



**UNIVERSIDAD MICHOACANA DE SAN  
NICOLÁS DE HIDALGO**

**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN INGENIERÍA  
AMBIENTAL**

FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA

FACULTAD DE BIOLOGÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL

**EVALUACIÓN DEL RIESGO DE SEQUÍA  
OPERATIVA, EN EL SISTEMA DE RECURSOS  
HÍDRICOS DE LA CUENCA DEL RÍO ANGULO**

TESIS

Como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

PRESENTA

**ING. JULIO CARDIEL DÍAZ**

ASESORA

**DRA. SONIA TATIANA SÁNCHEZ QUISPE**

CO-ASESOR.

**DR. JOSÉ JAIME MADRIGAL BARRERA**

MORELIA, MICH. OCTUBRE DE 2023

# ÍNDICE

## RESUMEN

<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>1</b>
<b>2. MARCO TEÓRICO</b> .....	<b>3</b>
2.1. SEQUÍAS Y SUS CLASIFICACIONES .....	3
2.2. DAÑOS OCASIONADOS POR LAS SEQUÍAS EN MÉXICO .....	4
2.3. ANTECEDENTES DE GESTIÓN DEL RIESGO EN MÉXICO Y ESPAÑA .....	7
2.4. MODELOS Y HERRAMIENTAS A UTILIZAR.....	9
2.4.1. EVALHID .....	10
2.4.2. AQUIVAL .....	14
2.4.3. SIMGES .....	15
2.4.4. MASHWIN .....	20
2.4.5. SIMRISK.....	22
2.4.6. GESTAT.....	23
<b>3. OBJETIVOS</b> .....	<b>25</b>
3.1. OBJETIVOS PARTICULARES .....	25
<b>4. HIPOTESIS</b> .....	<b>26</b>
<b>5. JUSTIFICACIÓN</b> .....	<b>27</b>
<b>6. METODOLOGÍA</b> .....	<b>29</b>
6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	30
6.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN.....	30
6.2.1. ESTACIONES CLIMATICAS .....	30
6.2.2. ESTACIONES HIDROMETRICAS.....	30
6.2.3. PIEZOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS Y VOLUMENES DE EXTRACCIÓN POR ACUÍFERO .....	31
6.2.4. DEMANDA URBANA.....	31
6.2.5. DEMANDA INDUSTRIAL .....	33
6.2.6. DEMANDA AGRÍCOLA .....	33
6.2.7. PRESAS.....	33
6.3. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS .....	33
6.3.1. LÍMITES DE ANDERSON.....	34
6.3.2. PRUEBA ESTADÍSTICA DE HELMERT.....	34
6.3.3. PRUEBA ESTADÍSTICA DE CRAMER .....	35
6.3.4. PRUEBA ESTADÍSTICA DE T-STUDENT.....	35
6.3.5. PRUEBA ESTADÍSTICA DE SECUENCIAS .....	36
6.3.6. LLENADO DE DATOS EN PRECIPITACIÓN .....	36
6.4. MODELACIÓN MATEMÁTICA.....	38
6.4.1. MODELACIÓN SUPERFICIAL .....	38
6.4.2. RESTITUCIÓN A RÉGIMEN NATURAL.....	38
6.4.3. MODELACIÓN SUBTERRÁNEA .....	39
6.4.4. MODELACIÓN CONJUNTA DE LA GESTIÓN HÍDRICA (SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA).....	39
6.4.5. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES .....	39
6.4.6. MODELACIÓN DE LA SEQUÍA .....	40
<b>7. RESULTADOS</b> .....	<b>41</b>
7.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO .....	41

<b>7.2.</b>	<b>DEMANDAS</b> .....	<b>46</b>
7.2.1.	DEMANDA URBANA.....	46
7.2.1.1	PROYECCIÓN A FUTURO DE LAS DEMANDAS URBANAS.....	48
7.2.2.	DEMANDA AGRÍCOLA .....	50
7.2.3.	DEMANDA INDUSTRIAL .....	53
<b>7.3.</b>	<b>ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS</b> .....	<b>54</b>
<b>7.4.</b>	<b>ESTACIONES HIDROMÉTRICAS</b> .....	<b>59</b>
<b>7.5.</b>	<b>NIVELES PIEZOMÉTRICOS</b> .....	<b>60</b>
<b>7.6.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO ZACAPU</b> .....	<b>63</b>
<b>7.7.</b>	<b>CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO PASTOR ORTIZ</b> .....	<b>67</b>
<b>7.8.</b>	<b>MODELACIÓN HIDROLOGÍA SUPERFICIAL</b> .....	<b>71</b>
7.8.1.	MODELO CONCEPTUAL DE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL .....	72
7.8.2.	INDICADORES DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO SUPERFICIAL .....	73
7.8.3.	CALIBRACIÓN DEL MODELO SUPERFICIAL .....	75
7.8.5.	COMPARATIVA ENTRE SIMULACIONES CON MODELO TEMEZ Y HBV .....	82
<b>7.9.</b>	<b>MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUBTERRÁNEA</b> .....	<b>84</b>
7.9.1.	MODELO CONCEPTUAL DE LA HIDROLOGICA SUBTERRÁNEA .....	84
7.9.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO SUBTERRÁNEO .....	89
<b>7.10.</b>	<b>MODELACIÓN CONJUNTA DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA</b> .....	<b>91</b>
7.10.1.	TOPOLOGÍA DEL SISTEMA.....	92
7.10.2.	CALIBRACIÓN DEL MODELO CONJUNTO.....	98
<b>7.11.</b>	<b>GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES</b> .....	<b>98</b>
<b>7.12.</b>	<b>EVALUACIÓN DEL RIESGO POR SEQUÍA OPERATIVA</b> .....	<b>100</b>
7.12.1.	CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA HISTÓRICA .....	100
7.12.2.	EVALUACIÓN DEL RIESGO .....	106
<b>8.</b>	<b>CONCLUSIONES</b> .....	<b>110</b>
<b>9.</b>	<b>BIBLIOGRAFÍA</b> .....	<b>114</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Porcentaje de área afectada para una demanda de 0 - 25% con IRSOE, (Arreguin, 2017).....	8
Figura 2. Proceso de las modelaciones matemáticas Brito-Vallinal et al., (2011). .....	9
Figura 3. Diagrama de flujos y almacenamiento del modelo Témez Paredes et al., (2017).....	11
Figura 4. Esquema metodológico a desarrollar en este proyecto. ....	29
Figura 5. Macrolocalización de la zona de estudio.....	41
Figura 6. Municipios dentro del parteaguas.....	42
Figura 7. Zona de estudio. ....	42
Figura 8. Clima de la zona de estudio.....	44
Figura 9. Uso de suelo dentro de la cuenca del río Ángulo.....	44
Figura 10. Geología de la cuenca del río Ángulo. ....	45
Figura 11. Hidrografía de la cuenca del río Ángulo. ....	45
Figura 12. Geología de la cuenca del Río Ángulo. ....	46
Figura 13. Localidades dentro de la zona de estudio. ....	47
Figura 14. Métodos empleados para poblaciones futuras.....	48

Figura 15. Estaciones climáticas cubriendo la zona de estudio. ....	54
Figura 16. . Resultados de validación de estación Abasolo con software Hydro Analysis. .....	57
Figura 17. Estaciones principales para la zona de estudio. ....	58
Figura 18. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Ángulo. ....	60
Figura 19. Pozos medidos para la campaña de monitoreo 2021. ....	61
Figura 20. Isopiezas para los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu para el año 2021. ....	62
Figura 21. Niveles estáticos para los acuíferos en el año 2021. ....	62
Figura 22. Geología general del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007. ....	64
Figura 23. Hidrogeología general del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007. ....	65
Figura 24. Distribución de transmisividad del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007. .....	66
Figura 25. Variación de la conductividad hidráulica del acuífero Zacapu. Fuente: CNA- IMTA 2007. ....	67
Figura 26. Geología general del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007. ....	68
Figura 27. Unidades hidrogeológicas del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007. .....	69
Figura 28. Distribución de transmisividad del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007. ....	70
Figura 29. Distribución de la conductividad hidráulica del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007. ....	71
Figura 30. Subcuencas de la cuenca del río Ángulo. ....	72
Figura 31. Estaciones ficticias en microcuencas con polígonos de Thiessen. ....	73
Figura 32. Calibración del año medio para la subcuenca de cabecera. ....	75
Figura 33. Calibración anual para la subcuenca de cabecera. ....	76
Figura 34. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca de cabecera. ..	76
Figura 35. Calibración para el año medio de la subcuenca media. ....	77
Figura 36. Calibración anual para la subcuenca media. ....	77
Figura 37. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca media. ....	78
Figura 38. Calibración para el año medio de la subcuenca baja. ....	78
Figura 39. Calibración anual para la subcuenca media. ....	79
Figura 40. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca baja. ....	79

## RESUMEN

Los daños derivados de las sequías comprenden impactos directos a los sistemas sociales, tales como; hambrunas, migración, abandono de tierras por la falta de agua para sus riegos, y pérdidas de cultivos y ganado, así como reducción de la disponibilidad del agua para uso doméstico e industrial, o para la generación de energía. También induce condiciones propicias para incendios forestales, alteraciones en la distribución de especies, pérdida de biodiversidad, e incluso, aumento en conflictos sociales y políticos.

El monitoreo y análisis de la sequía en México ha sido de gran importancia en los últimos años, a tal grado que se ha puesto énfasis en estudiar el comportamiento de la sequía meteorológica e hidrológica; contando con organismos que destinan sus recursos para la caracterización de los eventos secos.

El objetivo de este trabajo es generar un modelo de Gestión Hídrica que permita la evaluación de la sequía operativa en la Cuenca del Río Angulo y pretende recuperar información que permita prever y mitigar una sequía futura. En un sistema de recursos hídricos (RRHH) se puede hacer cuantificando los distintos componentes del balance hídrico, como lo es la precipitación, la evapotranspiración, escorrentía e infiltración.

El resultado de la modelación del sistema de RRHH es clasificar del total de precipitación media para la cuenca, cuánto es lo que escurre, cuánta agua se transforma en evapotranspiración así como la cantidad de milímetros que se infiltran al acuífero y de esa forma generar un balance hídrico que posteriormente ayudará a tomar decisiones en cuanto a la optimización del recurso para un aprovechamiento más adecuado de una Gestión Integral del Recurso Hídrico (GIRH) y posteriormente generar una Gestión del Riesgo ante posibles sequías operativas y aminorar las consecuencias que estas acarreen consigo mismas.

**Palabras clave:** Gestión en conjunto, EvalHid, Temez, Hidrología, Simulación.

## ABSTRAC

Damages derived from droughts include direct impacts to social systems, such as; famines, migration, abandonment of land due to lack of water for irrigation, and loss of crops and livestock, as well as reduced availability of water for domestic and industrial use, or for power generation. It also induces favorable conditions for forest fires, alterations in the distribution of species, loss of biodiversity, and even an increase in social and political conflicts.

The monitoring and analysis of drought in Mexico has been of great importance in recent years, to such an extent that emphasis has been placed on studying the behavior of meteorological and hydrological drought; counting on organisms that allocate their resources for the characterization of dry events.

The objective of this work is to generate a Water Management model that allows the evaluation of the operational drought in the Angulo River Basin and aims to recover information that allows predicting and mitigating a future drought. Water resources system can be done by quantifying the different components of the balance water, such as precipitation, evapotranspiration, runoff and infiltration.

The result of the modelling of the water resources system is to classify the total average precipitation for the basin, how much it runs off, how much water is transformed into evapotranspiration, as well as the amount of mm that infiltrates the aquifer, thus generating a water balance. which will later help to make decisions regarding the optimization of the resource for a more adequate use of an Integral Management of the Water Resource and later generate a Risk Management before possible operational droughts and reduce the consequences that these carry with themselves.

**Keywords:** Joint management, EvalHid, Temez, Hydrology, Simulation.

## 1. INTRODUCCIÓN

México es un país donde su clima se encuentra determinado por distintos factores dada su ubicación geográfica y los accidentes geográficos. La parte norte se localiza en una zona templada mientras que la parte sur del país se encuentra en la zona intertropical del globo terráqueo, es por ello que se encuentra a la misma latitud con los desiertos del Sahara y el Árabe.

La aridez es otro factor importante que influye de manera directa sobre la disponibilidad del recurso hídrico ya que dos terceras partes del territorio nacional se catalogan como áridas o semiáridas con registros de precipitaciones anuales alrededor de los 500 mm. Por otro lado, una tercera parte se considera como húmeda con precipitaciones anuales que superan los 2,000 mm al año. Las cuencas del país se encuentran organizadas en 37 regiones hidrológicas (RH), que para efectos de administración se agrupan en 13 regiones hidrológico-administrativas (RHA).

En el caso de la administración del agua en México se tienen registros por parte de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) donde se indican los volúmenes concesionados para los distintos sectores en México como se puede apreciar en la Tabla 1, donde se constata que el sector agrícola y el abastecimiento público urbano son los que más recurso hídrico necesitan para realizar sus actividades del día a día.

*Tabla 1 Volúmenes concesionados en México (Comisión Nacional del Agua, 2018)*

Clave	Rubro de clasificación del REPGA	Volumen Concesionado (hm <sup>3</sup> )
A	Agrícola (inscrito + pendiente)	59,621
B	Agroindustrial	3.81
C	Doméstico	38
D	Acuacultura	1,159
E	Servicios	1,600
F1	Industrial	2,663
F2	Termoeléctricas	4,147
G	Pecuario	218
H	Público Urbano	12,591
I	Múltiples	5,800
K	Comercio	0.08
L	Otro	0.59
	Subtotal consuntivo	87,842
J	Hidroeléctricas	183,066
N	Conservación Ecológica	9.46
	Subtotal no consuntivo	183,076

En virtud de lo anterior, la seguridad alimentaria nacional es un tema prioritario para el gobierno de México, por lo que frente a las sequías, es necesario siempre tomar medidas de política social, económica y fiscal, entre ellas garantizar el abasto de alimentos en el país, potenciar las capacidades productivas del sector rural y definir los cupos de importación que se requieran para asegurar la disponibilidad de granos básicos en todo el territorio nacional, en particular de frijol y de maíz blanco para consumo humano (Comisión Nacional del Agua, 2018).

Las sequías se han presentado de manera recurrente en México. En las últimas dos décadas, muchos Estados del país han experimentado episodios de sequía con impactos severos, de manera particular en 2011 cuando se registró la peor sequía desde 1941 y casi todo el territorio nacional padeció en algún grado este fenómeno meteorológico.

Como se mencionó anteriormente, México presenta en la mayoría de su territorio características áridas, lo que ha provocado grandes problemas de escasez del recurso hídrico y de forma adicional el cambio climático puede agravar la situación en futuros escenarios. Es por ello que se han venido realizando estrategias por parte del gobierno para mitigar estos efectos ocasionados por los fenómenos naturales meteorológicos mediante programas e incentivos para la disminución de los estragos ocasionados, los cuales se verán a detalle en el apartado 2.3. de este documento.

Con base en las acciones y planes estratégicos que se vienen realizando en países como Estados Unidos, China y España, que por su ubicación geográfica y climas extremos se han visto en la necesidad de investigar y estudiar este fenómeno de las sequías de manera puntual y para el caso de España quienes generalmente han estado inmersos en problemáticas de escasez del agua tienen ya una experiencia bastante robusta y una tecnología de punta como lo podremos apreciar en el apartado 2.5 donde se explican a detalle las herramientas de cómputo que se utilizará para el estudio de la zona. Con base en la experiencia con que cuenta México en el tema y con el análisis de las acciones que se vienen desarrollando en otros países es que podremos darle un enfoque de aplicación a este proyecto de investigación.

Finalmente la metodología a aplicar a la zona de estudio será la descrita en el apartado 6 donde en conjunto con una serie de muestreos de pozos en campo y con la información recopilada de estaciones climáticas e hidrométricas se podrán generar modelaciones matemáticas para generar reglas de operación para el sistema de recursos hídricos (SRH) de la cuenca del Río Ángulo, garantizando un uso óptimo de la infraestructura hidráulica existente y del recurso hídrico ante el evento de una sequía en sus distintas fases de severidad, actuando así de forma anticipada y no de manera reactiva que es como se ha venido realizando a lo largo de los años en México.



## 2. MARCO TEÓRICO

### 2.1. SEQUÍAS Y SUS CLASIFICACIONES

Las sequías son fenómenos temporales, a diferencia de la aridez que se restringe a las regiones con escasa precipitación y constituye una característica permanente del clima, como es el caso de las regiones desérticas. Por otra parte, las sequías son un peligro insidioso de la naturaleza (Servín, 2005).

Este término tiene variantes en su definición; sin embargo, todas tienen en común un punto inicial, que es el déficit de agua en forma de precipitación lo que origina una escasez de agua que consecuentemente imposibilita realizar determinadas actividades de los agricultores, logrando así un adecuado desarrollo de los ecosistemas entre otras. Por lo tanto, se debe atribuir a las sequías una condición de media a largo plazo la cual debe tener un equilibrio entre la precipitación y la evapotranspiración en un determinado lugar.

Otros factores de suma importancia son el viento, la temperatura y la humedad relativa que con el paso del tiempo pueden agravar la severidad de dichos fenómenos. Es entonces que surge la necesidad de conocer las causas que determinan su naturaleza con la finalidad de continuar con robustos estudios los cuales permitan estimar la periodicidad de las sequías.

Con base en los parámetros anteriormente mencionados es que se tienen dos clasificaciones de sequías; la sequía conceptual y la sequía operacional. Como definición de sequía operacional: son todas aquellas que identifican el principio, el final y el grado de severidad de la misma. Desde el punto de vista disciplinario, las sequías pueden clasificarse en meteorológica, hidrológica, agrícola y socioeconómica (Servín, 2005).

En un primer acercamiento podemos tener las siguientes definiciones;

- I. La sequía meteorológica se caracteriza por una ausencia prolongada, un déficit marcado o una débil distribución de precipitaciones con relación a la considerada como normal, y puede producir serios desbalances hidrológicos.
- II. La sequía agrícola es ocasionada por un déficit marcado y permanente de lluvia que reduce significativamente la producción agrícola con relación a la considerada como normal o a los valores esperados para una región dada.
- III. La sequía hidrológica hace referencia a una deficiencia en el caudal o volumen de aguas superficiales o subterráneas (ríos, embalses, acuíferos, lagos, etc.) con respecto a los niveles considerados como normales.
- IV. La sequía socioeconomía se produce cuando la disponibilidad de agua disminuye hasta el punto de producir daños ya sean económicos o sociales en las zonas afectadas por la escasez de lluvia. Este tipo de sequía está directamente relacionada con los tres tipos anteriormente

definidos, es decir está asociada con un bien económico que sufrió los impactos en la sequía meteorológica, agrícola e hidrológica.

Los daños derivados de las sequías comprenden impactos directos a los sistemas sociales, tales como; hambrunas, migración, abandono de tierras por la falta de agua para sus riegos, y pérdidas de cultivos y ganado, así como reducción de la disponibilidad del agua para uso doméstico e industrial, o para la generación de energía. También induce condiciones propicias para incendios forestales, alteraciones en la distribución de especies, pérdida de biodiversidad, e incluso, aumento en conflictos sociales y políticos. Frecuentemente, factores como la pobreza, el manejo inadecuado de los recursos naturales, una mala planeación urbana, falta de gobernanza y otros elementos relacionados a socioeconomía vulnerable contribuyen a que la sequía se convierta en desastre (Vidaurri, 2017).

Para el desarrollo de este trabajo a nivel local, es necesario conocer y entender cómo es que se ha enfrentado este fenómeno en otros países, así como tener en cuenta las acciones que se han venido manejando a nivel nacional para tener una metodología idónea a nivel local y con buenos resultados.

## 2.2. DAÑOS OCASIONADOS POR LAS SEQUÍAS EN MÉXICO

Uno de los sectores económicos más afectados por las sequías en el país, es el agrícola. Los efectos de las sequías en la agricultura son de diversos grados, según su periodicidad e intensidad pueden alcanzar desde daños patrimoniales al productor y a la economía familiar por pérdida parcial o total de la inversión y del ingreso separado, hasta daños a la economía regional y nacional por la interrupción del ciclo productivo, reducción del ingreso, desocupación productiva, desabasto de alimentos, pérdida del nivel de bienestar, desarraigo y migración (AGROASEMEX, 2006).

Los daños secundarios sobre la agricultura derivados de las sequías se relacionan con altas temperaturas, las cuales pueden causar incendios forestales y la aceleración de la erosión de los suelos. La falta de humedad en las plantas aumenta la materia orgánica potencialmente combustible y la sola presencia de una pequeña llama de fuego (natural o intencional) hace que se inicie un incendio forestal. Una vez consumida por el fuego la capa vegetal, el suelo queda desprotegido ante los agentes climáticos como son el viento o la lluvia, acelerando el proceso de erosión. Por otra parte, las ondas de calor pueden causar la muerte por deshidratación de seres humanos, sobre todo niños y ancianos, además, son motivo para que aumenten considerablemente las enfermedades gastrointestinales (CENAPRED, 2001).

Los datos que muestra en sus publicaciones el CENAPRED indican que entre el periodo de 1979 y 1988 el estado de Coahuila se vio afectado por 10 años de sequías, en segundo lugar, con más afectaciones se encontró Guanajuato con 10 años de ocurrencia, luego Durango y Zacatecas con 9 años. En la Tabla 2, se pueden contrastar las pérdidas convertidas en pesos.

Para el periodo de 1990 al 2000 se tienen registros de otras sequías que produjeron pérdidas devastadoras en distintos Estados. Para el año de 1994, fallecieron 54 personas por deshidratación en Chihuahua, se reportó la muerte de 20 mil cabezas de ganado en Baja California Sur y pérdidas por alrededor de 100 millones de pesos en la agricultura para el estado de Guerrero, por otro lado, Tlaxcala se vio afectado con un total de 5,000 ha de cultivos y Chiapas con 12 mil ha, recordando que este último Estado es el que cuenta históricamente con un mayor índice de precipitación.

*Tabla 2 Afectaciones por sequías durante 1979 y 1988 en México (CENAPRED, 2001)*

ESTADO	HECTÁREAS AFECTADAS	COSTO DE PÉRDIDAS EN MILLONES DE PESOS	AÑOS DE OCURRENCIA
Coahuila	260	20	10
Durango	1,287	66	9
Guanajuato	4,525	234	10
Guerrero	741	32	8
Jalisco	1,973	175	7
Nuevo León	397	40	8
Querétaro	507	29	8
Tamaulipas	1,116	47	8
Zacatecas	2,627	150	9
Otros	6,979	419	-
Total	20,412	1,212	-

Para el caso de Chihuahua, la mayoría de las organizaciones sociales solicitaban al gobierno la declaración de zona de desastre con la finalidad de iniciar con los programas de emergencia y obtener ayudas a la población ya que se situaban en su cuarto año consecutivo de sequía. El sector ganadero se redujo a un 50% y las pérdidas estatales se centraron en 600 millones de pesos, consecuentemente y a raíz del déficit de agua la población rural se vio en la necesidad de emigrar a las grandes ciudades y a los estados vecinos de Estados Unidos.

Mientras que para el mismo año 2000, los principales Estados que resintieron los efectos de las sequías de la década anterior fueron Aguascalientes, Guanajuato y Coahuila, por ello el Fondo de Desastres Naturales (FONDEN) destinó alrededor de 570 millones de pesos para aminorar los impactos relacionados con las sequías de ese mismo año como se puede apreciar en la Tabla 3.

*Tabla 3 Daños totales por sequías durante el año 2000 (CENAPRED, 2018)*

ESTADO	FONDO (MILLONES DE PESOS)
Sonora	56.08
Durango	45

Aguascalientes	25.112
Chihuahua	120
Nuevo León	51.825
San Luis Potosí	16.28
Sinaloa	53.441
Zacatecas	42.278
Coahuila	62
Guanajuato	73.994
Querétaro	10.86
Jalisco	-
Tamaulipas	-
RECURSOS NO AUTORIZADOS	
Querétaro	3.33
Michoacán	9.32
Total	569.52

Durante el año 2001, las pérdidas totales por estragos de sequía alcanzaron los 254 millones de pesos en el territorio mexicano donde los estados con mayor afectación fueron Aguascalientes y Chihuahua alcanzando un nivel crítico en el lapso de mayo-junio. Para Aguascalientes el FONDEN destinó 13.5 millones de pesos utilizados en la perforación de pozos e infraestructura de agua potable en beneficio de alrededor de 3 mil habitantes, 14 mil agricultores de temporal y 2,500 ganaderos. Mientras que para Chihuahua se destinaron 160 millones de pesos utilizados en perforaciones de pozos y conexiones a la red de agua potable.

En el transcurso del 2002 las incidencias por el fenómeno extremo supero en un 41% las pérdidas registradas en el año de 2001, con un total que ascendió a los 359 millones de pesos, donde los estados con mayor afectación fueron Sonora, Sinaloa, Tlaxcala, Veracruz y San Luis Potosí. Para esta ocasión el FONDEN destinó 370 millones de pesos.

*Tabla 4 Afectaciones por sequías para el año 2002 (CENAPRED, 2003)*

LOCALIZACIÓN	HECTÁREAS DAÑADAS	CABEZAS DE GANADO PÉRDIDAS	DAÑOS TOTALES (MILLONES DE PESOS)
Sonora	80,000	-	32
Veracruz	-	1,000	110
Tlaxcala	-	-	20
Coahuila	-	4,000	5.5
Zacatecas	-	6,000	100
Tamaulipas	-	400	1.8
Puebla	-	-	12.7
San Luis Potosí	-	-	12
Sinaloa	65,000	190	65

Durante el año de 2003 y 2004 las afectaciones por sequía generaron un total de 630 millones de pesos con un total de 806.4 ha afectadas y 1,500

cabezas de ganado pérdidas, donde los Estados más afectados fueron Veracruz, Sinaloa, Chihuahua, Hidalgo y Sonora para 2003. Por otro lado, en 2004 se destinaron 118 millones de pesos para Chihuahua puesto que el desabasto de agua se dio en 18 municipios mientras que Sinaloa requirió 29 millones de pesos para el sector ganadero que fue el más afectado.

Para el año 2006 las pérdidas rebasaron los 75 millones de pesos afectando 19 mil ha de distintos cultivos, dando como resultado un total de 8 mil agricultores perjudicados, siendo Puebla el estado donde se concentraron alrededor del 60% de los daños. Por otro lado, en el estado de Michoacán y Querétaro se presentaron 5,226 ha y 2,333 agricultores afectados, 2,524 ha y 1,057 agricultores afectados respectivamente.

Para el año 2007, seis estados fueron los que más se vieron afectados por las sequías donde el que se vio en un nivel crítico fue Oaxaca con un 52% de los daños principalmente en Maíz y con un aproximado de 4 mil ha.

En 2008 se presentaron pérdidas de distintos cultivos sumando entre ellos cerca de 100 mil ha donde el maíz fue el más afectado. Por su parte la SAGARPA declaró contingencia climática en Chiapas, Michoacán, Nayarit, Puebla, Yucatán y Zacatecas.

### 2.3. ANTECEDENTES DE GESTIÓN DEL RIESGO EN MÉXICO Y ESPAÑA

En México las actividades agrícola y ganadera necesitan grandes cantidades de agua para su desarrollo y al presentarse periodos muy prolongados de sequías las afectan directamente dejando con ello pérdidas económicas muy fuertes.

Consecuentemente, se ha abordado con anterioridad la gestión del riesgo en el tema de sequías y en particular se tiene el trabajo desarrollado por el M.C. Iván González Arreguín para la Región Hidrológica Balsas con la cuenca del Río Tepalcatepec (Arreguín, 2017). Es importante mencionar que dicho trabajo desarrolló la metodología que se va emplear en este proyecto de investigación con la cual se logró una adecuada gestión del riesgo para la zona y las tomas de decisiones internas del SRH como se puede visualizar en la Figura 1.

DEMANDA DEL 0-25%

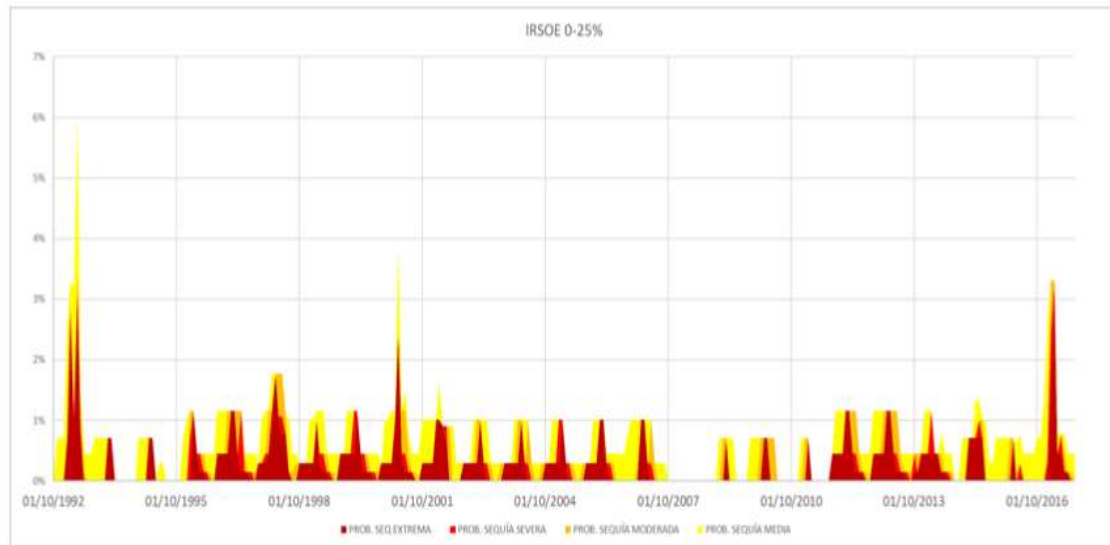


Figura 1. Porcentaje de área afectada para una demanda de 0 - 25% con IRSOE, (Arreguin, 2017).

Por otra parte, en España se tienen avances en lo correspondiente a la Gestión del Riesgo en sequías ya que, por su posición geográfica, España ha sido afectada a lo largo de la historia por periodos de sequía. Recientes estudios del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC) han demostrado que las sequías que padece este país son cada vez más intensas y de mayor duración, esto después de analizar la evolución del déficit hídrico entre 1945 y 2005.

En 2001, España señaló la necesidad de elaborar planes especiales de actuación en situación de alerta y eventual sequía por cada organismo de cuenca, donde se expusieran las reglas de explotación, medidas y restricciones del agua en condiciones de sequía, y también consideraron los planes de emergencia ante situaciones de sequía para abastecimientos urbanos que atiendan a más de 20,000 habitantes (PRONACOSE, 2014). A continuación, se muestran algunos de los trabajos desarrollados por esta nación en cuanto al tema de la gestión de hídrica y de las sequías.

La sequía, por tanto, no son una consecuencia directa del cambio climático. Al respecto, ya analizó y cuantificó mediante las rogativas *propluviam* para la península Ibérica como este riesgo se viene registrando desde la Edad Media, incluso en la fachada atlántica y cantábrica (Morote Seguido, 2020).

Ruiz-Ortiz et al., (2019) realizó la caracterización del sistema hidrológico de la cuenca del río Barbate y describió los componentes y los recursos hídricos superficiales y subterráneos, las demandas actuales y futuras y las infraestructuras hidráulicas existentes. Por ello, mediante el reconocimiento in situ de la cuenca, obtuvieron amplias bases de datos relacionadas con la gestión de los recursos hídricos.



Avilés et al., (2016) comparó los modelos basados en la cadena de Markov (MC) y en la red bayesiana (BN), en la previsión de sequías utilizando un índice de sequía respecto a su capacidad para caracterizar diferentes estados de gravedad de la sequía.

## 2.4. MODELOS Y HERRAMIENTAS A UTILIZAR

Cuando se necesita trabajar con modelos y herramientas matemáticas se debe tener en consideración una serie de criterios para decidir cuál de ellos es el apropiado. Uno de esos criterios es conocer la disponibilidad de softwares con los que podemos contar, si se tienen las licencias pertinentes, la cantidad de información con la que se cuenta para introducir al programa, la cantidad de parámetros que el modelo necesita para generar resultados de calidad, ya que existe una amplia variedad de modelos de lluvia-escorrentía y estos criterios nos pueden servir para trabajar con uno u otro.

Generalmente, las modelaciones siguen un proceso y llegan a un mismo punto como se puede observar en la Figura 2, para tener aún más claro el proceso que se sigue se enunciarán a continuación:

1. Definición del problema y sus objetivos
2. Definición de la teoría que gobierna el problema
3. Descripción de la situación física en términos matemáticos
4. Solución matemática del modelo.
5. Comparación del modelo con la situación real.
6. Estudio de las limitaciones del modelo.
7. Aplicación del modelo e interpretación de los resultados que ofrece.

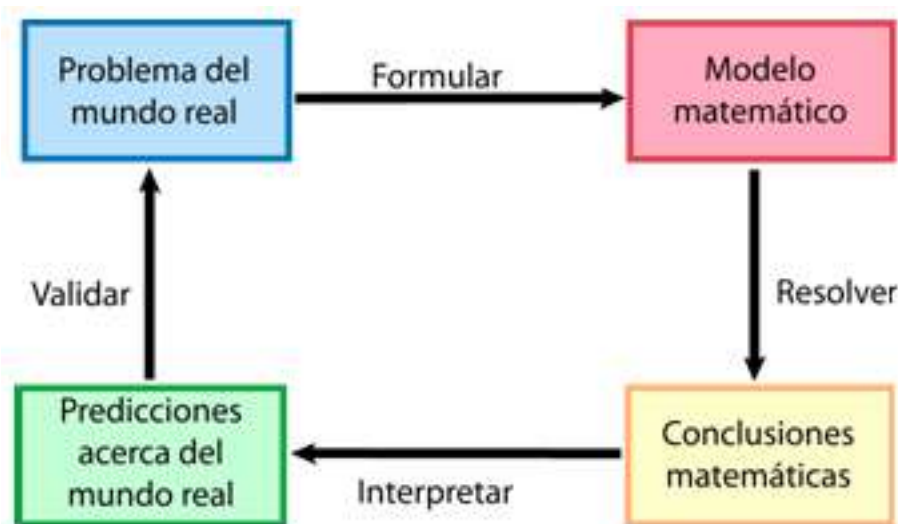


Figura 2. Proceso de las modelaciones matemáticas Brito-Vallinal et al., (2011).

AQUATOOL+ es un entorno de trabajo para el desarrollo y análisis de sistemas de ayuda a la decisión en planificación y gestión de cuencas. El contenido del programa es una serie de fichas interactivas que permiten la edición de los datos necesarios para el análisis de alternativas de gestión de los recursos hídricos de cuencas hidrográficas. Como entorno de trabajo

proporciona acceso directo a otros programas que realizan funciones específicas relacionadas con el análisis de la gestión de una cuenca. Todos estos programas son integrados y coordinados con este interface haciendo que el usuario pueda manejarlos todos sin notar que está cambiando de programa (Solera et al., 2015).

Esta interfaz cuenta con modelos de simulación los cuales están enfocados a tareas muy específicas que serán descritas a continuación;

#### 2.4.1. EVALHID

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. El módulo consta de varios tipos de modelos que se pueden escoger en función de los datos disponibles, la complejidad de la cuenca y la práctica del usuario en el desarrollo y calibración de modelos hidrológicos. Todos los modelos disponibles son del tipo agregado con aplicación semidistribuida (Paredes et al., 2017)

*Modelo de Témex.* Teniendo en cuenta que las dependencias en México no tienen un sistema automatizado para la recolección y actualización de datos, es que se vuelve un tanto compleja la accesibilidad a la información con que se puede contar para ingresar a los modelos, por ello es que se optó en trabajar con este modelo ya que solo necesita 4 parámetros.

La herramienta para la evaluación de los recursos hídricos servirá para desarrollar el modelo de precipitación-escorrentía (MPE). El intervalo más usado para las series temporales es el mensual; sin embargo, el programa tiene intervalos horarios, diarios, mensuales y anuales. El modelo contempla el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, 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, la cual se encuentra saturada y funciona como un almacenamiento subterráneo que desagua a la red de drenaje superficial.

El balance de humedad que realiza el modelo está constituido por el flujo entrante de precipitación ( $P_i$ ), el cual se reparte entre una serie de flujos salientes, de flujos intermedios y de almacenamientos intermedios. Los distintos componentes de flujos y almacenamientos se observan en la Figura 3.



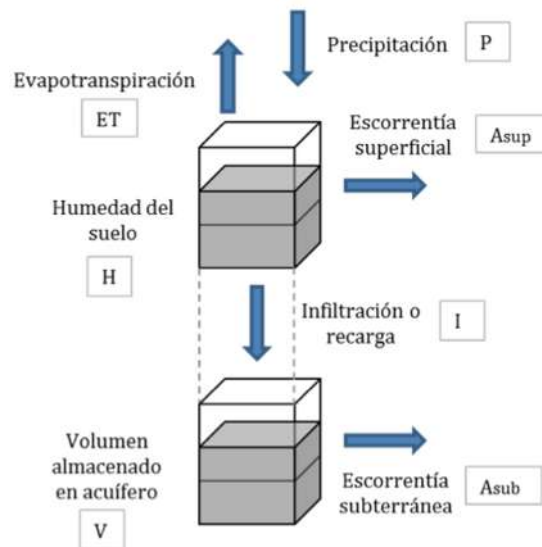


Figura 3. Diagrama de flujos y almacenamiento del modelo Témez (Paredes et al., 2017).

- Flujos de entrada: la precipitación (P)
- Flujos de salida: la evapotranspiración real (E), la aportación superficial (Asup) y la aportación de origen subterráneo (Asub)
- 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 (Asup). Este flujo superficial se evacua a través del cauce dentro del periodo presente de simulación. Parte del agua almacenada en la zona inferior o acuífero desagua en el intervalo de tiempo presente (Asubt) y la otra parte permanece dicho almacenamiento subterráneo para salir en meses posteriores.
- La evapotranspiración real (Et) 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 ( $H_{maxt}$ ).
- Desarrollo de las ecuaciones de estado del modelo, ecuaciones que regulan los procesos de transferencia hídrica, y del resto del ciclo hidrológico (Témez, 1977).
- Excedente (T)
- 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 ( $R_t$ ).

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

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

Donde:

$$\delta = H_{max} - H_{t-1} + EPT_t$$

$$P_0 = C(H_{max} - H_{t-1})$$

Siendo:

- $H_{max}$ , la capacidad máxima de almacenamiento del suelo (mm), que depende de las características del suelo y la vegetación donde tiene lugar la evapotranspiración. El valor de  $H_{max}$  aumenta conforme lo hacen aquellos factores que facilitan la retención de agua en el suelo y el espesor del mismo que puede ser drenado por evapotranspiración.
- $H_{t-1}$ , el almacenamiento de agua en el suelo (mm) en el instante  $t-1$ .
- $ETP_t$ , 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 define el inicio de la escorrentía antes de que se alcance el máximo de humedad en el suelo  $H_{max}$ .
- De este modo, cuando la cantidad de lluvia es inferior a  $P_{0t}$  toda el agua de lluvia se almacena como humedad del suelo, siendo susceptible de convertirse en evapotranspiración, y el excedente total es nulo. A partir del valor de  $P_{0t}$ , la precipitación incrementa simultáneamente el excedente y la componente de humedad del suelo. Tal y como se observa en la figura 5, la curva que expresa los excedentes. No es lineal, parte de 0 para  $P=P_0$  y tiende a  $P - \delta$  para lluvias altas.
- Almacenamiento superficial e infiltración una vez estimado el excedente ( $T_t$ ), la humedad en el suelo al final de cada mes se obtiene mediante la siguiente expresión:

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

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

$$H_t = \max \left\{ H_{t-1} + P_t - T_t - ETP_t, 0 \right\}$$

- La infiltración al acuífero es función del excedente y del parámetro denominado infiltración máxima ( $I_{max}$ ), que expresa la máxima cantidad de agua que puede infiltrarse en el terreno en un mes, a través de la siguiente expresión empírica:

$$I_t = I_{max_t} \cdot \frac{T_t}{T_t + I_{max_t}}$$

- La parte del excedente que no infiltra al acuífero se convierte en escorrentía superficial al final del mes "t", según la siguiente expresión:

$$A_{sup_t} = T_t - I_t$$

- Para simular el comportamiento del acuífero se plantea el modelo unicelular, el cual está basado en la función exponencial que representa la curva de agotamiento de un manantial. La variable de estado es el volumen almacenado en el acuífero ( $V_t$ ). El caudal cedido a la red superficial ( $Q_t$ ) se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_t = \alpha \cdot V_t$$

Donde

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

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

$$I_t - Q_t = \frac{dV_t}{dt}$$

Donde

$I(t)$  son las entradas al acuífero en el tiempo t (recargas)

$O(t)$  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 primera ecuación en la segunda y considerando  $R(t)$  como el caudal de recarga neta al acuífero en el tiempo  $t$  se tiene:

$$R_t - \alpha \cdot V_t = \frac{dV_t}{dt}$$

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:

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

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

$$Q_t = Q_0 \cdot e^{-\alpha t}$$

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:

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

#### 2.4.2. AQUIVAL

AQUIVAL es un módulo incorporado al sistema soporte de decisión para la planificación y gestión de recursos hidráulicos incluyendo uso conjunto, llamado AQUATOL (Andreau et al., 1991), desarrollado en la Universidad Politécnica de Valencia (UPV) (España). Este módulo permite la integración de modelos de acuíferos previamente calibrados en la simulación de recursos hidráulicos.

AQUIVAL ayuda al usuario en la modelización por el método de los autovalores (Sahuquillo, 1983), facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico. La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizados. Con ello se puede incluir el modelo de flujo subterráneo en un modelo complejo de gestión y simular muchas alternativas para largos periodos de simulación (Andreau y Sahuquillo, 1987).

El método de los autovalores da lugar a una solución explícita en el tiempo. La definición de “acciones elementales” y “parámetros de control”, contribuye a una mayor eficiencia computacional del método. Mediante las “acciones elementales se definen los tipos de acciones a las que se somete el acuífero, como pueden ser recarga por lluvia, bombeos, retornos de riego, etc. Con los “parámetros de control” se definen las variables cuyo seguimiento puede

ser interesante, ya sea a efectos de información o a efectos de influir en la gestión que se realice del acuífero.

Los datos hidrodinámicos necesarios para aplicar el método descrito necesitan de una calibración, que puede realizarse mediante modelos matemáticos en diferencias finitas o elementos finitos. Esto es debido a que el modelo de autovalores no es, en principio, eficaz en la obtención de esta calibración.

Una de las principales ventajas de la utilización de AQUIVAL, es que se pueden usar sus resultados, ya que crea un conjunto de archivos con el formato adecuado para que el programa "SIMGES" pueda leerlo (Solera, 2017).

### 2.4.3. SIMGES

Para resolver el problema de la gestión del sistema, el programa construye una red de flujo conservativa que resuelve mediante optimización. Este problema de optimización se describe en el apartado 6.1 y 6.2.

Además, el programa realiza un proceso iterativo sobre el algoritmo de optimización para resolver flujos no lineales como la evaporación de embalses, y reglas de operación como los indicadores de alarma y el reparto del déficit entre "grupos isoprioritarios" (apartado 6.3).

Estrictamente hablando, al resolver la optimización de la red de flujo, el modelo en cada mes utiliza la siguiente función objetivo:

Minimizar:

$$TE + TR1 + TR2 + TR3 + TR4 + TR5 + TDC + TDN + TRA + TB$$

donde:

TE es un término debido a los embalses

TR1 es un término debido a los tramos de río tipo 1

TR2 es un término debido a los tramos de río tipo 2

TR3 es un término debido a los tramos de río tipo 3

TR4 es un término debido a los tramos de río tipo 4

TR5 es un término debido a los tramos de río tipo 5

TDC es un término debido a las demandas consuntivas

TDN es un término debido a las demandas no consuntivas

TRA es un término debido a las recargas artificiales

TBA es un término debido a los bombeos adicionales

Dada la configuración en la red interna que se origina para un elemento embalse, la contribución de estos a la función objetivo es:

$$T_E = \sum_{i=1}^{nemb} \left( \left( \sum_{j=1}^4 V_{ij} CE_{ij} \right) + P_i CV \right)$$

nemb, es el número de embalses

$V_i$ , es el volumen a final de mes en cada zona  $j$ ,  $j=1,2,3$  y  $4$ , del embalse  $i$ . La zona 1 es la zona de reserva, la 2 es la zona inferior, la 3 es la zona intermedia, y la 4 es la zona superior,

$P_i$ , son los vertidos (sueitas no controladas) del embalse  $i$

$CE_{ij}$ , es el costo ficticio asociado al volumen embalsado en la zona  $j$ , y viene dado por:

$$CE_{ij} = k_j + NP_i$$

donde:

$k_j$ , son valores preestablecidos (por defecto son:  $k_1=-1700$ ;  $k_2=-1100$ ;  $k_3=-1000$ ;  $k_4=700$ )

$NP_i$ , es el número de prioridad asignado al embalse

$CV$ , es el costo ficticio asociado al vertido (por defecto  $CV=2000$ )

Dada la configuración que se origina para un tramo de río tipo 1 en la red interna, se tiene que:

$$T_{Ri} = \sum_{i=1}^{ntr1} \left( D_i CD_i + (Q_i - Q_i^{\min}) \cdot CQ_i \right)$$

donde:

ntr1, es el número de tramos de río tipo 1

$Q_i$ , es el caudal que circula por el tramo de río  $i$ . Si se ha definido un caudal mínimo en el tramo de río, el valor de  $Q_i$  será el máximo entre el caudal que circula y el caudal mínimo definido. En consecuencia, un coste ficticio en un tramo de río no se suma al coste asociado al déficit sobre caudal mínimo.

$D_i$  es el déficit con respecto al caudal mínimo declarado:

$$D_i = \begin{cases} Q_i^{\min} - Q_i & \text{si } Q_i^{\min} > Q_i \\ 0 & \text{si } Q_i^{\min} \leq Q_i \end{cases}$$

$CD_i$ , es el costo ficticio asociado al déficit de caudal mínimo y viene dado por:

$$CD_i = KD - NP_i$$

donde:

$KD$ , es un valor constante (por defecto  $KD = 1700$ ) y

$NP_i$ , es el número de prioridad asignado al caudal mínimo en el tramo de río  $i$ .

$CQ_i$ , es el costo ficticio asociado al caudal que circula por el tramo de río  $i$ . Solo afecta al caudal por encima del caudal mínimo. Por defecto  $CQ_i=0$ . Si se declara de otra forma puede valer  $CQ_i=1$  (bypass) ó puede ser definido por el usuario. Para los tramos de río tipo 2 se tiene que:

$$T_{R2} = \sum_{i=1}^{ntr2} (D_i CD_i + DF_i CF_i + 1)$$

$ntr2$ , el número de tramos de río tipo 2  
 $D_i$  y  $CD_i$ , el mismo significado que en tramos de río tipo 1 y dados por las ecuaciones (6.5) y (6.6) respectivamente.

$DF_i$ , es el posible déficit de filtraciones, dado por:

$$DF_i = \begin{cases} FILC - QENT & \text{si } FILC > QENT \\ 0 & \text{si } FILC \leq QENT \end{cases}$$

donde:

$FILC$ , son las filtraciones calculadas según la ecuación

$QENT$ , es el caudal de entrada al tramo de río.

$CF_i$ , es el costo asociado a  $DF_i$  (por defecto  $CF_i=2100$ )

Para las conducciones de tipo 3, de forma similar se tiene que la fórmula estricta, dado el esquema generado en la red interna es:

$$T_{R3} = \sum_{i=1}^{ntr3} (D_i CD_i + DF_i CF_i + 1)$$

siendo:

$ntr3$  el número de tramos de río tipo 3, pero su contribución en la última iteración es:

$$T_{R3} = \sum_{i=1}^{ntr3} (D_i CD_i + 1)$$

pues  $DF_i$  se anula.  $DF_i$  es en este caso la diferencia entre la posible detracción  $DET$  calculada por la simulación del acuífero conectado con el río y el caudal entrante, caso de que este no sea suficiente para que ocurra:

$$DF_i = \begin{cases} DET - QENT & \text{si } DET > QENT \\ 0 & \text{si } DET \leq QENT \end{cases}$$

donde:

$CF_i$  tiene asignado un valor de  $CF_i=2100$ .

Dada la configuración que se origina para una conducción de tipo 4 en la red interna, su contribución es idéntica a la de las conducciones de tipo 1:

$$T_{R4} = \sum_{i=1}^{ntr4} (D_i CD_i + Q_i CQ_i)$$

donde:

$ntr4$  es el número de conducciones de tipo 4

$Q_i$  es el caudal que circula por la conducción de tipo 4,  $i$

$D_i$  es el déficit con respecto al caudal mínimo del mes:

$$D_i = \begin{cases} Q_i^{min} - Q_i & \text{si } Q_i^{max} > Q_i \\ 0 & \text{si } Q_i^{min} \leq Q_i \end{cases}$$

$CD_i$  es el costo ficticio asociado al déficit de caudal mínimo y viene dado por:

$$CD_i = KD - NP_i$$

Donde:

$KD$  es un valor constante (por defecto  $KD = 2000$ ) y  $NP_i$  es el número de prioridad asignado al caudal mínimo en la conducción de tipo 4,  $i$ .

$CQ_i$  es el costo ficticio asociado al caudal que circula por la conducción  $i$ . Por defecto  $CQ_i = 0$ . Si se declara de otra forma puede valer

$CQ_i = 1$  ó puede ser definido por el usuario.

Para las conducciones de tipo 5 se tiene que:

$$T_{R5} = \sum_{i=1}^{ntr5} DF_i CF5_i$$

siendo:

$ntr5$ , el número de conducciones de tipo 5

$DF_i$  es el posible déficit sobre el máximo caudal que puede circular por la conducción dado por,

$$DF_i = QINT - QENT$$

donde:

$QINT$  es el caudal que debe circular por la conducción obtenido a partir de la integración, en el mes dado, de los caudales instantáneos como función de la diferencia de cota entre los extremos de la conducción.



QENT es el caudal de entrada en la conducción  
CF5i es el costo asociado a DF<sub>i</sub> (por defecto CF<sub>i</sub>=1800)

La fórmula estricta, dada la configuración en la red interna generada por los elementos de demanda consuntiva es:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left( D_i CK + \sum_{t=1}^{ntoi} \left( S_{it} (CT'_{it} + 1) - DS_{it} CT'_{it} \right) \right)$$

donde:

ndc es el número de demandas consuntivas  
D<sub>i</sub> es el déficit sobre la demanda total de la zona i en el mes en cuestión  
CK es un costo ficticio constante asociado a los déficits de las zonas de demanda (CK=750 por defecto)  
ntoi es el número de tomas de la demanda i  
S<sub>it</sub> es el suministro bruto a la toma t de la demanda i.  
DS<sub>it</sub> es el déficit al suministro bruto mínimo calculado por el modelo.

De forma que el suministro neto a la toma es:

$$SN_{it} = S_{it} - DS_{it}$$

Los términos S<sub>it</sub> y DS<sub>it</sub> tienen sentido a lo largo de las iteraciones, pero en la última se tiene que DS<sub>it</sub>=0 y SN<sub>it</sub>=S<sub>it</sub>, con lo que la fórmula definitiva de la contribución a la función objetivo es:

$$T_{DC} = \sum_{i=1}^{ndc} \left( D_i CK + \sum_{t=1}^{ntoi} SN_{it} CT'_{it} \right)$$

donde:

$$CT'_{it} = CT_{it} + 1$$

$$CT_{it} = -CTC + (NP_{it} - 1) CDC$$

donde:

CTC es un valor constante, al igual que CDC (CTC=750, CDC=5, por defecto)  
NP<sub>it</sub> es el número de prioridad de la toma t de la demanda i.

La fórmula de la función objetivo de las demandas no consuntivas

$$T_{DN} = \sum_{i=1}^{ndnc} (DO_i CN_i + SO_i CS)$$

donde:

$ndnc$ , es el número de demandas no consuntivas

$DO_i$ , es el déficit con respecto al caudal objetivo  $QO_i$

$SO_i$ , es el superávit con respecto al caudal objetivo dado por (6.24).

$$QO_i - Q_i = \begin{cases} SO_i & \text{si } Q_i > QO_i \\ DO_i & \text{si } Q_i < QO_i \end{cases}$$

$CN_i$ , es el costo ficticio asociado al déficit, dado por:

$$CN_i = CKN - (Np_i - 1) \times CDN$$

Donde:

$Np_i$ , es el número de prioridad asignado a la demanda no consuntiva.

$CKN$  y  $CDN$  son valores constantes ( $CKN=1500$ ,  $CDN=5$ )

La función objetivo de los elementos de recarga está dada por:

$$T_{RA} = \sum_{i=1}^{nba} (QR_i CR)$$

donde:

$nba$ , es el número de bombeos adicionales

$QB_i$ , es el caudal bombeado por la instalación  $i$

$CB_i$ , es el costo ficticio asociado a la instalación  $i$ .

Viene dado por:

$$CB_i = CTC + CK - (NP_i - 0,5) \times CDC$$

$CTC$ ,  $CK$  y  $CDC$  son los mismos consuntivas.

$NP_i$  es el número de prioridad correspondiente al grupo isoprioritario hasta el cual se quiere suministrar (Por ejemplo, si  $NP_i$  es 4, el  $BAD$  suministrará a los grupos 1 a 4).

#### 2.4.4. MASHWIN

El modelo MASWIN combina; para la realización del análisis de las series temporales de aportaciones correspondientes a un sistema hidráulico; una modelación periódica estocástica mensual mediante una modelación autorregresiva y de media móvil (ARMA) multivariada, con una desagregación espacial mensual por el modelo condensado de Lane. Además el modelo realiza una gran variedad de test de ajuste para todas las fases del análisis (Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente, 2007)

El modelo calcula tres grupos de estadísticos: a) estadísticos básicos, conformados por las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo de las series de caudales propiamente dichas, b) estadísticos de sequía, conformados por las medias, máximos y desviaciones típicas de la duración, la intensidad y la magnitud de las sequías para distintos umbrales; y c) estadísticos de almacenamiento, que consisten en las capacidades de embalse de las series de caudales para diferentes umbrales, así como el rango ajustado, el rango ajustado reescalado y el coeficiente de Hurst para cada serie de caudales.

### Estadísticos básicos

Cuando se trata de series mensuales, se calculan las medias, las desviaciones típicas y los coeficientes de sesgo para cada uno de los 12 meses del año, de acuerdo con las ecuaciones siguientes:

$$\bar{Q}_\tau = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,\tau}}{N} \quad s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^2}{N-1}} \quad g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)s_\tau^3}$$

Donde:

$Q_\tau$ , Media mensual de los caudales del mes  $\tau$ .

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

$N$ : Número total de años.

$s_\tau$ , Desviación típica mensual del mes  $\tau$ .

$g_\tau$ , Coeficiente de sesgo mensual del mes  $\tau$ .

Si la modelación se hace sobre series anuales, dichos estadísticos se calculan según las ecuaciones de cada uno de ellos habrá un solo valor para cada serie de caudales.

$$\bar{Q} = \frac{\sum_{v=1}^N Q_v}{N} \quad s = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_v - \bar{Q})^2}{N-1}} \quad g = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_v - \bar{Q})^3}{(N-1)(N-2)s^3}$$

Donde:

$Q$  Media anual de la serie de caudales.

$Q_v$ , Caudal del año  $v$  ( $v=1, \dots, N$ ).

$N$ , Número total de años.

$S$ , Desviación típica anual de la serie de caudales. Coeficiente de sesgo anual de la serie de caudales.

$g$ , Coeficiente de sesgo anual de la serie de caudales.

### Estadísticos de sequía

Para describir los estadísticos correspondientes a esta categoría, conviene definir previamente algunos conceptos que se emplean en la determinación de dichos estadísticos. El programa forma la serie de sequías que corresponde a la serie de caudales de cada estación para cada umbral, y le calcula las medias, máximos y desviaciones típicas de duración, intensidad y magnitud.

$$\bar{\gamma} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \gamma_i, \quad \gamma_{\text{máx}} = \text{Máx}(\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_n), \quad s_{\gamma} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\gamma_i - \bar{\gamma})^2}{n-1}}$$

Donde n es el número de sequías para una estación y un umbral dados.

Estadísticos de almacenamiento

Dentro de este grupo se calcula la capacidad de embalse correspondiente a un umbral dado (o varios), necesaria para almacenar el volumen de agua requerido para abastecer cien por cien una demanda constante equivalente al valor del umbral. Esto se hace mediante el algoritmo de los Picos Secuenciales, según el cual, la capacidad de embalse es el máximo de los valores calculados con la ecuación siguiente:

$$S_t = \begin{cases} U_t - Q_t + S_{t-1}, & \text{si } S_t > 0 \\ 0, & \text{si } S_t < 0 \end{cases} \quad \text{para } t = 1, 2, 3, \dots, 2N$$

Donde:

$S_t$ , Volumen de embalse en el periodo t ( $S_0=0$ ).

$U_t$ , Umbral en el periodo t. Es constante, y no puede superar el valor del caudal medio de toda la serie.

$Q_t$ , Caudal en el periodo t. De N+1 a 2N la serie se repite, con el fin de tener en cuenta aquellos casos en los que la secuencia de caudales críticos (menores que el umbral) están al final de la serie.

N, Número de periodos (meses o años) de la serie.

#### 2.4.5. SIMRISK

El modelo SimRisk es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamiento tanto superficiales como subterráneos, de captación, de transporte, de utilización o consumo y de dispositivos de recarga artificial (Andreu et al., 2007)

La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Para

los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance, mientras que para los subsistemas subterráneos o acuíferos el flujo es simulado mediante modelos de celda, uní o pluricelulares, según convenga, o incluso mediante modelos distribuidos de flujo lineal. Se tiene asimismo en cuenta en la simulación las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

Para la obtención de estadísticos de riesgo el modelo SIMRISK precisa realizar un número elevado de simulaciones con un periodo de tiempo de longitud dada y múltiples series hidrológicas. En base a estas simulaciones confecciona índices estadísticos que evalúan la situación de riesgo hidrológico del sistema.

Otra característica de este modelo es la capacidad que da al usuario de asignar reducciones en el suministro, para facilitar el estudio alternativas de anticipación a situaciones de escasez de agua.

Dada una situación inicial del sistema, el modelo puede ser utilizado entre otras finalidades para:

- Determinar la probabilidad de fallo de una demanda, para periodos futuros.
- Determinar probabilidades de distintos niveles de fallo en una demanda.
- Determinar la probabilidad de estado de los embalses, para periodos futuros.
- Determinar la probabilidad de fallo en un caudal mínimo, para periodos futuros.
- Estudiar el efecto que distintos niveles de restricciones en las demandas tienen en dichas probabilidades de fallo futuro.

El programa SIMRISK funciona a partir de índices donde se evalúan las posibilidades que existen en las situaciones con riesgo a fallos que son los que se enuncian a continuación:

Índice de riesgo en demandas  
Índice de riesgo en embalses  
Índice de riesgo en caudales mínimos

#### 2.4.6. GESTAT

Es una herramienta computacional para la realización de la validación estadística de los datos que contienen las estaciones climáticas a utilizar para la cuenca del Río Ángulo, las pruebas básicas para definir estaciones principales y estaciones secundarias optimizando el tiempo invertido en esa fase del desarrollo de este proyecto de investigación.

Los métodos que están incluidos en GESTAT serán explicados más adelante en capítulos posteriores. Esta herramienta fue desarrollada por el M.C. Sergio Cazares durante sus estudios de posgrado en la Maestría en Ingeniería

de los Recursos Hídricos de la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo (Cazares, 2021)

### 3. OBJETIVOS

Generar un modelo de gestión hídrica que permita predecir y evaluar la sequía operativa, en la cuenca del río Angulo.

#### 3.1. OBJETIVOS PARTICULARES

- Caracterizar la zona de estudio, para conocer sus características hidrogeológicas, fisiográficas, geológicas, topográficas, edafológicas y geomorfológicas.
- Actualizar, calibrar y validar el modelo subterráneo de los acuíferos presentes en la cuenca que permita obtener su funcionamiento ante la presencia de acciones elementales y recarga del acuífero.
- Actualizar, calibrar y validar el modelo hidrológico lluvia-escorrentía que permita obtener series de escurrimiento superficial restituidos a régimen natural al introducir datos de precipitación mensual.
- Generar un modelo estocástico con múltiples series hidrológicas sintéticas que permita la evaluación de un gran número de opciones de escurrimientos con mismos parámetros estadísticos.
- Evaluar el riesgo de sequía operativa con base en series históricas que permitan implementar medidas de mitigación a futuro.

## 4. HIPOTESIS

Estimar la probabilidad de ocurrencia de sequías operativas mediante un modelo de Gestión Hídrica, permitirá lograr una correcta planificación de los recursos hídricos dentro de la cuenca del río Angulo.



## 5. JUSTIFICACIÓN

El agua es por naturaleza una fuente de vida por estar involucrado en la vida animal, vegetal y en el desarrollo de las civilizaciones, es común encontrarla en distintas fases del ciclo hidrológico, así como en cualquier lugar que funge como un depósito. Su importancia en el planeta Tierra es bastante ya que es necesaria para poder llevar a cabo reacciones físicas, biológicas y químicas, por ello que la encontramos en un estado sólido, gaseoso y líquido a través de la atmósfera, cavernas denominadas unidades hidrogeológicas, manglares, ríos, lagunas, arroyos, etc.

Es por ello que se puede decir que el agua también forma parte fundamental de la economía del país, puesto que México es una nación con bastante actividad agrícola y ganadera. Por ello es que el líquido vital se ha vuelto un tema central y de suma importancia entre los gestores, las instituciones públicas y privadas para definir el futuro de sus usos y garantizar una adecuada gestión integral del agua. Actualmente, el hablar de recursos hídricos es contemplar aspectos económicos, técnicos, culturales y sociales, lo cual está regulado mediante, normas y leyes que a su vez nos indican como es que ésta puede ser aprovechada y en que cantidades para un cierto periodo de tiempo.

En lo particular para México el tener una gestión integral del agua es un rubro complejo ya que teniendo en cuenta la diversidad y las extensiones territoriales del país con alrededor de 2 millones de km<sup>2</sup> y con una población total aproximada a los 128 millones de habitantes y con un amplio repertorio de climas los cuales van desde muy áridos hasta muy húmedos. El país cuenta con 51 ríos principales y su red hidrográfica comprende 633 mil kilómetros de longitud y 653 acuíferos según la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA).

Por otro lado, México geográficamente se encuentra en una región en la que los huracanes, tormentas y depresiones tropicales son habituales en el Golfo de México como en el Océano Pacífico, fenómenos naturales que pueden causar afectaciones relacionadas con el agua, tales como inundaciones, lo cual significa retos adicionales a la administración del agua ante los distintos eventos extremos que puedan presentarse y para cada uno de ellos contemplar los climas y los habitantes que a su vez estos serán quienes recientan todas las consecuencias de dichas eventualidades.

Pensando en garantizar el agua para futuras poblaciones y para todas nuestras actividades es que se debe tener un manejo cuidadoso y muy minucioso de cómo es que estamos utilizando el líquido vital y en que cantidades, sobre todo cuando se presentan fenómenos extremos como las sequías las cuales tienen todo un proceso de afectación que va desde la carencia de agua superficial hasta generar estragos económicos los cuales se ven reflejados en la baja productividad del campo agrícola y afectación interna a los nichos ecológicos de las distintas especies animales y vegetales.

Mediante el desarrollo del presente trabajo se pretende crear un modelo que permita implementar un sistema de alerta temprana ante las posibles

sequías que se presenten en la zona de estudio. Los resultados obtenidos mediante este modelo constituirán un estudio con base científica de la evaluación de la sequía operativa en la cuenca del Río Angulo con un alto nivel de certeza que aportará elementos para monitorear y predecir la sequía.

Consecuentemente, los beneficiados en primera instancia serán los usuarios del agua en la zona de estudio, a quienes les permitirá prever estos eventos y planear mejor el uso del agua, para fines urbanos, agrícolas y pecuarios. Como se analizó en el capítulo 2.2, las mayores afectaciones por eventos de sequía se han dado en los sectores agropecuarios y teniendo en cuenta que la cuenca del Río Angulo se sitúa en una zona meramente agrícola y ganadera es que este proyecto a desarrollar tiene una importante aplicación directa.

Finalmente, este trabajo fungirá como base para la toma de decisiones por parte de las autoridades competentes a la administración de los recursos hídricos, que les permita establecer los sistemas de advertencia temprana y las medidas de prevenciones necesarias ante un posible evento de sequía operativa.

## 6. METODOLOGÍA

El proceso propuesto a desarrollar este trabajo y sus fases podemos observarlas en la Figura 4, donde cada una de ellas se explicarán a detalle más adelante.

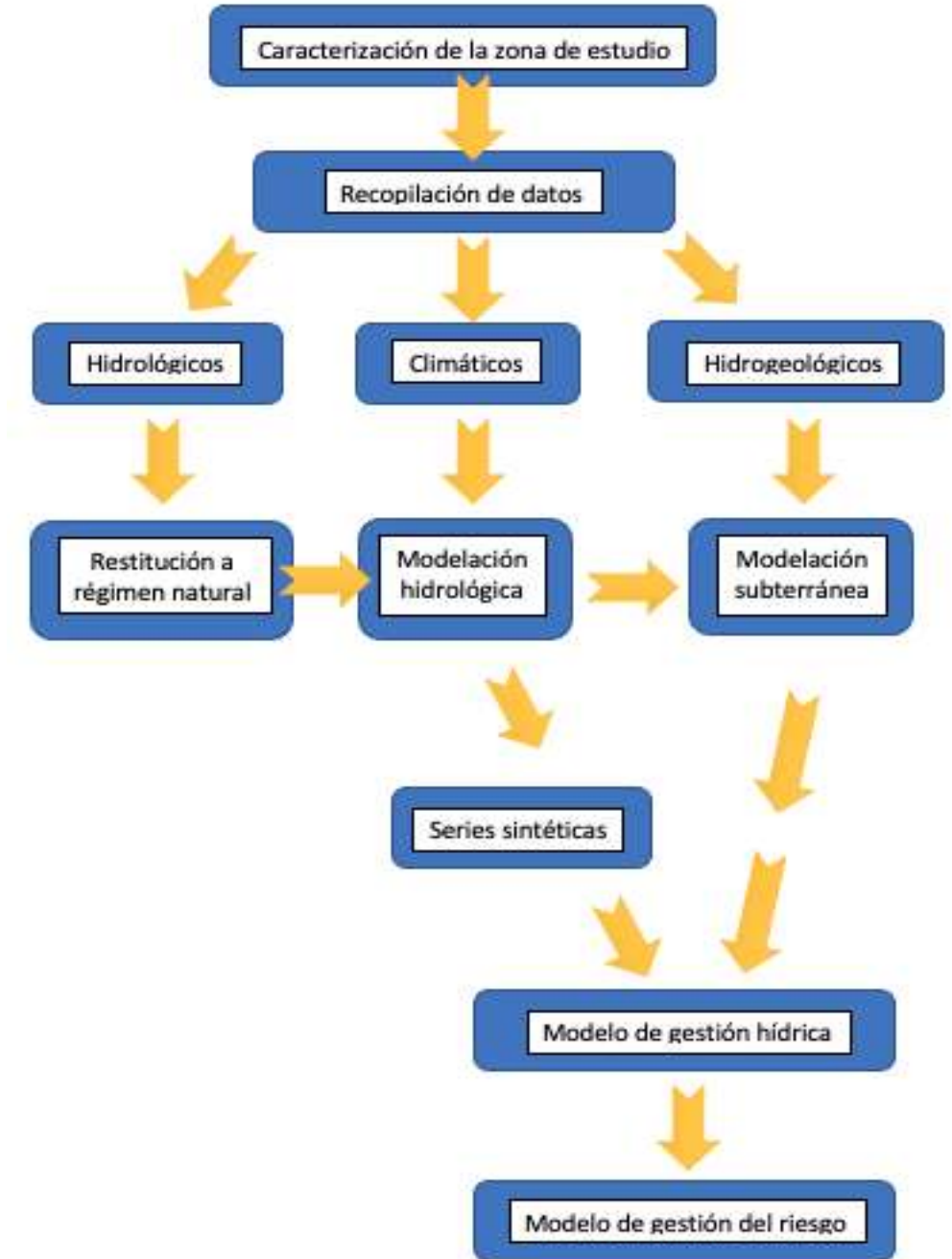


Figura 4. Esquema metodológico a desarrollar en este proyecto.

## 6.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Como punto de partida en esta investigación debemos conocer, identificar y delimitar nuestra zona de estudio, es por ello que comenzaremos con un análisis del sitio donde se origina la cuenca del Río Angulo y sus características, así como la superficie terrestre que logran abarcar los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad y Zacapu con sus respectivas características físicas y climáticas.

La caracterización de la zona se realizará con el apoyo de los sistemas de información geográfica (SIG) y el uso de modelos digitales de elevación (DEM) en su formato ráster y vectorial, proporcionados estos últimos por el Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) para crear mapas de usos de suelo, climatología, geología, delimitar los acuíferos, delimitar la cuenca, entre otros.

## 6.2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

En esta etapa de desarrollo es importante mencionar la existencia de dos tipos de datos a recopilar el primero de ellos es mediante informes y páginas administradas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) y el segundo grupo de datos necesarios para las modelaciones serán datos obtenidos a partir de mediciones en campo.

### 6.2.1. ESTACIONES CLIMATICAS

Primeramente, las estaciones por utilizar los conoceremos e identificaremos con la base de datos de clima computarizado (CLICOM). Nuestra herramienta CLICOM Estaciones permite hacer gráficas (ciclo anual y series de tiempo de temperaturas, precipitación, evaporación y unidades de calor) y descargarlas, así como los datos de las gráficas en texto. Como se muestra en la Sección de Ayuda, la interface de visualización de las gráficas se hace seleccionando primero un estado del país y luego una estación climática directamente del mapa, o bien se hace una búsqueda de una estación por su nombre. También se pueden seleccionar las estaciones con más y menos de 25 años de datos (Servicio Meteorológico Nacional, 2020).

Una vez obtenida la lista de estaciones, se seleccionan las estaciones principales procurando que estas cubran la superficie total de la cuenca. Para la selección se utiliza un método de discretización de acuerdo a distintos pesos en sus variables (cantidad de años con datos, datos recientes y porcentaje de vacíos).

### 6.2.2. ESTACIONES HIDROMETRICAS

Al hablar de este tipo de estaciones hacemos referencia a los caudales medidos en ríos, arroyos y la variación de volúmenes en las presas. La información de las estaciones hidrométricas se obtendrá del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) administrado por la CONAGUA.

Las estaciones seleccionadas son las ubicadas dentro del parteaguas de la cuenca del río Angulo, Dentro de estas estaciones, las principales son aquellas que estén registrando información de una corriente natural sobre el cauce principal de la cuenca. Por otro lado, las estaciones que registren información de canales u otras obras de regulación serán utilizadas para la restitución a régimen natural de las estaciones principales.

### 6.2.3. PIEZOMETRÍA DE LOS ACUÍFEROS Y VOLUMENES DE EXTRACCIÓN POR ACUÍFERO

Los niveles piezométricos medidos a partir de una visita a campo serán utilizados para la modelación matemática de cada uno de los acuíferos y para su correcta calibración de los mismos con el apoyo de una base de datos de niveles piezométricos históricos con que se cuenta. Para el caso de los volúmenes de extracción servirán para calibrar el modelo subterráneo y serán obtenidos a través del Registro Público de Derechos del Agua (REPDA).

### 6.2.4. DEMANDA URBANA

La modelación subterránea debe tomar en cuenta las extracciones por concepto de demanda urbana con lo cual se debe tener en cuenta cada uno de los caudales de los pozos que abastecen a todas aquellas poblaciones que se ubican dentro del parteaguas de la cuenca del río Angulo. Para realizar la siguiente tarea es necesario apoyarse de los SIG y nuevamente del INEGI para obtener el número de habitantes por localidades para posterior a ello generar una demanda futura mediante proyecciones con los métodos aritmético, exponencial, mínimos cuadrados y geométrico. Cuando esto suceda se debe seleccionar el método que mejor ajuste tenga.

#### I. 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 fórmulas siguientes:

$$P_f = P_a + IN$$

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 PD Y P(D-1)

## II. 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.

$$P_f = P_a (1 + r)^n$$

Donde,

P<sub>f</sub> = Población futura

P<sub>a</sub> = Población actual

r = Tasa de crecimiento

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

Donde,

P<sub>D</sub> = Población de cada decena

P<sub>(D-1)</sub> = Población de la decena anterior

n = Años transcurridos desde P<sub>D</sub> y P<sub>(D-1)</sub>

## III. Método de los mínimos cuadrados

Sustituyendo en la fórmula del método aritmético  $P_f = P_a + In$ , que es la función de regresión lineal, para la línea recta, donde tenemos las siguientes ecuaciones normales

$$\sum Y_o = a \sum X_o + nb$$

$$\sum X_o Y_o = a \sum X_o^2 + b \sum X_o$$

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

$$a = (n \sum X_o Y_o - \sum X_o \sum Y_o) / (n \sum X_o^2 - (\sum X_o)^2)$$

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

## IV. Método de la curva exponencial

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

$$a = P_a$$

$$b = (1 + r)$$

$$Y = P_f \quad t = N$$

$$\text{Se obtiene: } Y = a b^t$$

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

$$\sum \log Y_o = n \log a + \log \sum b \sum t$$

$$\sum t \log Y_o = \log a \sum t + \log b \sum t^2$$

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

$$\log b = (n \sum t \log Y_o - \sum t \sum \log Y_o) / (n \sum t^2 - \sum t^2)$$

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

#### 6.2.5. DEMANDA INDUSTRIAL

Los datos de la demanda industrial en la cuenca del río Angulo se obtienen de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) administrado por la CONAGUA. Datos que muestran los títulos de concesión, permisos de descarga y volúmenes concesionados.

#### 6.2.6. DEMANDA AGRÍCOLA

Las demandas de agua del sector agrícola, así como de los distintos planes de riego, se obtendrán de los registros en la base de datos del distrito de riego 087 "Mezquite-Rosario", así como de la base de datos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) al igual que en el caso de demandas agrícolas ya que la información de cada uno de los pozos de bombeo especifica el tipo de servicio que ofrece (Industrial, agrícola, urbano). Información que será utilizada en el modelo en conjunto de la gestión hídrica.

#### 6.2.7. PRESAS

La obtención de las características y funcionamiento del vaso de las presas dentro de la zona en estudio para conocer los volúmenes que llegan a ellas y que se almacenan y poder realizar la restitución a régimen natural, se realizará a través del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS) administrado por la CONAGUA.

### 6.3. ANÁLISIS Y VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LOS DATOS

Es sumamente importante realizar una validación de los datos a utilizar en los modelos, para ello se realizará una correlación espacial y temporal para cada

estación utilizada con la finalidad de determinar su independencia y su consistencia, una vez realizado esto podremos trabajar con sus datos.

### 6.3.1. LÍMITES DE ANDERSON

Lo primero que se debe validar es la independencia de las series de precipitación; es decir, probar que la precipitación es una variable aleatoria. Para esto se utiliza la prueba de Anderson, la cual consiste en elaborar un autocorrelograma para diferentes desfases temporales.

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.

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

Límites de Anderson

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

Autocorrelación

Dado que se pueden encontrar series de precipitación con datos erróneos o con datos de diferente naturaleza debido al cambio de equipos con los que se mide la precipitación, es importante determinar que las series con las que se trabajará si contienen la misma naturaleza en sus datos, para ello se revisa la consistencia mediante los métodos de Secuencias y de Helmert, cuando estos dos métodos arrojan en resultado negativo (no homogeneidad) se realizan pruebas más finas como los son  $t$  de Student y Cramer.

### 6.3.2. 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 de Helmert

6.3.3. 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 Cramer, que además es complementaria de la prueba t de Student. La prueba de Cramer se determina con la siguiente ecuación.

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

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

$$\tau_k = \frac{(\bar{X}_k - \bar{X})}{S}$$

Ecuación de Cramer

Donde,

- $n$  = Número de registros de toda la muestra
- $\bar{X}$  = Media de la muestra
- $S$  = Desviación estándar de la muestra
- $n_1$  = Número de registros de la submuestra
- $\bar{X}_k$  = Media de la submuestra
- $k$  = Índice posterior a la submuestra,  $k = n - n_1$
- $\tau_k$  = Parámetro relaciona medias muestrales con submuestrales

6.3.4. PRUEBA ESTADÍSTICA DE T-STUDENT

Cuando la causa probable de la pérdida de homogeneidad de la serie sea un cambio abrupto en la media, la prueba del estadístico t es muy útil. Si se considera una serie Q para  $i = 1, 2, \dots, n_i$ , del sitio j, la cual se divide en dos conjuntos de tamaño  $n_1 = n_2 = \frac{n_j}{2}$ , entonces, el estadístico de prueba se define con la expresión:

$$t_d = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2}{\left[ \frac{n_1 s_1^2 + n_2 s_2^2 \left( \frac{1}{n_1} + \frac{1}{n_2} \right)}{n_1 + n_2 - 2} \right]^{1/2}}$$

Donde

$X_1, S_1^2$  son la media y varianza de la primera parte del registro de tamaño  $n_1$ .

$X_2, S_2^2$  son la media y varianza de la segunda parte del registro de tamaño  $n_2$ .

El valor absoluto de  $t_d$  se compara con el valor de la distribución t de Student de dos colas, y con  $u = n_1 + n_2 - 2$  grados de libertad y para un nivel  $\alpha = 0.05$ .

Sí y solo si el valor absoluto de  $t_d$  es mayor que el de la distribución t de Student, se concluye que la diferencia entre las medias es evidencia de inconsistencia y por lo tanto la serie Q se considera no homogénea.

### 6.3.5. PRUEBA ESTADÍSTICA DE SECUENCIAS

La prueba de las secuencias es conocida como prueba básica general para detectar inconsistencias en las series climáticas, donde el procedimiento consiste en definir la mediana de la serie que se analiza, para lo cual los datos se ordenan según su magnitud, si el número de valores ( $n$ ) es impar, la mediana es el valor central; si  $n$  es par corresponde a la media aritmética de las dos magnitudes centrales. Con base en la mediana se marca en la serie original con A si el dato es mayor y con B si es menor: las secuencias o sucesiones ( $u$ ) de valores A o B son contabilizadas y se concluye que la serie es homogénea si  $u$  está en el intervalo que marca la tabulación. Si se obtiene un alto valor de  $u$  la inhomogeneidad se puede deber a un exceso de oscilación de la serie, en cambio si  $u$  es reducido puede haber tendencia o cambio en la media.

n	u	n	u	n	u	n	u
12	5 a 8	22	9 a 14	32	13 a 20	50	22 a 30
14	5 a 10	24	9 a 16	34	14 a 21	60	26 a 36
16	6 a 11	26	10 a 17	36	15 a 22	70	31 a 41
18	7 a 12	28	11 a 18	38	16 a 23	80	35 a 47
20	8 a 13	30	12 a 19	40	16 a 25	100	45 a 57

### 6.3.6. LLENADO DE DATOS EN PRECIPITACIÓN

Existen periodos temporales en los cuales no se realizaron los registros correspondientes por cuestiones de que los equipos de medición presentan fallas mecánicas o no se registran bien las cuales se traducen en incertidumbre de los registros y en ocasiones las estaciones dejan de registrar, 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.

$$\bar{Q}_\tau = \frac{\sum_{v=1}^N Q_{v,\tau}}{N} \quad s_\tau = \sqrt{\frac{\sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^2}{N-1}} \quad g_\tau = \frac{N \sum_{v=1}^N (Q_{v,\tau} - \bar{Q}_\tau)^3}{(N-1)(N-2)s_\tau^3}$$

Media

Desviación Típica

Coefficiente de Sesgo

$$\sqrt{[(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2]}$$

Distancia Euclidiana

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. Sin embargo, las ecuaciones de llenado del dato faltante requieren identificar el peso de cada estación.

$$i = \frac{(Inv. Dist. Euclidiana est i)^2}{\sum_{i=1}^n (Inv. Dist. Euclidiana)^2}$$

Peso de estación

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.

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

Para agilizar tiempos de análisis de datos se utilizará la herramienta GESTAD, la cual fue desarrollada por parte de la Maestría en Ingeniería de los Recursos Hídricos (MIRH) de la Universidad Michoacana De San Nicolás de Hidalgo (UMSNH) para la aplicación de las pruebas anteriormente mencionadas.

## 6.4. MODELACIÓN MATEMÁTICA

En la etapa de modelaciones que comenzará una vez terminada la validación de datos se procede a integrar la información en los formatos adecuadas para su correcta lectura en las herramientas mencionadas en el capítulo 2.4. A su vez estos modelos tienen que ser validados y calibrados.

### 6.4.1. MODELACIÓN SUPERFICIAL

En esta parte se realizará la modelación de los distintos escurrimientos que ocurren en la cuenca usando un modelo matemático de lluvia-escurrimiento, empleando la metodología de Témez, que forma parte de los módulos de EVALHID, los datos obtenidos como resultado gastos, precipitaciones, así como valores de infiltración medios simples de datos.

Para lograr una adecuada modelación superficial se pueden seguir lo siguientes pasos:

1. Generar microcuencas con base en la red de drenaje natural de la zona en estudio.
2. Se ubican espacialmente las estaciones de aforo principales existentes.
3. Se establecen las zonas de calibración.
4. Se delimitan las áreas de influencia de las estaciones climatológicas ubicadas en la cuenca en estudio, a través de polígonos de Thiessen.
5. Se determina que estación climatológica tiene influencia sobre cada una de las microcuencas de modelación y en caso que una microcuenca este afectada por dos más estaciones, se construye una estación ficticia en el centroide de la microcuenca.
6. Se reduce el número de microcuencas.
7. Se calibra el modelo.

### 6.4.2. RESTITUCIÓN A RÉGIMEN NATURAL

Las series hidrométricas de aforo en los ríos frecuentemente tienen huecos que se necesitan completar o que no cubren del todo el periodo de tiempo para el que se realiza la restitución. Además, suele ser necesario reconstruir series en lugares en que no existen estaciones de aforo, y es muy habitual que no existan datos aforados para muchas de las causantes necesarias para la restitución. Por lo tanto, es necesario recurrir a diversos análisis estadísticos, así como a estimaciones.

La restitución a régimen natural es conceptualmente un proceso sencillo, que consiste en la adición o sustracción de los datos de caudales detraídos o aportados al caudal del río, lo que matemáticamente puede escribirse (Marizza, 2003).

$$N = A + T + B - V - Q - R + E \pm S$$

Donde,

N = Caudal en régimen natural para el periodo considerado

A = Caudal aforado

T = Caudal derivado o trasvasado por tomas aguas arriba

B = Caudal extraído por bombeo en acuíferos conectados

V = Son los retornos de aguas arriba

Q = Caudal trasvasado de otras cuencas

R = Caudal aportado por recarga adicional en acuíferos

E = Caudal evaporado en embalses y masas de agua nuevas

S = Caudal almacenado o liberado por embalses.

#### 6.4.3. MODELACIÓN SUBTERRÁNEA

Realizar una modelación subterránea tomando en cuenta las distintas extracciones, que se hacen al acuífero, así como la presencia de galerías, conexiones río-acuífero, los datos de infiltración obtenidos en la modelación superficial, utilizando la herramienta AQUIVAL el cual emplea el método de autovalores que emplea un procedimiento de cálculo de diferencias finitas.

1. Discretización en celdas, de los acuíferos en estudio.
2. Numerar las celdas indicando las características de cada celda (activa, inactiva, manantial o normal).
3. Se ingresan los valores de los parámetros hidrodinámicos de transmisividad y coeficiente de almacenamiento para cada celda con los datos proporcionados por CONAGUA.
4. Se colocan los valores de los niveles piezométricos correspondientes al muestreo en campo.
5. Se establecen las acciones elementales a las que está sujeto cada acuífero y posteriormente se determinan los pesos que tiene cada una de las acciones elementales para cada celda.
6. Se determinan los parámetros de control (celdas).
7. Se calibra el modelo.

#### 6.4.4. MODELACIÓN CONJUNTA DE LA GESTIÓN HÍDRICA (SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEA)

En esta fase se hace un análisis general tomando en cuenta la modelación superficial y subterránea, elementos de regulación, de transporte realizándose una modelación matemática, utilizando la herramienta SIMGES.

Para ello tenemos que definir las aportaciones y demandas de la cuenca incluyendo la infraestructura con que cuenta el SRH dentro del parteaguas incluyendo los pozos industriales, urbanos, módulos de riego, embalses, la topología, entre otros.

#### 6.4.5. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES

El método empleado en esta herramienta es el de los modelos autorregresivos de media móvil con ayuda de MASHWIN con el cual realizaremos el análisis estocástico de tipo mensual para el estudio de series temporales de aportaciones en un sistema hidráulico.

Esta herramienta de cómputo incluida en AQUATOOL utiliza los modelos autorregresivos AR (P) y ARMA (P, Q) del tipo estacionarios, periódicos parciales y periódicos totales con los cuales podemos generar series de caudales.

Para ello debemos seguir las siguientes etapas:

1. Normalización de la serie.
2. Estimación de los estadísticos básicos (media, varianza, asimetría, curtosis).
3. Autocorrelación.
4. Generar serie residual.
5. Cálculo de los nuevos caudales.

#### 6.4.6. MODELACIÓN DE LA SEQUÍA

Con los parámetros obtenidos en el modelo de gestión hídrica y las series sintéticas obtenidas, se realiza la modelación matemática para determinar situaciones en las cuales el sistema no puede abastecer una demanda, utilizando la herramienta SIMRISK el cual nos permitirá determinar el riesgo de fallo del sistema que nos generará una sequía operativa.

## 7. RESULTADOS

En este apartado se muestran los resultados obtenidos en la presente investigación.

### 7.1. CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Con el apoyo de los modelos digitales de elevación utilizados dentro del Sistema de Información Geográfica (SIG) fue posible ubicar la zona de estudio de acuerdo a la división política del país, geología, uso y tipo de suelo, escurrimientos, cuerpos de agua, municipios que están dentro del parteaguas, permitiendo generar diversos mapas de la cuenca y acuíferos estudiados, caracterizando así la zona de estudio.

La cuenca del Río Angulo se sitúa entre las coordenadas 20° 20' 0" N y 19° 20' 0" N de latitud y entre las coordenadas 101° 0' 0" W y 101° 20' 0" W de longitud.

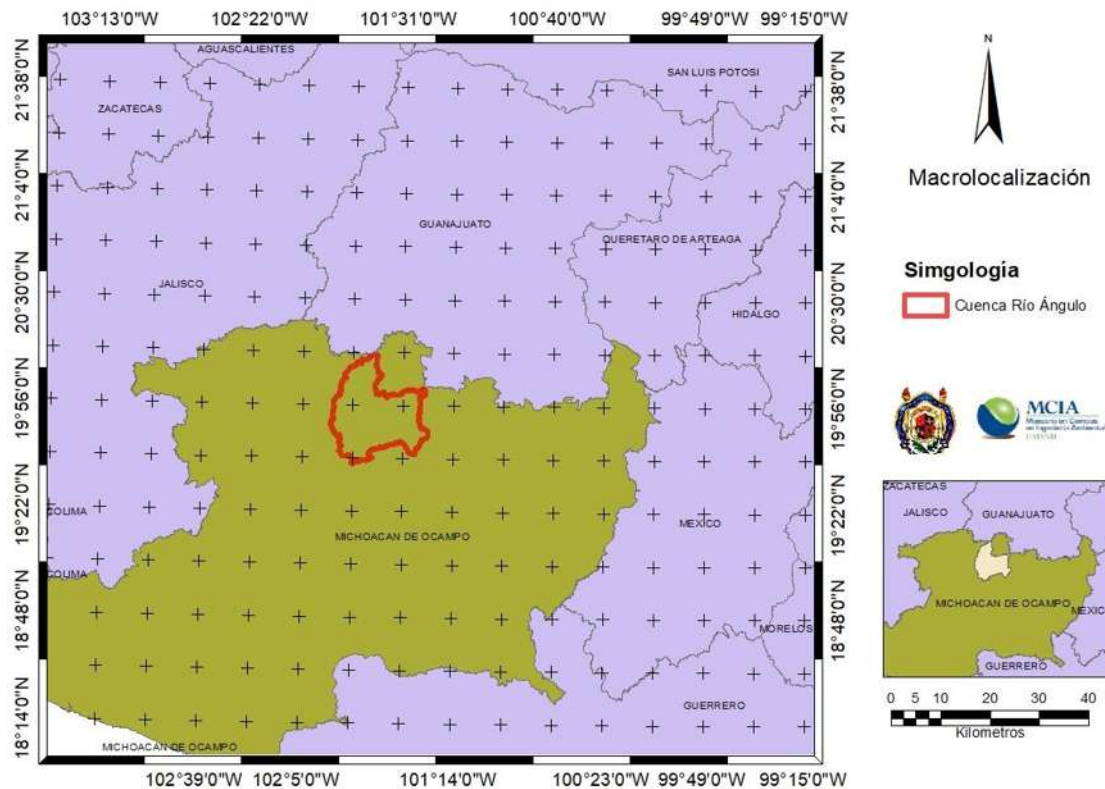
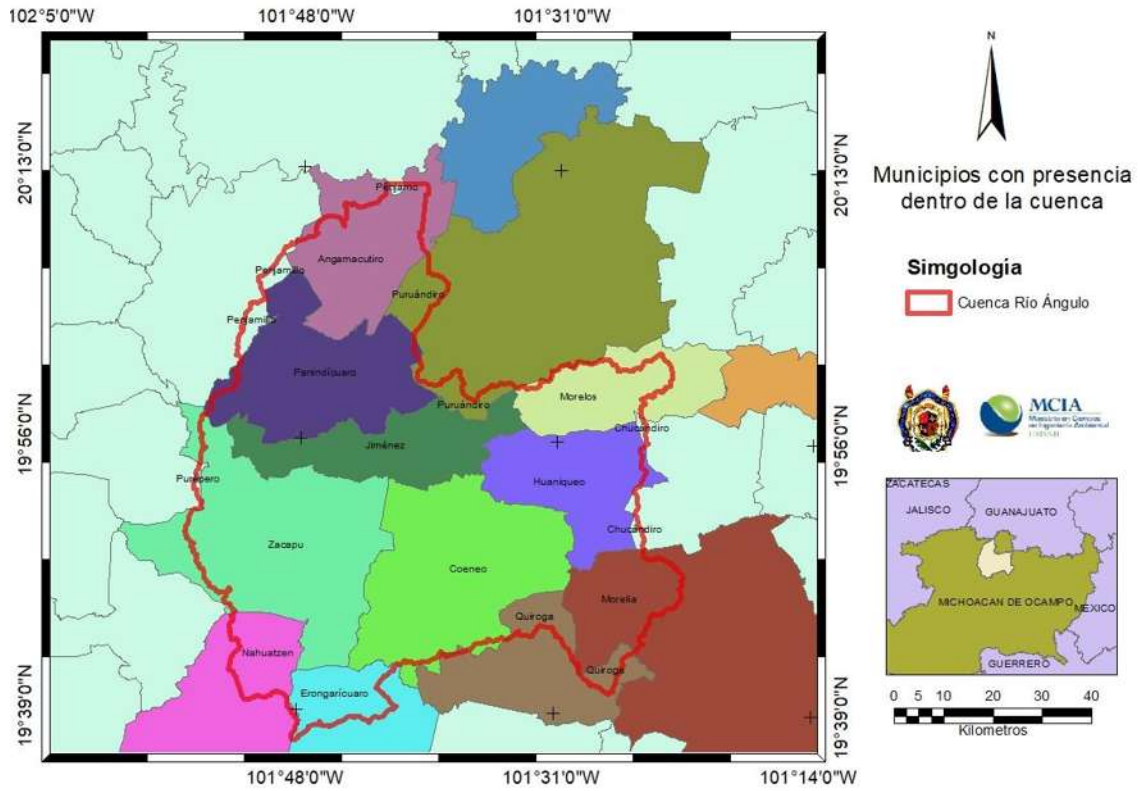
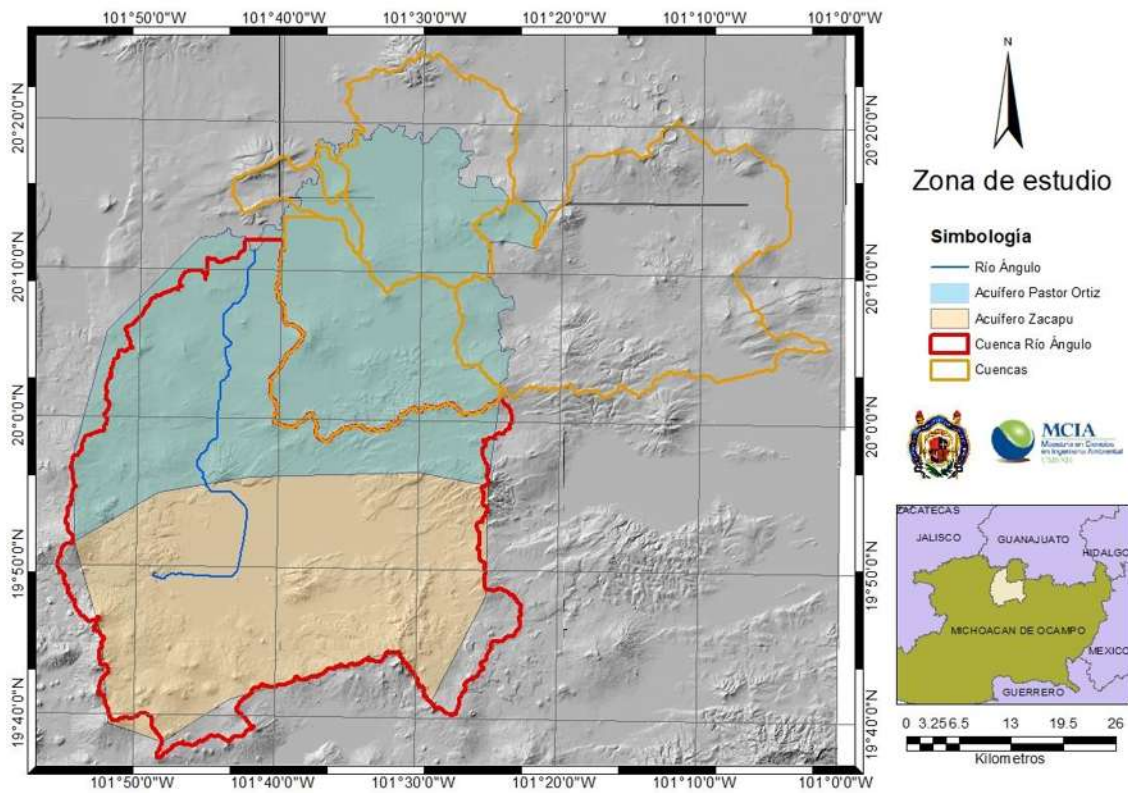


Figura 5. Macrolocalización de la zona de estudio.





**Figura 6. Municipios dentro del parteaguas.**



**Figura 7. Zona de estudio.**



Para la cuenca del Río Angulo se puede observar en la Figura 6, la influencia directamente de 10 municipios; sin embargo es imperativo considerar al municipio de Puruandiro y José Sixto Verduzco para la modelación superficial y subterránea para así cubrir totalmente el acuífero Pastor Ortiz y poder generar las infiltraciones que se tienen en esa zona y consecuentemente tener un modelo matemático representativo de dicho acuífero.

**Tabla 5. Características geomorfológicas de la cuenca del río Angulo.**

Área (km <sup>2</sup> )	Perímetro (km)	Centroide		Pendiente %
		x	y	
2,141.19	282.6	219,620	2,200,957.48	

La cuenca del río Angulo se encuentra ubicada sobre dos acuíferos; Zacapu y Pastor Ortiz-La Piedad. La extensión a cubrir por parte del acuífero de Pastor se estima alrededor de un 35% y por otro lado al acuífero de Zacapu lo cubre en su totalidad de extensión.

También es importante mencionar se obtuvieron 5 cuencas en la parte norte del acuífero de Pastor Ortiz como se observa en la Figura 7, ya que son necesarias para lograr cubrir la zona de estudio y obtener un adecuado comportamiento en la modelación del agua subterránea en dicho acuífero por lo cual se procedió a su delimitación en conjunto con la cuenca del Río Angulo.

**Tabla 6. Dimensiones de los acuíferos en estudio.**

	Pastor Ortiz	Zacapu
Área (km <sup>2</sup> )	1,780.74	1,228.01
Perímetro (m)	235.63	151.43

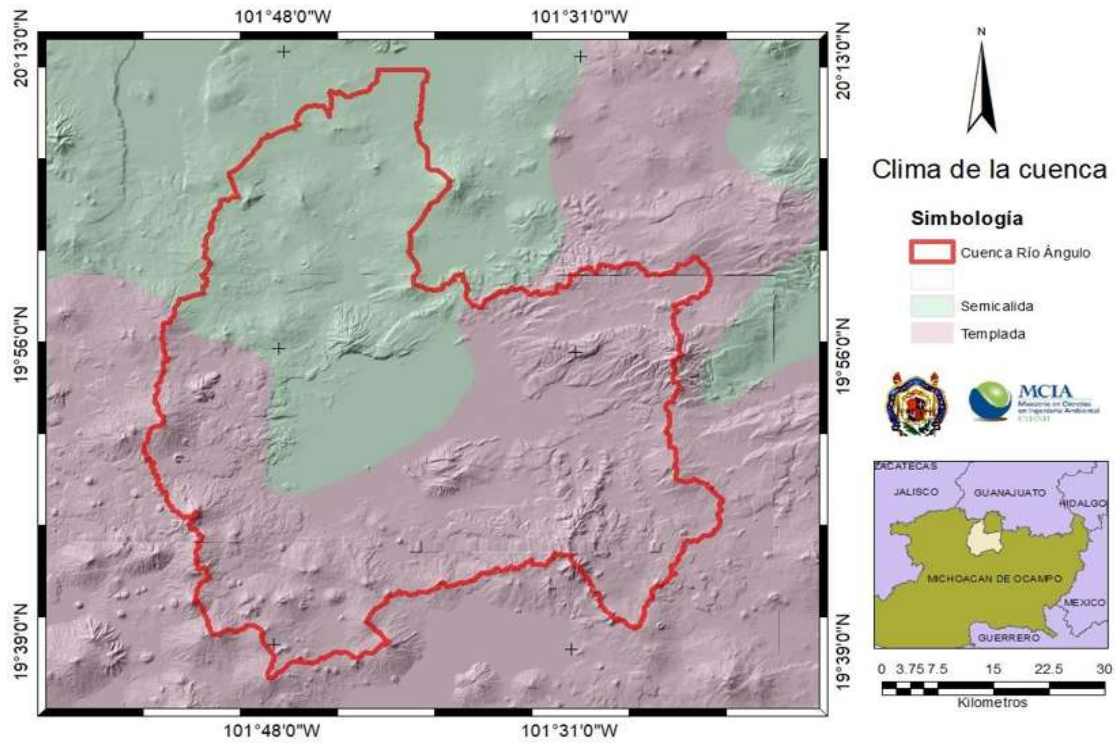


Figura 8. Clima de la zona de estudio.

En la Figura 8, se pueden conocer los tipos de climas que predominan en la zona de estudio, que según la CONAGUA en su compendio del Manual de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (MAPAS) para un clima templado corresponde una temperatura de 5 °C a 11.9 °C y para el clima semicálido corresponde una temperatura de entre 18 °C y 22 °C.

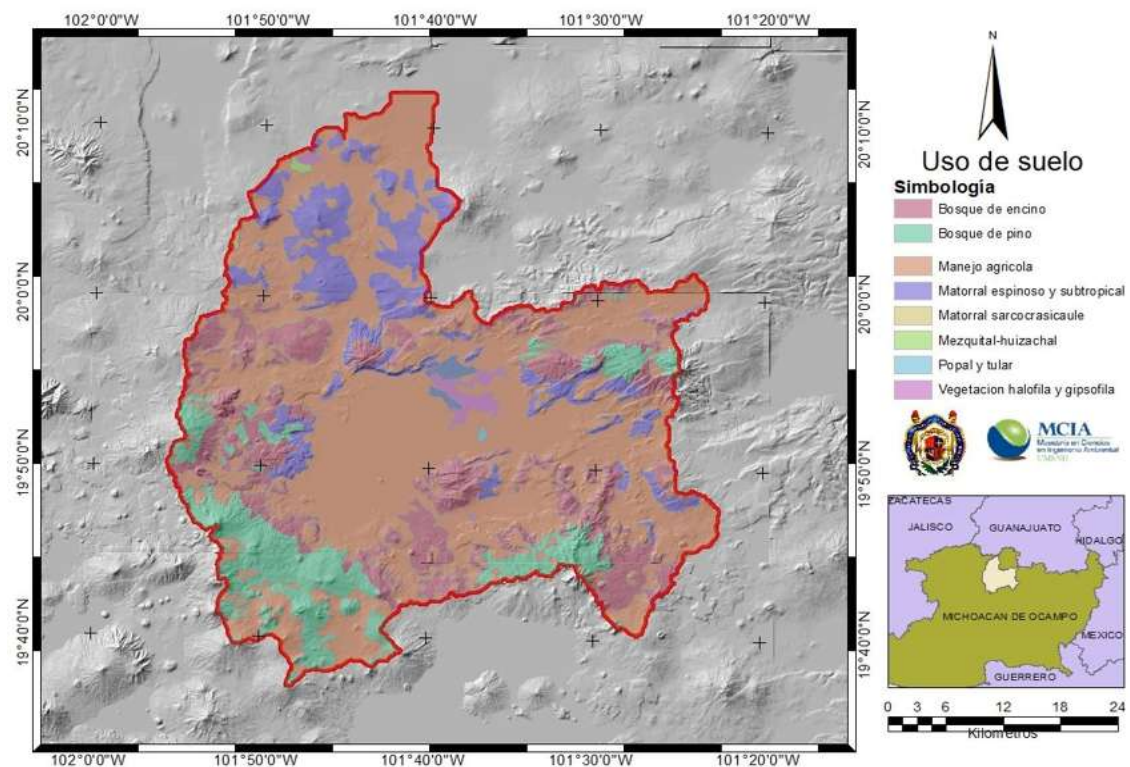


Figura 9. Uso de suelo dentro de la cuenca del río Ángulo.



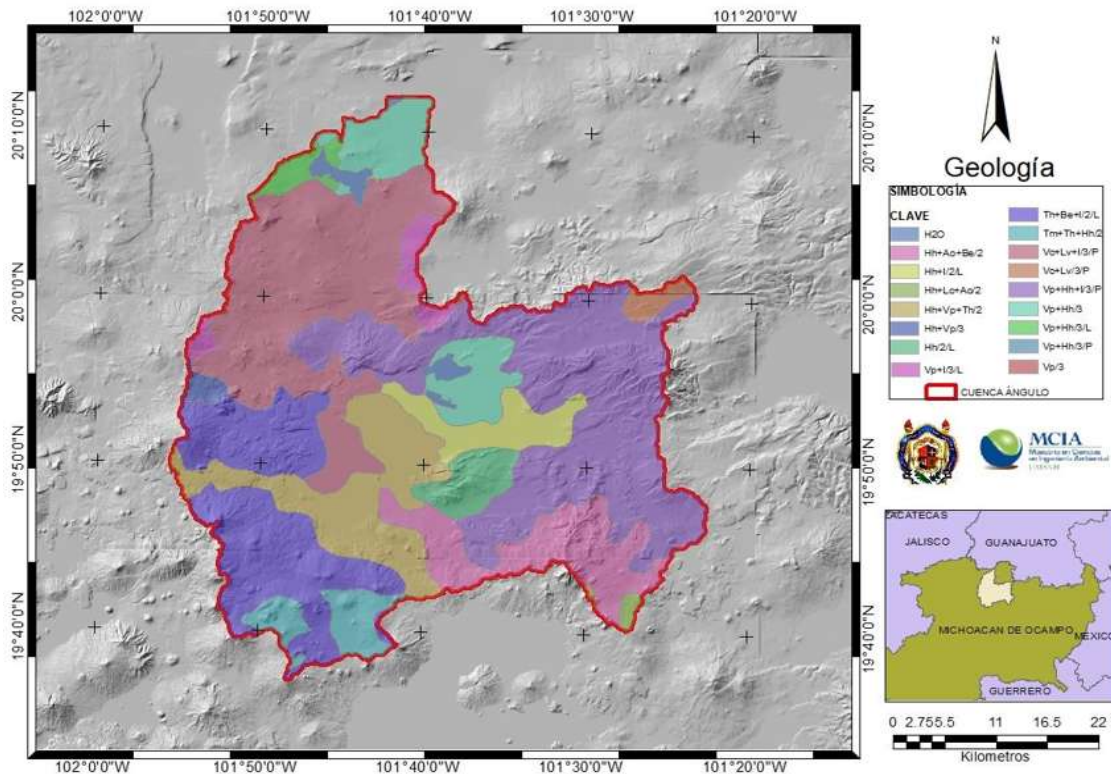


Figura 10. Geología de la cuenca del río Ángulo.

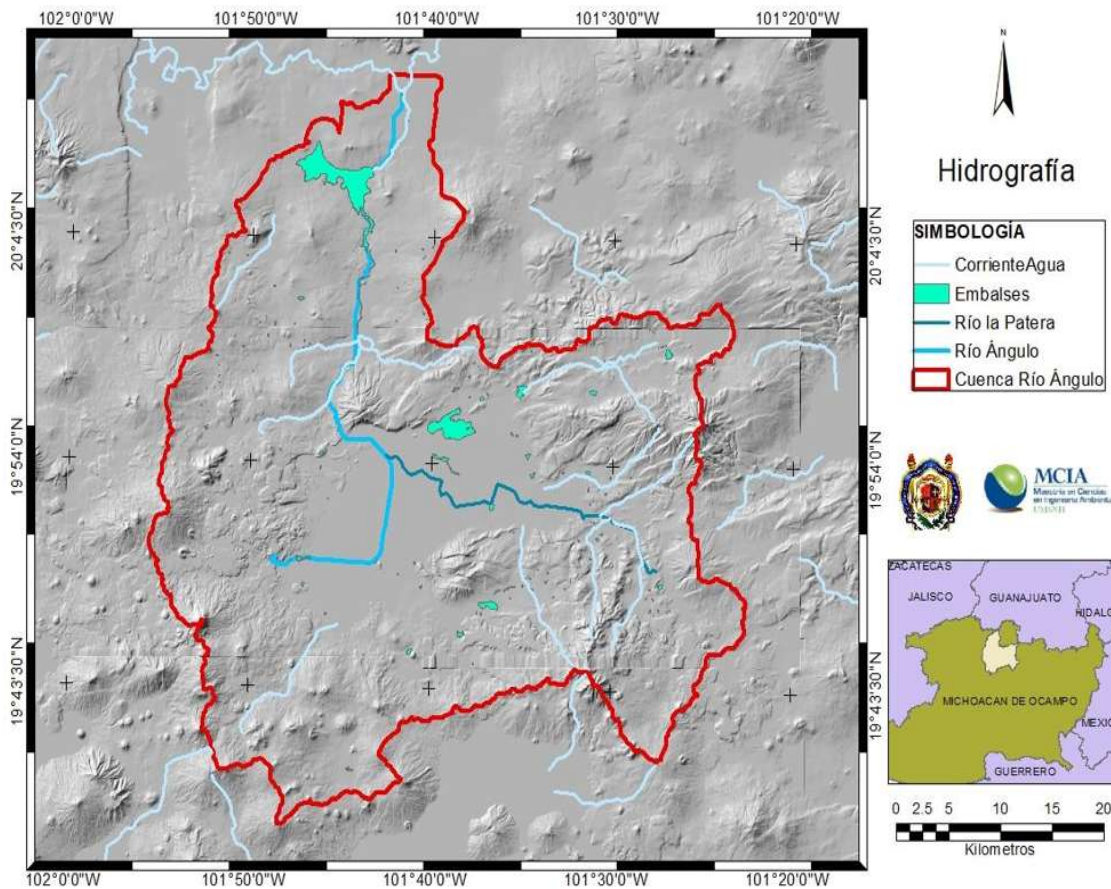


Figura 11. Hidrografía de la cuenca del río Ángulo.

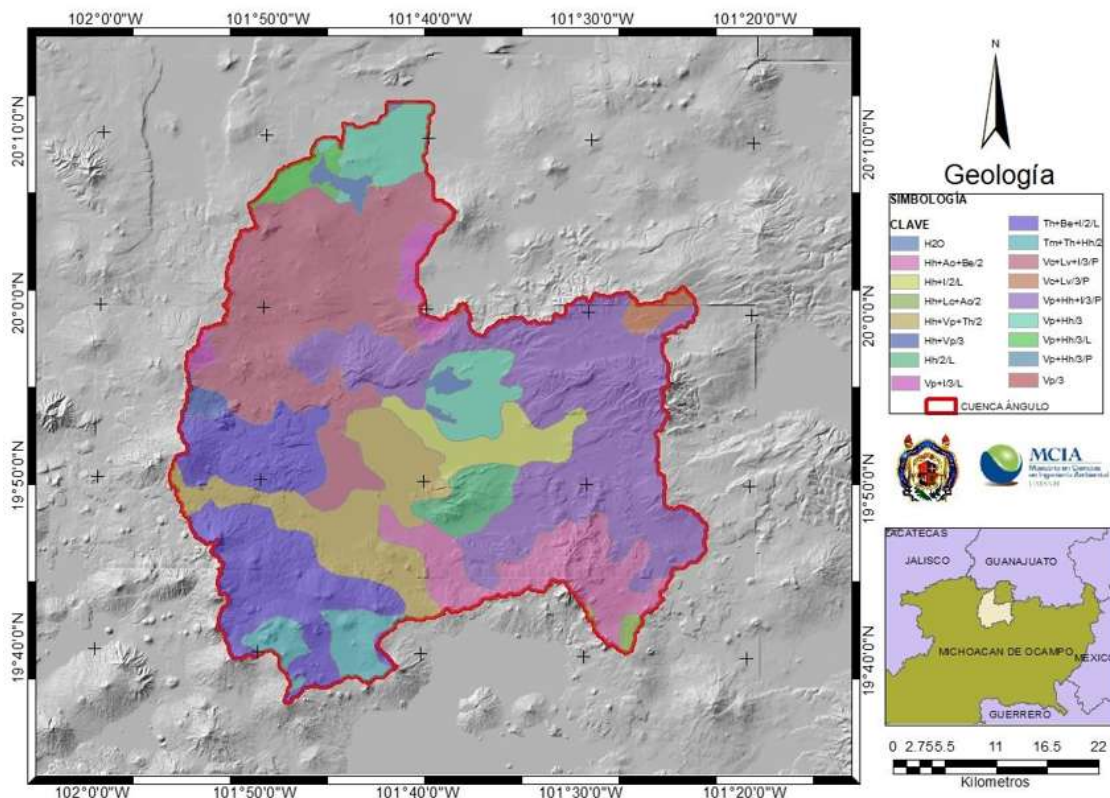


Figura 12. Geología de la cuenca del Río Ángulo.

## 7.2. DEMANDAS

Las demandas hídricas son aquellas cantidades de agua que han sido asignadas o que son necesarias para el desarrollo de actividades y usos específicos, las cuales tienen que ser distribuidas a los usuarios finales en distintos periodos de tiempo y en distintas cantidades.

Con el fin de tener un mejor manejo del recurso tanto en hidrología superficial como subterránea es que se deben considerar las demandas incluyendo sus variantes como: las urbanas, agrícolas e industriales.

### 7.2.1. DEMANDA URBANA

Los sistemas de abastecimiento de agua potable, son aquellas demandas que encontraremos en este apartado ya que tiene como finalidad primordial, la de entregar a los habitantes de una localidad, agua en cantidad y calidad adecuada para satisfacer sus necesidades, ya que este líquido es vital para la supervivencia y proviene principalmente de los acuíferos.

Por ello la importancia de conocer y estimar esos caudales de extracción para cada una de las localidades que integran la zona de estudio y que se encuentran distribuidas como se puede observar en la Figura 13.



Los habitantes para cada municipio mostrados en la Tabla 7 corresponden únicamente a las localidades que tienen presencia dentro de la cuenca y fueron datos proporcionados por parte del INEGI los cuales servirán para una proyección a futuro de las demandas urbanas posibles a extraer en escenarios posteriores.

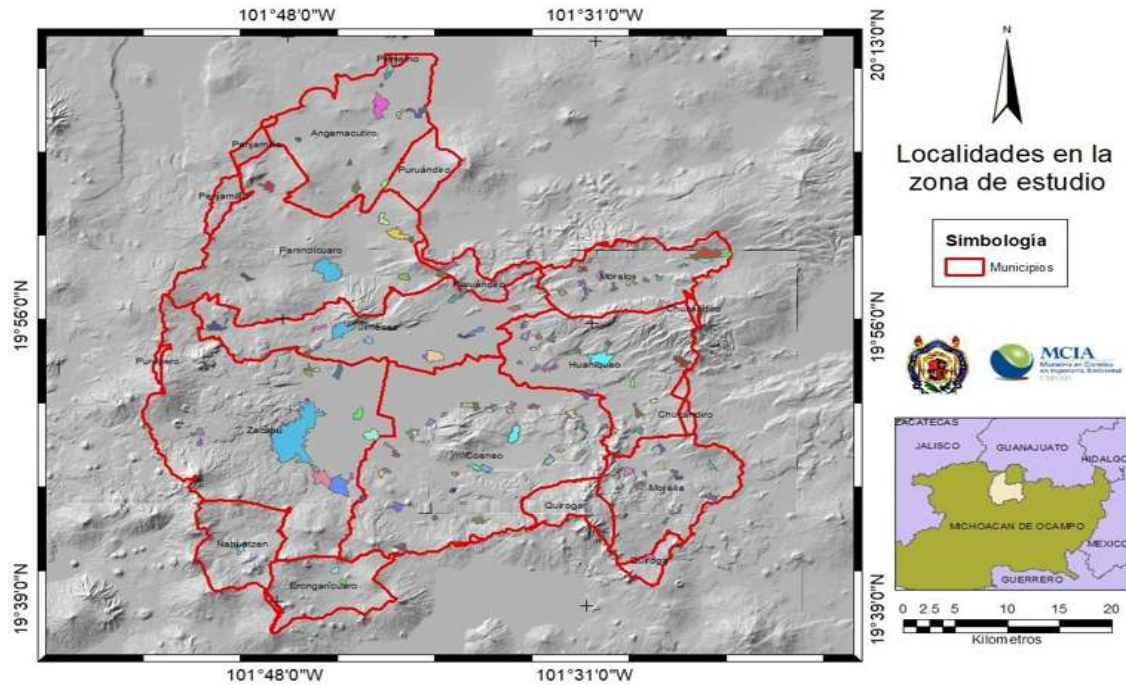


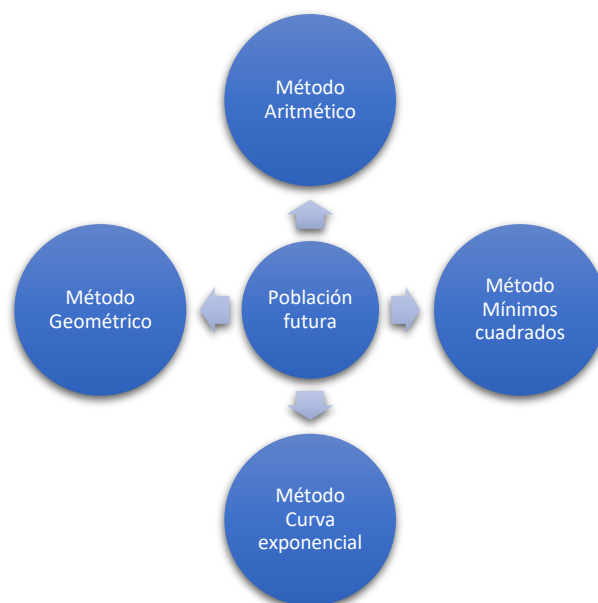
Figura 13. Localidades dentro de la zona de estudio.

Tabla 7. Poblaciones históricas de municipios. (INEGI, 2021)

Municipio	Censos históricos					
	1980	1990	1995	2000	2005	2010
Angamacutiro	9,778	13,953	13,807	13,172	10,705	12,921
Puruándiro	55,853	70,887	74,074	71,770	64,597	67,837
Coeneo	12,352	14,036	12,649	11,892	9,996	10,556
Erongarícuaro	1,521	1,318	1,242	1,141	968	1,054
Huaniqueo	11,223	12,597	10,700	10,033	7,561	7,886
Jiménez	12,018	12,782	11,233	10,602	9,357	9,752
Morelos	6,650	7,468	7,033	6,300	4,997	4,868
Nahuatzen	1,805	1,851	1,840	1,632	1,269	1,403
Panindícuaro	10,967	13,005	11,403	11,232	10,021	10,012
Zacapu	57,139	60,330	65,687	65,992	68,162	70,459
José Sixto Verduzco	24,015	29,093	28,867	26,480	23,787	25,574
Morelia	6,874	7,112	6,990	6,656	6,126	6,938
<b>Total</b>	<b>210,195</b>	<b>244,432</b>	<b>245,525</b>	<b>236,902</b>	<b>217,546</b>	<b>226,020</b>

### 7.2.1.1 PROYECCIÓN A FUTURO DE LAS DEMANDAS URBANAS

Para conocer las poblaciones a futuro se emplearon los siguientes métodos:



*Figura 14. Métodos empleados para poblaciones futuras.*

Para calcular la población proyectada es necesario determinar el caudal asignado para cada habitante de cada municipio, a partir de esto primeramente se determina el tipo de nivel socioeconómico que presenta cada uno de los municipios y posterior a ello apoyándonos de la temperatura ya obtenida en la Figura 8, se determina el caudal per cápita asignado para los habitantes y así como los caudales actuales y futuros.

Para ello se empleó la Tabla 10, donde una vez determinando el nivel socioeconómico de los municipios que fue de tipo medio, se puede conocer el consumo per cápita por habitante y acorde a nuestros tipos de clima tenemos un consumo residencial y medio.

**Tabla 8. Parámetros para determinar el tipo de nivel socioeconómico en el municipio de Puruándiro.**  
Fuente: (INEGI, 2021)

Porcentaje de viviendas con piso de tierra	2
Porcentaje de viviendas con agua entubada	97
Porcentaje de viviendas con electricidad	100
Porcentaje de viviendas que disponen de sanitario	95
Porcentaje de viviendas particulares habitadas propias	73
Porcentaje de viviendas particulares habitadas alquiladas	10
Porcentaje de viviendas donde todos sus focos son ahorradores	61
Porcentaje de viviendas que disponen de calentador solar de agua	11
Porcentaje de viviendas particulares habitadas con techos precarios	0
Porcentaje de viviendas particulares habitadas con paredes precarias	0

Porcentaje de viviendas particulares habitadas de un familiar o prestada	16
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de Internet	15
Porcentaje de viviendas donde separan en orgánico e inorgánico los residuos	38
Porcentaje de viviendas que disponen de panel solar para tener electricidad	0
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de computadora	17
Porcentaje de viviendas particulares habitadas con tenencia no especificada	1
Porcentaje de viviendas particulares habitadas en otra situación de tenencia	1
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de teléfono fijo	32
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de pantalla plana	59
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de teléfono celular	69
Porcentaje de viviendas particulares habitadas que disponen de televisión de paga	36
Porcentaje de viviendas en el ámbito geográfico de referencia respecto a la unidad geográfica superior	1
Porcentaje de viviendas con drenaje	92
Promedio de ocupantes por cuarto (Índice de hacinamiento)	1

**Tabla 9. Temperatura de acuerdo al clima en zona de estudio.**

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

**Tabla 10. Demanda per cápita.**

CLIMA	CONSUMO POR CLASE SOCIOECONÓMICA (l / HAB / DIA)		
	RESIDENCIAL	MEDIA	POPULAR
CÁLIDO	400	230	185
SEMICALIDO	300	205	130
TEMPLADO	250	195	100

**Tabla 11. Población a futuro para los municipios. Fuente: Elaboración propia.**

Población Proyectada				
Municipio	Método	2030	2040	2050
Angamacutiro	Mínimos Cuadrados	13,898	14,350	14,803
Puruándiro	Aritmético	59,971	56,038	52,105
Coeneo	Geométrico	9,522	9,044	8,589
Erongarícuaro	Geométrico	825	730	646

Huaniqueo	Geométrico	6,250	5,564	4,953
Jiménez	Geométrico	8,493	7,926	7,396
Morelos	Geométrico	3,964	3,577	3,228
Nahuatzen	Geométrico	1,187	1,092	1,004
Panindícuaro	Geométrico	7,572	6,352	5,132
Zacapu	Mínimos Cuadrados	79,682	84,199	88,715
José Sixto Verduzco	Mínimos Cuadrados	25,455	25,201	24,946
Morelia	Exponencial	6,895	6,874	6,852
<b>Total</b>		<b>223,714</b>	<b>220,947</b>	<b>218,369</b>

Una vez teniendo en cuenta todos los factores y parámetros anteriormente mencionados se procedió a realizar los cálculos necesarios y como resultado se obtiene la Tabla 12.

**Tabla 12. Demandas urbanas a futuro. Fuente: Elaboración propia.**

	Demandas (hm <sup>3</sup> /año)			
	2021	2030	2040	2050
Angamacutiro	1.01	1.03	1.07	1.10
Puruándiro	5.24	4.48	4.19	3.89
Coeneo	0.71	0.71	0.67	0.64
Erongarícuaro	0.06	0.061	0.05	0.04
Huaniqueo	0.51	0.46	0.41	0.37
Jiménez	0.67	0.63	0.59	0.55
Morelos	0.32	0.29	0.26	0.24
Nahuatzen	0.09	0.08	0.08	0.07
Panindícuaro	0.72	0.56	0.47	0.38
Zacapu	5.65	5.96	6.3	6.63
José Sixto Verduzco	1.92	1.9	1.88	1.86
Morelia	0.75	0.75	0.75	0.75
<b>Total</b>	<b>15.73</b>	<b>16.911</b>	<b>16.72</b>	<b>16.52</b>

### 7.2.2. DEMANDA AGRÍCOLA

Se le conoce así aquellos caudales concesionados exclusivamente para el desarrollo de la agricultura en sus distintas etapas dependiendo del cultivo que se siembre según la temporada en que se encuentre siendo estas de temporal o de riego.

Generalmente la agricultura de riego es aquella donde la mayoría o en su totalidad de la extracción proviene de los acuíferos y una parte mediante el empleo de cárcamos o abastecimiento de algunos embalses; sin embargo, para fines de este proyecto se considerará como demanda agrícola aquellas extracciones que provienen solamente del agua subterránea.



En México para tener una adecuada gestión e inventario del agua agrícola, así como las superficies de siembra, se tienen Distritos de Riego (DR) a nivel nacional los cuales se encargan de la gestión, distribución y planes de riego para cada sector. Dentro de la cuenca del río Ángulo se tiene el DR-087 denominado Rosario – Mezquite el cual se encuentra conformado por 7 módulos como se puede observar en la Tabla 13.

Tabla 13. División del DR-087 Rosario – Mezquite. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2012)

No.	MODULO	SUPERFICIE REGADA (ha)	USUARIOS
1	Angamacutiro	7689	2116
2	La piedad	16096	3159
3	Yurecuaro	4235	770
4	Vista Hermosa	3865	805
5	La barca	12837	3014
6	Pastor Ortiz	7233	2337
7	Zacapu	11160	3834
<b>Total</b>		<b>63115.00</b>	<b>16035.00</b>

Dentro del parteaguas en estudio se tiene el módulo de Zacapu y una parte del módulo Angamacutiro. Por cuestiones de una correcta modelación subterránea se incluye el módulo de Pastor Ortiz que se localiza en la parte norte de la zona en estudio colindando con el estado de Guanajuato como se observa en la Figura 15.

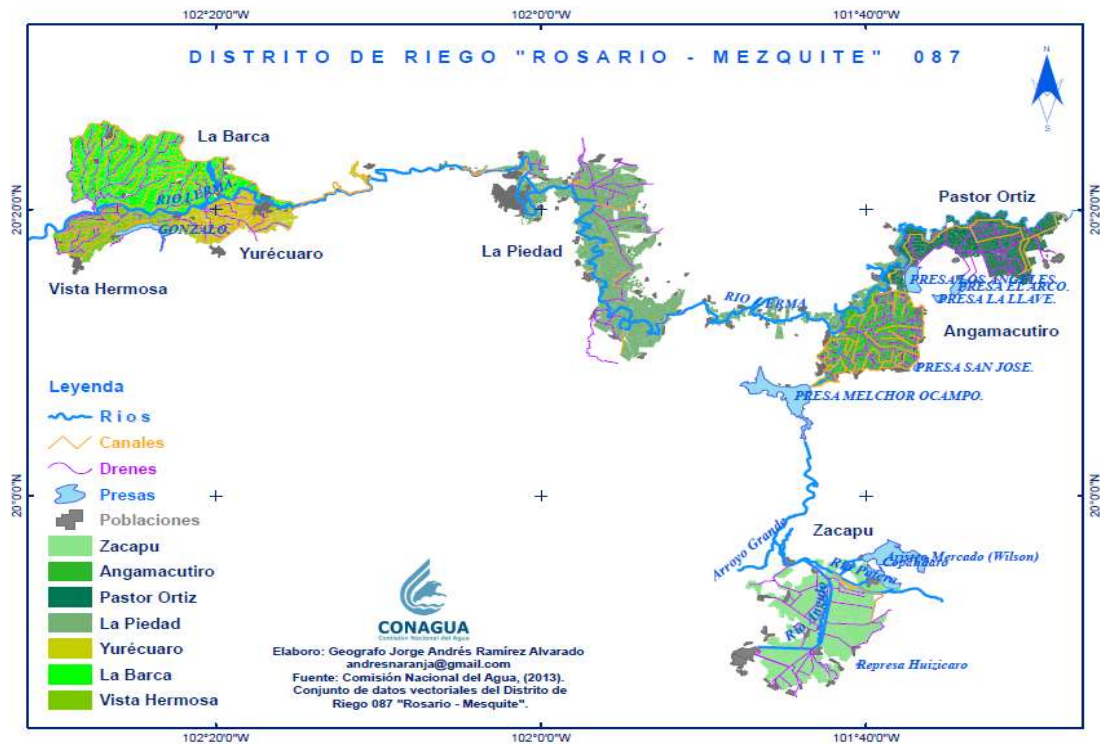


Figura 15. Distrito de Riego 087 Rosario - Mezquite. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2012)

La red principal de conducción y distribución del Distrito de Riego consta de 491.652 km de canales con capacidad mayor a 0.5 m<sup>3</sup>/seg, la conducción y distribución principal es entre los Módulos es el cauce del Rio Angulo y del Rio Lerma. Siendo el Sistema Rosario-Mezquite es el más grande, abarca a los Módulos I, II, III, IV, y V donde se abastece principalmente de la Presa Melchor Ocampo, complementándose con la Presa Gonzalo.

Tabla 14. Producción y valor de cosecha del DR-087. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2012)

ORGANISMO DE CUENCA LERMA-SANTIAGO-PACIFICO				
No	Nombre	Superficie (ha)	Producción (Ton)	Valor de cosecha (miles de \$)
87	Rosario-Mezquite	63,115	731,529	2,427,663.94

La importancia de este DR-087 económicamente es fuerte y a nivel nacional es uno de los principales productores de granos obteniendo un valor de cosecha como se observa en la Tabla 14. Podemos encontrar una gran variedad de cultivos los cuales dependiendo de la temporada del año pueden o no sembrarse y los cuales se encuentran recopilados en la

Tabla 15.

**Tabla 15. Cultivos con mayor rotación en el DR-087. Fuente: (Comisión Nacional del Agua, 2012)**

CICLO	CULTIVO	SUPERFICIE SEMBRADA (Ha)	RENDIMIENTO (TON/Ha)	PRODUCCIÓN (TON)
Otoño- Invierno	Cebada	738	4.75	3784
	Garbanzo	54	3.3	238
	Trigo grano	12110	5.36	66058
Primavera- Verano	Chile verde	211	64	15360
	Maíz grano	28650	10.92	324411
	Sorgo grano	12073	9.68	132815
Perennes	Alfalfa	41	43.5	3350
	Fresa	233	26.17	6569

### 7.2.3. DEMANDA INDUSTRIAL

Son aquellas demandas donde su principal fin es su utilización en algunos procesos en la fabricación y/o proceso de materias primas, alimentos o algún otro tipo de proceso industrializado.

Para nuestra zona de estudio se localizan dos concesiones catalogadas dentro de este rubro y las cuales se muestran en la Tabla 16. Para el caso del acuífero de Pastor-Ortiz – La Piedad se tiene una concesión de este tipo; sin embargo, por estar fuera de la zona de estudio no se toma en cuenta.

**Tabla 16. Concesiones de tipo industrial dentro de la cuenca del río Ángulo. Fuente: REPDA, 2021**

FECHA DE REGISTRO	MUNICIPIO	ZACAPU	LATITUD	LONGITUD
	TITULO	VOLUMEN DE EXTRACCION(m <sup>3</sup> /año)		
20/02/2014	08MCH154394/12F MDL16	73,200.00	19°50'12. 70"	- 101°46'16. 70"
01/06/2018	08MCH156645/12F MDL16	197,500.00	19°50'25. 60"	- 101°46'41. 00"

### 7.3. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS

Inicialmente se contó con alrededor de 45 estaciones climáticas distribuidas de forma espacial como se aprecia en el en toda la cuenca del Río Angulo y las cuencas del norte que logran cubrir todo el acuífero Pastor Ortiz y a las cuales se les aplicó pruebas estadísticas y de consistencia a los registros que tienen cada una de ellas.

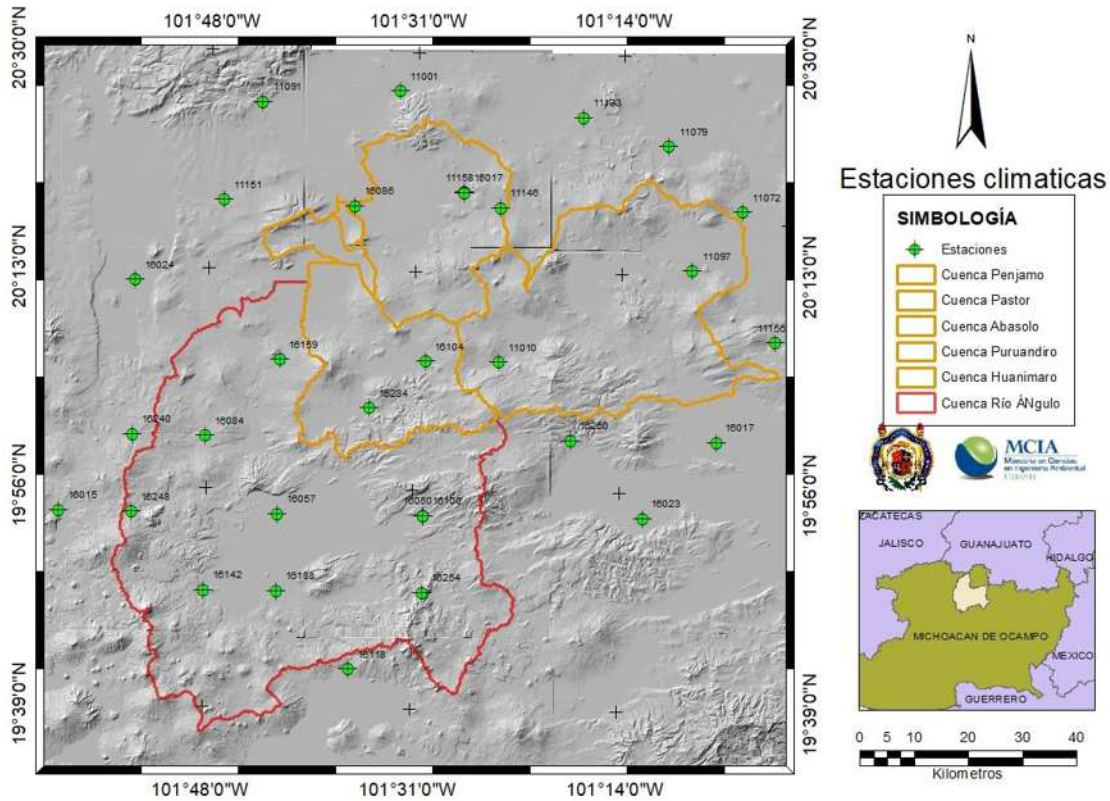


Figura 16. Estaciones climáticas cubriendo la zona de estudio.

Dentro de la Tabla 17, se muestran los datos generales para cada una de las estaciones seleccionadas en una primera instancia cumpliendo parámetros como cantidad de datos registrados, periodo de registro, ubicación espacial.

Tabla 17. Estaciones climáticas y descripciones breves. Fuente: (Servicio Meteorológico Nacional, 2020)

Estación	ID	LONG.	LATITUD	ALTITUD	REGIS.	EFACT.	PERIODO
ANGAMACUTIRO, MICH	16005	101.7	20.1	1685	56	51	23-80
EL ROSARIO, MICH	16159	101.7	20.1	1700	43	40.9	72-15
PANINDICUARIO, MICH	16084	101.8	20	1852	68	54	46-15
COPANDARO, MICH	16155	101.7	19.9	1980	40	33.9	69-10
HUANIQUEO, MICH	16050	101.5	19.9	2040	66	64	48-14
PUENTE SAN ISIDRO	16100	101.5	19.9	2022	46	45	47-93
TIRINDARO, MICH	16188	101.7	19.8	2002	29	28.7	73-03
ZACAPU, MICH	16171	101.8	19.8	1994	46	45.7	23-69

Para un primer filtro que se aplicó y comenzar a descartar estaciones se empleó el criterio de longitud entre estaciones y la zona de estudio quedándose únicamente con 34 estaciones (posterior a este criterio anteriormente mencionado).

**Tabla 18. Estaciones cercanas a la zona de estudio.**

No	clave	x	y	altitud	Nombre
1	16050	-101.5	19.9	2040	HUANIQUEO, MICH
2	11010	-101.4	20.1	1909	Cerano, Gto
3	16024	-101.9	20.2	1730	Corrales, Mich
4	16142	-101.8	19.8	1982	Zacapu, Mich
5	16254	-101.5	19.8	2188	Teremendo, Mich
6	16159	-101.7	20.1	1700	El Rosario, Mich
7	16240	-101.9	19.8	2371	El Pueblito, Mich
8	16248	101.9	19.9	2064	Caurio de Guadalupe, Mich
9	16118	-101.6	19.7	2203	Santa Fe, Mich
10	16023	-101.2	19.9	1840	Copandaro de Galeana, Mich
11	16250	-101.3	20	1851	Huandacareo, Mich
12	16057	-101.7	19.9	2000	Villa Jimenez, Mich
13	16084	-101.8	20	1852	Panindicuaro, Mich
14	16015	-102	19.9	1940	Carapan, Mich
15	16188	101.7	19.8	2002	Tirindaro, Mich
16	16104	-101.5	20.1		Puruandiro, Mich
17	16086	-101.6	20.3	1692	Pastor Ortiz, Mich
18	16234	-101.5761	20.03888	1935	Galeana, Mich
19	16017	-101.1	20	1831	Cuitzeom Mich
20	11158	-101.45	20.32	2130.00	Piñicuaro, Gto
21	11156	-101.02	20.13	1907	El dormido, Gto
22	11097	-101.1355	20.22166	1725	Santa maria (Yuriria), Gto
23	11071	-101.4236	20.9433	1726	Santa Maria dge (yuriria), Gto
24	11072	-101.06777	20.29833	1728	Santa Rita, Jaral del progreso, Gto
25	11021	-101	20.2813	1730	El sabino, Salvatierra, Gto
26	11079	-101.1694	20.3827	1790	Valle de Santiago, Gto
27	11146	-101.4	20.3	1859	Las jicamas, Gto
28	11133	-101.28805	20.41861	1715	Santa maria sanabria, Gto
29	11137	-101.288	20.87		Presa la purisima, Gto
30	16017	-101.45	20.31944	1694	Casa blanca, Mich
31	11001	-101.54	20.45	1761	Abasolo, Gto
32	11151	-101.7794	20.30555	1708	Tacubaya, Gto
33	11091	-101.7286	20.4333	1770	Penjamo, Gto
34	16100	-101.5	19.9	2022	Puente San Isidro, Mich

A estas estaciones que lograron cumplir un primer criterio, se aplicaron las pruebas de homogeneidad, persistencia e independencia con la finalidad de

seleccionar las estaciones principales a trabajar en este proyecto, verificando que sean aquellas donde la consistencia de datos es mejor. Para ello se apoyó de la herramienta informática Hydro Analysis, que fue desarrollada en la Maestría Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Universidad Michoacana.

Dicho programa aplica las pruebas básicas como:

- ✚ Secuencias

- ✚ Helmert

Pruebas de cambio en la media:

- ✚ Cramer

- ✚ T-student

Consistencia en la variabilidad:

- ✚ Bartlet

Pruebas de tendencia:

- ✚ Test de Spearman

- ✚ Test de Kendall

Pruebas de consistencia:

- ✚ Límites de Anderson

- ✚ Test de Wald

En la Figura 17, se puede analizar la información de las pruebas de validación aplicables para cada una de las estaciones.



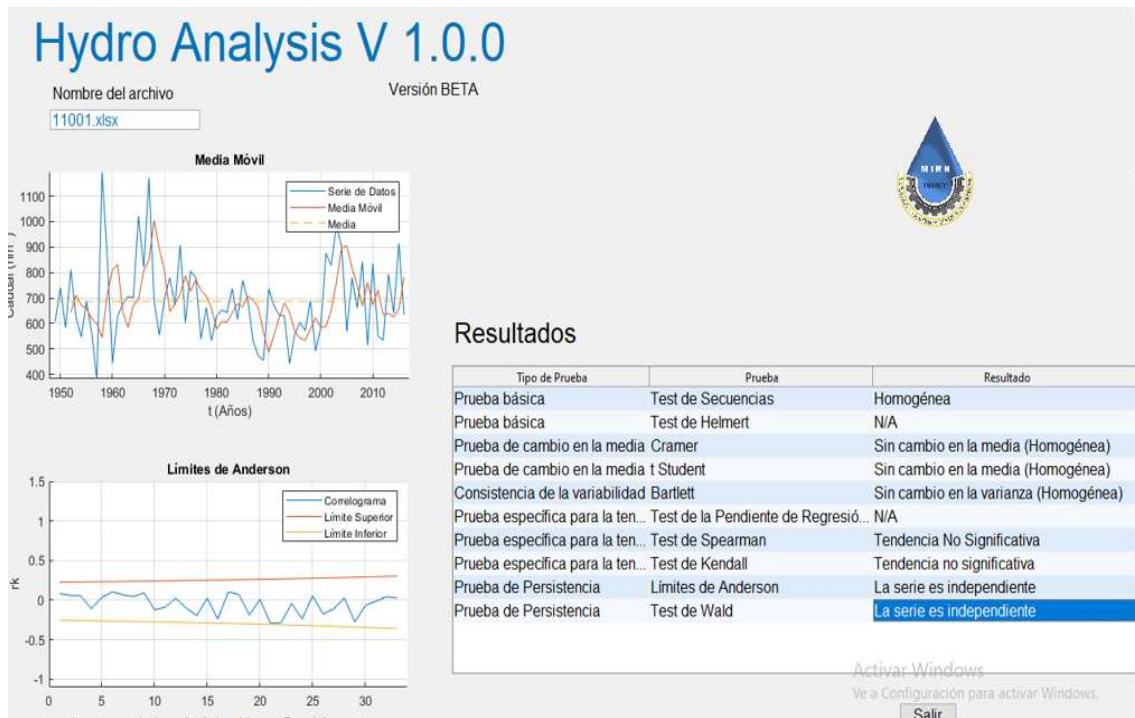


Figura 17. Resultados de validación de estación Abasolo con software Hydro Analysis.

Una vez terminado el proceso de validación para las estaciones climáticas se obtuvo la Figura 16, donde podemos analizar de forma espacial la influencia que logran tener cada una de ellas sobre la zona de estudio y dejando únicamente 26 estaciones mostradas en la Tabla 18, que son aquellas donde sus datos registrados presentan mayor homogeneidad para proceder a realizar un llenado de datos.

El cual también se realizó con la herramienta informática GESTAD que fue desarrollada en la Maestría Ingeniería de los Recursos Hídricos de la Universidad Michoacana.

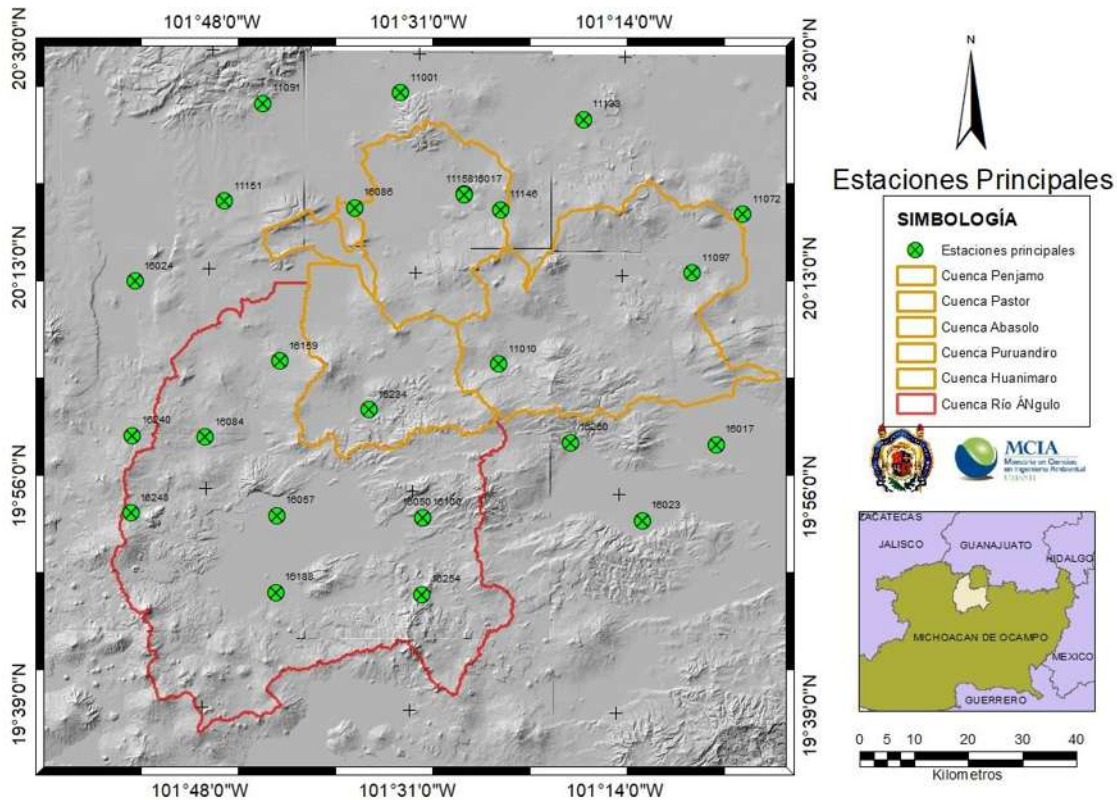


Figura 18. Estaciones principales para la zona de estudio.

Tabla 19. Estaciones principales validadas.

clave	x	y	altitud	Nombre
16050	238257.938	2202359.91	2040	Huaniqueo, Mich
11010	249049.935	2224354.35	1909	Cerano, Gto
16024	196930.59	2236263.53	1730	Corrales, Mich
16254	238093.76	2191285.93	2188	Teremendo, Gto
16159	217664.307	2224834.71	1700	El Rosario, Mich
16240	196544.904	2214109.47	2371	El Pueblito, Mich
16248	196353.443	2203032.57	2064	Caurio de Guadalupe, Mich
16023	269679.743	2201920.99	1840	Copandaro de Galeana
16250	259358.128	2213133.88	1851	Huandacareo, Mich
16057	217307.024	2202683.75	2000	Villa Jimenez, Mich
16084	207015.415	2213931.18	1852	Panindicuario, Mich
16188	217129.671	2191608.41	2002	Tirindaro, Mich
16086	228474.125	2246818.28	1692	Pastor ortiz, Mich
16234	230522.748	2217860.59	1935	Galeana, Mich
16017	280291.081	2212858.84	1831	Cuitzeo, Mich
11158	244179.497	2248793.32	2130	Piñicuario, Gto
11097	276890.304	2237448.14	1725	Santa Maria (yuriria), Gto
11071	247966.789	2317778.65	1726	Santa Maria dge (yuriria), Gto
11072	284075.026	2245847.13	1728	Santa Rita, jaral del progreso, Gto



11146	249370.461	2246501.74	1859	Las Jicamas, Gto
11133	261248.725	2259469.56	1715	Santa Maria Sanabria, Gto
16017	244178.575	2248731.31	1694	Casa blanca, Mich
11001	234999.854	2263332.8	1761	Abasolo, Gto
11151	209738.32	2247738.55	1708	Tacubaya, Gto
11091	215281.35	2261799.58	1770	Penjamo, Gto
16100	238257.938	2202359.91	2022	Puente San Isidro, Mich

#### 7.4. ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Este tipo de estaciones nos permiten conocer las escorrentías superficiales y con la base de registro del BANDAS se obtuvo una serie histórica con la cual se genera la modelación superficial en conjunto con las precipitaciones registradas en las estaciones del apartado anterior.

Dentro de la cuenca del río Ángulo se tienen localizadas 3 estaciones hidrométricas las cuales se sitúan sobre el cauce, con las cuales se validarán los caudales simulados, su ubicación se puede consultar en la Tabla 20 y se pueden observar de forma espacial en la Figura 19.

**Tabla 20. Ubicación estaciones hidrométricas. Fuente: BANDAS, 2021**

Clave	Nombre	Situada	Longitud	Latitud
12014	Pasarela Villa Jiménez	Río Ángulo	-101.75	19.92
12713	Angamacutiro 2	Río Ángulo	-101.71	20.14
12415	Puente San Isidro	Río La Patera	-101.53	19.86

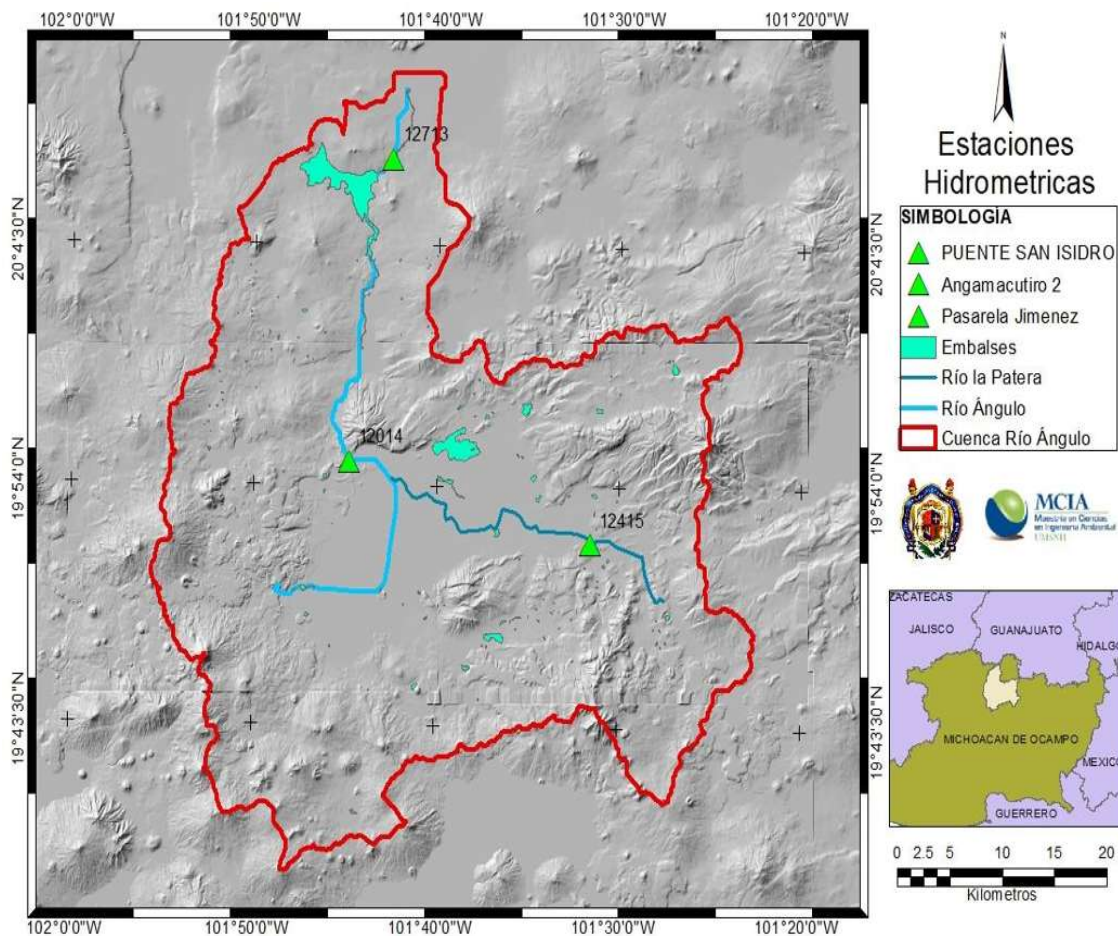


Figura 19. Estaciones hidrométricas en la cuenca del río Ángulo.

## 7.5. NIVELES PIEZOMÉTRICOS

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 el equipo sonda de nivel, el cual ayuda a conocer la profundidad del agua mediante un sensor que al tocar el agua detecta la conductividad hidráulica y su temperatura.

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 el año 2007 se realizó un levantamiento de censo de pozos por parte de CONAGUA en el cual se estableció la red de monitoreo para futuros sondeos.

Para el acuífero de Zacapu se tienen 155 pozos para sondeos y sus posibles comparativas mientras que para el acuífero de Pastor Ortiz se tiene un inventario de 415 pozos todos distribuidos en toda el área de los respectivos acuíferos.

Sin embargo, para actualizar la información existente se realizó un muestreo en el mes de Julio de 2021, en temporada de lluvias que es la recomendación que hace CONAGUA para obtener los niveles estáticos de los pozos. Con el criterio de medir los mismos pozos que se muestran en la Figura 20, que se habían muestreado en 2014 y 2017, para de esa forma tener un registro histórico con el cual poder comparar lo medido en este año.

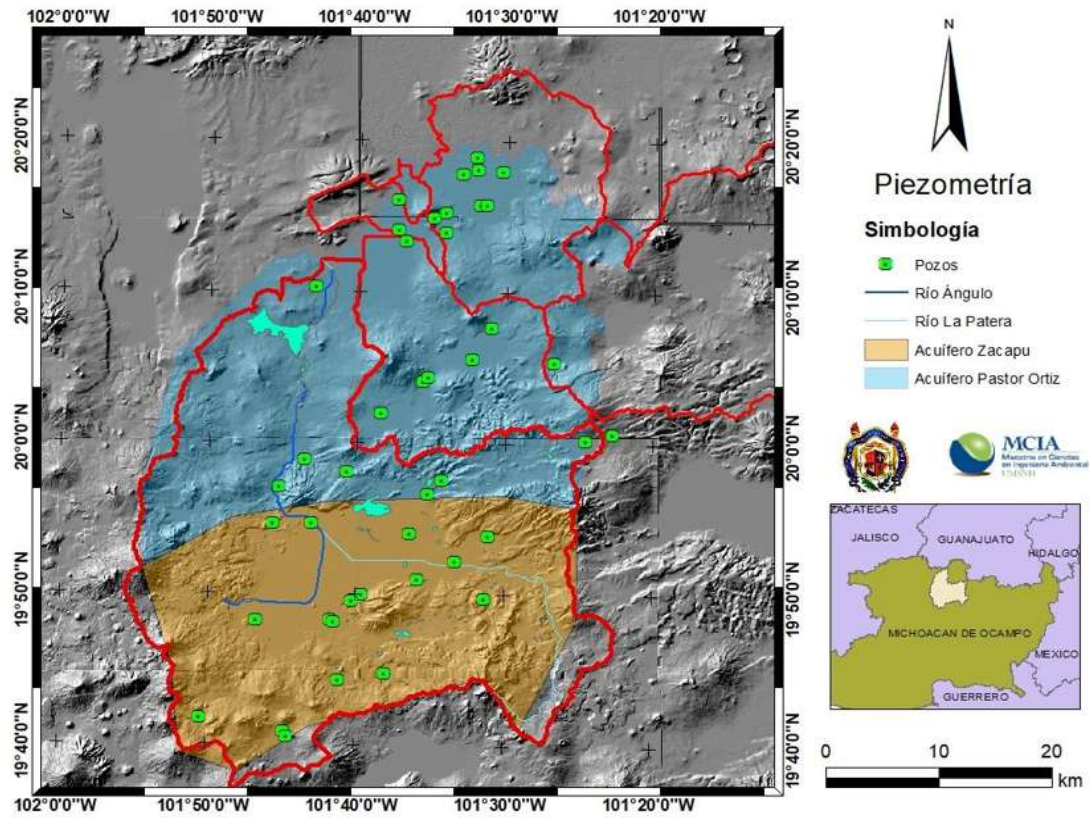


Figura 20. Pozos medidos para la campaña de monitoreo 2021.



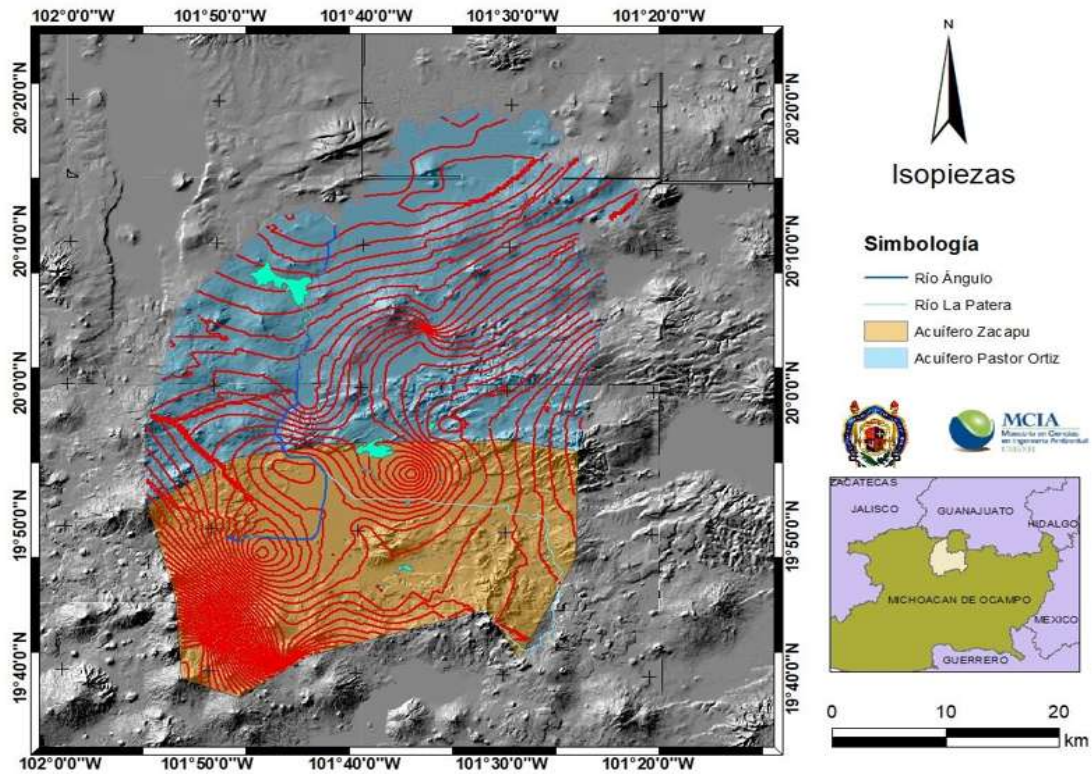


Figura 21. Isopiezias para los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu para el año 2021.

Con la Figura 21, podemos conocer la dirección que tiene el agua subterránea dentro del acuífero de Zacapu donde se presenta una zona de recarga en la parte suroeste y tiene movimiento hacia el norte transmitiendo el agua hacia el acuífero Pastor Ortiz.

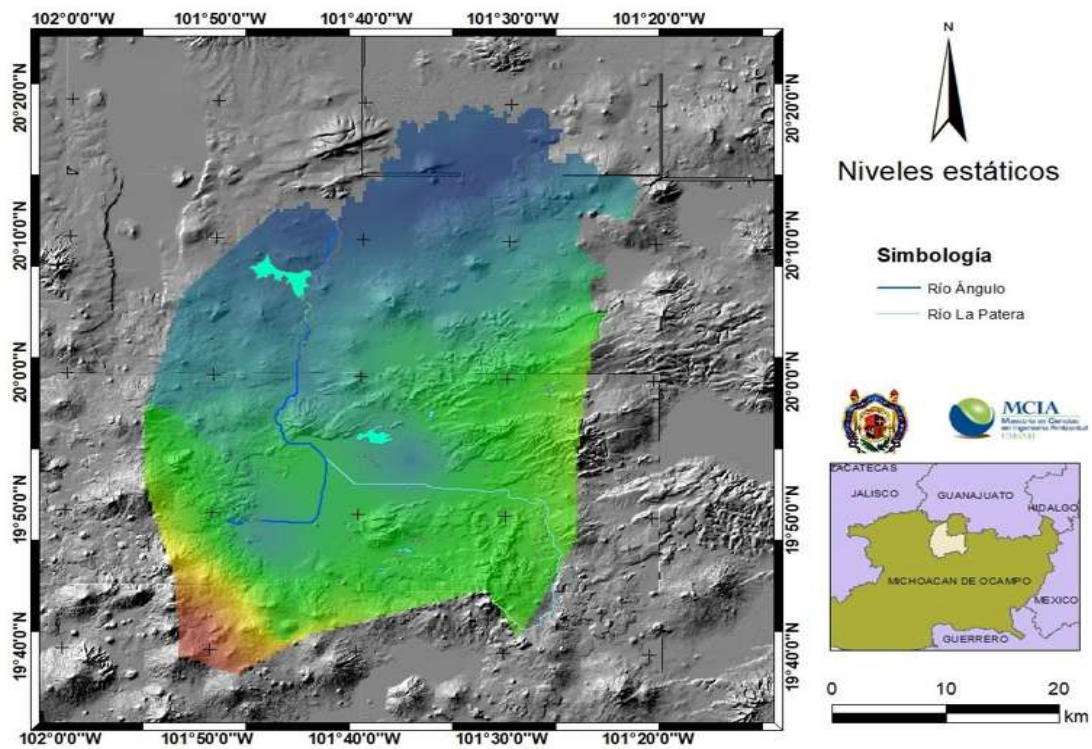


Figura 22. Niveles estáticos para los acuíferos en el año 2021.

## 7.6. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO ZACAPU

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 río 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 m<sup>3</sup>/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 60 km 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 aprovechando al río Angulo para su embalse.

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.

### Geología

De carácter explosivo similar al eje Neovolcánico, cuyas emisiones cubrieron el basamento preexistente 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.

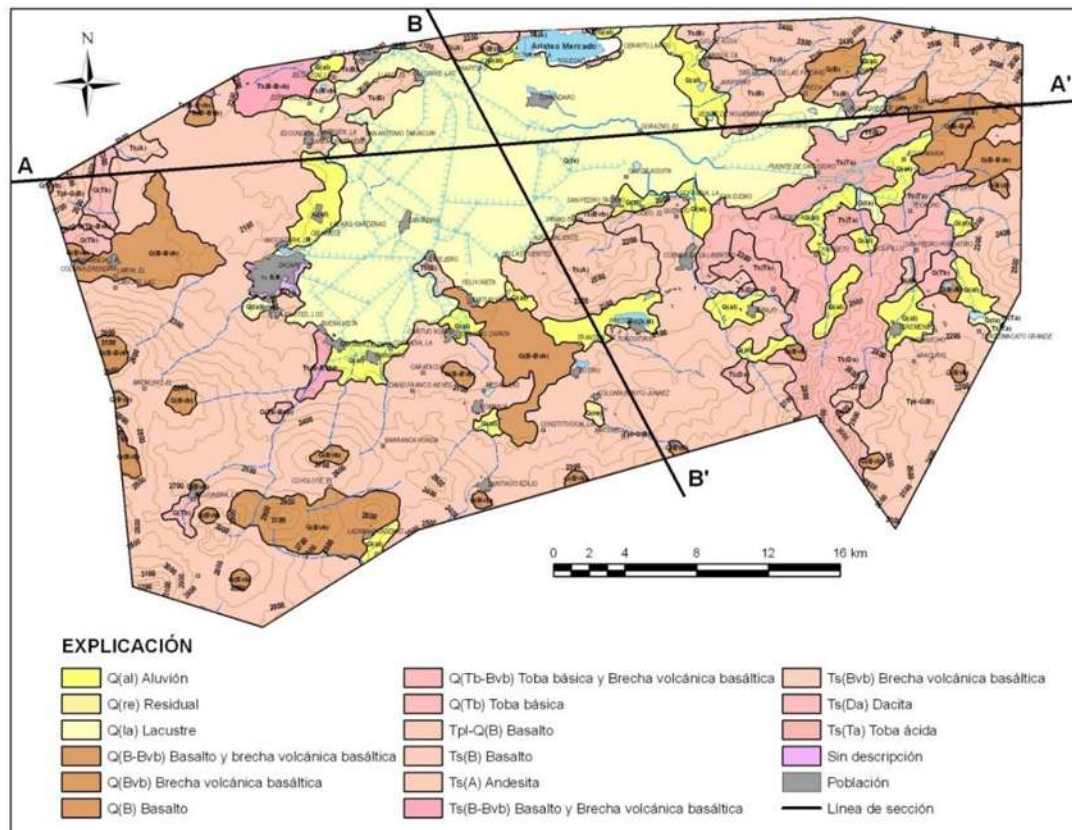


Figura 23. Geología general del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007.

### Hidrogeología

Del análisis geológico, geofísico, hidrodinámico y piezométrico se determina que los acuíferos son de tipo libre o freático a escala regional, o semiconfinados 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.



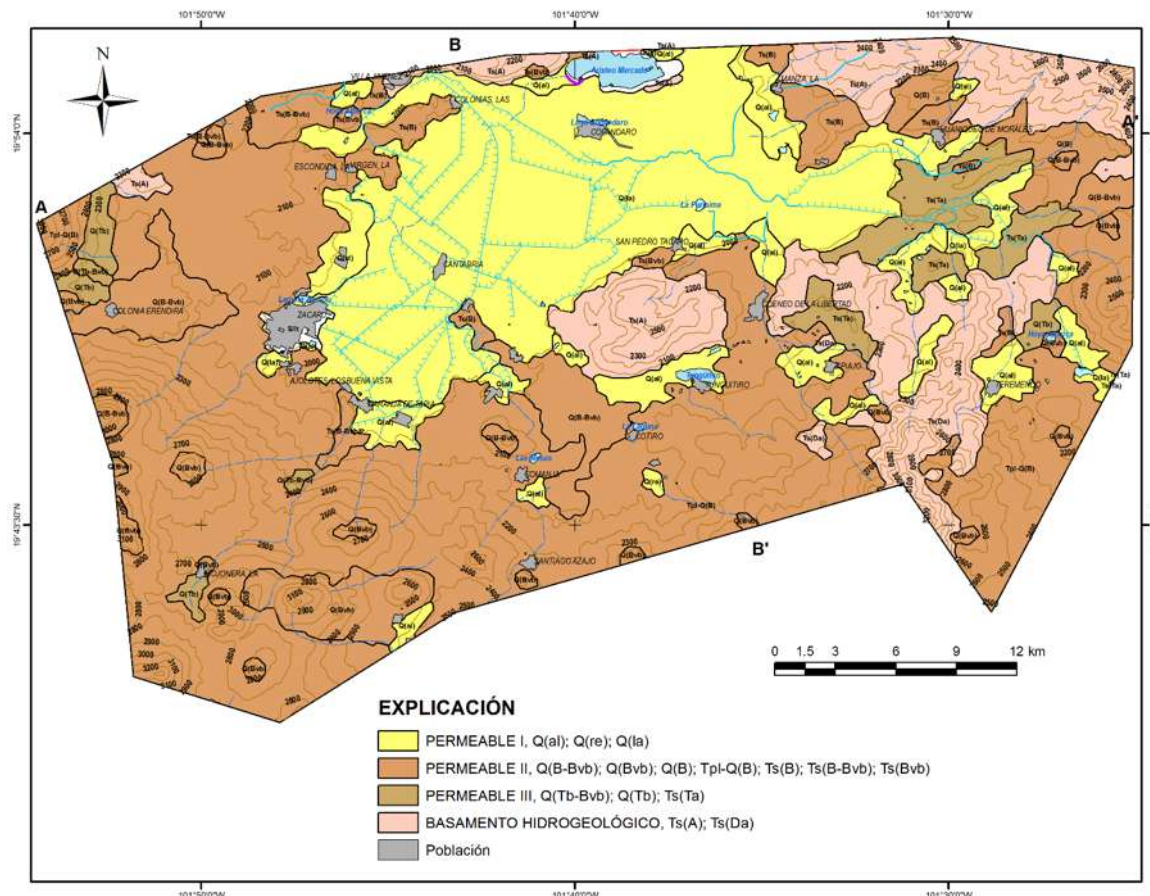



Figura 24. Hidrogeología general del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007.

 Coeficiente de transmisividad (T)

Para 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 m<sup>2</sup>/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 m<sup>2</sup>/s en el límite noreste. El promedio pesado regional es 6.8E-03 y 35.1E-03, o 20.95E-03 m<sup>2</sup>/s como media global.

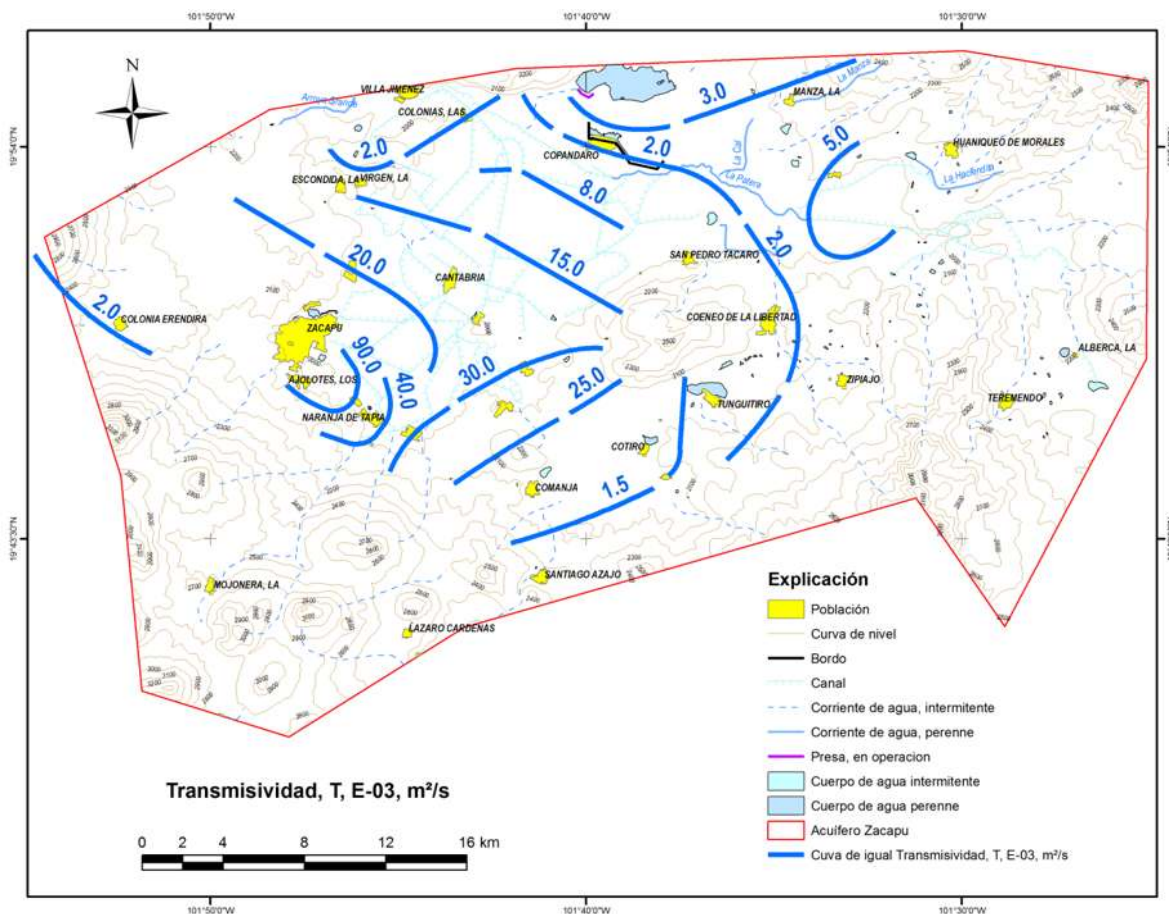


Figura 25. Distribución de transmisividad del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007.

#### ✚ Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S y Sy)

Desde el punto de vista local se detectan acuíferos semiconfinados 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.



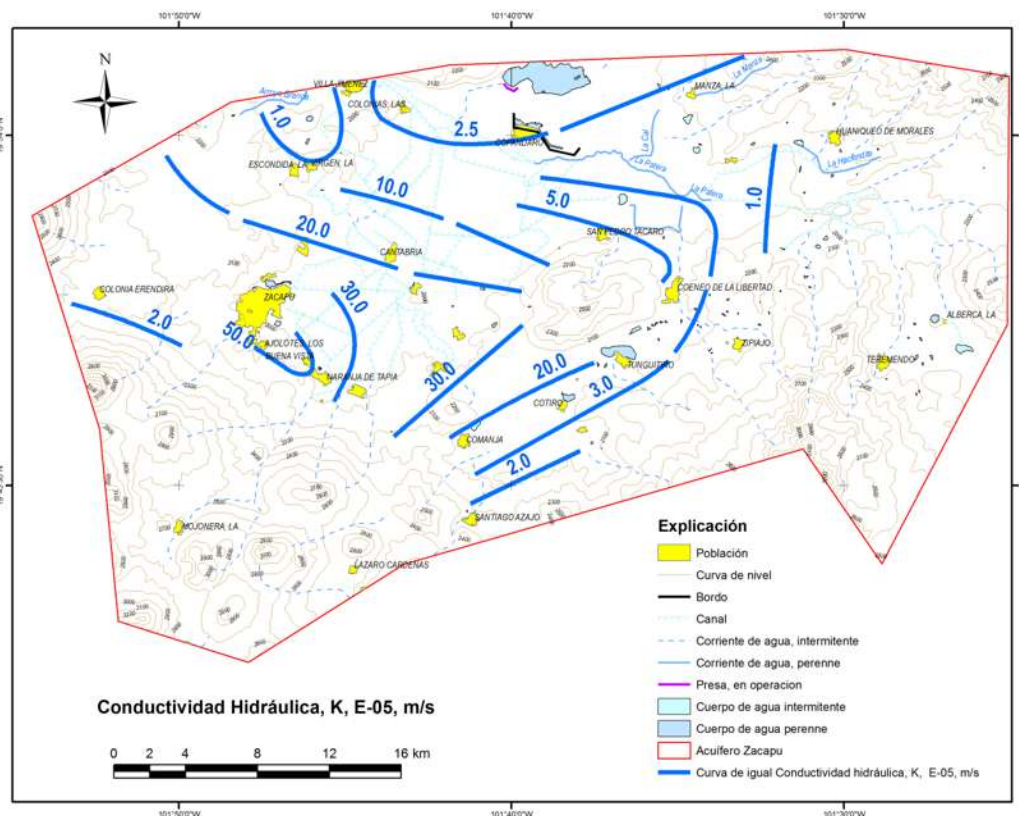


Figura 26. Variación de la conductividad hidráulica del acuífero Zacapu. Fuente: CNA-IMTA 2007.

## 7.7. CARACTERIZACIÓN DEL ACUÍFERO PASTOR ORTIZ

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 6,507 ha mediante el canal principal revestido Santa Ana que alimenta a los canales Santa Ana y Zurumuato con un 7.0 m<sup>3</sup>/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 6,986 ha, se divide en cinco secciones donde se asientan 2675 usuarios; es alimentada con la presa Melchor Ocampo con 200 y 185 Mm<sup>3</sup> de capacidad total y útil, al año se utilizan 300 Mm<sup>3</sup> 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.

El acuífero es libre o freático, o puede ser semiconfinado en zonas locales por la interdigitización de material fino embebido en el acuífero principal. La salida subterránea es por los valles Pastor Ortiz al Norte y Ancyhuácuaro 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.

### 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 como se observa en la Figura 27.

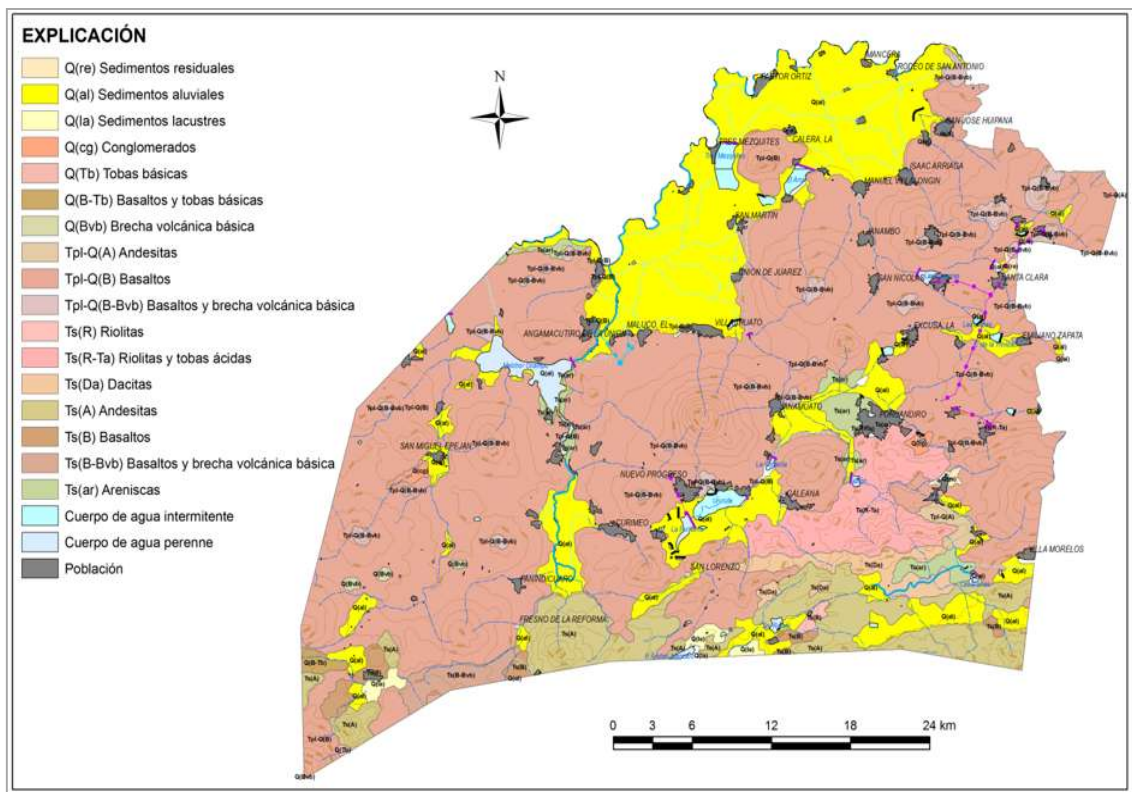


Figura 27. Geología general del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007.

### 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 semiconfinado, 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 semiconfinado.

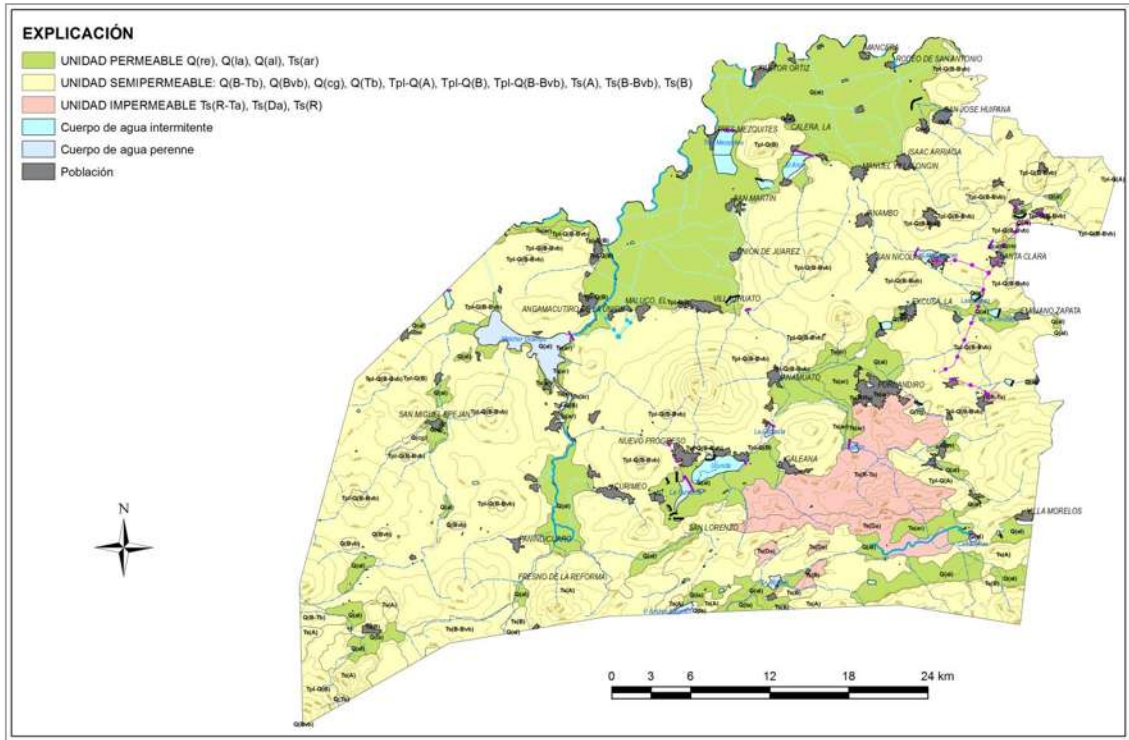


Figura 28. Unidades hidrogeológicas del acuífero Pastor Ortiz. Fuente: CNA-IMTA 2007.

✚ Coeficiente 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  $4.82E-03 \text{ m}^2/\text{s}$  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  $6.0E-03 \text{ m}^2/\text{s}$ , 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  $58.3E-03 \text{ m}^2/\text{s}$ . El acuífero es de tipo libre con 0.13 de rendimiento específico, con drenaje dependiente de la granulometría.



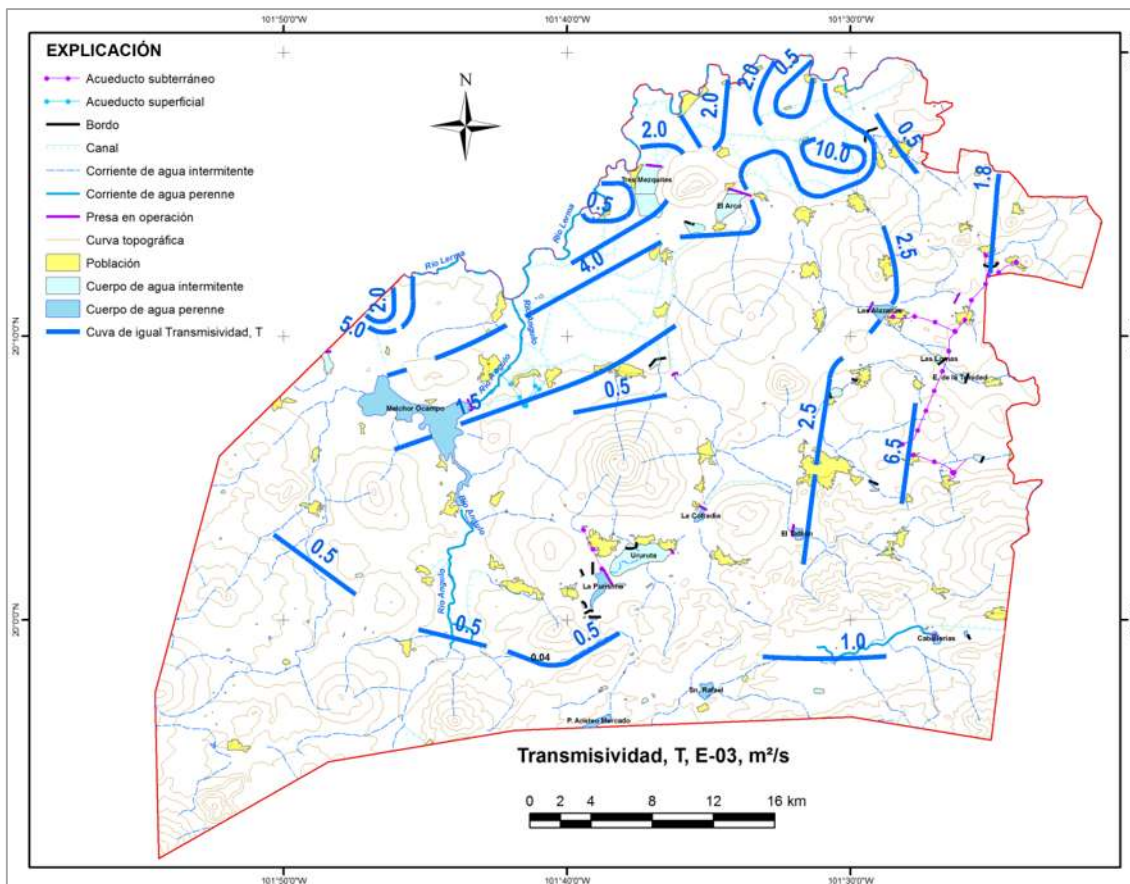


Figura 29. Distribución de transmisividad del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007.

#### ✚ Coeficiente de almacenamiento y rendimiento específico (S y Sy)

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. 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 10.0E-05 m/s. Con promedio general deducido de afloros y pruebas de bombeo que resulta de 5.31E-05 m/s.

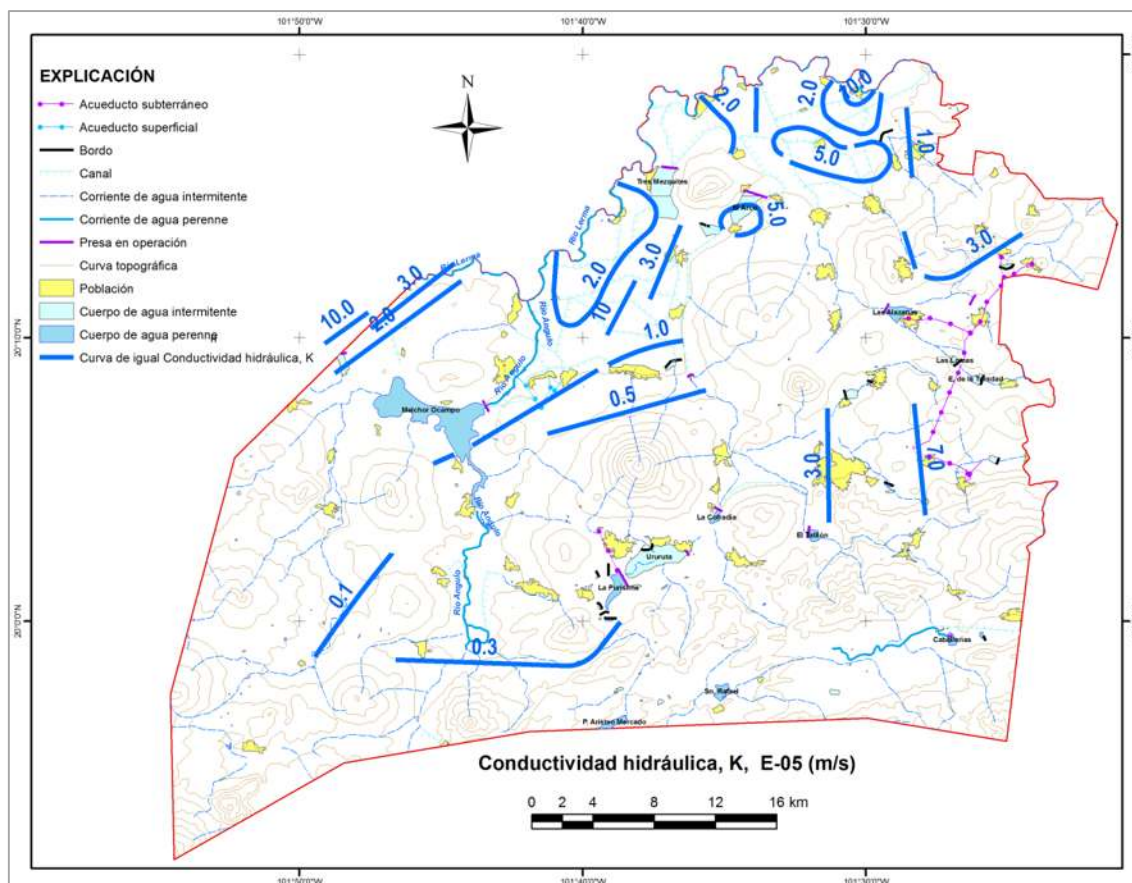


Figura 30. Distribución de la conductividad hidráulica del acuífero Pastor Ortíz. Fuente: CNA-IMTA 2007.

## 7.8. MODELACIÓN HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

Las modelaciones hidrológicas tienen como principal objetivo cuantificar el recurso hídrico que puede escurrir, evaporar y las infiltraciones que se pueden tener en una zona determinada. Es por ello la necesidad de contar con esta modelación matemática para posterior a ello obtener los valores de infiltraciones para los acuíferos en estudio y generar su propia modelación de hidrología subterránea.

Como bien se mencionó en el apartado de metodología, se empleó el modelo de Témez (Estrela, 1999; Temez, 1977), es un modelo hidrológico concentrado que supone que el perfil del suelo está dividido en una zona superior insaturada y otra inferior saturada, y su comportamiento semeja un embalse subterráneo que desagua en la red superficial. 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 semidistribuido.

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 A., 2010).

### 7.8.1. MODELO CONCEPTUAL DE LA HIDROLOGÍA SUPERFICIAL

Dado que se tienen tres estaciones hidrométricas dentro de la cuenca del río Angulo partiremos de ello para generar tres subcuencas denominadas cuenca de cabecera, cuenca media y cuenca baja. Las cuáles serán los puntos de calibración y validación del modelo con los registros históricos aforados dentro de los dos cauces principales de la cuenca como se observa en el Figura 31.

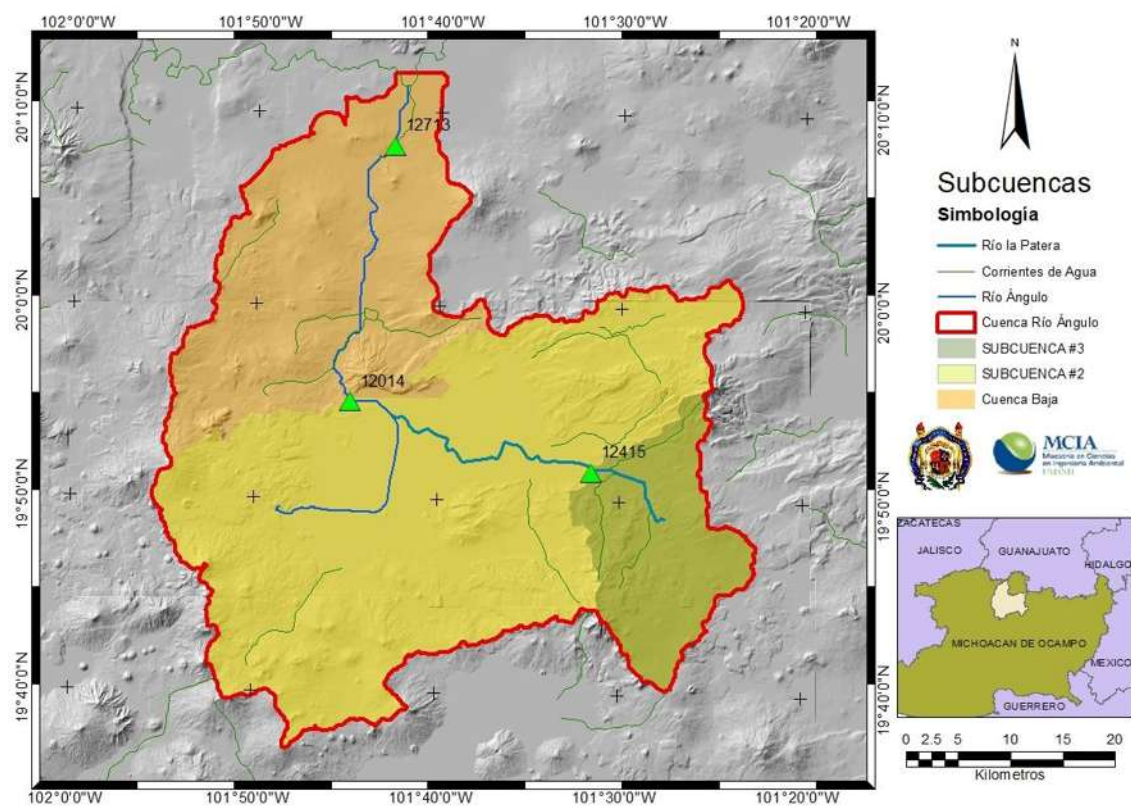


Figura 31. Subcuencas de la cuenca del río Angulo.

De manera secundaria es imperativo obtener microcuencas dentro de las subcuencas ya establecidas acorde a la topografía e hidrografía de la zona como se muestra en el con base en el modelo digital de elevación de la zona, esto con la finalidad de modelar los procesos de escorrentía que descargan a los cauces principales.

Consecuentemente el tener microcuencas implica realizar estaciones ficticias que nos proporcionen información puntual para cada una de las microcuencas tanto en precipitación como evapotranspiración. Para su creación se necesita saber la influencia que tiene cada estación climática sobre cada microcuenca, lo cual fue resuelto con el uso de polígonos de Thiessen y mediante el método de la distancia euclidiana al cuadrado se calcularon pesos



para obtener los valores para cada una de las estaciones ficticias como se puede visualizar en la Figura 32.

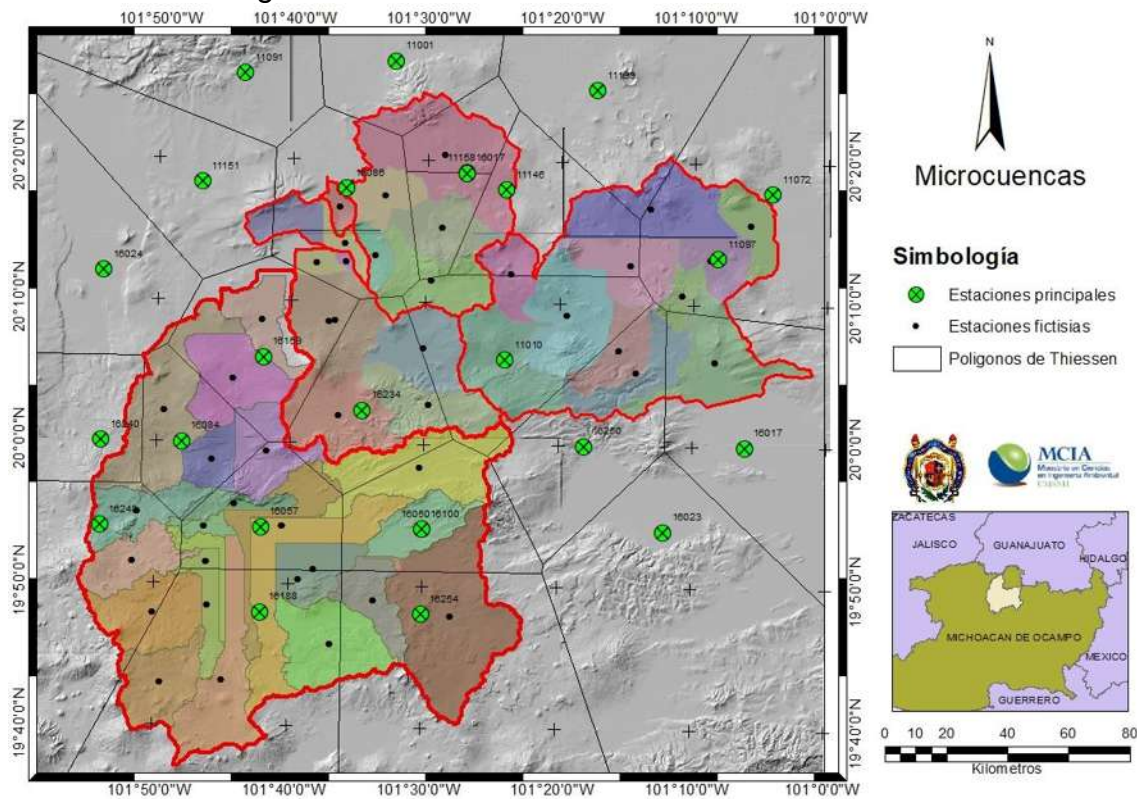


Figura 32. Estaciones ficticias en microcuencas con polígonos de Thiessen.

Para la aplicación del modelo Témez se hace uso de la herramienta informática EvalHid donde la calibración se realizó a partir de un calibrador automático que hace uso del algoritmo evolutivo 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)

### 7.8.2. INDICADORES DE LA BONDAD DE AJUSTE DEL MODELO SUPERFICIAL

 Coeficiente 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).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - Y_{i\text{sim}})^2}{\sum_{i=1}^n (Y_{i\text{obs}} - \bar{Y}_{\text{obs}})^2}$$

En la ecuación anterior  $Y_i$  obs representa el  $i$ -ésimo valor observado que está siendo evaluado,  $Y_i$  sim compone el  $i$ -ésimo valor simulado que está siendo evaluado,  $\bar{Y}_{obs}$  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. Los rangos para determinar la calidad de la modelación se presentan en la Tabla 21.

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

Tabla 21. Rangos de ajuste recomendados para modelaciones mensuales con NSE. Fuente: 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	$NSE \leq 0.50$

✚ Coeficiente de correlación de Pearson.

El coeficiente de Correlación de Pearson ( $r$ ) 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  $r$  toma el valor de  $1$  se tiene una correlación completa positiva; es decir, todos los datos describen una línea recta con pendiente positiva.

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



Tabla 22. Rangos de ajuste para el Coeficiente de Correlación de Pearson.

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

### 7.8.3. CALIBRACIÓN DEL MODELO SUPERFICIAL

Como se comentó anteriormente, los puntos elegidos para calibrar son aquellos donde se sitúan las estaciones hidrométricas, por su naturaleza como punto de observación y de aforo en las escorrentías para el río Angulo y río La Patera (Figura 31).

#### Subcuenca de Cabecera

Está es una cuenca que tiene alrededor de 262 km<sup>2</sup> cuenta con dos canales de riego en la zona, los cuales se han monitoreado con las estaciones hidrométricas 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.

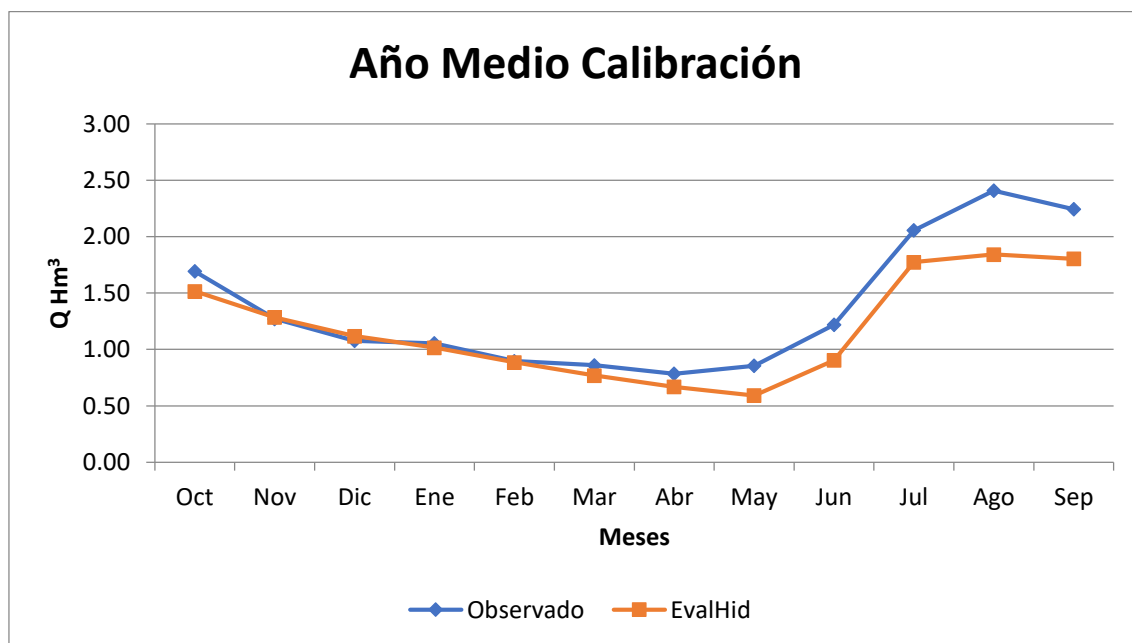


Figura 33. Calibración del año medio para la subcuenca de cabecera.

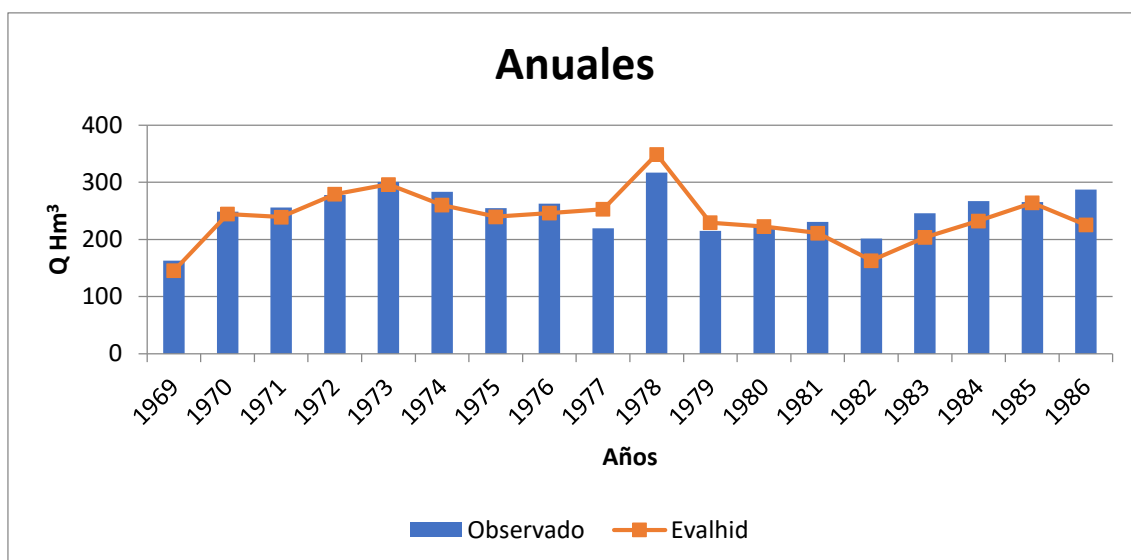


Figura 34. Calibración anual para la subcuenca de cabecera.

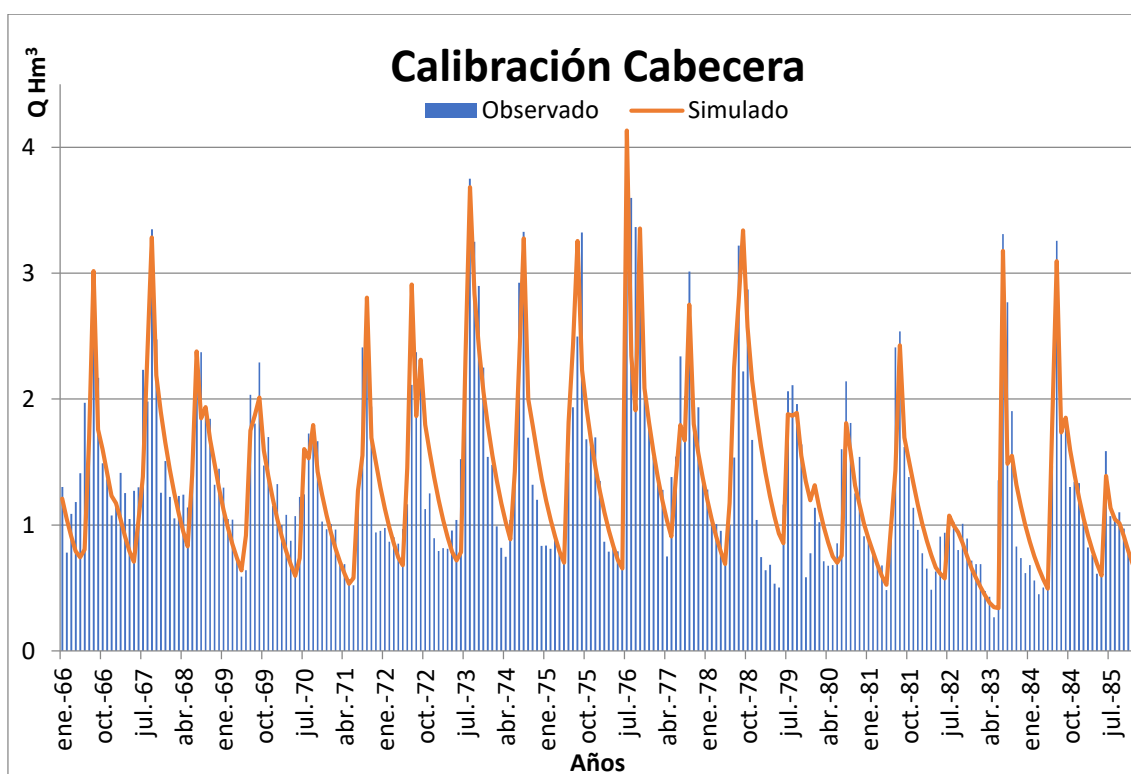


Figura 35. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca de cabecera.

 Subcuenca Media

El área que logra cubrir esta cuenca, abarca la parte alta y media de la cuenca con una superficie aproximada de 1,504 km<sup>2</sup> 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.

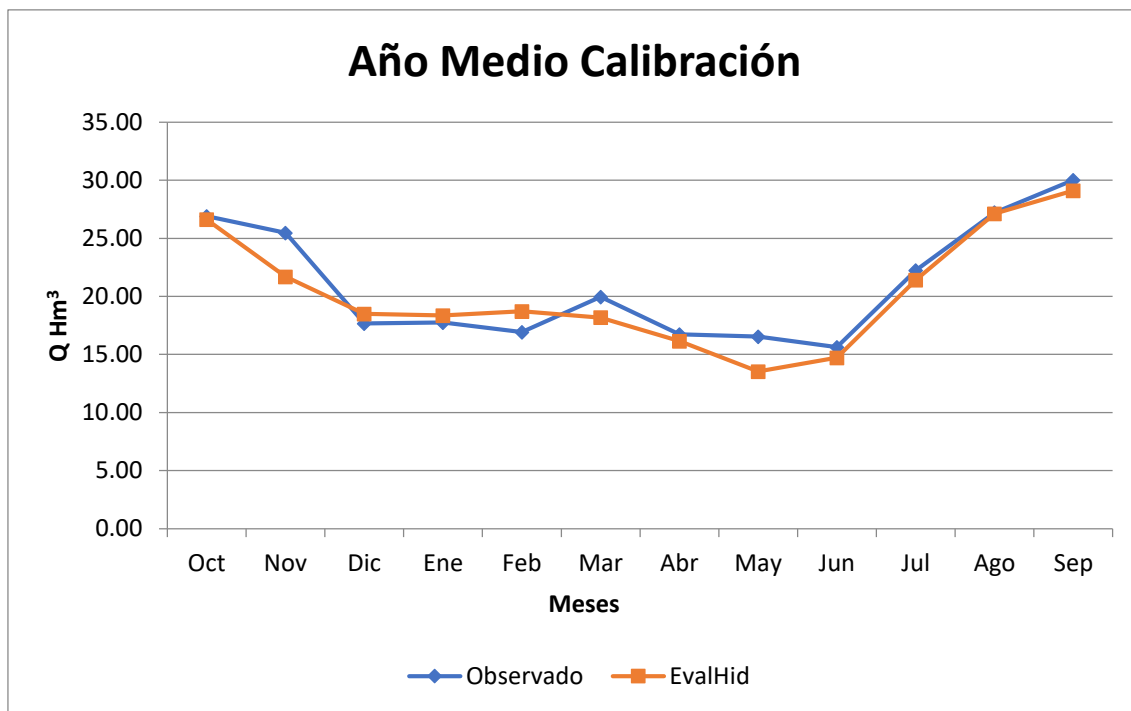


Figura 36. Calibración para el año medio de la subcuenca media.

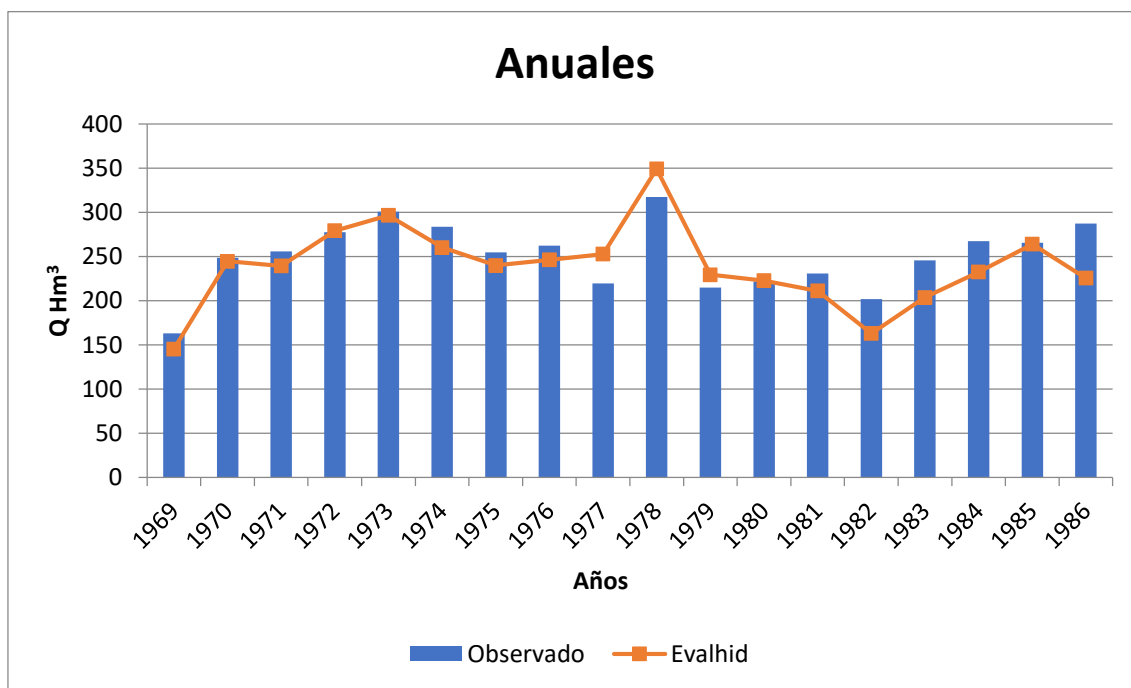


Figura 37. Calibración anual para la subcuenca media.

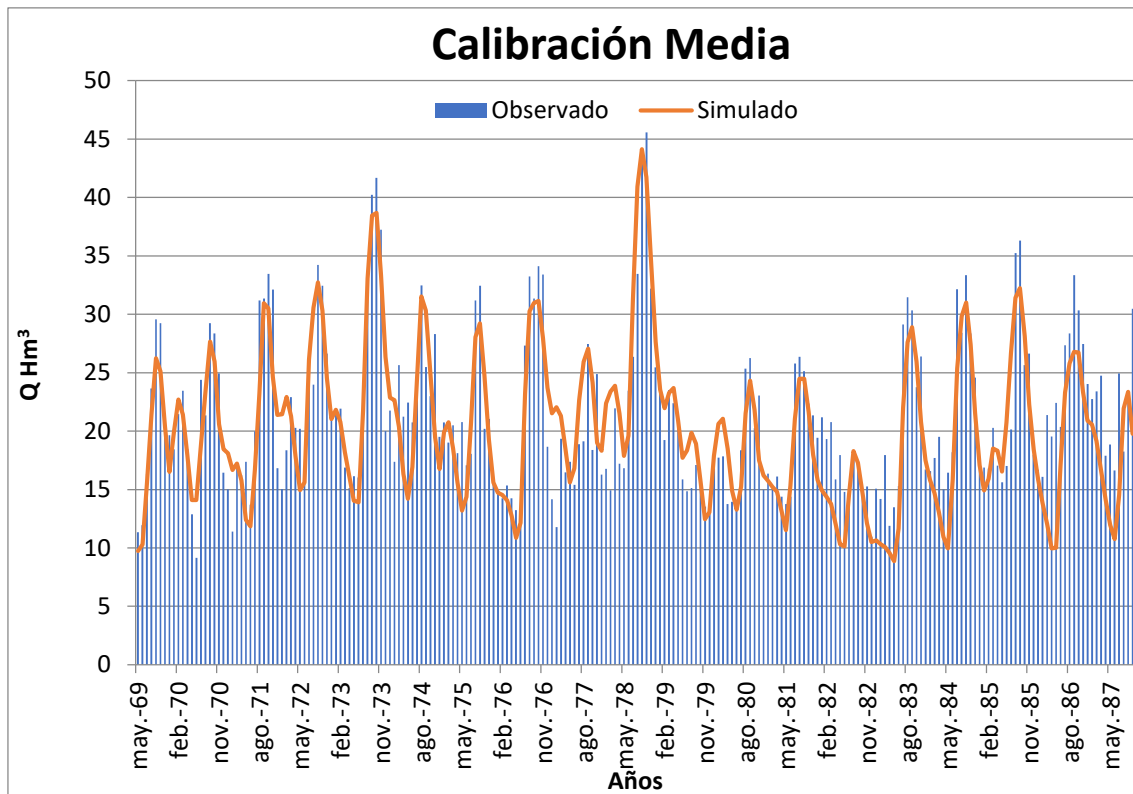



Figura 38. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca media.

 Subcuenca baja

Es la cuenca que comprende aproximadamente en su totalidad de área, dentro de ella se encuentra la presa del rosario.

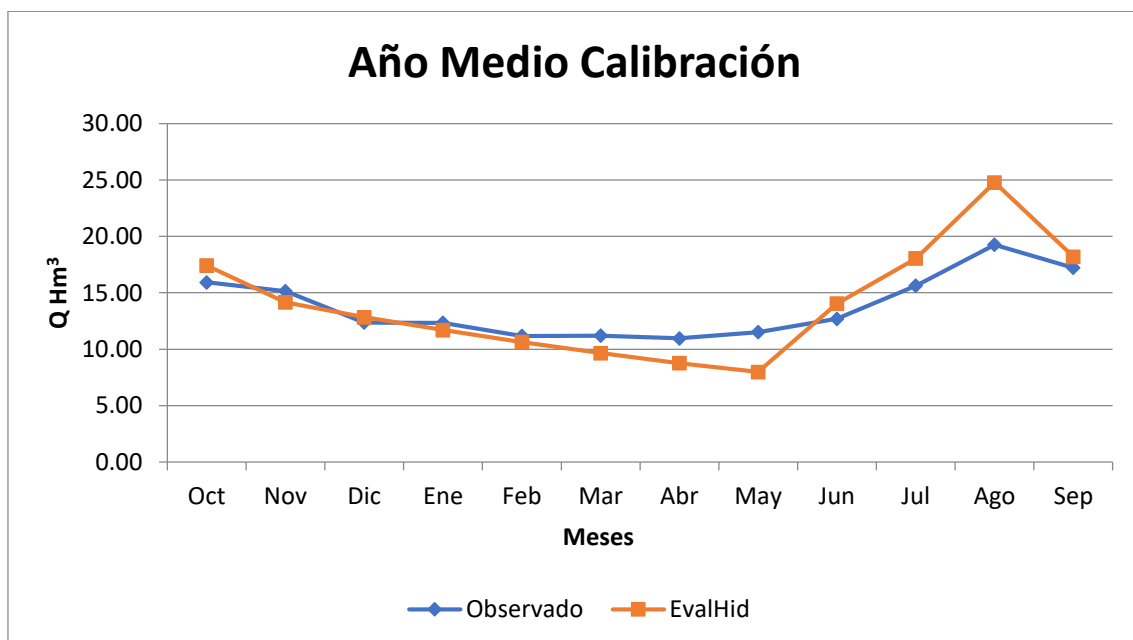


Figura 39. Calibración para el año medio de la subcuenca baja.

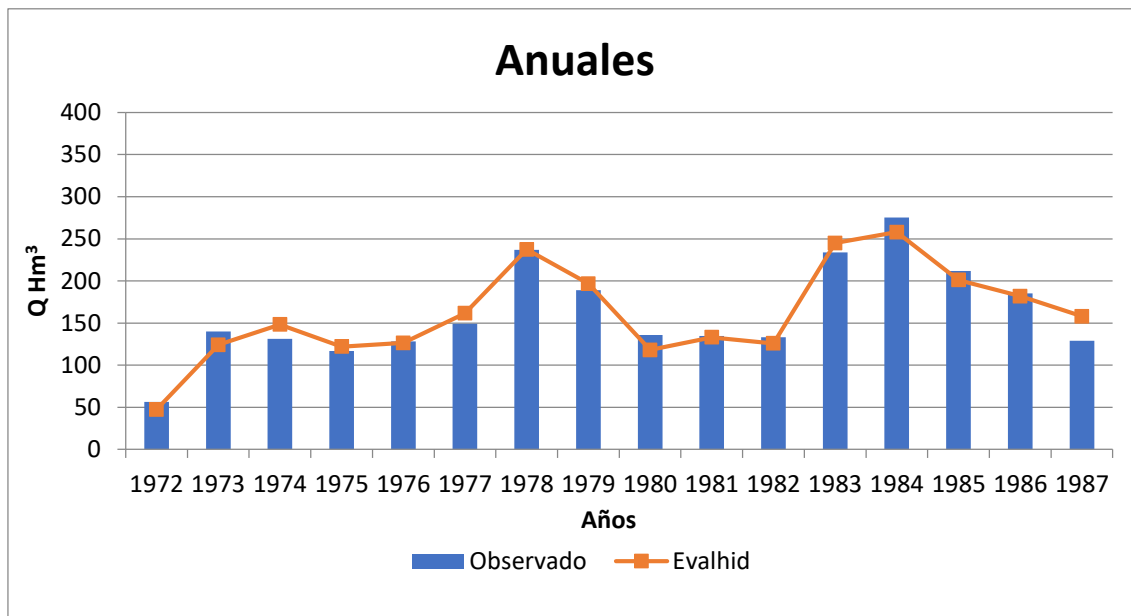


Figura 40. Calibración anual para la subcuenca media.

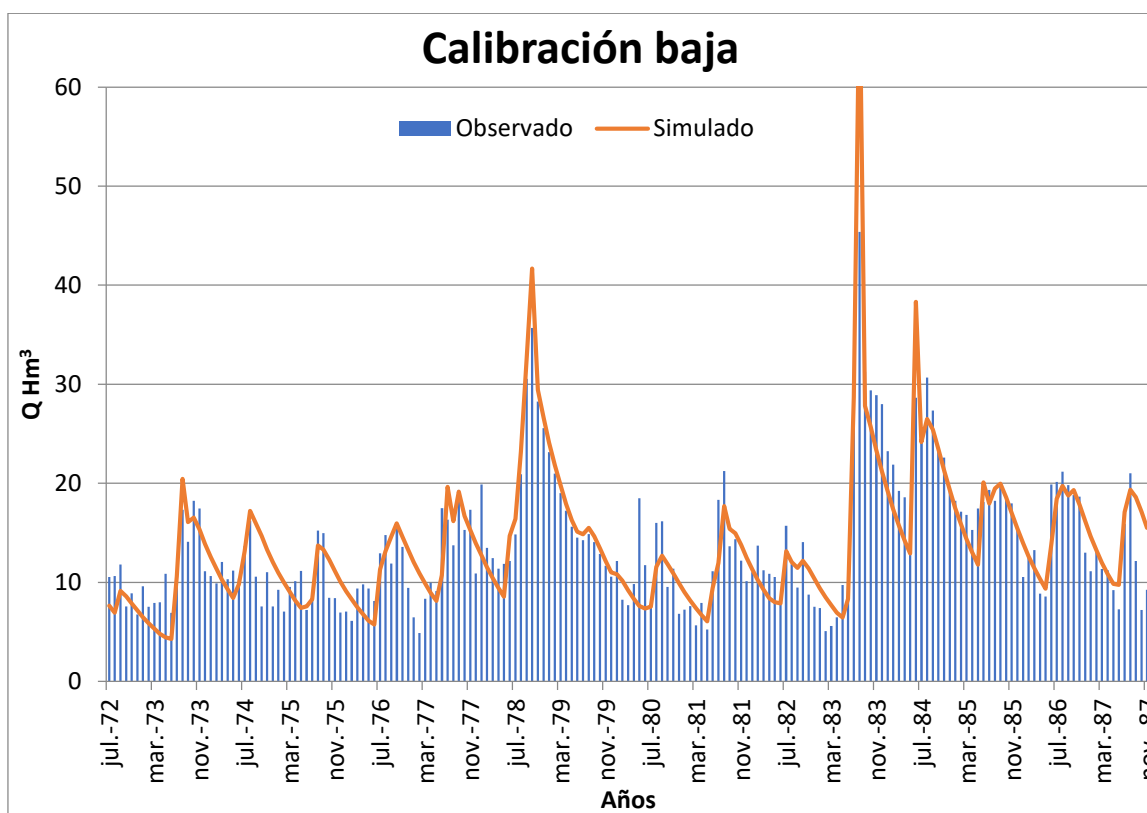


Figura 41. Calibración mensual para la serie histórica de la subcuenca baja.

Una vez realizadas las modelaciones correspondientes para las subcuencas del río Ángulo como se puede observar de la Figura 33 a la Figura 41 en seguida se enuncian los valores correspondientes para cada uno de los índices de ajuste y su calidad para cada uno en la Tabla 23.

**Tabla 23. Parámetros calibrados para cada subcuenca y su respectivo valor de ajuste.**

Subcuenca	PARÁMETROS DE CALIBRACIÓN				INDICADORES DE AJUSTES		
	Hmáx (mm)	C	Imáx (mm)	$\alpha$	NSE	ln NSE	r
Baja	692.24	0.10	492.61	0.013	0.74	0.49	0.89
Media	387.10	0.10	512.81	0.10	0.74	0.67	0.86
Cabecera	220.87	0.20	439.25	0.11	0.71	0.67	0.85

Como se puede observar en la Tabla 23, el mejor ajuste se obtuvo para la subcuenca de cabecera. Comparando los valores acordé a los rangos para NSE y r de la Tabla 21 y Tabla 22 se tendría una modelación muy buena. Es importante tener en cuenta que las modelaciones para cada una de las subcuencas cuentan con valores diferentes entre ellas, debido a que se han tomado en cuenta las características físicas y geológicas de las zonas. Por ejemplo, para el caso particular de la subcuenca de cabecera esta cuenta con pendientes fuertes con pocas infiltraciones y mucha escorrentía. Para el caso de la subcuenca media la infiltración se incrementa ya que el suelo es más permeable y la zona es de tipo llanura; sin embargo, para la subcuenca baja que presenta menor calificación por parte del ln NSE es debido a la mala calidad de los datos registrados en las estaciones climáticas e hidrométricas.

Para el caso de las cuencas situadas al norte de la cuenca del Río Angulo, como no se tienen estaciones hidrométricas cercanas para generar una comparativa entre los caudales simulados por EvalHid y los observados, se tomaron los parámetros con mejor ajuste, que en este caso fue de la subcuenca de cabecera y con ellos se simularon los posibles caudales para cada una, así como las infiltraciones generadas por las precipitaciones de cada subcuenca.

En la Tabla 24, se pueden conocer una parte de los caudales que fueron simulados para las cuencas que se localizan al norte de la cuenca del río Angulo y con los cuales se trabajaran.

**Tabla 24. Comparativa de caudales simulados de las cuencas del norte, con parámetros de subcuenca de cabecera del río Ángulo.**

Cuenca Puruandiro (hm <sup>3</sup> )		Cuenca Pastor Ortiz (hm <sup>3</sup> )		Cuenca Penjamo (hm <sup>3</sup> )		Cuenca Abasolo (hm <sup>3</sup> )		Cuenca Huanimaro (hm <sup>3</sup> )	
oct.-82	26.84	oct.-82	3.47621	oct.-79	0.50562	ene.-71	0.11952	oct.-74	24.21849
nov.-82	14.61	nov.-82	2.76197	nov.-79	0.40173	feb.-71	0.09496	nov.-74	16.54911
dic.-82	9.23	dic.-82	2.19448	dic.-79	0.31919	mar.-71	0.07545	dic.-74	13.98365

ene.-83	9.81	ene.-83	1.74359	ene.-80	0.33477	abr.-71	0.05995	ene.-75	18.22649
feb.-83	8.45	feb.-83	1.3865	feb.-80	0.3043	may.-71	0.04763	feb.-75	12.68014
mar.-83	8.23	mar.-83	1.16357	mar.-80	0.24178	jun.-71	0.13636	mar.-75	10.07541
abr.-83	7.72	abr.-83	9.88369	abr.-80	0.1921	jul.-71	0.40888	abr.-75	8.00579
may.-83	7.12	may.-83	8.1546	may.-80	0.15263	ago.-71	0.60267	may.-75	6.36087
jun.-83	6.52	jun.-83	6.57854	jun.-80	0.13701	sep.-71	1.48215	jun.-75	5.05392
jul.-83	5.98	jul.-83	5.86518	jul.-80	0.48324	oct.-71	0.55659	jul.-75	4.04586
ago.-83	7.26	ago.-83	4.87721	ago.-80	1.61714	nov.-71	0.44574	ago.-75	3.68348
sep.-83	6.64	sep.-83	3.91623	sep.-80	0.9234	dic.-71	0.35416	sep.-75	3.0966
oct.-83	44.18	oct.-83	3.14459	oct.-80	0.73367	ene.-72	0.28139	oct.-75	31.51098
nov.-83	19.17	nov.-83	2.49849	nov.-80	0.58293	feb.-72	0.22357	nov.-75	17.03287
dic.-83	25.64	dic.-83	1.98513	dic.-80	0.46315	mar.-72	0.17764	dic.-75	29.24676

Una vez concluida la modelación matemática superficial y tras haber obtenido un índice de ajuste muy bueno para la cuenca de cabecera se pueden tomar los parámetros de infiltración generados para incluirlos en la modelación hidrológica subterránea que es un parámetro que se necesita para generarla.

#### 7.8.4. SIGNIFICACIÓN DEL COEFICIENTE DE CORRELACIÓN LINEAL PEARSON

Cuando se tiene calculado el valor de correlación de Pearson lo siguiente es determinar si aquellos valores de  $r$  a partir de las variables  $X$  y  $Y$ , están siendo relacionadas entre ellas o solo muestran valores de correlación por efectos del azar.

Consecuentemente se podrá afirmar mediante una probabilidad diferente de cero con el apoyo de dos hipótesis donde:

$H_0$  :  $r_{xy} = 0$ , el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuya correlación es cero ( $\rho = 0$ ).

$H_1$  :  $r_{xy} \neq 0$ , el coeficiente de correlación obtenido procede de una población cuyo coeficiente de correlación es distinto de cero ( $\rho \neq 0$ ).

En consecuencia, dado un cierto coeficiente de correlación  $r_{xy}$  obtenido en una determinada muestra se trata de comprobar si dicho coeficiente es posible que se encuentre dentro de la distribución muestral especificada por la Hipótesis nula. A efectos prácticos, se calcula el número de desviaciones tipo que se encuentra el coeficiente obtenido del centro de la distribución, según la formula conocida:

$$t = \frac{r_{xy} - 0}{\sqrt{\frac{1 - r_{xy}^2}{N - 2}}}$$



Una vez calculando  $t$ , se compara el valor obtenido con el existente en tablas para un determinado nivel de significación  $\alpha$  y  $N-2$  grados de libertad  $t(\alpha, N-2)$ , que como se sabe, marca el límite pertenencia de un cierto coeficiente  $r_{xy}$  a la distribución muestra de correlaciones procedentes de una población con  $\rho = 0$ . De esta forma si:

$t > t(\alpha, N-2)$  Se rechaza la Hipótesis nula. La correlación obtenida no procede de una población cuyo valor  $\rho_{xy} = 0$ . Por tanto, las variables están relacionadas.

$t \leq t(\alpha, N-2) \Rightarrow$  Se acepta la Hipótesis nula. La correlación obtenida procede de una población cuyo valor  $\rho_{xy} = 0$ . Por tanto, ambas variables no están relacionadas.

Para nuestro caso de estudio;

**Tabla 25. Significación del coeficiente de correlación de Pearson.**

Datos	r	t	t(0.05,8)	
Cabecera	355	0.85	30.32	1.656 $\therefore t > t(0.05,8)$ variable relacionada
Media	222	0.86	25.00	1.658 $\therefore t > t(0.05,8)$ variable relacionada
Baja	185	0.89	26.41	1.659 $\therefore t > t(0.05,8)$ variable relacionada

#### 7.8.5. COMPARATIVA ENTRE SIMULACIONES CON MODELO TEMEZ Y HBV

Como parte de conocer y explorar la herramienta informática EvalHid se trabajó con el modelo de HBV el cual contempla más parámetros para lograr una simulación a comparación del modelo de Temez. Los módulos que considera el modelo son; precipitación efectiva, humedad del suelo, evapotranspiración, respuesta de escorrentía y nieve.

**Tabla 26. Parámetros del modelo HBV. Fuente: (Paredes et al., 2017)**

Parámetro	Descripción	Rango	
		mínimo	máximo
FC	Capacidad de campo	1	2
$\beta$	Coefficiente de forma para la infiltración	200	7800
Pwp	Punto de marchitez de la vegetación	0.1	0.2
Lmax	Umbral de descarga rápida	110	130
K0	Coefficiente de descarga rápida	0.15	0.3
K1	Coefficiente de recesión	0.15	0.23
K2	Coefficiente de recesión	0.03	1
Kperc	Coefficiente de percolación	0.5	1

Los periodos simulados fueron los mismos al igual que con el modelo de Temez, la única variante fueron los nuevos parámetros que contempla HBV y sin contemplar nieve ya que dentro de la zona de estudio no se tienen esa condición climática.

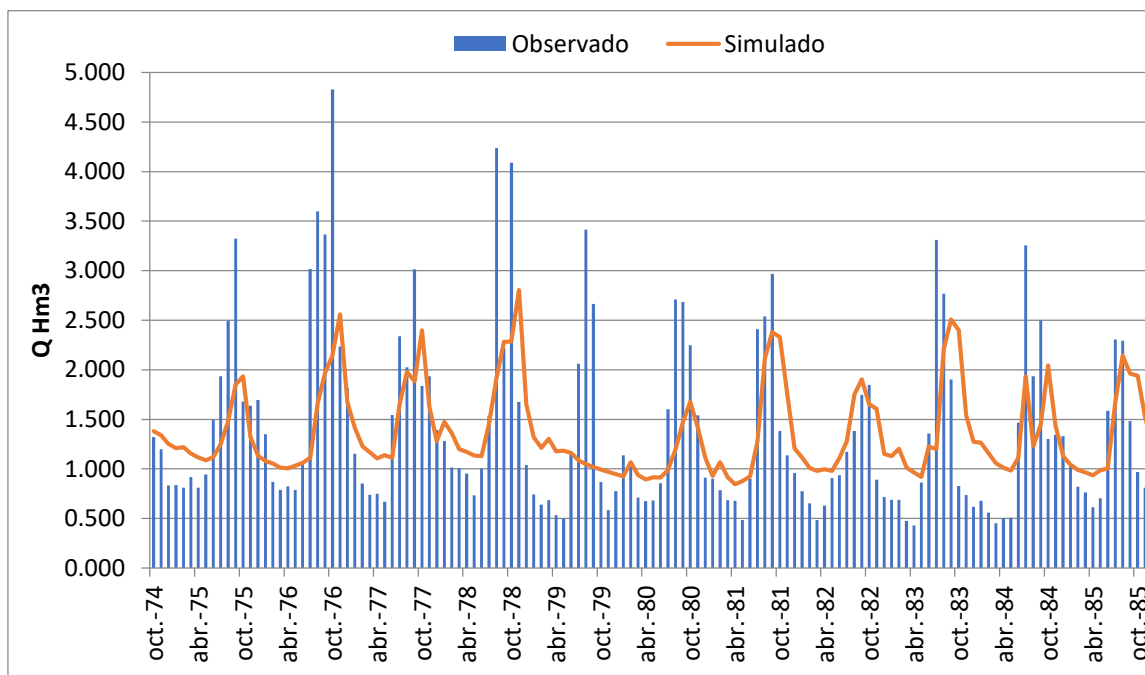


Figura 42. Calibración con HBV para serie histórica de la cuenca de Cabecera.

Tabla 27. Parámetros de mejor ajuste para el modelo de HBV para la subcuenca de Cabecera.

	Beta	Fc	Pwp	Lmax	K0	K1	K2	Kperc
<b>Cabecera</b>	1.0000	6948.7796	0.1088	121.4286	0.2143	0.2143	0.0253	0.5000

Como se puede observar en la Figura 42, los simulados contra los observados existe mucha diferencia entre ellos y en la Tabla 28, se pueden observar los parámetros que se obtuvieron tras realizar el mejor ajuste y la mejor calibración que se pudo lograr.

Los índices de ajuste que se pueden observar en la Tabla 28 corresponden para la subcuenca de Cabecera y comparados con los índices de ajuste para la misma subcuenca pero con el modelo de Témez en la Tabla 23 se puede ver la gran variación que se presenta y por lo tanto HBV no es un modelo que represente de forma más cercana a las escorrentías para dicha zona de estudio esto principalmente debido a la escases de datos para llenar los parámetros que presenta el método.

Tabla 28. Indicadores de ajuste para la subcuenca de Cabecera con modelo HBV.

INDICADORES DE AJUSTE		
NSE	ln NSE	r
0.18	0.21	0.38

## 7.9. MODELACIÓN HIDROLÓGICA SUBTERRÁNEA

Esta modelación matemática como objetivo principal es entender el funcionamiento hidráulico de los acuíferos, conocer la recarga que presentan, sus extracciones, propiedades hidrogeológicas para posterior a ello obtener una modelación en conjunto con la modelación superficial para llevar a cabo una adecuada gestión de los recursos hídricos.

### 7.9.1. MODELO CONCEPTUAL DE LA HIDROLOGICA SUBTERRÁNEA

Para esta modelación se optó por una discretización de 3000 x 3000 metros para cada celda y mantenerlas de forma homogénea con la finalidad de representar a detalle el comportamiento del agua subterránea. Con esas dimensiones establecidas se obtiene una malla de 23 columnas con 28 filas como se observa en la Figura 43. Para ello la zona de estudio está conformada por dos acuíferos de tipo libre.

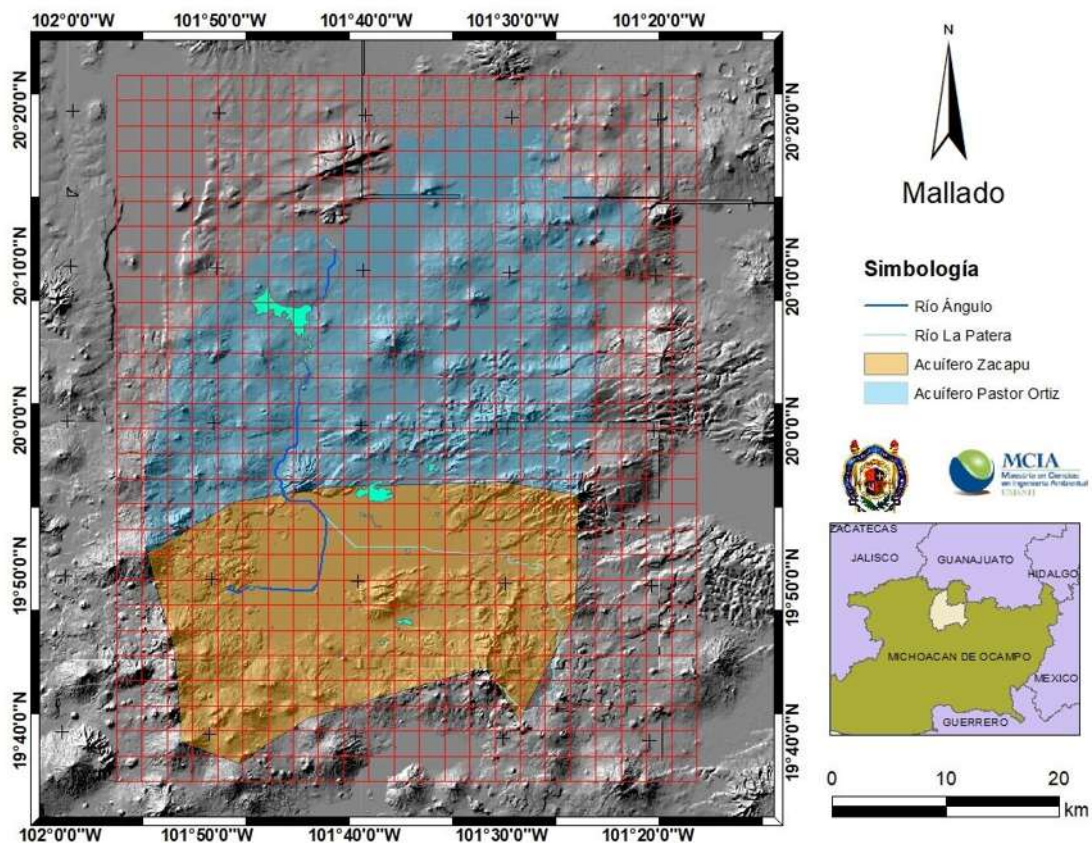
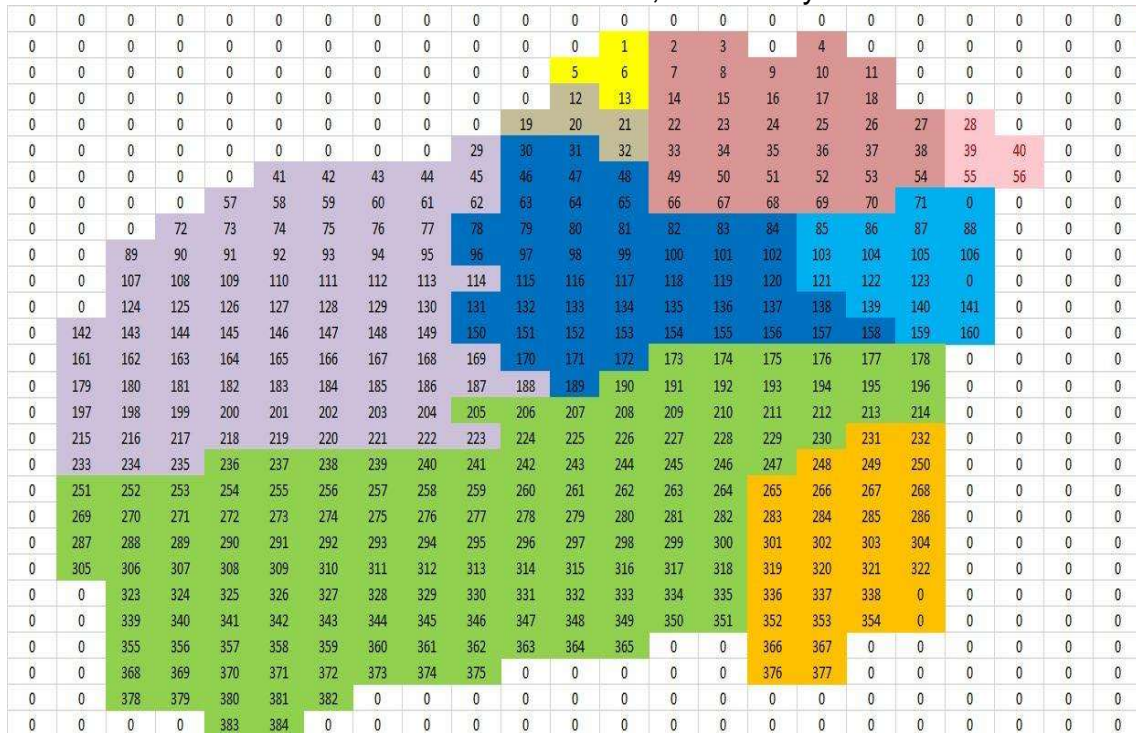


Figura 43. Malla para modelo de la hidrología subterránea.

Primeramente, se parte de la creación de un mallado el cual tendrá las dimensiones anteriormente mencionadas, esto con la ayuda de los SIG para continuar con el ingreso de los datos hidrogeológicos de ambos acuíferos, es importante mencionar que dichos datos son: la transmisividad, conductividad hidráulica, acciones elementales y coeficiente de almacenamiento cuyos valores ya fueron definidos en los apartados 7.6 y 7.7. de este documento. Sin embargo, no se puede dejar de lado el pre-proceso que es la configuración de las celdas

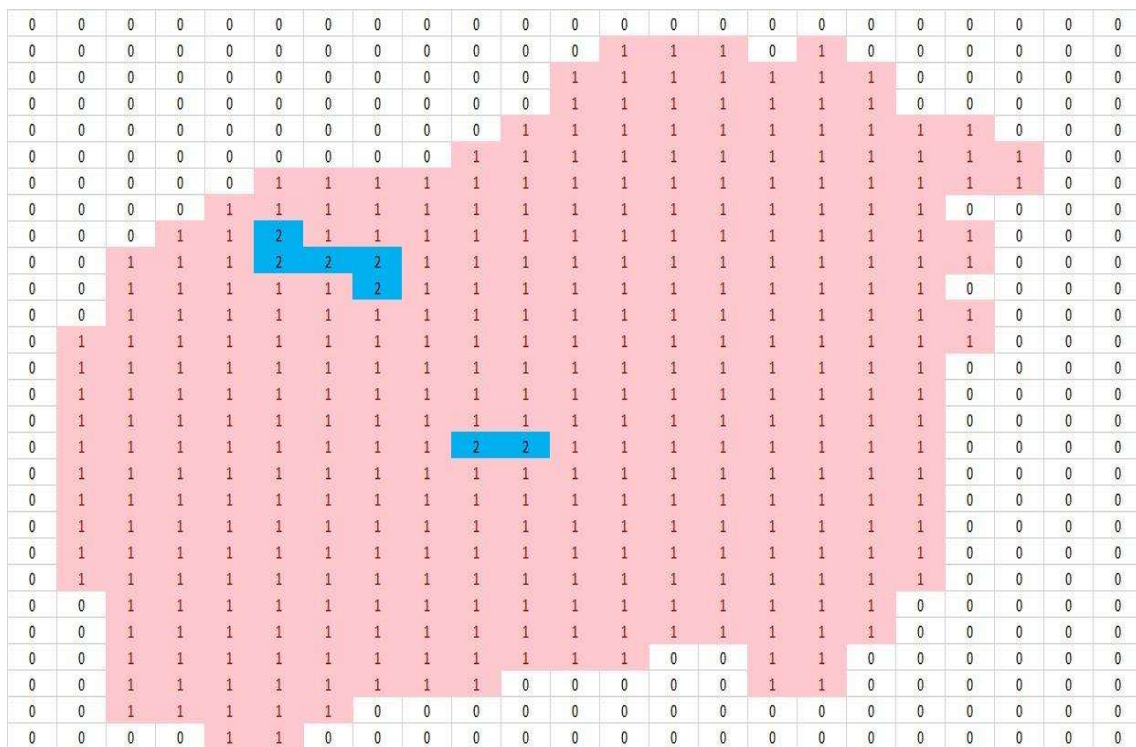


que conforman el mallado y el cual consiste en numeración de cada una de ellas, así como definir cuáles son las celdas activas, inactivas y de niveles constantes.



**Figura 44. Numeración de celdas del área de influencia.**

Dentro de la Figura 44, se puede observar existen 384 celdas activas las cuales también han sido agrupadas en 8 grupos representando a cada una de las cuencas superficiales para posterior a ello ingresar las acciones elementales también agrupadas de esa forma. En la Figura 45, se configura el modelo para en seguida comenzar a ingresar valores geomorfológicos.







Dentro de los monitoreos realizados en 2014 y 2017 para la zona de estudio, se obtuvieron los niveles estáticos para el último año mencionado y con los cuales se obtuvo una interpolación para toda la zona de ambos acuíferos lo cual propicia el ingreso de las elevaciones para cada celda del mallado de este proyecto (Figura 47).

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1662	1670	1678	0	1708	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1653	1657	1664	1674	1690	1710	1727	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1653	1658	1662	1674	1696	1716	1731	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1655	1658	1661	1664	1667	1702	1725	1747	1750	1766	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	1660	1662	1670	1678	1682	1697	1722	1775	1771	1787	1802	1816	0	0	0
0	0	0	0	1883	1673	1658	1666	1678	1690	1701	1714	1736	1751	1774	1793	1793	1809	1825	1828	0	0	0	0
0	0	0	0	1784	1697	1682	1688	1687	1682	1699	1720	1737	1755	1776	1794	1811	1826	1838	0	0	0	0	0
0	0	0	1745	1727	1712	1701	1699	1688	1691	1706	1725	1752	1772	1794	1816	1833	1847	1859	1866	0	0	0	0
0	0	1777	1762	1748	1731	1719	1718	1733	1755	1788	1812	1837	1861	1876	1788	1888	1895	1899	1899	0	0	0	0
0	0	1796	1783	1771	1755	1743	1740	1747	1764	1789	1827	1860	1890	1914	1933	1938	1936	1939	0	0	0	0	0
0	0	1813	1803	1790	1777	1762	1758	1767	1787	1817	1862	1902	1939	1973	1987	1988	1982	1976	1968	0	0	0	0
0	1836	1830	1817	1796	1775	1777	1769	1781	1809	1842	1894	1941	1987	2025	2045	2040	2026	2011	1991	0	0	0	0
0	1919	1896	1850	1858	1857	1818	1786	1771	1789	1822	1866	1923	1976	2038	2086	2112	2091	2063	0	0	0	0	0
0	1983	1956	1931	1873	1864	1835	1798	1761	1796	1837	1882	1951	2002	2063	2136	2149	2085	2058	0	0	0	0	0
0	1997	1964	1884	1874	1850	1824	1798	1822	1861	1903	1951	1992	2045	2099	2117	2100	2084	2065	0	0	0	0	0
0	2012	1992	1945	1922	1895	1860	1850	1850	1878	1909	1943	1981	2021	2053	2071	2074	2065	2057	0	0	0	0	0
0	2067	2027	1994	1952	1919	1886	1893	1911	1926	1949	1973	1996	2010	2027	2044	2049	2046	2035	0	0	0	0	0
0	2107	2072	2025	1985	1953	1924	1919	1930	1945	1959	1968	1977	1991	1999	2011	2027	2033	2035	0	0	0	0	0
0	2159	2112	2065	2018	1981	1966	1956	1945	1945	1957	1979	1988	1995	2002	2010	2017	2023	2026	0	0	0	0	0
0	2219	2177	2122	2059	1996	1981	1976	1971	1968	1980	1993	2001	2006	2011	2015	2018	2022	2024	0	0	0	0	0
0	2267	2248	2191	2116	2019	1981	1978	1992	2000	2012	2015	2017	2017	2019	2022	2033	2026	2024	0	0	0	0	0
0	0	2336	2284	2208	2104	2014	2003	2016	2028	2044	2049	2050	2052	2028	2029	2033	2037	0	0	0	0	0	0
0	0	2454	2415	2341	2233	2156	2092	2078	2066	2088	2087	2083	2078	2078	2082	2081	2079	0	0	0	0	0	0
0	0	2552	2544	2461	2371	2285	2221	2170	2143	2131	2116	2107	0	0	2103	2105	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2554	2616	2541	2454	2397	2321	2234	2199	0	0	0	0	0	2115	2114	0	0	0	0	0	0	0
0	0	2622	2611	2571	2513	2455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	2574	2555	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 48. Niveles estáticos de los acuíferos Pastor Ortiz y Zacapu para el año 2017.

0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1662	1670	1678	0	1708	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1653	1657	1664	1674	1690	1710	1727	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1653	1656	1662	1674	1696	1716	1731	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1655	1658	1661	1664	1667	1702	1725	1747	1750	1768	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1660	1662	1670	1676	1682	1697	1722	1775	1771	1787	1802	1816	0
0	0	0	0	0	1663	1673	1658	1666	1678	1690	1701	1714	1736	1751	1774	1793	1793	1809	1825	1828	0	0
0	0	0	0	1714	1697	1682	1668	1667	1662	1699	1720	1737	1755	1776	1794	1811	1826	1838	0	0	0	0
0	0	0	1745	1727	1712	1701	1699	1688	1691	1706	1725	1752	1773	1794	1816	1833	1847	1859	1886	0	0	0
0	0	1777	1762	1748	1731	1719	1718	1733	1755	1786	1812	1837	1861	1876	1788	1888	1895	1899	1899	0	0	0
0	0	1798	1785	1771	1755	1743	1740	1747	1764	1788	1827	1860	1890	1934	1933	1938	1936	1939	0	0	0	0
0	0	1813	1803	1790	1777	1762	1758	1767	1787	1817	1862	1902	1939	1973	1987	1988	1982	1976	1968	0	0	0
0	1836	1830	1817	1796	1775	1777	1769	1781	1809	1842	1894	1941	1987	2025	2045	2040	2026	2011	1991	0	0	0
0	1919	1856	1855	1858	1857	1818	1786	1771	1789	1822	1866	1923	1978	2038	2088	2112	2091	2063	0	0	0	0
0	1982	1956	1931	1873	1864	1835	1798	1761	1796	1837	1882	1951	2002	2063	2136	2149	2085	2058	0	0	0	0
0	1997	1964	1884	1874	1850	1824	1798	1822	1861	1903	1951	1992	2045	2099	2117	2100	2084	2065	0	0	0	0
0	2012	1992	1945	1922	1895	1860	1850	1878	1909	1943	1981	2021	2053	2071	2074	2065	2057	0	0	0	0	0
0	2067	2027	1994	1952	1919	1886	1893	1911	1926	1949	1973	1996	2010	2027	2044	2049	2046	2035	0	0	0	0
0	2107	2072	2025	1985	1953	1924	1919	1930	1945	1959	1966	1977	1991	1999	2011	2027	2033	2035	0	0	0	0
0	2139	2112	2065	2018	1981	1966	1956	1945	1945	1957	1979	1988	1995	2002	2010	2017	2022	2026	0	0	0	0
0	2219	2177	2122	2059	1996	1981	1976	1971	1968	1980	1993	2001	2006	2011	2015	2018	2022	2024	0	0	0	0
0	2267	2248	2191	2116	2019	1981	1978	1992	2000	2012	2015	2017	2017	2019	2022	2033	2026	2024	0	0	0	0
0	0	2336	2284	2208	2104	2014	2003	2016	2028	2044	2049	2050	2052	2028	2029	2033	2037	0	0	0	0	0
0	0	2454	2415	2341	2233	2156	2092	2078	2066	2088	2087	2083	2078	2078	2082	2081	2079	0	0	0	0	0
0	0	2552	2544	2461	2371	2285	2221	2170	2143	2131	2116	2107	0	0	2103	2105	0	0	0	0	0	0
0	0	2554	2616	2541	2454	2397	2321	2234	2199	0	0	0	0	0	2135	2114	0	0	0	0	0	0
0	0	2622	2611	2571	2513	2455	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	2574	2555	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 49. Niveles estáticos en los acuíferos de Pastor Ortiz y Zacapu para el año 2021.

En el desarrollo de este proyecto se consideraron 17 puntos de control, los cuales están distribuidos en ambos acuíferos para garantizar una simulación del flujo lo más aproximado posible al funcionamiento hidráulico de la zona de estudio como se puede observar en la Figura 50.



0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1680.92	1683.08	1676.5	0	1657.75	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1673.01	1675.26	1680.84	1671.34	1655.01	1653.16	1648.46	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1665.05	1661.31	1662.74	1648.79	1644.05	1643.29	1645.49	0	0	0	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1667.57	1663.19	1650.29	1627.92	1631.51	1635.46	1672.25	1687.38	1733.78	1768.28	0	
0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1660.18	1661.67	1651.92	1639.2	1632.29	1628.34	1669.87	1688.43	1733.94	1750.87	1767.56	1780.83
0	0	0	0	0	1695.47	1687.66	1662.89	1651.65	1657.25	1656.43	1648.99	1659.8	1668.78	1684.63	1699.25	1742.85	1759.25	1777.22	1787.73	1851.04	0	0	0	0	
0	0	0	0	1712.3	1711.44	1698.65	1694.5	1681.11	1688.2	1704.12	1712.38	1718.31	1729.65	1744.62	1768.59	1797.5	1820.67	1804.32	0	0	0	0	0		
0	0	0	1720.1	1727.31	1724.65	1717.54	1715.85	1718.48	1720.64	1740.46	1754.17	1757.36	1753.98	1780	1805.54	1832.89	1858.36	1884.98	1915.76	0	0	0	0		
0	0	1746.89	1735.14	1743.03	1717.54	1715.85	1713.94	1727.88	1740.46	1754.17	1763.34	1753.98	1776.1	1805.54	1837.91	1863.4	1885.62	1916.65	1626.91	0	0	0	0		
0	0	1758.98	1752.77	1745.78	1737.49	1736.05	1741.97	1755.88	1778.04	1799.58	1796.85	1781.09	1804.09	1836	1870.53	1899.44	1920.93	1965.32	0	0	0	0	0		
0	0	1759.35	1758.4	1763.88	1756.38	1755.69	1760.96	1782.48	1820.01	1854.45	1881	1844.96	1853.01	1879.01	1911.16	1939.38	1971.74	2018.41	2030.69	0	0	0	0		
0	1773.25	1767.42	1782.07	1780.68	1780.14	1776.47	1783.5	1806.83	1854.34	1905.94	1927.02	1927.54	1914.32	1924.89	1947.17	1972.36	2011.34	2058.46	2079.09	0	0	0	0		
0	1783.41	1784.86	1788.12	1805.58	1803.83	1793.34	1787.84	1816.83	1875.2	1914.71	1939.47	1954.36	1961.66	1969.42	1995.69	2011.38	2045.15	2092.49	0	0	0	0	0		
0	1797	1805.32	1815.54	1833.85	1854.43	1833.33	1783.32	1827.94	1879.46	1911.12	1944.13	1976.6	1992.6	2006.6	2015.55	2044.54	2069.13	2110.77	0	0	0	0	0		
0	2009.98	1873.29	1881.39	1889.54	1894.89	1888.05	1861.47	1868.23	1889.51	1898.1	1935.94	1991.87	2001.71	2015.51	2030.91	2058.24	2087.97	2117.36	0	0	0	0	0		
0	2032.51	1998.68	1892.98	1909.69	1931	1956.8	1949.35	1916.23	1895.67	1870.49	1879.93	1947.17	1975.57	2006.99	2033.61	2060.25	2090.03	2110.34	0	0	0	0	0		
0	2056.88	2018.24	1988.11	1913.07	1952.23	1983.25	1983.53	1960.95	1919.83	1857.09	1781.78	1870.2	1953.47	1995.3	2028.33	2058.92	2087.35	2105.02	0	0	0	0	0		
0	2108.65	2038.86	1997.42	1963.37	1926.29	1959.43	1973.02	1969.77	1934.63	1891.34	1874.02	1906.69	1974.51	2003	2026.8	2051.94	2083.05	2101.49	0	0	0	0	0		
0	2128.55	2084.87	2027.02	1962.15	1909.03	1917.25	1943.79	1962.21	1973.25	1967.09	1948.97	1976.68	1998.71	2018.82	2034.01	2051.77	2070.51	2081.52	0	0	0	0	0		
0	2180.26	2124.19	2038.77	1950.21	1858.38	1885.38	1936.91	1968.38	1985.22	2002.85	1993.6	2001.74	2013.64	2027.65	2034.9	2056.44	2070.1	2079.62	0	0	0	0	0		
0	2217.58	2191.13	2116.37	1997.26	1878.05	1885.99	1933.64	1976.73	1996.86	2007.38	2003.74	2011.33	2020.91	2031.38	2036.77	2050.4	2069.89	2078.54	0	0	0	0	0		
0	0	2286.05	2226.21	2100.57	1968.94	1953.7	1969.27	1996.46	2011.54	2012.05	2012.22	2015.49	2024.48	2032.39	2039.23	2044.19	2058.55	0	0	0	0	0	0		
0	0	2430.09	2338.17	2239.17	2098.07	2025.94	2016.53	2059.02	2047.62	2025.22	2030.73	2060.71	2054.98	2033.64	2041.28	2045.1	2047.2	0	0	0	0	0	0		
0	0	2557.41	2518.45	2363.99	2174.8	2061.17	2070.95	2107.85	2108.97	2087.95	2073.37	2076.71	0	0	2094.14	2046.11	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	2634.94	2610.91	2471.43	2270.73	2071.93	2162.74	2171.14	2156.78	0	0	0	0	0	2107.77	2108.41	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	2643.01	2609.58	2523.65	2446.46	2354.65	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		
0	0	0	0	2547.65	2520.42	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0		

Figura 50. Distribución de los parámetros de control.

## 7.9.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO SUBTERRÁNEO

Para conseguir un buen ajuste del modelo propuesto es necesario realizar un análisis de cuáles son las variables que representan la mayor alteración del porcentaje de error al realizarse algunas variaciones, de esta manera es posible catalogar cuales son los factores que deben ser ajustados con mayor sensibilidad (Gutierrez y Márquez., 2004).

El análisis de sensibilidad se realizó a través del método de ensayo y error, partiendo de la variación del parámetro de conductividad hidráulica, considerando que esta es citada como una de las más sensibles (Vassolo, 2001).

La calibración se realizó de tipo transitorio es decir considerando los posibles cambios de niveles y caudales fuese por extracciones y/o recargas respecto al tiempo, para ello se simuló un periodo comprendido de 1966 hasta 2021, es importante mencionar que para lograr una calibración más rápida y aceptable en Aquald primeramente se simuló y calibró con el software Modflow.

Modflow considera el flujo de las aguas subterráneas a partir de las leyes de la hidrodinámica, donde la porosidad, permeabilidad, transmisividad y coeficiente de almacenamiento son los parámetros principales a considerar, siendo la ley de Darcy la base teórica que permitió el desarrollo analítico de esta disciplina en el siglo XIX (Betancurt y Palacio., 2009).

Se consideró calibrado el modelo cuando las diferencias de los niveles observados en campo y los niveles simulados alcanzaron un valor medio de 0.74 m, tomando como base los niveles iniciales aquellos medidos por CONAGUA en el año 2007 siendo este el primer monitoreo de pozos en la zona de estudio.

Sin embargo, en la Tabla 29 se pueden conocer las diferencias entre observados y simulados para cada uno de los puntos de control de forma puntual.

**Tabla 29. Diferencias entre niveles simulados y observados para el año 2021.**

	Observados (msnm)	Simulados (msnm)	Diferencia
1	2610.91	2610.62	0.28
2	1878.05	1875.34	2.70
3	2071.93	2080.80	-8.87
4	1888.05	1887.21	0.84
5	1783.32	1783.48	-0.16
6	1976.79	1981.34	-4.55
7	1681.11	1679.86	1.24
8	1985.22	1988.34	-3.12
9	1781.78	1779.54	2.24
10	1991.87	1990.98	0.88
11	1974.51	1976.54	-2.03
12	1632.29	1628.56	3.73
13	1627.92	1628.56	-0.64
14	2027.65	2027.28	0.36
15	1995.30	1995.60	-0.30
16	1655.01	1661.23	-6.22
17	1920.93	1920.01	0.91

En la Figura 51, se puede visualizar el ajuste logrado para los puntos de control a lo largo de la zona de estudio.

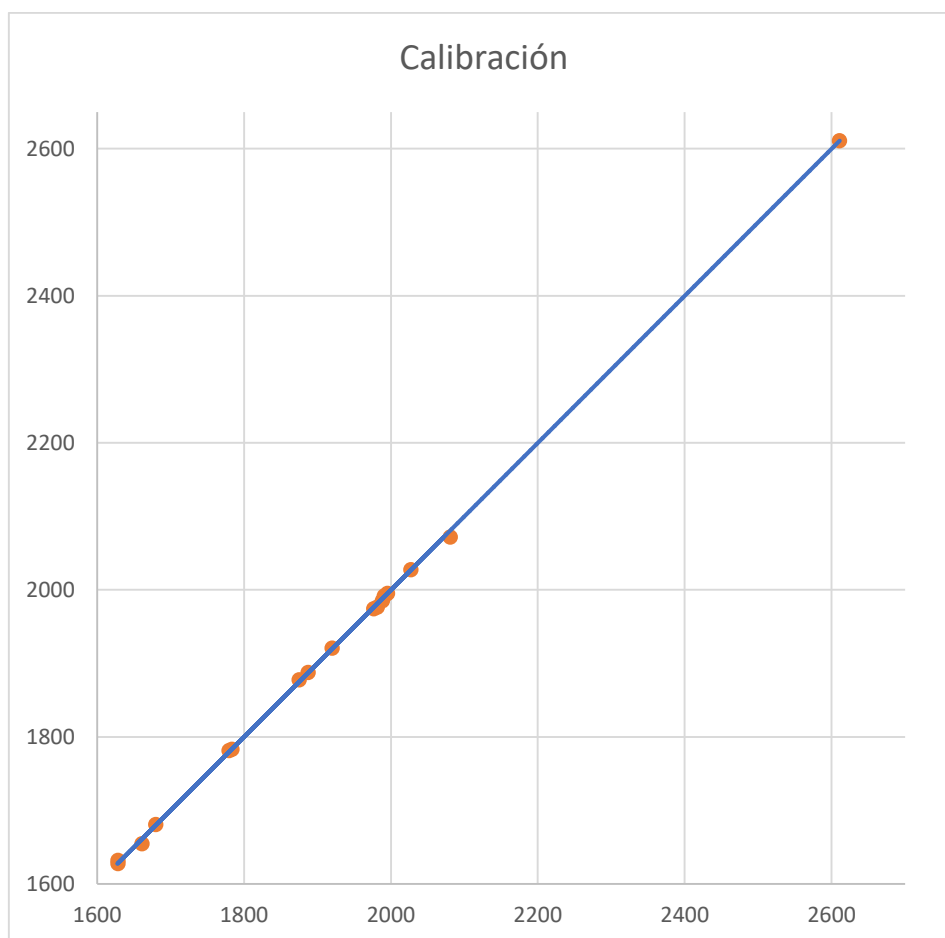


Figura 51. Calibración de los 17 parámetros distribuidos en la zona de estudio (msnm).

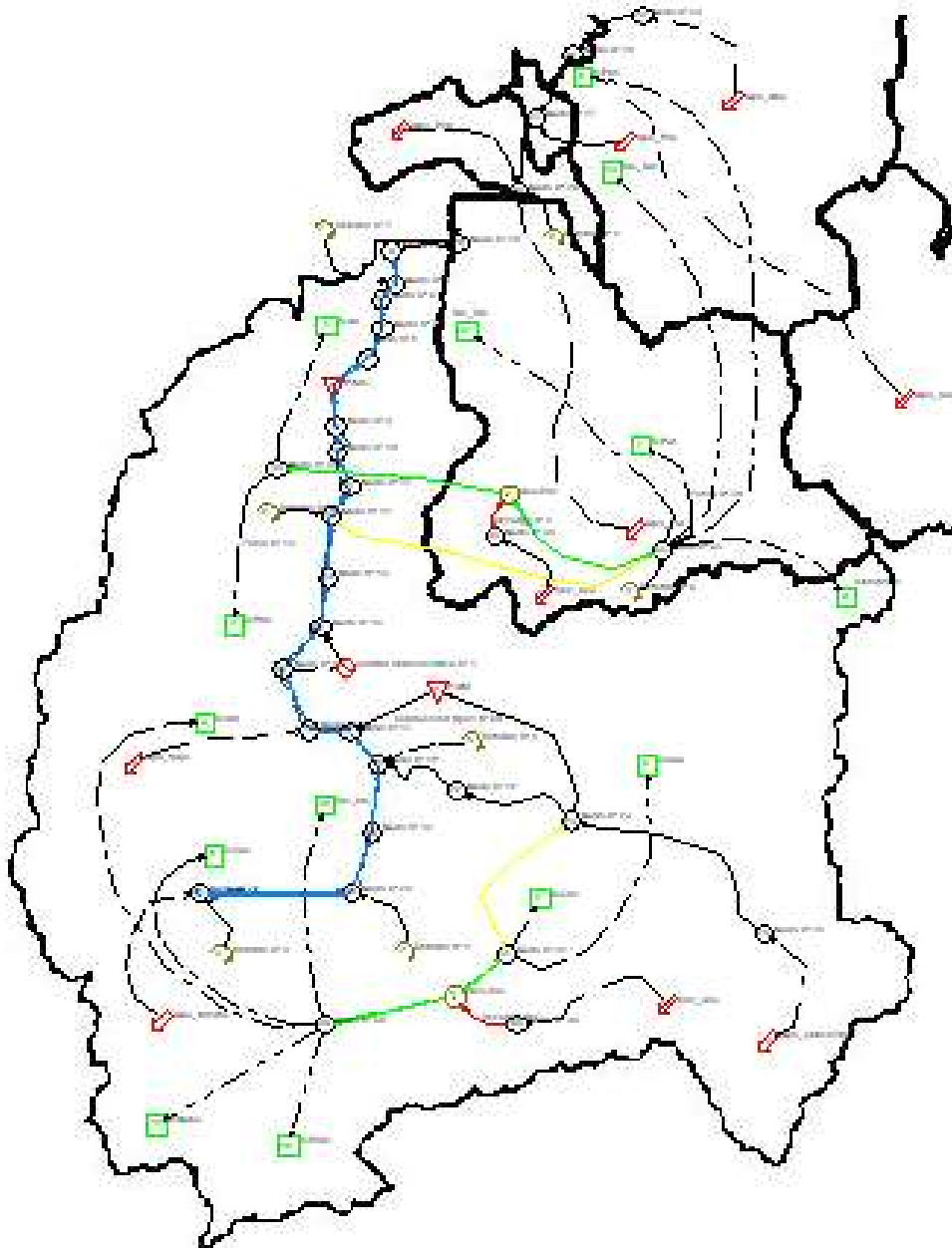
### 7.10. MODELACIÓN CONJUNTA DE LA GESTIÓN INTEGRAL DEL AGUA

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos en México (GIRH) es un enfoque de política pública, incremental y adaptativo, que persigue el desarrollo y manejo coordinado del agua, la tierra y los recursos relacionados. Está orientada a propiciar que el aprovechamiento de los recursos hídricos se dirija hacia la consecución de objetivos nacionales de desarrollo económico y social bajo criterios de equidad y sostenibilidad ambiental (Valencia et al., 2005).

Los criterios principales que mantiene la GIRH nos indican que esta se basa en manejar los recursos hídricos a nivel de cuencas, considerando también las subcuencas, microcuencas y acuíferos como unidades interdependientes para la gestión y desarrollo de los recursos hídricos y busca establecer objetivos a corto y largo plazos para las políticas hídricas mediante la planeación estratégica y la producción de planes maestros.

### 7.10.1. TOPOLOGÍA DEL SISTEMA

Como consecuencia de lo anterior, para el caso particular de la zona de estudio de la cuenca del Río Angulo se tienen en consideración los siguientes elementos que conforman al sistema como; presas, distritos de riego, zonas urbanas, zonas industriales, recargas, concesiones, retornos y acuíferos interconectados entre sí, los cuales se pueden observar en la Figura 52.



*Figura 52. Topología del sistema de recursos hídricos en la cuenca del Río Angulo.*

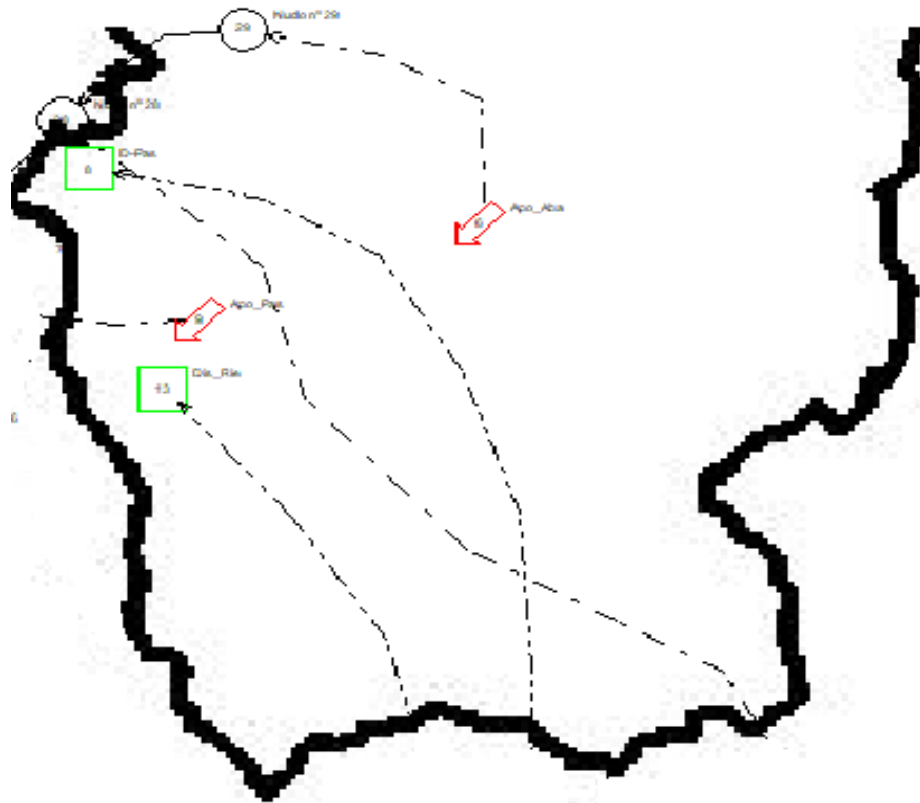


Figura 53. Topología de la cuenca Pastor Ortiz.

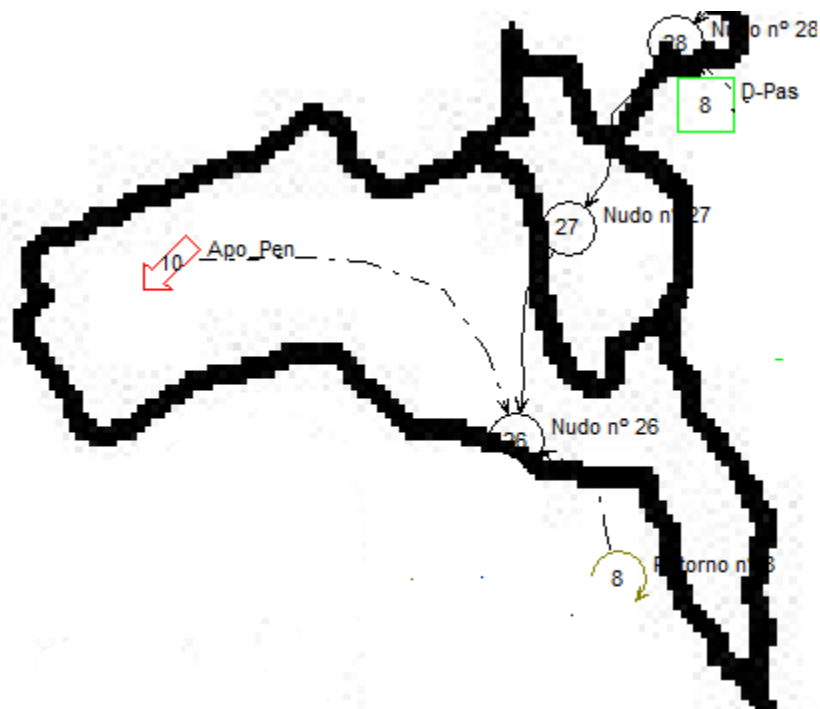


Figura 54. Topología de las cuencas Pénjamo y Abasolo.

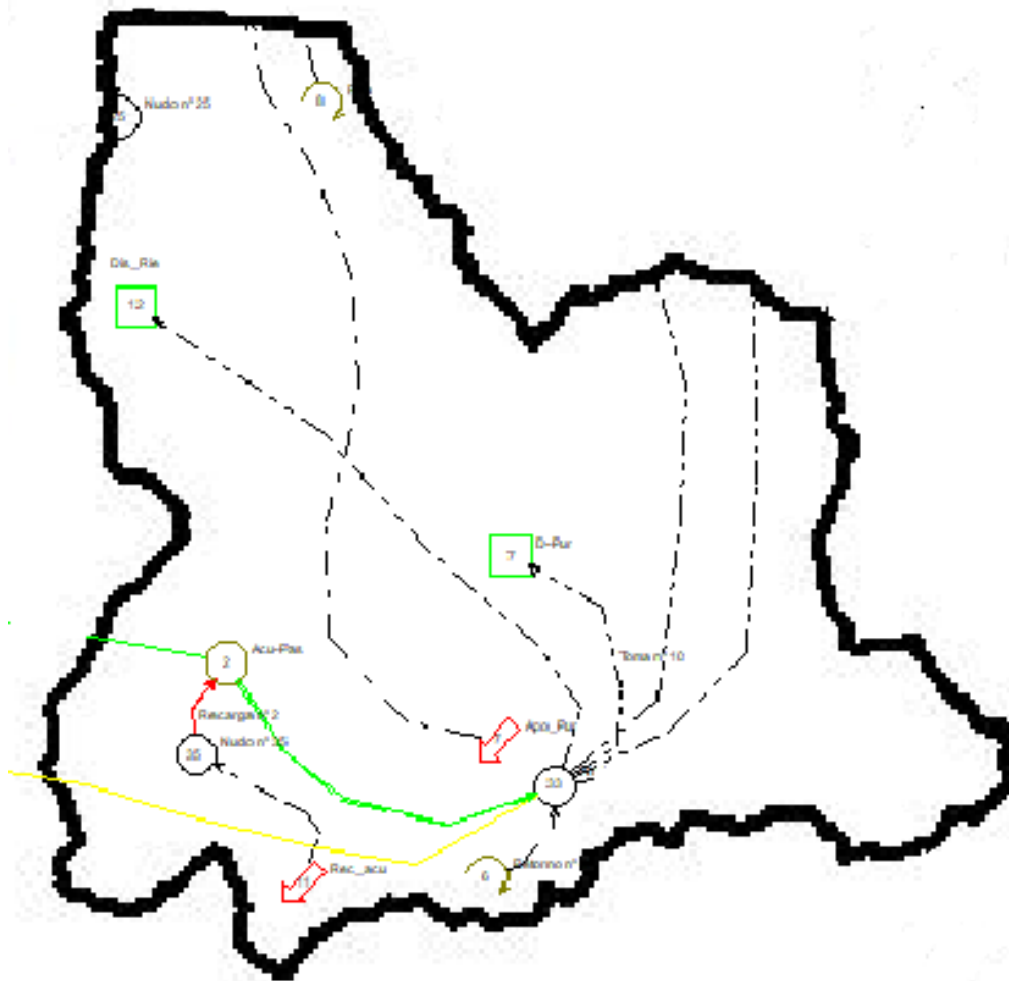
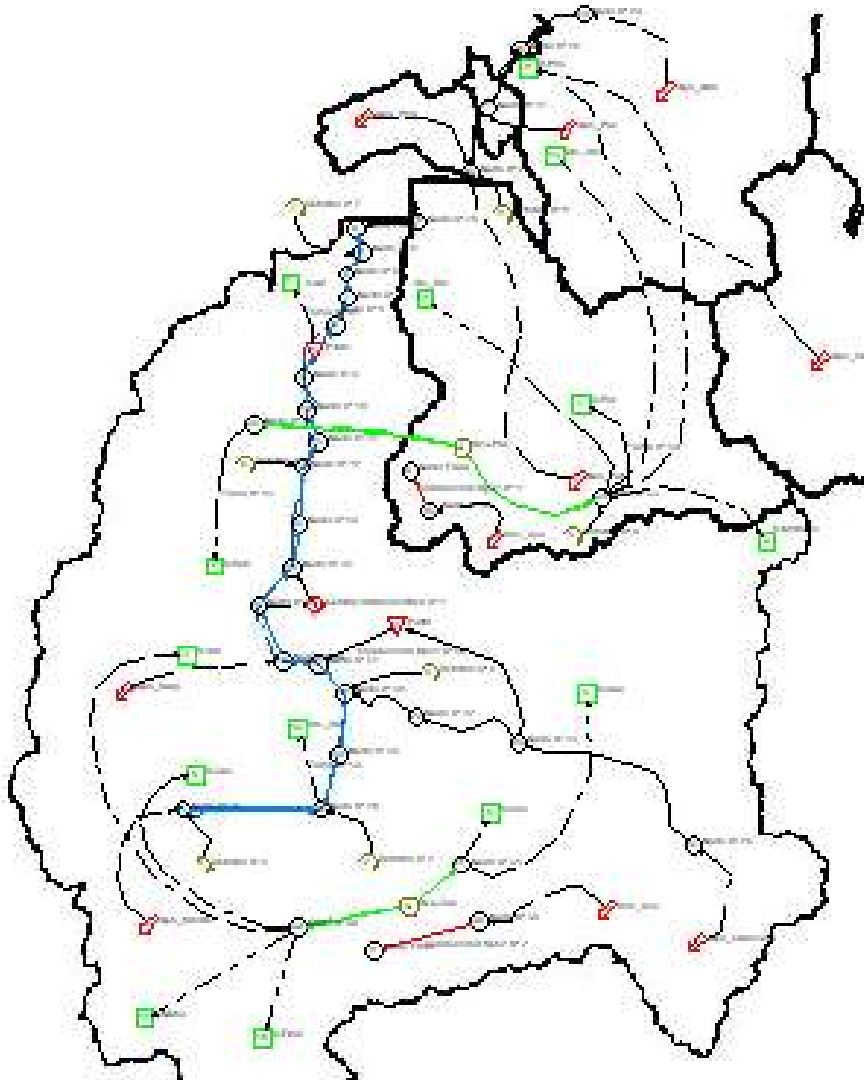


Figura 55. Topología de la cuenca Puruandiro.





*Figura 56. Topología de la cuenca del Río Angulo.*

Una vez visualizados de forma espacial los elementos que conforman a cada una de las cuencas de la zona de estudio de la Figura 52 a la Figura 56, se puede hacer mención de ellos en la Tabla 30.

**Tabla 30. Descripción de elementos del sistema.**

ELEMENTO	NOMBRE	ABREVIATURA
Acuífero	Zacapu	Acu-Zac
Acuífero	Pastor Ortiz	Acu-Pas
Aportación	Huanimaro	Apo-Hua
Aportación	Pastor Ortiz	Apo-Pas
Aportación	Puruandiro	Apo-Pur
Aportación	Abasolo	Apo-Aba
Aportación	Pénjamo	Apo-Pen
Aportación	Baja	Apo-Cabecera
Aportación	Media	Apo-Media

Aportación	Cabecera	Apo-Baja
Demanda	Urbana e Industrial	D-###
Hidroeléctrica	Botello	C-H
Módulo de Riego	Zacapu	Dis-Rie
Módulo de Riego	Angamacutiro	Dis-Rie
Módulo de Riego	Pastor Ortiz	Dis-Rie
Recarga	Zacapu	Rec-Acu
Recarga	Pastor Ortiz	Rec-Acu

Para cada uno de los elementos anteriormente mencionados fue necesario asignarles valores acorde al periodo de simulación establecido de 2000 a 2015, tanto para recargas de los acuíferos como las escorrentías generadas para cada una de las subcuencas que conforman el sistema las cuales son provenientes de las modelaciones del recurso hídrico superficial desarrolladas en este mismo proyecto de tesis. Por último, los datos de caudales de los distritos de riego, demandas urbanas y embalses fueron obtenidos de las bases de datos históricos de CONAGUA, en las figuras 57 a la 59 se puede observar el ingreso y formato de los datos.

Es importante recordar que SIMGES para generar una simulación y gestión del sistema superficial se efectúa a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo (Alvarez et al., 2022). Dicho algoritmo se encarga de determinar el flujo en el sistema tratando de satisfacer al máximo los objetivos múltiples de minimización de déficits, y de máxima adaptación a las curvas de volúmenes objetivo de embalse.

Descripción del embalse ×

Nombre

**SimGes** SimFisk ◀ ▶

Datos físicos Volúmenes Cotas Tasa evaporación

Mes	Máximo	Objetivo	Mínimo
Octubre	226	120.07	10
Noviembre	226	140.03	10
Diciembre	226	160.45	10
Enero	226	165.43	10
Febrero	226	166.16	10
Marzo	226	156.81	10
Abril	226	136.22	10
Mayo	226	110.38	10
Junio	226	96.22	10
Julio	226	29.97	10
Agosto	226	63.4	10
Septiembre	226	90.8	10

**Figura 57. Niveles históricos para el embalse Melchor Ocampo.**

Descripción de la demanda ×

Nombre

**SimGes** SimRisk

Demanda total (Hm<sup>3</sup>/mes)

Mes	Hm <sup>3</sup>
Octubre	2
Noviembre	2
Diciembre	1
Enero	0.2
Febrero	0.2
Marzo	0.2
Abril	2
Mayo	10
Junio	28
Julio	30
Agosto	20
Septiembre	2

Regla operación ahorro agua

Infiltración  
 Acuífero al que recarga:     Acción elemental recarga:

Bombeo  
 Acuífero del que bombea:     Acción elemental bombeo:   
 Parámetro control bombeo:   
 Caudal máx. bombeo (Hm<sup>3</sup>/mes):     Valor umbral parámetro control:

Garantía mensual  
 Fallo mensual (% D.M.):

Garantía Anual  
 Fallo mensual (% D.M.):   
 Fallo anual (% D.A.):

Criterio tipo UTAH DWR  
 Fallo anual (% D.A.):     Fallo 2 años (% D.A.):   
 Fallo 10 años (% D.A.):

Criterio IPH,2008 demandas urbanas  
 Máximo fallo mensual %:     Máximo fallo a 10 años %:

Figura 58. Ingreso de las demandas para el Distrito de Riego de Angamacutiro.

Descripción de la demanda ×

Nombre

**SimGes** SimRisk

Demanda total (Hm<sup>3</sup>/mes)

Mes	Hm <sup>3</sup>
Octubre	0.43
Noviembre	0.43
Diciembre	0.43
Enero	0.43
Febrero	0.43
Marzo	0.43
Abril	0.43
Mayo	0.43
Junio	0.43
Julio	0.43
Agosto	0.43
Septiembre	0.43

Regla operación ahorro agua

Infiltración  
 Acuífero al que recarga:     Acción elemental recarga:

Bombeo  
 Acuífero del que bombea:     Acción elemental bombeo:   
 Parámetro control bombeo:   
 Caudal máx. bombeo (Hm<sup>3</sup>/mes):     Valor umbral parámetro control:

Garantía mensual  
 Fallo mensual (% D.M.):

Garantía Anual  
 Fallo mensual (% D.M.):   
 Fallo anual (% D.A.):

Criterio tipo UTAH DWR  
 Fallo anual (% D.A.):     Fallo 2 años (% D.A.):   
 Fallo 10 años (% D.A.):

Criterio IPH,2008 demandas urbanas  
 Máximo fallo mensual %:     Máximo fallo a 10 años %:

Figura 59. Ingreso de las demandas urbanas para Puruandiro.

### 7.10.2. CALIBRACIÓN DEL MODELO CONJUNTO

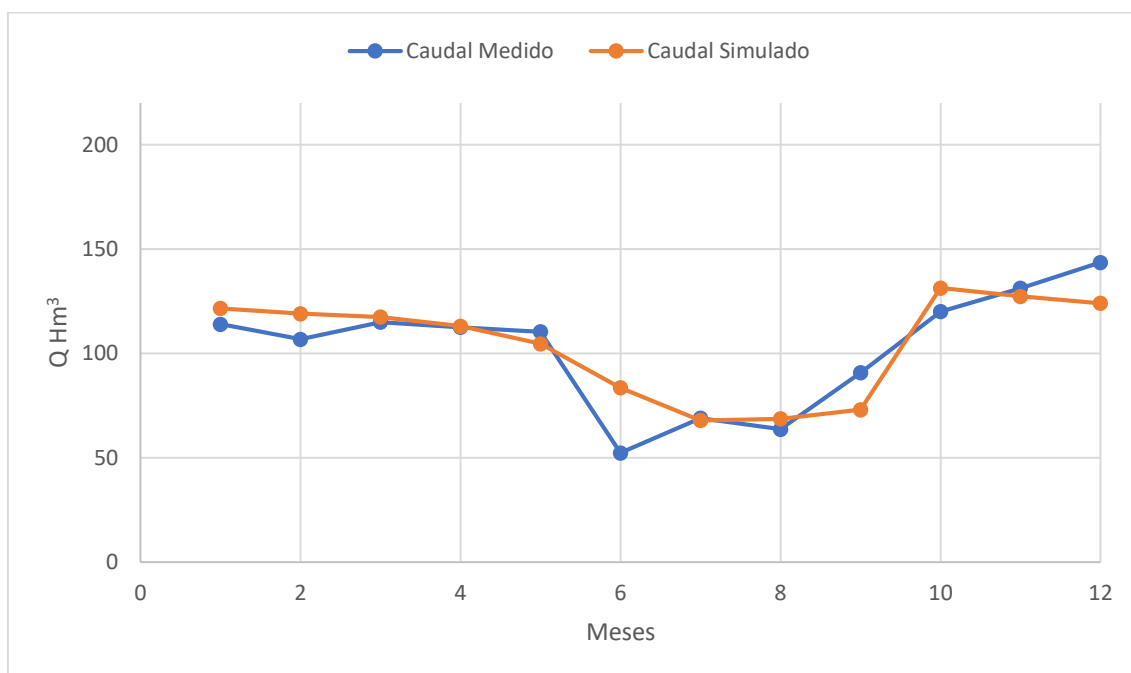


Figura 60. Calibración mensual con los volúmenes del embalse Melchor Ocampo

Para realizar dicha calibración se emplearon los registros históricos de los volúmenes almacenados en la presa Melchor Ocampo contemplando únicamente la media mensual de los últimos 10 años registrados y proporcionados por el BANDAS contra los niveles simulados por el modelo en conjunto, resultando la Figura 60.

### 7.11. GENERACIÓN DE SERIES SINTÉTICAS DE CAUDALES

Todos los procesos naturales que están en función del tiempo y el espacio, son procesos periódicos y estocásticos, cuyas propiedades son causadas por ciclos astronómicos y la aleatoriedad de los procesos casuales del medio. En consecuencia, todos los procesos hidrológicos tienen características estocásticas o una combinación de procesos determinísticos y estocásticos (Yevjevich, 1972).

Los modelos estocásticos o de series temporales, carecen de bases físicas y expresan en términos de probabilidad el resultado de procesos altamente aleatorios. El origen de la estocasticidad en los recursos hídricos es doble: La distribución de la lluvia es un proceso aleatorio (prácticamente puro) y los diferentes factores que afectan a la propagación del agua en la superficie terrestre (conductividad, flujo de agua, cubierta vegetal, y otros) le confieren también cierta aleatoriedad (Marco, 1993).

Actualmente existen muchos modelos para la simulación de caudales, entre los que están: redes neuronales artificiales, análisis espectral singular, modelos de ajuste no lineal por partes, modelos de ondas, modelos adaptativos de regresión múltiple, modelos estocásticos AR(p), MA(q), ARMA(p,q),

ARIMA(p,i,q), entre otros. A partir de estos modelos se derivan modelos lineales y no lineales para la predicción de caudales. La alta no linealidad de los procesos físicos en una cuenca y que generan los caudales, requiere de nuevos enfoques tanto en los modelos físicos como en los matemáticos (Cadavid y Carvajal, 2013).

La serie de caudales mensuales a emplear son resultado de una modelación superficial de los recursos hídricos la cual comprenden un periodo del año 2012 al año 2015. Dentro de este mismo periodo se tienen en cuenta 8 subcuencas las cuales conforman el SRH lo que conlleva a tener un total de 288 datos para la generación de caudales sintéticos.

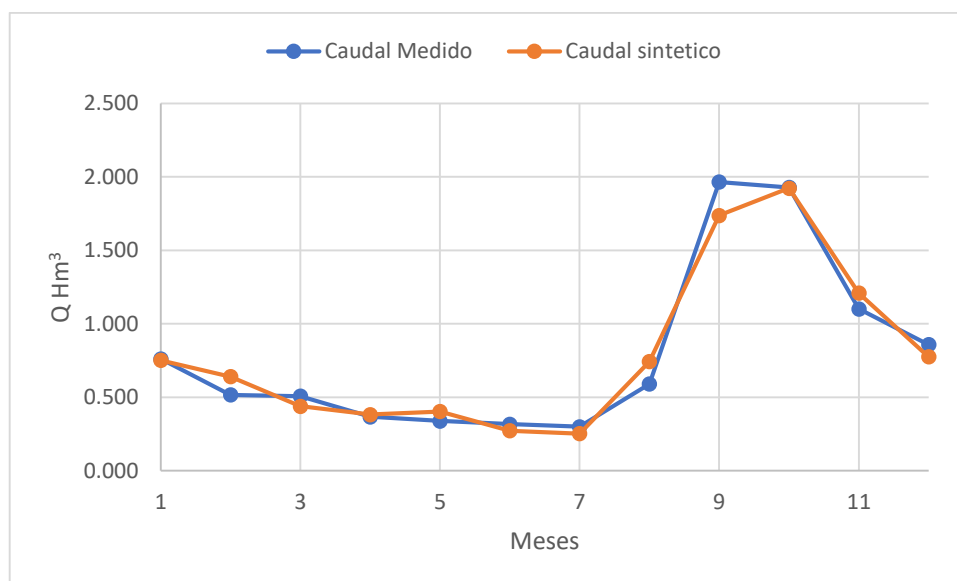
Para la generación de las series sintéticas se optó por tener dos grupos de subcuencas para realizar un análisis multivariado, esto con base en la buena correlación de las mismas subcuencas lo cual se puede observar en la Tabla 31, donde las subcuencas resaltadas son las principales y el resto subcuencas secundarias.

**Tabla 31. Grupos de subcuencas para el análisis multivariado de series equiprobables.**

Subcuencas	
Grupo 1	<b>Puruandiro</b>
	Baja
	Media
	Cabecera
Grupo 2	<b>Huanimaro</b>
	Abasolo
	Penjamo
	Pastor Ortiz

Finalmente, para cada una de las subcuencas se generó un gráfico mensual en el cual muestra la serie equiprobable generada con un modelo AR (1) y modelo de desagregación espacial de Lane Salas y otros (1980), que en este caso fue el modelo que mejor se ajustó a los estadísticos de la serie real de caudales proporcionados contra la serie de caudal medido por la estación hidrométrica en la misma subcuenca como se observa en la Figura 61. Cada una de las series generadas tienen un nivel de confianza del 95% con base en los estadísticos base que son igualdad de la media cero y la igualdad en la desviación estándar a uno.

Las series generadas en este apartado servirán para analizar la probabilidad de fallo de los embalses y demandas dentro del SRH de la cuenca del Río Angulo y que será la información de entrada para el modelo SIMRISK para su posterior análisis y posibles fallos ante sequía operativa en el siguiente apartado.



*Figura 61. Serie equiprobable vs serie real de caudales para la subcuenca baja.*

## 7.12. EVALUACIÓN DEL RIESGO POR SEQUÍA OPERATIVA

### 7.12.1. CARACTERIZACIÓN DE LA SEQUÍA HISTORICA

El monitoreo y análisis de la sequía en México ha sido de gran importancia en los últimos años, a tal grado que se ha puesto énfasis en estudiar el comportamiento de la sequía meteorológica e hidrológica; contando con organismos que destinan sus recursos para la caracterización de los eventos secos (CONAGUA, 2015).

El Programa Nacional Contra la Sequía (PRONACOSE), se creó en el 2013 con la finalidad de estimar los periodos secos o húmedos a partir de las dos variables más importantes; la precipitación y el escurrimiento. Algunos de los instrumentos aplicados por la PRONACOSE son el Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en ingles) y el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI, por sus siglas en ingles) (Díaz et al., 2019).

Los índices de sequía son medidas cuantitativas que caracterizan niveles de severidad mediante la asimilación y entendimiento de una o varias variables (indicadores); es este caso uno de esos indicadores son la precipitación y el escurrimiento; los cuales son dos variables completamente independientes (Esquivel et al., 2014).

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI) se basa solo en la precipitación (Hayes et al., 1999), de tal manera que este índice caracteriza a una sequía meteorológica. El SPI fue desarrollado para categorizar precipitaciones como una desviación con respecto a una función normalizada de distribución de probabilidad de la precipitación (McKee et al., 1995).



El SPI se calcula tomando la diferencia entre la precipitación registrada y el promedio de un periodo de tiempo en especial, y dividiéndolo por la desviación típica correspondiente. Debido a que la precipitación para periodos de menos de 12 meses generalmente no está distribuida normalmente, se efectúa una corrección para transformar el SPI en normal, de manera que para cada lugar el SPI tiene promedio cero y desviación típica uno. Esto permite además representar condiciones húmedas y secas mediante el mismo indicador. McKee et al. (1993) proponen definir una condición de sequía cuando el valor del SPI es continuamente negativo y alcanza el valor  $-1$  o menos. La sequía termina cuando SPI vuelve a ser positivo. Para clasificar las condiciones de sequía proponen la siguiente clasificación:

Tabla 32. Clasificación de condiciones de sequía para SPI. Fuente: (Fernandez, 1994)

Valor SPI	Categoría de sequía	% Tiempo de categoría
0 a -0.99	Sequía suave	24
-1 a -1.49	Sequía moderada	9.2
-1.5 a -1.99	Sequía severa	4.4
-2 y menos	Sequía extrema	2.3

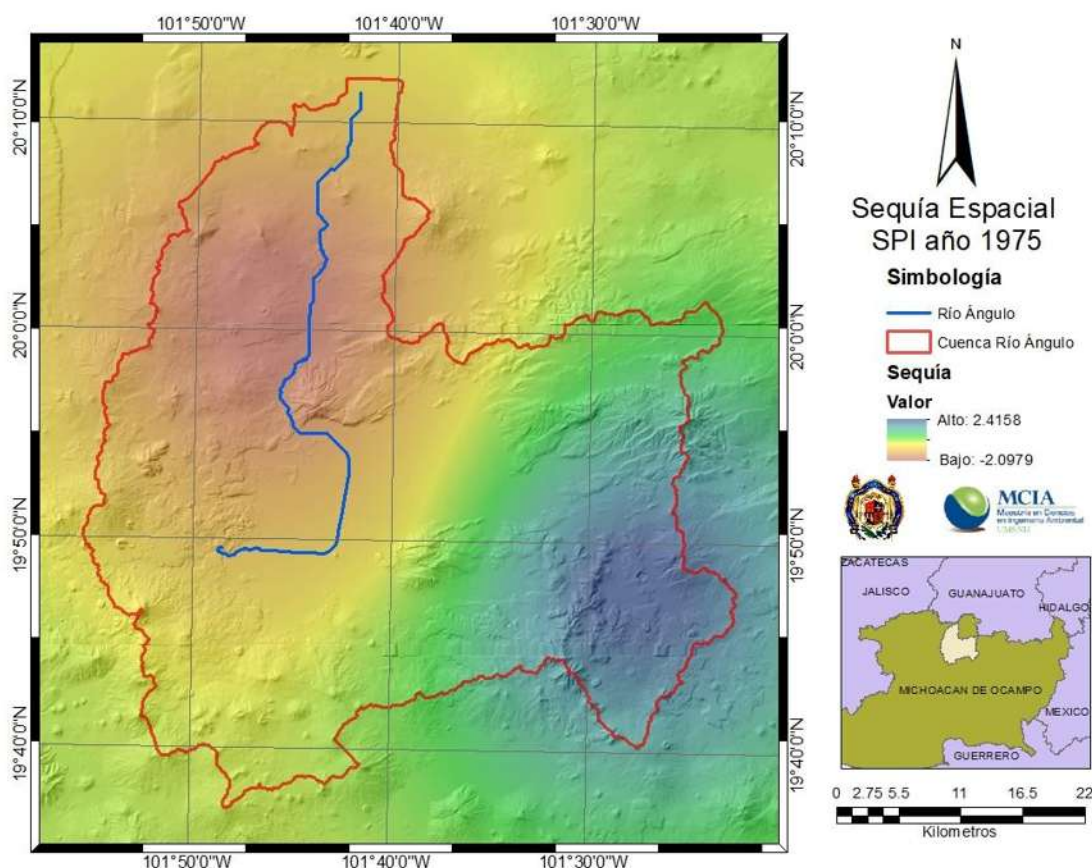


Figura 62. Análisis de sequía histórica empleando SPI para 1975.

Como se observa en la Figura 62, la parte Noreste de la zona de estudio es la más afectada por la falta de precipitación lo que origina una sequía

meteorológica la cual logra extenderse a una parte de la zona central del SRH del río Angulo esto correspondiente únicamente para el año 1975. Mientras que por otro lado para el año 1980 (Figura 63), la parte central del SRH fue la zona donde más precipitación se presentó dejando esa zona sin sequía y la parte noreste y suroeste con una sequía moderada y sequía extrema respectivamente.

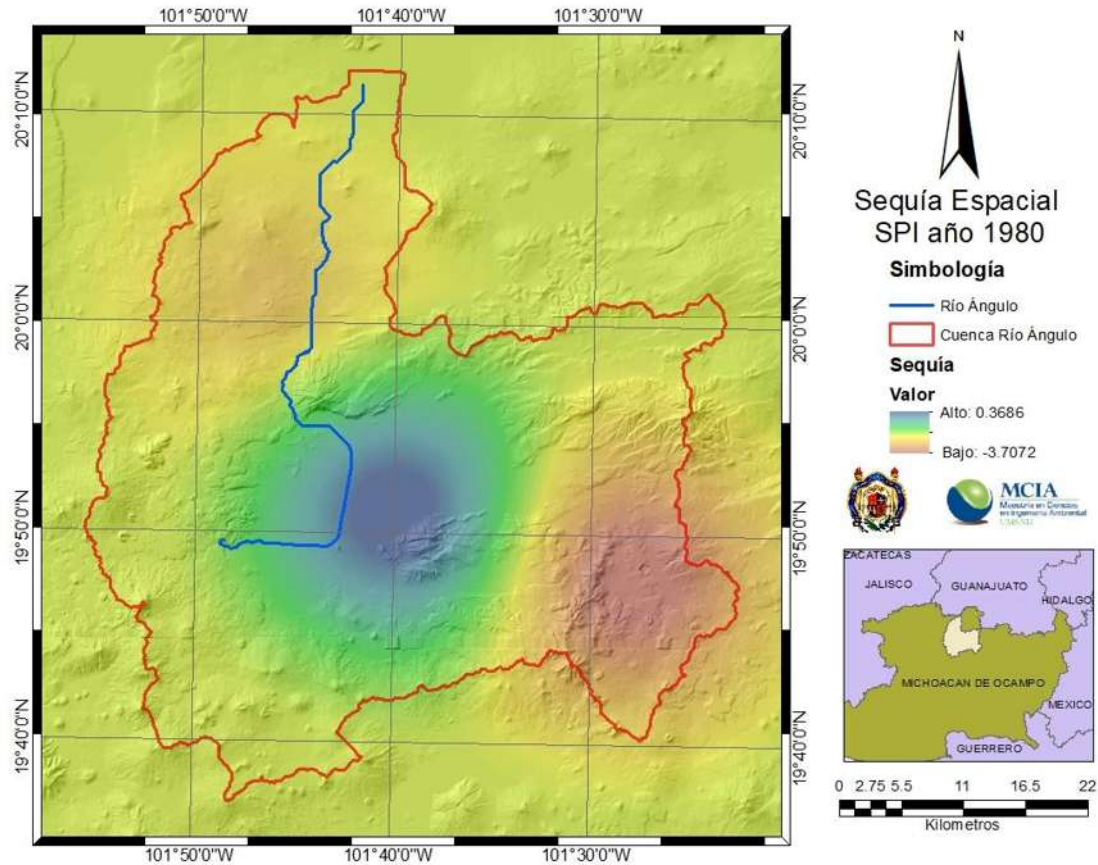


Figura 63. Análisis de sequía histórica empleando SPI para 1980.

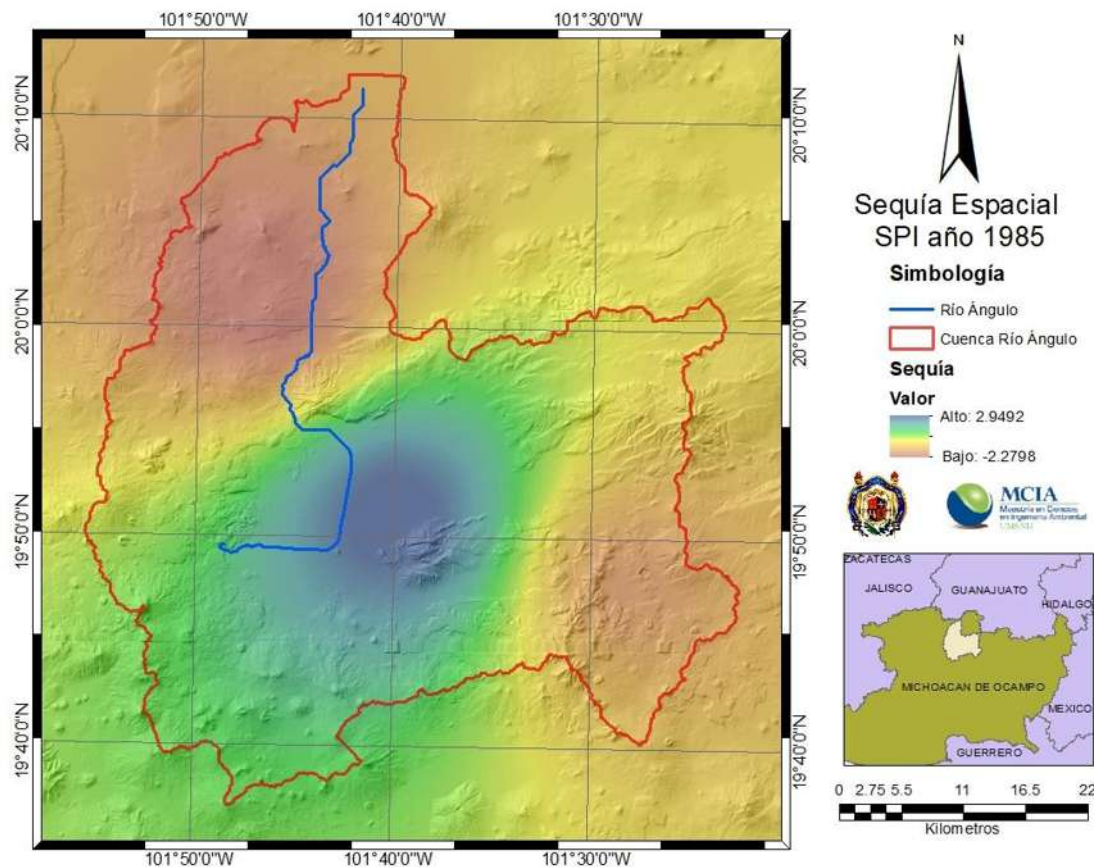


Figura 64. Análisis de sequía histórica empleando SPI para 1985.

Finalmente, para el año 1985 (Figura 64) con el índice SPI se observa que la evolución de la parte Noreste paso de tener sequía moderada a una sequía de categoría extrema y la parte suroeste de estar en sequía extrema paso a una sequía moderada mientras que la zona central conservo su categoría sin sequía.

Por otra parte, el estudio de la sequía hidrológica mediante el Índice de Sequía en Caudales o Escurrimientos (SDI), fue desarrollado por Nalbantis y Tsakiris (2009) el cual permite determinar un evento seco a partir de los datos de caudal o escurrimiento; utilizando como base la metodología y los cálculos del índice SPI (OMM, 2016).

El SDI se basa en los volúmenes de caudales o escurrimientos acumulados por periodos escalonados de tres, seis, nueve y doce meses dentro de cada año hidrológico (Nalbantis, 2008), mediante la estandarización de las variaciones de los escurrimientos con respecto a su media, suponiendo que siguen una distribución normal. Por lo general, el escurrimiento sigue una probabilidad de distribución sesgada, la cual puede aproximarse a la familia de las funciones de distribución gamma (Arreguin et al., 2016).

El SDI se define como

$$SDI_{i-k} = \frac{V_{i,k} - V_k}{S_k}$$



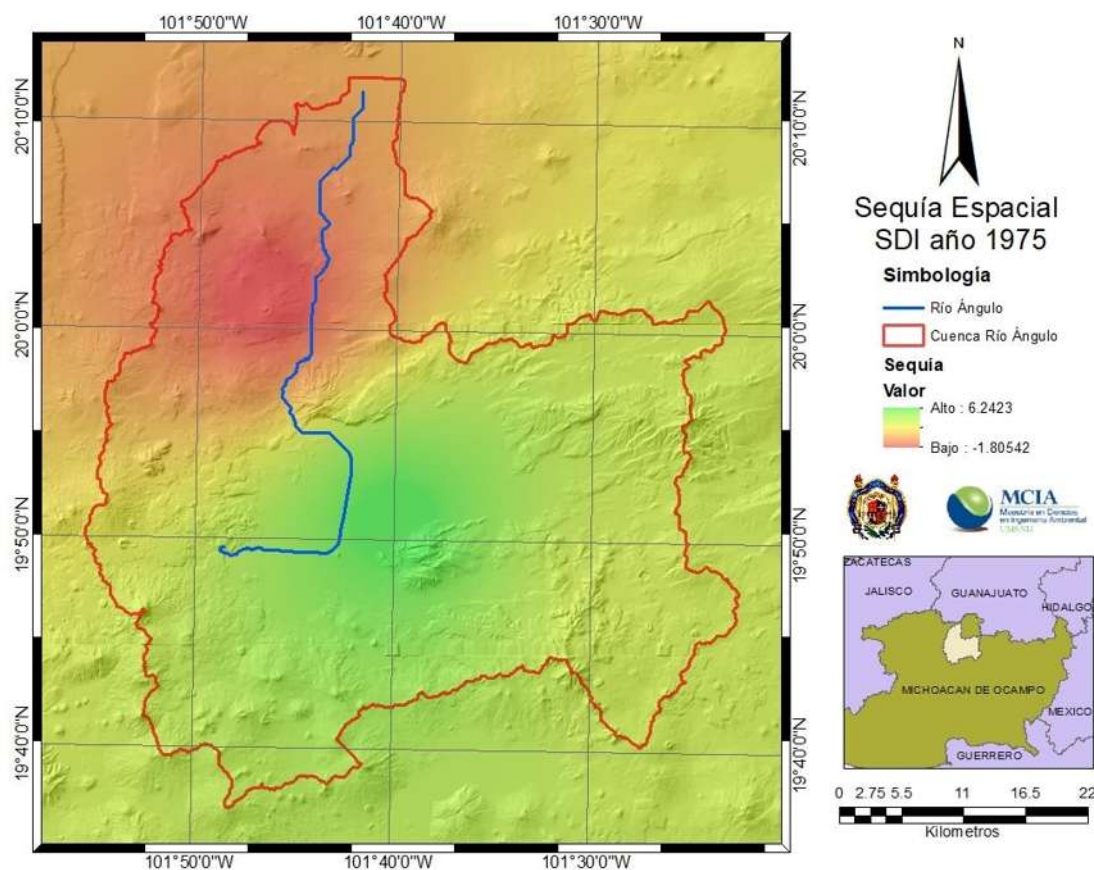
Donde es el volumen de escurrimiento acumulado en el año trimestre, es la media observada para el trimestre acumulado y es la desviación estándar en el periodo. El valor de es variable, así que considera los volúmenes de octubre a diciembre, de octubre a marzo, de octubre a junio y de octubre a septiembre; el cual corresponde al año hidrológico completo (CONAGUA, 2012).

Los valores que definen los estados de la sequía hidrológica mediante el uso del índice SDI se muestran en la tabla 1. En donde podemos observar que estos estados están asociados a una probabilidad (P) y un periodo de retorno (Tr).

Tabla 33. Definición de los estados de la sequía hidrológica mediante el SDI. Fuente: López y otros, (2016)

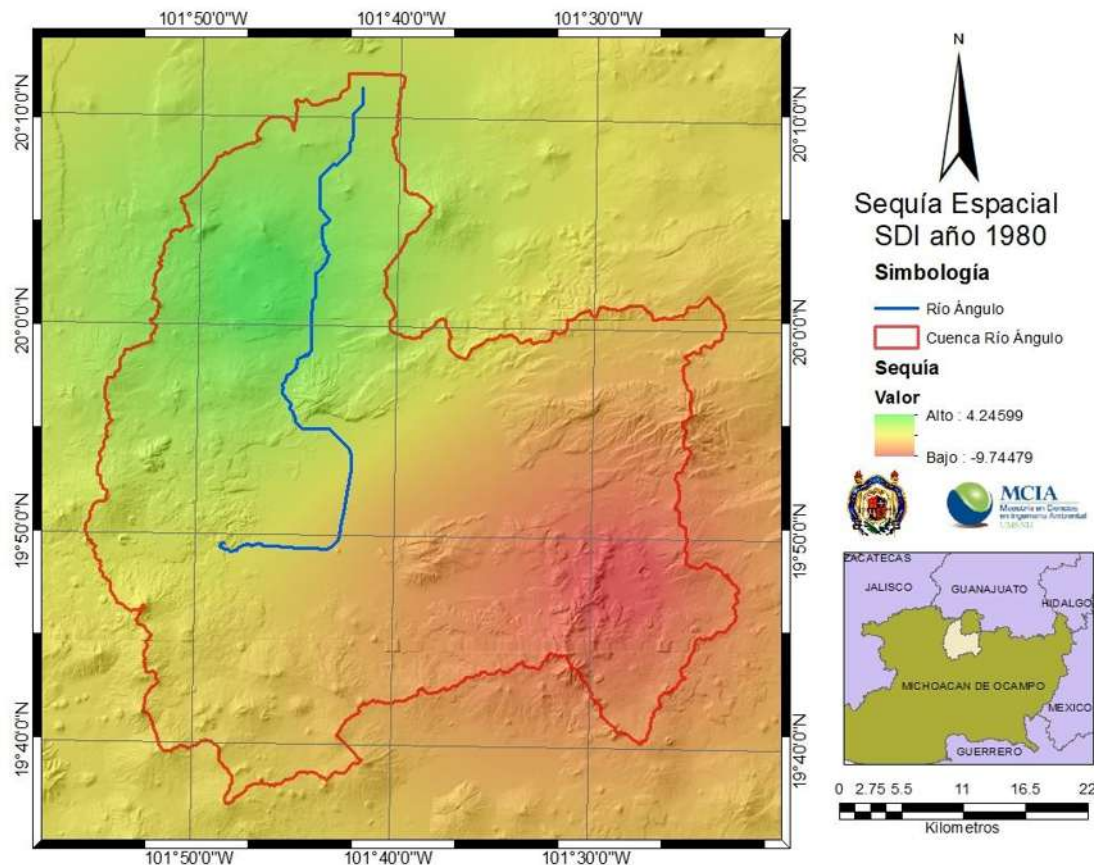
Estado	Descripción	Criterio	P	Tr
0	Sin sequía	$SDI \geq 0.0$	50	2
1	Sequía suave	$-1 \leq SDI < 0.0$	34.1	2.9
2	Sequía moderada	$-1.5 \leq SDI < -1$	9.2	10.9
3	Sequía severa	$-2 \leq SDI < -1.5$	4.4	22.7
4	Sequía extrema	$SDI < -2$	2.3	43.5

A partir de lo anterior se tiene la Figura 66, Figura 67 y la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** donde se pueden analizar las sequías históricas para la zona de estudio en un periodo de evolución no mayor a 15 años con el uso del índice SDI.



*Figura 65. Análisis de la sequía histórica para el año 1975.*

El índice de sequía SDI demuestra que en la parte sur y suroeste, así como en la parte central de la zona de estudio no existe sequía hidrológica en el SRH para el año 1975 teniendo en cuenta que es la misma zona donde nace el río Angulo con lo cual alimenta a los canales u infraestructura hidráulica de la zona; sin embargo, para el año de 1980 la mayor sequía se localiza en la parte suroeste de la zona de estudio como se observa en la Figura 66 y con categoría de extrema.



*Figura 66. Análisis de la sequía histórica para el año 1980.*

A diferencia de los dos años anteriores de estudio del SDI en 1985 (Figura 67), se observa que la sequía hidrológica extrema prevalece únicamente en la zona suroeste del SRH del río Angulo, teniendo en cuenta que este índice está en función del agua que circula a través de la infraestructura hídrica con que cuenta la zona y a su vez de las escorrentías ya sean por fuentes como la misma precipitación o algún embalse que este desfogando recurso hídrico.

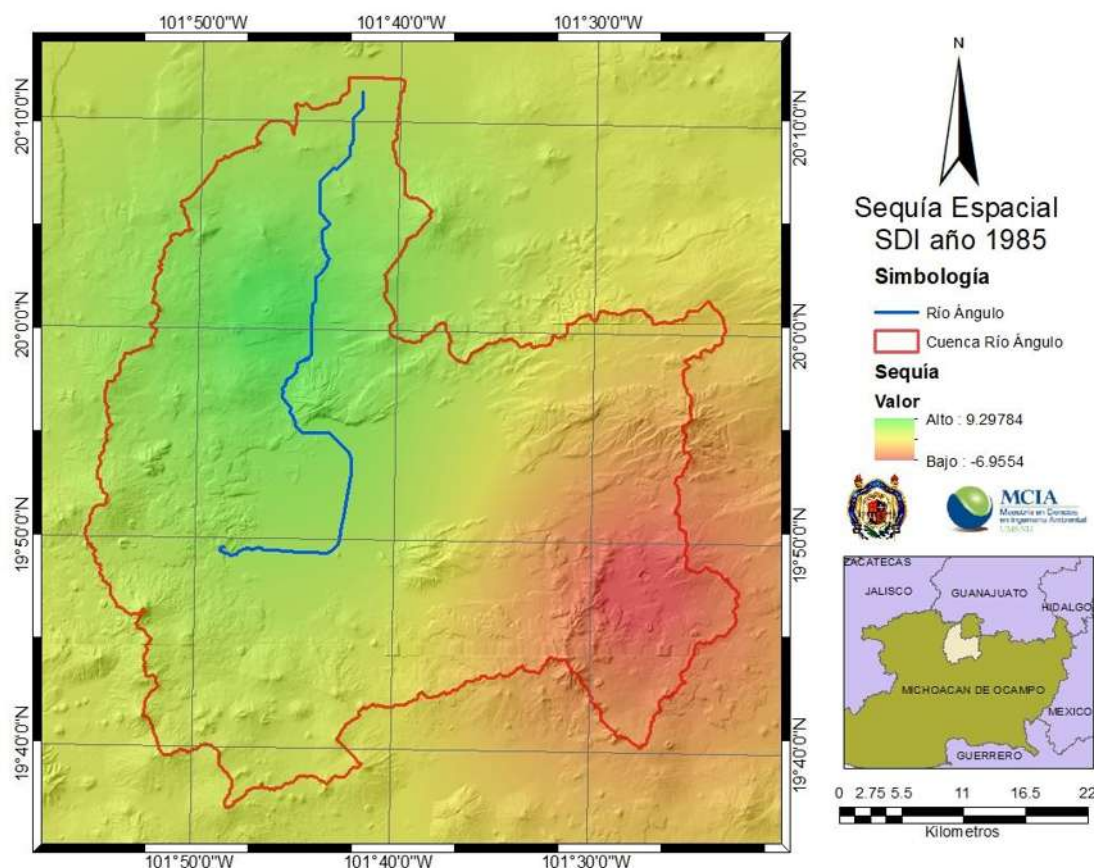


Figura 67. Análisis de la sequía histórica para el año 1985.

### 7.12.2. EVALUACIÓN DEL RIESGO

El modelo SIMRISK amplía el alcance del anterior modelo con la repetición de numerosas simulaciones con un periodo de tiempo de longitud dada y múltiples series hidrológicas. En base a estas simulaciones confecciona índices estadísticos que evalúan la situación de riesgo hidrológico del sistema.

Para la obtención de estadísticos de riesgo el modelo SIMRISK precisa realizar un número elevado de simulaciones con un periodo de tiempo de longitud dada y múltiples series hidrológicas. Y en base a estas simulaciones confecciona índices estadísticos que evalúan la situación de riesgo hidrológico del sistema.

Es muy común que los sistemas de recursos hídricos en la fase de explotación se gestionen sin al menos la conciencia de la probabilidad de ocurrencia de las sequías operativas, ni se tenga algún mecanismo explícito para enfrentarlas en el futuro, es decir, no se tiene un sistema de advertencia temprana (Andreu et al.,2007).

A continuación, se describen los índices desarrollados para evaluar el riesgo en el suministro a demandas, mantenimiento de reservas en embalses y mantenimiento de caudales ecológicos.

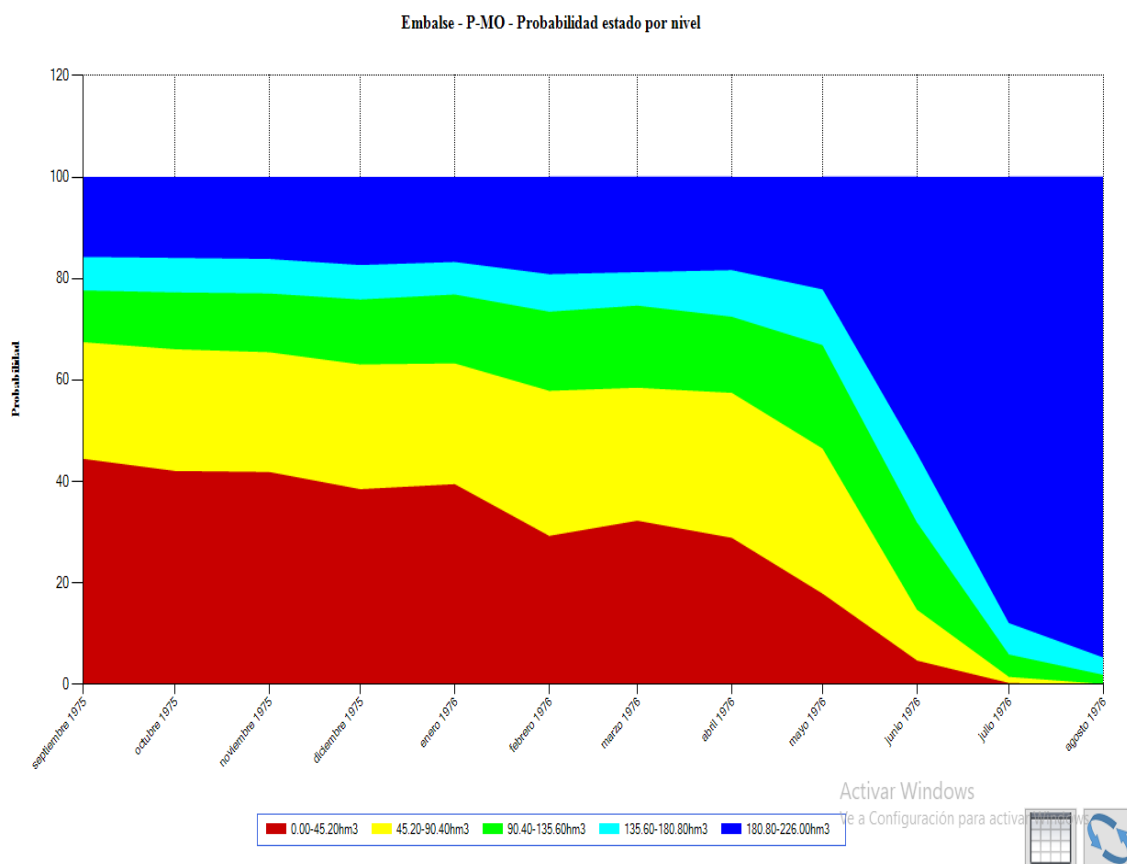


- Índices de riesgo en demandas.
- Índices de riesgo en embalses.
- Riesgo de fallo en criterios de Utah.

Para facilitar el análisis de las medidas a adoptaren situaciones de sequía el modelo dispone de una serie de utilidades para aplicar posibles medidas de ahorro de agua. Estas medidas consisten en definir restricciones al suministro a las demandas

Dada una situación inicial del sistema, el modelo puede ser utilizado entre otras finalidades para:

- Determinar la probabilidad de fallo de una demanda, para periodos futuros.
- Determinar probabilidades de distintos niveles de fallo en una demanda.
- Determinar la probabilidad de estado de los embalses, para periodos futuros.
- Determinar la probabilidad de fallo en un caudal mínimo, para periodos futuros
- Estudiar el efecto que distintos niveles de restricciones en las demandas tienen en dichas probabilidades de fallo futuro.



**Figura 68. Probabilidad de fallo en embalse Melchor Ocampo para el año 1975.**

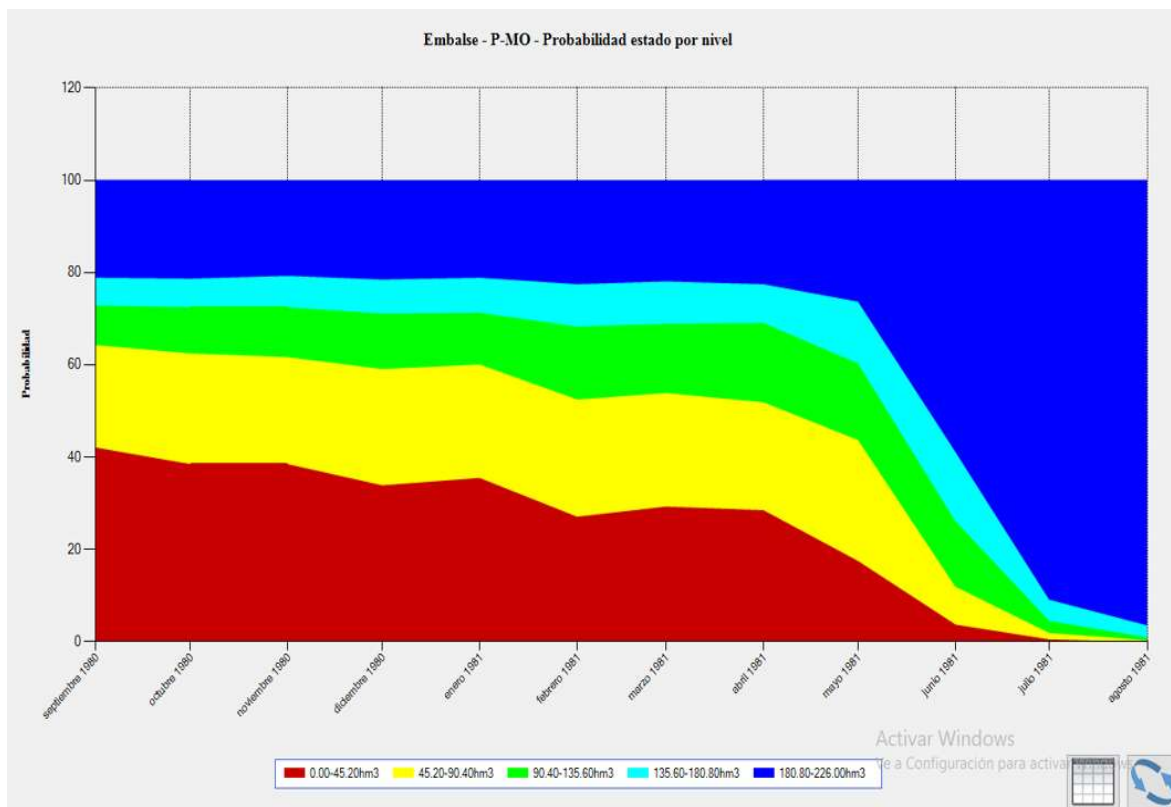


Figura 69. Probabilidad de fallo en embalse Melchor Ocampo para el año 1980.

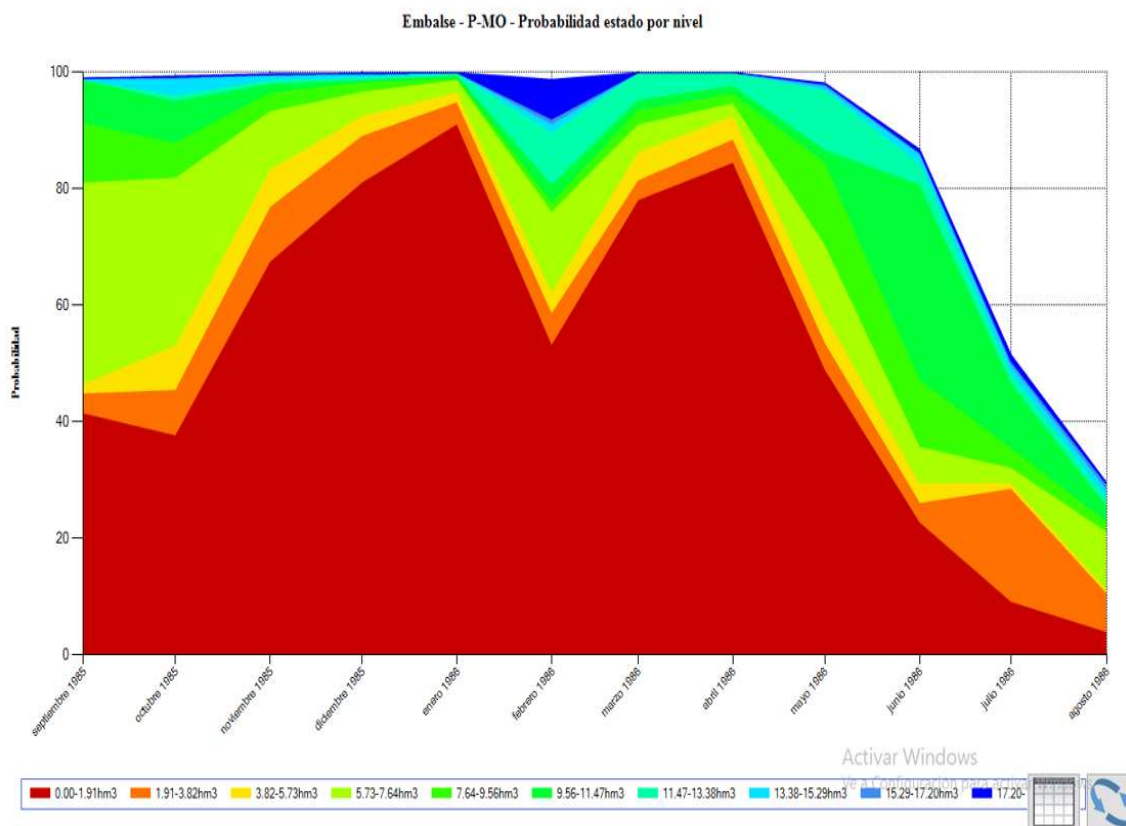


Figura 70. Probabilidad de fallo en embalse Melchor Ocampo para el año 1985.

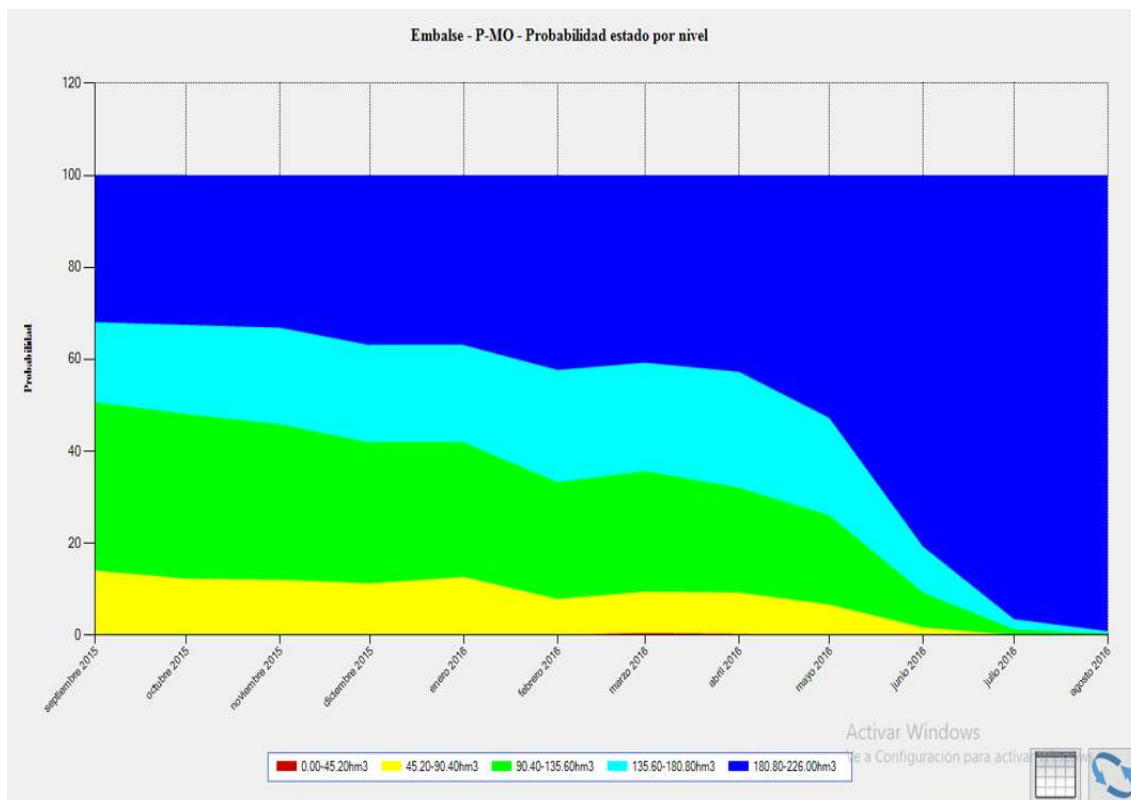


Figura 71. Probabilidad de fallo en embalse Melchor Ocampo para el año 2016.

Para el caso particular del embalse Melchor Ocampo se obtuvieron 500 series de simulaciones desde el año 1966 hasta el año 2016 tomando como inicio del año hidrológico al mes de septiembre y con la ayuda de las series de caudales generadas para utilizar sus estadísticos y a partir de este análisis se puede observar la variación de la probabilidad de fallo en sus distintos niveles desde la Figura 68 hasta la Figura 71.

En el año de 1975 (Figura 68) se observa que para el embalse MO existe una probabilidad de fallo del 40% iniciando en el mes de Septiembre que comienza a decrecer dicho riesgo mientras el transcurre el tiempo hasta llegar al mes de Julio donde la probabilidad es prácticamente nula, sin embargo, para el año 1985 (Figura 70) la probabilidad de un posible fallo en los niveles del embalse ascienden hasta aproximadamente un 93% durante los meses de Octubre y Febrero de dicho año lo que implica generar reglas de operación y restricciones a las demandas existentes dentro de la zona para garantizar el recurso hídrico y así lograr disminuir la probabilidad de fallo.

Por otro lado en el año 2015 se puede observar (Figura 71) los riesgos a posibles fallos son mínimos con lo cual las reglas operativas o restricciones son mínimas dentro del SRH de la cuenca del Río Angulo y con lo cual se garantiza un abastecimiento adecuado a las demandas de la zona.

## 8. CONCLUSIONES

Para el desarrollo de esta investigación fue necesario analizar, estudiar y recopilar información climática de las distintas estaciones meteorológicas de la zona de estudio (Figura 18) y algunos otros datos como geológicos e hidráulicos correspondientes a los acuíferos en estudio con validaciones mediante pruebas estadísticas que posteriormente alimentaron al primero modelo hidrológico generado para esta investigación.

Existen diversas herramientas informáticas que pueden ser útiles en diferentes áreas y para distintos propósitos. A continuación, se mencionan las herramientas informáticas que se emplearon y facilitaron en tiempo y forma de procesar los datos obtenidos. En primera instancia para el modelo de hidrología superficial EvalHid, utilizando el modelo Temez y comparando con los resultados del modelo HBV, teniendo en cuenta que este último toma en cuenta más parámetros de campo no fue el más óptimo esto debido a la falta de información fidedigna que alimenta al modelo por lo tanto Temez fue el modelo que más se asemeja a lo recopilado en las estaciones climáticas, por lo tanto el balance hídrico proporcionado genero las infiltraciones que alimentaron al segundo modelo hidrológico subterráneo y en conjunto con los niveles estáticos recabados dentro de ambos acuíferos para generar una calibración adecuada en Aquival. Se concluyó que entre más puntos de control se tengan la calibración para dicho modelo será mejor el resultado. De manera particular el flujo subterráneo modelado tiene una dirección que va del acuífero Zacapu hacia el acuífero Pastor Ortiz y los niveles estáticos oscilan entre los 2600 y 1900 msnm (Figura 22). Esto generado con la ayuda de un SIG como se observa en la Figura 43 por mencionar un ejemplo.

En este apartado se utilizó la simulación de la hidrología subterránea en otro software como lo fue MODFLOW, esto con la finalidad de crear una precalibración y posterior a ello ingresar los parámetros hidráulicos de los acuíferos en Aquival y generar una calibración lo más precisa posible a lo medido en campo y generar los ficheros correspondientes para proceder a crear un modelo de la gestión hídrica.

La gestión adecuada de los recursos hídricos es esencial para garantizar la sostenibilidad a largo plazo del suministro de agua y para proteger los ecosistemas acuáticos y la biodiversidad. Además, puede ayudar a reducir la vulnerabilidad frente a desastres naturales y a mejorar la resiliencia de las comunidades ante los desafíos del cambio climático, esto manteniendo los niveles por encima de los 100 hm<sup>3</sup> en el embalse la presa Melchor Ocampo que es el principal embalse del sistema y el cual puede almacenar hasta 250 hm<sup>3</sup>. El SRH de la cuenca del Río Angulo está conformado por los acuíferos mencionados anteriormente, la presa Melchor Ocampo situada en el municipio de Angamacutiro, distintas localidades que mantienen un consumo constante de agua potable subterránea y conformado por el DR036 Rosario Mezquite que a su vez se compone de 5 submódulos los cuales generan una demanda de recurso hídrico para abastecer alrededor de 63115 ha de diferentes cultivos

como la fresa, maíz, camote, trigo, etc. Dentro del modelo se localizaron aquellos tramos del Río Angulo donde se caracterizaron con la categoría de ganadores, es decir el acuífero Zacapu le cede agua al río y los cuales competen desde la parte de la Ciénega de Zacapu hasta el municipio de Villa Jiménez y posterior a ello el río presenta tramos perdedores donde su infiltración alimenta al acuífero Pastor Ortiz.

Se concluye de manera teórica que, a su vez dentro de la revisión de distintas bibliografías, la gestión de recursos hídricos se refiere al conjunto de acciones y estrategias destinadas a administrar, conservar y utilizar de manera sostenible los recursos de agua dulce disponibles en una determinada región o cuenca hidrográfica. Para ello los aspectos clave para llevar a cabo una adecuada gestión de recursos hídricos deben incluir los siguientes aspectos:

- Evaluación y monitoreo.
- Planificación y políticas.
- Participación pública y coordinación.
- Uso eficiente del agua.
- Adaptación al cambio climático.
- Educación y concienciación.

El modelo estocástico elegido fue el AR(1), obteniendo buenos resultados para la proyección de caudales a futuro y como apoyo a la gestión del riesgo, esto teniendo en cuenta que también se analizaron otros modelos como el AR(2) y ARMA pero que generaban mayores discrepancias en los resultados.

La desagregación espacial recomendada para sistemas muy grandes como el que se está tratando en esta investigación, y que además se crearon dos grupos teniendo una estación como la principal para las series estocásticas mantengan los estadísticos de media y varianza mantienen la correlación con su serie principal, teniendo una mayor confiabilidad en los resultados generados.

Se concluye que la sequía es un fenómeno meteorológico que se caracteriza por un período prolongado de tiempo en el que se registra una escasez significativa de precipitaciones, lo que resulta en una reducción significativa del suministro de agua. Esta falta de agua puede afectar a diferentes áreas, como la agricultura, la ganadería, el abastecimiento de agua potable, la generación de energía hidroeléctrica y la conservación de los ecosistemas naturales.

Las sequías pueden clasificarse en diferentes categorías, dependiendo de su intensidad y duración como lo son; sequía meteorológica, sequía agrícola, sequía hidrológica y sequía socioeconómica las cuales ya fueron descritas en capítulos anteriores.



La gestión del riesgo por sequía operativa se refiere a las acciones y estrategias que se implementan durante un evento de sequía para minimizar sus impactos negativos y garantizar una respuesta eficiente y efectiva ante la escasez de agua. Esta gestión tiene como objetivo reducir las pérdidas económicas, sociales y ambientales asociadas con la sequía y proteger a las comunidades y los ecosistemas vulnerables.

Algunas de las principales medidas y criterios de la gestión del riesgo por sequía operativa que se han incluido son:

- Monitoreo y predicción
- Planes de contingencia y respuesta
- Uso eficiente del agua
- Gestión de embalses y regulación de caudales
- Comunicación y concienciación

La gestión del riesgo por sequía operativa es una parte crucial de la gestión integral de los recursos hídricos y la adaptación al cambio climático. La coordinación entre las autoridades gubernamentales, las instituciones locales, las comunidades y otros actores relevantes es fundamental para una respuesta efectiva y una mitigación adecuada de los impactos de la sequía. Para esto se realizaron diversas modelaciones del impacto de la sequía en los niveles del embalse y distritos de riego.

Dentro de la misma zona de estudio se realizó una caracterización histórica de las sequías con el empleo del índice SPI y SDI para el análisis de lluvia y caudales en canales y ríos respectivamente con lo cual se observó de manera espacial que las sequías climáticas tienden a estar en la zona norte del SRH de la cuenca del río Angulo lo que propicia una mayor demanda de recurso hídrico en sus cultivos en las diversas etapas, sin embargo teniendo en cuenta que el principal cauce circula por esa zona con el índice SDI la zona se encuentra fuera de sequía.

El análisis se realizó para un periodo de 15 años mientras que cada lapso de tiempo fue de 5 años la sequía ha ido en incremento lo que ocasiona mayor demanda de caudal hidrológico en los principales canales y río para cubrir las demandas hídricas por parte de los agricultores del distrito de riego.

Finalmente, para el análisis del riesgo operativo para el embalse Melchor Ocampo se observa que sus niveles se han visto afectados por distintas cuestiones como la falta de lluvia en algunos periodos históricos lo que conlleva un menor almacenamiento del recurso hídrico y consecuentemente exista una variación en los volúmenes almacenados en distintos periodos de tiempo con lo cual se puede observar en los gráficos proporcionados por SimRisk las

probabilidades que existen ante posibles fallos siendo el periodo de 1985 en el que más riesgos se tuvo con un 93% de probabilidad lo que conlleva a generar reglas operativas de dicho embalse y del SRH de la cuenca del río Angulo para su mejor aprovechamiento y así garantizar cumplir las demandas de la zona en su totalidad o en su defecto en alto porcentaje de cumplimiento, sin embargo, para el año 2016 se observa que los riesgos a posibles fallos se reducen sin embargo lo ideal es reducir las probabilidades a fallos con lo cual se puede seguir trabajando entre los organismos operadores del SRH para garantizar el suministro adecuado a cada una de las demandas principalmente de carácter agrícola y mantener los niveles mínimos en el embalse para así garantizar infiltraciones y favorecer las recargas hacia el acuífero correspondiente.

## 9. BIBLIOGRAFÍA

- AGROASEMEX, S. A. D. C. V. (2006). La experiencia mexicana en el desarrollo y operación de seguros paramétricos orientados a la agricultura. *Scielo*.
- Alvarez, A., Solera, A., Capilla, J., & Ferrer, J. (2022). *Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta*.
- Andreu, J., Solera, A., Capilla, R., & Sánchez, S. T. (2007). *Modelo SIMRISK de Simulación múltiple de la Gestión de Recursos Hídricos con estimación del riesgo, incluyendo Utilización Conjunta*.  
<https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/ManSimriskEsp.pdf>
- Arreguin, F., López, M., Ortega, D., & Ibañez, O. (2016). La Política Pública contra la Sequía en México: Avances, Necesidades y Perspectivas. *Revista de Tecnología y Ciencias Del Agua*, 7(5), 63–76.
- Arreguin, I. (2017). *Evaluación Del Riesgo De Sequía Operativa, En El Sistema De Recursos Hídricos De La Cuenca Del Río Tepalcatepec*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- Avilés, A., Céleri, R., Solera, A., & Paredes, J. (2016). Probabilistic forecasting of drought events using Markov chain- and Bayesian network-based models: A case study of an Andean regulated river basin. *Water (Switzerland)*, 8(2). <https://doi.org/10.3390/w8020037>
- Begueria, S. (2002). Revisión de métodos paramétricos para la estimación de la probabilidad de ocurrencia de eventos extremos en Climatología e Hidrología: El uso de series de excedencias y su comparación con las series de máximos anuales. *VII Reunión Nacional de Climatología*, 83–92.  
[https://digital.csic.es/bitstream/10261/9859/1/BegueríaS\\_2002.pdf](https://digital.csic.es/bitstream/10261/9859/1/BegueríaS_2002.pdf)
- Betancurt, T., & Palacio, C. (2009). *La Modelacion Numerica Como Herramienta Para La Exploracion Hidrogeológica Y Construccion De Modelos Conceptuales (Caso de aplicación: Bajo Cauca Antioqueño)*.  
<http://www.scielo.org.co/pdf/dyna/v76n160/a04v76n160.pdf>
- Cadavid, J., & Carvajal, L. (2013). *Modelo autorregresivo bilineal aplicado a la predicción mensual de caudales en Colombia*.
- Cazares, S. (2021). *Gestión de la sequía operativa en el sistema de recursos hídricos río duero michoacan*. Universidad Michoacana de San Nicolas de Hidalgo.
- CENAPRED. (2001). *Diagnostico de peligros e identificación de riesgos de desastres en México*.
- Comisión Nacional del Agua. (2012). *Estadísticas agrícolas de los distritos de riego*.  
<http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Publicaciones/Publicaciones/SG IH-4-13.pdf>
- Comisión Nacional del Agua. (2018). *Estadísticas del Agua en México*.
- CONAGUA. (2015). *Plan General Maestro Estratégico de Investigación*.
- CONAGUA, C. N. del A. (2012). *Programa Hídrico Regional Visión 2030, Región Hidrológico-Administrativa VI Río Bravo*.
- Díaz Barriga Arroyo, U. S., López Corzo, R., Ortiz Aguilar, T. L., Torres Miranda, I., & Galván Vargas, E. (2019). Análisis del índice de sequía en

- caudales (SDI) empleando escurrimiento natural en la cuenca mexicana del río Lerma. *Aqua-LAC*, 11(2), 17–28. <https://doi.org/10.29104/phi-aqualac/2019-v11-2-02>
- Esquivel, A., Palmira, N., Sánchez-Cohen, I., Velazquez-Valle, M., & Esquivel, O. (2014). Evaluación del Índice de Sequía de Caudales en Cuencas del Norte-Centro de México. *Agrofaz*, 14(2), 53–60.
- Estrela, T. (1999). *Los modelos de simulación integral de cuenca y su utilización en estudios de recursos hídricos*. 83–95.
- Fernandez, B. (1994). *Sequías: Caracterización Y Mitigación*.
- Gutierrez, M., & Márquez, J. y otros. (2004). Modelación De Acuíferos Para El Aprovechamiento Sostenible Del Agua Subterránea. *Ingeniería de Recursos Naturales y Del Ambiente*, 1692–9918.
- Hassani, H., & Silva, E. (2015). A Kolmogorov-Smirnov Based Test for Comparing the Predictive Accuracy of Two Sets of Forecasts. *Econometrics*, 3(3), 590–609. <https://doi.org/10.3390/econometrics3030590>
- Hayes, M. J., Svoboda, M. D., Wilhite, D. A., & Vanyarkho, O. V. (1999). Monitoring the 1996 Drought Using the Standardized Precipitation Index. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 80(3), 429–438. [https://doi.org/10.1175/1520-0477\(1999\)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0477(1999)080<0429:MTDUTS>2.0.CO;2)
- INEGI. (2021). *Sistema Nacional de Información Estadística y Geográfica*. <https://www.inegi.org.mx/temas/mg/#Herramientas>
- Marco, J. (1993). *Hidrología estocástica y planteamiento hidráulico en conceptos y métodos para la planificación hidrológica*.
- Marizza, M. S. (2003). *Integración de la información espacio temporal para la restitución de las series de aportaciones al régimen natural utilizando sistemas de información geográfica*. [UPM]. <http://oa.upm.es/1227/>
- McKee, B., N., D., & Kleist, J. (1995). *Drought monitoring with multiple time scales*. *Preprints, Nineth conf. on Applied Climatology*.
- Morote Seguido, Á. F. (2020). Experiencia didáctica en postgrado sobre la interpretación de los riesgos naturales y el cambio climático. Ejemplos de estudios de caso en la provincia de Alicante (España). *Cuadernos de Geografía de La Universitat de València*, 103. <https://doi.org/10.7203/cguv.103.16015>
- Nalbantis, I. (2008). *Evaluation of Hydrological Drought Index*. *European Water Publications*. 23/24, 67–77.
- Nalbantis, I., & Tsakiris, G. (2009). *Assessment of Hydrological Drought Revisited*. *Water Resources Management*. 23(5), 891–897.
- OMM, O. M. M. (2016). *Manual de Indicadores e Índices de sequía* (pp. 1–46).
- Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., & Lerma, N. (2017). *Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos*. [https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual\\_Tecnico\\_EvalHid.pdf](https://aquatool.webs.upv.es/files/manuales/aquatool/Manual_Tecnico_EvalHid.pdf)
- PRONACOSE. (2014). *Política Pública Nacional para la Sequía Documento rector*.
- R, L., Ortiz, T., & Cruz, F. (2016). Análisis de sequías para la subregión hidrológica Lerma-Chapala aplicando el Índice de Escurrimientos Estandarizados (Streamflow Drought Index, SDI) en México. *XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica*, 30.

- Ruiz-Ortiz, V., Garcíá-López, S., Solera, A., & Paredes, J. (2019). Contribution of decision support systems to water management improvement in basins with high evaporation in Mediterranean climates. *Hydrology Research*, 50(4). <https://doi.org/10.2166/nh.2019.014>
- Sahuquillo A., C. E. et al. (2010). *Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas*.
- Salas, J., Delleur, J., Yevjevich, V., & Lane W. (1980). Applied Modeling of Hydrologic Time Series. *Water Resources Publications*.
- Servicio Meteorológico Nacional. (2020). *Datos climáticos diarios del CLICOM*. <http://clicom-mex.cicese.mx>
- Servín, C. C. (2005). Las sequías en Mexico durante el siglo XIX. *Investigaciones Geográficas*.
- Solera, A., Paredes, J., & Andreu, J. (2015). *AQUATOOL +*.
- Temez, J. R. (1977). *Modelo matemático de transformación. Precipitación. Aportación*. 39.
- Universidad Politecnica De Valencia. (2007). *MASHWIN. MODELO DE ANÁLISIS DE SERIES HIDROLÓGICAS*.
- Valencia, J., Nigenda, J., & Vargas, L. (2005). *La gestión integrada de los recursos hídricos en México: un nuevo paradigma en el manejo del agua*.
- Vassolo, S. (2001). *Aplicación de Modelos Numéricos en Aguas Subterráneas*.
- Vidaurri, C. (2017). *Usos de la Información Climática en la Gestión del Riesgo ante Sequías* [UNAM]. [http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/1E58P13KNKL72L2X8YLY2BF6YS154MH2RN3FE6GR95KP6DTT25-23973?func=full-set-set&set\\_number=028251&set\\_entry=000006&format=999](http://oreon.dgbiblio.unam.mx/F/1E58P13KNKL72L2X8YLY2BF6YS154MH2RN3FE6GR95KP6DTT25-23973?func=full-set-set&set_number=028251&set_entry=000006&format=999)
- Yevjevich, V. (1972). Probability and statistics in hydrology. *Fort Collins*.