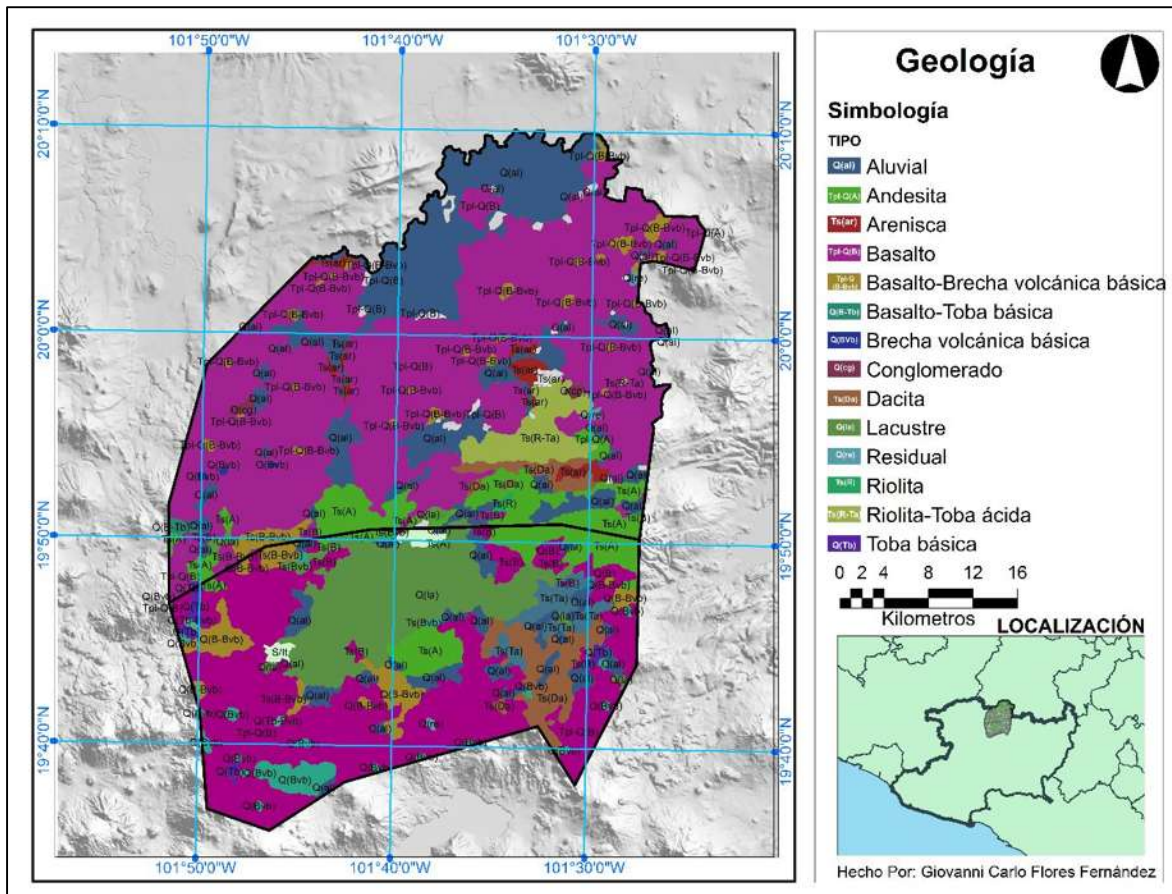


Figura 7. 8. Geología presente en la región estudiada

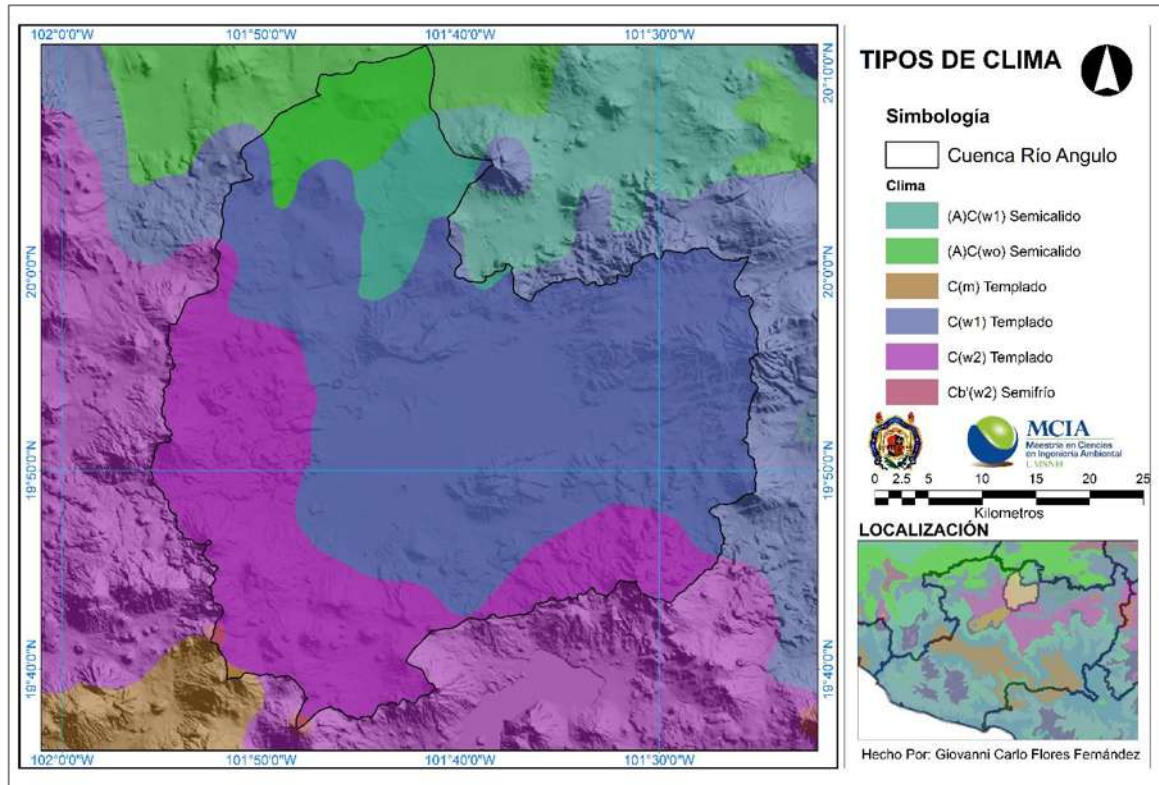


Figura 7. 9. Tipos de clima en la Cuenca del Río Angulo

7.2 Recopilación de datos

Con el fin de obtener las demandas del recurso hídrico se requiere conocer la población servida, a través de la información espacial proveniente de CONABIO sobre las poblaciones en México y el uso de SIG fue posible ubicar las localidades que se encuentran dentro de los límites determinados por los sistemas de cuenca y acuíferos (figura 7.9), teniéndose 264 localidades dentro de 12 municipios considerados para la determinación de la demanda urbana de recurso hídrico.

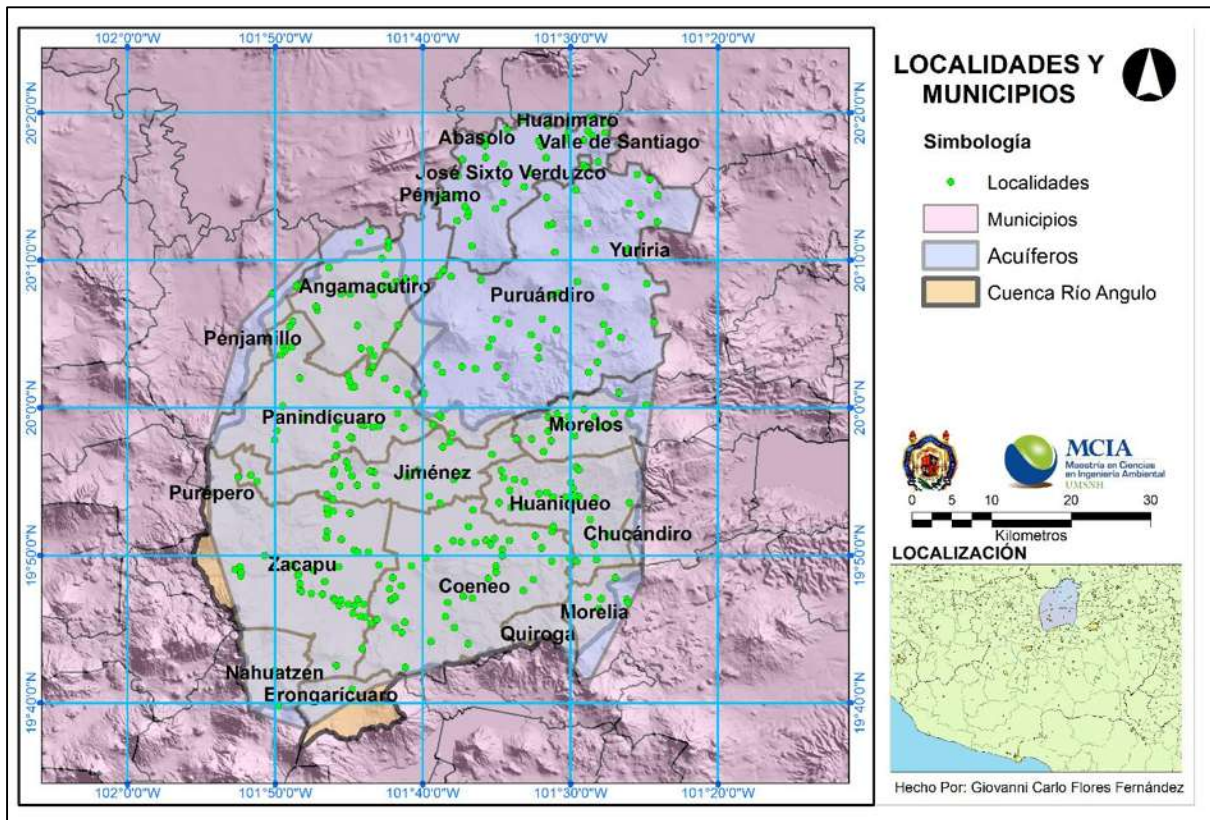


Figura 7. 10. Poblaciones dentro del área de estudio

Donde los municipios de Puruándiro, Panindicuaro, Villa Jimenez y Huaniqueo quedan comprendidos dentro de los sistemas en su totalidad contemplándose a su vez las localidades en estos, por otra parte se encuentran en menor extensión o en parte Nahuatzen, Erongaricuaro, Zacapu, Quiroga, Morelos, Morelia aportando parte de sus poblaciones y existen también pequeñas porciones de los municipios de Purepero, Penajamo, Abasolo, Huanímaro Valle de Santiago y Yuriria contenidos dentro de los sistemas cuya zona es tan pequeña que no se presenta ninguna localidad en ellos por tanto no son considerados en la determinación de las proyecciones de población (tabla 7.2).

Tabla 7. 2 Información de censos de acuerdo al INEGI

Estado	Municipio	Localidades	Censos				
			1990	1995	2000	2005	2010
Michoacán	Angamacutiro	24	13636	13778	13364	10995	13140
	Coeneo	42	27683	24766	23164	19457	20461
	Erongarícuaro	2	1318	1242	1141	968	1054
	Huaniqueo	27	12749	10785	10118	7613	7946
	Jiménez	25	17474	15239	14393	12778	13223
	Morelia	8	4195	4050	4246	3904	4475
	Morelos	21	9603	9193	8169	6345	6068
	Nahuatzen	1	1851	1840	1632	1269	1403
	Panindícuaro	32	21342	18062	18015	15380	15452
	Puruándiro	29	47897	50729	49216	45781	48373
	Zacapu	45	61653	67039	67412	68856	71095
José Sixto Verduzco	8	5091	4974	4312	3632	3835	
Total	264						

El incremento de la población se plantea en los horizontes de los escenarios de cambio climático para 30 y 90 años de acuerdo a las proyecciones de INECC, seleccionando las proyecciones de población que mejor describan la tendencia de crecimiento o decaimiento. Con estas proyecciones es posible determinar las demandas a nivel local, municipal y de cuenca.

Tabla 7. 3 Proyecciones de población por municipio

Municipio	Método	Población Proyectada			
		2015	2039	2075	2099
Angamacutiro	Geométrico	13,016	12,421	11,528	10,933
Coeneo	Curva Exponencial	17,782	11,848	6,444	4,294
Erongarícuaro	Geométrico	998	766	515	396
Huaniqueo	Curva Exponencial	6,553	3,521	1,387	745
Jiménez	Geométrico	12,338	8,850	5,375	3,855
Morelia	Curva Exponencial	4,287	4,482	4,790	5,008
Morelos	Geométrico	5,414	3,132	1,378	797
Nahuatzen	Geométrico	1,311	948	583	421
Panindícuaro	Curva Exponencial	13,754	9,338	5,225	3,547
Puruándiro	Mínimo Cuadrado	48,127	47,691	47,037	46,601
Zacapu	Aritmético	73,456	84,786	101,782	113,112
José Sixto Verduzco	Geométrico	3,576	2,555	1,544	1,103
	Suma	200,611	190,338	187,587	190,813

Tabla 7. 4 Demandas proyectadas de acuerdo al método estadístico seleccionado.

Municipio	Método	Demandas (Hm ³ /año)			
		2015	2039	2075	2099
Angamacutiro	Geométrico	0.97	0.93	0.86	0.82
Coeneo	Curva Exponencial	1.27	0.84	0.46	0.31
Erongarícuaro	Geométrico	0.07	0.05	0.04	0.03
Huaniqueo	Curva Exponencial	0.47	0.25	0.10	0.05
Jiménez	Geométrico	0.88	0.63	0.38	0.27
Morelia	Curva Exponencial	0.31	0.35	0.40	0.43
Morelos	Geométrico	0.39	0.22	0.10	0.06
Nahuatzen	Geométrico	0.09	0.07	0.04	0.03
Panindícuaro	Curva Exponencial	0.98	0.66	0.37	0.25
Puruándiro	Mínimo Cuadrado	3.60	3.57	3.52	3.49
Zacapu	Aritmético	5.23	6.03	7.24	8.05
José Sixto Verduzco	Geométrico	0.27	0.19	0.12	0.08
Suma		14.51	13.81	13.63	13.87

En cuanto a las demandas industriales para los acuíferos estudiados la CNA reporta lo siguiente:

Tabla 7. 5 Volúmenes de extracciones de tipo industrial en los acuíferos de Zacapu y Pastor Ortíz

Acuífero	Título	Titular	Volumen extracción que ampara el título (Hm ³ /año)
Zacapu	4MCH105768/ 12FMGE96	FIDEICOMISO DE PARQUES INDUSTRIALES DE MICHOACAN	0.12
	08MCH154394 /12FMDL14	DERIVADOS MACROQUIMICOS S.A. DE C.V.	0.03
Pastor Ortíz	4MCH101185/ 12FMGE94	INDUSTRIAS ALIMENTICIAS CLUB, S. A. DE C.V.	0.04
	08MCH123830 /12FPDL08	PRODUCTORES DE DULCES Y GALLETAS CABADAS DE LA PIEDAD S.A. DE C.V.	0.01
Volemen Total			0.21

Mientras que para la demanda agrícola se considera al distrito de riego 087 Rosario-Mezquite que cuenta con un área de influencia de 63,217.45 ha (Figura 7.10) distribuidas entre 16,202 usuarios. El abastecimiento de agua se hace mediante tres sistemas hidráulicos independientes: Zacapu, Rosario-Mezquite y Pastor Ortiz, donde las áreas de riego son mostradas en la tabla 7.6.

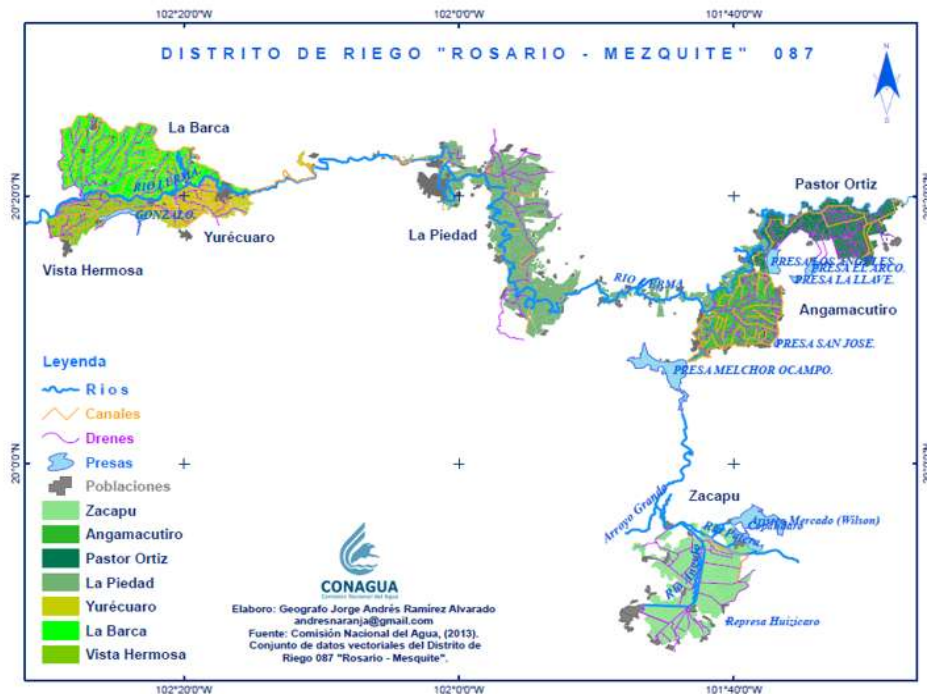


Figura 7. 11. Área de influencia del distrito de riego 087

Tabla 7. 6 Áreas dominadas y regables por módulo

Módulo	Dominada (Ha:)	Regable (Ha)
Angamacutiro	7686.3	7686.3
La Piedad	16110.08	16110.08
Yurécuaro	4241.74	4241.74
Vista hermosa	3974.34	3949.43
La Barca	12836.52	12836.52
Pastor Ortiz	7233.22	7233.22
Zacapu	11160.15	11160.15
Total	63242.35	63217.45

El sistema Zacapu abarca el Modulo VII, se encuentra en la parte alta de la Cuenca del Río Angulo, donde el riego es principalmente por irrigación, alimentado por los manantiales, y parte del riego es por gravedad, alimentado por las Presas de Copándaro y Aristeo Mercado.

El Sistema Pastor Ortiz que corresponde al Modulo VI, aprovecha las aguas de la Presa Solís y es alimentado por el Canal Santa Ana que inicia en la derivadora Markazuza sobre el Rio Lerma.

El Sistema Rosario-Mezquite es el más grande, abarca a los Módulos I, II, III, IV, y V y se abastece principalmente de la Presa Melchor Ocampo, complementándose con la Presa Gonzalo.

La red principal de conducción y distribución del Distrito de Riego consta de 491.652 Km de canales con capacidad mayor a 0.5 m³/seg, la conducción y distribución principal es entre los Módulos es el cauce del Rio Angulo y del Rio Lerma.

El concentrado de las capacidades de las presas Aristeo Mercado, Gonzalo, Copándaro y Melchor Ocampo que forman parte del distrito de riego se presentan en la tabla 7.7.

Tabla 7. 7 Capacidades de las presas de las que depende el distrito de riego

Nombre	Capacidad N.A.M.E	Capacidad N.A.M.O	Capacidad Conservación	Capacidad Muerta	Volumen Útil
A. Mercado	19	18.75	15	0.25	18.75
P. Gonzalo	9.5	9	7	0.14	8.886
Copandaro	6.5	6.25	5	0.25	6
P. Melchor	250	230	200	15	185

7.3 Estaciones Meteorológicas

A partir de la base de datos de CLICOM las estaciones meteorológicas que formaron parte del estudio fueron identificadas espacialmente a través del uso del complemento de AUTOCAD GDCLIMEX y el uso de SIG, teniéndose un total de 26 estaciones (figura 7.11), de las cuales se realizó una discretización con el fin de identificar cuales proporcionarían una adecuada descripción de precipitación y temperatura dentro del área de la cuenca, proporcionándose las características de las estaciones en la tabla 7.8.

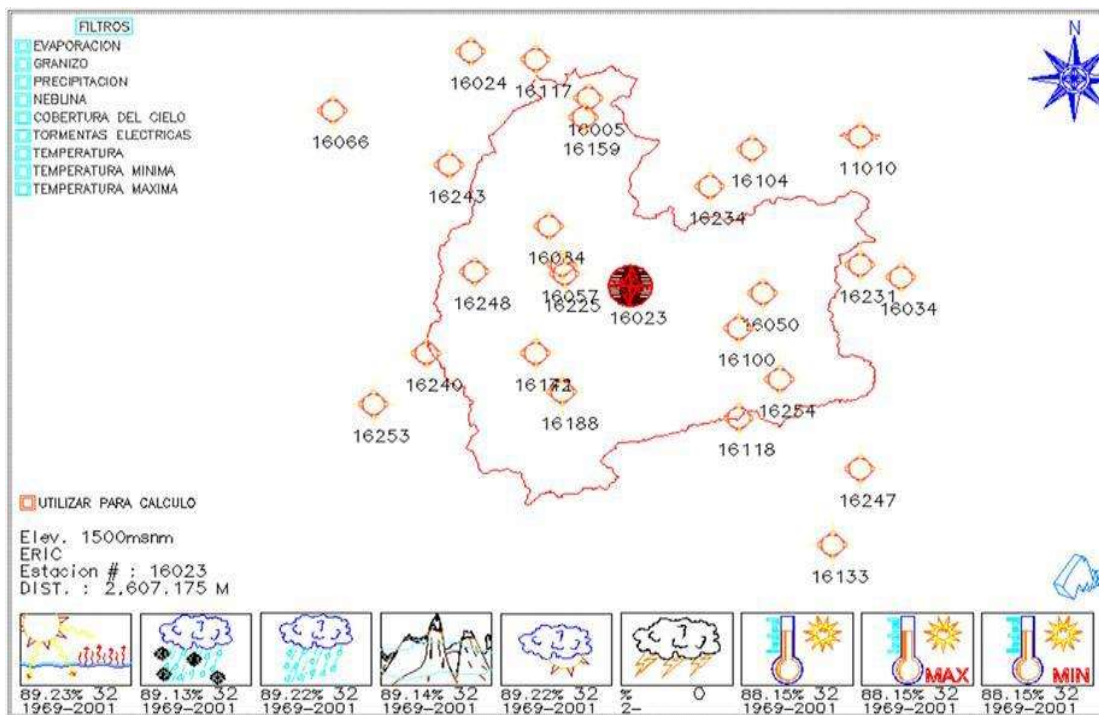


Figura 7. 12. Estaciones meteorológicas para la cuenca del Río Angulo

A partir de esta información se procedió a realizar la selección de las estaciones principales a partir de la ponderación de peso para las variables consideradas.

Tabla 7. 8 Información descriptiva de las estaciones meteorológicas para la Cuenca del Río Angulo

CODIGO	COORDENADAS GEO		COORDENADAS UTM			N° DE DATOS	PERIODO DE INFORMACION	% DE VACIOS
	LAT	LONG	X (m)	Y (m)	Z (msnm)			
16066	20.3386	-102.0247	810,668	2,251,757	1700	8	1961-1968	58.33
16240	19.8222	-101.9292	193,144	2,194,468	1100	15	1981-2003	45.76
16231	19.9389	-101.3833	250,543	2,206,490	2070	16	1982-2003	37.31
16253	19.7375	-102.0792	806,137	2,185,070	1850	17	1982-1999	16.43
16247	19.675	-101.3917	249,250	2,177,280	1708	18	1981-2005	33.29
16243	20.0611	-101.8889	197,824	2,220,857	1920	19	1981-2004	41.06
16234	20.0389	-101.575	230,638	2,217,861	1550	20	1981-2002	9.46
16034	19.8867	-101.3356	255,457	2,200,640	1500	21	1969-2002	44.42
16225	19.9231	-101.7469	212,435	2,205,322	1980	23	1980-2003	1.91
16254	19.7833	-101.4778	240,394	2,189,402	2350	23	1982-2004	0
16248	19.9203	-101.8583	200,761	2,205,206	1523	24	1981-2004	0
16188	19.7667	-101.7417	212,699	2,187,991	2500	29	1973-2003	7.66
16057	19.9225	-101.7467	212,455	2,205,255	1250	30	1970-1999	4.47
16023	19.8922	-101.2136	268,244	2,201,076	1500	32	1969-2001	10.78
16159	20.1286	-101.7489	212,600	2,228,086	1720	32	1972-2003	5.84
16142	19.8053	-101.795	207,181	2,192,357	1980	34	1968-2001	0.58
16133	19.0536	-101.4206	245,254	2,108,516	795	36	1969-2004	50
16118	19.6731	-101.5561	232,002	2,177,321	2056	39	1963-2003	6.96
11010	20.1011	-101.3958	249,491	2,224,470	1850	42	1962-2004	11.21
16100	19.8658	-101.5189	236,222	2,198,602	1989	47	1947-1993	91.67
16084	19.975	-101.7594	211,221	2,211,092	1638	48	1946-2002	19.99
16117	20.2019	-101.8269	204,578	2,236,342	1700	49	1946-1997	12.09
16104	20.0881	-101.5158	236,916	2,223,215	1994	51	1942-1997	21.15
16050	19.8992	-101.5047	237,764	2,202,279	1950	55	1948-2004	4
16005	20.1497	-101.7083	216,885	2,230,353	1500	57	1923-1980	6.61
16024	20.2072	-101.8617	200,950	2,236,991	1750	70	1934-2003	1.15

Determinándose en la tabla 7.9 las estaciones que por su mayor puntaje de selección de variables son consideradas para formar parte del estudio.

Tabla 7. 9 Selección de estaciones meteorológicas principales para la Cuenca del Río Angulo

Estación	No.Años	%Vacios	Int. Tiempo	Suma	Estación	No.Años	%Vacios	Int. Tiempo	Suma
11010	3	8	3	14	16159	2	8	4	14
16005	4	8	1	13	16188	2	8	4	14
16171	3	8	5	16	16247	2	8	6	16
16024	4	8	1	13	16240	1	7	6	14
16100	3	8	5	16	16234	1	8	5	14
16050	4	8	2	14	16103	2	8	5	15
16057	2	8	4	14	16027	4	8	6	18
16155	2	8	6	16	16120	4	8	6	18
16084	3	7	2	12	16248	2	8	5	15
16231	2	7	6	15	16254	1	8	5	14
16104	3	7	2	12	16243	2	5	6	13
16117	3	7	2	12	11001	4	8	6	18
16118	2	8	3	13	16225	1	8	5	14
16034	2	8	5	15	16023	2	8	4	14
16142	2	8	4	14	11151	2	8	6	16

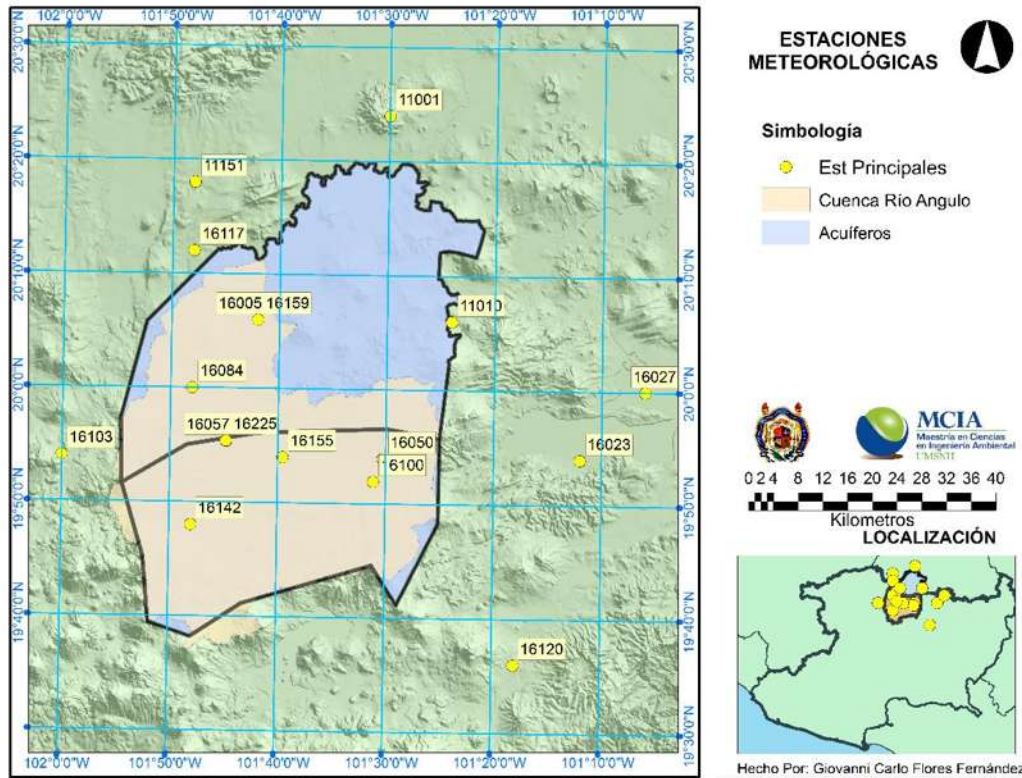


Figura 7. 13. Ubicación espacial de las estaciones principales seleccionadas

Los resultados para las pruebas de homogeneidad a las estaciones principales se describen a continuación.

Tabla 7. 10 Resultados de pruebas de homogeneidad

Estación	Secuencias	Helmert
11001	Homogéneo	Homogéneo
11010	Homogéneo	Homogéneo
11151	Homogéneo	Homogéneo
16005	Homogéneo	Homogéneo
16023	Homogéneo	Homogéneo
16027	Homogéneo	Homogéneo
16050	Homogéneo	Homogéneo
16057	Homogéneo	Homogéneo
16084	Homogéneo	Homogéneo
16100	Homogéneo	Homogéneo
16103	Homogéneo	Homogéneo
16117	Homogéneo	Homogéneo
16120	Homogéneo	Homogéneo
16142	Homogéneo	Homogéneo
16155	Homogéneo	Homogéneo
16159	Homogéneo	Homogéneo
16225	Homogéneo	Homogéneo

La prueba de independencia de Anderson es aplicada a una de las estaciones principales se muestra en las tabla 7.11 y en la figura 7.13. En cuanto al resto los resultados se muestran en la tabla 7.12.

Tabla 7. 11 Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación para la estación meteorológica con clave 16050

rk	Desfase					
	1	2	3	4	5	6
Límite Superior	-0.135418135	-0.063647238	0.132460788	-0.22552573	-0.02526719	0.1696811
Límite Inferior	0.269376807	0.275002941	0.281004902	0.2874267	0.2943199	0.30174538

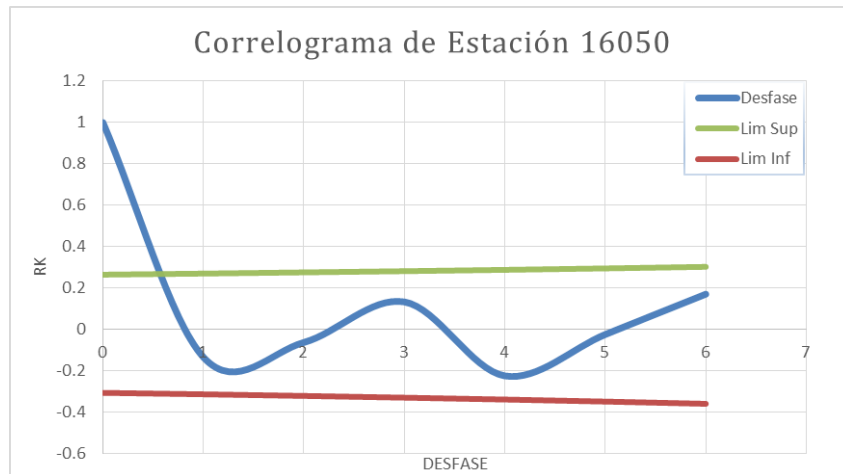


Figura 7. 14. Correlograma de estación 16050 mostrando la independencia temporal de acuerdo a los límites de Anderson

Tabla 7. 12 Resultados de la prueba de Independencia de las estaciones seleccionadas

Estación	Anderson	Estación	Anderson
11001	Independiente	16100	Independiente
11010	Independiente	16103	Independiente
11151	Independiente	16117	Independiente
16005	Independiente	16120	Independiente
16023	Independiente	16142	Independiente
16027	Independiente	16155	Independiente
16050	Independiente	16159	Independiente
16057	Independiente	16225	Independiente
16084	Independiente		

Tabla 7. 13 Comparación de estadísticos antes y después del llenado de la estación 16050

Estadístico	Original	Llenada
Media	857.51339	859.180435
Desv. Estándar	163.069965	150.528748
Sesgo	0.11607013	0.03834579

7.4 Estaciones Hidrométricas

Dentro de los límites de la cuenca se ha ubicado la estación 12415 sobre el río de la Patera al sur de Huaniqueo de los Morales, la estación 12014 en Villa Jiménez y la 12713 al este de Angamacutiro se encuentran sobre el río Angulo (figura 7.15).

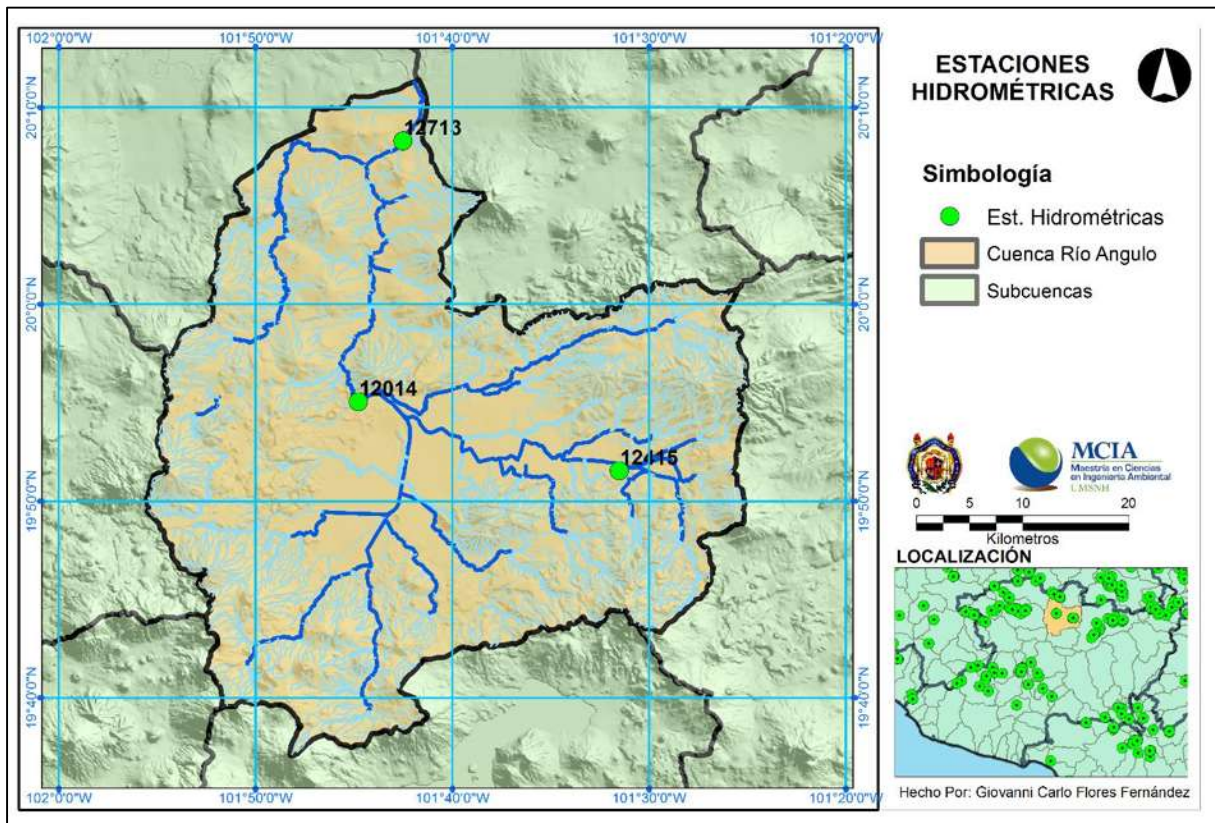


Figura 7. 15. Ubicación espacial de las estaciones hidrométricas

Estas fueron seleccionadas sobre otras estaciones cercanas principalmente por la cantidad de datos registrados que mostraban; en la tabla 7.14 se describen algunas de sus características.

Tabla 7. 14 Estaciones hidrométricas seleccionadas de acuerdo a su ubicación en la cuenca.

Est. Hidrométricas	NOMBRE	CORRIENTE	ESTADO	Latitud	Longitud
12014	PASARELA VILLA JIMENEZ	RIO ANGULO	MICHOACAN	19.923611	-101.745833
12713	ANGAMACUTIRO II	RIO ANGULO	MICHOACAN	19.858333	-101.525
12415	PUENTE SAN ISIDRO	RIO DE LA PATERA	MICHOACAN	20.1375	-101.70833

Las series históricas de gastos de las estaciones anteriormente mencionadas obtenidas del BANDAS deben cumplir con un comportamiento dependiente, el cual es comprobado con el método de los límites de Anderson mostrado en la tabla 7.15 y figura 7.16 para la estación 12713, las estaciones 12014 y 12415 también mostraron un comportamiento dependiente.

Tabla 7. 15 Límites de Anderson y coeficiente de auto correlación de las estación hidrométrica 12713.

rk	Desfase					
	1	2	3	4	5	6
rk	0.46172831	0.36598865	0.76679651	0.53870821	0.60692077	0.52835561
Límite Superior	0.39340483	0.41194046	0.43334861	0.45838205	0.488	0.52320907
Límite Inferior	-0.50451595	-0.53694046	-0.57620575	-0.62504872	-0.688	-0.77320907

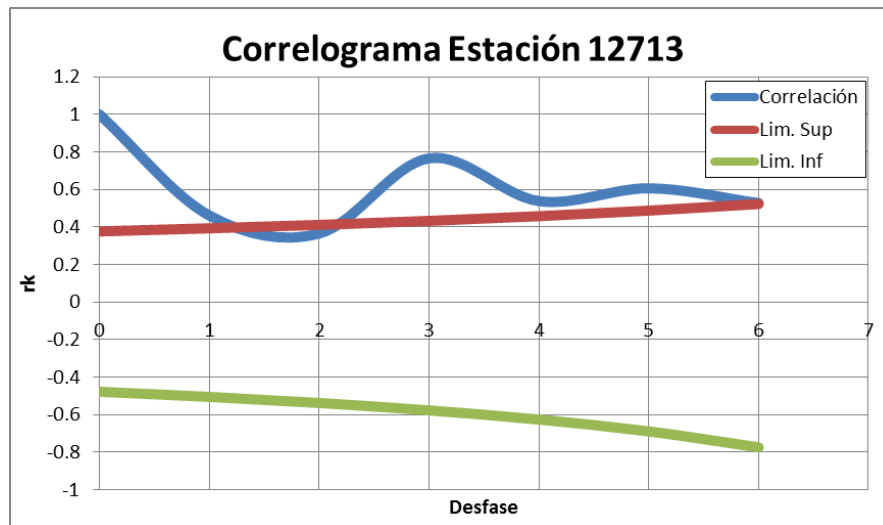


Figura 7. 16. Correlograma de dependencia de la estación hidrométrica 12713.

Una vez comprobada la dependencia de las series se procedió a determinar los valores de los meses sin medición y de manera similar a las estaciones meteorológicas se realizó la evaluación de los estadísticos básicos de las series de gasto, evaluando la media, el sesgo y la desviación estándar de las series antes y después del llenado.

Tabla 7. 16 Comparación de estadísticos básicos de la estación hidrométrica 12713

Estadístico	Original	Llenada
Media	218201.184	309511.8
Dev. Estándar	89491.947	81208.4994
Sesgo	0.6036523	-0.40385135

7.5 Piezometría

A partir de las coordenadas correspondientes a los aprovechamientos de agua subterránea sondeados en 2007 fue posible ubicar los pozos de la red de monitoreo dentro de los acuíferos estudiados como se muestra en la figura 7.17.

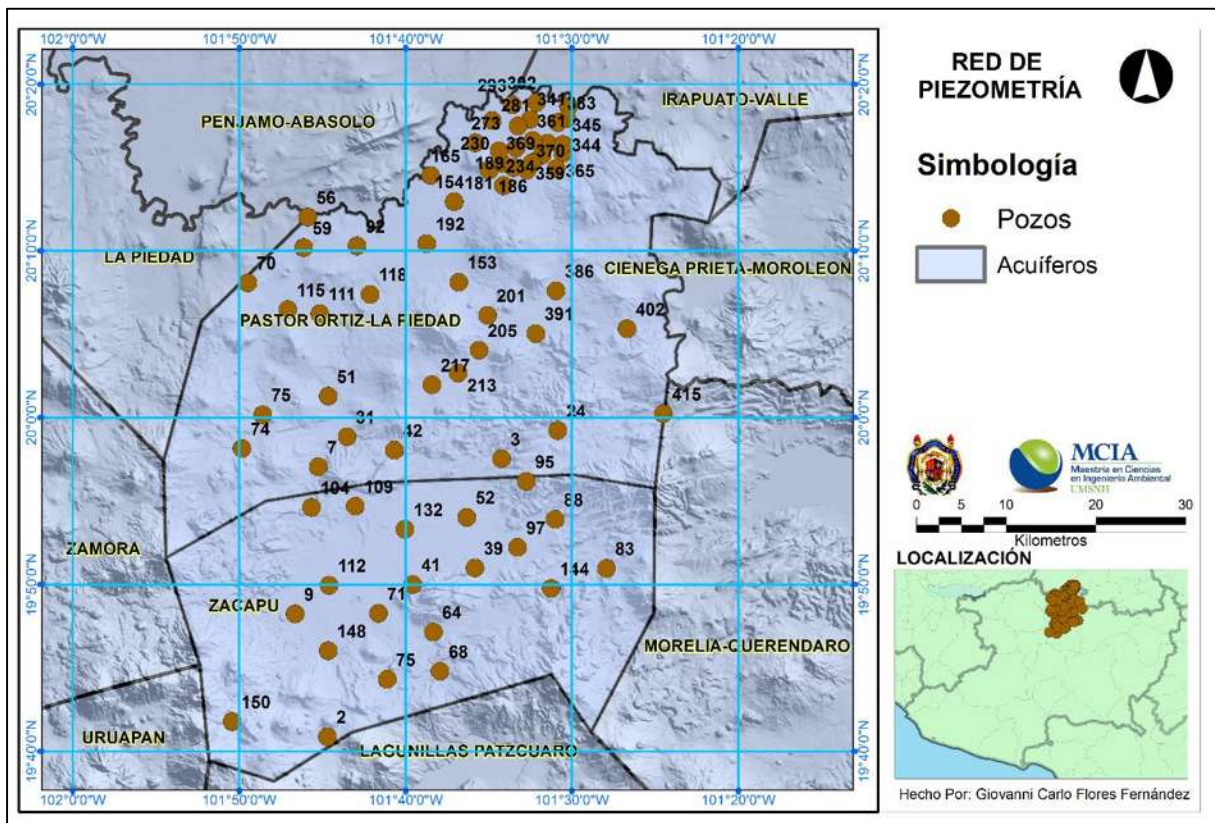


Figura 7. 17. Red de monitoreo de niveles piezométricos de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz.

En el mes de Junio de 2014 se realizó un trabajo de campo entre la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo y CONAGUA con el fin de obtener la piezometría en los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz a través del sondeo de los pozos que se consideraron en la red de monitoreo del 2007 y proveer una noción del cambio de los niveles estáticos.

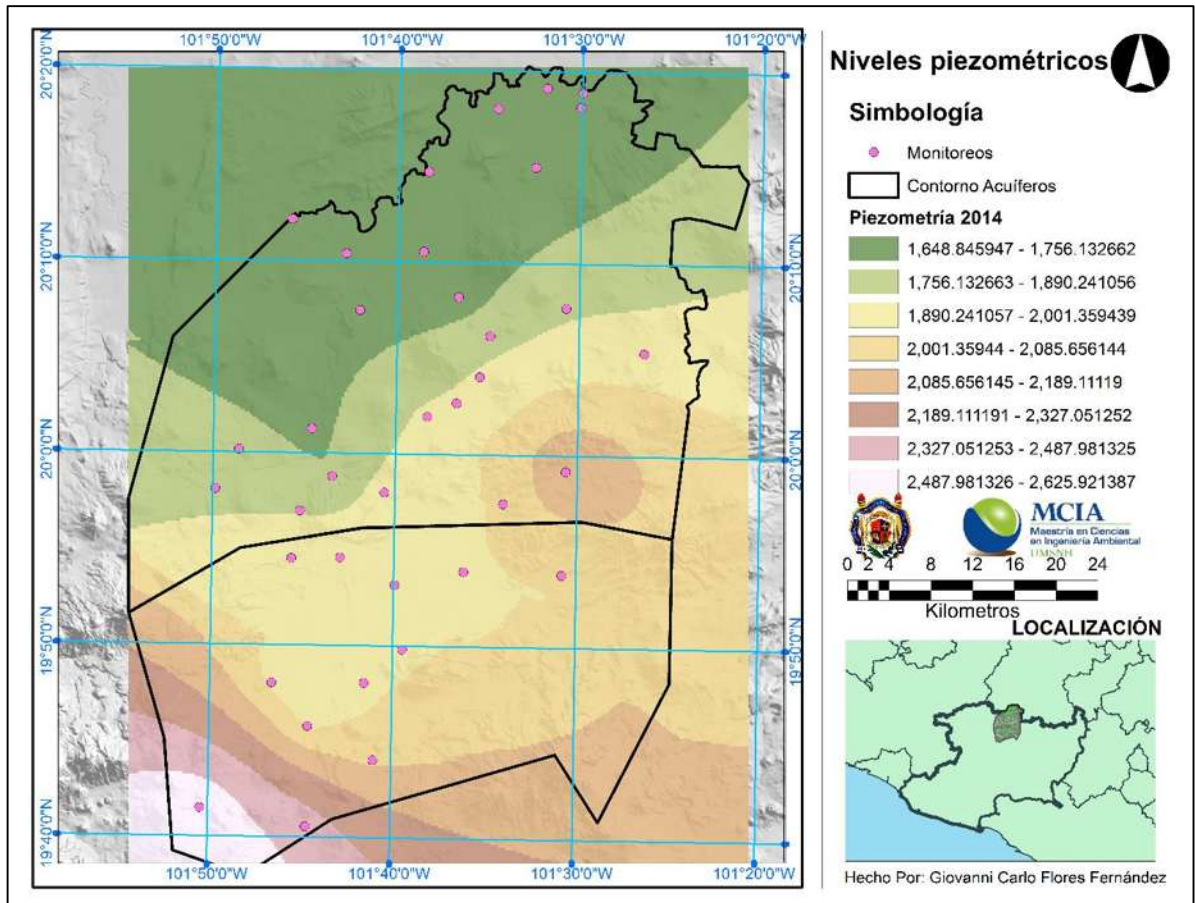


Figura 7. 18. Niveles piezométricos probables de acuerdo a los aprovechamientos medidos en 2014.

7.6. Series Meteorológicas con cambio climático

Al contar con las coordenadas que abarcan toda la extensión de los acuíferos fue posible determinar cuántas serían las estaciones de INECC cercanas que contienen series climatológicas afectadas por cambio climático teniendo en cuenta su ubicación.

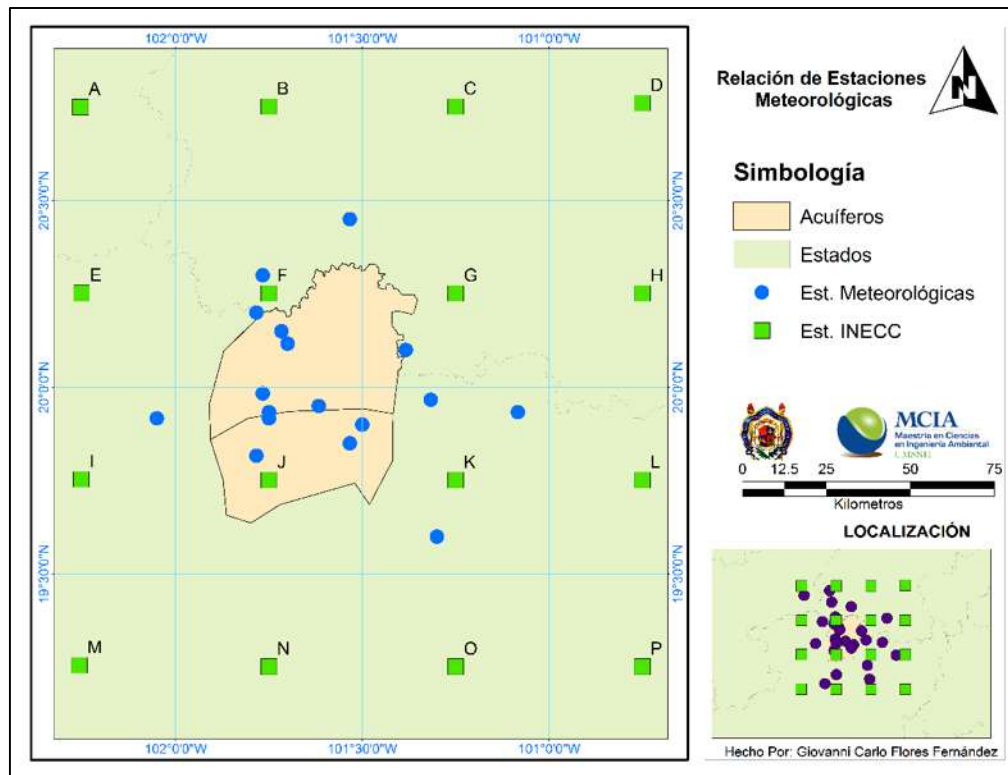


Figura 7. 19. Estaciones INECC seleccionadas para el estudio y visualizadas en ArcMap.

Tabla 7. 17 Coordenadas de las estaciones INECC.

Estación	X	Y	Estación	X	Y
A	161017	2297800	I	159032.6	2187336
B	213639.7	2296916	J	211798.2	2186155
C	265727.6	2296110	K	264221.8	2185382
D	317782.9	2296477	L	316631.4	2184763
E	160223.2	2242502	M	157445.1	2132170
F	212708	2241534	N	210910.3	2130778
G	264965.8	2240745	O	263495.7	2130021
H	317209.8	2240113	P	316067	2129416

A partir de la ubicación espacial de dichas estaciones en el SIG se determinó cuáles serían necesarias para llevar a cabo la transferencia de comportamiento de las series de datos para las modelaciones, se consideró para ello 16 estaciones con clave en orden alfabético de A hasta P (tabla 7.17).

A continuación se muestra el comportamiento general de las series de precipitación y temperatura de las estaciones seleccionadas.

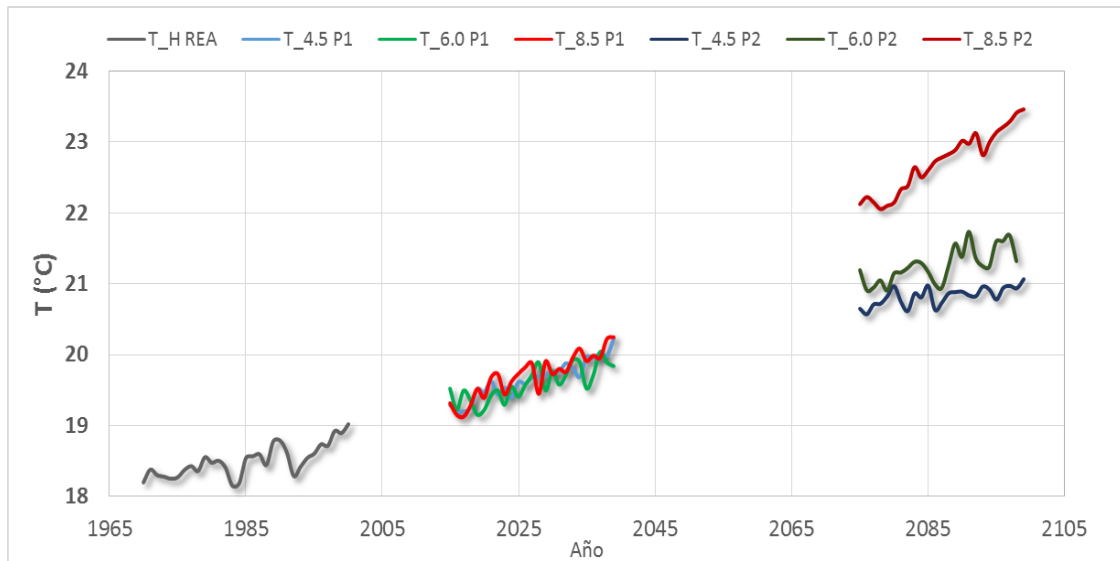


Figura 7. 20. Series históricas y proyecciones de temperatura media anual del INECC bajo los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

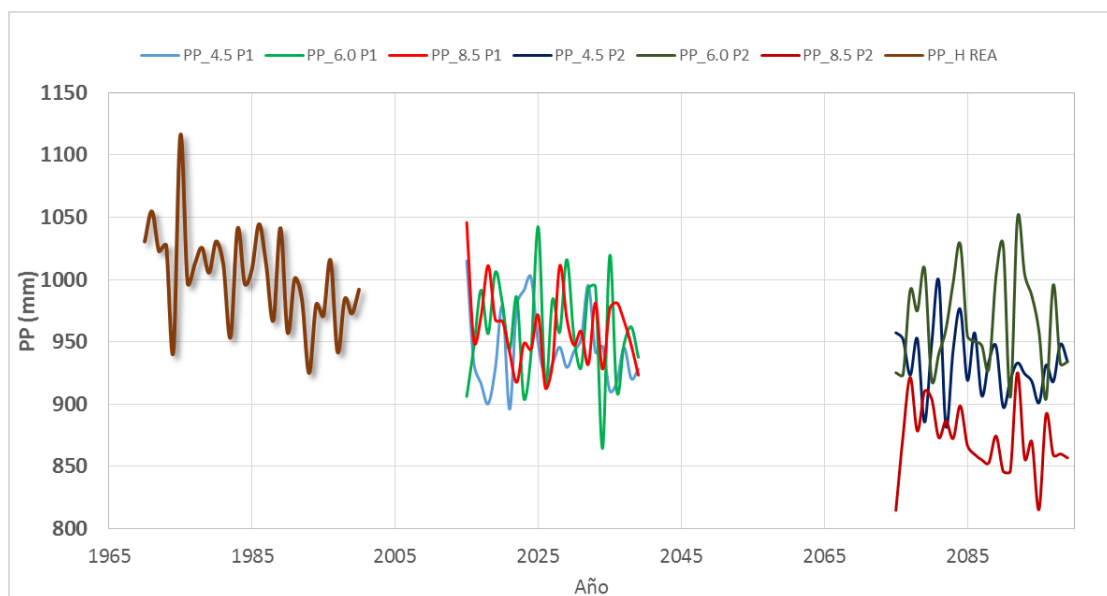


Figura 7. 21. Series históricas y proyecciones de PTA media del INECC bajo los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

De manera similar a las series de precipitación y temperatura de las estaciones meteorológicas se les aplico las pruebas de consistencia, mostrando ser independientes.

Siguiendo la metodología descrita para la obtención de la anomalía climática se determinaron los siguientes valores de temperatura y precipitación de cada escenario analizado:

Tabla 7. 18 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para corto plazo

Δ 4.5 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-8.53	-8.01	-7.55	-6.35	-9.02	-8.31	-7.48	-7.33	-8.82	-8.16	-7.22	-7.47	-7.92	-7.20	-5.69	-6.63
Febrero	-7.22	-7.47	-7.70	-7.04	-7.36	-7.60	-7.45	-7.54	-7.65	-7.65	-7.54	-7.83	-8.09	-7.58	-7.35	-7.62
Marzo	-5.58	-5.81	-6.04	-7.76	-5.20	-6.13	-6.58	-7.63	-5.45	-6.33	-6.63	-7.69	-5.50	-6.16	-6.28	-7.69
Abril	-2.54	-2.57	-2.79	-3.42	-2.54	-3.03	-3.38	-4.15	-2.82	-3.28	-3.78	-3.88	-3.69	-3.94	-4.39	-4.95
Mayo	-6.27	-7.02	-7.02	-5.92	-5.81	0.52	-0.70	-4.60	-6.44	-5.41	-6.03	-8.14	-4.49	-4.03	-4.63	-3.39
Junio	-2.99	-2.15	-1.79	-2.31	-3.80	-2.24	-2.40	-2.15	-4.49	-3.50	-3.24	-2.67	-6.71	-4.52	-3.39	-3.21
Julio	-12.31	-10.01	-10.94	-10.13	-12.05	-10.81	-9.90	-12.81	-15.53	-15.87	-9.55	-20.08	-18.54	-20.92	-22.58	-23.70
Agosto	-3.79	-1.49	-1.15	-0.39	1.03	2.90	2.63	0.05	-4.72	-1.17	6.28	-2.38	-6.00	-5.94	-6.09	-4.31
Septiembre	-2.72	-3.26	-2.89	-2.39	-1.05	-2.38	-2.96	-1.83	-2.20	-1.59	-1.21	-0.15	-7.21	-6.25	-2.94	-2.59
Octubre	-2.42	-2.79	-4.36	-3.18	-4.31	-3.91	-4.81	-2.98	-5.32	-5.50	-5.24	-3.85	-4.63	-4.50	-4.27	-3.17
Noviembre	-3.11	-3.38	-3.42	-3.56	-2.75	-2.85	-2.71	-2.67	-2.93	-2.26	-2.28	-0.33	-3.76	-2.95	-2.96	-2.55
Diciembre	-9.63	-8.65	-7.63	-7.74	-9.27	-8.64	-7.35	-7.27	-9.56	-8.60	-7.07	-5.96	-11.21	-9.61	-7.08	-6.06

Tabla 7. 19 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para largo plazo

Δ 4.5 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-12.00	-10.85	-9.64	-8.52	-11.87	-10.70	-9.45	-8.43	-11.73	-10.46	-9.15	-8.39	-11.64	-10.16	-7.85	-8.09
Febrero	-11.24	-11.21	-10.76	-9.23	-11.53	-11.59	-11.00	-10.01	-11.90	-11.55	-10.61	-9.65	-11.88	-10.68	-9.45	-9.16
Marzo	-6.68	-7.40	-7.71	-8.97	-7.22	-7.89	-8.19	-9.35	-7.03	-7.69	-8.11	-9.45	-6.58	-7.20	-7.56	-9.28
Abril	-3.36	-4.39	-5.46	-8.00	-3.60	-5.48	-6.11	-8.57	-4.32	-5.61	-6.21	-7.77	-5.02	-5.52	-5.96	-7.98
Mayo	-3.04	-3.70	-4.62	-6.43	-3.27	-4.57	-4.54	-4.64	-1.86	-3.99	-3.82	1.64	-5.13	-5.13	-5.28	-5.28
Junio	-2.83	-4.17	-3.73	-3.62	-4.01	-4.23	-0.13	-0.95	-5.06	-2.85	-1.15	-2.20	-21.48	-15.96	-11.04	-8.35
Julio	-18.98	-17.07	-18.52	-17.44	-17.78	-15.08	-16.20	-17.32	-23.70	-22.32	-17.38	-26.98	-29.09	-34.64	-36.56	-35.31
Agosto	-5.36	-4.66	-5.78	-5.80	1.83	1.94	0.07	-2.90	-3.50	0.58	7.25	-4.67	-4.44	-5.80	-6.12	-8.20
Septiembre	2.99	2.79	3.61	1.33	5.37	3.33	0.57	1.05	6.49	7.78	5.39	10.14	8.17	11.75	13.43	10.99
Octubre	0.49	0.38	0.90	0.77	-1.89	-1.30	-2.10	-1.88	3.99	2.35	-0.59	3.52	6.58	5.77	5.23	5.69
Noviembre	-8.31	-7.24	-6.13	-6.56	-8.36	-6.92	-5.60	-5.98	-7.66	-6.24	-5.08	-1.07	-7.24	-6.90	-6.09	-6.02
Diciembre	-13.10	-11.96	-10.74	-10.15	-12.79	-11.90	-10.75	-10.28	-13.13	-11.84	-10.27	-9.65	-13.67	-12.08	-10.23	-9.39

Tabla 7. 20 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para corto plazo.

Δ 6.0 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-7.57	-8.03	-7.51	-6.74	-7.44	-7.39	-6.79	-6.33	-6.60	-6.37	-6.69	-5.78	-7.54	-6.93	-5.62	-5.56
Febrero	-5.76	-5.94	-6.03	-5.66	-5.62	-6.00	-5.53	-5.11	-5.80	-5.90	-5.68	-5.13	-6.59	-6.40	-5.35	-4.71
Marzo	-4.14	-3.97	-3.75	-4.74	-4.46	-4.77	-4.48	-4.51	-4.69	-5.12	-5.34	-4.71	-5.49	-5.72	-5.72	-5.36
Abril	-9.17	-10.52	-11.33	-11.35	-8.68	-10.21	-10.64	-9.37	-7.54	-7.68	-7.57	-6.22	-8.88	-9.52	-9.49	-8.82
Mayo	-2.04	-1.85	-1.85	0.72	-3.33	3.17	3.01	-1.25	-6.60	-3.60	-3.70	-8.50	-2.45	-1.87	-2.03	0.10
Junio	-15.68	-15.73	-14.35	-14.31	-14.74	-12.57	-15.18	-14.78	-13.93	-13.75	-13.93	-14.02	-11.51	-13.54	-13.96	-14.26
Julio	-7.55	-8.38	-8.24	-4.38	-9.06	-10.16	-8.98	-6.68	-11.05	-11.49	-9.24	-9.01	1.67	-4.91	-10.50	-10.04
Agosto	1.29	1.03	1.01	3.18	2.16	2.58	2.73	2.16	4.44	4.05	3.60	3.19	4.22	4.86	7.27	9.01
Septiembre	-2.85	-0.83	-0.85	-0.85	-5.41	-3.25	-2.79	-1.88	-2.83	-2.96	-3.15	0.14	6.92	6.73	4.48	1.82
Octubre	-3.82	-3.27	-1.94	-1.30	-3.85	-3.78	0.38	-1.74	0.83	1.27	2.43	2.66	1.42	2.36	2.73	3.86
Noviembre	2.76	1.88	1.28	1.25	2.42	1.89	2.83	1.41	2.19	3.00	2.66	3.45	0.53	2.87	3.60	3.08
Diciembre	-8.79	-7.62	-6.22	-5.82	-8.79	-7.14	-5.86	-5.69	-9.40	-7.32	-5.38	-4.84	-10.46	-8.39	-5.78	-5.25

Tabla 7. 21 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para largo plazo.

Δ 6.0 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-10.77	-10.15	-9.61	-8.49	-11.55	-10.83	-9.08	-8.25	-11.35	-10.23	-9.14	-7.86	-11.99	-10.21	-8.29	-7.95
Febrero	-11.09	-10.56	-10.33	-9.08	-11.29	-11.58	-10.27	-9.45	-12.38	-11.87	-10.82	-9.40	-13.52	-12.48	-10.98	-9.56
Marzo	-9.20	-10.15	-11.45	-12.15	-9.64	-10.73	-11.60	-11.90	-9.79	-10.36	-10.90	-11.49	-9.40	-10.19	-10.88	-11.24
Abril	-10.35	-11.17	-11.79	-11.13	-9.71	-10.58	-10.89	-9.52	-7.75	-7.80	-8.22	-6.96	-10.11	-11.06	-11.47	-10.39
Mayo	-4.02	-4.78	-6.36	-5.97	-3.91	-5.16	-5.45	-5.63	-2.01	-6.03	-6.20	1.20	-5.57	-5.28	-5.70	-4.98
Junio	3.06	0.41	-0.86	-1.94	0.55	-0.67	3.52	2.54	-3.28	-1.13	-0.32	0.32	-8.90	-6.52	-5.29	-5.19
Julio	-18.32	-17.82	-16.59	-17.77	-22.12	-22.96	-20.10	-20.57	-27.38	-28.15	-25.41	-27.04	-9.46	-17.53	-27.79	-31.65
Agosto	4.70	5.17	4.16	2.10	6.18	4.16	3.41	3.70	10.11	8.69	2.51	5.52	9.82	-0.45	7.67	9.19
Septiembre	10.74	12.37	13.81	12.08	9.87	10.90	12.14	11.40	10.98	12.58	13.32	14.86	8.29	13.30	14.90	12.83
Octubre	2.92	2.26	3.45	3.52	-0.76	-0.73	-0.62	1.19	14.34	10.26	-1.99	14.33	18.62	16.96	17.16	18.79
Noviembre	5.44	6.15	7.27	5.70	6.58	6.90	9.71	8.06	7.82	9.14	10.17	10.63	7.96	10.19	11.29	11.30
Diciembre	-12.38	-10.75	-8.37	-7.55	-12.31	-9.81	-8.12	-7.13	-13.22	-10.30	-7.34	-5.98	-15.40	-12.17	-8.35	-6.36

Tabla 7. 22 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para corto plazo.

Δ 8.5 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-7.78	-7.38	-6.26	-6.25	-7.58	-6.66	-5.61	-5.70	-6.99	-5.88	-5.19	-4.89	-6.84	-5.70	-3.89	-4.45
Febrero	-6.34	-5.96	-5.51	-5.10	-7.02	-6.43	-5.73	-5.42	-6.62	-5.95	-5.38	-5.36	-6.33	-5.33	-5.12	-5.13
Marzo	-6.24	-6.74	-6.73	-7.15	-6.15	-6.98	-6.95	-7.62	-5.53	-5.33	-5.43	-6.78	-3.90	-4.27	-4.55	-6.20
Abril	-4.11	-4.45	-4.68	-7.03	-3.74	-4.29	-4.30	-6.14	-3.46	-3.61	-3.88	-4.62	-3.77	-4.27	-4.46	-6.29
Mayo	-6.34	-6.07	-6.08	-6.58	-5.82	-2.56	-3.13	-5.57	-6.42	-5.03	-5.66	-9.12	-4.45	-4.04	-4.25	-4.65
Junio	-6.05	-6.78	-6.26	-6.14	-5.99	-7.24	-7.02	-5.68	-5.45	-8.13	-7.45	-4.72	-8.35	-5.34	-4.34	-3.81
Julio	-9.23	-9.16	-8.95	-10.87	-12.53	-11.39	-10.60	-11.78	-15.08	-11.78	-10.07	-13.33	-12.25	-16.06	-17.24	-12.60
Agosto	-4.59	-3.25	-2.92	-3.78	-0.32	0.95	0.74	-1.96	-4.19	1.97	5.61	-1.66	2.40	-4.56	-3.43	-0.81
Septiembre	5.00	6.82	8.19	6.43	3.57	4.85	6.79	5.84	3.94	6.03	9.73	12.66	2.47	2.56	6.76	9.70
Octubre	-4.68	-4.28	-3.44	-3.86	-5.01	-4.70	-4.51	-4.88	-0.62	-1.98	-3.43	-1.17	3.24	1.60	1.29	1.84
Noviembre	-3.98	-3.11	-2.19	-3.29	-3.94	-3.39	-2.00	-2.57	-4.76	-3.04	-2.91	0.88	-6.71	-3.72	-3.03	-2.66
Diciembre	-7.35	-6.13	-4.65	-4.69	-6.54	-5.69	-4.68	-4.46	-7.14	-6.14	-5.00	-3.98	-8.64	-6.65	-4.98	-4.40

Tabla 7. 23 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para largo plazo.

Δ 8.5 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	-15.72	-14.75	-13.32	-13.36	-15.61	-14.56	-12.55	-12.52	-14.88	-13.44	-11.97	-11.52	-14.16	-12.54	-10.16	-10.62
Febrero	-15.54	-16.20	-15.95	-16.28	-15.74	-16.19	-15.41	-15.22	-15.68	-15.31	-13.96	-14.38	-15.58	-14.06	-12.55	-12.81
Marzo	-10.92	-11.57	-11.79	-14.60	-11.95	-12.10	-12.27	-14.56	-10.77	-10.97	-11.07	-13.49	-9.33	-9.66	-10.17	-12.51
Abril	-9.90	-11.37	-11.92	-14.95	-9.01	-11.15	-11.56	-13.93	-8.34	-9.30	-9.94	-11.51	-8.05	-8.43	-9.08	-11.60
Mayo	-11.07	-11.39	-11.62	-15.37	-8.10	-9.48	-9.90	-10.57	-6.06	-5.92	-5.84	-8.64	-7.73	-7.68	-7.64	-9.08
Junio	-16.72	-14.71	-10.48	-12.89	-22.21	-17.24	-11.52	-14.50	-23.01	-20.48	-14.91	-12.08	-40.98	-29.29	-23.34	-18.57
Julio	-35.46	-30.00	-28.01	-27.54	-36.98	-35.10	-29.23	-34.99	-46.88	-36.18	-31.51	-50.66	-44.26	-60.42	-74.77	-59.34
Agosto	-28.40	-26.19	-26.15	-22.80	-17.56	-17.67	-19.30	-24.68	-25.29	-17.13	-15.84	-31.40	-25.90	-32.17	-40.19	-38.52
Septiembre	14.26	14.83	15.93	10.56	14.45	14.81	13.73	10.49	13.39	16.85	19.75	22.36	12.68	17.74	23.43	20.51
Octubre	1.04	1.97	3.61	5.12	-1.69	-0.03	-0.43	1.09	8.70	6.51	3.07	9.05	16.58	15.77	14.81	14.64
Noviembre	-5.91	-5.07	-4.25	-5.62	-5.96	-4.00	-2.82	-4.46	-2.59	-1.47	-2.00	3.12	-5.68	-0.18	0.87	-0.40
Diciembre	-17.84	-16.33	-14.12	-14.26	-17.57	-16.18	-14.34	-13.73	-17.63	-16.12	-13.27	-12.71	-17.79	-14.73	-11.46	-11.11

Tabla 7. 24 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para corto plazo.

ΔT 4.5 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	0.86	0.88	0.82	0.89	0.96	0.90	0.80	0.89	0.84	0.80	1.05	0.96	0.83	0.87	0.86	0.95
Febrero	1.14	1.04	0.97	1.05	1.16	1.07	1.10	1.12	0.99	1.04	1.19	1.10	0.98	1.07	0.98	1.08
Marzo	1.34	1.43	1.55	1.44	1.36	1.44	1.45	1.44	1.30	1.27	1.50	1.31	1.28	1.36	1.38	1.40
Abril	1.41	1.64	1.68	1.63	1.37	1.63	1.65	1.38	1.47	1.35	1.47	1.39	1.46	1.35	1.55	1.60
Mayo	1.57	1.56	1.55	1.56	1.54	1.54	1.56	1.48	1.48	1.42	1.31	1.35	1.36	1.43	1.44	1.56
Junio	1.24	1.29	1.30	1.40	1.25	1.28	1.35	1.21	1.14	1.20	1.05	1.08	1.24	1.05	1.34	1.31
Julio	1.40	1.22	1.23	1.25	1.36	1.24	1.29	1.36	1.10	1.16	1.15	1.07	1.38	1.32	1.26	1.30
Agosto	1.37	1.23	1.21	1.23	1.33	1.22	1.24	1.40	1.11	1.18	1.16	1.08	1.29	1.23	1.25	1.24
Septiembre	1.30	1.17	1.16	1.16	1.25	1.15	1.16	1.29	1.06	1.10	1.10	1.03	1.20	1.14	1.15	1.13
Octubre	1.33	1.19	1.16	1.17	1.29	1.19	1.14	1.25	0.94	1.17	1.14	1.24	1.24	1.29	1.14	1.05
Noviembre	1.30	1.01	0.87	1.09	1.30	1.17	1.14	1.18	0.96	1.28	1.28	1.35	1.06	1.29	1.11	1.12
Diciembre	1.26	1.03	1.08	1.05	1.27	1.07	1.07	1.11	0.93	0.99	1.30	1.14	1.07	1.07	1.09	1.09

Tabla 7. 25 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para largo plazo.

ΔT 4.5 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	2.07	2.12	2.28	2.03	2.18	2.08	1.90	1.96	1.88	1.99	2.45	2.26	2.17	1.96	2.15	2.16
Febrero	2.48	2.56	2.69	2.49	2.43	2.50	2.44	2.31	2.28	2.34	2.62	2.42	2.41	2.33	2.48	2.48
Marzo	2.54	2.88	3.16	2.79	2.56	2.96	2.67	2.68	2.67	2.57	2.81	2.62	2.73	2.65	2.90	2.82
Abril	2.72	2.79	3.14	2.77	2.69	2.96	2.70	2.65	2.80	2.60	2.87	2.71	2.83	2.54	3.06	3.10
Mayo	2.72	2.66	2.71	2.56	2.54	2.78	2.51	2.44	2.68	2.61	2.51	2.58	2.32	2.49	2.44	2.82
Junio	2.33	2.36	2.51	2.39	2.24	2.41	2.32	2.35	2.28	2.43	2.36	2.38	2.28	2.26	2.31	2.50
Julio	2.70	2.17	2.51	2.23	2.48	2.20	2.17	2.70	2.37	2.48	2.41	2.36	2.72	2.65	2.49	2.58
Agosto	2.66	2.35	2.40	2.33	2.56	2.37	2.36	2.70	2.28	2.45	2.40	2.30	2.61	2.40	2.42	2.59
Septiembre	2.45	2.13	2.38	2.15	2.26	2.06	2.09	2.50	2.05	2.19	2.17	2.10	2.24	2.21	2.13	2.20
Octubre	2.43	2.49	2.40	2.38	2.37	2.27	2.30	2.36	1.76	2.28	2.22	2.46	2.38	2.31	2.32	2.30
Noviembre	2.42	2.25	2.24	2.15	2.40	2.22	2.15	2.29	1.81	2.25	2.30	2.38	2.17	2.40	2.15	2.21
Diciembre	2.11	2.09	2.09	1.96	2.22	1.99	1.96	2.11	1.91	2.11	2.32	2.35	2.02	2.01	2.02	2.07

Tabla 7. 26 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para corto plazo

ΔT 6.0 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	0.86	0.86	0.92	0.80	0.98	0.84	0.74	0.92	0.91	0.92	1.15	1.13	0.79	0.89	0.86	0.93
Febrero	1.14	0.96	0.91	1.03	1.16	1.02	1.09	1.15	0.95	0.99	1.21	1.05	0.87	1.09	0.90	1.06
Marzo	1.10	1.18	1.34	1.20	1.11	1.18	0.99	1.20	1.32	1.38	1.43	1.41	1.03	1.11	1.18	1.30
Abril	1.38	1.45	1.59	1.50	1.37	1.49	1.44	1.53	1.66	1.30	1.34	1.52	1.31	1.36	1.48	1.52
Mayo	1.25	1.30	1.31	1.29	1.25	1.38	1.29	1.28	0.91	1.22	1.01	1.21	1.23	1.25	1.34	1.52
Junio	1.25	1.34	1.32	1.37	1.27	1.29	1.33	1.22	1.04	1.22	1.22	1.30	1.17	0.92	1.27	1.35
Julio	1.15	1.03	1.05	1.02	1.01	1.05	0.97	1.19	1.22	1.26	1.30	1.27	1.16	1.34	1.12	1.12
Agosto	1.25	1.13	1.02	1.08	1.25	1.13	1.30	1.25	1.23	1.29	1.35	1.32	1.18	1.24	1.23	1.21
Septiembre	1.14	1.05	1.09	1.04	1.06	1.04	1.07	1.16	1.20	1.27	1.30	1.34	1.06	1.22	1.11	1.08
Octubre	1.07	1.05	1.09	0.96	0.99	1.02	0.95	1.07	1.19	1.40	1.19	1.48	0.89	0.93	1.01	1.01
Noviembre	1.07	1.00	1.01	1.09	1.04	1.05	1.10	1.11	0.97	1.24	1.16	1.30	0.86	0.98	0.99	1.03
Diciembre	1.20	1.06	1.20	1.14	1.12	1.14	1.18	1.17	1.05	1.23	1.20	1.34	1.05	1.10	1.11	1.22

Tabla 7. 27 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para largo plazo

ΔT 6.0 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	2.38	2.35	2.40	2.36	2.43	2.33	2.29	2.46	2.56	2.53	2.87	2.89	2.20	2.28	2.30	2.45
Febrero	2.49	2.74	2.94	2.73	2.41	2.66	2.60	2.37	2.59	2.61	2.91	2.69	2.51	2.45	2.73	2.81
Marzo	2.60	2.96	3.49	2.85	2.56	3.10	2.61	2.56	3.13	2.79	3.01	2.90	2.80	2.56	3.08	3.11
Abril	3.10	3.33	3.56	3.27	2.94	3.45	3.22	3.12	3.43	2.89	3.02	3.35	3.33	3.01	3.64	3.67
Mayo	3.14	3.16	3.15	3.14	3.00	3.06	3.03	3.14	2.37	3.15	2.84	3.25	2.76	2.85	2.87	2.95
Junio	2.59	2.52	2.60	2.46	2.53	2.57	2.46	2.80	2.47	3.09	2.86	3.19	2.45	2.50	2.35	2.65
Julio	2.89	2.62	2.69	2.74	2.77	2.70	2.78	2.97	3.13	3.25	3.22	3.29	2.87	3.24	3.00	3.02
Agosto	2.92	2.72	2.58	2.72	2.86	2.71	2.98	2.93	3.01	3.30	3.21	3.37	2.95	2.78	3.00	3.05
Septiembre	2.62	2.54	2.64	2.58	2.46	2.51	2.55	2.74	2.88	3.18	3.15	3.34	2.48	2.94	2.63	2.70
Octubre	2.62	2.59	2.64	2.61	2.51	2.41	2.53	2.59	2.83	3.32	2.71	3.30	2.43	2.23	2.49	2.55
Noviembre	2.39	2.51	2.56	2.43	2.34	2.39	2.36	2.48	2.22	3.07	2.70	3.23	2.36	2.30	2.37	2.56
Diciembre	2.43	2.75	2.82	2.56	2.30	2.48	2.51	2.45	2.41	2.77	2.59	3.17	2.46	2.23	2.64	2.69

Tabla 7. 28 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para corto plazo.

ΔT 8.5 (2015-2039)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	1.11	0.97	0.70	0.99	1.25	1.02	0.97	1.12	0.96	1.05	1.31	1.18	1.04	1.06	1.01	1.11
Febrero	1.36	1.13	0.88	1.18	1.38	1.18	1.18	1.25	1.10	1.15	1.40	1.25	1.08	1.16	1.00	1.20
Marzo	1.46	1.24	1.01	1.29	1.46	1.15	1.28	1.46	1.31	1.27	1.48	1.30	0.97	1.28	0.82	1.21
Abril	1.69	1.65	1.56	1.62	1.51	1.58	1.61	1.62	1.63	1.48	1.64	1.51	1.49	1.59	1.47	1.56
Mayo	1.66	1.43	1.41	1.38	1.44	1.39	1.36	1.62	1.68	1.51	1.43	1.44	1.38	1.43	1.40	1.16
Junio	1.35	1.17	1.17	1.03	1.25	1.21	1.07	1.37	1.36	1.44	1.28	1.34	1.18	1.23	1.04	1.20
Julio	1.61	1.34	1.29	1.34	1.52	1.37	1.39	1.56	1.27	1.34	1.35	1.25	1.62	1.50	1.36	1.38
Agosto	1.56	1.32	1.25	1.27	1.47	1.28	1.26	1.58	1.23	1.33	1.31	1.19	1.49	1.40	1.32	1.24
Septiembre	1.44	1.18	1.19	1.19	1.31	1.14	1.15	1.47	1.13	1.21	1.21	1.12	1.34	1.25	1.15	1.01
Octubre	1.43	1.18	0.96	1.22	1.41	1.13	1.15	1.29	0.91	1.33	1.39	1.48	1.42	1.43	1.23	1.16
Noviembre	1.35	0.95	0.48	1.22	1.39	1.42	1.39	1.35	1.00	1.30	1.29	1.27	1.35	1.46	1.26	1.22
Diciembre	1.32	1.08	0.98	1.06	1.35	1.13	1.08	1.15	1.07	1.16	1.40	1.32	1.21	1.14	1.17	1.22

Tabla 7. 29 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para largo plazo.

ΔT 8.5 (2075-2099)																
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
Enero	3.71	3.85	3.72	3.69	3.87	3.72	3.32	3.71	3.61	3.70	4.67	4.31	3.85	3.48	3.77	3.81
Febrero	4.21	4.21	3.99	4.12	4.13	4.14	4.05	3.89	4.27	4.20	4.55	4.26	4.01	3.89	3.94	4.08
Marzo	4.40	4.61	4.59	4.54	4.32	4.54	4.25	4.50	5.00	4.86	5.13	4.91	4.37	4.16	4.37	4.56
Abril	4.73	4.96	4.95	4.90	4.63	4.86	4.76	4.63	5.09	5.07	5.12	5.15	4.63	4.32	4.71	4.94
Mayo	4.95	4.66	4.60	4.51	4.52	4.58	4.40	4.36	5.07	4.85	4.45	4.82	4.10	4.37	4.12	4.37
Junio	4.26	4.21	4.22	4.11	4.04	4.13	4.00	4.21	4.58	4.71	4.53	4.53	4.02	4.13	3.82	4.41
Julio	5.26	4.20	4.36	4.23	4.86	4.19	4.28	5.28	4.69	4.83	4.87	4.62	5.20	5.07	4.72	4.59
Agosto	5.28	4.53	4.13	4.40	4.92	4.49	4.64	5.23	4.58	4.77	4.72	4.43	5.04	4.87	4.64	4.55
Septiembre	4.77	3.89	3.99	3.93	4.05	3.75	3.93	4.71	3.97	4.22	4.30	3.95	4.52	4.47	3.92	3.77
Octubre	4.19	3.90	3.88	3.92	4.07	3.66	3.80	3.98	3.22	4.02	4.41	4.54	4.00	4.11	3.89	3.95
Noviembre	4.15	3.83	3.47	3.81	4.08	3.96	3.82	4.09	3.65	4.39	4.35	4.88	3.87	4.09	3.77	3.97
Diciembre	3.93	3.93	3.80	3.32	3.96	3.43	3.35	3.78	3.75	4.04	4.56	4.59	3.90	3.51	3.58	3.78

Los valores de las anomalías climáticas una vez transferidos a la posición de las estaciones CLICOM se muestra a continuación:

Tabla 7. 30 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 4.5 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-7.87	-7.71	-8.30	-8.10	-8.04	-7.50	-8.04	-8.18	-8.21	-7.84	-8.52	-8.31	-7.09	-8.13	-7.43	-8.24	-8.17
Febrero	-7.56	-7.74	-7.60	-7.53	-7.59	-7.55	-7.60	-7.61	-7.59	-7.59	-7.62	-7.60	-7.54	-7.65	-7.58	-7.59	-7.61
Marzo	-6.47	-6.84	-6.12	-6.08	-6.29	-6.67	-6.30	-6.20	-6.15	-6.36	-5.73	-6.11	-6.64	-6.29	-6.89	-6.14	-6.22
Abril	-3.31	-3.57	-3.02	-3.10	-3.27	-3.59	-3.27	-3.20	-3.15	-3.41	-3.00	-3.02	-3.88	-3.28	-3.70	-3.08	-3.21
Mayo	-1.32	-2.67	0.14	-4.61	-3.79	-4.08	-3.67	-4.19	-3.46	-4.46	-5.00	0.16	-5.70	-5.22	-4.88	-1.02	-4.41
Junio	-2.45	-2.61	-2.29	-3.18	-3.11	-2.86	-3.17	-3.28	-3.13	-3.29	-3.98	-2.31	-3.31	-3.53	-2.81	-2.58	-3.32
Julio	-11.23	-11.10	-10.88	-12.37	-12.97	-11.27	-14.29	-13.89	-13.14	-13.31	-14.84	-10.94	-13.48	-15.66	-12.30	-11.44	-14.16
Agosto	2.39	2.62	2.70	0.62	1.09	3.36	-0.26	0.21	0.75	1.21	-2.12	2.69	2.55	-1.10	2.72	2.26	0.01
Septiembre	-2.33	-2.46	-2.38	-2.03	-1.86	-1.77	-2.21	-1.80	-1.90	-1.99	-2.34	-2.36	-1.73	-1.75	-1.50	-2.22	-1.77
Octubre	-4.34	-4.82	-3.93	-4.74	-4.91	-4.82	-4.86	-5.07	-4.85	-5.13	-4.94	-3.96	-4.94	-5.40	-4.59	-4.27	-5.14
Noviembre	-2.63	-2.63	-2.85	-2.66	-2.51	-2.34	-2.44	-2.47	-2.57	-2.44	-2.78	-2.85	-2.31	-2.33	-2.09	-2.75	-2.45
Diciembre	-7.93	-7.56	-8.63	-8.37	-8.30	-7.37	-8.38	-8.53	-8.54	-8.17	-9.26	-8.64	-7.22	-8.61	-7.11	-8.53	-8.53

Tabla 7. 31 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 4.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 4.5 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-9.96	-9.67	-10.70	-10.51	-10.30	-9.40	-10.33	-10.52	-10.58	-10.08	-11.26	-10.71	-9.05	-10.46	-9.13	-10.61	-10.51
Febrero	-11.16	-11.16	-11.57	-11.32	-11.34	-10.79	-11.31	-11.48	-11.48	-11.22	-11.66	-11.58	-10.43	-11.51	-10.54	-11.51	-11.49
Marzo	-8.13	-8.50	-7.87	-7.68	-7.83	-8.23	-7.82	-7.71	-7.73	-7.81	-7.30	-7.87	-8.08	-7.67	-8.48	-7.84	-7.71
Abril	-6.01	-6.46	-5.44	-5.19	-5.64	-6.30	-5.62	-5.45	-5.39	-5.74	-4.73	-5.44	-6.25	-5.57	-6.68	-5.44	-5.47
Mayo	-4.26	-4.24	-4.52	-3.75	-4.01	-3.78	-3.76	-3.92	-3.96	-4.02	-3.24	-4.51	-3.85	-3.99	-3.12	-4.32	-3.92
Junio	-2.33	-0.94	-4.15	-2.71	-2.74	-1.39	-3.64	-3.05	-3.22	-3.11	-5.63	-4.16	-3.69	-3.32	-1.36	-3.68	-3.01
Julio	-16.64	-17.74	-15.31	-18.98	-19.14	-18.00	-20.90	-20.11	-19.11	-20.36	-22.10	-15.36	-22.41	-22.32	-19.03	-16.44	-20.44
Agosto	1.05	0.68	1.74	0.50	1.48	2.88	-0.19	1.06	1.21	1.93	-1.16	1.78	3.03	0.45	1.92	1.71	1.00
Septiembre	2.97	2.43	3.38	4.74	5.34	4.26	5.92	6.14	5.47	6.13	6.53	3.42	7.44	7.40	4.84	3.89	6.37
Octubre	-1.14	-1.28	-1.21	0.20	0.44	-0.55	1.09	1.09	0.53	1.00	2.19	-1.20	1.21	2.26	-0.17	-0.80	1.27
Noviembre	-6.06	-5.59	-6.92	-6.59	-6.33	-5.28	-6.17	-6.47	-6.59	-6.04	-7.30	-6.93	-5.22	-6.30	-4.72	-6.77	-6.43
Diciembre	-11.24	-10.99	-11.90	-11.73	-11.59	-10.66	-11.67	-11.82	-11.85	-11.40	-12.60	-11.91	-10.42	-11.85	-10.42	-11.82	-11.82

Tabla 7. 32 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 6.0 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-6.96	-6.95	-7.38	-6.92	-6.74	-6.66	-6.70	-6.68	-6.83	-6.65	-6.85	-7.37	-6.44	-6.44	-6.52	-7.19	-6.64
Febrero	-5.73	-5.74	-5.98	-5.76	-5.81	-5.63	-5.82	-5.86	-5.86	-5.84	-5.89	-5.98	-5.63	-5.90	-5.52	-5.92	-5.86
Marzo	-4.72	-4.77	-4.75	-4.72	-4.93	-4.95	-4.90	-4.97	-4.90	-5.09	-4.85	-4.76	-5.36	-5.11	-4.92	-4.80	-4.99
Abril	-9.81	-10.06	-10.15	-8.86	-8.61	-8.62	-8.73	-8.36	-8.71	-8.30	-8.26	-10.13	-7.90	-7.84	-8.26	-9.69	-8.25
Mayo	1.53	0.66	2.83	-2.02	-1.56	-1.53	-1.57	-2.18	-1.33	-2.31	-3.71	2.81	-3.49	-3.38	-2.66	1.50	-2.43
Junio	-13.77	-15.12	-12.71	-14.41	-13.77	-14.17	-13.86	-13.69	-13.60	-13.80	-13.71	-12.70	-13.92	-13.73	-14.21	-13.09	-13.71
Julio	-9.55	-9.24	-10.10	-9.87	-10.33	-9.31	-10.07	-10.77	-10.53	-10.12	-9.77	-10.14	-9.37	-11.12	-9.01	-10.15	-10.86
Agosto	2.79	2.89	2.56	3.05	3.41	3.22	3.48	3.59	3.37	3.71	3.75	2.59	4.37	4.02	3.17	2.83	3.66
Septiembre	-2.87	-2.66	-3.22	-3.09	-3.11	-2.76	-2.27	-3.15	-3.23	-2.49	-2.39	-3.25	-1.24	-2.70	-2.34	-3.27	-3.12
Octubre	-1.33	0.42	-3.62	-0.38	-0.10	1.01	0.08	0.04	-0.66	0.99	-0.33	-3.60	2.44	1.11	1.22	-2.53	0.25
Noviembre	2.34	2.70	1.92	2.57	2.58	2.65	2.71	2.67	2.52	2.73	2.32	1.93	2.88	2.92	2.67	2.14	2.72
Diciembre	-6.45	-6.02	-7.16	-7.26	-6.99	-5.84	-7.15	-7.29	-7.30	-6.79	-8.55	-7.18	-5.71	-7.36	-5.60	-7.15	-7.30

Tabla 7. 33 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 6.0 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 6.0 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-9.85	-9.40	-10.79	-10.21	-10.15	-9.25	-10.12	-10.35	-10.44	-9.94	-11.04	-10.80	-9.06	-10.25	-8.94	-10.62	-10.33
Febrero	-10.92	-10.69	-11.54	-11.22	-11.42	-10.68	-11.43	-11.65	-11.59	-11.46	-12.05	-11.56	-10.88	-11.85	-10.39	-11.50	-11.68
Marzo	-11.10	-11.75	-10.71	-10.50	-10.63	-11.11	-10.63	-10.46	-10.50	-10.63	-10.01	-10.71	-10.86	-10.36	-11.22	-10.68	-10.44
Abril	-10.15	-10.42	-10.54	-9.29	-8.92	-9.07	-9.10	-8.62	-9.03	-8.69	-8.72	-10.50	-8.78	-8.03	-8.75	-10.07	-8.50
Mayo	-5.19	-5.48	-5.14	-5.01	-5.46	-5.38	-4.94	-5.44	-5.25	-5.70	-3.97	-5.12	-5.62	-5.87	-4.61	-5.14	-5.51
Junio	0.92	2.16	-0.59	0.16	-0.35	0.76	-0.54	-0.78	-0.65	-0.82	-2.27	-0.61	-1.52	-1.27	0.80	-0.44	-0.83
Julio	-22.54	-22.17	-22.87	-23.74	-25.24	-23.93	-24.67	-26.13	-25.30	-25.47	-24.74	-22.98	-25.86	-27.47	-24.15	-23.52	-26.42
Agosto	4.14	3.72	4.25	6.02	6.10	3.78	6.10	7.06	6.42	5.60	7.87	4.32	3.94	8.27	3.78	4.80	7.29
Septiembre	11.74	12.83	10.96	11.89	12.02	12.71	12.15	12.03	11.76	12.52	11.11	10.94	13.53	12.46	12.98	11.22	12.11
Octubre	0.62	0.52	-0.49	3.86	4.45	0.97	6.75	6.38	4.77	5.29	9.34	-0.39	4.18	9.83	2.30	0.88	6.94
Noviembre	8.38	9.73	6.95	8.40	8.64	9.56	8.79	8.59	8.28	9.22	7.91	6.97	10.30	9.07	9.70	7.49	8.68
Diciembre	-8.84	-8.22	-9.85	-10.15	-9.72	-7.96	-9.97	-10.20	-10.18	-9.48	-12.04	-9.88	-7.84	-10.36	-7.50	-9.87	-10.22

Tabla 7. 34 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 8.5 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-6.05	-5.77	-6.66	-6.33	-6.06	-5.51	-6.05	-6.13	-6.27	-5.79	-6.73	-6.66	-5.06	-5.92	-5.39	-6.50	-6.10
Febrero	-6.00	-5.83	-6.41	-6.10	-6.02	-5.62	-6.02	-6.10	-6.18	-5.83	-6.44	-6.42	-5.37	-5.97	-5.53	-6.32	-6.07
Marzo	-6.79	-6.87	-6.93	-6.06	-5.98	-6.16	-5.98	-5.79	-6.02	-5.64	-5.63	-6.92	-5.35	-5.37	-6.29	-6.64	-5.72
Abril	-4.34	-4.48	-4.27	-3.91	-3.94	-4.18	-3.95	-3.79	-3.88	-3.85	-3.70	-4.26	-4.09	-3.65	-4.36	-4.15	-3.76
Mayo	-3.53	-4.29	-2.75	-4.99	-4.52	-4.89	-4.56	-4.65	-4.37	-4.76	-5.30	-2.74	-5.49	-4.97	-5.60	-3.29	-4.73
Junio	-7.06	-7.11	-7.20	-7.02	-7.40	-7.11	-7.11	-7.54	-7.35	-7.47	-6.52	-7.21	-6.70	-7.93	-6.70	-7.20	-7.61
Julio	-11.16	-11.01	-11.36	-11.47	-11.55	-10.81	-12.12	-11.80	-11.78	-11.56	-13.35	-11.41	-11.73	-11.93	-11.11	-11.50	-11.81
Agosto	0.98	1.16	0.83	0.52	1.56	2.66	0.43	1.40	1.17	2.08	-1.19	0.86	2.96	1.69	2.06	1.01	1.47
Septiembre	6.21	7.68	4.93	6.06	6.13	8.13	5.87	5.83	5.64	6.68	4.33	4.89	8.83	5.92	8.79	5.23	5.87
Octubre	-4.26	-4.19	-4.64	-3.39	-3.19	-3.61	-2.70	-2.81	-3.21	-2.65	-1.87	-4.62	-2.10	-1.98	-3.38	-4.22	-2.68
Noviembre	-2.69	-2.22	-3.38	-3.15	-3.11	-2.47	-2.88	-3.21	-3.27	-3.06	-4.11	-3.39	-2.76	-3.13	-2.05	-3.31	-3.19
Diciembre	-5.21	-4.92	-5.70	-5.85	-5.75	-5.00	-5.78	-5.98	-5.93	-5.72	-6.68	-5.71	-5.10	-6.14	-4.79	-5.72	-6.01

Tabla 7. 35 Anomalía climática de precipitación del escenario RCP 8.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

Δ 8.5 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	-13.43	-12.94	-14.53	-13.77	-13.54	-12.50	-13.50	-13.72	-13.89	-13.10	-14.49	-14.54	-11.81	-13.46	-12.27	-14.25	-13.67
Febrero	-15.61	-15.62	-16.16	-15.42	-15.36	-14.77	-15.39	-15.43	-15.55	-15.00	-15.59	-16.16	-13.87	-15.28	-14.64	-15.91	-15.40
Marzo	-12.21	-12.56	-12.06	-11.50	-11.50	-11.82	-11.50	-11.30	-11.47	-11.16	-11.05	-12.06	-11.06	-10.98	-12.19	-11.90	-11.25
Abril	-11.26	-11.70	-11.09	-10.02	-10.09	-10.73	-10.03	-9.73	-9.96	-9.79	-9.01	-11.06	-9.85	-9.33	-11.02	-10.73	-9.66
Mayo	-9.18	-9.43	-9.45	-7.87	-7.34	-7.68	-7.66	-6.93	-7.44	-6.77	-6.96	-9.40	-6.46	-6.13	-7.86	-8.80	-6.77
Junio	-15.10	-13.15	-17.21	-17.71	-18.11	-14.60	-18.63	-19.25	-18.81	-18.38	-22.79	-17.33	-17.19	-20.63	-14.13	-17.51	-19.42
Julio	-33.57	-32.33	-35.01	-34.65	-35.16	-33.16	-37.92	-36.06	-35.96	-35.97	-41.82	-35.11	-41.17	-37.00	-35.34	-35.13	-36.10
Agosto	-18.96	-20.44	-17.93	-19.38	-18.00	-18.56	-19.99	-17.87	-18.05	-18.26	-21.55	-17.84	-21.72	-17.83	-20.49	-17.91	-17.80
Septiembre	14.91	15.66	14.83	15.50	15.99	17.09	15.99	16.12	15.76	17.00	14.69	14.81	20.06	16.73	17.57	15.09	16.22
Octubre	0.87	1.16	0.11	2.80	3.45	2.52	4.60	4.34	3.35	4.82	6.11	0.14	6.32	6.46	3.28	0.97	4.67
Noviembre	-3.10	-2.67	-4.00	-3.16	-2.60	-2.15	-2.09	-2.39	-2.80	-2.00	-3.12	-3.98	-1.15	-1.64	-1.60	-3.61	-2.26
Diciembre	-15.12	-14.60	-16.17	-15.83	-15.63	-14.08	-15.68	-16.01	-16.04	-15.19	-16.97	-16.20	-13.22	-16.06	-13.73	-16.03	-16.02

Tabla 7. 36 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas

ΔT 4.5 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	0.87	0.89	0.90	0.87	0.87	0.94	0.84	0.85	0.87	0.89	0.86	0.90	0.99	0.81	0.95	0.89	0.84
Febrero	1.09	1.14	1.07	1.09	1.08	1.13	1.06	1.06	1.07	1.09	1.04	1.07	1.14	1.04	1.14	1.08	1.06
Marzo	1.43	1.49	1.44	1.38	1.37	1.44	1.34	1.33	1.36	1.37	1.32	1.43	1.45	1.28	1.43	1.41	1.32
Abril	1.58	1.63	1.62	1.49	1.47	1.51	1.46	1.44	1.48	1.45	1.44	1.62	1.46	1.37	1.48	1.58	1.42
Mayo	1.51	1.54	1.54	1.48	1.46	1.42	1.47	1.45	1.47	1.42	1.48	1.54	1.35	1.43	1.40	1.52	1.45
Junio	1.27	1.31	1.28	1.23	1.21	1.17	1.22	1.21	1.22	1.17	1.19	1.28	1.11	1.20	1.15	1.26	1.21
Julio	1.25	1.29	1.24	1.22	1.20	1.20	1.21	1.19	1.20	1.18	1.20	1.24	1.18	1.17	1.19	1.23	1.18
Agosto	1.22	1.26	1.22	1.21	1.20	1.19	1.20	1.19	1.20	1.18	1.19	1.22	1.17	1.18	1.19	1.22	1.19
Septiembre	1.15	1.18	1.15	1.14	1.13	1.13	1.12	1.12	1.13	1.11	1.12	1.15	1.10	1.11	1.12	1.14	1.12
Octubre	1.17	1.19	1.19	1.16	1.16	1.16	1.17	1.16	1.16	1.15	1.11	1.19	1.15	1.16	1.17	1.18	1.16
Noviembre	1.18	1.21	1.17	1.19	1.22	1.24	1.22	1.23	1.21	1.24	1.13	1.17	1.26	1.27	1.25	1.18	1.24
Diciembre	1.08	1.14	1.07	1.09	1.07	1.16	1.04	1.05	1.06	1.09	1.03	1.07	1.22	1.01	1.17	1.08	1.04

Tabla 7. 37 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 4.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas

ΔT 4.5 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	2.04	2.11	2.08	2.06	2.07	2.19	2.01	2.04	2.05	2.11	2.00	2.08	2.33	2.00	2.21	2.07	2.03
Febrero	2.46	2.55	2.50	2.43	2.42	2.51	2.39	2.40	2.42	2.44	2.36	2.50	2.55	2.35	2.49	2.48	2.39
Marzo	2.80	2.81	2.95	2.68	2.71	2.74	2.67	2.67	2.72	2.70	2.67	2.94	2.78	2.60	2.73	2.86	2.66
Abril	2.82	2.84	2.94	2.72	2.74	2.79	2.70	2.71	2.76	2.73	2.74	2.94	2.86	2.62	2.78	2.88	2.69
Mayo	2.63	2.61	2.77	2.59	2.61	2.54	2.61	2.63	2.64	2.59	2.63	2.76	2.52	2.60	2.53	2.71	2.62
Junio	2.37	2.42	2.40	2.34	2.38	2.36	2.37	2.39	2.38	2.38	2.32	2.40	2.36	2.41	2.36	2.39	2.39
Julio	2.26	2.35	2.21	2.35	2.38	2.35	2.37	2.40	2.36	2.40	2.42	2.21	2.44	2.47	2.38	2.26	2.41
Agosto	2.39	2.46	2.37	2.41	2.42	2.41	2.40	2.42	2.41	2.41	2.40	2.37	2.41	2.45	2.41	2.38	2.43
Septiembre	2.11	2.21	2.07	2.15	2.15	2.16	2.14	2.15	2.14	2.15	2.13	2.07	2.17	2.18	2.18	2.09	2.16
Octubre	2.29	2.37	2.28	2.26	2.25	2.27	2.27	2.24	2.24	2.24	2.10	2.27	2.26	2.27	2.30	2.26	2.25
Noviembre	2.21	2.27	2.22	2.21	2.22	2.26	2.22	2.22	2.21	2.24	2.10	2.22	2.28	2.24	2.28	2.22	2.22
Diciembre	2.03	2.12	2.00	2.10	2.09	2.17	2.06	2.09	2.07	2.13	2.03	2.00	2.24	2.10	2.21	2.03	2.09

Tabla 7. 38 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

ΔT 6.0 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	0.85	0.88	0.84	0.91	0.92	0.98	0.89	0.91	0.90	0.95	0.91	0.84	1.07	0.92	1.01	0.86	0.92
Febrero	1.06	1.13	1.02	1.06	1.05	1.13	1.03	1.02	1.03	1.07	1.01	1.02	1.13	1.00	1.13	1.04	1.02
Marzo	1.16	1.17	1.19	1.23	1.28	1.28	1.24	1.31	1.27	1.32	1.26	1.19	1.37	1.36	1.30	1.20	1.32
Abril	1.45	1.48	1.48	1.40	1.39	1.39	1.40	1.37	1.40	1.36	1.48	1.48	1.37	1.31	1.42	1.46	1.36
Mayo	1.30	1.28	1.37	1.20	1.21	1.16	1.24	1.21	1.23	1.17	1.13	1.36	1.11	1.21	1.16	1.31	1.21
Junio	1.29	1.34	1.29	1.25	1.24	1.26	1.23	1.23	1.24	1.21	1.15	1.29	1.22	1.22	1.26	1.27	1.23
Julio	1.07	1.10	1.05	1.13	1.17	1.18	1.16	1.19	1.16	1.22	1.18	1.05	1.27	1.25	1.20	1.08	1.20
Agosto	1.22	1.32	1.14	1.26	1.26	1.30	1.25	1.26	1.24	1.28	1.23	1.14	1.32	1.28	1.31	1.18	1.26
Septiembre	1.10	1.17	1.05	1.16	1.19	1.21	1.18	1.20	1.17	1.23	1.17	1.05	1.26	1.26	1.23	1.09	1.21
Octubre	1.05	1.08	1.02	1.14	1.20	1.15	1.19	1.25	1.19	1.22	1.16	1.03	1.17	1.36	1.18	1.07	1.27
Noviembre	1.10	1.15	1.05	1.11	1.14	1.15	1.14	1.16	1.13	1.16	1.05	1.05	1.14	1.21	1.17	1.07	1.17
Diciembre	1.17	1.23	1.14	1.16	1.18	1.20	1.19	1.19	1.17	1.19	1.12	1.14	1.20	1.21	1.22	1.15	1.19

Tabla 7. 39 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 6.0 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

ΔT 6.0 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	2.39	2.51	2.34	2.48	2.50	2.61	2.45	2.47	2.56	2.47	2.34	2.72	2.52	2.67	2.38	2.51	
Febrero	2.64	2.74	2.66	2.63	2.64	2.73	2.60	2.63	2.63	2.69	2.56	2.66	2.82	2.61	2.72	2.65	2.63
Marzo	2.87	2.84	3.09	2.81	2.87	2.86	2.82	2.87	2.90	2.87	2.91	3.08	2.98	2.81	2.85	3.01	2.86
Abril	3.29	3.30	3.43	3.11	3.10	3.12	3.12	3.06	3.14	3.05	3.20	3.43	3.13	2.93	3.14	3.33	3.04
Mayo	3.05	3.12	3.05	2.99	3.02	2.98	3.05	3.04	3.02	2.99	2.78	3.05	2.89	3.11	3.01	3.03	3.05
Junio	2.62	2.69	2.57	2.70	2.81	2.77	2.79	2.87	2.78	2.85	2.63	2.57	2.80	3.03	2.83	2.62	2.89
Julio	2.84	2.98	2.72	2.97	3.04	3.06	3.04	3.09	3.01	3.13	3.03	2.72	3.19	3.22	3.10	2.81	3.11
Agosto	2.91	3.10	2.72	3.03	3.08	3.11	3.07	3.12	3.03	3.14	3.00	2.73	3.17	3.25	3.14	2.83	3.15
Septiembre	2.65	2.80	2.52	2.80	2.90	2.93	2.88	2.95	2.85	3.01	2.81	2.52	3.07	3.12	2.99	2.62	2.98
Octubre	2.57	2.70	2.43	2.79	2.87	2.73	2.87	2.98	2.84	2.90	2.79	2.43	2.73	3.22	2.79	2.55	3.03
Noviembre	2.48	2.58	2.40	2.59	2.70	2.65	2.70	2.78	2.67	2.75	2.47	2.40	2.69	2.99	2.71	2.47	2.82
Diciembre	2.54	2.65	2.49	2.57	2.61	2.61	2.62	2.64	2.59	2.62	2.48	2.49	2.63	2.74	2.67	2.51	2.66

Tabla 7. 40 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para corto plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

ΔT 8.5 (2015-2039)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	1.04	1.07	1.02	1.08	1.08	1.15	1.04	1.06	1.06	1.10	1.04	1.02	1.22	1.05	1.17	1.04	1.06
Febrero	1.20	1.25	1.18	1.22	1.21	1.28	1.18	1.18	1.19	1.22	1.17	1.18	1.30	1.16	1.29	1.19	1.18
Marzo	1.25	1.34	1.16	1.32	1.29	1.36	1.26	1.28	1.27	1.32	1.29	1.16	1.35	1.27	1.38	1.21	1.28
Abril	1.59	1.65	1.58	1.57	1.55	1.60	1.54	1.53	1.55	1.56	1.56	1.58	1.59	1.50	1.60	1.57	1.53
Mayo	1.41	1.44	1.40	1.46	1.47	1.43	1.46	1.48	1.47	1.47	1.54	1.40	1.42	1.51	1.44	1.42	1.49
Junio	1.20	1.19	1.21	1.27	1.31	1.25	1.30	1.35	1.31	1.32	1.33	1.21	1.26	1.41	1.27	1.23	1.36
Julio	1.38	1.42	1.38	1.37	1.37	1.37	1.37	1.35	1.36	1.36	1.37	1.38	1.36	1.35	1.37	1.37	1.35
Agosto	1.29	1.32	1.29	1.32	1.32	1.30	1.31	1.32	1.31	1.31	1.32	1.29	1.31	1.33	1.31	1.29	1.32
Septiembre	1.17	1.22	1.15	1.20	1.20	1.20	1.19	1.20	1.19	1.20	1.20	1.15	1.19	1.21	1.21	1.16	1.20
Octubre	1.19	1.25	1.13	1.24	1.25	1.30	1.26	1.26	1.23	1.29	1.17	1.13	1.36	1.31	1.33	1.17	1.27
Noviembre	1.38	1.35	1.41	1.26	1.32	1.33	1.33	1.31	1.32	1.31	1.23	1.41	1.29	1.30	1.32	1.39	1.30
Diciembre	1.14	1.18	1.13	1.18	1.19	1.25	1.16	1.17	1.17	1.21	1.16	1.13	1.33	1.17	1.27	1.15	1.17

Tabla 7. 41 Anomalía climática de temperatura del escenario RCP 8.5 para largo plazo transferida a la posición de las estaciones meteorológicas.

ΔT 8.5 (2075-2099)																	
	11001	11010	11151	16005	16023	16027	16050	16057	16084	16100	16103	16117	16120	16142	16155	16159	16225
Enero	3.67	3.78	3.72	3.77	3.80	4.06	3.66	3.75	3.75	3.91	3.69	3.71	4.36	3.71	4.14	3.73	3.75
Febrero	4.13	4.26	4.14	4.20	4.21	4.29	4.14	4.20	4.20	4.26	4.18	4.14	4.37	4.19	4.28	4.16	4.21
Marzo	4.52	4.63	4.55	4.66	4.74	4.77	4.63	4.77	4.71	4.81	4.73	4.55	4.92	4.83	4.80	4.59	4.78
Abril	4.86	5.00	4.87	4.92	4.97	4.97	4.91	4.99	4.96	4.99	4.92	4.87	5.01	5.04	4.98	4.89	5.01
Mayo	4.53	4.59	4.59	4.65	4.67	4.51	4.68	4.74	4.70	4.65	4.79	4.59	4.45	4.81	4.52	4.61	4.76
Junio	4.17	4.29	4.14	4.34	4.43	4.36	4.39	4.50	4.41	4.49	4.41	4.14	4.42	4.65	4.38	4.21	4.53
Julio	4.39	4.60	4.22	4.61	4.65	4.66	4.61	4.67	4.59	4.72	4.73	4.22	4.83	4.81	4.73	4.34	4.70
Agosto	4.62	4.79	4.50	4.70	4.70	4.70	4.68	4.70	4.67	4.71	4.71	4.50	4.70	4.76	4.71	4.56	4.71
Septiembre	3.94	4.16	3.77	4.06	4.09	4.15	4.06	4.09	4.03	4.16	4.06	3.77	4.21	4.20	4.18	3.86	4.11
Octubre	3.83	4.07	3.68	3.92	3.93	4.13	3.91	3.91	3.86	4.03	3.68	3.67	4.28	4.00	4.21	3.74	3.93
Noviembre	4.01	4.10	3.96	4.06	4.17	4.20	4.16	4.21	4.13	4.23	3.96	3.96	4.28	4.34	4.30	4.01	4.23
Diciembre	3.58	3.80	3.46	3.88	3.88	4.05	3.79	3.90	3.82	4.01	3.81	3.46	4.31	4.01	4.16	3.58	3.93

Las anomalías transferidas son entonces adicionadas al valor mensual correspondiente a las series de datos climáticos de las estaciones meteorológicas que comprenden un periodo del año 1970 a 2000; el cual con el fin de realizar una comparación con los escenarios de proyección fue reiterado hasta alcanzar el periodo correspondiente al año 2099, bajo la consideración de que las condiciones climáticas podrían mantenerse sin alteraciones notables.

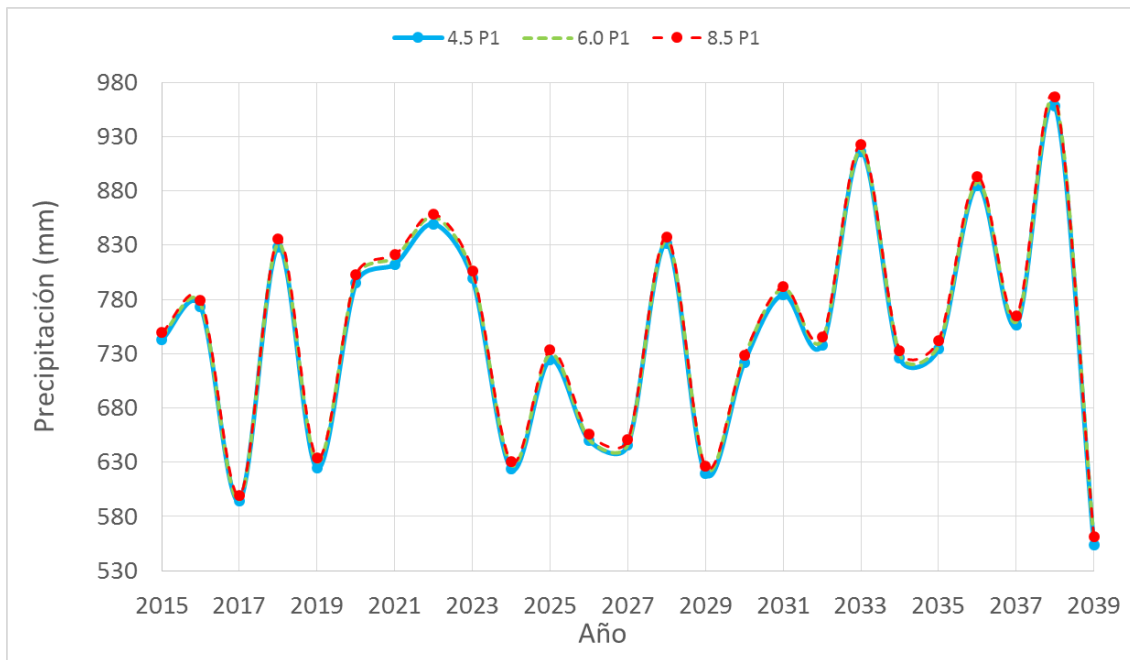


Figura 7. 22. Series de datos climáticos futuros - PTA media para cada escenario de cambio climático para el periodo 2015-2039

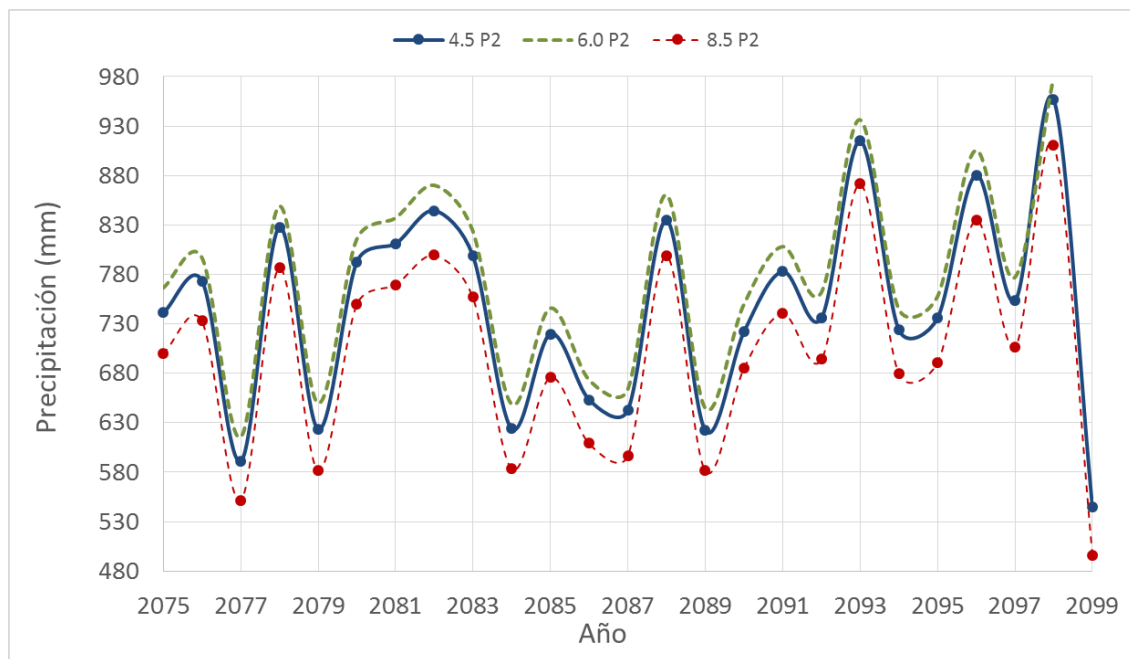


Figura 7. 23. Series de datos climáticos futuros - PTA media para cada escenario de cambio climático para el periodo 2075-2099

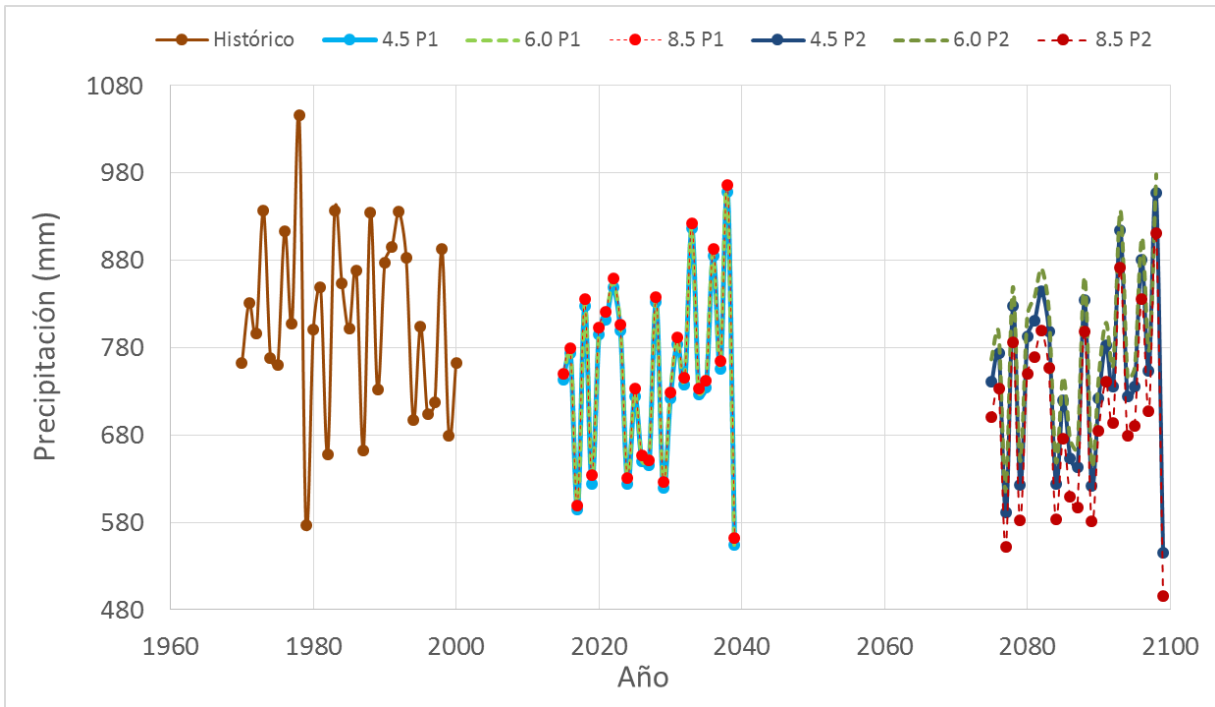


Figura 7. 24. Series de PTA media histórica y de proyección de cambio climático

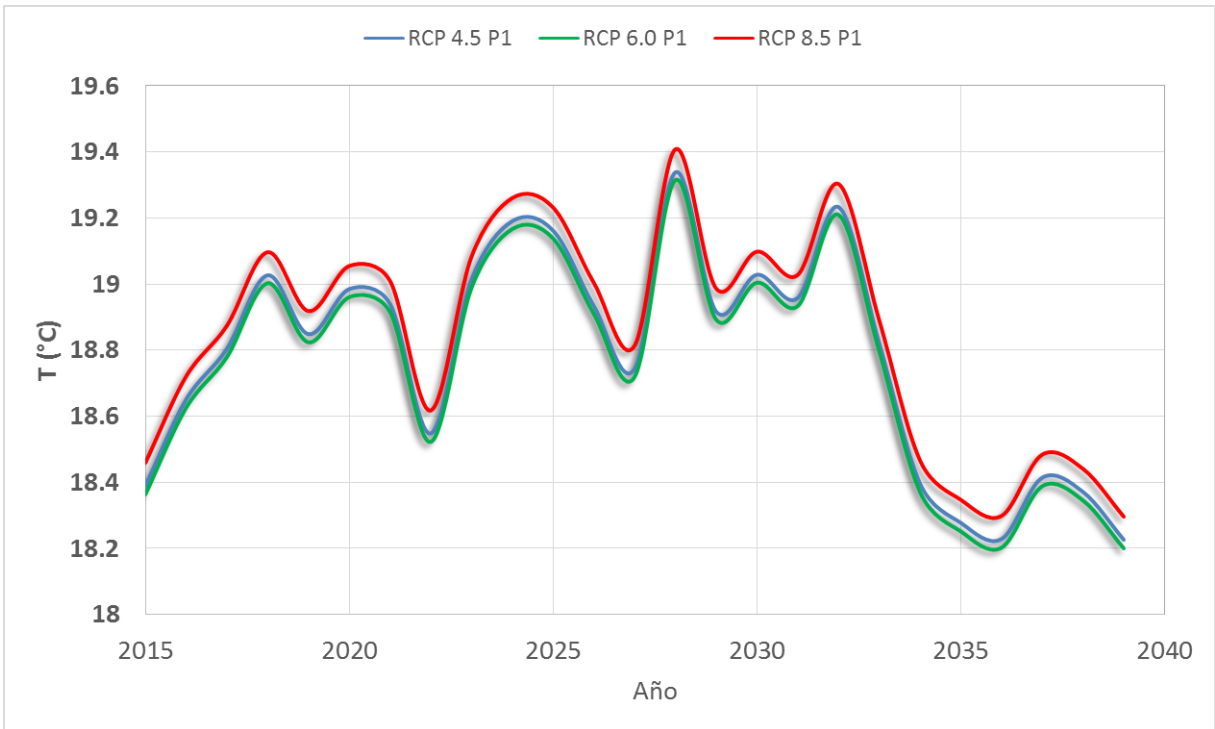


Figura 7. 25. Series de datos climáticos futuros - TMA para cada escenario de cambio climático para el periodo 2015 - 2039

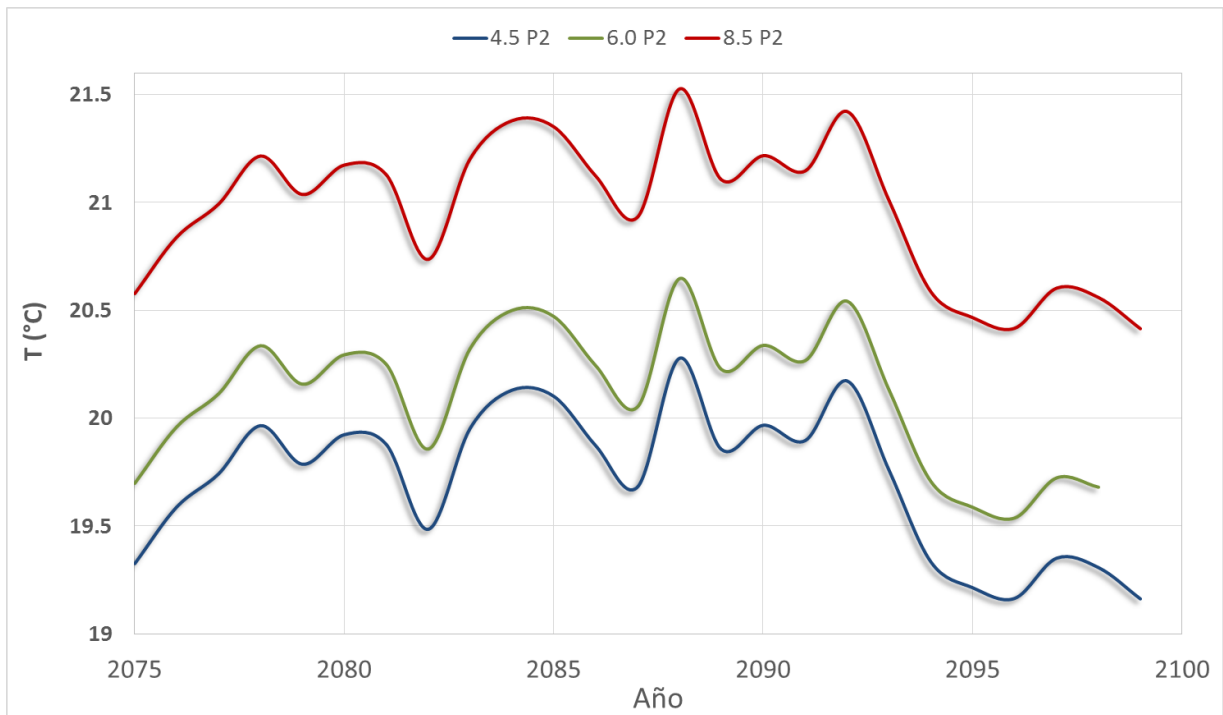


Figura 7. 26. Series de datos climáticos futuros – TMA para cada escenario de cambio climático para el periodo 2075 – 2099.

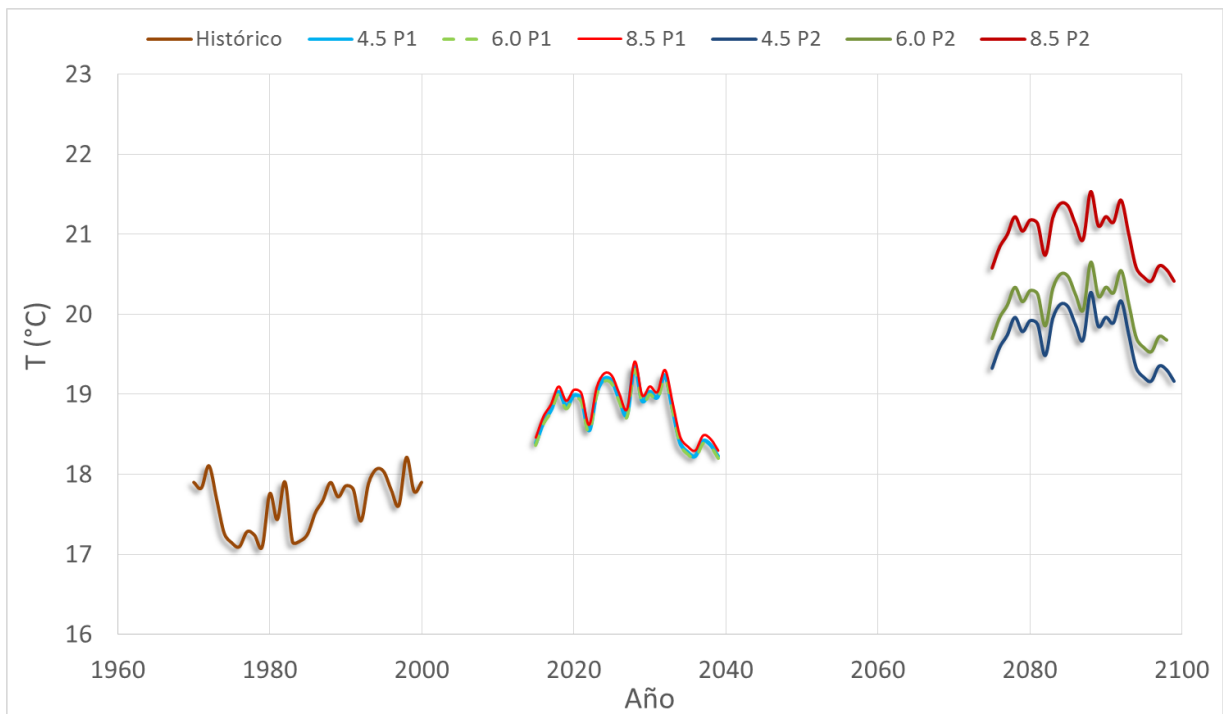


Figura 7. 27. Series de datos actuales y futuros - TMA histórica y de cambio climático

En el caso de la precipitación en el primer periodo de proyección de precipitación no es fácilmente apreciable el comportamiento de cada escenario ya que llegan a traslaparse en más de una ocasión principalmente los RCP 6.0 y 8.5, siendo el 4.5 el que a través de un margen reducido muestra valores de menor precipitación. Para el segundo periodo los escenarios muestran una gran discrepancia siendo el RCP 8.5 con los valores de PTA más bajos.

Por otra parte las temperaturas describen un comportamiento más discernible acorde al nivel de gravedad de los escenarios, a diferencia del RCP 6.0 en el primer periodo que se muestra más bajo que el RCP 4.5.

Las series que se han obtenido a partir de esta metodología son las que se utilizarán para las simulaciones de hidrología superficial y subterránea con el fin de estimar si la piezometría de los acuíferos estudiados se verá afectada por los cambios en las magnitudes de temperatura y precipitación que describen los escenarios RCP y que se describen en los gráficos.

7.8 Modelación Hidrológica Superficial – Modelo Evalhid

7.8.1 Configuración conceptual del modelo

A partir del MDE de la región se generó el sistema de drenaje de la cuenca y de éste se establecieron las microcuencas dentro de la zona estudiada como se muestra en la figura 7.28.

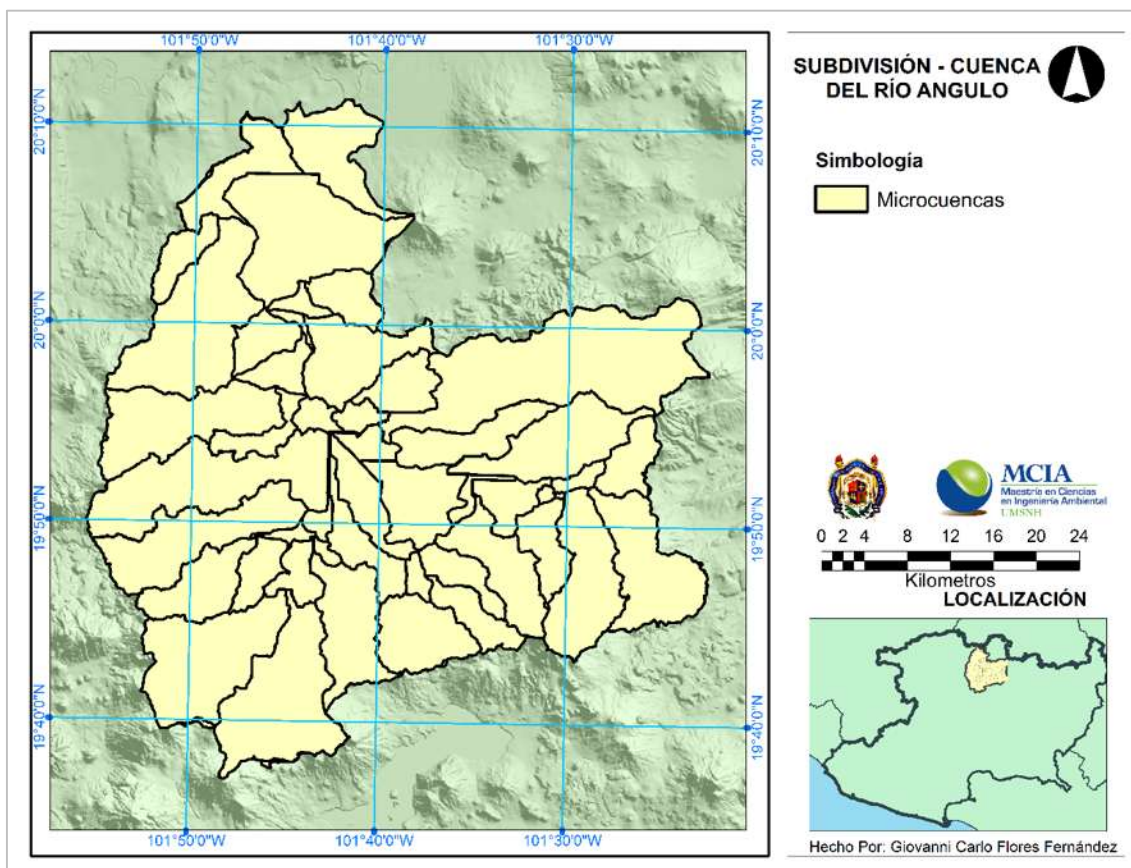


Figura 7. 28. Establecimiento de microcuencas dentro del sistema de cuenca del río Angulo

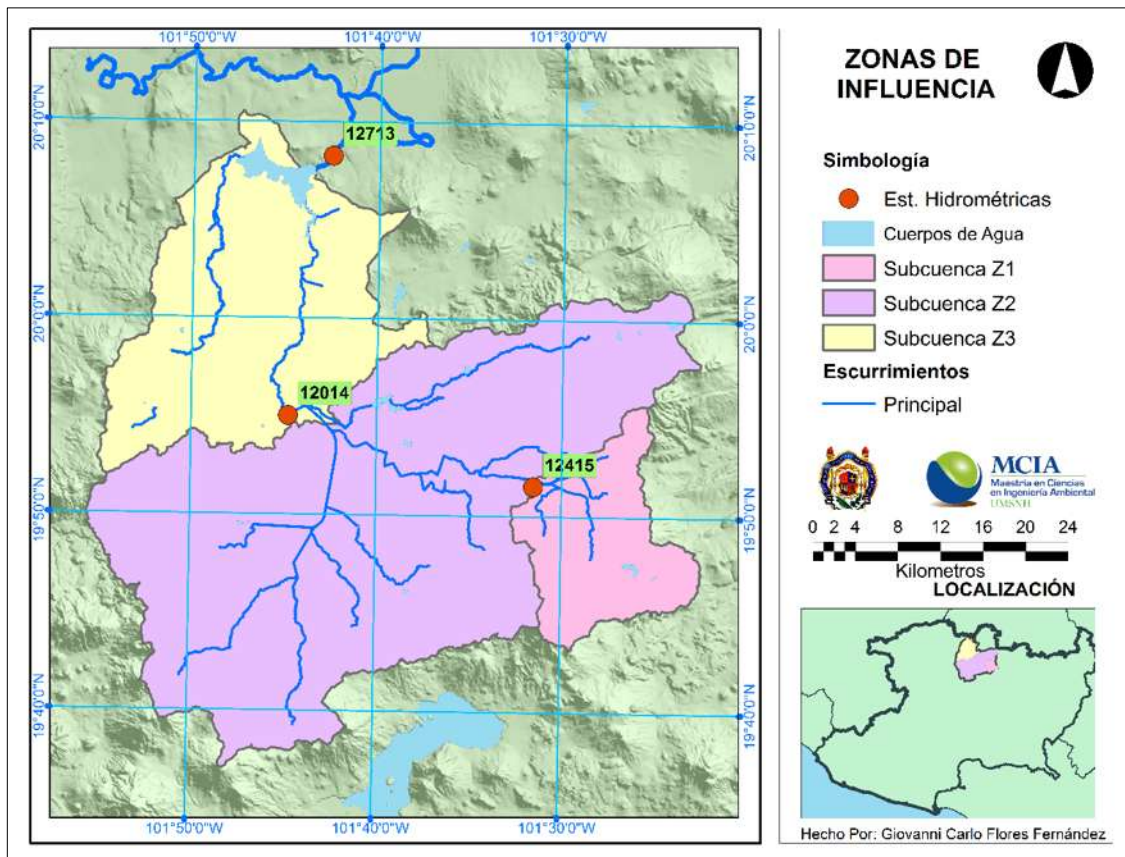


Figura 7. 29. Zonas de calibración de acuerdo a estaciones hidrométricas

Las estaciones de monitoreo 12713, 12014 y 12415 ubicadas sobre los ríos de la Patera y el río Angulo, permitieron establecer las zonas de calibración (figura 7.29), donde los datos históricos aforados se utilizan para las etapas de calibración y validación del modelo.

Se generaron polígonos de Thiessen para conocer las zonas de influencia de las estaciones meteorológicas, las cuales se muestran en la figura 7.30.

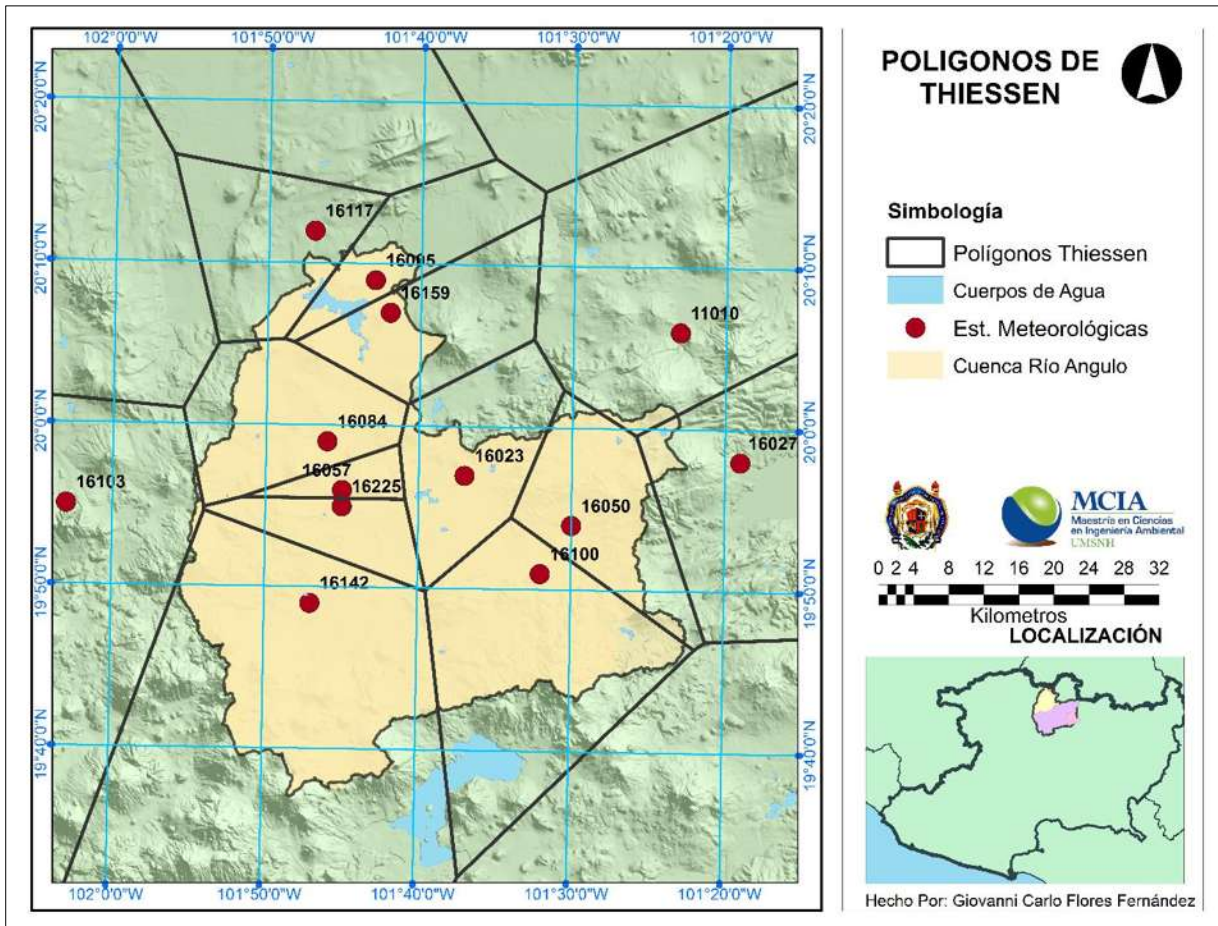


Figura 7. 30. Polígonos de Thiessen de las estaciones meteorológicas seleccionadas

Al conocer la influencia que tiene cada estación sobre las microcuencas, se generan estaciones ficticias para los casos en que se presenta más de una zona de influencia mientras que los conjuntos de microcuencas bajo la misma afectación se unen en un solo sistema, llegando a la configuración de la figura 7.31.

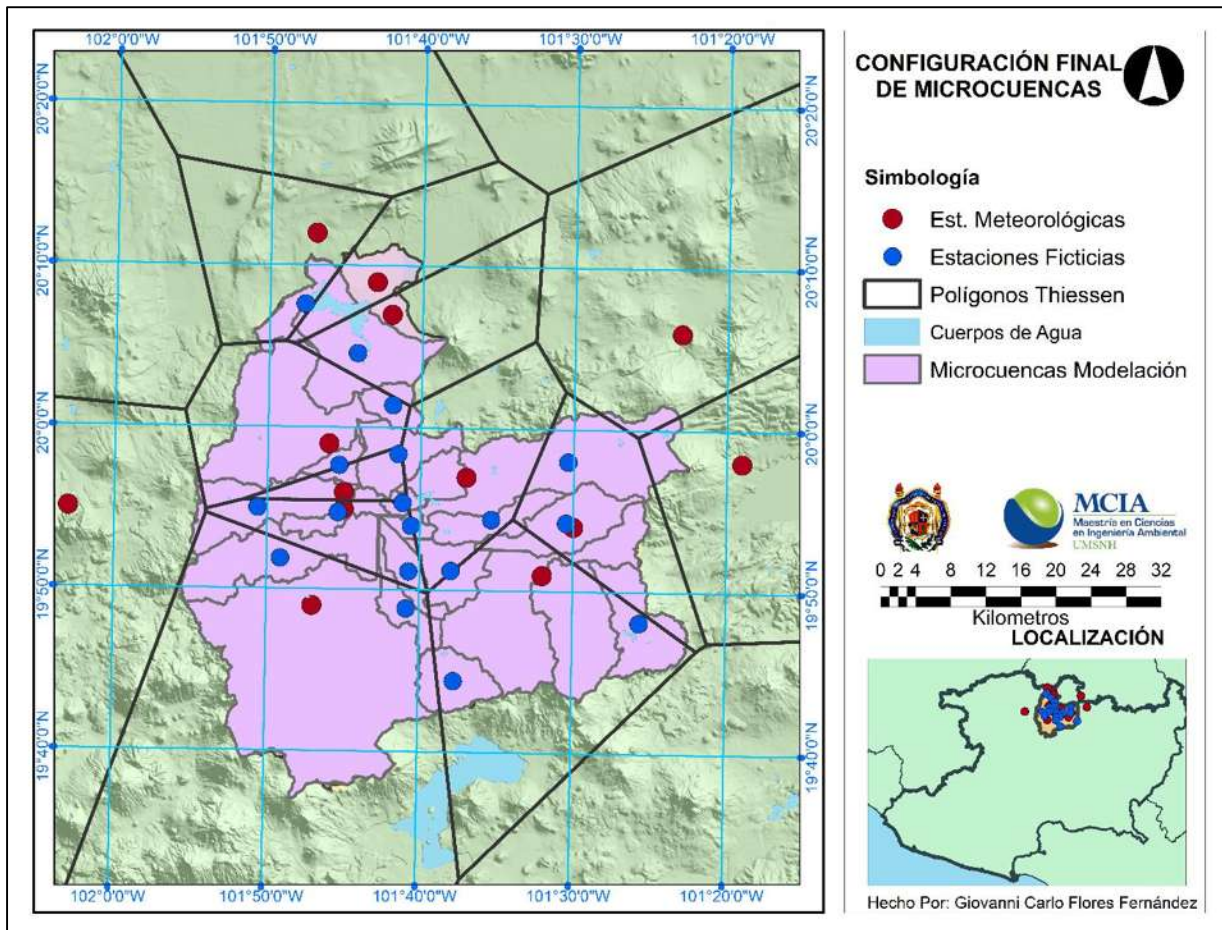


Figura 7. 31. Configuración final de microcuencas

7.8.2 Calibración

Se designaron tres zonas (Z1-12415, Z2-12014 y Z3-12713) para el proceso de calibración tomando como referencia la ubicación de las estaciones hidrométricas cuyos datos servirán de punto de comparación.

La zona Z1-12415 se localiza en la parte alta de la cuenca, cuenta con una superficie de 216 km², cuenta con dos canales de riego en la zona, los cuales son monitoreados en las estaciones de aforo 12427 y 12440. La restitución a régimen natural en esta zona se realizó sumando los gastos aforados en las estaciones de dichos canales a la estación 12415.

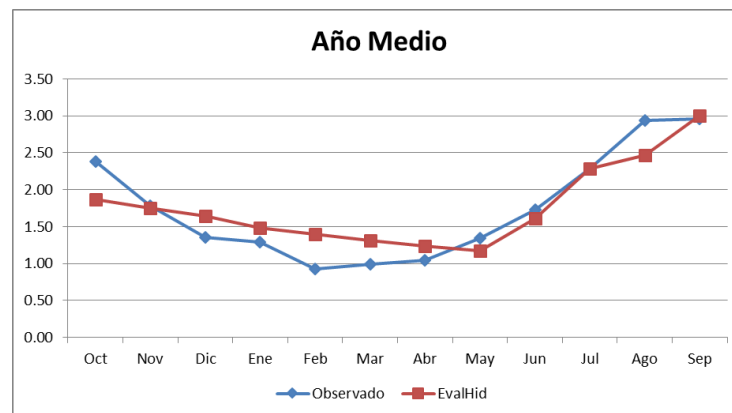


Figura 7. 32. Escurrimientos de año medio resultantes (Hm³) en Z1-12415.

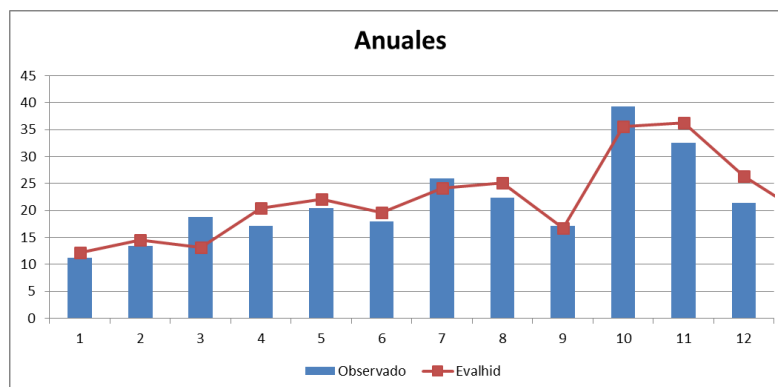


Figura 7. 33. Escurrimientos anuales resultantes (Hm³) en Z1-12415

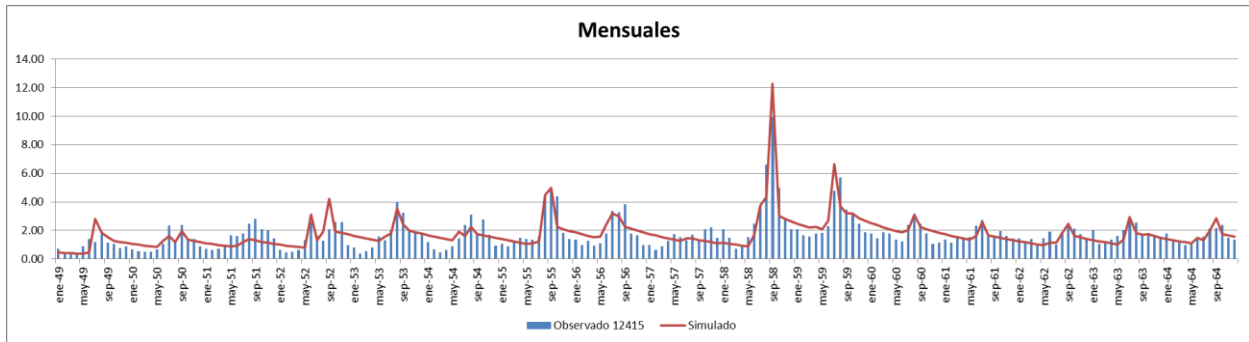


Figura 7. 34. Escurremientos mensuales resultantes (Hm³) en Z1-12415

La zona Z2-12014 abarca la parte alta y media de la cuenca con una superficie aproximada de 1,475 km² y contiene a la localidad de Zacapu de mayor consideración poblacional dentro de la cuenca, el distrito de riego con el mismo nombre y se tienen también las presas Copándaro y Aristeo Mercado.

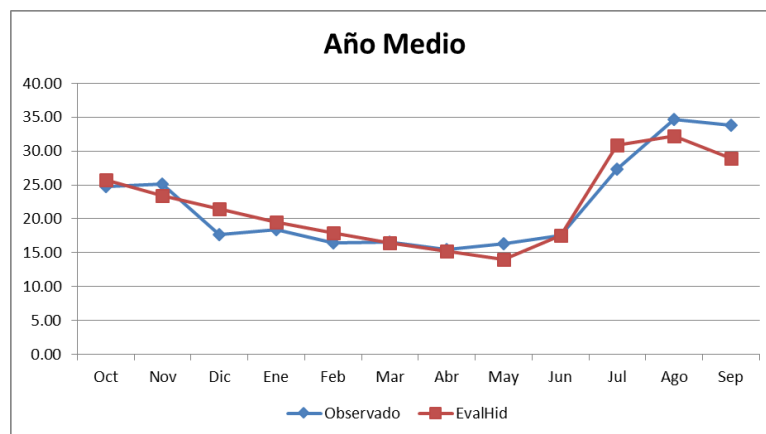


Figura 7. 35. Escurremientos de año medio resultantes (Hm³) en Z2-12014.

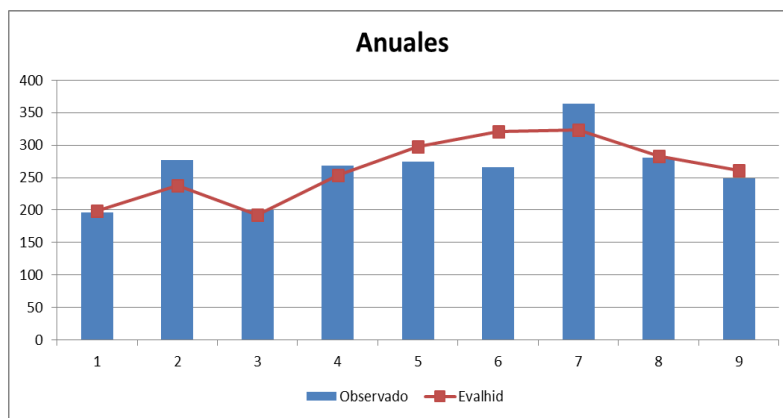


Figura 7. 36. Escurremientos anuales resultantes (Hm³) en Z2-12014

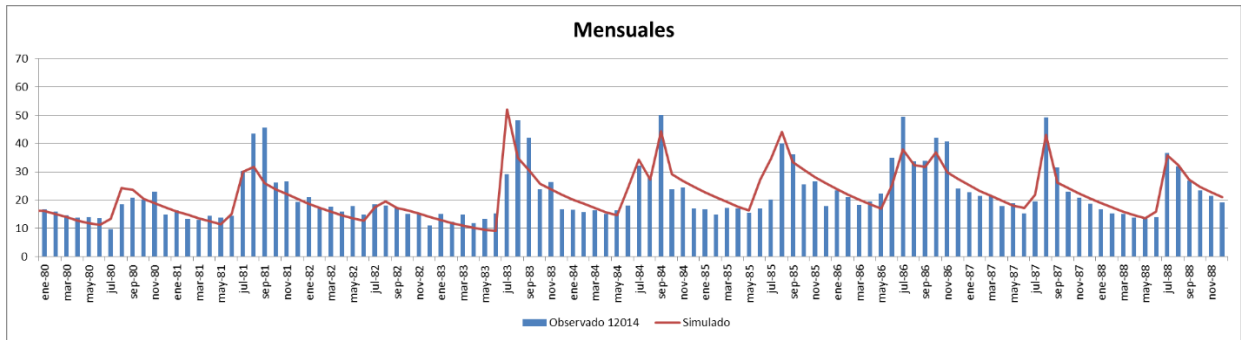


Figura 7. 37. Escurremientos mensuales resultantes (Hm³) en Z2-12014.

La zona Z3-12713 comprende aproximadamente el 99 % de la superficie total de la cuenca con 2,040 km², abarca infraestructura hidráulica como la presa derivadora en la localidad de Villa Jiménez la cual abastece a la central hidroeléctrica Botello y la presa Melchor Ocampo.

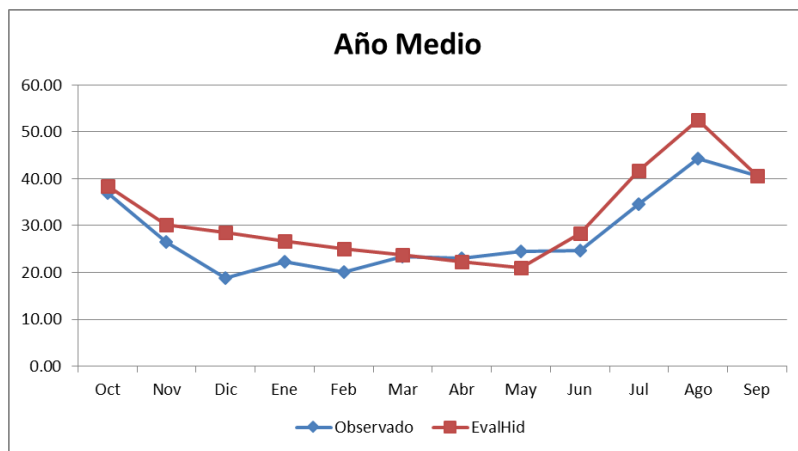


Figura 7. 38. Escurremientos de año medio resultantes (Hm³) en Z3-12713.

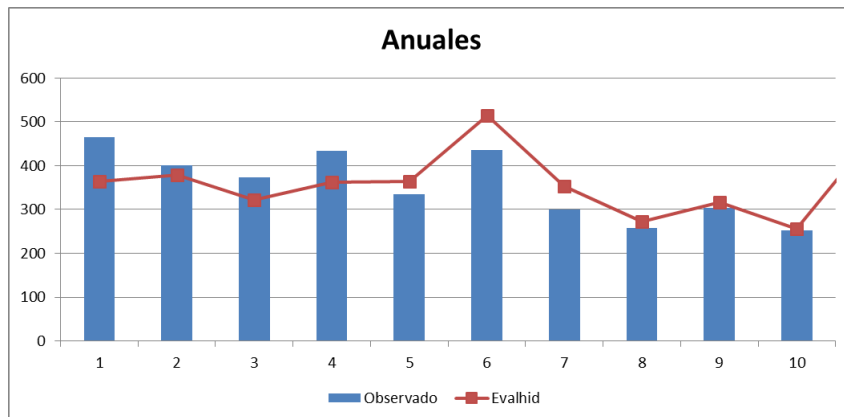


Figura 7. 39. Escurremientos anuales resultantes (Hm³) en Z3-12713.

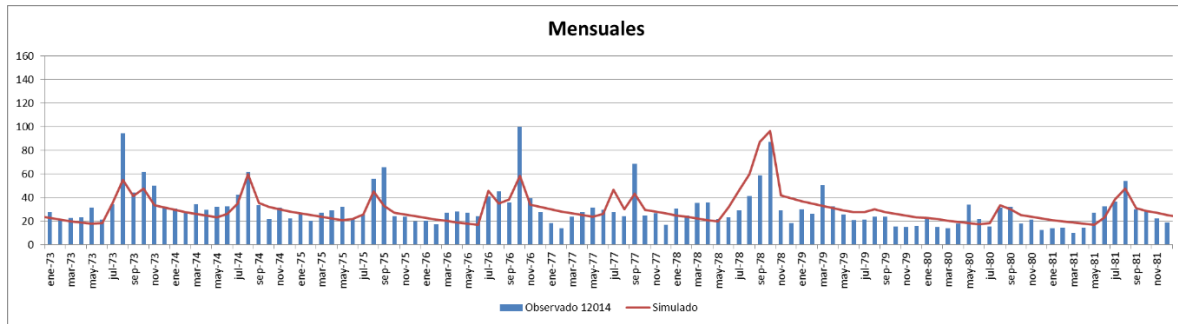


Figura 7. 40. Escurreimientos mensuales resultantes (Hm³) en Z3-12713

A continuación se presenta para los gráficos anteriores los valores de los indicadores de ajuste utilizados para la calibración y los parámetros correspondientes de humedad máxima, Infiltración máxima, el coeficiente de excedente C y el parámetro α .

Tabla 7. 42 Parámetros de calibración e indicadores de ajustes resultantes para las zonas de modelación.

ZONA DE MODELACIÓN	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN				INDICADORES DE AJUSTES		
	Hmáx (mm)	C	Imáx (mm)	α	NSE	ln NSE	r^2
Z1-12415	534.00	0.10	207.75	0.064	0.68	0.55	0.84
Z2-12014	383.20	0.10	500.00	0.085	0.70	0.73	0.84
Z3-12713	327.00	0.20	237.20	0.027	0.56	0.51	0.75

Ante estos resultados es posible admitir bajo ciertas consideraciones que el modelo reproduce de manera apropiada los escurrimientos que se presentan naturalmente en la realidad, permitiendo entonces plantear los escenarios de simulación requeridos a partir de series de precipitación y temperatura de proyección futura con carácter equipotencial a las históricas que correspondan con los horizontes de proyección de las series con afectación de cambio climático generadas por INECC, permitiendo obtener los volúmenes de infiltración o recarga hacia los acuíferos como parte de los resultados acumulados del modelo, los cuales son necesarios como parámetro de entrada de las acciones elementales de la modelación hidrológica subterránea.

7.9 Modelación Hidrológica Subterránea – Modelo Aquival

7.9.1 Caracterización del acuífero Pastor Ortiz

i. Localización

El acuífero Pastor Ortiz se localiza en la porción norte del estado de Michoacán, llegando hasta la margen izquierda del río Lerma, entre los paralelos 19° 48'57.6" y 20° 19'22.8" de latitud norte, y entre los meridianos 101° 22'48" y 101° 56'38.4" de longitud oeste, contando con una superficie de 1798 Km²

ii. Estudios previos

Se determina un valor de recarga media anual de unos 28 Mm³/año, siendo cerca del 70% de ella originada por infiltración natural, y 30% corresponde a retornos de riego.

En el periodo 1990 a 1993 la extracción del acuífero resultó 37 a 64 Mm³/año y el volumen concesionado por el Registro Público de Derechos de Agua era 127,434, 114 m³/año

La disponibilidad de agua subterránea se estimó en -98, 840,114 m³/año, siendo el signo negativo indicativo de una pérdida continua importante en las reservas almacenadas, implicando que el acuífero esta sobreexplotado y por tanto de disponibilidad nula.

iii. Clima

El Servicio Meteorológico Nacional de la Subdirección General Técnica, de la Comisión Nacional del Agua proporciona los datos climatológicos con los cuales se identifican tres tipos de clima: templado frío, templado cálido y semi-cálido siendo el primero detectado entre Las Fuentes y Pastor Ortiz; el segundo, por Puruándiro, Corrales, Casa Blanca y Angamacutiro, y el tercero en la franja definida por Santa Fe del Río y El Salto.

iv. Temperatura

La temperatura anual promedio es 18.2°C, en 1992 se registra 16.93°C y 19.76°C en 1982, correspondiendo a mayo con 21.79°C el mes más cálido, mientras enero es el más frío con 14.48°C.

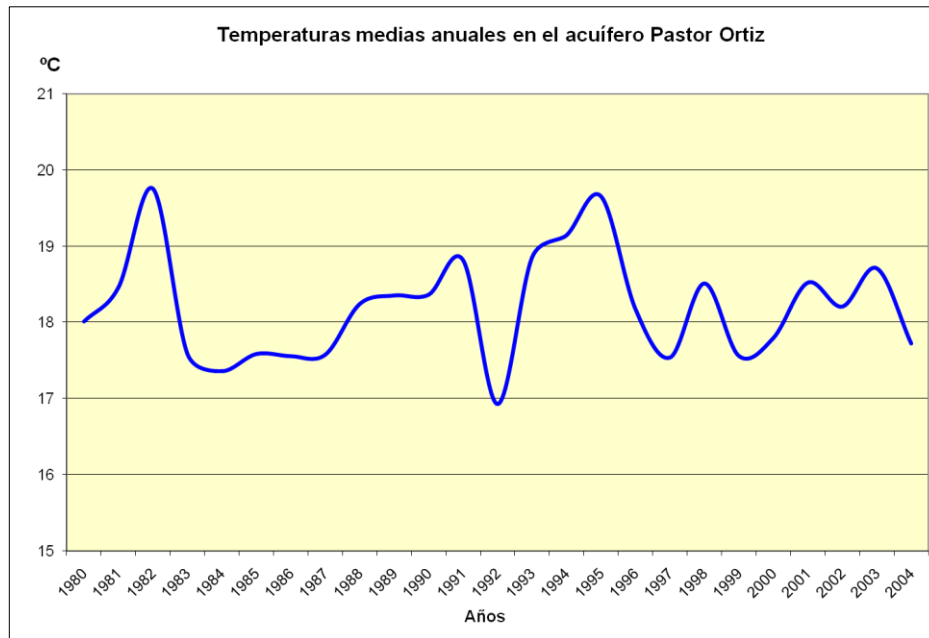


Figura 7. 41. Temperatura anual promedio en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007)

v. Precipitación

La precipitación pluvial anual promedio es 745.67 mm, con mínima de 562.16 en 2000 y 985.51 de máxima en 2004. La temporada de lluvias ocurre entre junio y septiembre, con tormentas ocasionales significativas en mayo y octubre; julio es el mes de mayor precipitación con 188.39 mm, la lámina media en marzo es apenas 4.58 mm.

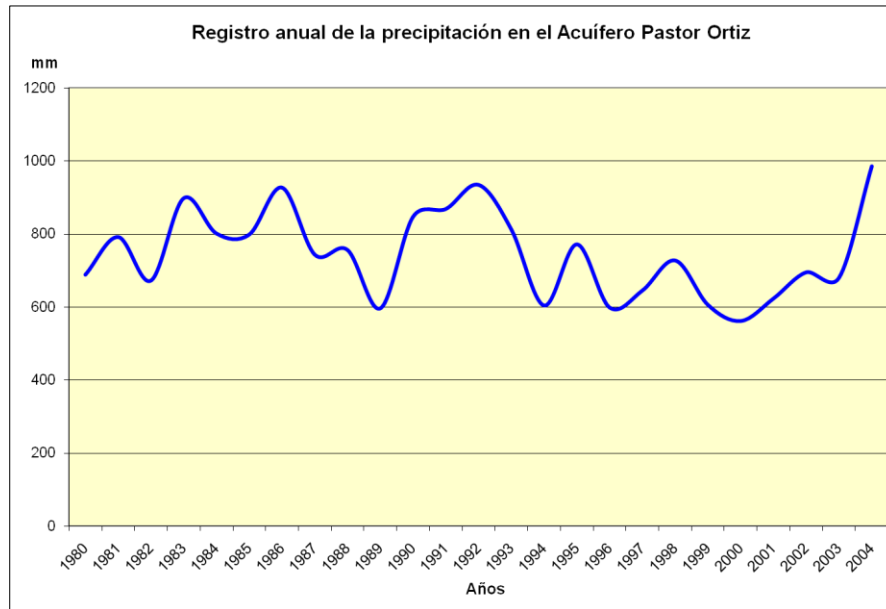


Figura 7. 42. Precipitación anual en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007)

vi. Evaporación

La evaporación potencial promedio es 1555.91 mm/año, con 1303.74 mm de límite inferior en 2000 y un máximo de 1813.80 en el año 1982. Siendo mayo el mes con índice más grande de evaporación potencial con 190.4 mm; en cambio, diciembre registra 37.68 mm.

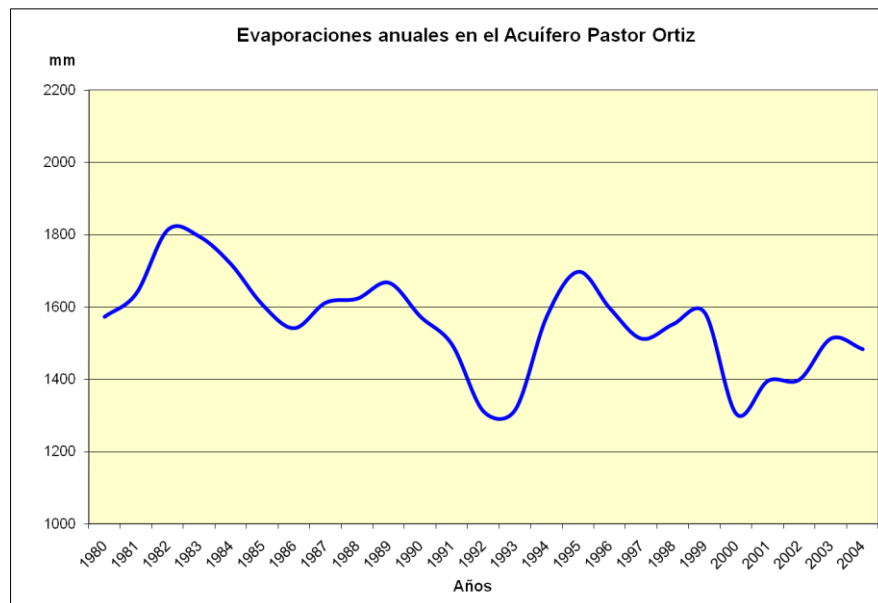


Figura 7. 43. Evaporación anual en el acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).

vii. Hidrografía

El acuífero Pastor Ortiz se ubica en la Región hidrológica No. 12 (RH-12) “Lerma-Chapala-Santiago, en la subcuenca denominada “Río Angulo”, el cual representa el escurrimiento principal, formado por el río La Patera originado en las estribaciones occidentales del cerro Jendo (El Picacho), y por el dren mayor de la ciénaga Zacapu, donde se asienta el Distrito de Riego no. 22 “Zacapu”

La unidad Pastor Ortiz domina 6507 ha mediante el canal principal revestido Santa Ana que alimenta a los canales Santa Ana y Zurumuato con un 7.0 m³/s de capacidad.

Dicha unidad localizada en la margen izquierda del río Lerma, cuenta con la derivadora Marcazusa, y los almacenamientos pequeños, presas Tres Mezquites y El Arco.

La superficie agrícola de la unidad Angamacutiro tiene 6986 ha, se divide en cinco secciones donde se asientan 2675 usuarios; es alimentada con la presa Melchor Ocampo con 200 y 185 Mm³ de capacidad total y útil, al año se utilizan 300 Mm³ parte de los cuales transitan por el río Lerma para alimentar otras unidades de riego, los canales principales margen derecha e izquierda tienen 39.5 y 8.1 km de largo, respectivamente.

viii. Geología

El estado de Michoacán se constituye geológicamente por rocas con basamento metamórfico vulcano-sedimentario, sedimentarias del Mesozoico e ígneas intrusivas y extrusivas del Cenozoico.

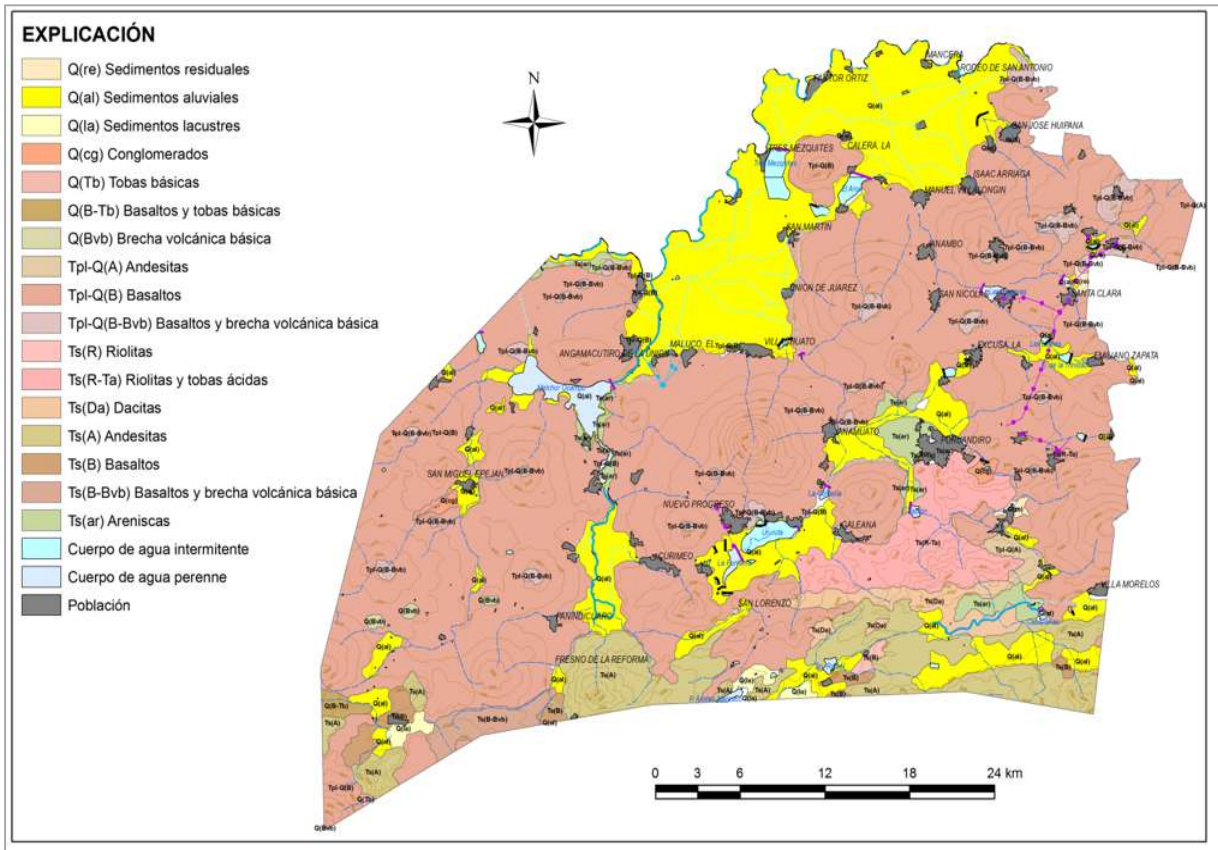


Figura 7. 44. Geología general del acuífero Pastor Ortíz (CNA-IMTA 2007).

ix. Geología de Subsuelo

Para la determinación de la geología del subsuelo se analizaron los cortes litológicos y perfiles geoelectrónicos más representativos.

Dentro de estos se encuentran dos pozos de uso agrícola en el Ejido Galeana, municipio de Puruándito, al que se le realizó sondeo eléctrico vertical (SEV), encontrándose que el subsuelo se conforma por una capa de 2 m de espesor aproximadamente de suelo orgánico y material arcilloso, subyaciendo un sustrato roca basáltica con matriz arcillo-limosa con unos 3 m, descansa sobre una capa de 80m de espesor y 3.0 ohm-m de resistividad, en la parte inferior se detectan tobas arenosas de compacidad intermedia con 28 ohm-m de espesor indeterminado por la dificultad de medición de la base de la roca.

Otro es del Ejido La Calera, municipio José Sixto Verduzco, que también cuenta con SEV de calibración, cuenta con 6 m de suelo arcilloso con 4 ohm-m de resistividad, 20 m de material piroclástico intercalado con derrames volcánicos fracturados de composición intermedia, 67 m con 105 ohm-m de roca volcánica extrusiva de composición ácida, moderadamente fracturada y finalmente derrames riolíticos y tobas compuestas por arena fina a media.

Litológicamente el pozo de agua potable de la Unidad Deportiva de Panindícuaro arroja la siguiente descripción.

Prof.,m	Material
0 – 6	Suelo Residual
6 – 83	Basalto
83 – 96	Arena empacada en arcilla
96 – 102	Piroclastos
102 – 108	Arena empacada en arcilla
108 – 118	Piroclastos
118 – 123	Basalto
123 – 130	Piroclastos
130 – 140	Basalto
140 – 150	Piroclastos con boleos
150 – 155	Basaltos
155 – 160	Arena Volcánica con boleos
160 – 185	Basalto
185 – 203	Boleos con Arenas
203 – 290	Andesita Alterada y Fracturada
290 – 305	Arcillas
305 – 310	Arena Empacada en Arcilla

El marco geológico subterráneo para el acuífero Pastor Ortiz muestran un origen compuesto por derrames, tobas, brechas y piroclastos de naturaleza riolítica, andesítica y especialmente basáltica, seguidos por depósitos lacustres.

Durante la formación de rocas riolíticas, basálticas y andesíticas, tobas, brechas, aglomerados y piroclastos, se produjo de forma paralela períodos alternantes de

erosión y depósito de sedimentos continentales, lacustres y aluviales, estos se caracterizan por formar mesetas hasta cierto punto horizontales, con pseudo-estratificación, alcanzando un grosor de 500m de forma conjunta.

A partir de los rasgos geológicos analizados, los cortes de pozos y reconocimientos de campo se determinaron que poseen dimensiones considerables en superficie y cientos de m de espesor en el subsuelo, formando unidades espaciales de carácter regional.

x. Hidrogeología

Se identifican dos medios acuíferos, uno de tipo libre, en material volcánico y sedimentario, regularmente consolidado, así como en basalto y arenisca, de porosidad y permeabilidad media, con buena oportunidad de recarga, y otro profundo de carácter semi-confinado, constituido en basalto o andesita fracturada y piroclastos asociados, de porosidad secundaria y conductividad hidráulica intermedias

El acuífero libre tiene rendimiento específico regional de 0.10 o 0.15 con drenaje retrasado, y 0.008, o mayor para tiempos largos de bombeo, el semi-confinado.

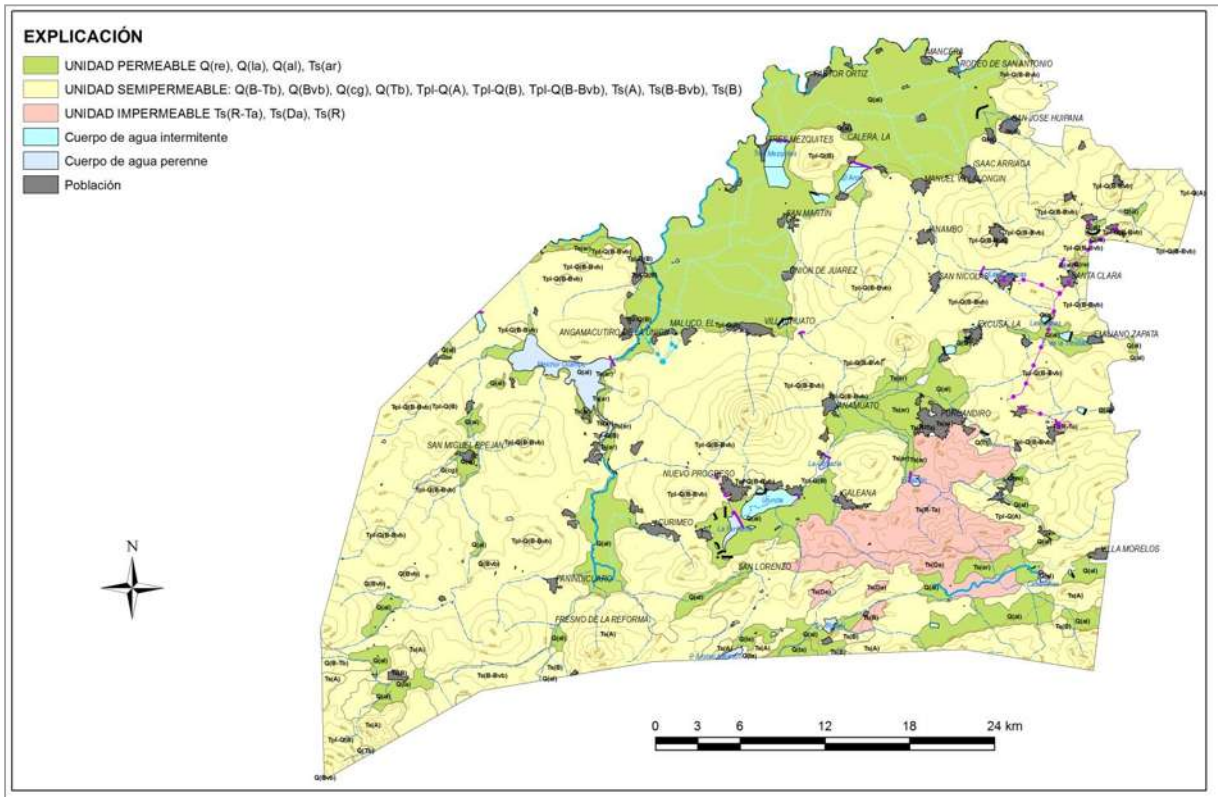


Figura 7. 45. Unidades hidrogeológicas del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).

xi. Modelo conceptual de funcionamiento

El esquema dinámico formula tres grupos de elementos variables que en su descripción conceptual simple corresponden a entradas, cambio de almacenamiento y salidas.

Las entradas o recarga corresponden a infiltración natural por lluvia, pérdidas en redes de agua potable, retornos de riego y flujo lateral subterráneo. Las salidas o descarga se refieren a bombeo, evapotranspiración de aguas freáticas, gasto base y flujo lateral subterráneo.

El cambio de almacenamiento representar pérdida o ganancia de las reservas dinámicas, si en el intervalo de tiempo y área de balance ocurre abatimiento o recuperación de la carga hidráulica, influyendo principalmente la recarga y el bombeo.

La vinculación entre entradas y salidas son los parámetros de tipo distribuido que definen las propiedades del sistema de agua subterránea.

7.9.1.1 Parámetros hidrogeológicos

Las características hidráulicas del acuífero se estimaron a partir de pruebas de bombeo a gasto constante y variable, en régimen transitorio, para acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo (CONAGUA 2007). A continuación se describen los resultados para los diferentes parámetros:

Coefficiente de transmisividad (T)

La transmisividad es el producto de la permeabilidad y el espesor saturado, representa la cantidad de agua que fluye en el acuífero.

El promedio de este coeficiente es $4.82E-03$ m²/s para unos 100 m de espesor efectivo cerca de los pozos, siendo el del acuífero considerablemente mayor.

En los bordes del acuífero varía entre 0.5 y $6.0E-03$ m²/s, entre 0.5 y 4.0 en el valle de Angamacutiro, de 0.5 a 10.0 en el sector norte; estimándose localmente 25.3, 28.7 y $58.3E-03$ m²/s.

El acuífero es de tipo libre con 0.13 de rendimiento específico, con drenaje dependiente de la granulometría.

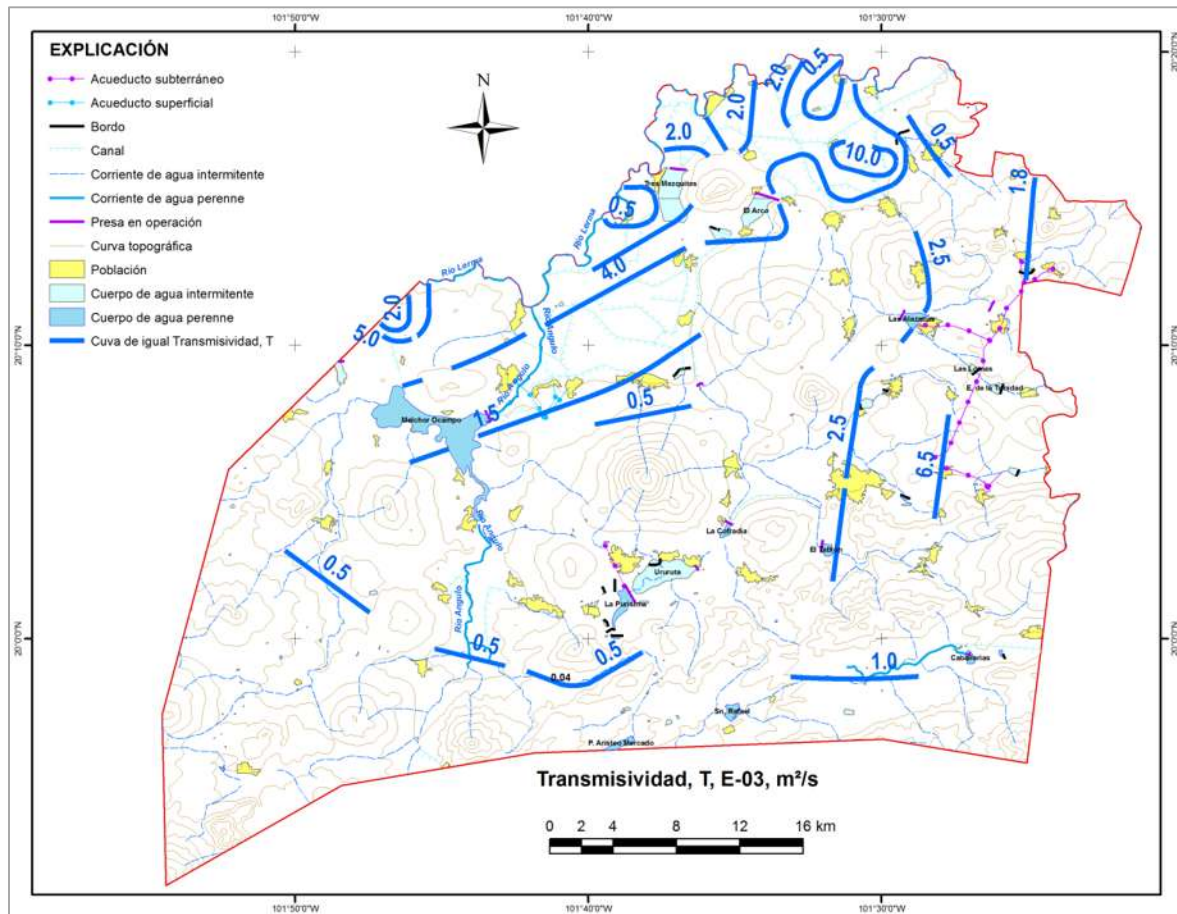


Figura 7. 46. Distribución de transmisividad del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).

Coefficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S y S_y)

Por la naturaleza litológica cambiante se detectan acuíferos semi-confinados locales con 0.075 de coeficiente de almacenamiento aproximadamente.

Para fines de balance geohidrológico se adopta 0.10 como dato representativo de la condición regional.

Conductividad hidráulica (KH)

También denominada descarga específica porque representa un gasto que pasa a través de una sección transversal unitaria; tiene unidades de velocidad, [m/s] en el sistema M.K.S adoptado.

En la zona central del acuífero varía entre 0.5 y 10.0E-05 m/s, es del orden de 0.3 en su costado sur, de 3.0 a 7.0 en el lado oriente, y entre 2.0 y 10.0 en el poniente, por la parte norte, en el valle de Pastor Ortiz, entre 2.0 y 10.0E-05 m/s. Con promedio general deducido de aforos y pruebas de bombeo que resulta de 5.31E-05 m/s.

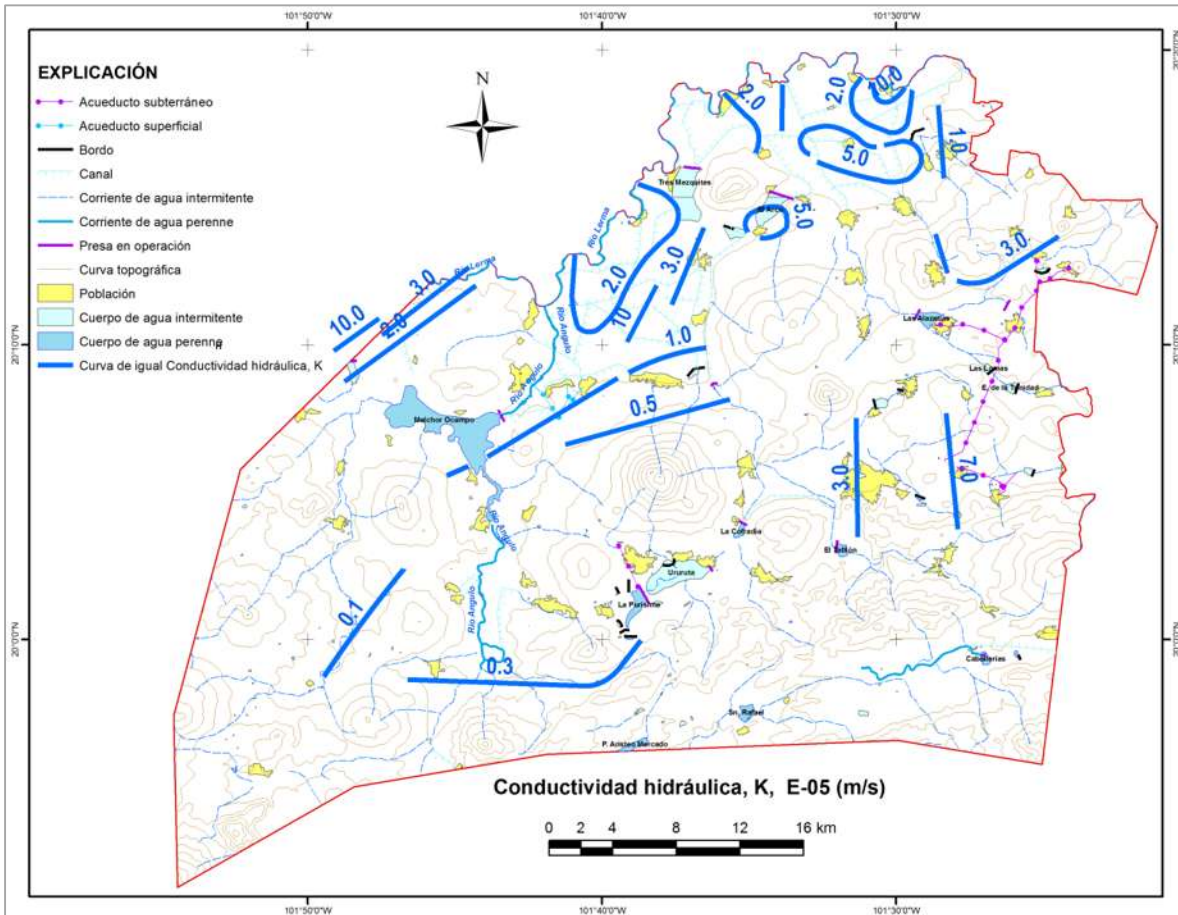


Figura 7. 47. Distribución de la conductividad hidráulica del acuífero Pastor Ortiz (CNA-IMTA 2007).

Gasto específico (q)

Varía con el caudal y los tiempos de bombeo de pozos, y con la permeabilidad del acuífero; equivale al rendimiento de aquellos.

En el límite oriental fluctúa entre 1.8 y 6.0 lps/m, al norte comporta valores entre 0.5 y 10.0 con datos locales de 25.3 y 58.3, en la zona central-norte entre 0.5 y 2.5 con 9.3

y 12.4 de máximos puntuales, en el flanco poniente es de 2.0 a 5.0 con un valor extremo de 38.6 lps/m.

En términos generales el caudal específico varía en el rango de 1.0 a 2.0, con 4.8 lps/m de promedio pesado

Comportamiento hidráulico

El acuífero es libre o freático, o puede ser semiconfinado en zonas locales por la interdigitización de material fino embebido en el acuífero principal.

Su coeficiente de almacenamiento regional se aproxima a 0.10.

La salida subterránea es por los valles Pastor Ortiz al N y Ancihuácuaro al Noroeste, se infiere el comportamiento efluente del río Angulo sobre los acuíferos marginales, los gradientes hidráulicos del flujo resultan moderados o relativamente fuertes, las sierras volcánicas permeables por fracturamiento limítrofes actúan como áreas de recarga, tampoco se observan depresiones piezométricas significativas debido al bombeo, si existe sobreexplotación cabe esperar un descenso uniforme regional del nivel, poco probable por las variaciones hidrodinámicas e hidrométricas del acuífero.

Evolución de nivel estático

La evolución de nivel estático para 1992–2007 (Figura 7.48) abarca un lapso considerable para involucrar ciclos de lluvia, recarga y bombeo promedio o por arriba y debajo de éste, así que tal configuración caracteriza con razonable aproximación las condiciones piezométricas específicas del acuífero.

El nivel ha descendido hasta 25m en Pastor Ortiz, unos 20 en Tres Mezquites y Santiago Conguripo, por Panindícuaro el nivel se abatió 10 m y 15 en Angamacutiro, pero se ha mantenido constante hacia las estribaciones cerriles con escasa o nula extracción.

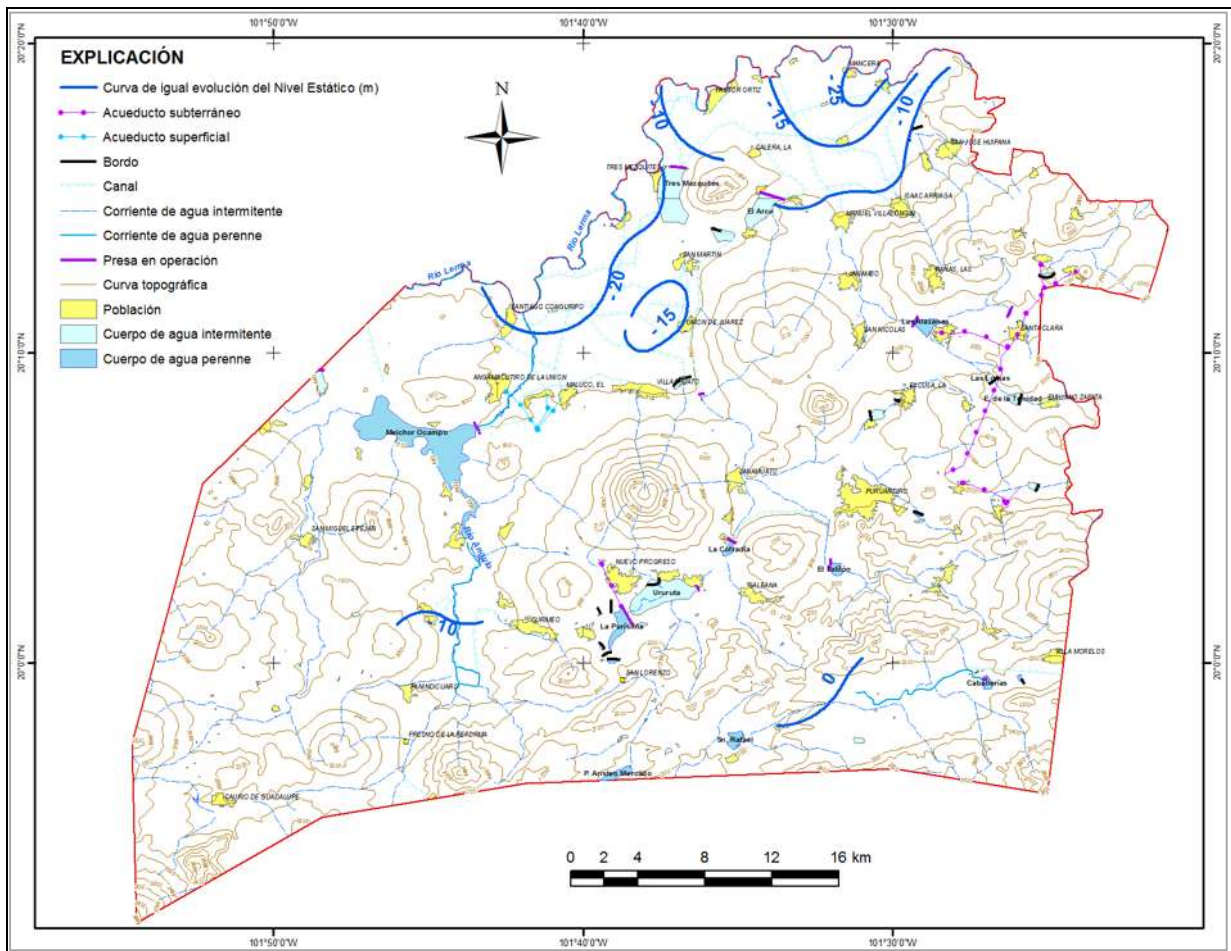


Figura 7. 48. Evolución de los niveles estáticos del acuífero Pastor Ortiz (1992-2007), (CNA-IMTA 2007).

Piezometría

A mayor número de pozos y rango de tiempo de registro mejor el discernimiento sobre la recuperación y descenso de niveles, así como de sus comportamiento relevante por ciclo en diferentes sectores del acuífero.

Cuantificación de la extracción de agua subterránea

El volumen anual de extracción se clasifica de acuerdo al uso a que se destina.

- Agrícola = Área regable/ uso consuntivo del cultivo (Ha lámina media en m)
- Potable = Número de habitantes / dotación media urbana y rural (lps/hab/día)
- Pecuario = Número de cabezas de ganado / dotación / día (lps / cg/ día)

- Doméstico = Número de habitantes / dotación media rural (lps / hab / día)
- Industrial = Tipo de industria / volumen medio anual del proceso, servicios y riego / índice, consumo (m³ / ton /producto).
- Servicios / comercial = Tiempo de uso / volumen (periodo anual/ lps / día)

La estimación de la hidrometría de extracciones se vale de cualquiera o una combinación de los métodos citados según la información disponible, con el fin de lograr la cifra más precisa en cada caso específico; la extracción total resulta de 113.45 Mm³/año.

7.9.2 Caracterización del acuífero Zacapu

i. Localización

El acuífero Zacapu se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán, entre los paralelos 19°37' y 19°57' latitud norte y los meridianos 101°24' y 101°55' longitud oeste; cubre 1239 km² de extensión superficial aproximadamente.

ii. Estudios Previos

Geológicamente el acuífero Zacapu se encuentra ubicado en un graben o fosa tectónica, actualmente cubierta por material clástico no consolidado; geohidrológicamente parece corresponder a una cuenca semi-cerrada, con salida por Villa Jiménez.

El flujo subterráneo es radial convergente, proviene de las sierras limítrofes, llega a las zonas bajas y sale en dirección SE-NW, por el poblado Villa Jiménez.

De las pruebas de bombeo se estiman valores de 0.52 a 3.91 x 10⁻³ m²/s para la transmisividad y la capacidad de aporte excede el volumen descargado, con unos 4.8 Mm³/año de disponibilidad adicional del acuífero.

Los aforos realizados de la descarga de manantiales, bombeo de pozos y norias resulta 17.12 y 4.89 Mm³/año respectivamente.

La geología predominante son las rocas volcánicas con secuencia alternante de tobas, brechas y piroclastos, de naturaleza basalto andesítico, así como por depósitos lacustres y aluviales, de granulometría y compacidad variables, que comprenden de terciario al reciente.

iii. Clima

Con base en información climatológica disponible en el Servicio Meteorológico Nacional, de la Subdirección General Técnica, de la Comisión Nacional del Agua se clasifica templado subhúmedo, la temperatura media anual es 16.12°C , con 766.32 mm/año de lluvia promedio y período principal de junio a septiembre.

iv. Temperatura

La temperatura anual promedio es 16.12°C , teniéndose mediciones de 14.68°C en 1999 y 17.92°C en 1991. La Figura 7.51. Muestra su comportamiento anual, mayo es relativamente el mes más cálido con 19.16°C en promedio, mientras enero registra 12.47°C .

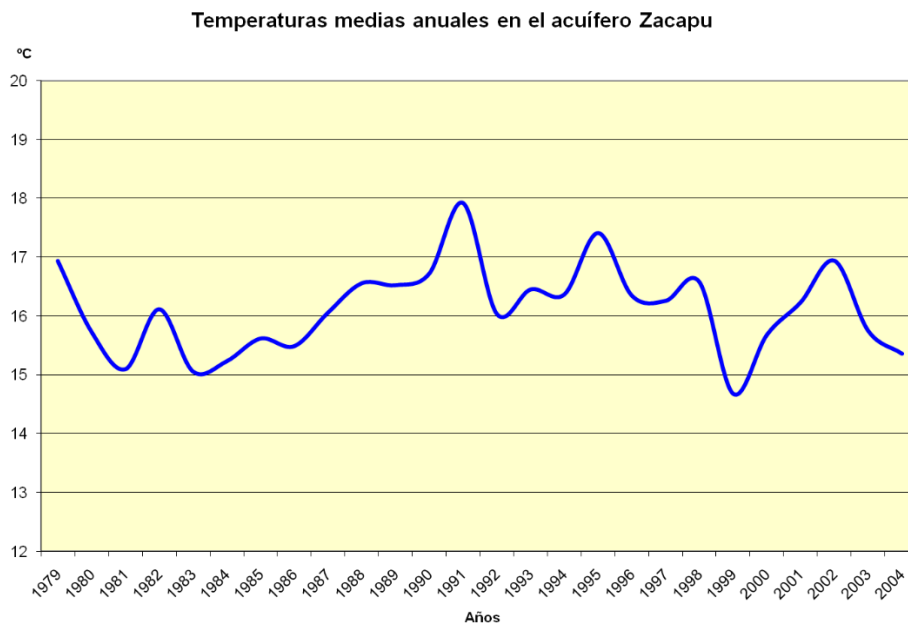


Figura 7. 49. Temperatura anual promedio en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007)

v. Precipitación

El promedio anual de precipitación pluvial es 766.32 mm, con mínimo de 574.44 registrado en el año 1996 y 957.54 como máximo para 1992, ocurriendo la temporada de lluvias entre junio y septiembre, con tormentas ocasionales significativas en octubre, teniéndose la mayor precipitación en julio con 176.72 mm y marzo el menor con 4.66 mm.

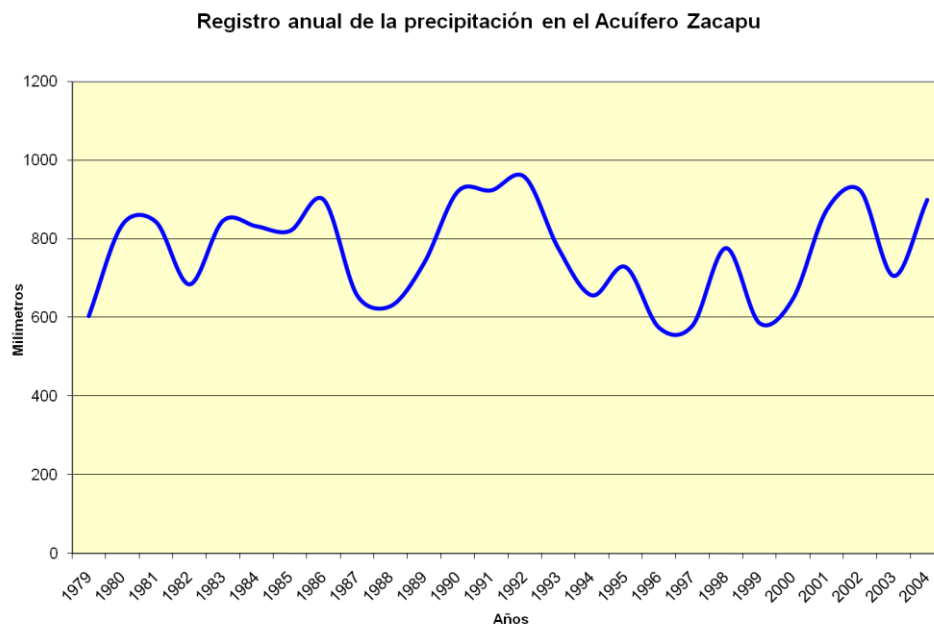


Figura 7. 50. Precipitación anual en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007).

vi. Evaporación

La evaporación potencial promedio es 1736.06 mm/año, en 1992 se obtuvo el valor de límite inferior de 1551.97, por otro lado su máximo de 1997.75 mm corresponde al registrado en 1998. A escala mensual Abril presenta la evaporación más grande con 204.67 mm, en cambio diciembre registra 73.91 mm.

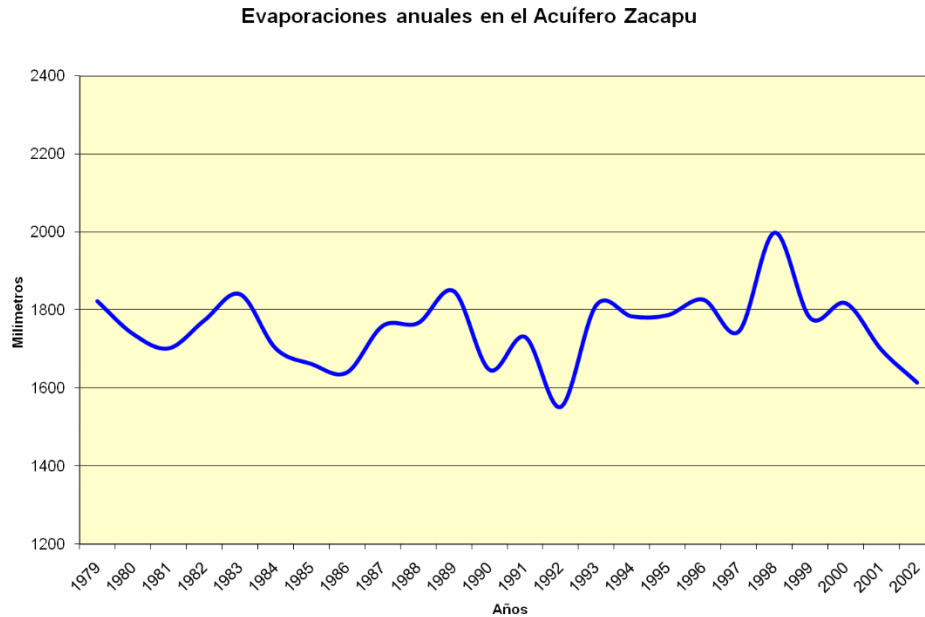


Figura 7. 51. Evaporación anual en el acuífero de Zacapu. (CNA-IMTA 2007).

vii. Hidrografía

El acuífero Zacapu se ubica dentro de la Región hidrológica No. 12, Lerma-Chapala-Santiago, su límite coincide aproximadamente con el parteaguas hidrográfico de las montañas circundantes del acuífero, donde se encuentra el río La Patera que confluye poco antes de llegar a Villa Jiménez, por la margen derecha al río Angulo el cual es uno de los afluentes más importantes del río Lerma.

El río La Patera tiene dirección noreste, es el dren principal de la ciénaga de Zacapu; por Villa Jiménez se asienta el Distrito de Riego No. 22 "Zacapu". El Angulo nace de la descarga de manantiales, los más caudalosos son los que forman la Lagunas Zacapu y Tarajero.

De datos hidrométricos mensuales de 1979 y 1980, de la estación Villa Jiménez, se determinan escurrimientos sensiblemente uniformes durante el estiaje y las lluvias, deduciéndose buena permeabilidad y consecuentemente alta capacidad de infiltración de los materiales superficiales del acuífero.

Se estima un escurrimiento de 1.65 m³/s que aporta la Laguna Zacapu al río Angulo, este funciona como colector general de la cuenca y se une por la margen izquierda al Lerma, a lo largo de 60km de recorrido recibe descargas de una extensa red de drenes agrícolas en la Ciénaga y en los valles de Panindícuaro y Angamacutiro, más adelante la Presa Melchor Ocampo aprovecha al Angulo para su embalse.

viii. Geología

Es carácter explosivo similar al eje Neovolcánico, cuyas emisiones cubrieron el basamento pre-existente y están representadas por rocas de composición basalto andesítica.

La composición andesítica se transforma en andesítica con alternancia de derrames brechas y piroclásticos finos a medios durante el Terciario y Cuaternario.

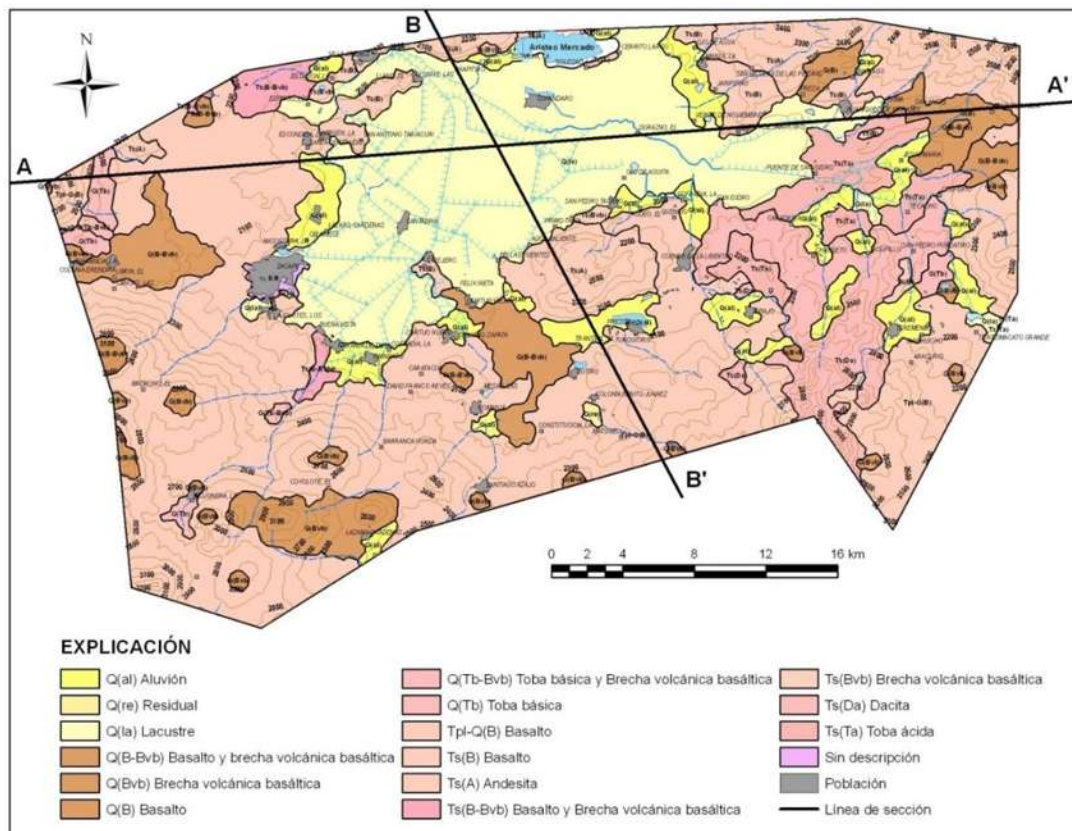


Figura 7. 52. Geología general del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).

ix. Geología del subsuelo

La siguiente es una descripción de la estratigrafía en el subsuelo del área de estudio con secciones esquemáticas representadas en las figuras 7.55 y 7.56.

El basamento litológico originado en el Cretácico Superior se encuentra ubicado aproximadamente a 1000m de profundidad está constituido por rocas marinas de origen carbonatado y clástico Ks, como caliza, lutita y marga.

De manera discordante sobreyacen rocas terciarias de composición basáltica Ti(B) de unos 200 m de espesor, mientras que en el oriente se acuña una estructura formada por derrames y piroclastos andesíticos Ti(A).

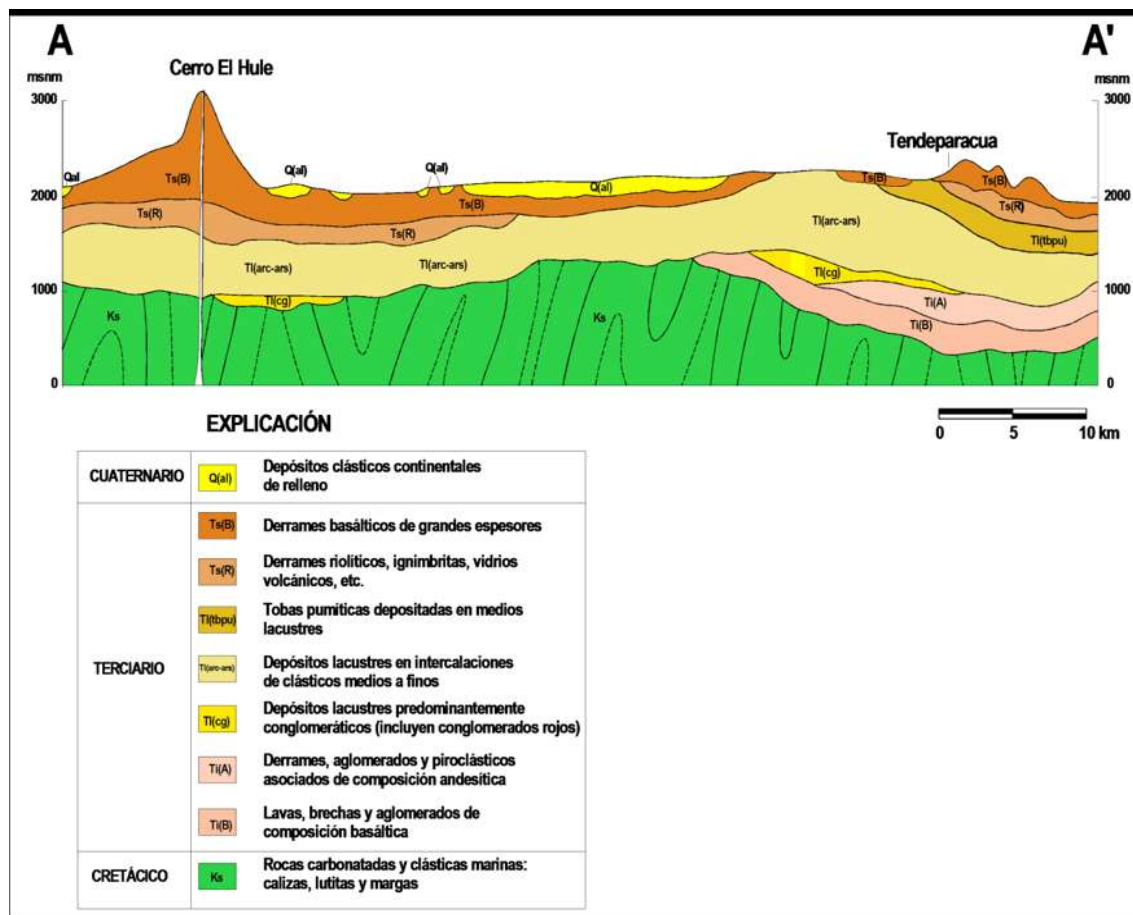


Figura 7. 53. Sección geológica A – A'

Con geometría irregular también descansan depósitos lacustres Tl(cg), con abundancia de conglomerados rojos de poco espesor, en forma alternante se encuentran estos mismos depósitos lacustres con intercalaciones de clásticos medios a finos Tl(arc-ars), aflorando al oeste de Huaniqueo, con un espesor estimado de 500 m.

Los lacustres son cubiertos por una franja de tobas pumíticas Tl(tbpu) de igual origen, de aproximados 200 m de espesor, a estos le siguen piroclastos Ts(R), derrames, ignimbritas y vidrios volcánicos de composición riolítica, con cerca de 500m de espesor. Se muestran a continuación derrames y piroclastos basálticos Ts(B) de gran espesor correspondientes al Terciario Superior.

Finalmente en la parte superior se encuentran basaltos y sedimentos lacustres del Cuaternario Q (la), bien expuestos en la zonas bajas.

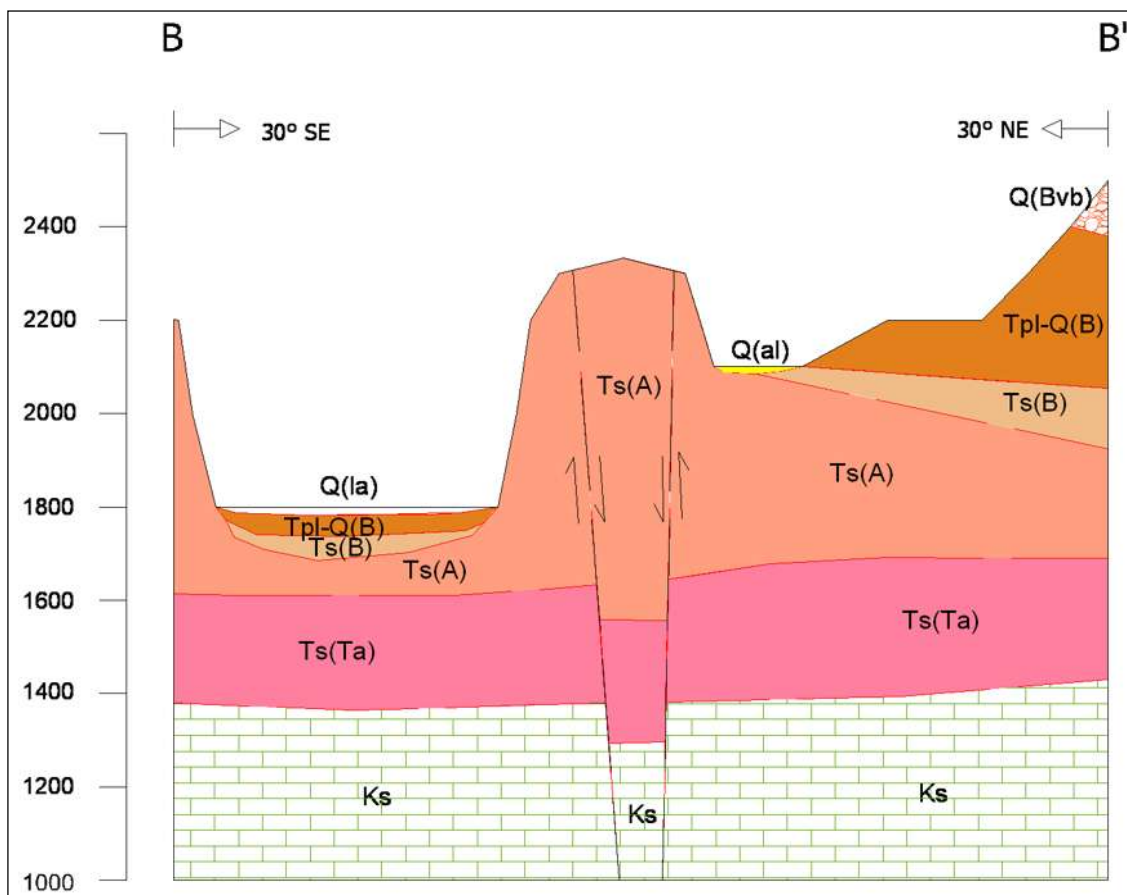


Figura 7. 54. Sección geológica B – B'

x. Hidrogeología

Del análisis geológico, geofísico, hidrodinámico y piezométrico se determina que los acuíferos son de tipo libre o freático a escala regional, o semi-confinados localmente. Con una posible interconexión de los materiales del subsuelo saturado y permeable funcionando como unidad hidrogeológica

Por sus enormes dimensiones y grado de fracturamiento relativamente desarrollado revisten más importancia hidrológica las rocas de origen volcánico que los materiales lacustres o de relleno.

Un acuífero libre tiene rendimiento específico regional de 0.10 o 0.15 y de 0.075 en promedio es el coeficiente de almacenamiento del semiconfinado.

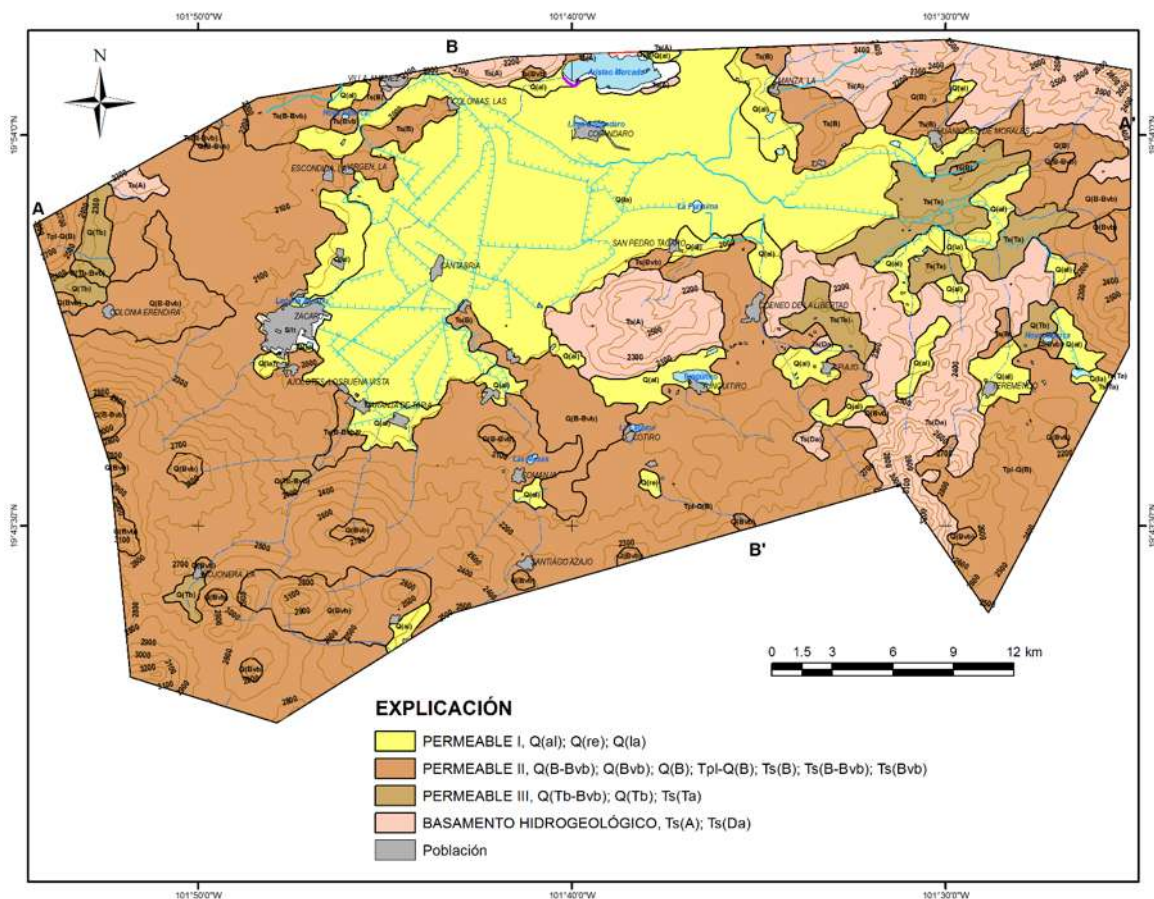


Figura 7. 55. Hidrogeología general del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).

xi. Modelo conceptual del funcionamiento

El esquema dinámico diferencia tres grupos de elementos variables que corresponden a entradas, cambio de almacenamiento y salidas.

Las entradas corresponden a recarga natural vertical, recarga por pérdidas en redes de agua potable, recarga por retornos de riego y recarga por flujo lateral subterráneo.

Las salidas son por bombeo, evapotranspiración, flujo lateral subterráneo y gasto base.

El cambio de almacenamiento representa la pérdida o ganancia de las reservas dinámicas, ya sea que en el intervalo y área de balance haya ocurrido abatimiento o recuperación de los potenciales piezométricos, respectivamente.

El enlace entre entradas y salidas son los parámetros de tipo distribuido que definen las propiedades hidrodinámicas del sistema.

La alimentación subterránea a las lagunas de la porción centro norte del acuífero provienen de las zonas elevadas perimetrales, definidas por los cerros Tule, Tecolote y Caja, donde se origina el flujo subterráneo radial concéntrico hacia el valle.

En términos generales se considera al acuífero con gran potencial y recarga superior a las extracciones, mostrado en algunos sitios artesianos de la planicie.

7.9.1.1 Parámetros hidrogeológicos

Las características hidráulicas de los acuíferos se estimaron a partir de pruebas a gasto constante y escalonado, en régimen transitorio, para acuíferos confinados o libres de espesor saturado mucho mayor que los descensos provocados por el bombeo, las pruebas corresponden a pozos representativos del acuífero en estudio.

Son ensayos útiles para estimar la conductividad hidráulica horizontal, el coeficiente de transmisividad, las pérdidas de carga de formación y construcción, así como el

grado de eficiencia del pozo de bombeo en relación con aspectos de diseño o problemas de obturación y deterioro de la rejilla.

Coefficiente de transmisividad (T)

Por Zacapu, en la porción centro poniente del acuífero, varía entre 2.0 y 20.0, con distribución local de 40.0 a 90.0E-03 m²/s, de 1.5 a 30.0E-03 en la parte sur oriental, entre 2.0 y 15.0E-03 en la zona norte, y de 2.0 a 5.0E-03 m²/s en el límite noreste.

El promedio pesado regional es 6.8E-03 y 35.1E-03, o 20.95E-03 m²/s como media global.

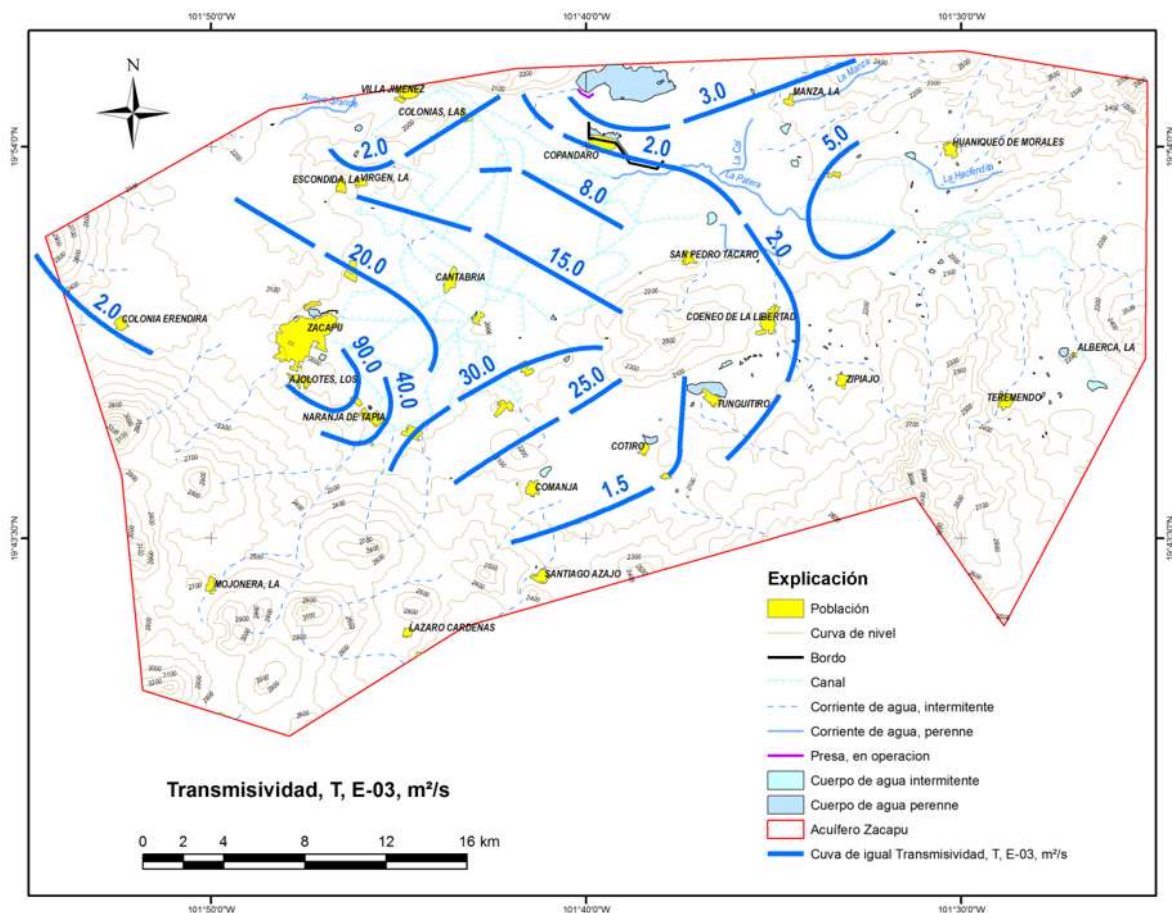


Figura 7. 56. Distribución de transmisividad del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).

Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S y Sy)

Desde el punto de vista local se detectan acuíferos semi-confinados cuyo coeficiente de almacenamiento se aproxima a 0.075.

Conductividad hidráulica (KH)

En los lados norte y oriental del acuífero varía entre 1.00 y 5.00E-05 m/s, de 5.00 a 20.00E-05 en la zona de riego de la porción central del valle, en el costado sur entre 2.00 y 30.00E-05, y entre 2.00 y 50.00E-05 m/s en la porción oeste, por Zacapu se encuentran las rocas más permeables.

Los promedios son 3.64E-04 para las pruebas de aforo y 8.86E-05 para las de bombeo, con 22.63E-05 m/s de valor medio general. El caudal específico y gasto de pozos es directamente proporcional a la permeabilidad y los resultados pueden variar conforme a la naturaleza de los materiales.

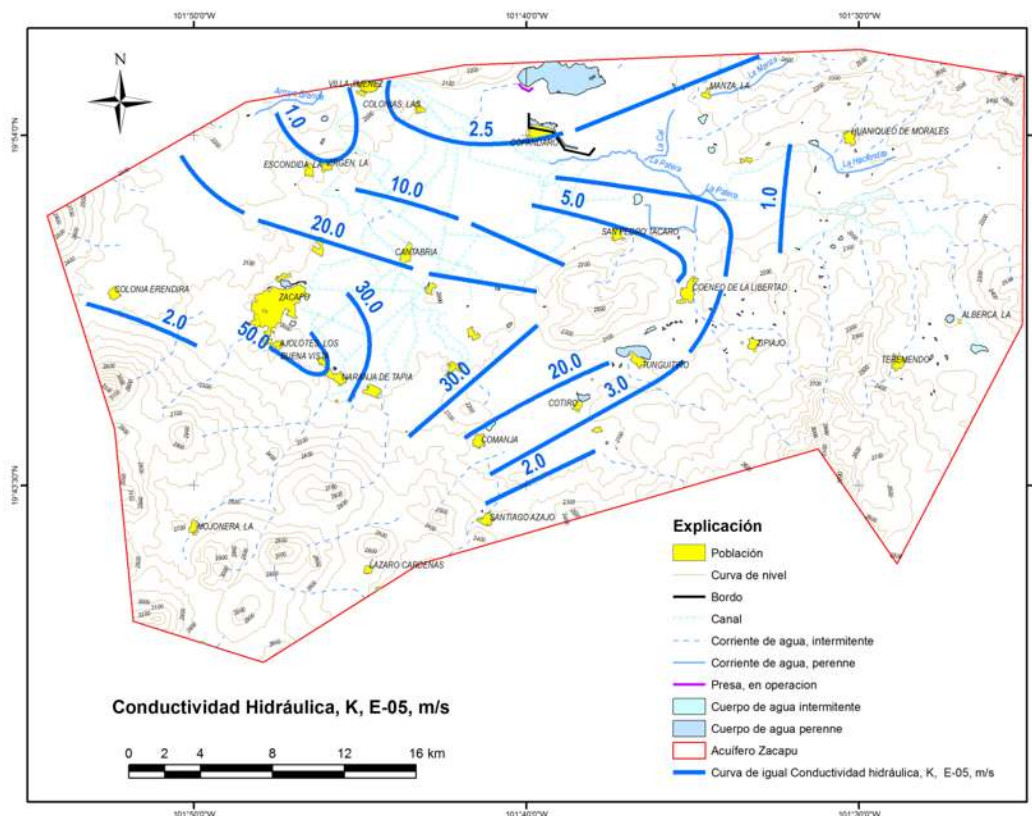


Figura 7. 57. Variación de la conductividad hidráulica del acuífero Zacapu (CNA-IMTA 2007).

Gasto específico (q)

Su comportamiento es análogo al de la permeabilidad y transmisividad, en general adoptan valores muy aceptables todos ellos; a nivel de cuenca fluctúa entre 0.5 y 90.0 lps/m, con valores medios de 35.1 en los afloros y 4.3 lps/m de abatimiento en la pruebas de gasto constante; su promedio global es 19.7 lps/m.

Este parámetro varía con el caudal instantáneo y con los tiempos de bombeo, a medida que el gasto específico se incrementa el acuífero es más permeable, son menores los niveles de bombeo y los costos de operación se reducen.

Comportamiento hidráulico

A escala regional, el acuífero de Zacapu es de tipo libre, y localmente de tipo semiconfinado. Las rocas de origen volcánico, por su amplia distribución y grado de fracturamiento muy desarrollado, son las que presentan mayor importancia hidrológica, por encima de los materiales lacustres o de relleno.

Evolución de nivel estático

Existen pocos registros de niveles de agua, solo se identifican unos cuantos pozos con datos piezométricos a partir de los cuales se elabora la configuración relativa al lapso 1982 - 2007, (Figura 7.60). La evolución piezométrica sugiere condiciones estables de la posición de nivel o recuperaciones entre 0.5 y 5.0 m, entre 0.5 y 4.0 m y del orden de 0.5 m, al noreste, sur y zona central del acuífero, respectivamente; en su flanco sur occidental se infiere una posición constante del nivel sin cambio apreciable.

En las partes altas se observa localmente 11.00, 5.35 y 6.28 m de recuperación, y 0.30 m en el valle; el periodo de análisis es 1982-2007.

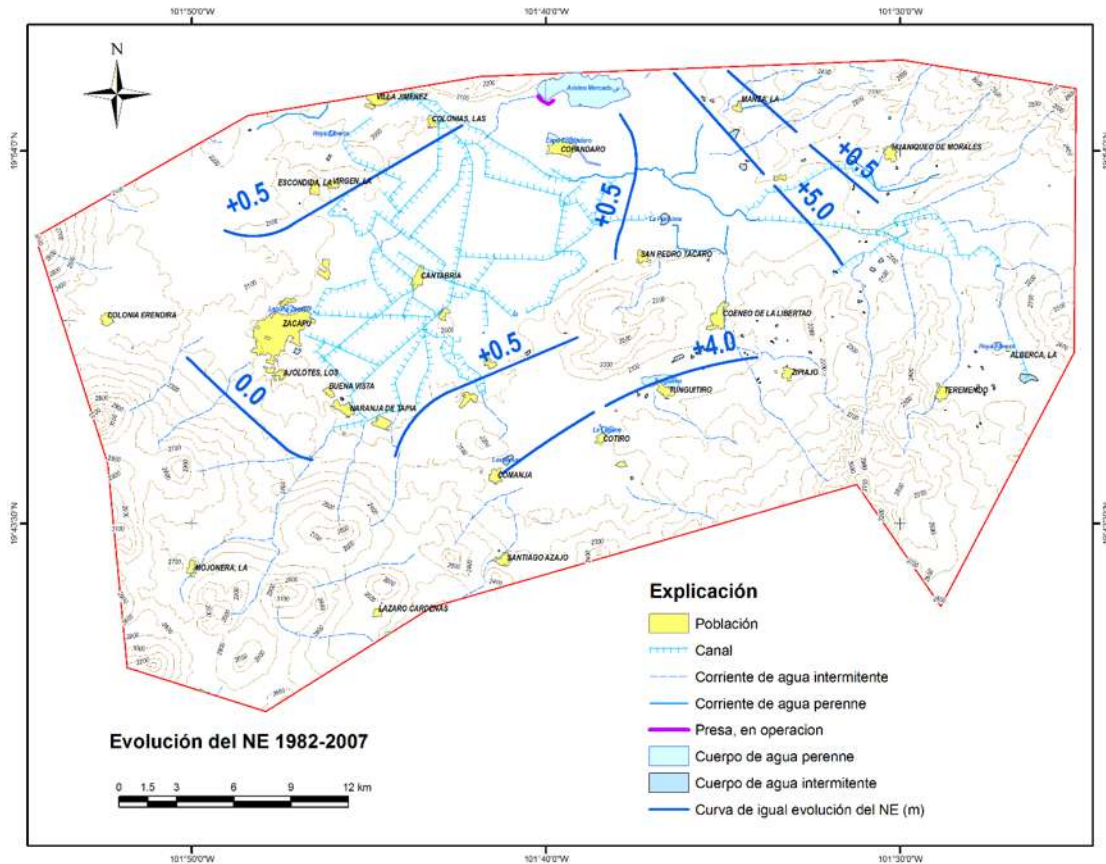


Figura 7. 58. Evolución de los niveles estáticos del acuífero Zacapu (1982-2007), (CNA-IMTA 2007).

Piezometría

Se utiliza la información piezométrica obtenida durante el levantamiento del censo de pozos, actividad realizada durante los meses de noviembre y diciembre de 2007, y los niveles estáticos anteriores disponibles de obras piloto que se correlacionaron razonablemente con la numeración actual asignada.

Se estiman 47.06 Mm³/año de extracción total.

7.9.3 Configuración conceptual del modelo

Siguiendo la estructura de la metodología la modelación de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz se desarrolló de la siguiente manera:

1. Definición de geometría y parámetros hidrodinámicos.

La geometría del modelo comprende un mallado con celdas de 4000m x 4000m compuesto por 16 columnas y 20 filas en las cuales se abarcaron ambos sistemas hídricos subterráneos (Figura 7.62).

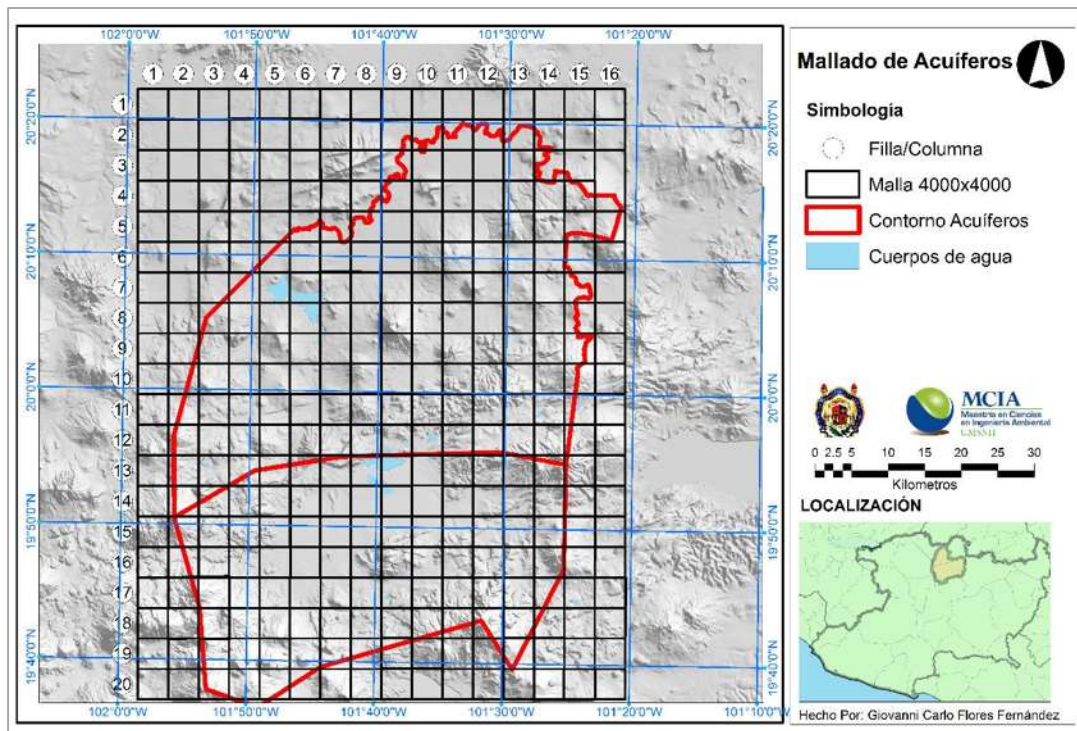


Figura 7. 59. Rejilla de 4000m por 4000m ajustada a los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz.

La distribución de los niveles estáticos por celda después de ser procesada la información puntual mediante interpolación kriging y su posterior re escalamiento en ArcMap (Figura 7.63), ofrece los valores probables de piezometría en la extensión de los acuíferos para la geometría seleccionada, sin embargo para poder trabajar con

esta información es necesario trasladarla al entorno de trabajo de AQUIVAL por medio del uso de la hoja de cálculo (Figura 7.64).

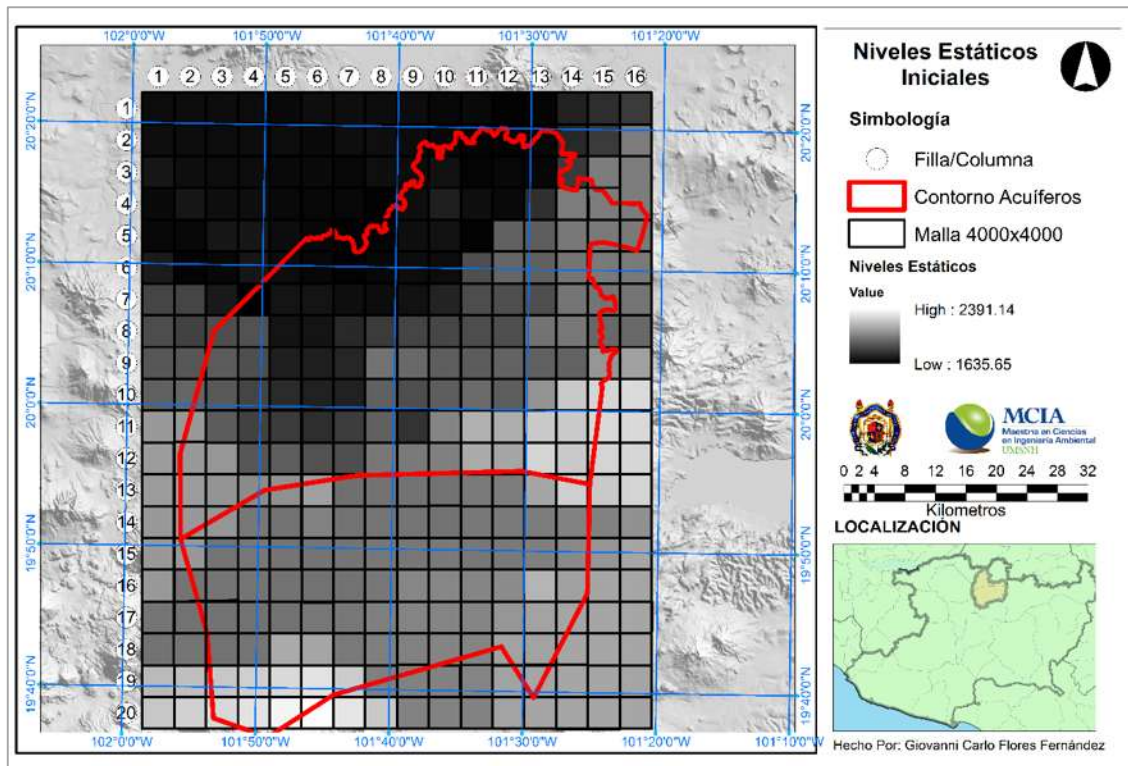


Figura 7. 60. Niveles Estáticos Iniciales de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz para el año 2007.

Esta hoja es adaptada a la configuración del acuífero donde únicamente aquellas celdas que son consideradas como parte del acuífero registrarán el valor de nivel estático inicial correspondiente.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2									1681	1668	1657	1656	1660			
3									1680	1689	1656	1660	1663	1810		
4								1651	1658	1732	1685	1672	1780	2010	2006	2005
5					1674	1662	1660	1651	1658	1688	1692	1645	1926	1919	1994	2004
6					1681	1662	1652	1664	1674	1674	1874	1943	1926	1985		
7				1635	1699	1699	1687	1674	1692	1750	1869	1874	1875	1989	1988	
8			1875	1879	1702	1703	1757	1817	1840	1851	1869	1876	1981	1990	1953	
9			1911	1874	1731	1730	1752	1982	1952	1917	1910	1934	1925	1931	2089	
10		1944	1903	1842	1770	1740	1738	1928	1876	1916	1959	1921	2075	2239	2274	
11		2090	1907	1833	1815	1774	1819	1930	1791	2031	2157	2153	2239	2238		
12		2090	2082	1895	1916	1878	1876	1989	1999	2018	2144	2126	2264	2236		
13		2096	2078	2057	2069	2114	1974	1983	1980	1983	2002	2008	2125	2253		
14		2092	2084	1995	1978	2023	1978	1984	1985	1983	1992	2002	2011	2027		
15		2090	1989	1990	1987	1984	1988	1991	1995	1998	1991	2004	2022	2047		
16		1988	1987	1984	1981	1981	1983	1995	2039	2039	2035	2052	2177	2116		
17			1983	1983	1982	1990	1990	2018	2028	2030	2031	2083	2119	2130		
18			1983	1988	2141	2133	2002	2019	2030	2029	2024	2119	2122			
19			2226	2246	2282	2307	2241	2020					2130			
20			2280	2313	2362	2391										

Figura 7. 61. Valores de niveles estáticos iniciales por celda de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortíz para el año 2007.

Además de la definición del nombre del proyecto, tipo de modelo a utilizar y dimensiones del mallado, se especifican cuales celdas serán activas, de nivel constante o no activas (Figura 7.65).

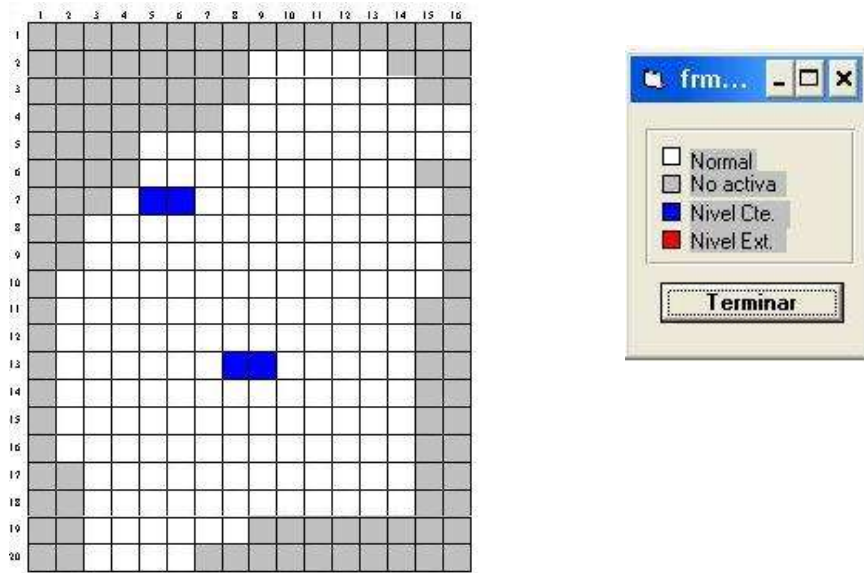


Figura 7. 62. Especificación de tipo de celda y condiciones de contorno del modelo de acuíferos en AQUIVAL

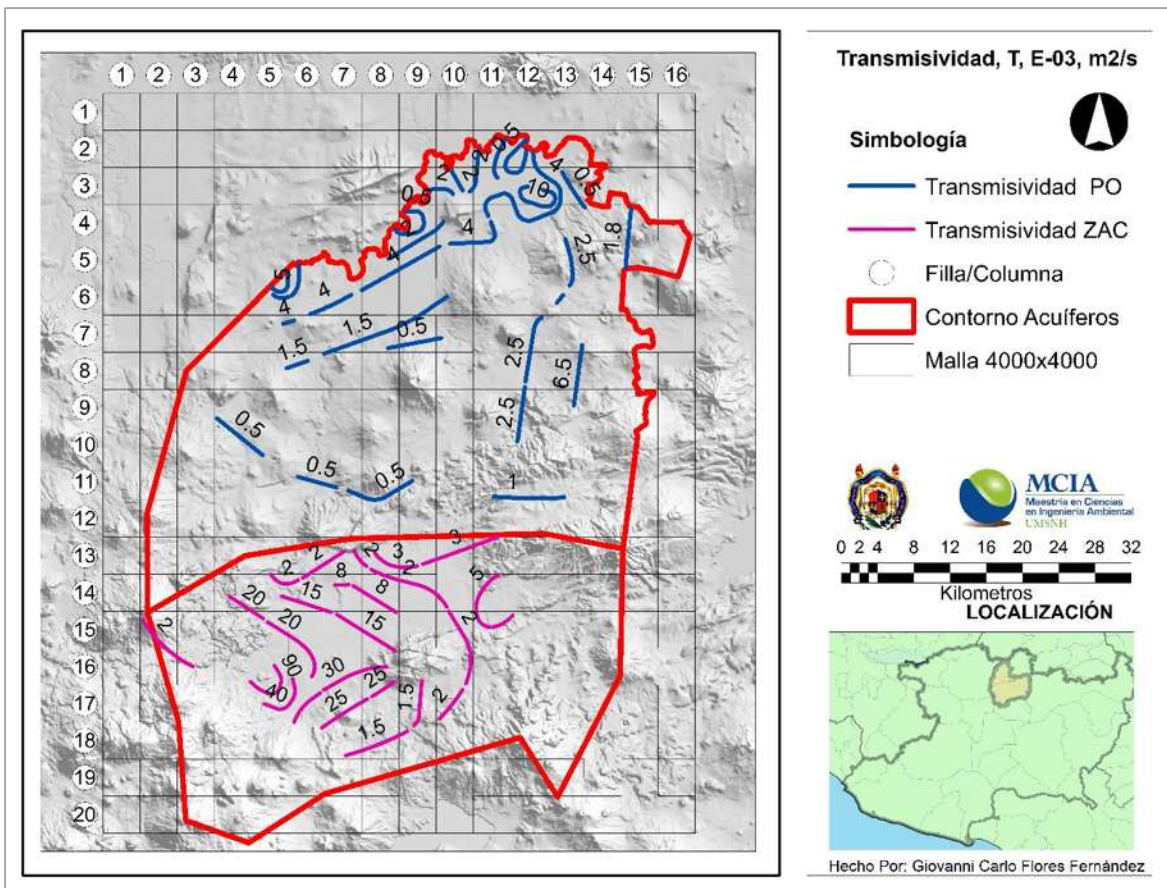


Figura 7. 63. Transmisividad en los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.

De la información de transmisividad procedente de las isoclinas del I estudio de CNA e IMTA del 2007 (Figura 7.66) es posible obtener el valor para este parámetro por celda de manera similar a los niveles iniciales obteniéndose por celda la cifra correspondiente (Figura 7.67), otra forma que ofrece el programa para el cálculo de la transmisividad es partiendo del valor de la conductividad hidráulica y del espesor del acuífero.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2									2.00	2.00	2.00	0.50	0.50			
3									2.00	2.00	4.00	10.00	0.50	0.50		
4								0.50	0.50	2.00	4.00	3.50	3.00	1.00	1.80	1.80
5					2.00	5.00	2.00	2.00	4.00	4.00	3.50	3.00	2.50	2.00	1.80	1.80
6					5.00	4.00	4.00	4.00	2.50	1.50	1.50	2.00	2.50	2.00		
7				4.00	4.00	2.50	1.50	1.50	0.50	0.50	1.50	2.50	4.50	6.00	2.00	
8			1.00	1.50	1.50	1.50	0.50	0.50	0.50	1.00	2.00	2.50	6.50	5.00	4.00	
9			0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	2.00	2.50	6.50	5.00	4.00	
10		0.75	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	2.00	3.75	3.75	5.00	4.00	
11		1.00	0.75	0.75	0.75	0.50	0.50	0.50	0.50	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		
12		11.00	20.00	1.00	0.50	0.50	0.50	0.50	3.00	3.00	3.00	1.00	1.00	1.00		
13		2.00	20.00	11.00	2.00	2.00	2.00	3.00	3.00	3.00	3.00	4.00	1.00	1.00		
14		2.00	20.00	20.00	11.00	15.00	8.00	8.00	2.00	2.00	5.00	5.00	5.00	5.00		
15		2.00	2.00	45.00	20.00	20.00	15.00	15.00	11.00	2.00	5.00	5.00	5.00	5.00		
16		2.00	2.00	90.00	90.00	20.00	30.00	30.00	1.50	2.00	2.00	5.00	5.00	5.00		
17			2.00	90.00	40.00	30.00	25.00	25.00	1.50	2.00	2.00	2.00	3.50	5.00		
18			20.00	40.00	35.00	27.00	1.50	1.50	1.50	2.00	2.00	2.00	2.00			
19			40.00	40.00	30.00	11.00	1.50	1.50					2.00			
20			40.00	34.00	15.00	1.50										

Figura 7. 64. Transmisividad por celda de los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.

Los parámetros determinados por celda son entonces ingresados en el modelo en las unidades en que son requeridos una de las particularidades del programa es que pueden ser ingresados valores comunes o directamente en la malla según sea el caso (Figura 7.68).

Figura 7. 65. Asignación de Parámetros Hidrodinámicos en AQUIVAL

2. Definición de acciones elementales.

Para el caso analizado de acuerdo al estudio de actualización hidrogeológica se determinan las siguientes acciones:

- Recarga en el acuífero Pastor Ortiz-La Piedad. (RECPO – Figura 7.60)
- Recarga en el acuífero Zacapu. (RECZA – Figura 7.60)
- Módulos del Distrito de riego 087 (Figura 7.61)
 - Angamacutiro (DRAN)
 - Pastor Ortiz (DRPO)
 - Módulo Zacapu (DRZA)
- Bombeo en el acuífero Pastor-Ortiz. (BOMPO)
- Bombeo en el acuífero Zacapu. (BOMZA)

Estas presiones en el sistema pueden ser especificadas de manera individual en el menú de entrada para las acciones elementales del modelo en AQUIVAL (Figura 7.69).

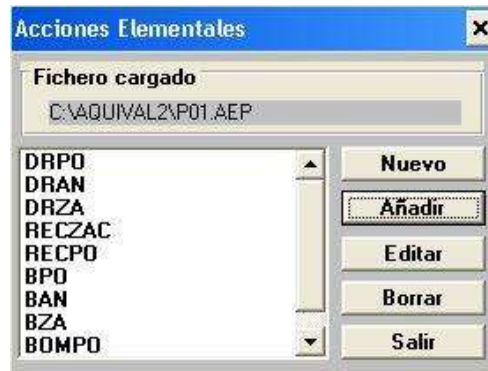


Figura 7. 66. Menú de entrada de acciones elementales del modelo AQUIVAL.

Dentro del acuífero Pastor Ortiz–La Piedad se conforman los módulos de riego Angamacutiro y Pastor Ortiz, por su parte el acuífero Zacapu contiene el módulo de riego Zacapu (Figura 7.70). Las demandas para estos módulos fueron obtenidas mediante los programas mensuales que elaboran los diferentes órganos de gobierno implementados y suministrados por el Distrito de riego 087, Yurecuaro, y a través del software “Plan DR-2” de CNA se obtuvo la distribución mensual de las demandas.

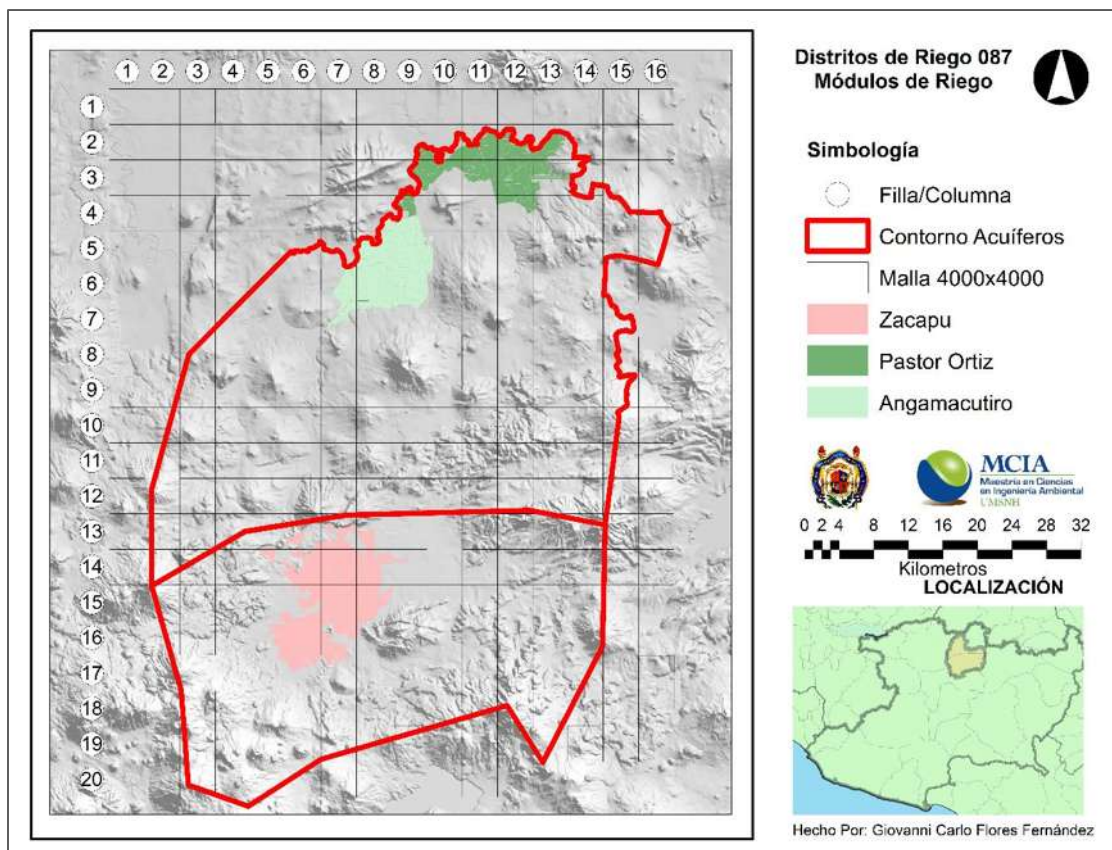


Figura 7. 67. Ubicación espacial de módulos del distrito de riego 087 dentro del mallado.

La distribución de pesos por celda de las acciones elementales dentro del modelo se designó de manera uniforme para la recarga vertical y las demandas agrícolas (Figura 7.71 y Figura 7.72)

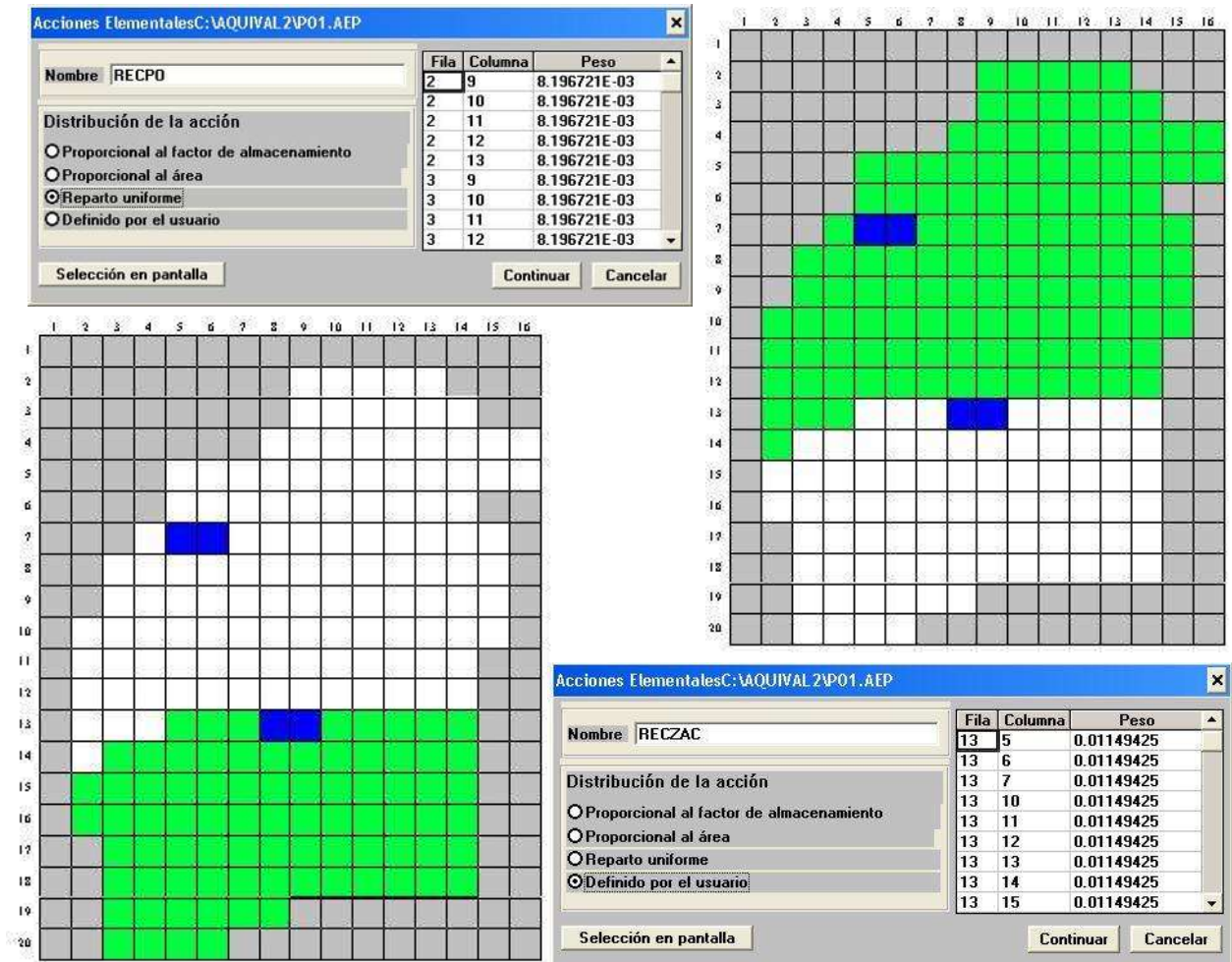


Figura 7. 68. Distribución de la acción elemental que representa las recargas de los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu en el modelo AQUIVAL.

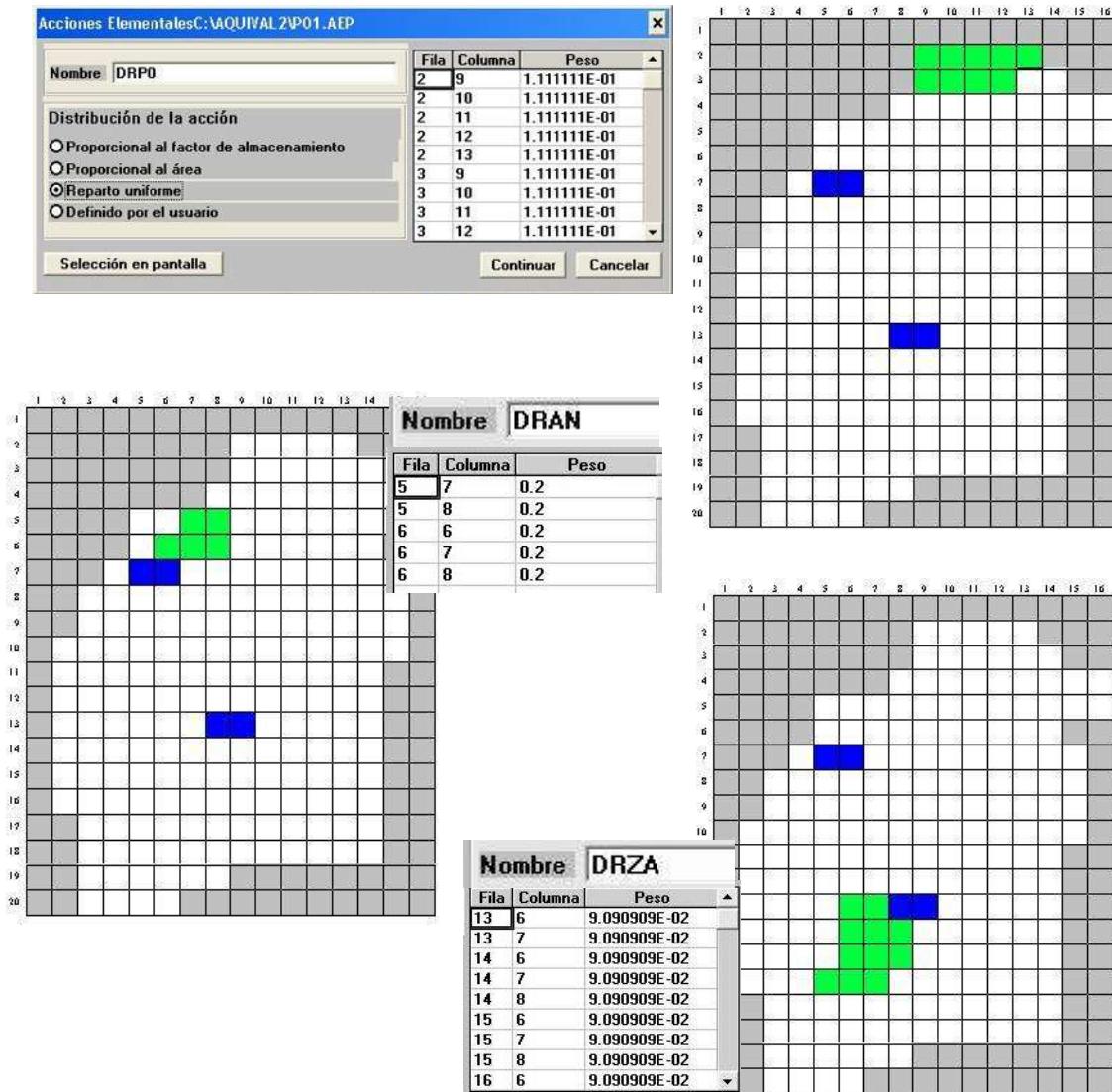


Figura 7. 69. Distribución de la acción elemental que representa los módulos de riego de los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu en el modelo AQUIVAL.

Mientras que para los aprovechamientos el peso se asignó de acuerdo a la distribución espacial del volumen de aquellos que se encuentran activos dentro de cada celda (Figuras 7.73 y 7.74).

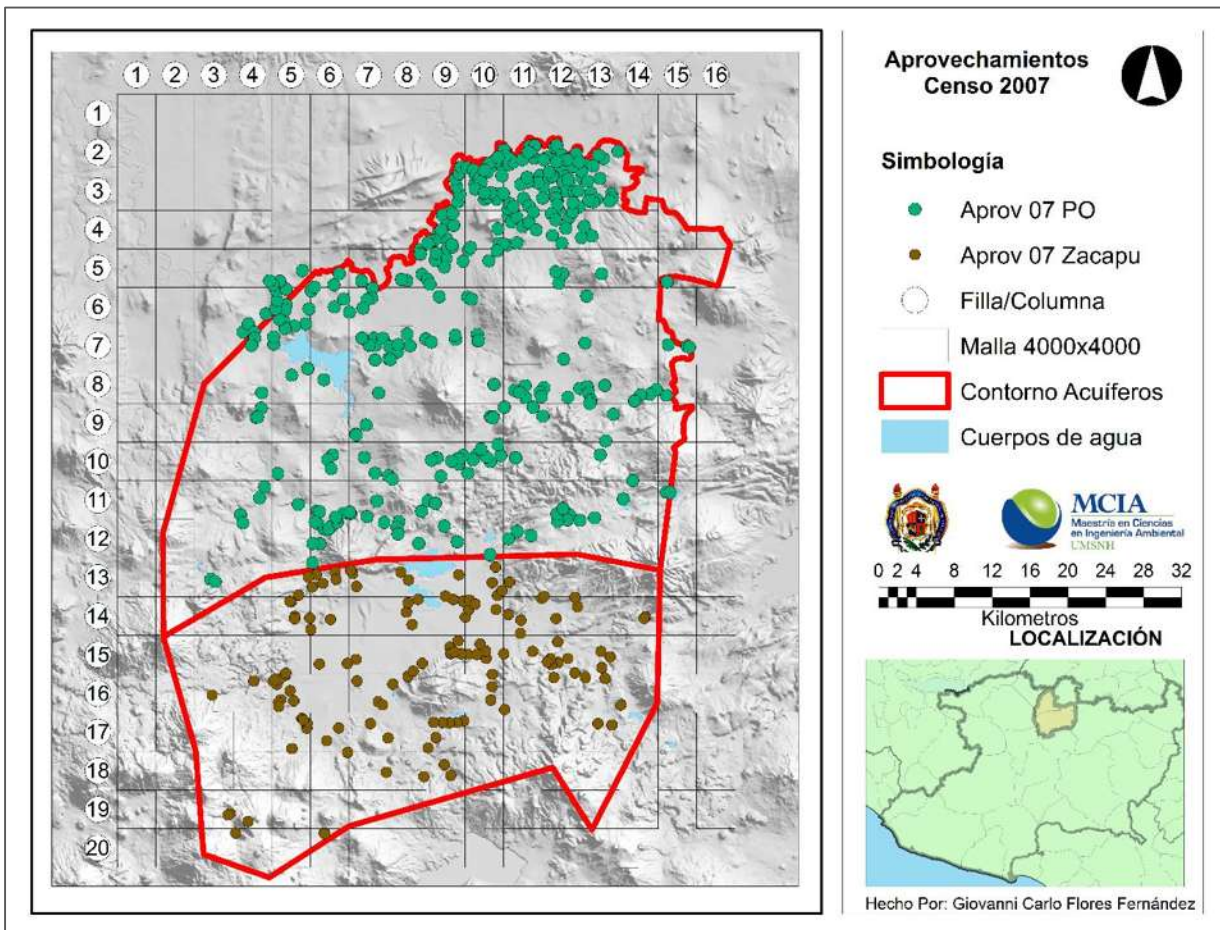


Figura 7. 70. Distribución espacial de los aprovechamientos en operación en el censo piezométrico CNA-IMTA del 2007 en la región que abarcan los acuíferos Pastor Ortíz y Zacapu.

La información de volúmenes de extracción de pozos, norias y demás cuerpos de agua subterránea fue obtenida de censos anteriores realizados por CNA y a partir de la base de datos de REPDA.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1																
2								0.02036	0.11815	0.10991	0.12482	0.03468				
3								0.08976	0.26414	0.09926	0.13892	0.03898				
4							0.06752	0.02627	0.0473	0.04134	0.01174					
5				0.01288	0.02297	0.01087	0.53613	0.03475	0.0112		0.00613	0.00074		0.00236		
6				0.12137	0.12783	0.32517		0.00795	0.00255			0.00287				
7			0.02883			0.01275	0.03166	0.00871	0.0025		0.00141	0.00442		0.00822		
8			0.00221	0.01413	0.05016	0.00074			0.0002	0.0379	0.03754	0.05447	0.01531	0.00133		
9			0.00816			0.01148			0.00221	0.01928	0.00118	0.00339				
10				0.00133	0.00511	0.01443	0.00206	0.01463	0.01455	0.00403		0.00081	0.00133			
11			0.00309	0.00466	0.02875	0.00574	0.00363	0.00141			0.0021	0.00056	0.00121			
12			0.00294		0.01466	0.00103	0.01797	0.0268	0.00242	0.00222	0.00181					
13		0.00363		0.00593	0.05789	0.01893			0.02528	0.00661	0.01148					
14				0.05512	0.06458		0.0453	0.02548	0.03883	0.02649	0.082		0.00904	Aprovechamientos	Vol Tot (m ³)	
15				0.00144	0.02336	0.00969	0.01332	0.02227	0.02771	0.0084	0.06245	0.02615		Dto PO	49005954	
16			0.02297	0.00044	0.52837		0.23856	0.1952		0.03158	0.01033	0.00134	0.01201	0.00077	Dto Ang	3625992
17				0.1226	0.05311	0.04478		0.04151				0.00746		Dto Zacapu	19531933.2	
18				0.00431	3.1E-05	0.00172	0.00509							Otros PO	58684424.4	
19			0.0007	0.0023										Otros Zac	27464339.7	
20			0.00459		0.00249											

Figura 7. 71. Distribución de pesos por celda del volumen correspondiente a los aprovechamientos activos del censo piezométrico CNA-IMTA del 2007.

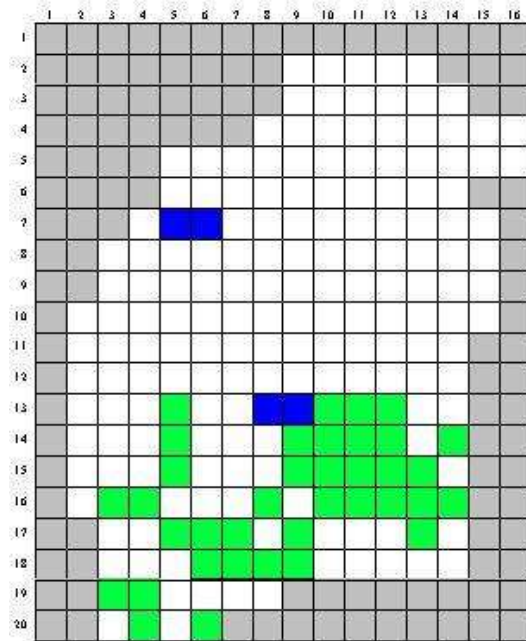
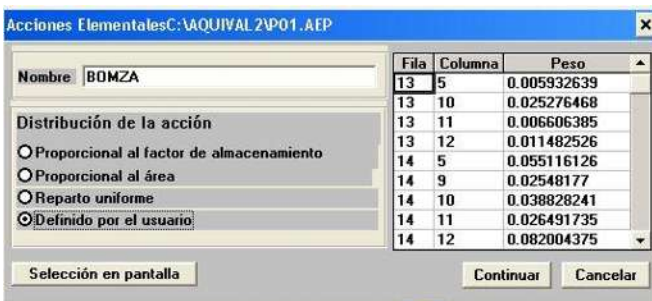
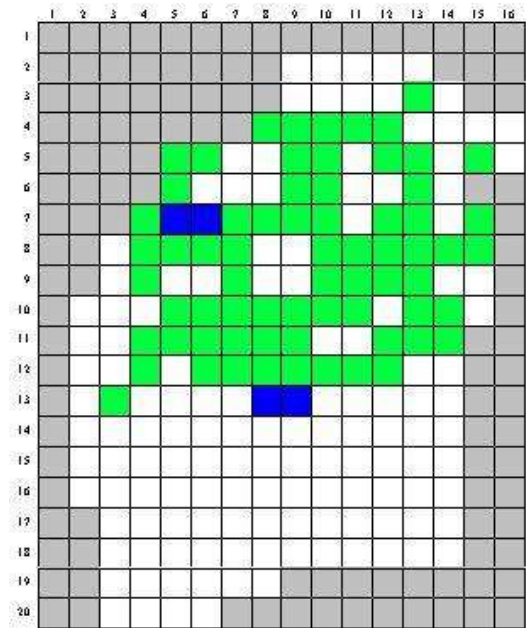


Figura 7. 72. Distribución de pesos de la acción elemental correspondiente a los aprovechamientos activos del censo piezométrico CNA-IMTA del 2007 en el modelo AQUIVAL.

Posteriormente en la simulación del modelo del acuífero se asignará a estas acciones elementales los valores temporales en m³/día.

3. Definición de parámetros de control.

Se han establecido el volumen total almacenado en los acuíferos y un conjunto de niveles estáticos medidos en campo que fueron medidos en 2007 y en el mes de junio de 2014 (Figura 7.76), para ello la información puntual censada fue tratado para generar los valores correspondientes por celda (Figura 7.77).

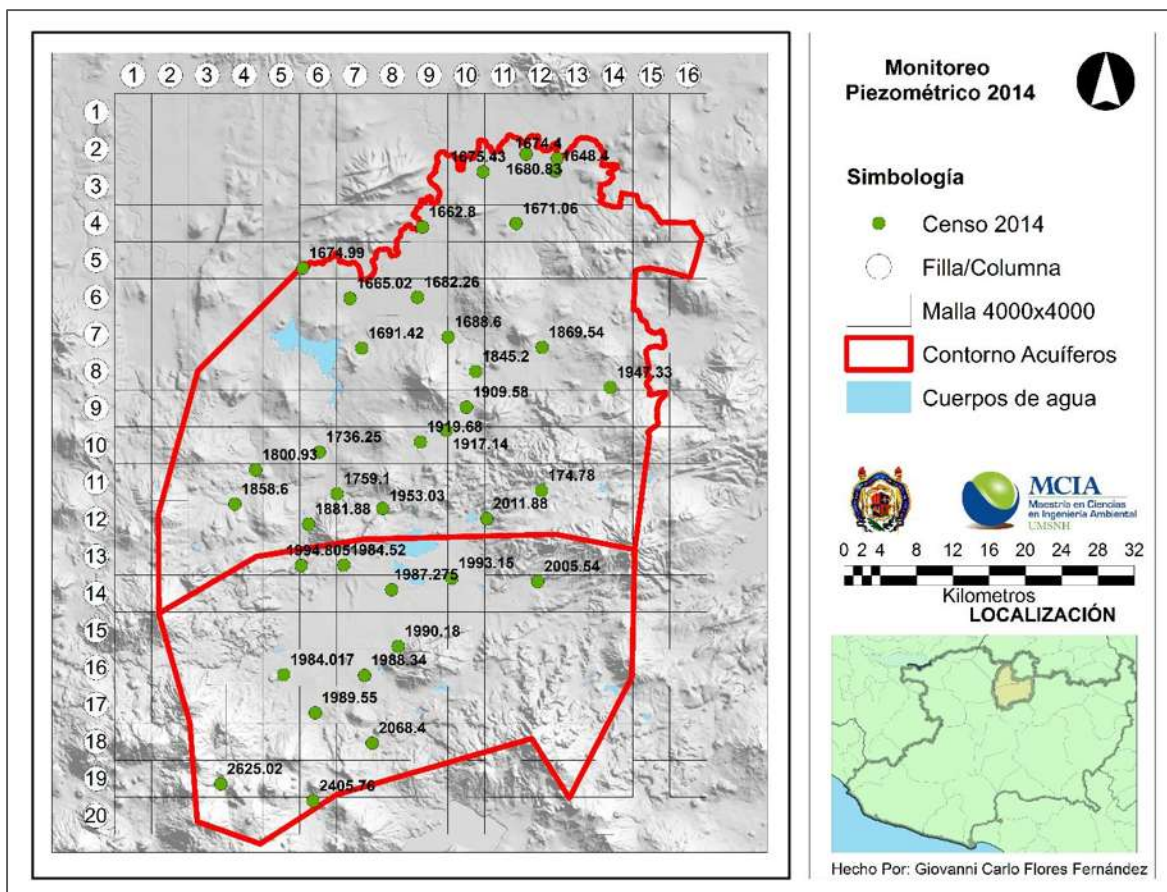


Figura 7. 73. Ubicación espacial de los niveles estáticos censados en campo en 2014.

Posteriormente se especificó el tipo de parámetro (Figura 7.78) y su distribución dentro del modelo (Figura 7.79).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1682	1676	1680	1678	1670	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1681	1682	1681	1660	1654	1809	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1667	1689	1730	1685	1671	1757	2011	2007	2005
5	0	0	0	0	1682	1671	1668	1672	1688	1707	1685	1800	1919	1998	2005	2004
6	0	0	0	0	1715	1680	1666	1677	1684	1691	1875	1943	1920	1985	0	0
7	0	0	0	1708	1699	1699	1695	1685	1692	1725	1871	1875	1875	1989	1988	0
8	0	0	1876	1879	1702	1703	1758	1822	1829	1853	1863	1870	1983	1991	1957	0
9	0	0	1908	1875	1731	1731	1746	1983	1948	1910	1911	1935	1925	1934	1944	0
10	0	1944	1905	1844	1768	1740	1738	1930	1918	1917	1960	1921	1931	2233	2238	0
11	0	2090	1903	1828	1807	1766	1819	1935	1914	2031	2107	2142	2254	2239	0	0
12	0	2091	1976	1884	1903	1855	1873	1992	2000	2018	2017	2155	2265	2237	0	0
13	0	2097	2078	2005	2073	2007	1987	1980	1980	1989	1991	2062	2129	2254	0	0
14	0	2092	2084	1996	1978	1959	1985	1987	1986	1984	1987	2004	2062	2076	0	0
15	0	2091	1990	1990	1987	1984	1990	1989	1988	1983	1985	2061	2209	2185	0	0
16	0	1988	1987	1984	1981	1982	1988	1995	2040	2040	2036	2138	2184	2121	0	0
17	0	0	1984	1984	1984	1988	1991	2018	2027	2030	2032	2120	2120	2129	0	0
18	0	0	2437	2345	2133	2107	2048	2051	2024	2029	2030	2120	2122	0	0	0
19	0	0	2595	2520	2396	2302	2218	2057	0	0	0	0	2130	0	0	0
20	0	0	2630	2583	2494	2414	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7. 74. Distribución y valor de los niveles estáticos censados en 2014 y seleccionados como parámetro de control.

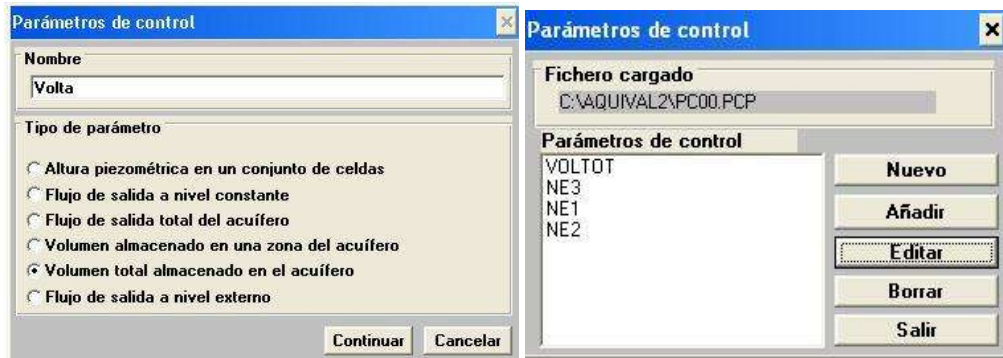


Figura 7. 75. Especificación de los parámetros de control en el modelo AQUIVAL.

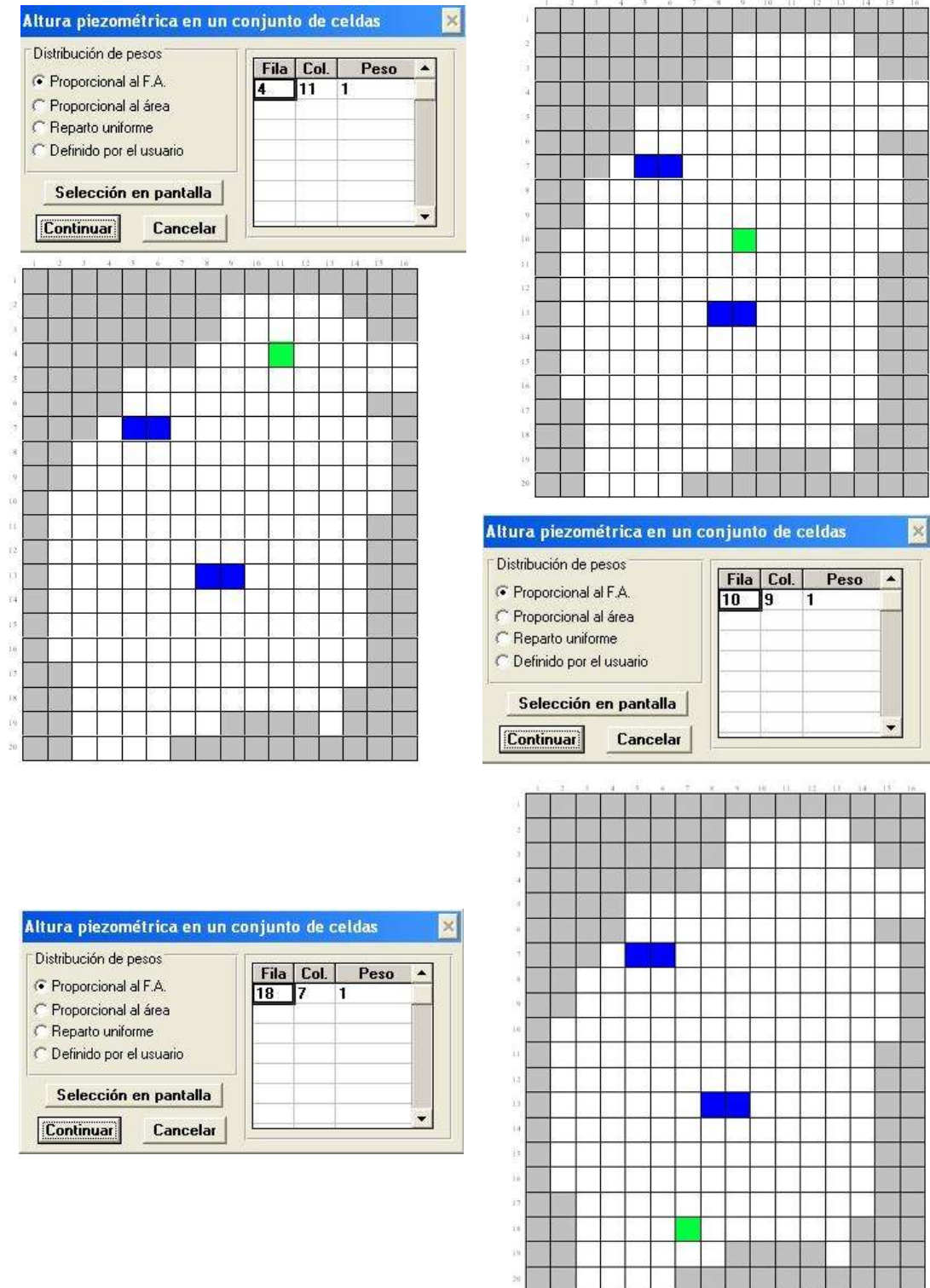


Figura 7. 76. Distribución de los parámetros de control correspondientes a los niveles censados en 2014 en el modelo AQUIVAL.

4. Cálculo del autoproyecto.

Se indica al módulo Aquival que realice el cálculo de la formulación del modelo matemático de autovalores el cual es necesario para realizar las simulaciones.

7.9.4 Simulación y Calibración

Dentro del archivo de series de resultados de los parámetros de control seleccionados "avres.txt" se muestran los niveles piezométricos elegidos y el volumen en el acuífero en ese orden de izquierda derecha. (Figura 7.80).

	A	B	C	D
1	1685	1922.34229	2049.66724	5.4873E+11
2	1685.02563	1922.37069	2049.68944	5.4875E+11
3	1685.02461	1922.36966	2049.6883	5.4875E+11
4	1684.96369	1922.33584	2049.67136	5.4872E+11
5	1684.916	1922.3092	2049.65779	5.487E+11
6	1684.86231	1922.27981	2049.6435	5.4867E+11
7	1684.81338	1922.25544	2049.63447	5.4865E+11
8	1684.81311	1922.25511	2049.63401	5.4865E+11
9	1684.73656	1922.2138	2049.61473	5.4861E+11
10	1684.68995	1922.19912	2049.60939	5.486E+11
11	1684.72622	1922.23913	2049.64309	5.4864E+11
12	1684.78989	1922.30922	2049.70447	5.487E+11
13	1684.79645	1922.31675	2049.70665	5.4871E+11
14	1684.79541	1922.31572	2049.70549	5.487E+11
15	1684.79439	1922.31469	2049.70435	5.487E+11
16	1684.73347	1922.28087	2049.68742	5.4867E+11
17	1684.68578	1922.25423	2049.67384	5.4864E+11
18	1684.6321	1922.22484	2049.65955	5.4862E+11
19	1684.58316	1922.20047	2049.65053	5.486E+11
20	1684.5829	1922.20015	2049.65006	5.486E+11

Figura 7. 77. Resultados de parámetros de control en msnm.

Cada fila representa un paso de tiempo, cada dato es el resultado seleccionado para ese paso de tiempo. Las unidades están dadas en metros para los niveles y en m³ para el volumen almacenado.

De los resultados de alturas piezométricas para las celdas activas del archivo "alturas.txt" para la primera simulación (Figura 7.81) son identificados los correspondientes a las celdas de control y son graficadas para observar su comportamiento ante escenarios en los que no se presenta niveles iniciales (Figuras 7.82) y donde lo hacen y se comparan con los niveles censados (Figura 7.83).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	1881.87585	1668.50476	1657.18933	1655.79199	1660.08044	1680.77417	1689.55249	1655.85669	1659.09009	1661.84851	1807.922	1653.01135	1688.78394	1729.96741	1665	1665.4032	1761
2	1581.59161	1668.56048	1657.24167	1656.0443	1560.13341	1680.83261	1689.61096	1655.92549	1659.14485	1661.90691	1807.98042	1653.09045	1688.85286	1730.04331	1685.02568	1665.47564	1761
3	1681.59059	1668.50945	1657.24065	1656.84327	1960.13278	1680.83158	1689.60994	1655.94446	1659.14747	1661.90589	1807.9794	1653.0795	1688.85183	1730.04228	1685.02461	1665.47461	1761
4	1581.91892	1668.2579	1656.98484	1656.54905	1960.08284	1680.8016	1688.84104	1655.64964	1668.76571	1661.74026	1807.96228	1652.74573	1688.70917	1729.772	1684.96369	1665.39619	1761
5	1681.921	1668.03465	1656.79623	1656.33057	1660.05447	1680.43463	1688.25518	1655.45574	1658.48074	1661.61127	1807.94868	1652.48649	1688.598	1729.56164	1684.916	1665.33846	1761
6	1681.92271	1667.77544	1656.57814	1656.07803	1660.02118	1680.24123	1687.5786	1655.23125	1658.15124	1661.46779	1807.9342	1652.18848	1688.47109	1729.32031	1684.86231	1665.27092	1761
7	1581.92513	1667.51599	1656.35864	1655.82368	1659.9645	1680.04606	1686.89473	1655.00458	1657.81842	1661.31996	1807.92498	1651.89294	1688.34803	1729.08156	1684.81338	1665.20794	1761
8	1681.97128	1667.56209	1656.40109	1655.86609	1660.03185	1680.09433	1686.94349	1655.05396	1657.86707	1661.32004	1807.92466	1651.89339	1688.34803	1729.08155	1684.81311	1665.20778	1761
9	1681.95259	1667.16896	1656.06578	1655.48085	1559.96406	1679.7923	1685.94038	1654.70806	1657.36725	1661.10733	1807.90506	1651.4633	1688.16519	1728.7128	1684.76566	1665.11107	1761
10	1681.92939	1668.8245	1655.77542	1655.14826	1659.89848	1679.52782	1685.0829	1654.40261	1656.93572	1660.9695	1807.93108	1651.15019	1688.06059	1728.49296	1684.68995	1665.08208	1761
11	1582.00632	1668.90137	1655.84774	1655.22053	1659.97358	1679.60817	1685.1835	1654.48364	1657.01823	1661.05	1808.01161	1651.24536	1688.15529	1728.59707	1684.72622	1665.18153	1761
12	1682.13988	1667.03483	1655.97337	1655.34607	1660.10157	1679.74794	1685.30335	1654.62425	1657.15593	1661.18969	1808.15136	1651.40973	1688.31938	1728.77736	1684.79869	1665.35378	1761
13	1682.15694	1667.05187	1655.98324	1655.36193	1660.11779	1679.78593	1685.32135	1654.64236	1657.17391	1661.20767	1808.16935	1651.43141	1688.34102	1728.80143	1684.79645	1665.37665	1761
14	1682.15559	1667.05084	1655.9882	1655.36089	1660.11676	1679.79489	1685.32032	1654.64133	1657.17288	1661.20664	1808.16831	1651.43046	1688.33958	1728.80039	1684.79541	1665.37561	1761
15	1682.15488	1667.04982	1655.98718	1655.35987	1660.11574	1679.79387	1685.3193	1654.64033	1657.17186	1661.20561	1808.16729	1651.42949	1688.33896	1728.79937	1684.79439	1665.37459	1761
16	1682.14321	1666.74827	1655.73137	1655.06664	1660.0656	1679.53389	1684.5904	1654.37548	1666.7901	1661.03999	1808.15017	1651.09572	1688.19563	1728.52909	1684.73347	1665.29617	1761
17	1682.14529	1666.52501	1655.54276	1654.84716	1660.05743	1679.36692	1683.96454	1654.18158	1656.50513	1660.911	1808.13652	1650.83649	1688.08513	1728.31873	1684.68578	1665.23846	1761
18	1682.147	1666.2668	1655.32467	1654.59463	1660.00414	1679.17352	1683.28796	1653.9571	1656.17562	1660.76352	1808.1221	1650.53847	1687.95822	1728.0774	1684.6321	1665.1709	1761
19	1682.14943	1666.00635	1655.10517	1654.34028	1659.97145	1678.97835	1682.60409	1653.73042	1655.80281	1660.61968	1808.11287	1650.24294	1687.83519	1727.89665	1684.58316	1665.10793	1761
20	1582.15058	1666.05246	1655.14762	1654.38289	1660.0148	1679.02712	1682.65286	1653.7798	1655.89146	1660.61977	1808.11255	1650.24339	1687.83516	1727.89665	1684.58229	1665.10777	1761
21	1682.1772	1665.65723	1654.81232	1653.99746	1659.94702	1678.7246	1681.64974	1653.43191	1655.39164	1660.40706	1808.09296	1649.3133	1687.65233	1727.48989	1684.50635	1665.01105	1761
22	1582.18115	1665.34232	1654.54802	1653.69091	1659.90932	1678.48848	1680.82085	1653.15717	1654.98867	1660.29778	1808.14754	1649.53312	1687.58061	1727.2858	1684.4748	1665.0164	1761
23	1682.31128	1665.47235	1654.67083	1653.81364	1660.03431	1678.62434	1680.95679	1652.2938	1655.12447	1660.43357	1808.28338	1649.692	1687.73892	1727.45906	1684.54042	1665.18224	1761
24	1682.33548	1665.49654	1654.69368	1653.83642	1660.05753	1678.64965	1680.98211	1653.31926	1655.14976	1660.45886	1808.30668	1649.72167	1687.76853	1727.49154	1684.55225	1665.2133	1761
25	1682.33589	1665.49695	1654.69394	1653.83673	1660.05788	1678.65014	1680.9826	1653.31976	1655.15025	1660.45925	1808.30917	1649.72247	1687.76933	1727.49254	1684.55179	1665.2142	1761

Figura 7. 78. Alturas piezométricas simuladas para todas las celdas.

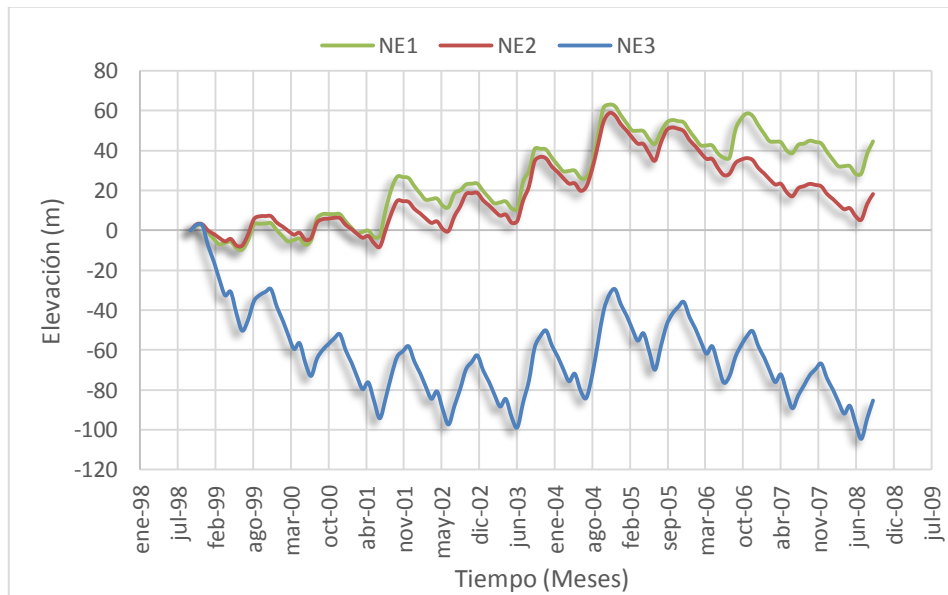


Figura 7. 79. Piezometría de primera simulación de prueba sin consideración de niveles estáticos iniciales.

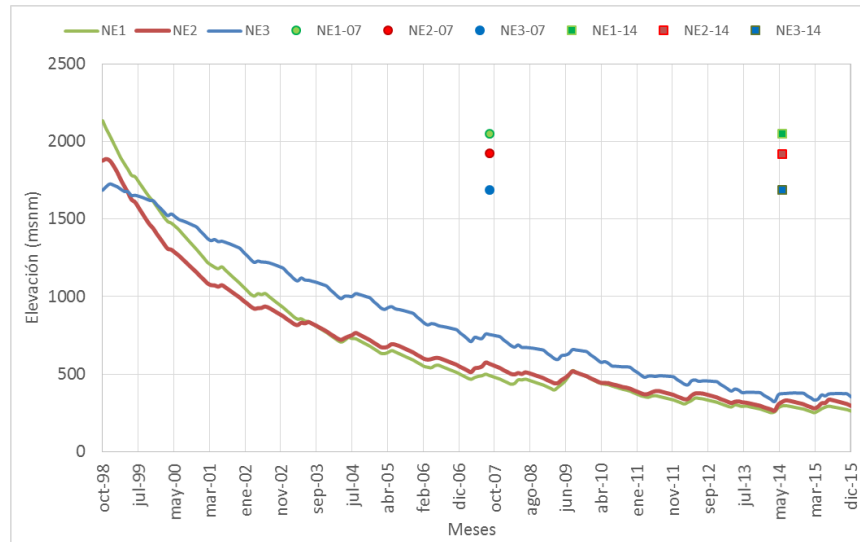


Figura 7. 80. Piezometría simulada considerando NEI y celdas tipo manantial

Para mejorar las simulaciones del modelo se optó por determinar la piezometría estableciendo los valores para la conductividad hidráulica (Figura 7.84) y el espesor del acuífero en lugar del uso directo de la transmisividad, para ello se determinaron los valores por celda de manera similar a las otras propiedades geohidrológicas (Figura 7.85).

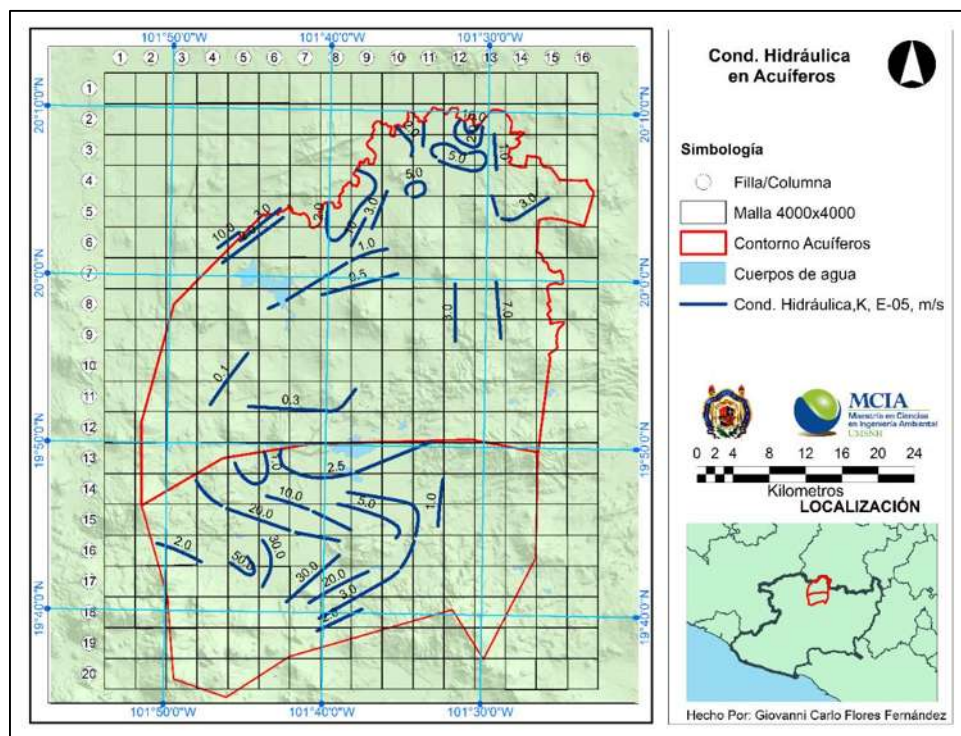


Figura 7. 81. Isolneas de conductividad hidráulica en los acuíferos de acuerdo al reporte CNA-IMTA 2007.

								1.73	1.73	2.09	1.11	1.16					
								1.73	1.73	4.32	4.32	2.59	2.59				
							1.73	1.73	4.32	4.32	4.32	2.59	2.59	2.59	2.59		
				2.59	2.15	1.73	1.73	3.19	3.66	4.32	2.59	2.59	2.59	2.59	2.59		
				1.73	1.73	1.73	3.07	0.86	0.77	1.52	2.59	2.59	2.59				
			1.73	1.73	0.86	0.86	0.86	0.43	0.43	2.59	2.59	6.05	6.05	6.05			
		2.39	1.47	0.86	0.86	0.76	0.43	0.43	0.43	2.59	2.59	6.05	6.05	6.05			
			0.09	0.09	0.09	0.64	0.76	0.43	0.37	2.59	2.59	6.05	6.05	6.05			
	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.26	0.26	0.26	0.26	1.20	2.59	2.59	6.05	6.05	6.05		
	0.09	0.09	0.09	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	0.26	1.41	2.16	2.34	4.92	6.05			
	6.73	0.09	0.09	0.09	0.36	0.26	0.26	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.66	3.49			
	17.28	17.28	0.86	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	2.16	1.95	1.07	0.86	0.86				
	17.28	17.28	17.28	0.86	8.64	6.53	3.15	1.73	1.73	0.86	0.86	0.86	0.86				
	1.73	1.73	17.28	17.28	17.28	15.34	8.64	4.32	4.32	0.96	0.86	0.86	0.86				
	1.73	1.73	25.30	32.20	25.92	22.48	25.92	17.28	1.73	1.73	0.86	0.86	0.86				
		1.73	32.20	30.23	25.92	25.92	17.28	2.59	2.59	1.82	1.73	1.24	0.86				
		1.73	32.20	27.71	25.92	5.41	1.73	1.73	2.59	2.59	2.03	1.73					
		1.73	31.41	25.92	11.24	1.73	1.73					2.16					
		17.31	27.96	12.62	1.73												

Figura 7. 82. Valores finales de conductividad hidráulica por celda

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

De acuerdo a los valores de conductividad para las rocas sedimentarias sin consolidar (Tabla 7.43), los valores utilizados para el modelo se encuentran dentro de los límites al considerarlos como depósitos de ribera o de acuífero superficial.

Tabla 7. 43 Valores de conductividad hidráulica de acuerdo al tipo de roca (USGS, 2002)

Propiedades de rocas comunes					
Material de Acuífero	Extremo	Común	Común	Extremo	Tipo de Roca
	Kmin, m/d	Kmin, m/d	Kmax, m/d	Kmax, m/d	
Grava	296	985	9850	9850	Roca sedimentaria sin consolidar
Mezcla de arena y grava	3.3	99	985	985	
Arena gruesa	164	230	985	985	
Arena media	3.3	66	230	657	
Arena fina	1.64E-01	10	66	66	
Sistemas de acuíferos de la costa del Golfo (6603 valores)	6.57E+00	99	657	2627	
Depósito de ribera, Fort Worth, Texas (59 valores)	3.28E-02	3.3	328	985	
Acuífero superficial, centro de Florida (arena fina y limo, 55 valores)	3.28E-02	3.28E-01	99	164	
Limo, Loess	9.85E-04	3.28E-03	0.33	20	
Till	9.85E-07	9.85E-03	0.99	2	
Suelo arcilloso (superficie)	3.28E-02	3.28E-02	3.3	3.3	
Arcilla	3.28E-06	3.28E-05	3.28E-04	3.28E-03	Rocas carbonatadas
Arcilla marina inalterada	6.57E-07	6.57E-07	1.97E-03	1.97E-03	
Carsto	9.85E-01	33	3238	32833	
Caliza de arrecife	9.85E-01	33	3283	19700	
Caliza y dolomita	9.85E-04	1.31E-02	3.28E-01	7	Roca sedimentaria endurecida
Arenisca de grano fino	3.28E-04	3.28E-03	3.3	19.7	
Arenisca de grano medio	3.28E-03	3.3	33	263	
Limonita	3.28E-06	3.28E-05	1.64E-02	1.31E-01	
Arcillolita	9.85E-09	3.28E-06	3.28E-05	9.85E-01	
Anhidrita	3.28E-07	3.28E-07	1.97E-02	1.97E-02	
Pizarra	3.28E-08	3.28E-07	3.28E-04	3.3	Roca volcánica o metamórfica
Basalto Permeable	0.328	3.3	328	19700	
Ígnea fracturada y roca metamórfica	0.003	0.164	33	328	
Granito erosionado	0.328	3.3	33	66	
Gabro erosionado	0.328	0.328	3.28	3.28	
Basalto	0	9.85E-02	3.28E-01	3.28E-01	
Ígnea sin fracturar y roca metamórfica	0	2.96E-08	1.97E-04	1.97E-04	

Ante las consideraciones anteriores y algunas otras modificaciones como la corrección de las unidades de algunas acciones elementales y orden de los niveles iniciales se logró mejorar gradualmente el comportamiento de la piezometría (Figura 7.86).

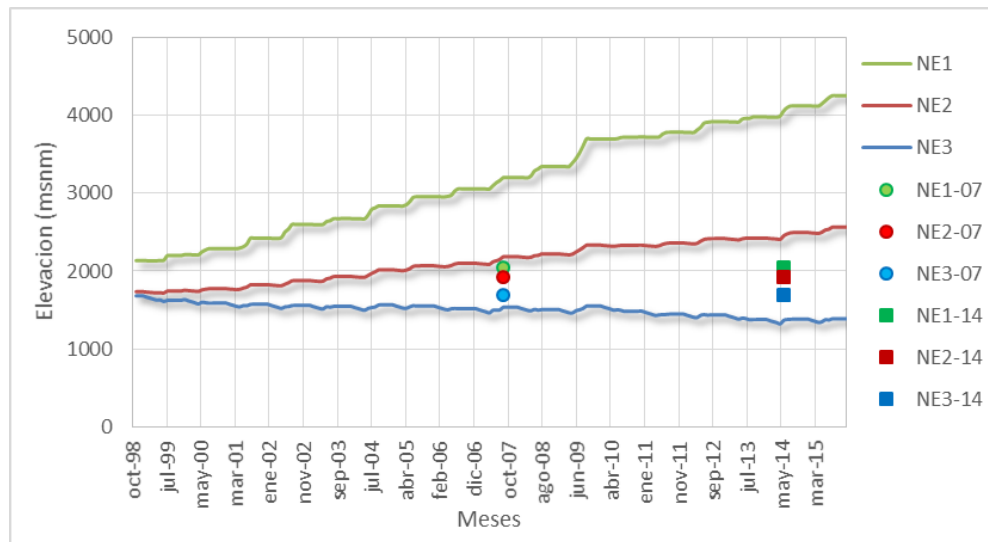


Figura 7. 83. Piezometría simulada para los parámetros de control bajo configuración de espesor y conductividad hidráulica.

A partir de las simulaciones posteriores se observó que el coeficiente de almacenamiento figuraba como el parámetro de mayor sensibilidad en el modelo por lo cual fueron calibrados los valores en las celdas de acuerdo al tipo de acuífero y material permeable, considerándolos de tipo libre y poroso intergranular. (Figura 7.44).

Tabla 7. 44 Coeficiente de almacenamiento para diferentes tipos de terreno y acuíferos (Villanueva e Iglesias, 1984).

Material Permeable	Acuífero	S (Valores medios)
Kárstico: Calizas y dolomías jurásicas	Libre	$2 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$5 \cdot 10^{-5}$
Calizas y dolomías cretácicas y terciarias	Libre	$2 \cdot 10^{-2} - 6 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	$10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
	Confinado	$10^{-4} - 5 \cdot 10^{-5}$
Poroso intergranular gravas y arenas	Libre	$5 \cdot 10^{-2} - 15 \cdot 10^{-2}$
	Semiconfinado	10^{-3}
	Confinado	10^{-4}
Kársticos y porosos Calcarenitas marinas terciarias	Libre	$10 \cdot 10^{-2} - 18 \cdot 10^{-2}$

Consecuentemente se realizaron simulaciones hasta determinar la mejor correspondencia con los niveles piezométricos medidos en campo, que se reflejan en los parámetros de control graficados (Figura 7.87).

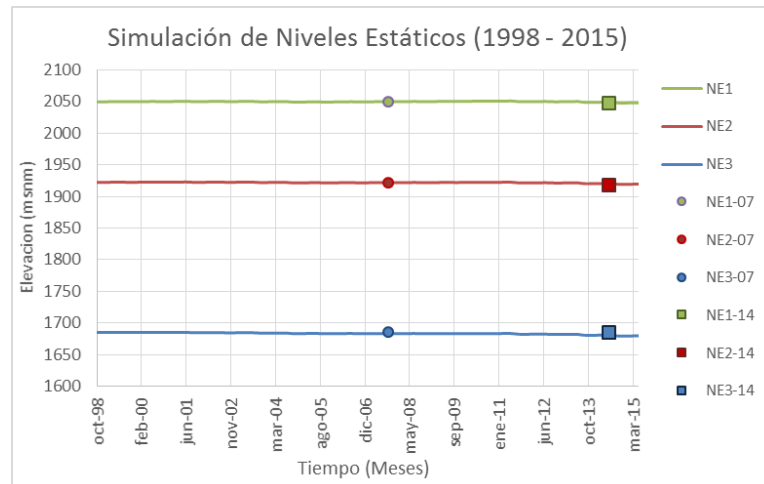


Figura 7. 84. Piezometría de última calibración realizada con mayor correspondencia.

El proceso de calibración conlleva una gran inversión de tiempo en el que los procesos de prueba y error llevaron a determinar cuáles parámetros son los que tienen mayor influencia sobre los resultados que arroja el modelo, proporcionando al mismo tiempo un panorama general sobre la calidad de los datos que se proporcionan al módulo y la que sería deseable utilizar.

La visualización individual de los parámetros de control NE1, NE2 y NE3 (Figura 7.88, Figura 7.89 y Figura 7.90) fue necesaria debido a que la diferencia de elevaciones entre cada uno de los niveles estáticos hace difícil apreciar el cambio en el tiempo de la piezometría.

Se presenta también la comparativa numérica entre los niveles medidos y simulados de los parámetros de control para el año 2007 y 2014 en la tabla 7.45.

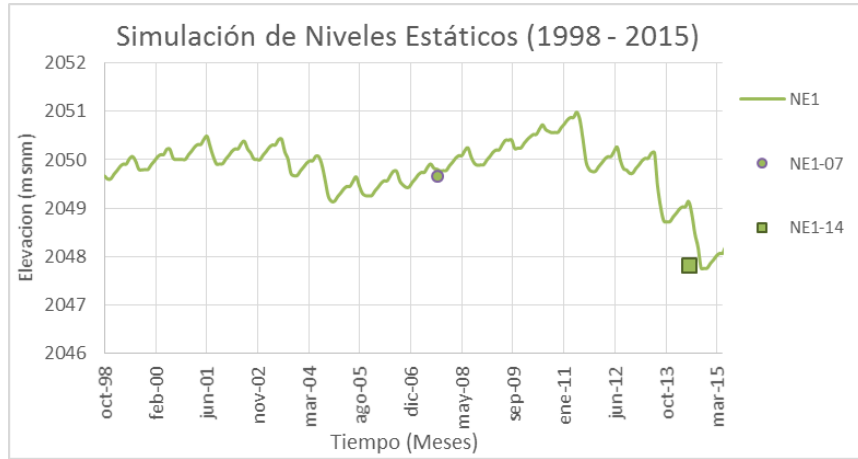


Figura 7. 85. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE1

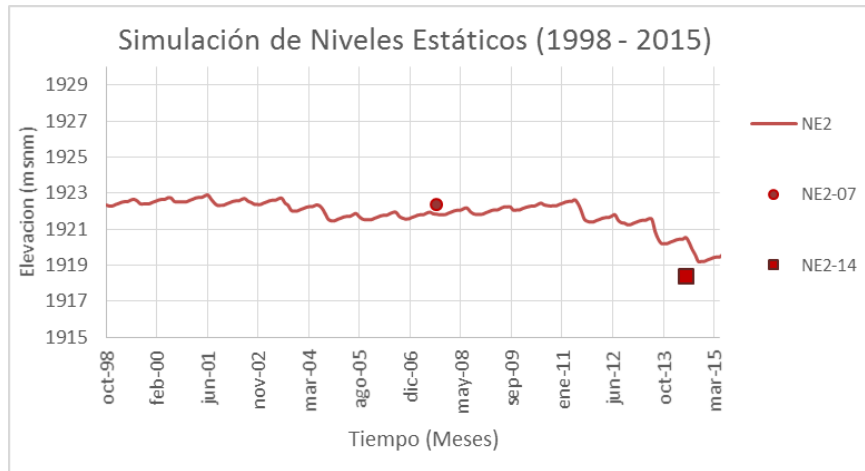


Figura 7. 86. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE2

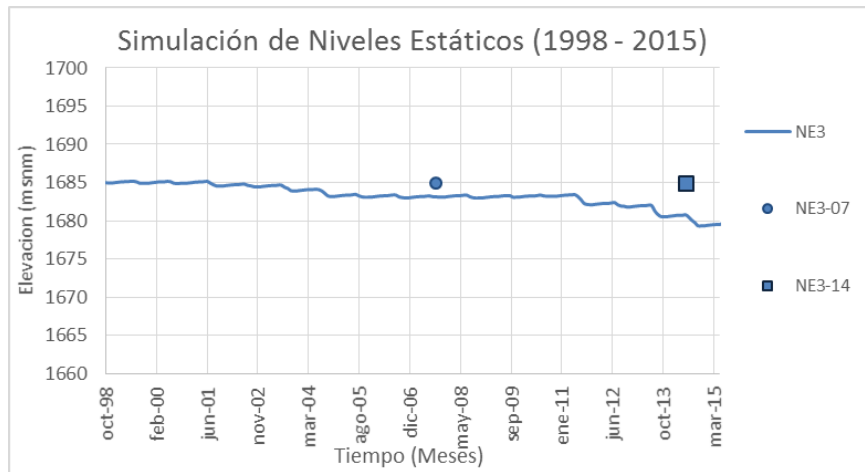


Figura 7. 87. Resultados de última simulación piezométrica realizada en NE3

Tabla 7. 45 Diferencia en los niveles estáticos de control, medidos y simulados.

	NE-07	NES-07	Δ NE-07	NE-14	NES-14	Δ NE-14
NE1	2049.667	2049.771	-0.24575	2047.822	2048.899	-1.07715
NE2	1922.342	1921.804	0.39948	1918.382	1920.288	-1.90575
NE3	1685	1683.102	1.748843	1685	1680.49	4.509772

A partir de estos valores de simulación provenientes de la calibración más fina obtenida se procede a determinar el comportamiento de la piezometría en el tiempo para un periodo más extenso, homólogo al fijado en las series de proyección de cambio climático de INECC con el fin de realizar la comparativa de la evolución de niveles, encontrándose el siguiente resultado.

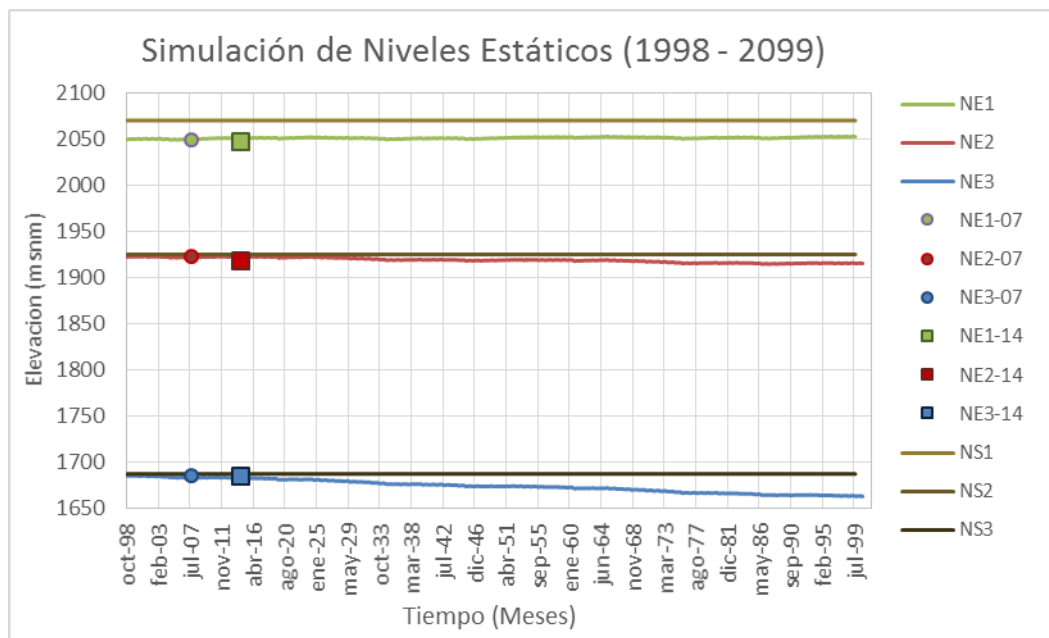


Figura 7. 88. Simulación de piezometría periodo 1998-2009

Para este periodo se utilizó una base de 30 años de datos de acciones elementales (1970 – 2000) las cuales se reproducen periódicamente hasta completar el ciclo al año 2009, esto bajo la consideración de que se presentará un comportamiento similar de presión sobre el acuífero en el futuro. Obteniéndose así una primera aproximación de la proyección de niveles donde se aprecia un descenso de los mantos freáticos en la parte media y baja de la zona modelada, teniendo un descenso del año 2014 al 2009, 7 y 15 m para NE2 y NE3, mientras que NE1 aumenta 1 m.

Con fines de visualización se ordenaron los valores de piezometría correspondientes a las celdas que se ubican en un trazo de que contiene aquellas que fueron seleccionadas como parámetro de control (Figuras 7.92 y 7.93).

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	0	0	0	1682	1678	1690	1678	1670	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	1681	1682	1687	1660	1654	1809	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	1667	1689	1730	1665	1671	1757	2011	2007	2005
5	0	0	0	0	1682	1671	1668	1672	1688	1707	1685	1800	1919	1998	2005	2004
6	0	0	0	0	1715	1680	1666	1677	1684	1691	1875	1943	1920	1985	0	0
7	0	0	0	1708	1699	1699	1695	1685	1692	1778	1871	1875	1875	1989	1988	0
8	0	0	1876	1879	1702	1703	1758	1822	1829	1853	1863	1870	1983	1991	1957	0
9	0	0	1908	1875	1731	1731	1746	1983	1948	1910	1911	1935	1925	1934	1944	0
10	0	1944	1905	1844	1768	1740	1738	1930	1917	1917	1960	1921	1931	2233	2238	0
11	0	2090	1903	1828	1807	1766	1819	1935	1924	2031	2107	2142	2254	2239	0	0
12	0	2091	1976	1884	1903	1855	1873	1992	2000	2018	2017	2155	2265	2237	0	0
13	0	2097	2078	2005	2073	2001	1987	1987	1980	1989	1991	2062	2129	2254	0	0
14	0	2092	2084	1996	1978	1959	1985	1977	1986	1984	1987	2004	2062	2076	0	0
15	0	2091	1990	1990	1987	1984	1990	1989	1988	1983	1985	2061	2209	2185	0	0
16	0	1988	1987	1984	1981	1982	1988	1995	2040	2040	2036	2138	2184	2121	0	0
17	0	0	1984	1984	1984	1988	1991	2018	2027	2030	2032	2120	2120	2129	0	0
18	0	0	2437	2345	2133	2107	2048	2051	2024	2029	2030	2120	2122	0	0	0
19	0	0	2595	2520	2396	2302	2238	2057	0	0	0	0	2130	0	0	0
20	0	0	2630	2583	2494	2471	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 7. 89. Trazo de perfil sobre las celdas de control e indicación de celdas de validación

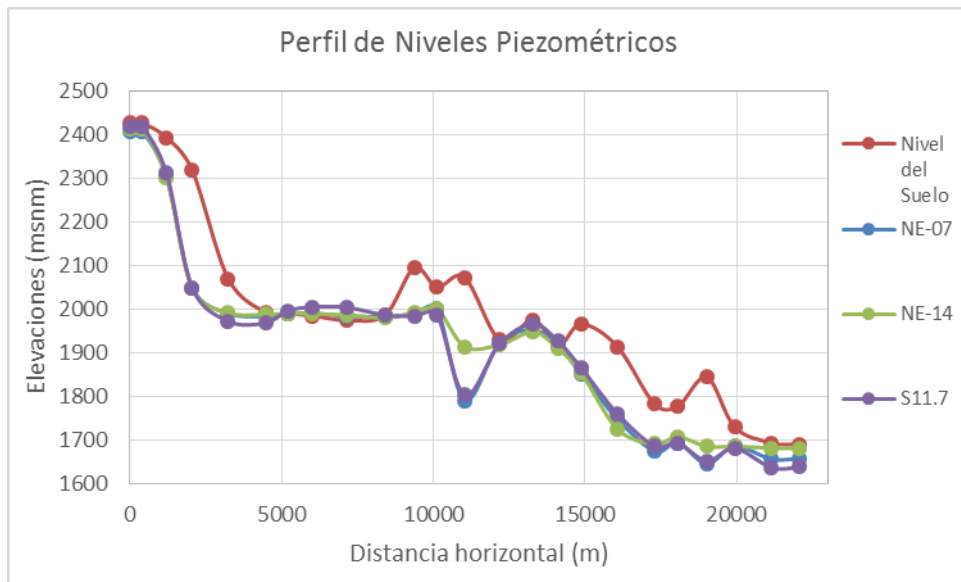


Figura 7. 90. Perfil piezométrico que incluye los niveles de los parámetros de control

Se puede apreciar que los niveles simulados para 2014 siguen un comportamiento similar al de los medidos a diferencia de un punto en la zona media en el que el descenso es bastante considerable y en la sección final en la que la tendencia es de disminución, por lo tanto podría requerirse una calibración más fina con el fin de ajustar mucho más los niveles simulados a lo obtenido en campo.

Para comprobar que el modelo produce resultados lógicos y admisibles se tomaron las celdas 28, 57, 126 y 142 dentro del modelo (Figura 7.92) para verificar la calidad de los resultados encontrándose que la mayor diferencia de elevación fue de 4 metros (Tabla 7.46).

Tabla 7. 46 Diferencia en los niveles estáticos de celdas de validación

	NE-07	NES-07	Δ NE-07	NE-14	NES-14	Δ NE-14
NEC-28	1799.389	1801.084	-1.69502	1799.917	1801.667	-1.7499
NEC-57	1702.103	1701.168	0.935016	1702.103	1700.35	1.753124
NEC-126	1974.798	1978.797	-3.99921	1987.277	1982.995	4.281798
NEC-142	1983.587	1981.383	2.20446	1983.587	1980.797	2.790554

Ante los resultados anteriores es posible pero intrincado producir una calibración mucho más fina principalmente por la complejidad que supone la discretización del modelo aun así el tiempo de inversión para llevarlo a cabo lo dejan fuera de consideración por lo cual se prosigue con la metodología.

7.10 Simulación con cambio climático

Los datos climatológicos afectados por la anomalía climática para cada uno de los escenarios RCP que se obtuvieron fueron utilizados dentro del modelo EvalHid para obtener las infiltraciones hacia los acuíferos, determinándose la infiltración total, el promedio anual y el porcentaje de reducción. (Tablas 7.47 y 7.48).

Tabla 7. 47 Resumen de infiltraciones determinadas para los acuíferos bajo los escenarios RCP.

	Infiltración RCP 4.5				Infiltración RCP 6.0			
	2015-2039		2075-2099		2015-2039		2075-2099	
	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz
Inf. Total (Hm3/mes)	5253.92	5339.33	5136.02	5152.54	5271.62	5290.24	5194.22	5144.22
Prom. Anual (Hm3/año)	220.49	222.57	215.57	214.71	221.06	220.41	217.98	214.33

	Infiltración RCP 8.5			
	2015-2039		2075-2099	
	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz
Inf. Total (Hm3/mes)	5383.35	5396.95	4186.89	4153.90
Prom. Anual (Hm3/mes)	225.83	224.94	175.91	172.76

Tabla 7. 48 Reducción de la infiltración de corto a largo plazo para cada escenario RCP

	Infiltración RCP 4.5		Infiltración RCP 6.0		Infiltración RCP 8.5	
	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz	Zacapu	P. Ortiz
Reducción de Infiltración (%)	2.24	3.50	1.47	2.76	22.23	23.03

Se hace notar que el escenario RCP 6.0 no disminuye como se esperaría respecto al RCP 4.5, esto probablemente se deba a alguna anomalía en la metodología con la que fueron determinados estos datos en el CMIP5, pues el mismo comportamiento se refleja en los datos obtenidos de INECC; por otra parte el escenario más severo muestra una gran disminución de las infiltraciones en los acuíferos siendo más del 20%.

La infiltración calculada es aplicada como la acción de recarga para el acuífero Zacapu y Pastor Ortiz del modelo en Aqual, donde al analizar los valores de piezometría simulados se presentan los siguientes resultados en las figuras 7.94 a 7.99; con fines de comparación se considera un nivel estático inicial común ajustándose las descripciones al periodo de cambio climático a corto plazo.

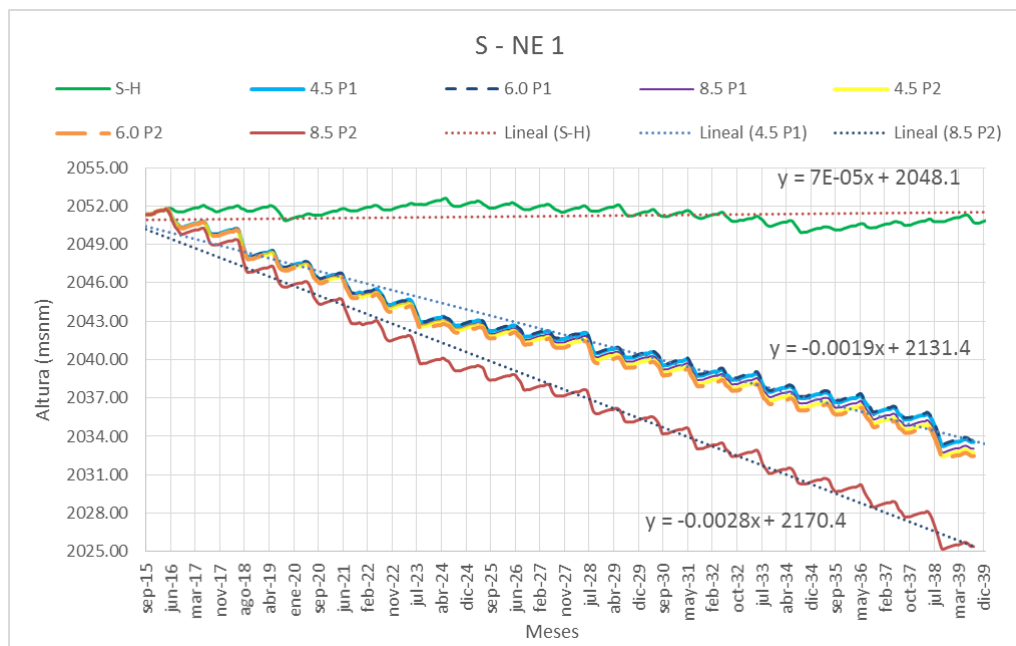


Figura 7. 91 Evolución piezométrica del PC NE1 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039)

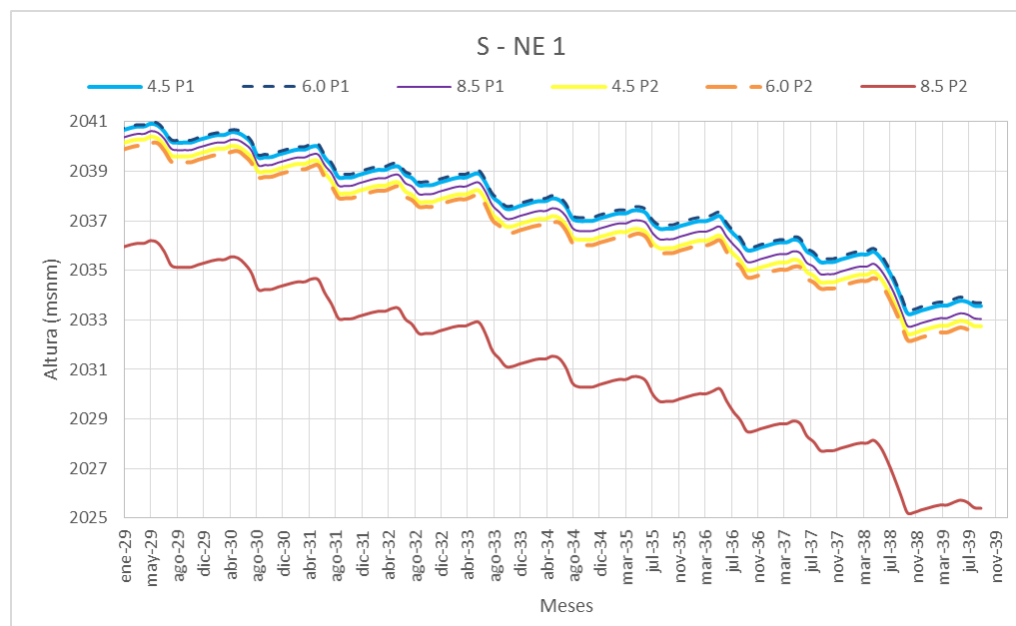


Figura 7. 92. Evolución piezométrica del PC NE1 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039)

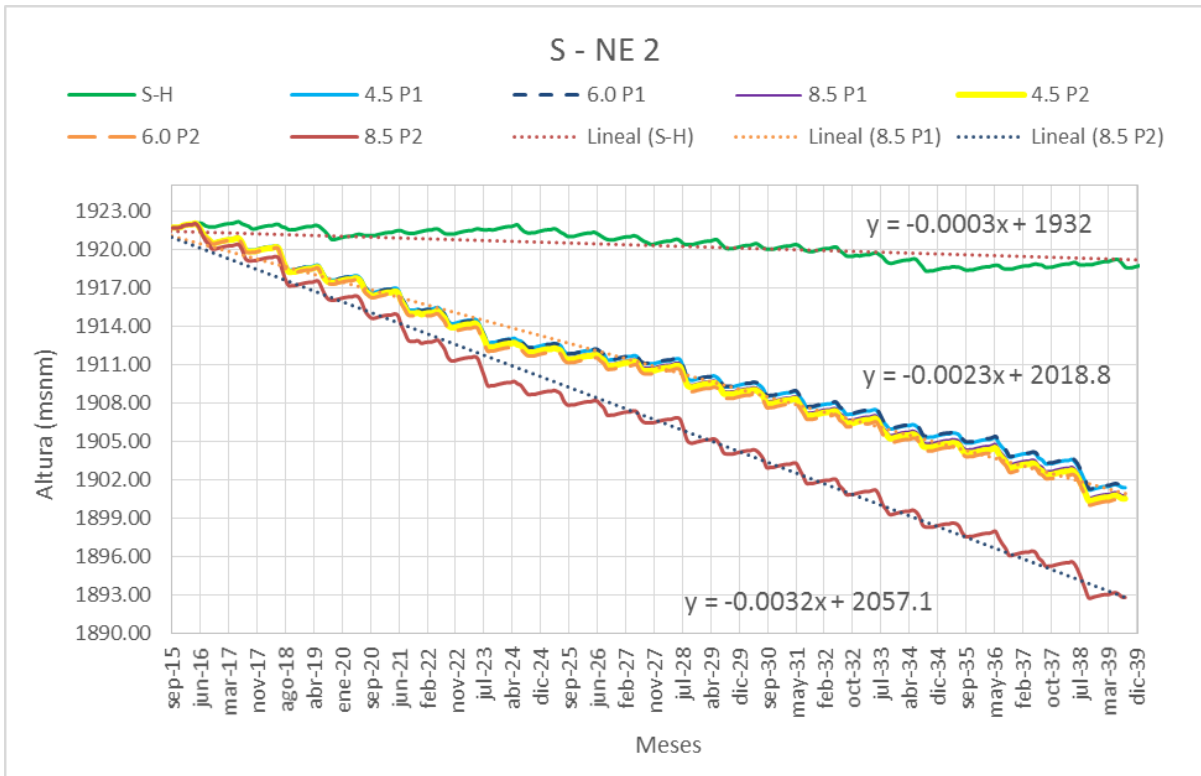


Figura 7. 93. Evolución piezométrica del PC NE2 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039).

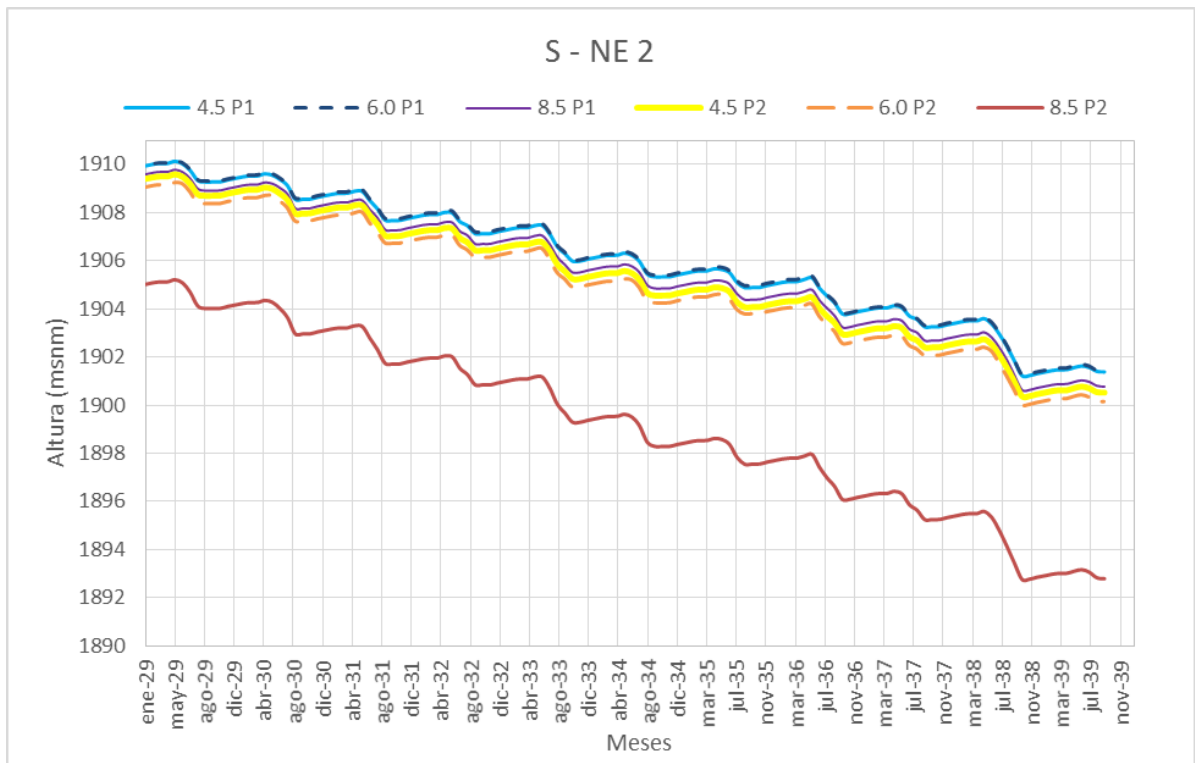


Figura 7. 94. Evolución piezométrica del PC NE2 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039).

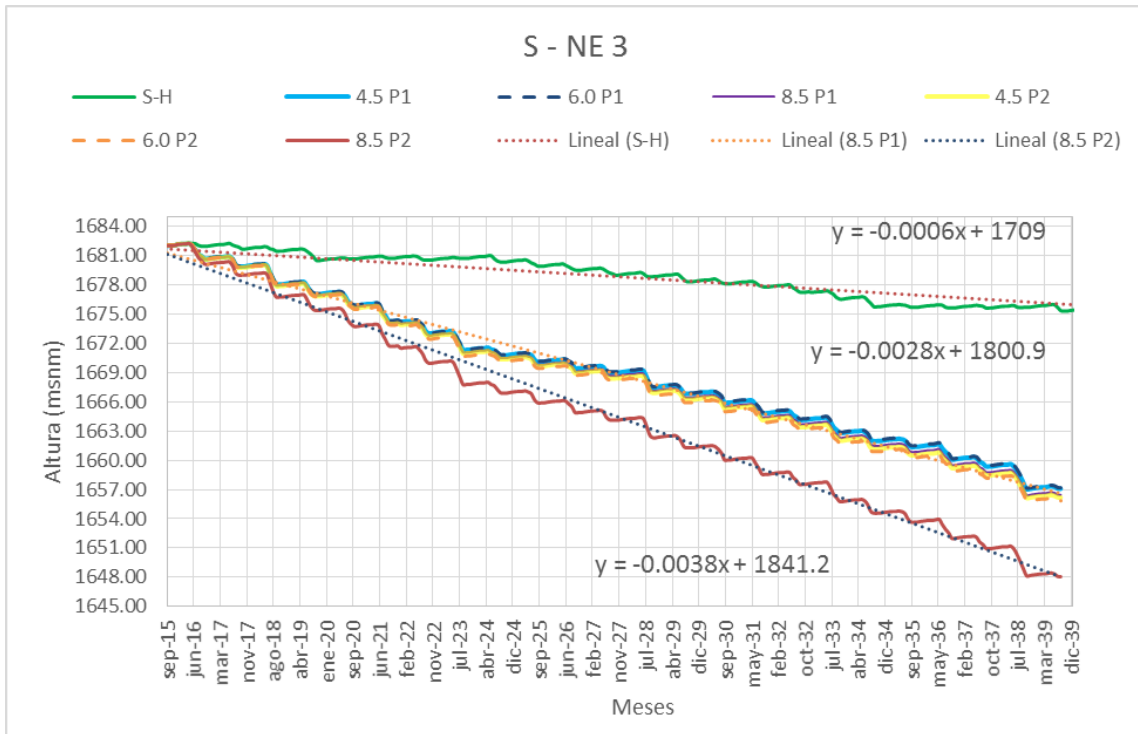


Figura 7. 95. Evolución piezométrica del PC NE3 para los diferentes escenarios de cambio climático (2015-2039).

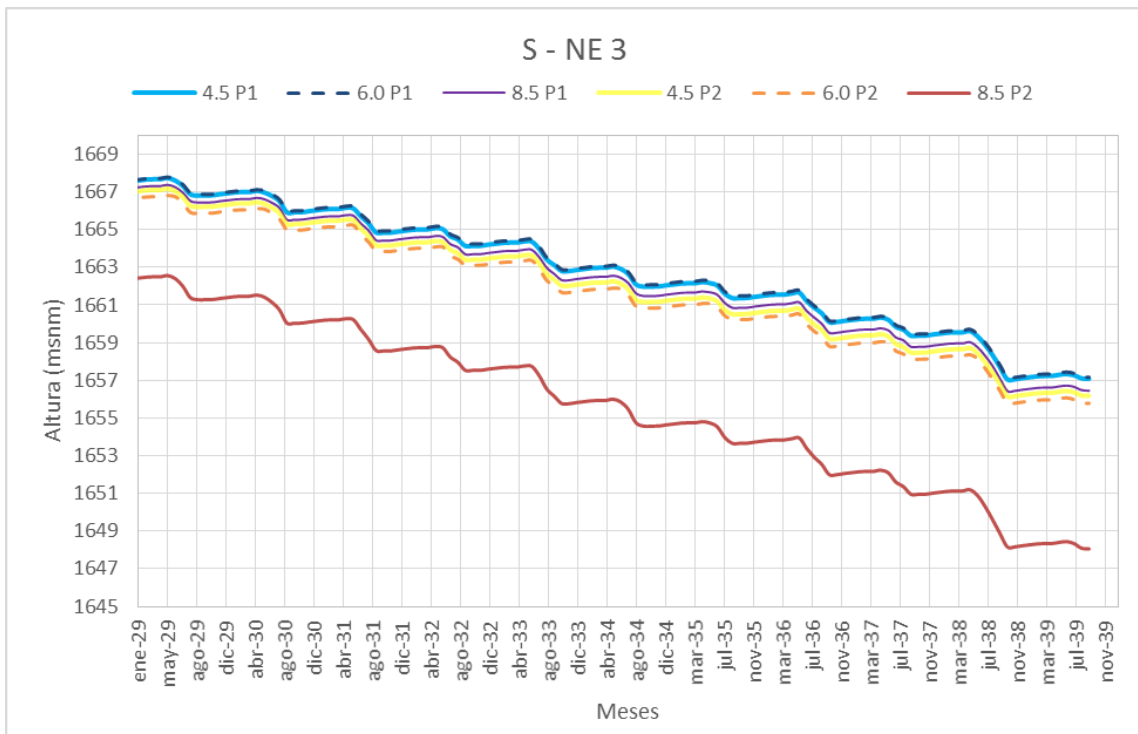


Figura 7. 96. Evolución piezométrica del PC NE3 para los diferentes escenarios de cambio climático (2029-2039).

Como muestran las figuras del periodo 2029-2039 la piezometría disminuye a medida que el escenario RCP aumenta de grado, paradójicamente se muestra poca variación de uno a otro, a excepción del escenario 8.5 P2 donde la reducción es muy evidente como se venía mostrando en el porcentaje de reducción de infiltración al acuífero y también como se muestra en la tabla 7.49 referente al promedio de las diferencias entre el nivel estático inicial y el último simulado para los parámetros de control.

Tabla 7. 49 Relación de disminución piezométrica para los diferentes escenarios y periodos de proyección.

Reducción de NE con respecto al estado inicial (m)	S 4.5 P1	S 6.0 P1	S 8.5 P1
	21.06	20.97	21.65
	S 4.5 P2	S 6.0 P2	S 8.5 P2
	21.92	22.28	29.66

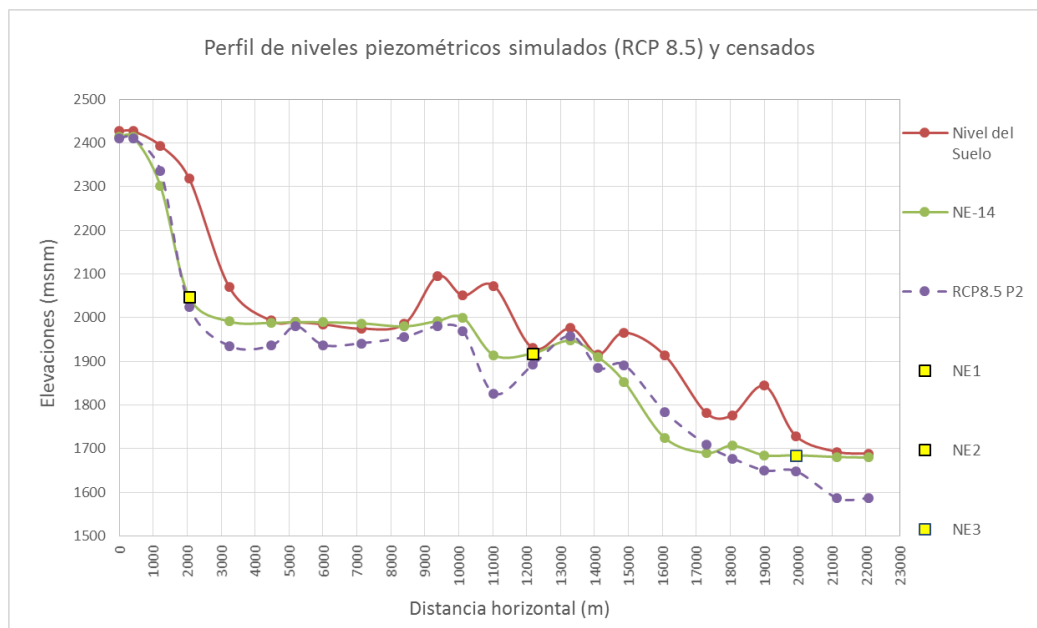


Figura 7. 97 Comparación de perfiles piezométricos simulado (RCP 8.5) y medido (2014) respecto al nivel del suelo

8. Conclusiones

La incorporación del efecto del cambio climático en la hidrología es un aspecto que posibilita un mayor entendimiento de la relación del ciclo hidrológico con el entorno en que se presenta, bajo diversos factores de afectación desde aquellos de origen natural hasta los de consecuencia antropogénica; a partir de la modelación es posible incorporar todos estos componentes en un sistema que represente de manera adecuada el probable comportamiento de las masas de agua subterránea, regido por las leyes de la física a través de expresiones matemáticas que consideran diversos elementos del medio, esto con el fin de proceder de forma adecuada ante la situación que supongan los resultados de la modelación.

Es evidente a partir de los resultados obtenidos que el modelo generado en Aquival predice una disminución de los niveles freáticos mucho mayor de la que se presentaría de manera natural si no ocurriera un aumento de las temperaturas y una reducción de la precipitación como lo advierten los datos generados de los escenarios RCP, muestran además que existe baja de niveles estáticos a medida que aumenta el grado RCP siendo esto también cierto para las proyecciones a largo plazo que permiten apreciar una evolución minorativa pero en comparación con las simulaciones a corto plazo podrían ser interpretadas como ínfimas, pero este no es el caso para la proyección a largo plazo del escenario más drástico (RCP 8.5) pues evidencia una importante reducción cercana a los 30m.

Ante las circunstancias anteriores, es plausible afirmar que la implementación del efecto del cambio climático a la modelación hidrológica tanto superficial como subterránea, proporciona un interesante y provechoso punto de vista sobre el cambio de los sistemas hidrológicos que son los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz, donde se ha encontrado que de acuerdo a lo inicialmente planteado el cambio climático afecta de forma negativa a estos cuerpos subterráneos, con un descenso que podría ser de 20m a 21 m para corto plazo y de 22m a 30m para largo plazo aunado al descenso del periodo anterior, traduciéndose en un mayor esfuerzo económico y de infraestructura para mantener el aprovechamiento hídrico deviniendo en una afectación a todos los

subsistemas humanos y naturales que dependen de él, principalmente los rubros urbanos y agrícolas, donde en el caso de contar con los datos de plazo medio se podría determinar la reducción de nivel total, que posiblemente llevaría a un estado mucho más agravante que los anteriormente analizados, .

Teniendo en cuenta la presión en los acuíferos existente y la que probablemente pueda ocurrir de acuerdo a los resultados, es necesario el planteamiento de nuevas opciones para la obtención de agua que satisfagan las demandas sin sobreexplotarlos, ya sea mediante la implementación plantas de tratamiento de aguas residuales, recarga artificial de acuíferos, cambio de tipo de cultivo en la zona, protección de zonas de recarga o reducción de volúmenes otorgados en concesiones.

Con el fin de obtener simulaciones más precisas y descriptivas, es necesario implementar métodos de recopilación de información actualizados de captura automática, que permitan producir simulaciones de manera agilizada, describiendo así el comportamiento natural del medio históricamente, permitiendo ser utilizados para predicciones del sistema bajo condiciones normales o comparaciones posteriores con escenarios de cambio climático, ayudando a desarrollar e incorporar mejores métodos de simulación hidrológica en México en especial subterránea.

Es recomendable la implementación de los efectos de cambio climático en futuros planteamientos de modelación hidrológica, con el fin de mejorar las metodologías utilizadas en detallar el funcionamiento de los sistemas hídricos que son aprovechados, evitando así alterar drásticamente o irremediablemente las fuentes de recursos y los entornos que dependen de ellos.

9. Documentos Consultados

1. Custodio E., Llamas M.R., 2001. *Hidrología Subterránea*. (2 tomos). España.
2. Hernández J. et al. 2012. *El Cambio Climático En La Gestión Hidrológica Subterránea*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México.
3. Martínez J., Fernández A. 2004. *Cambio climático: una visión desde México*. México D.F. México.
4. Estrela T. 1992. *Modelos matemáticos para la evaluación de recursos hídricos*. CEDEX, Madrid, España.
5. Magaña V. 2010. *Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones*. Centro de Ciencias de la Atmósfera, UNAM, México.
6. Laura M. 2004. *Modelos hidrológicos en la gestión integrada de cuencas*. CIVILTEC. 12, 8-9.
7. Denise G., et al. 2012. *Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río grande de Morelia*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México.
8. Magaña V., Caetano E. 2007. *Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector*. UNAM, México.
9. Pernia J., Fornés J. 2009. *Cambio climático y agua subterránea*. ECT, IGME, Madrid, España.
10. Cruces J. 2006. *Módulo I: Contaminación ambiental. Modelo MODFLOW*. Madrid, España.

11. Paredes J., Solera A., et al. 2011 *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. Manual Técnico V 1.0*. Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia.
12. Abbott M.; Bathurst, J. et al 1987: *An introduction to the European Hydrological System Hydrologique European*, SHE, 1; History and phylospy of a physically based distributed modeling system. *Journal of Hydrology*, 87 (1986) 45-59.
13. Thornthwaite C., Mather, J. 1955. *The water balance*. Publ. Climatol. Lab. Climatol Drexel. Inst. Technol.
14. Temez J. 1977. *Modelo matemático de transformación precipitación aportación*. ASINEL
15. IPCC, 2007. *Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK.
16. CONAGUA. 2012. *Atlas Digital del agua México 2012*. Recuperado el 21 de Noviembre de 2014 de: <http://www.conagua.gob.mx/atlas/>
17. Bates B.C., Z.W. Kundzewicz, S. Wu y J.P. Palutikof, Eds., 2008. *El Cambio Climático y el Agua. Documento técnico del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*, Secretaría del IPCC, Ginebra
18. Almanza J. 2013. *Modelación de los acuíferos Zacapu y Pastor Ortiz La Piedad para la gestión de recursos hídricos en la cuenca del río Angulo, municipio de Nahuatzen*. Tesis de Licenciatura de la Fac. de Ing. Civil. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. Morelia, Michoacán, México.
19. Sahuquillo A., Cassiraga E. et al. 2010. *Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas*. Instituto Geológico y Minero, España.
20. Bergström S., 1995. *The HBV model*, computer models of watershed hydrology Water Resources Publications.

21. Burnash R.J.C., Ferral R.L., McGuire R.A., 1973. *A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers*. U.S. Department of Commerce, National Weather service and State of California, Department of Water Resources.
22. Dragoni W., Sukhija B.S. 2008. *Climate change and groundwater*. Geological Society. Bath, UK.
23. SEMARNAT 2012. *Informe de la situación del medio ambiente en México. Compendio de estadística ambientales indicadores clave y de desempeño ambiental*. Recuperado de: http://app1.semarnat.gob.mx/dgeia/informe_12/06_agua/cap6_2.html
24. Departamento de Ingeniería hidráulica y medio ambiente Universidad Politécnica de Valencia. *Mashwin Modelo de análisis de series hidrológicas manual de usuario*, Valencia España
25. Jorge A., et al. 2012. *Gestión de datos meteorológicos*. XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Acapulco, Guerrero, México
26. Harrie-Jan H., 2009. *The impact of climate change on groundwater resources. International Journal of Climate Change and Management*, Institute of Environmental Engineering, ETH Zurich, Zurich, Suiza.
27. Facundo G. et al. 2009. *Catedra de hidrología y procesos hidráulicos, clase de estadística hidrológica*. Universidad Nacional de Córdoba Facultad de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Córdoba, Argentina.
28. J.B. Marco, R. Harboe y J.D. Salas. (1989). *Stochastic Hydrology and its Use in Water Resources Systems Simulation and Optimization*. Holanda: Kluwer Academic Publishers.
29. Salcedo, E. R. et al. 2012. *Groundwater optimization model for sustainable management of the Valley of Puebla aquifer*. México: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
30. Tinoco, J. A. 2008. *Modelo matemático del acuífero profundo del valle de México usando diferencias finitas y superficies finitas integradas: simulación numérica con el programa MODFLOW*. Morelia, Michoacán, México: Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo Facultad de Ciencias Físico Matemáticas
31. Carreón, D.C. 2012. *El modelo de flujo de agua subterránea en el Acuífero Valle de Querétaro. Siete años de colaboración inter-institucional*. Juriquilla, Querétaro, México: Centro de Geociencias. UNAM Campus Juriquilla Querétaro.

-
32. Comisión estatal de agua y saneamiento de Guanajuato. 1998. *Estudio Hidrogeológico y Modelo Matemático Del Acuífero del Valle de León, Gto.* León, Guanajuato, México: Geofísica de Exploraciones Guysa, S.A. DE C.V.
33. Moriasi, D. N., J. G. Arnold, M. W. et al. 2007. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations.* ASABE
34. Kushwaha, R. K., et al. 2009. *MODFLOW Based Groundwater Resource Evaluation and Prediction in Mendha Sub-Basin, NE Rajasthan.* Journal Geological Society of India. Vol. 74, pp. 449-458.
35. Garrote, L., Iglesias, A. 2012. *Adaptación al cambio climático. Identificación de medidas de adaptación a partir de los impactos sobre los recursos hídricos en la Comunidad de Madrid.* Madrid: Colaboración entre Canal de Isabel II y la Universidad Politécnica de Madrid.
36. Chávez, A. 2012. *Propuesta Metodológica Para la Identificación de Medidas de Adaptación al Cambio Climático en Sistemas de Recursos Hídricos.* Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid.
37. Sahuquillo, A. 1983. *An enginevalue Numerical Technique for Solving Unsteady Linear Groundwater Models Continuously in Time.* Water Resources Magazine. 19.(1), 87-93
38. Chong-yu Xu 2002. *Hydrologic Models. Uppsala University Department of Earth Sciences Hydrology.* Uppsala, Estocolmo, Suecia.
39. Pulido, D., Sahuquillo, A., et al. 2004. *Linearización de la ecuación de Boussinesq para la gestión de acuíferos libres.* Boletín Geológico y Minero. 115, 289-298.
40. CONAGUA, IMTA, SEMARNAT. 2007. *Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia - Queréndaro y Pastor Ortiz en el estado de Michoacán.* Convenio de Colaboración CNA-OCLSP-JAL-CONV-008-2007. Informe Final. México.
41. Collazos, G. 2002. *El método de los Autovalores paso a paso.* Recuperado el 06 de febrero de 2015 de:
<http://www.ssdh2o.com.ar/Download/AutovaloresPasoApasso.pdf>
42. Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente. Universidad Politécnica de Valencia. *AQUIVAL Módulo para el preproceso y simulación de acuíferos. Manual de Usuario.* Valencia, España.

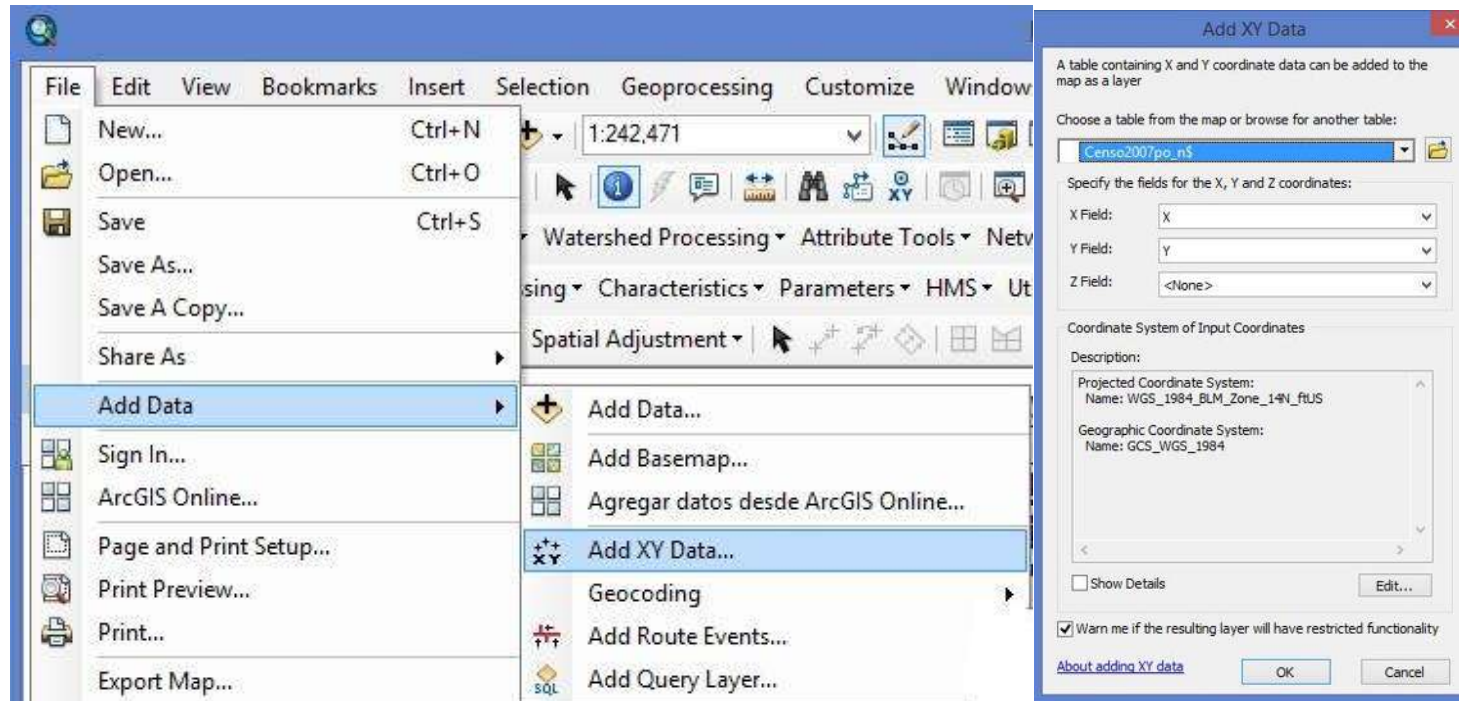
43. Villanueva, M. e Iglesias, A. 1984. *Pozos y acuíferos. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo*. Madrid, España.
44. García, E. 2004. *Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen*. México.
45. Andreu J. J. et al. 1991. *AQUATOOL: a computer assisted support system for water resource research management including conjunctive use*. In Loucks and da Costa, eds. *Decision Support Systems*. Berlin: Springer-Verlag.
46. USGS. 2002. *Basic Ground-Water Hydrology*. North Carolina. EUA.

Anexo 1

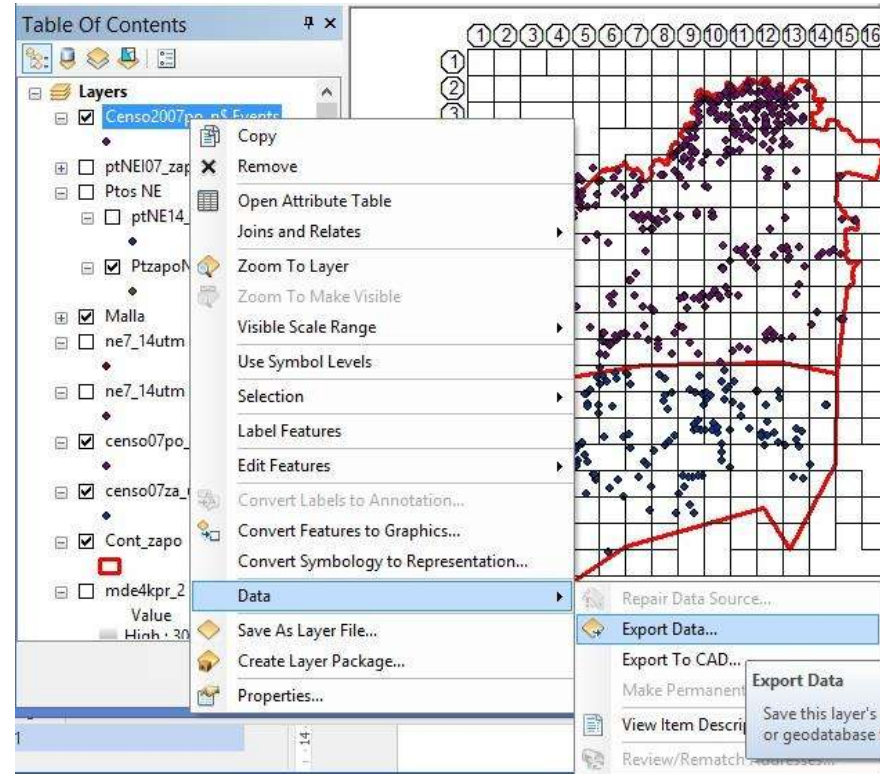
Para poder determinar una aproximación de los niveles estáticos iniciales necesarios para alimentar el modelo por diferencias finitas primero se requiere generar una tabla donde se concentre la información de los niveles estáticos censados para este caso las del año 2007.

NUM CENSO	TIPO OBRA	NE CENSO m	NE PROF	LATITUD	LONGITUD	Y	X	ALTITUD ms	TIPO BOMBA
200	POZO	1.73	1875.27	200452.2	1013426.16	20.081167	-101.573933	1877	SUMERGIBLE
7	POZO	2.12	1905.88	195703.24	1014515.06	19.9509	-101.754183	1908	SUMERGIBLE
167	POZO	2.18	1686.82	201343.14	1013757.3	20.22865	-101.632583	1689	VERTICAL
168	POZO	2.82	1685.18	201347.76	1013739.9	20.229933	-101.62775	1688	TURBINA
143	POZO	3.8	1686.2	201302.22	1013839.96	20.217283	-101.644433	1690	TURBINA
212	NORIA	4.09	1916.91	200207.38	1013651.18	20.035383	-101.614217	1921	SUMERGIBLE
223	NORIA	4.27	1914.73	200147.82	1013731.44	20.02995	-101.6254	1919	TURBINA
217	NORIA	4.46	1918.54	200158.2	1013825.32	20.032833	-101.640367	1923	TURBINA
214	POZO	4.85	1920.15	200156.94	1013707.38	20.032483	-101.618717	1925	SUMERGIBLE
169	POZO	5.23	1683.77	201356.04	1013742.12	20.232233	-101.628367	1689	TURBINA
386	POZO	5.53	1868.47	200736.78	1013057.9	20.126883	-101.516083	1874	SUMERGIBLE
198	POZO	6.45	1868.55	200605.22	1013313.32	20.10145	-101.5537	1875	SUMERGIBLE
42	POZO	7.94	1953.06	195802.64	1014040.98	19.9674	-101.67805	1961	TURBINA
174	POZO	8.81	1677.19	201410.2	1013843.56	20.236167	-101.645433	1686	SUMERGIBLE
300	POZO	10.47	1684.53	201910.32	1013306.36	20.319533	-101.551767	1695	TURBINA
22	POZO	10.93	2204.07	195831.74	1013110.8	19.975483	-101.519667	2215	SUMERGIBLE
104	POZO	12.03	1672.97	200853.52	1014017.04	20.1482	-101.6714	1685	SUMERGIBLE
224	POZO	13.82	1972.18	195933	1013853.22	19.9925	-101.648117	1986	SUMERGIBLE
395	POZO	15.12	1863.88	200558.86	1012958.38	20.099683	-101.49955	1879	SUMERGIBLE

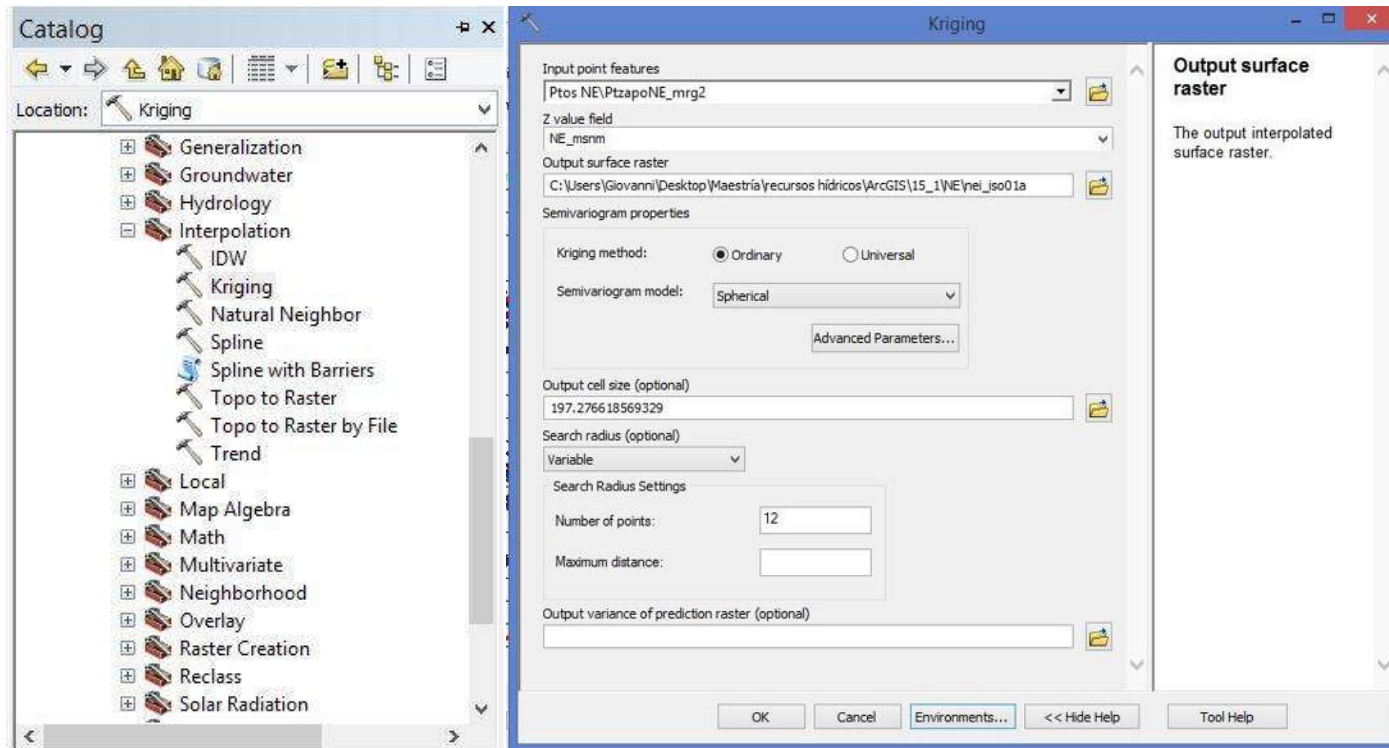
A partir de esta información se pueden ubicar espacialmente dentro de un sistema de información geográfica estos censos, en este caso en ArcMap se puede utilizar del menú "File" la herramienta que permite añadir la información a partir de los datos con sus coordenadas X,Y, utilizándose para esto la función "Add XY Data...", con esto se genera un "Event Theme" con la localización puntual de los aprovechamientos en el acuífero.



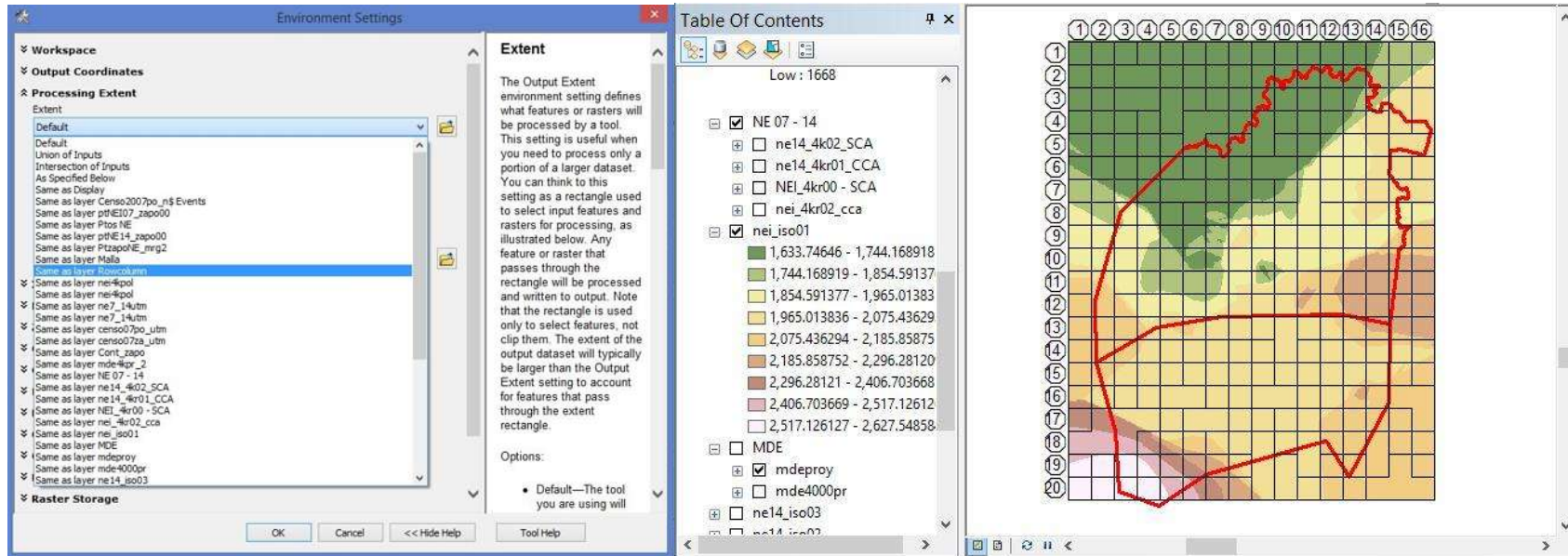
Una vez importado el tema debe ser transformado al formato “.shp” para poder trabajar con la información que contienen los puntos, para ello se utiliza la función “Export Data...” dentro de la opción “Data” de la lista desplegable de acciones del archivo



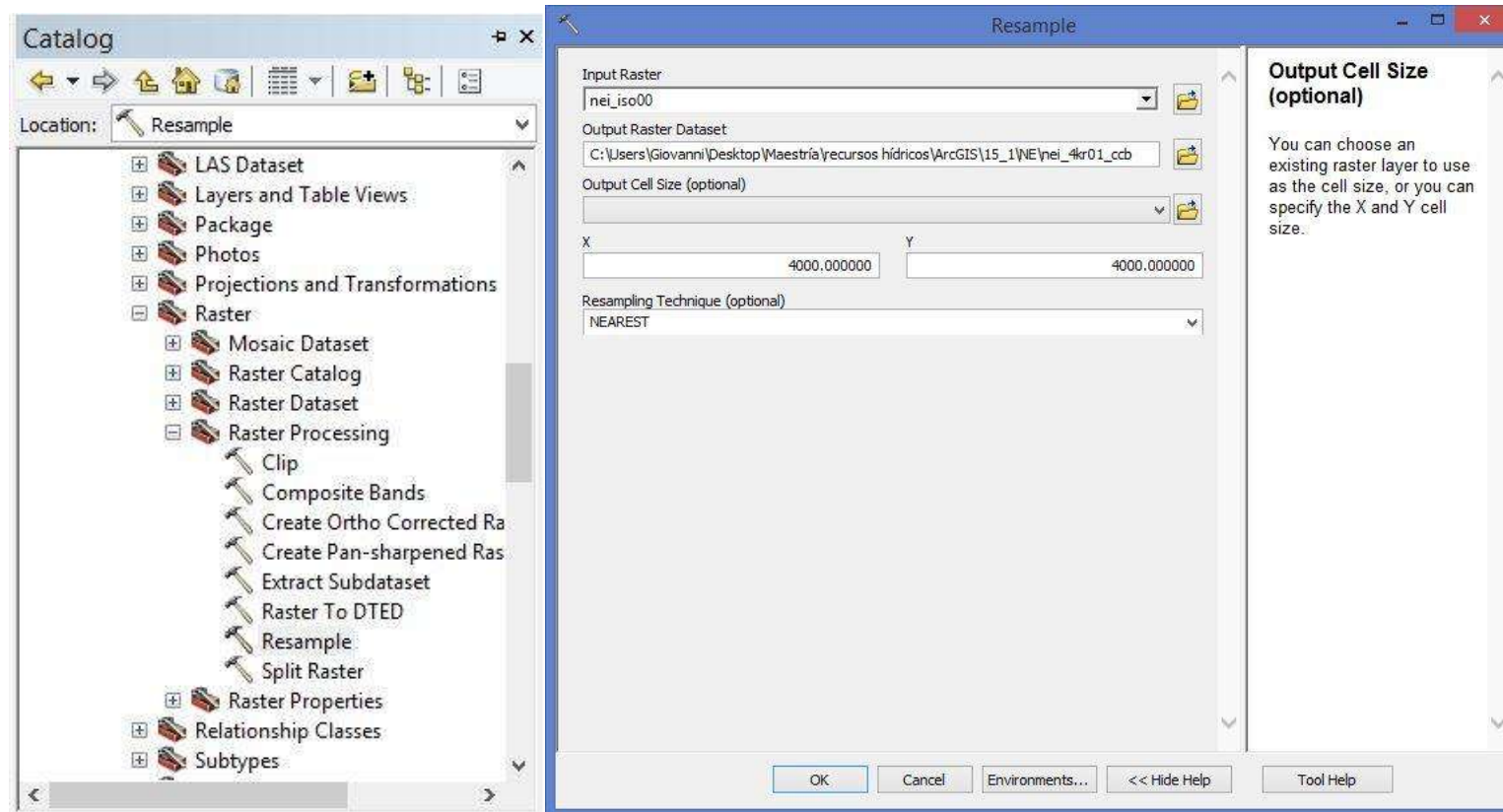
Una vez que se tiene el tema en el formato adecuado se procede a determinar los niveles estáticos probables en la superficie total del acuífero por medio de la interpolación de los valores censados, para lo cual se utiliza dentro de “Catalog” la caja de herramientas “Spatial Analyst Tools” donde se ubica la herramienta “Interpolation” y la opción “kriging”.



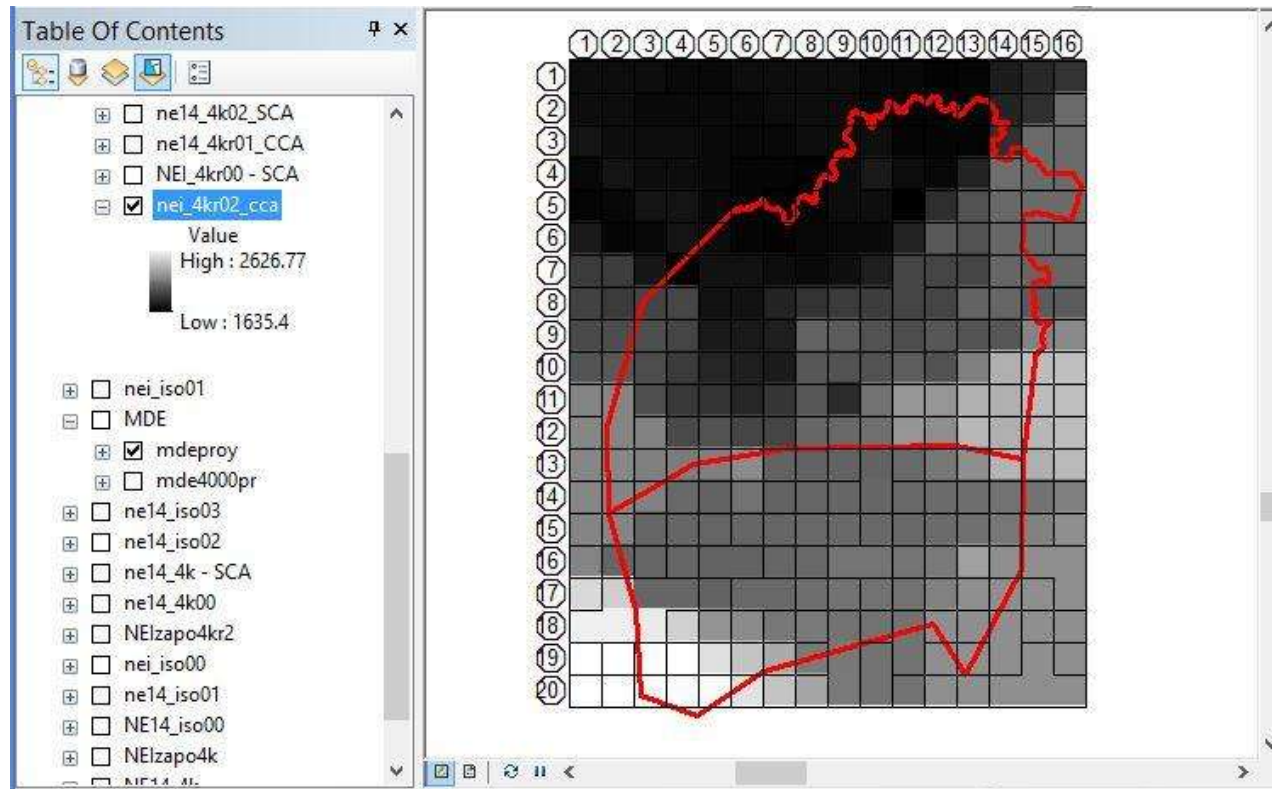
Después de definir el tema de puntos y el valor con el cual se realizará la interpolación se debe especificar hasta donde se extenderá la interpolación utilizando para ello el tema del mallado previamente generado.



Con esto se produce el tema en formato raster de isoyetas procedente del proceso de interpolación, debido a que este tipo de archivo comprende una gran cantidad de información, un valor por pixel, se debe modificar la cantidad de información presente de acuerdo al tamaño de celda establecido para el modelo discretizado, para ello se utiliza el comando “resample” dentro de la opción “Raster Processing” del menú “Raster” de la herramienta “Data Management Tool”.



Realizado lo anterior se obtiene un raster en el que el tamaño de pixel ha sido modificado para coincidir con el tamaño de celda establecido para el modelo del acuífero.



Se obtiene finalmente por cada celda el valor correspondiente a una aproximación al nivel estático inicial para la modelación por diferencias finitas, este procedimiento fue seguido de manera similar para producir los valores por celda de los parámetros hidrogeológicos como la conductividad hidráulica y la transmisividad.