



Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo

Facultad de Ingeniería Química
Facultad de Ingeniería Civil
Facultad de Biología

Programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental

**GESTIÓN INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS
EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO,
ANTE EL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO**

TESIS

Para obtener el grado de
Maestro en Ciencias en Ingeniería Ambiental

Presenta

Ingeniero Civil Jesús Pardo Loaiza

Director de Tesis:

Doctor en Ingeniería de Procesos Julio César Orantes Ávalos

Co-Director de Tesis:

Doctora en Ingeniería de Caminos, Canales y Puertos
Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Morelia, Michoacán, Febrero de 2016



AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por apoyarme y comprenderme en todo momento

A la Dra. Sonia, por sus conocimientos y por el apoyo a mi persona para la
realización de este trabajo

Al Dr. Julio Orantes, por su apoyo y por sus conocimientos

Al Dr. Abel Solera, por sus aportes a este trabajo y por su apoyo durante mi
estancia

A mis sinodales por sus aportes a este trabajo y por su apoyo en la culminación
de este trabajo

A todos mis amigos que en algún momento fueron parte de este trabajo, gracias
por sus aportes y más que nada por su amistad

Gracias a la vida, por permitirme seguir adelante



RESUMEN

Uno de los recursos naturales más utilizados en el desarrollo humano es el agua. A pesar de su abundancia, su disponibilidad relativa y creciente demanda hacen que sea considerada como recurso escaso y que se tienda a racionalizar su consumo. La gestión de los recursos hídricos puede definirse como el conjunto de actividades, funciones, organización, recursos, políticas y participación, aplicados en una cuenca. Esta gestión puede ser compleja. Sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, puede representarse en forma simplificada utilizando simulaciones matemáticas como es el caso del programa SIMGES. El objetivo de estas simulaciones es estudiar la operación de los sistemas y predecir sus respuestas a un determinado impulso ingresado en el mismo.

Es común pensar que el cambio climático solo se manifestara en incrementos en las temperaturas. Sin embargo, no es así; por ello, es necesario identificar cuáles serán los sectores más vulnerables al cambio climático.

Por lo que, el reto principal de esta investigación consiste en incorporar la variable del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos, ya que dada la incertidumbre que actualmente existe sobre la evolución del clima, no se puede suponer que el régimen hidrológico a futuro sea similar al del pasado.

El objetivo de este estudio es estimar la repercusión sobre los trabajos relativos a la planificación de recursos hídricos en sistemas complejos ante el efecto del cambio climático y ante el empleo de un modelo de gestión, el cual será desarrollado con el programa SIMGES.

PALABRAS CLAVE: gestión de recursos hídricos, cambio climático, cuenca, acuífero.



ABSTRACT

One of the most widely used natural resources in human development is water. Despite its abundance, its relative availability and increasing demand make it to be considered as a scarce resource and that tends to rationalize consumption. Water management resources can be defined as the set of activities, functions, organization, resources, policies and participation applied in a basin. This management can be complex. However, in the absence of perfect knowledge, it can be represented in simplified form by using mathematical simulations such as the SIMGES program. The goal of these simulations is to study the system's operations and predict their responses to a given impulse entered in it.

It is commonly thought that climate change is only manifested in increased temperatures. However, it is not; therefore, it is necessary to identify the most vulnerable sectors to climate change.

The main challenge of this research is to incorporate the variable of climate change in the planning and management of water resources, and given the current uncertainty about the evolution of climate, you cannot assume that the hydrological regime in the future will be similar to the one in the past.

The aim of this study is to estimate the repercussion on water resource planning in complex systems due to the impact of climate change and the use of a management model, which will be developed with the SIMGES program.



Tabla de contenido

1.	Introducción	1
1.1.	Objetivo General	3
1.2.	Objetivos específicos.....	3
1.3.	Hipótesis.....	3
1.4.	Justificación	4
2.	Marco Teórico	5
2.1	Sistemas de recursos hídricos	5
2.1.1	Usos del agua	7
2.1.2	Gestión de recursos hídricos	10
2.1.3	Modelos matemáticos en la Gestión de Recursos Hídricos	11
2.1.4	El modelo SIMGES	13
2.2	Cambio climático	15
2.3	Antecedentes	20
2.4	Caracterización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo	34
3.	Metodología	39
3.1	Selección de escenarios climáticos	41
3.2	Recopilación de datos	46
3.2.1	Estaciones climatológicas.....	46
3.2.2	Estaciones hidrométricas	48
3.2.3	Información del acuífero Morelia Queréndaro	48
3.2.4	Información de Presas.....	48
3.2.5	Demanda urbana.....	49
3.2.6	Demanda Industrial y Agrícola.	49
3.3	Análisis y validación estadística de los datos	49
3.4	Modelo lluvia - escurrimiento	51
3.5	Requerimiento de cultivos	52
3.6	Demanda urbana.....	53
3.7	Modelación del acuífero	54
3.8	Sistema de Gestión de Recursos Hídricos SIMGES.....	56



4.	Resultados	59
4.1	Determinación de series de precipitación y temperatura con efectos de cambio climático.....	59
4.2	Criterio de selección de estaciones climáticas.....	65
4.3	Validación de series futuras.	72
4.4	Determinación de las aportaciones en la cuenca del lago de Cuitzeo.....	77
4.5	Determinación de las aportaciones futuras en la cuenca del lago de Cuitzeo.	88
4.6	Modelación del Acuífero Morelia - Queréndaro.....	93
4.7	Calculo de la demanda urbana y agrícola en la Cuenca del Lago de Cuitzeo.....	103
4.7.1	Demanda agrícola.....	103
4.7.2	Demanda urbana.....	106
4.8	Esquema de simulación de la cuenca del Lago de Cuitzeo en el programa SIMGES.	110
4.9	Simulación de la cuenca del Lago de Cuitzeo con el efecto del Cambio Climático.....	119
4.10	Determinación de reglas de operación para la gestión de la cuenca del Lago de Cuitzeo ante el efecto del Cambio Climático.	128
4.10.1	Regla de operación A, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas.	131
4.10.2	Regla de operación B, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción en la demanda agrícola.....	132
4.10.3	Regla de operación C, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción del 20% en la demanda agrícola.	133
4.10.4	Regla de operación D, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción del 30% en la demanda agrícola.	134
4.10.5	Regla de operación E, considerando un mayor bombeo en las demandas urbanas y agrícolas que tengan interacción con el Acuífero Morelia-Queréndaro.....	135
5.	Conclusiones y recomendaciones	136
5.1	Conclusiones.....	137
5.2	Recomendaciones	137
6.	Referencias.....	138



Índice de Tablas

TABLA 1 CLASIFICACIÓN DE LOS PRINCIPALES USOS DEL AGUA	8
TABLA 2 NUEVOS ESCENARIOS RCP (MOSS, ET AL. 2010).	18
TABLA 3 RANGOS PARA LA EVALUACIÓN DE LA CONSISTENCIA MEDIANTE EL MÉTODO DE SECUENCIAS	50
TABLA 4 ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	60
TABLA 5 ESTACIONES PRINCIPALES	68
TABLA 6 PRUEBA DE HELMERT Y SECUENCIAS DE LA ESTACIÓN 16022	70
TABLA 7 HOMOGENEIDAD DE LAS ESTACIONES PRINCIPALES	71
TABLA 8 ESTACIONES DE CC	75
TABLA 9 RELACIÓN DE SUBCUENCAS DE CUITZEO	78
TABLA 10 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO	82
TABLA 11 PARÁMETROS UTILIZADOS EN EL CÁLCULO DE LAS APORTACIONES	85
TABLA 12 CALIBRACIÓN DE LOS NIVELES PIEZOMÉTRICOS DEL ACUÍFERO	102
TABLA 13 RELACIÓN DEL VOLUMEN BRUTO DE LOS MÓDULOS DE RIEGO	106
TABLA 14 DEMANDA URBANA POR ZONA (HISTÓRICA Y FUTURA)	109
TABLA 15 INDICADORES DE AJUSTE DE CALIBRACIONES DEL MODELO DE GESTIÓN	118
TABLA 16 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS DEL ESCENARIO HISTÓRICO	129
TABLA 17 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS ORIGINALES	130
TABLA 18 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS REGLA DE OPERACIÓN A	131
TABLA 19 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS REGLA DE OPERACIÓN B	132
TABLA 20 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS REGLA DE OPERACIÓN C	133
TABLA 21 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS REGLA DE OPERACIÓN D	134
TABLA 22 GARANTÍAS VOLUMÉTRICAS REGLA DE OPERACIÓN E	135

Índice de Figuras

FIGURA 1 A) CAMBIOS EN EL FORZAMIENTO DE RADIACIÓN RELACIONADO A LAS CONDICIONES PRE-INDUSTRIALES. B) EMISIONES DE CO ₂ DE ENERGÍA E INDUSTRIA PARA LOS CUATRO RCP. (MOSS, ET AL. 2010)	19
FIGURA 2 MAPAS DE EVENTOS EXTREMOS A CAUSA DEL CC. FUENTE: MANAGING THE RISKS OF EXTREME EVENTS AND DISASTERS TO ADVANCE CLIMATE CHANGE ADAPTATION, IPCC-2012.	21
FIGURA 3 MARCO INSTITUCIONAL DEL SISTEMA NACIONAL DE CAMBIO CLIMÁTICO (DOF, 2013)	26
FIGURA 4 CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO	36
FIGURA 5 DRENAJE DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO	37
FIGURA 6 UBICACIÓN DE ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS	59
FIGURA 7 ESTACIONES DE CAMBIO CLIMÁTICO	67
FIGURA 8 CORRELOGRAMA DE LA ESTACION 16016	69
FIGURA 9 CORRELOGRAMA DE LA ESTACION 16022	69
FIGURA 10 SUBCUENCAS DEL ÁREA DEL ESTUDIO	79



FIGURA 11 ESTACIONES HIDROMÉTRICAS EN LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO	80
FIGURA 12 VISTA DEL PROGRAMA EVALHID	82
FIGURA 13 COMPARATIVA DE APORTACIONES MENSUALES SIMULADAS Y REALES DE LA ESTACIÓN SANTIAGO UNDAMEO.....	83
FIGURA 14 COMPARATIVA DE AÑO MEDIO SIMULADO Y REAL DE LA EST. SANTIAGO UNDAMEO	84
FIGURA 15 COMPARATIVA DE APORTACIONES MENSUALES SIMULADAS Y REALES DE LA ESTACIÓN QUERÉNDARO.....	84
FIGURA 16 COMPARATIVA DE AÑO MEDIO SIMULADO Y REAL DE LA EST. QUERÉNDARO	85
FIGURA 17 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA APORTACIÓN ATAPANEÓ.....	86
FIGURA 18 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA APORTACIÓN EL PLAN	86
FIGURA 19 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA APORTACIÓN CHIQUITO	87
FIGURA 20 ESCURRIMIENTO SUPERFICIAL DE LA APORTACIÓN SALIDAS MALPAIS	87
FIGURA 21 COMPARACIÓN DEL AÑO MEDIO DE LA APORTACIÓN DE SANTIAGO UNDAMEO (FUTURO CERCANO)	88
FIGURA 22 COMPARACIÓN DEL AÑO MEDIO DE LA APORTACIÓN DE SANTIAGO UNDAMEO (FUTURO LEJANO).....	89
FIGURA 23 APORTACIÓN ANUAL (2075-2099) DE LA EST. SANTIAGO UNDAMEO C.C.	90
FIGURA 24 COMPARACIÓN DEL AÑO MEDIO DE LA APORTACIÓN DE QUERÉNDARO (FUTURO CERCANO).....	91
FIGURA 25 COMPARACIÓN DEL AÑO MEDIO DE LA APORTACIÓN DE QUERÉNDARO (FUTURO LEJANO)	92
FIGURA 26 APORTACIÓN ANUAL (2075-2099) DE LA EST. QUERÉNDARO	92
FIGURA 27 DISCRETIZACIÓN DEL ACUÍFERO.....	94
FIGURA 28 RED DE FLUJO SUBTERRÁNEO (CONAGUA 2007).....	94
FIGURA 29 UBICACIÓN DE LAS ÁREAS URBANAS Y LAS ÁREAS DE RIEGO EN LA ZONA DE ESTUDIO	96
FIGURA 30 UBICACIÓN DE LOS POZOS CON PRUEBAS DE ABATIMIENTO	97
FIGURA 31 DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA URBANA	100
FIGURA 32 TRANSMISIVIDADES DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERENDARO	101
FIGURA 33 COEFICIENTES DE ALMACENAMIENTO DEL ACUÍFERO MORELIA-QUERENDARO.....	101
FIGURA 34 NIVEL PIEZOMÉTRICO DE LA CELDA 26.....	102
FIGURA 35 NIVEL PIEZOMÉTRICO DE LA CELDA 92.....	103
FIGURA 36 DISTRITO DE RIEGO MORELIA - QUERENDARO	104
FIGURA 37 RELACIÓN DE CULTIVOS EN ALGUNOS MÓDULOS DEL DISTRITO DE RIEGO MORELIA QUERÉNDARO.....	105
FIGURA 38 PROYECCIÓN DE POBLACIÓN MORELIA	107
FIGURA 39 PROYECCIÓN DE POBLACIÓN TARÍMBARO	107
FIGURA 40 PROYECCIÓN DE POBLACIÓN ÁLVARO OBREGÓN	108
FIGURA 41 DISTRIBUCIÓN DE LA DEMANDA URBANA	109
FIGURA 42 ESQUEMA DE SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL LAGO DE CUITZEO EN EL ENTORNO SIMGES	110
FIGURA 43 DETALLE DEL ESQUEMA DE SIMULACIÓN SIMGES DE LA CUENCA LAGO DE CUITZEO	112
FIGURA 44 VOLÚMENES HISTÓRICOS DE LA PRESA DE COINTZIO	113
FIGURA 45 VOLÚMENES HISTÓRICOS DE LA PRESA MALPAÍS.....	114
FIGURA 46 VOLUMEN MEDIO HISTÓRICO DE LA PRESA DE COINTZIO	114
FIGURA 47 VOLUMEN MEDIO HISTÓRICO DE LA PRESA MALPAIS.....	115
FIGURA 48 CALIBRACIÓN DE LA PRESA DE COINTZIO (AÑO MEDIO)	115
FIGURA 49 CALIBRACIÓN DE LA PRESA MALPAIS (AÑO MEDIO)	116
FIGURA 50 COMPARATIVA DE VOLUMEN MENSUAL DE LA PRESA DE COINTZIO	116
FIGURA 51 COMPARATIVA DE VOLUMEN MENSUAL DE LA PRESA MALPAIS.....	117
FIGURA 52 COMPARATIVA DE VOLUMEN MENSUAL DE LA EST. ATAPANEÓ.....	117
FIGURA 53 VOLUMEN MENSUAL DEL LAGO DE CUITZEO	118
FIGURA 54 COMPARATIVA DEL VOLUMEN MEDIO DE LA PRESA DE COINTZIO (2039)	120



FIGURA 55 COMPARATIVA DEL VOLUMEN MEDIO DE LA PRESA DE COINTZIO (2099)	121
FIGURA 56 COMPARATIVA DEL VOLUMEN MEDIO DE LA PRESA MALPAIS (2039)	122
FIGURA 57COMPARATIVA DEL VOLUMEN MEDIO DE LA PRESA MALPAIS (2099)	123
FIGURA 58 COMPARATIVA DEL VOLUMEN DEL LAGO DE CUITZEO (2039)	124
FIGURA 59 COMPARATIVA DEL VOLUMEN DEL LAGO DE CUITZEO (2099)	124
FIGURA 60 COMPARATIVA DE LA RECARGA NETA DEL ACUÍFERO (2039)	125
FIGURA 61 COMPARATIVA DE LA RECARGA NETA DEL ACUÍFERO (2099)	126
FIGURA 62 COMPARATIVA DEL BOMBEO TOTAL DEL ACUÍFERO (2039)	127
FIGURA 63 COMPARATIVA DEL BOMBEO TOTAL DEL ACUÍFERO (2099)	127
FIGURA 64 COMPARATIVA DE LA RECARGA DEL ACUÍFERO 2099	136
FIGURA 65 COMPARATIVA DEL BOMBEO DEL ACUÍFERO 2099	136



1. Introducción

El agua es dentro de los recursos que nos provee la naturaleza, el más importante e indispensable. Debido a la presencia o falta de éste, se desencadenan beneficios o desastres muchas veces irreversible. Sin embargo, la necesidad del agua es vital para el ser humano, como es también en los animales, plantas silvestres, agricultura, ganadería, industria y para la producción de energía.

Las Organización de las Naciones Unidas y la FAO mencionan que los recursos hídricos a nivel mundial se utilizan en la agricultura en un 70%, donde se mantienen sistemas de riego ineficientes con pérdidas de evaporación de hasta el 60%. Por su parte, la industria utiliza el 22% de los recursos de agua globales y, escasamente, el 8% se destina a usos domésticos y de servicios. Además de que se prevé que la extracción de agua aumentará en un 50 por ciento en 2025 en los países en desarrollo, y el 18 por ciento en los países desarrollados.

La interacción y progreso de la sociedad con el ambiente requieren de una planificación de los recursos naturales, ya que son la fuente de vida y al deteriorarse éstos, el costo de vida y desarrollo se incrementan, sin mencionar que la recuperación de los recursos pueda no ser irreversible. Uno de los recursos renovables con los que hasta ahora cuenta la cuenca es el agua, la cual depende de las condiciones climáticas, como de la concienciación de la población y de un adecuado manejo de los operadores de los sistemas hidráulicos.

Una situación que nos preocupa es el cambio climático que estamos viviendo en la cuenca, debido a los escenarios que mundialmente se vislumbran por el aumento de temperatura y variación en las precipitaciones.



Habitualmente, realizamos estudios de prospecciones climáticas con el período de retorno asumiendo que prevalecerán las mismas características y variabilidad que las condiciones del pasado, sin considerar los cambios climáticos que pudieran presentarse. Por lo que, el reto principal de esta investigación consiste en incorporar la variable del cambio climático en la planificación y gestión de los recursos hídricos, ya que dada la incertidumbre que actualmente existe sobre la evolución del clima, no se puede suponer que el régimen hidrológico a futuro sea similar al del pasado.

Este trabajo se desarrollará mediante el programa SIMGES, el cual permite realizar simulaciones con modelos de gestión de recursos hídricos con el objeto de evaluar los efectos del cambio climático de una forma cuantitativa y con los resultados de éste proponer medidas de mitigación que aseguren la disponibilidad del recurso.



1.1.Objetivo General

Evaluar el efecto del cambio climático, en la gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca del Lago de Cuitzeo, mediante el uso del modelo SIMGES.

1.2. Objetivos específicos

- Seleccionar los modelos de cambio climático a incorporar a la gestión integrada de los recursos hídricos, con base en el análisis de los escenarios de precipitación y temperatura.
- Determinar los escurrimientos superficiales, mediante la simulación hidrológica de la cuenca.
- Modelar, simular y validar el comportamiento del acuífero Morelia-Queréndaro.
- Evaluar las demandas para los usos urbano, agrícola e industrial en la cuenca.
- Definir, calibrar y validar el esquema de simulación de la gestión integrada de recursos hídricos de la cuenca del Lago de Cuitzeo.
- Evaluar el sistema de gestión integrada de los recursos hídricos, ante el efecto de cambio climático.

1.3.Hipótesis

El uso del modelo SIMGES, permitirá evaluar el efecto del cambio climático en la gestión integrada de recursos hídricos en la Cuenca del Lago de Cuitzeo



1.4. Justificación

El cambio climático ha afectado de manera significativa al medio ambiente como lo es en la periodicidad de eventos atípicos. La ubicación geográfica de la Cuenca del Lago de Cuitzeo la hace vulnerable. Los pronósticos del aumento de la temperatura, el crecimiento desmedido de la población y la deforestación inciden en la baja disponibilidad del recurso hídrico.

La integración y participación de los tres órdenes de gobierno, la academia, el sector productivo y la sociedad civil permite llevar a cabo políticas de planeación encaminadas al uso eficiente del recurso hídrico, no obstante, es de vital importancia la concienciación de la población en general.

La existencia de estudios técnicos y académicos han sido base en la generación de acuerdos que han permitido encausar acciones y proyectos en beneficio de los usuarios del recurso hídrico; tal es el caso de las acciones en pro de su saneamiento.

Después de haber hecho una revisión bibliográfica, se ha observado que se cuentan con pocos estudios que contemplen la variable del cambio climático y la evalúen en un contexto de Gestión de Recursos Hídricos. La intención de este estudio es la de evaluar la disponibilidad del agua en escenarios futuros a mediano y largo plazo con la finalidad de que los tomadores de decisiones (gobierno) puedan contar con instrumentos que les permitan realizar acciones en beneficio de toda la población.



2. Marco Teórico

2.1 Sistemas de recursos hídricos

El agua constituye uno de los recursos naturales más utilizados, dada su importancia en el desarrollo humano y en equilibrio de los ecosistemas.

A pesar de la abundancia del agua en la naturaleza, su disponibilidad relativa y creciente demanda hacen que la sociedad la considere como recurso escaso, lo que presiona a los administradores y usuarios a racionalizar su consumo, a través de alternativas que promuevan un uso integral y eficiente mediante una valoración no integral del mismo. En este sentido, recurrir a la teoría de sistemas es un punto de partida que permite analizar la interacción sociedad-agua.

Dependiendo del fenómeno que se analiza y de las relaciones que unen o alimentan al sistema, estos pueden ser cerrados, esto es, que no tienen relaciones con su medio o, abiertos. En éstos últimos las relaciones son frecuentes y admiten cambios y adaptaciones (Parsegian, 1973 citado por Johansen, 1999).

Los recursos naturales tienen esta característica, fundamentada en la tesis de Pfaundler a principios del siglo XX, que indica que la capacidad sustentadora de la tierra no está determinada por la disponibilidad de materiales sino por la de energías libres, ya que según la ley de la conservación de la materia los materiales pueden reciclarse por completo, favoreciendo un nuevo orden tanto en el tiempo como en el espacio (Martínez y Schlüpmann, 1993). En el caso del agua, esta apreciación tiene doble matiz, ya que, si bien es cierto que desde el punto de vista físico constituye un recurso renovable, también se agota cuando se analizan aspectos de disponibilidad y distribución.

En esta relación agua-sociedad, los factores climáticos y fisicoquímicos se ven delimitados por la intervención del hombre en lo individual y como en lo colectivo, se



presenta un caso práctico de la primera ley de la termodinámica, ya que el hombre incorpora un recurso natural a un proceso productivo o de servicio con dos alternativas: el recurso se acumula en el sistema económico o se vuelve al medio ambiente como desecho por medio del flujo de energía, de tal manera que a partir de aquí pierde su calidad intrínseca y por lo tanto su valor de uso (Sepúlveda, 2002).

El Ciclo Hidrológico, el cual es un término descriptivo aplicable a la circulación general del agua en la Tierra, es alimentado tanto por agua superficial como por agua subterránea. Se sabe que este ciclo inicia con la evaporación del agua en los océanos propiciada por la energía solar y concluye con la precipitación y escurrimiento del agua por efecto de la gravedad terrestre hasta que una parte de ella penetra bajo la superficie del terreno infiltrándose llenando los poros y fisuras del suelo, misma que cuando es abundante desciende hasta recargar y ubicarse en un acuífero (US Environmental Protection Agency, 2012).

Las aguas superficiales, exceptuando el aguamarina, son aquellas que se originan a partir del agua de precipitación atmosférica, de afloramientos de agua subterránea o bien de la fusión de masas de hielo. Se pueden distinguir tres tipos de agua superficial: el agua de escorrentía, la retenida en reservorios naturales o artificiales y el agua de estuarios. (Diccionario aguamarket, 2001).

Las aguas subterráneas, de acuerdo a Del Valle (1991) y Hornsby (2000) coinciden en señalar que el agua subterránea o freática forma parte del agua del subsuelo, encontrándose en los vacíos que existen entre las partículas del suelo y las rocas o entre las grietas del lecho rocoso, siendo a su vez la primera fuente hídrica en regiones áridas y semiáridas. Adicionalmente Aboites (1998), destaca al referirse a aguas subterráneas la necesidad de distinguir entre agua somera o freática y artesisana, la primera es aquella que se halla a menor profundidad, pero por encima de la primera capa impermeable del subsuelo; la segunda, es aquella que se encuentra



cubierta o encerrada entre capas impermeable, por lo que genera una presión diferente a la del acuífero libre lo que la hace subir a la superficie.

Chávez (2004) define al acuífero como una formación geológica subterránea que se ha creado a lo largo de varios años como resultado de la infiltración del agua de lluvia o del agua de los ríos, lagos y deshielos. A esta infiltración se le conoce como recarga y esta puede ser natural, inducida, incidental o artificial.

2.1.1 Usos del agua

Se entiende por “Uso” al empleo continuo y habitual de una cosa, entendiéndose por cosa, todo lo que tiene entidad ya sea corporal o espiritual, natural o artificial, real o abstracta. Uso es un concepto relacionado con el provecho que se obtiene de las cosas. En términos hídricos, se aplica como sinónimo de utilización, consumo o demanda, de forma tal que las necesidades de agua varían de un usuario a otro, los usos del agua determinan la cantidad utilizada de este recurso.

De acuerdo con la Ley de Aguas Nacionales, en México “uso” es la aplicación del agua a una actividad que implique el consumo parcial o total de ese recurso (CNA, 2012a), mientras que para otros autores se considera “uso” a cada una de las distintas clases de utilización del agua según su destino, cuya cantidad derivada del sistema hidrológico es tomada de los embalses o se extrae de los acuíferos (Llamas *et al*, 2001).

A diferencia de uso, “demanda” tiene dos acepciones, la del usuario en la que demanda de agua significa la cantidad de agua requerida por los diferentes usos en las condiciones económicas en que ésta es ofertada; y la técnica, que implica además la pérdida por transporte y la evaporación. En el caso del agua subterránea, la demanda es equivalente a la extracción del bombeo (Llamas *et al*, 2001).



Desde el punto de vista hidrológico, existen dos tipos de uso de agua: consuntivos y no consuntivos. El Uso consuntivo es aquel en el que por características del proceso existen pérdidas volumétricas de agua, misma que se determina por la diferencia del volumen de una cantidad determinada que se extrae menos una que se descarga y que se señala en el título –concesión o asignación- respectivo. Mientras que el uso no consuntivo es aquel en el que no existe pérdida de agua, ya que la cantidad que entra es la misma o aproximadamente la misma que termina con el proceso (Castelán, 2003).

Tabla 1 Clasificación de los principales usos del agua

Consuntivos	No consuntivos
Doméstico	Energía eléctrica
Público urbano	(hidroeléctricas)
Agrícola	Acuacultura
Industrial	Actividades recreativas
Pecuario	Navegación
Servicios	Transporte
Ambiental	

Dentro de los usos consuntivos del agua podemos destacar los siguientes:

- **Uso doméstico del agua**, es la aplicación del agua nacional para el uso particular de las personas y del hogar, riego, jardines y de árboles de ornato, incluyendo el abrevadero de animales domésticos siempre y cuando no constituya una actividad lucrativa, de acuerdo con los términos del artículo 115 de la Constitución Política de los Estados Unidos Mexicanos (CNA, 2012a).



- **Uso público urbano.** Se entiende a la aplicación del agua nacional para centros de población y asentamientos humanos a través de la red municipal, lo cual implica que ésta se utiliza en hogares, industrias y servicios propios del municipio, mismo que ocupa el segundo lugar en la cadena de importancia para suministro u orden de prelación de agua definido en la Ley de Aguas Nacionales (CNA, 2012a).
- **Uso agrícola.** A este uso se le ha asignado un cuarto lugar en importancia para la concesión de agua, precedido por los usos doméstico, público-urbano y pecuario (CNA, 2012a). En México, más del 70% del agua se destina para la agricultura (REPDACONAGUA). Se prevé que el futuro del agua para la agricultura sea de menor asignación, ya que ésta cederá ante el consumo humano y muy posiblemente ante la industria, dadas las demandas del mercado.
- **Uso industrial.** Es la aplicación de las aguas nacionales en fábricas o empresas que realizan la extracción, conservación o transformación de materias primas o minerales, el acabado de productos o la elaboración de satisfactores, así como el agua que se utiliza en parques industriales, calderas, dispositivos de enfriamiento, lavado, baños y otros servicios dentro de la empresa, las salmueras que se utilizan para cualquier tipo de sustancias y el agua que aún en estado de vapor es usada para la generación de energía eléctrica o para cualquier otro uso o aprovechamiento de transformación (CNA, 2012a).



- **Uso ambiental (Gasto ecológico).** Se considera uso ambiental o “uso para conservación ecológica” el caudal o volumen mínimo necesario en cuerpos receptores, incluyendo corrientes de diversa índole y embalses, o el caudal mínimo de descarga natural de un acuífero que debe conservarse para proteger las condiciones ambientales y el equilibrio ecológico del sistema (CNA, 2012a). Ortiz (2001), considera que el desarrollo sustentable comienza por reconocer el uso natural del agua y la cuantificación de su demanda ambiental. En México, este primer paso está dado al ser considerado en la LAN en la que incluso se considera el quinto lugar del orden de prelación del agua; sin embargo, éste uso no se refleja en los balances hidrológicos nacional, regional o estatal, hecho que repercute negativamente en el equilibrio de los ecosistemas.

2.1.2 Gestión de recursos hídricos

La Real Academia Española define la gestión, como la acción de hacer diligencias conducentes al logro de un negocio o de un deseo cualquiera. Estas diligencias pueden ser un conjunto de actividades, funciones, formas de organización institucional de organismos que pueden o no ser gubernamentales, recursos e instrumentos políticos y sistemas de participación, relacionados con unos o varios objetivos que definen el sentido y el objeto de lo que se pretende gestionar.

Por lo cual, la gestión de los recursos hídricos puede definirse como el conjunto de actividades, funciones, organización, recursos, instrumentos de política y sistemas de participación, aplicados en un territorio de cuenca (CONAGUA, 2012a).

Estas actividades pueden relacionarse con:

- El monitoreo de las variables del ciclo hidrológico
- El aprovechamiento y control del agua



- La prevención y mitigación de desastres naturales asociados a fenómenos hidrometeorológicos
- Construcción y operación de obras hidráulicas
- Calidad del agua

Por lo tanto, una gestión integral consiste en la coordinación y concertación de objetivos, metas, políticas, programas, proyectos y acciones específicas en materia hídrica de los actores involucrados, en su ámbito territorial, de conformidad con las normas y principios que la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento establecen, en todo aquello que no sea de la exclusiva competencia de la Comisión Nacional del Agua (PROGIRH CEAC-CONAGUA, 2009).

2.1.3 Modelos matemáticos en la Gestión de Recursos Hídricos

La gestión de los sistemas hídricos puede llegar a ser extremadamente complejos, sin embargo, en ausencia de un conocimiento perfecto, pueden representarse en forma simplificada mediante el uso de simulaciones matemáticas. El objetivo de estas simulaciones es estudiar la operación de los sistemas y predecir sus respuestas o salidas a un determinado impulso ingresado en el mismo. Un modelo de un sistema hidrológico es una aproximación al sistema real; sus entradas y salidas son variables hidrológicas medibles y su estructura es un conjunto de ecuaciones (en el caso de un modelo matemático) que conectan las entradas y las salidas.

Existen muchos paquetes informáticos específicos para la modelación de sistemas de recursos hídricos. Estas herramientas de modelación pueden clasificarse en función de diferentes criterios como pueden ser: programas para optimizar o simular, redes de flujo u otro tipo de programación matemática, programas específicos o herramientas



para la modelación de cualquier sistema, programas o sistemas de soporte a la decisión. A continuación, se presenta una breve compilación de los mismos:

IRIS. Interactive River System Simulation Program (Loucks *et al.*, 1990), principalmente utilizado para el suministro y la producción de energía hidroeléctrica.

STELLA. System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation (Karpack y Palmer, 1992), el cual incluye herramientas gráficas y ha sido utilizado para la modelación de diversas cuencas en el estado de Washington en los Estados Unidos.

MIKE-BASIN (DHI, 2003), es un modelo de simulación a escala diaria con una interfaz gráfica desarrollada en el sistema de información geográfica Arcview.

MODSIM (Labadie, 1995), puede utilizarse a escala mensual o semanal. Además, restricciones no lineales pueden incorporarse a través del lenguaje de programación PEARL.

WEAP (Grigg, 1996), para la evaluación de la planificación de cuencas hidrológicas. Este modelo realiza el balance de agua mediante el uso de redes de flujo y puede incorporar diferentes elementos como embalses, ríos y demandas. Permite incluir modelos de acuíferos del tipo rectangular conectados con ríos.

CALSIM Water Resources Simulation Model (DWRC, 2000), desarrollado por el California Department of Water Resources que a diferencia de los anteriores sirve para simular un sistema de recursos hídricos: El Proyecto Federal del Valle Central de California, Su principal característica es su flexibilidad para la incorporación de diferentes tipos de reglas de operación y restricciones.

AQUATOOL (Andreu *et al.*, 1996), es un sistema de soporte a la decisión para la modelación de sistemas de recursos hídricos en diferentes aspectos como son la optimización, simulación, aguas subterráneas, calidad de aguas, etc. Todos los módulos están gestionados mediante una única interfaz con capacidades gráficas que



permiten crear, editar y visualizar resultados de los modelos de una forma sencilla y amigable. Los módulos principales son los modelos de simulación y optimización de sistemas de recursos hídricos. En el entorno de AQUATOOL existen los modelos OPTIGES, AQUIVAL y SIMGES

El modelo OPTIGES (Andreu, 1992) es un programa informático para la optimización de sistemas de recursos hídricos que permite la optimización de largos períodos de sistemas concebidos mediante un conjunto de elementos como son embalses, conducciones, demandas, retornos, etc.

El modelo AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1996) para el preproceso y simulación de acuíferos por el método de los autovalores. Este módulo permite la integración de un modelo distribuido de flujo de un acuífero en un modelo de simulación del uso conjunto desarrollado con SIMGES. El método de los autovalores resuelve directa y explícitamente en cada paso de tiempo la ecuación diferencial de flujo y puede proporcionar de forma explícita y directa alturas en una serie de puntos elegidos previamente y los intercambios de caudal río acuífero.

2.1.4 El modelo SIMGES

El modelo SIMGES (Andreu *et al.*, 2007) 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 y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial.

El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.



La simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce con el detalle espacial que el usuario desee el flujo de agua a través del sistema. Para los subsistemas superficiales el flujo es calculado simplemente por continuidad o balance. El modelo también considera los retornos a las aguas superficiales y los que se infiltran en los acuíferos y tiene además 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.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo. 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 y objetivos de producción hidroeléctrica. Además, esta optimización se completa con un proceso iterativo de llamadas al algoritmo de optimización lineal, lo que permite mejorar la calidad de la simulación en procesos no lineales como filtraciones, evaporaciones y relaciones entre aguas superficiales y subterráneas.



2.2 Cambio climático

El cambio climático es definido como “un cambio en el estado del clima identificable a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos. Denota todo cambio del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana” (IPCC, 2007).

Este cambio en el sistema climático ha sido influenciado por actividades antropogénicas durante los últimos 200 años, debido al incremento en la emisión de los llamados gases de efecto invernadero, los cuales se manifiestan al provocar un aumento en la temperatura media en el planeta.

El análisis de los impactos en el clima del planeta es realizado mediante el uso de modelos de circulación general de la atmósfera (MCG) en el que se aplica una singularidad en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Los resultados obtenidos por los modelos donde se aplicó esta singularidad son comparados con modelos donde no existe esta anomalía, dando como resultado la información de alteraciones en el clima para un período determinado.

A partir de estos modelos generales de circulación, es posible crear diferentes escenarios de cambio climático (Hernández, 2007). Los cuales pueden ser definidos como estudios climatológicos simulados y supuestos para el futuro, basados en información histórica y actual a nivel global, mostrando posibles cambios del estado climático futuro (IPCC, 2007). Es necesario resaltar que estos estudios son una serie de imágenes o de posibles rumbos, los cuales dependen de la actitud de la humanidad. Dichos escenarios son principalmente generados por el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) y se refieren a la cantidad esperada de emisiones humanas de GEI (Gases de Efecto Invernadero) a la atmósfera.



En 1992 el IPCC publicó la primer familia de escenarios que consideraba variables sociales y económicas, llamados IS92. Los escenarios mayormente utilizados hoy en día son los últimos publicados por el IPCC en 2007, el paquete SRES (special reduction emissions scenarios). Son escenarios que modelan las emisiones futuras en base a distintos patrones de desarrollo social, económico, político y tecnológico entre otros.

Los escenarios climáticos son muy complejos, ya que para generarlos es necesario tomar en cuenta numerosos parámetros, entre los cuales están:

- Población
- Economía
- Sistema de energías
- Uso de suelo
- Modelación del clima

Los escenarios climáticos, debido a su naturaleza estadística y de modelación, siempre acarrearán una inevitable incertidumbre. Sin embargo, la precisión de los modelos crece cada año, así como la precisión de los insumos y la resolución espacial.

Para el último reporte del IPCC, el cual está en proceso de revisión, han sido definidos nuevos escenarios de emisiones, los cuales sustituyen los que se venían utilizando (A1, A2, B1 y B1), los cuales describían consistentemente las relaciones entre las principales fuerzas demográficas, económicas y tecnológicas que determinan las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero. Todos los escenarios basados en una misma historia constituían una “familia”.

De acuerdo a Hurtt *et al.* (2009), la razón por la cual este cambio en los escenarios es necesario es debido a que existe nueva información que debe ser reflejada en las nuevas proyecciones, como es el caso de datos económicos,



tecnologías emergentes, además de observaciones de factores medio ambientales tales como el tipo de uso de suelo y el cambio en la cobertura vegetal.

Los nuevos escenarios se generan a partir de la identificación de las características más importantes de forzamiento de radiación de la modelación climática, siendo la más prominente la relacionada con el nivel de forzamiento de radiación en el año 2100. A diferencia de las modelaciones anteriores, las nuevas trayectorias no están asociadas con condiciones socioeconómicas únicas, si no que pueden generarse de diversas combinaciones económicas, tecnológicas, demográficas y políticas.

Estos nuevos escenarios han sido nombrados como “trayectorias de concentración representativas” (RCP por sus siglas en inglés). Se les denomina representativas porque cada RCP asigna solo uno de varios posibles escenarios que pueden llevar a esas características de forzamiento radiactivo. Al decir que es una trayectoria se enfatiza que no solo los niveles de concentración a largo plazo son importantes, sino que también es igual de interés el camino a través del tiempo para llegar a ese resultado.

El IPPC ha definido cuatro selecciones de RCP (RCP2.6, RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5) en base a la cantidad de forzamiento radiactivo previsto para el año 2100. Este conjunto de escenarios abarca el rango de forzamientos radiactivos publicados hasta septiembre de 2007. Para las emisiones de dióxido de carbono en industria y generación de energía, el escenario RCP8.5 representa el 90% de la referencia de los rangos de emisión, mientras que el escenario RCP2.6 representa trayectorias debajo del 10% de los escenarios de mitigación (Moss, *et al.* 2010).

En el siguiente cuadro se muestran las características principales de cada uno de los nuevos escenarios. Para cada escenario fue seleccionado un modelo climático que cumpliera con los requerimientos que buscaba el grupo de investigación del IPCC.



También se muestra en una gráfica el comportamiento de cada RCP en cuanto al forzamiento radiactivo y a la generación de CO₂.

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

Nombre	Forzamiento radiactivo	Concentración (ppm)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	>8.5 Wm ⁻² en 2100	>1,370 CO ₂	Aumentando	MESSAGE
				(Austria)
RCP 6.0	6 Wm ⁻² estable después de 2100	850 CO ₂ estable después de 2100	Estable sin pararse	AIM
				(Japón)
RCP 4.5	4.5 Wm ⁻² estable después de 2100	650 CO ₂ estable después de 2100	Estable sin pararse	GCAM
				(EU)
RCP 2.6	Pico en 3Wm ⁻² antes del 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO ₂ antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE
				(Países bajos)

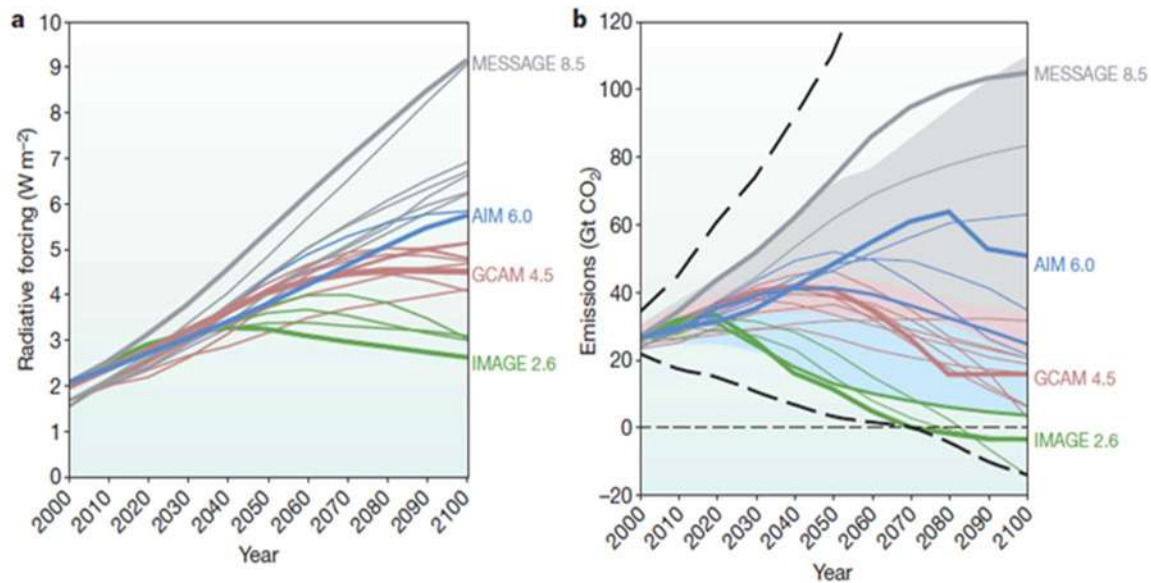


Figura 1 a) Cambios en el forzamiento de radiación relacionado a las condiciones pre-industriales. b) Emisiones de CO_2 de energía e industria para los cuatro RCP. (Moss, et al. 2010)

De acuerdo a la figura anterior, las líneas gruesas muestran los cuatro RCP elegidos, mientras que las líneas delgadas representan escenarios individuales de aproximadamente 30 candidatos de escenarios RCP que proveen información en todos los factores clave que afectan el forzamiento de radiación.



2.3 Antecedentes

El cambio climático (CC) se asocia a los eventos de altas temperaturas y eventos climáticos atípicos, sin embargo, en muchas ocasiones se asocia con las actividades que genera el hombre como es la deforestación y el uso indiscriminado de combustibles que afectan la calidad del aire. La IPCC define al CC como toda alteración del clima a lo largo del tiempo, tanto si es debido a la variabilidad natural como si es consecuencia de la actividad humana” (IPCC, 2007). Manuel Estrada en 2001 menciona que se espera que la temperatura media superficial a nivel global aumente entre 1.4 y 5.8° C de 1990 al 2100, incremento que se pronostica que ocurrirá a un ritmo significativamente más rápido.

El IPCC (2012), estima que en los próximos años las lluvias, sequías, tormentas, olas de calor e inundaciones tendrán un aumento, por lo que las emisiones de efecto invernadero originadas por actividades humanas están incrementando la frecuencia de fenómenos climático extremos.

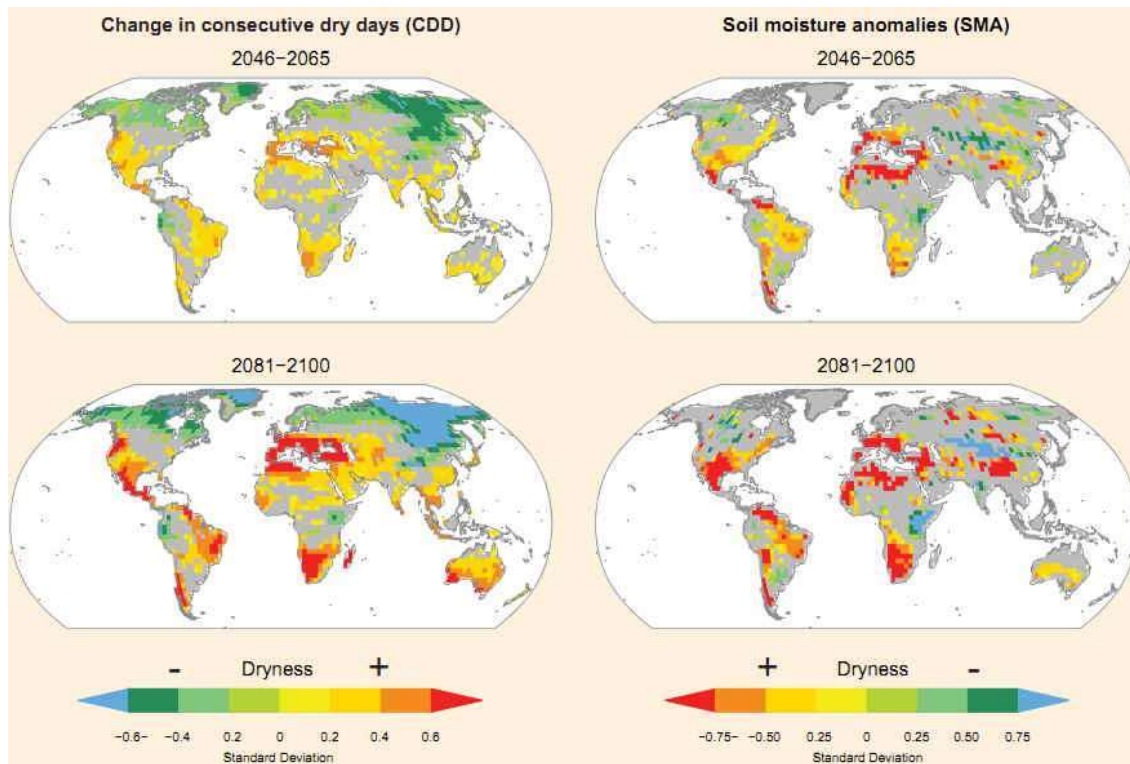


Figura 2 Mapas de eventos extremos a causa del CC. Fuente: *Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation, IPCC-2012.*

De acuerdo a la figura anterior, se puede apreciar que los países pobres o en vías de desarrollo se verán afectados por los fenómenos naturales hidrológicos debido a que no tienen la suficiente capacidad de respuesta ante dichos eventos, mientras que los países desarrollados sufrirán la escasez de alimentos por la falta humedad en el suelo y poca precipitación.

Se postula que, si el aumento de la temperatura promedio global es mayor a 4°C comparado con las temperaturas preindustriales, en gran parte del globo, los sistemas naturales no podrán adaptarse y, por lo tanto, no podrán sostener a las poblaciones circundantes, por lo que no habrá recursos naturales para sustentar la vida humana.



Es tal la preocupación ante el cambio climático que en el año 2000 la Unión Europea mediante la Comisión al Consejo y al Parlamento Europeo tomó cartas en el asunto sobre Políticas y medidas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero creando un Programa Europeo sobre el Cambio Climático (PECC), cuyo objetivo es determinar y desarrollar todos los elementos de la estrategia europea para hacer frente al cambio climático que son necesarios para aplicar el Protocolo de Kioto. Este Protocolo exige reducir las emisiones mediante políticas y medidas y los mecanismos de flexibilidad, la creación de capacidad y la transferencia de tecnología, la investigación y la observación y la educación y la formación.

A continuación, se presenta una cronología de los eventos más relevantes en el régimen del cambio climático (tomado de la estrategia SEMARNAT 2007).

- 1988 PNUMA y OMM establecen el IPCC, que desde entonces produce regularmente información científica y tecnológica sobre el Cambio Climático.
- 1992 La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático es adoptada en la Cumbre de la Tierra en Río de Janeiro.
- 1994 El 21 de marzo entra en vigor La Convención.
- 1995 El Segundo Reporte de Evaluación (SAR) del IPCC concluye que la evidencia sugiere una influencia humana decisiva en el clima global.
- 1997 Se adopta el Protocolo de Kioto.
- 2001 El Tercer Reporte de Evaluación (TAR) del IPCC difunde mayores evidencias de la influencia humana en el clima global. Estados Unidos de América anuncia que no ratificará el Protocolo de Kioto, mientras que otros países signatarios acuerdan una serie de reglas para la implementación del Protocolo: los «Acuerdos de Marrakech».
- 2004 En noviembre, la Federación Rusa anuncia que ratifica el Protocolo de Kioto, el cual entra en vigor 90 días después.



- 2005 El 16 de febrero entra en vigor el Protocolo de Kioto.
- 2005 XI Conferencia de las Partes, en Montreal, Canadá y Primera Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto.
- 2006 XII Conferencia de las Partes, en Nairobi, Kenia y Segunda Reunión de las Partes del Protocolo de Kioto.
- 2007 El Cuarto Informe de Evaluación del IPCC refuerza las certidumbres científicas en relación con el cambio Climático. XIII Conferencia de las Partes, Bali, Indonesia.

Conforme a lo anterior en España se han desarrollado metodologías enfocadas al manejo del recurso hídrico, tal es el caso de Hernández Barrios en 2007 aplicada a la cuenca Júcar, dichas técnicas se están aplicando a diferentes cuencas con el fin de proyectar medidas de mitigación a corto, mediano y largo plazo.

Carlos Duarte en 2006, realizó un estudio de los posibles escenarios futuros, impactos sociales, así como mitigación y adaptación, en el que deduce que los cambios ambientales son afectaciones que, aunque ejercidas localmente, tienen efectos que trascienden el ámbito local o regional para afectar el funcionamiento global del sistema Tierra. Por lo que aconseja combatir el cambio global mediante la integración de análisis ambientales y las decisiones económicas en todos los sectores económicos y a todos los niveles, así como involucrar a la sociedad civil en su solución (concienciación, información, participación social).

Así mismo, se han realizado investigaciones en América Latina y el Caribe, tal es el caso de los “Impactos, vulnerabilidad y adaptación” ante el cambio climático, realizado por Conde-Álvarez y Saldaña-Zorrilla en el año 2006, donde señalan la probabilidad de que las actividades agrícolas serán severamente afectadas en América Latina y el Caribe, con disminuciones importantes en los rendimientos; que



las plagas extiendan su territorio, y los procesos de degradación de suelos aumentarán. Por lo que proponen que en los planes de desarrollo sustentable que se realicen en el futuro deberán incluir las estrategias de adaptación para incrementar la integración del cambio climático en las políticas de desarrollo.

En la reseña del “Cambio climático y desarrollo en América Latina” realizada por Samaniego *et al.*, 2009, revelan que la probabilidad en el norte de la Argentina los problemas ocasionales en materia de suministro de agua para la agricultura se agravarán, por otro lado, en el sur del Brasil la disponibilidad futura de agua para el sector agrícola parece estar garantizada, mientras que en las demás regiones se reduciría la confiabilidad del sistema hídrico.

Desde 1992 México ha desarrollado capacidades para mitigar el CC, por lo que firmó la Convención ratificándola en 1993, posteriormente firmo en 1997 el Protocolo de Kioto, siendo México el único país fuera del Anexo I que ha entregado tres Comunicaciones Nacionales, cada una de las cuales incluye un Inventario de Emisiones.

Dentro de la Estrategia Nacional de Acción Climática (ENACC) de mayo de 2007, México presentó su posicionamiento ante el Cambio Climático y planteó algunos puntos para la estrategia en el periodo posterior a Kyoto, como una iniciativa para "descarbonizar" la economía nacional a través de la reducción en la emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI). El principal objetivo del programa en cuanto a mitigación "es continuar y profundizar el desacoplamiento entre crecimiento, desarrollo económico e intensidad de carbono en México".

En junio de 2012 el Congreso General de los Estados Unidos Mexicanos, decreta la Ley General de Cambio Climático, donde se establecen criterios para atender la protección al ambiente, el desarrollo sustentable y la preservación y



restauración del equilibrio ecológico, así como de la concurrencia de facultades entre la federación, entidades federativas y municipios, elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático para regular las emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero; la mitigación y adaptación, reducir la vulnerabilidad, fomentar la educación, investigación y desarrollo así como la transferencia de tecnología. En este decreto, dentro del Título Tercero, de acuerdo con el artículo 13, se establece la creación del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC, sustituyendo al Instituto Nacional de Ecología), como organismo público descentralizado con personalidad jurídica y patrimonio propios, autonomía de gestión y proyectos de investigación científica, sectorizado con la SEMARNAT, teniendo como principales funciones; promover y difundir criterios, metodologías y tecnologías para la conservación y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, realizar análisis de prospectiva sectorial, evaluar el cumplimiento de objetivos de adaptación y mitigación, así como emitir recomendaciones de política y acciones de mitigación o adaptación al cambio climático. Para lograr la coordinación efectiva de los distintos órdenes de gobierno y la concertación entre los sectores público, privado y social, la LGCC prevé la integración del Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC). Este sistema debe propiciar sinergias para enfrentar de manera conjunta la vulnerabilidad y los riesgos del país ante el fenómeno y establecer las acciones prioritarias de mitigación y adaptación.

Es así que el 29 de enero de 2013 se realiza la primera sesión ordinaria de la Comisión Intersecretarial de Cambio Climático. En la que se convocó a representantes de los tres órdenes de gobierno, al Poder Legislativo, a la sociedad civil organizada, a la academia y al sector privado, a integrar el Sistema Nacional de Cambio Climático; siendo el 3 de junio de 2013 cuando el DOF publica la Estrategia Nacional de Cambio Climático, que incluye la creación de este Sistema Nacional de Cambio Climático (SINACC), el cual debe propiciar sinergias para enfrentar de manera conjunta la



vulnerabilidad y los riesgos del país ante el fenómeno y establecer las acciones prioritarias de mitigación y adaptación.



Figura 3 Marco institucional del Sistema Nacional de Cambio Climático (DOF, 2013)

Derivado de esta preocupación y de los impactos ambientales que se encadenan, el gobierno de México ha puesto atención en el cuidado, preservación y manejo adecuado del recurso hídrico, en un inicio desde la una perspectiva integral, posteriormente la decisión de trabajar a nivel de cuencas como la unidad de gestión más viable y adecuada para el tratamiento de la problemática ambiental de una cuenca, anteponiendo como prerequisite la necesidad de la acción coordinada tanto de la federación, los gobiernos estatales involucrados, y los distintos sectores productivos que en ellas se desarrollan.

En base a lo anterior y a la relevancia del tema, la CONAGUA aplica talleres de capacitación con el propósito que el personal identifique las medidas de adaptación al cambio climático en los distintos ámbitos de acción, aplicando la Gestión Integrada de



los Recursos Hídricos y que beneficien a la población y no afecten al desarrollo sustentable del país.

Por otro lado, Palma et al., 2007, menciona que los escenarios futuros para México apuntan hacia un aumento del riesgo climático, dado que las proyecciones para las temperaturas y precipitaciones han resultado ser similares o superiores a las presentadas durante eventos extremos en el pasado, por lo que mediante la generación de escenarios de cambio climático mediante el uso de dos tipos de modelos, uno de circulación regional (MCR) y tres de circulación general (MCG), que permiten obtener proyecciones diversas de temperatura y precipitación bajo distintos escenarios socioeconómicos y ambientales, que permiten a los tomadores de decisiones plantear las estrategias necesarias de adaptación y mitigación ante posibles eventos para el estado de Veracruz, México.

Así también López D.C. et al., 2012, en sus resultados de estudio indican una modificación del clima con respecto al historial climático, lo que demuestra que la temperatura se ha vuelto más cálida en los últimos años y los posibles escenarios a futuro siga en incremento la temperatura.

Patiño et al., en 2012, destaca la importancia de evaluar la vulnerabilidad de los grupos sociales frente al cambio climático, que cobra especial relevancia al identificar e implementar medidas orientadas a promover procesos de adaptación, reduciendo así las consecuencias negativas del cambio climático en los procesos de desarrollo.

En el ámbito estatal, el Gobierno de Michoacán conjuntamente con la SEMARNAT, INEC (INE), el Banco Mundial y la Agencia Española de Cooperación Internacional, presentaron en 2011 el Plan Rector “Estrategia de Cambio Climático del Estado de Michoacán”, el cual indica la importancia de contar con medidas de



mitigación, prevención, conservación. Siendo este la base de articulación con todo lo relacionado ante el efecto del CC.

A partir del año 2013 el Gobierno del Estado de Michoacán en conjunto con ONG's, academia, institutos de investigación y personas interesadas de la sociedad civil se ha dedicado a llevar talleres con la finalidad de integrar el Proyecto Estatal de Cambio Climático del Estado de Michoacán De Ocampo (PECC).

El PECC tiene el objetivo de Integrar, coordinar e impulsar políticas públicas y acciones en el Estado de Michoacán fomentando la educación y la participación social, contemplando los pilares en los que se fundamenta la Estrategia Nacional de Cambio Climático.

El 21 de enero de 2014, el Periódico oficial del Estado publica la Ley de Cambio Climático del Estado de Michoacán de Ocampo, que en su artículo primero establece que es una ley de orden público, interés social y de observancia en todo el territorio del Estado de Michoacán de Ocampo y establece disposiciones para enfrentar los efectos adversos del cambio climático, en materia de protección al ambiente, desarrollo sustentable, preservación y restauración del equilibrio ecológico.

Esta ley tiene como objetivos principales establecer la competencia del Estado y de los municipios en la elaboración y aplicación de políticas públicas para la adaptación al cambio climático y la mitigación de emisiones de gases y compuestos de efecto invernadero; a su vez también plantea la vinculación y la planeación del Ordenamiento Ecológico Territorial con las acciones de mitigación y adaptación al cambio climático (Periódico Oficial del Estado de Michoacán, Enero 2014).

La Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el INECC publicaron en enero de 2013 la "Evaluación de las acciones realizadas por el sector ambiental en la cuenca Lerma Chapala Recomendaciones para Programas de



Política Pública”, a cargo de la Dirección General de Investigación en Conservación y Planeación Ambiental de Territorio Dirección de Manejo Integral de Cuencas Hídricas en donde señala las deficiencias que se tienen en cada una de las subcuencas que integran dicha Cuenca, y que muestra que en los últimos años los programas de gobierno han enfocado su esfuerzo y presupuesto, sobretodo en obras hidráulicas que si bien, resultan necesarias, no contemplan la estructura y funcionamiento de la cuenca de manera integral. En este sentido, la inversión que se destina a acciones de conservación tiene limitaciones en la asignación de presupuesto, por lo que su impacto resulta disperso en el territorio de la cuenca. Debido a esto se debe de considerar que el diseño de los programas de gobierno tienda a establecer criterios priorizados, que promueven de manera generalizada el acceso de la población a programas gubernamentales.

Para la Cuenca del Lago de Cuitzeo, existen diferentes trabajos de investigación y estrategias realizados por instituciones académicas y de gobierno que contemplan diversos tópicos con respecto a la cuenca; se sabe de la necesidad de fortalecer los vínculos de comunicación y trabajo entre centros universitarios, instituciones gubernamentales y sociedad civil, por lo que se presenta un escrutinio bibliográfico de las acciones y esfuerzos que se han propuesto para el sostenimiento en esta cuenca.

A partir del año 2005 se desarrolló el Ordenamiento Ecológico Territorial, el cual propone la disminución de cambio de uso del suelo, tener un mejor control del desarrollo urbano, que la reforestación sea con especies nativas, tener control de cárcavas, mejorar técnicas de riego y construir plantas de tratamiento de agua

La CONAGUA en el año 2008 dio a conocer el “Plan Director del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro” como un esfuerzo para lograr la viabilidad del Distrito de Riego y elevar los niveles de bienestar de los usuarios, a través del aumento de la eficiencia en el uso del agua y el incremento de la productividad agrícola de riego,



utilizando una estrategia integrada que se vincule a la demanda de los beneficiarios, con mecanismos que aseguren la participación coordinada de instituciones y usuarios. Las acciones concretas en las que se centra el programa son: obras de rehabilitación y modernización en la infraestructura hidráulica y maquinaria. Así como acciones conducentes a mejorar la gestión y administración de los distritos de riego para mejorar el desempeño económico de las actividades agrícolas.

Para el año 2008, y derivado del Simposio Acciones y Resultados para el Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se publica la “Problemática, Perspectivas y Retos hacia su Desarrollo Sostenible” en el que se abordan temas que en su mayoría son diagnósticos de comunidades biológicas, pocos abordan la dinámica de los ecosistemas, en lo poco plantean alternativas a la degradación de la cuenca, aunque si promueven que se realicen estudios de dinámica de los ecosistemas que contribuya en la generación de bases para propuestas de manejo y restauración además de estudios de planeación participativa y coordinación institucional para orientar la política ambiental que permita integrar en un plan rector unificador de acciones en conjunto con participación ciudadana.

Posteriormente en 2009, la SEMARNAT presentó el “Programa Hídrico Visión 2030”, en el que se presenta dentro de los proyectos emblemáticos el -saneamiento de la cuenca del lago de Cuitzeo-, es por ello que, en los últimos años, el presupuesto que se ha destinado entre los tres órdenes de gobierno ha sido para los proyectos y construcción de colectores y plantas de tratamiento de aguas residuales en la cuenca.

En el año 2010, la UNAM con la UMSNH integraron el “Atlas de la Cuenca del Lago de Cuitzeo. Análisis de su Geografía y Entorno Socioambiental” que muestra el estado actual de la cuenca, con aspectos físicos, biológicos, económicos, sociales,



demográficos y culturales de un territorio, que sirvan para su entendimiento y ordenamiento.

Por su parte el Centro del Agua para América Latina y el Caribe, una iniciativa del Tecnológico de Monterrey, fundación FEMSA y el Banco Interamericano de Desarrollo presentaron en 2011 “Estrategias para el uso sostenible del agua”. En la que realizaron un diagnóstico y acciones prioritarias para la conservación y preservación de los recursos hídricos.

Para el mes de noviembre del 2012 y con la participación de gobierno federal, estatal y la academia se presentó el “Simposio de la Cuenca del Lago de Cuitzeo”, en el que se dio a conocer los avances en materia de investigación científica, tecnológica e institucional que se han desarrollado en la cuenca en los últimos años. Aprovechando este evento, la UNAM presentó el libro “Contribuciones para el Desarrollo Sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán”, siendo un compendio de estudios enfocados en la caracterización y problemática, conservación y restauración de los recursos naturales y la gestión socioeconómica.

Lo más reciente (2013) y con el apoyo mixto: Conacyt–Gobierno del estado de Michoacán (convocatoria 2009-02) fue concluido y presentado el “Programa de Restauración de la Ribera del Lago de Cuitzeo, Michoacán” en el que se presentan estrategia priorizadas y enfocadas en el plan de gestión. Sin embargo, la falta de recursos no ha permitido efectuar todas las acciones propuestas.

El 14 de enero del 2005, el Grupo de Seguimiento y Evaluación del Consejo de Cuenca Lerma-Chapala, aprobó la conformación de la Comisión de Cuenca del Lago de Cuitzeo, siendo esta formalmente instalada el 18 de agosto de 2006. La cual, a partir de entonces, ha trabajado como foro de coordinación y concertación entre instituciones de gobierno federal, estatal, académicos, social y la parte fundamental



que son los usuarios del agua, con el objeto de contribuir a mejorar la administración del agua.

Una vez integrada la comisión de cuenca, consideró varios estudios para realizar un diagnóstico de la cuenca completa, lo que permitió que en el periodo de 2008-2009, se llevaran a cabo talleres especiales de concertación con gobierno, academia, sector social y privado, con el fin de elaborar el “Plan de Gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo”, quienes en consenso convergieron en una problemática -deterioro ambiental de los recursos naturales de la cuenca de Cuitzeo-, llegando a un objetivo común como es la -restauración ambiental de los recursos naturales-, en el que se determinaron 10 ejes rectores:

- Disminuir la contaminación y sus impactos contra los recursos naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo (CLC).
- Restaurar el recurso forestal de la cuenca
- Consolidar la educación ambiental como premisa del aprovechamiento sustentable de los recursos naturales.
- Construir la infraestructura adecuada para el uso sustentable del agua.
- Lograr una eficiente coordinación interinstitucional en pro del aprovechamiento sustentable de los recursos naturales de la cuenca
- Aplicar eficazmente el marco legal ambiental y procurar su observancia entre los pobladores de la cuenca
- Instrumentar un plan integral y ordenado de desarrollo poblacional en la cuenca
- Aplicar procesos agropecuarios sostenibles y certificados en la producción
- Contar con recursos naturales protegidos que garanticen la biodiversidad y servicios ambientales
- Generar el ordenamiento pesquero del lago de Cuitzeo





2.4 Caracterización de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

La cuenca cerrada del lago de Cuitzeo está situada en la parte sur de la Altiplanicie Mexicana. está rodeada al sur por elevaciones que forman parte del Eje Volcánico en su porción de las sierras Tarasca y Oztumatlán; al sureste por las de Mil Cumbres y Ucareo; y al norte limita con la región del Bajío regada por el río Lerma. Se localiza al sur del paralelo 20° Norte, en la zona intertropical. El lago ocupa la porción más baja de la cuenca, se localiza entre los paralelos 19°53'15" y 20°04'30" de latitud norte y los meridianos 100°50'20" y 101°19'30" de longitud oeste, a una altitud aproximada de 1,830 msnm. Pertenece al sistema hidrológico (RH-12) Lerma-Chapala, que es los más importantes del país, al cual pertenece la cuenca del Lago de Cuitzeo

La cuenca se encuentra ubicada en los límites de los estados de Michoacán y Guanajuato. La extensión es de aproximadamente 4,000 km², de los cuales la mayor parte corresponde a Michoacán. La superficie promedio del lago, incluyendo zonas de inundación, es de aproximadamente 400 km² (Bravo *et al.*, 2008).

Normalmente las cuencas de tipo lacustre son cerradas o endorreicas, como es el caso del lago de Cuitzeo, en la que el drenaje superficial se concentra en la porción más baja de la cuenca, en el norte de la misma.

El lago se alimenta principalmente de los escurrimientos superficiales de la cuenca, principalmente de los ríos Grande de Morelia, Queréndaro y Zinapécuaro. Las salidas naturales del agua son las causadas por la evaporación y los aportes a acuíferos. El drenaje de la cuenca del lago de Cuitzeo se caracteriza, por ser dendrítico a subdendrítico en la región sur y sur-oriente, zona que aloja la mayor cantidad de escurrimientos asociados a un grado de deyección medio de los sustratos; que se observa poco desarrollado en drenaje en la zona centro y hacia el oriente; caso



particular es la porción más horizontal de la cuenca, superficie modificada fuertemente por la actividad agrícola ubicada en el valle, al sur del lago.

No obstante, en 1964 fue construido en la parte norte El dren La Cinta una salida artificial, a través del cual se drenaba agua al lago con la laguna de Yuriria. Sin embargo, Las continuas sequías que afectaron al lago generaron que el dren La Cinta fuera bloqueado por los pescadores en 1988 (Valdivia et al., 1996). Este desagüe artificial permitía la liberación del agua incluso en la época de estiaje. Esto a su vez favoreció que se asignaran terrenos para la agricultura en áreas que correspondían al lago, como en los municipios de Álvaro Obregón, Copándaro, Huandacareo y Chucándiro (Ávalos, 1996).

En particular, las sequías que se presentaron entre 1964 y 1965 favorecieron que localidades como Los Trojes y La Presa solicitaran a la Reforma Agraria el otorgamiento de títulos ejidales de las áreas rentadas para agricultura por la CONAGUA, cuando bajaba el nivel del agua. Estas y otras localidades sin posesión obtuvieron más de 4,000 ha en el sur del lago entre 1978 y 1989.

Por su extensión, el lago de Cuitzeo es el segundo cuerpo de agua de origen natural más grande de la República Mexicana, solamente superado por el de Chapala. Sin embargo, esta condición podría perderse relativamente pronto si los procesos de desecación del lago y de azolvamiento en menor medida, continúan de forma acelerada. Si esto llegara a ocurrir, el lago de Pátzcuaro, también ubicado en el estado de Michoacán, o el de Catemaco, en Veracruz, tomarían esa posición.

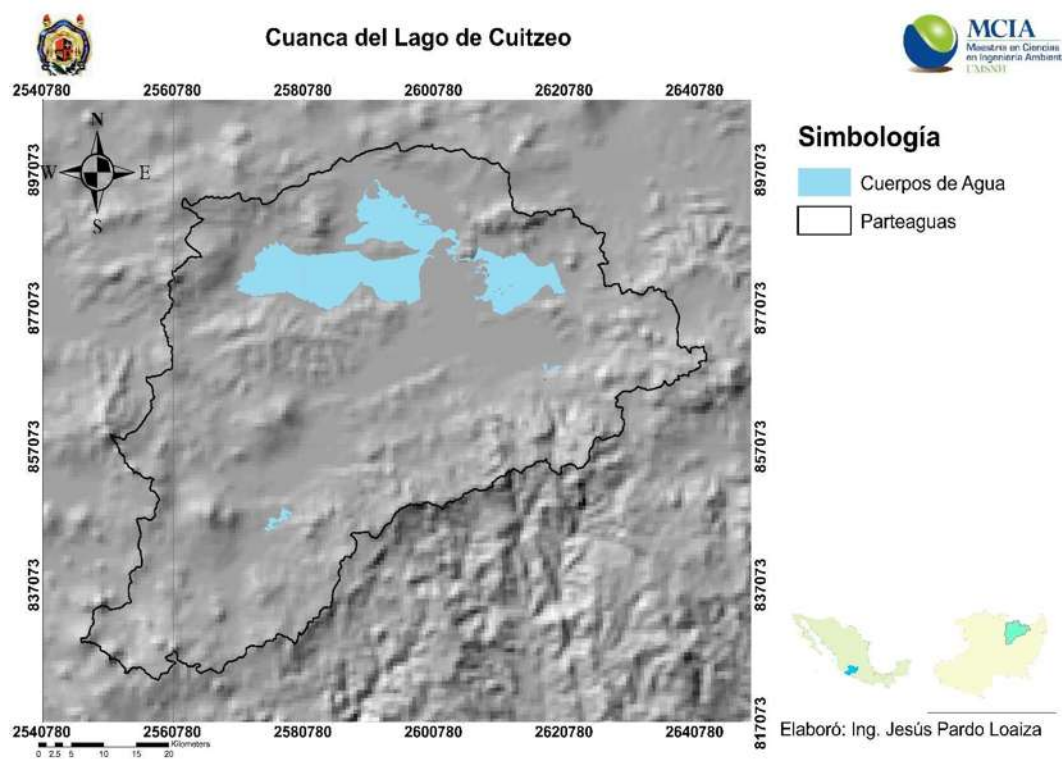


Figura 4 Cuenca del Lago de Cuitzeo

El vaso del lago es alimentado por los afluentes permanentes: Río Grande de Morelia que es el más importante de la zona, escurre de SW a NE hasta justo antes de la zona de riego agrícola donde se rectifica para convertirse en un canal destinado al riego; al cual se le une el Río Chiquito de Morelia, el mismo en la estación El Plan se divide en dos el Viejo y el Rectificado, el arroyo San Marcos de Chiquimitío se une al río Viejo de Morelia por el lado oeste después de cruzar el valle de Tarímbaro, en tanto que el río Queréndaro primero da origen a la presa de Malpaís y después desemboca en el lago por la parte sur al igual que el río Zinapécuaro (García, 2011).

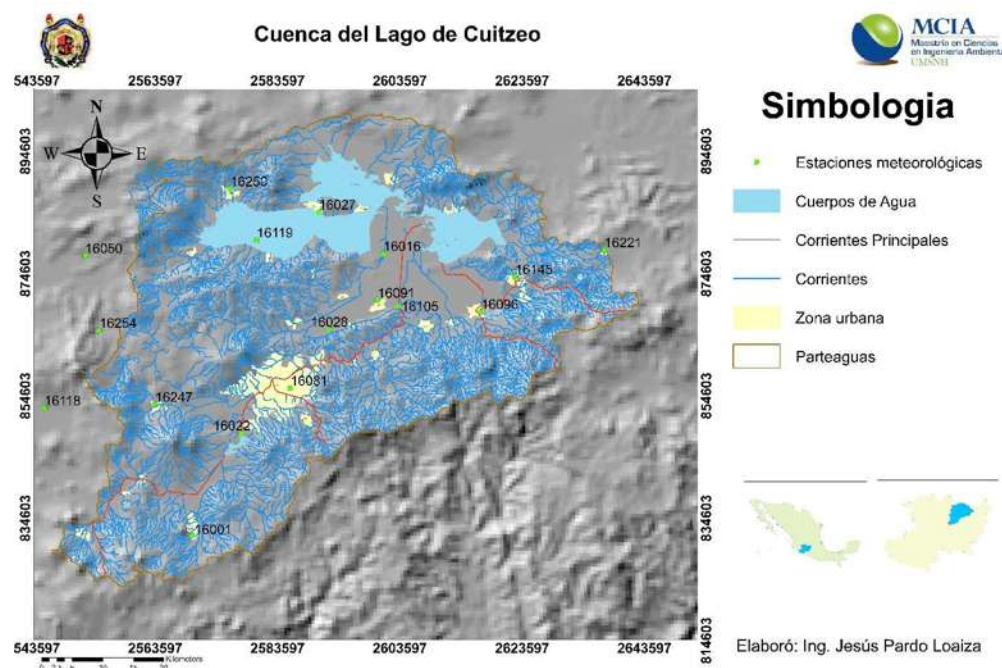


Figura 5 Drenaje de la Cuenca del Lago de Cuitzeo

El crecimiento desmedido de la población ha generado la necesidad de vivienda lo que incita a un cambio de uso del suelo, mismo que se ha realizado sin la aplicación de un ordenamiento territorial, además de la demanda de servicios básicos como el abastecimiento de agua potable y por consecuencia de un drenaje que impida una complicación en la salud de los habitantes, lo cual representa problemas de contaminación de acuíferos, disminución del nivel de acuíferos subterráneos y del nivel del lago de Cuitzeo, además repercute en la modificación del paisaje.

La Ciudad de Morelia, principal centro de población de la cuenca y del estado de Michoacán, y dos cuerpos de agua más pequeños: la presa Cointzio, al sureste de Morelia, y la laguna de Queréndaro, justo debajo del límite oriental del lago de Cuitzeo.



La vegetación reside en pastizal inducido y matorral subtropical, en las partes de lomerío, y bosques de encino y pino con diversos grados de conservación en las zonas montañosas, especialmente a lo largo de todo el límite sur, sureste y suroeste de la cuenca.

El relieve con las zonas montañosas localizadas principalmente a lo largo del límite de la cuenca, con las partes más altas en las porciones suroeste, sur, sureste y este, y las zonas de planicie ubicadas en las inmediaciones del lago de Cuitzeo, especialmente en su porción al sur. El resto del territorio está dominado por lomeríos de poca elevación.

Otro aspecto importante del abastecimiento de agua, es para el uso agrícola, como bien sabemos esta actividad nos provee de alimentos, sin embargo, requiere de infraestructura adecuada para el uso eficiente de la misma, debido a que no solo se abastecen de agua superficial, sino que la mayoría realiza la extracción de agua subterránea. Actualmente el aprovechamiento subterráneo se ha convertido en la mayor fuente de abastecimiento para los diversos usos en la cuenca e incluso a nivel regional, al contar con prácticamente el doble de fuentes en comparación a las de origen superficial destinadas para satisfacer las demandas de recurso. No obstante, la demanda de agua es mayor cada vez y pareciera que este recurso estuviese escaseando, siendo que lo que la calidad se deteriora, lo que conlleva a un uso limitado.



3. Metodología

Para poder llevar a cabo el análisis integral de los recursos hídricos que intervienen en la cuenca se requiere de la utilización de diversos modelos de simulación compilados en una secuencia definida. Esto se debe al nivel de dificultad que implica manejar toda la información requerida y que forma parte de los sistemas de recursos hídricos en cuestión cuantitativa y socio económica.

También es importante que la información con la que se cuente sea lo más confiable y completa posible, para que los resultados obtenidos sean confiables. En este caso es muy importante la información climatológica ya que el punto medular de este estudio es el cambio climático. El tipo de información con la que es necesario contar es de temperaturas y precipitaciones de estaciones climáticas a lo largo y ancho de la cuenca, la cual deberá de ser previamente validada para su posterior utilización.

Una vez que se cuenta con esta información, la secuencia del proceso inicia con la selección de los resultados de los diversos escenarios climatológicos existentes para la región de nuestro estudio, estos pueden ser suministrados por modelo climatológicos regionales los cuales nos proporcionan una mejor resolución espacial, y por otra parte se tendrán los escenarios proporcionados por los Modelos de circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGAO-A). Estos escenarios generalmente nos arrojan variaciones a futuro tanto de temperatura como de precipitación.

Los escenarios climáticos regionales con los que se disponen han sido desarrollados por varias instituciones académicas coordinadas por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC). En el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional” (Cavazos *et al.*, 2013), se realizó un análisis regional del



periodo histórico y de las proyecciones de 15 modelos de circulación global (MCG) a futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099) para el caso de México, que serán utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del IPCC.

La selección de los escenarios adecuados es fundamental, ya que, dependiendo de los modelos elegidos, obtendremos la información adecuada de acuerdo a nuestras necesidades a corto, mediano o largo plazo.

Una vez elegido y validado el conjunto de escenarios climáticos, el siguiente paso consiste en la simulación del ciclo hidrológico mediante un modelo distribuido lluvia escorrentía, el cual debe abarcar la totalidad de la cuenca hidrográfica a una escala temporal mensual. Esta simulación posibilitará conocer en que proporciones y los lugares donde se tendrían disminuciones en los recursos hídricos y se podría analizar su afectación en las distintas componentes y almacenamientos del agua, como puede ser el caso de los niveles piezométricos de los acuíferos.

Para realizar esta simulación lluvia escorrentía se hará uso del modelo lluvia escorrentía propuesto por Témez (1977). El modelo de simulación del acuífero se llevará a cabo mediante el programa AQUIVAL, donde podremos observar la evolución de los acuíferos de la cuenca y nos permitirá introducir esta información en el modelo del sistema de recursos hídricos. Ambos modelos deberán ser calibrados y validados para asegurar su fiabilidad.

A la par del modelo lluvia escorrentía, es oportuno llevar a cabo un análisis de las demandas agrícolas de los diversos cultivos en la zona de estudio. El cálculo de estas demandas hídricas sería para condiciones actuales de acuerdo a la información que se tenga disponible y a futuro mediante la metodología propuesta por la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación).



Para el caso de la demanda del agua urbana e industrial, se hará uso de escenarios de incremento de población, los cuales están considerados en los MCGAO-A y con la metodología que ha desarrollado la Comisión Nacional del Agua para la proyección de población y demanda.

Una vez que se cuente con la información arrojada de los pasos anteriores, se procederá a utilizar el modelo de gestión de recursos hídricos SIMGES (Andreu *et al.*, 1996) con la finalidad de simular la gestión integral de los recursos hídricos en la cuenca y evaluar el comportamiento de las demandas de acuerdo a los escenarios propuestos.

3.1 Selección de escenarios climáticos

En las evaluaciones de los impactos del cambio climático de los recursos hídricos se emplean tres tipos distintos de metodologías para la definición de escenarios climáticos, las cuales son:

- Escenarios incrementales o sintéticos. Son simples ajustes del clima de referencia (clima actual) con arreglo a cambios futuros previstos (aumento de 1° o 5°C de la temperatura, disminución de un 5% o 10% de la precipitación) que pueden proporcionar una ayuda valiosa para ensayar la sensibilidad del sistema de recursos hídricos al clima. Estos escenarios están basados en algunas ocasiones en los resultados de los escenarios de los MCGAO-A, a escala global.
- Escenarios basados en analogías climáticas. Son la representación analógica de un clima que ha cambiado a partir de registros anteriores o de otras regiones con similitudes geográficas. Pueden ser difíciles de identificar y casi no se aplican, aunque algunas veces pueden proporcionar detalles útiles de los impactos en condiciones climáticas similares.



- Escenarios obtenidos a partir de los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGAO-A). Son los más utilizados en la actualidad y los que presentan mayor fiabilidad y objetividad. Generan escenarios climáticos indicando las variaciones respecto a un clima de referencia. Inicialmente estaban basados en las observaciones regionales del clima durante el período 1961-1990, por el Climate Research Unit (CRU). Los Modelos de Circulación General Acoplados Océano-Atmósfera (MCGAO-A), llevan a cabo simulaciones climáticas en las que se considera que el incremento de la concentración de gases invernadero corresponden a los escenarios de emisiones que se espera se presenten a lo largo de las próximas décadas. Los modelos MCGAO-A reproducen razonablemente bien las características de gran escala del clima actual. La variabilidad interanual del clima simulado a escala global es suficientemente realista, de forma que estos modelos matemáticos pueden ser capaces de cuantificar la influencia humana sobre la evolución del clima. En general, se considera como bastante aceptable el grado de confianza en las previsiones del impacto antropogénico sobre el clima futuro que los MCGAO-A proporcionan.

Sin embargo, la resolución espacial típica de estos modelos no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo). Algunas veces, los impactos de las variaciones del clima global cobran características especiales muy particulares en regiones de topografía marcada, en islas o en regiones de contrastes en el uso de suelo, factores que generan circulaciones de mesoescala. Por ello, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático en conjunto con el Centro de Ciencias de la Atmósfera de la UNAM desarrollaron la regionalización de los Modelos de Circulación General para la superficie de nuestro país. A su vez, ambos institutos crearon el Modelo Ensamble el cual representa una media multimodelo de las variables del clima proyectadas por los modelos matemáticos aceptados por el IPCC.



El objetivo de proyectar las precipitaciones y temperaturas por Ensamble, es proporcionar un cuadro más detallado de la gama de estados futuros posibles del clima que sea consistente con nuestro conocimiento del sistema, permitiendo estimar en combinación con proyecciones de la vulnerabilidad, qué puede suceder y cuáles son las varias alternativas que el usuario tiene para la gestión del riesgo en una zona determinada.

Los modelos numéricos dividen la atmósfera en capas, cada capa en una cuadrícula, generando así una retícula de celdas en tres dimensiones. Con datos de temperatura y presión, entre otras variables, en cada celda se estima cómo varían estos parámetros en el tiempo según las condiciones generales y los valores de las celdas vecinas según principios físicos. Estos modelos son capaces de procesar cascadas de datos que proceden de una red de estaciones, satélites y estaciones de control remoto cada vez más amplia para entregar pronósticos del tiempo precisos, aunque no exactos.

La regionalización de los Modelos de Circulación General permite que se incluyan factores locales como hidrología, topografía, geología, clima, uso del suelo, etc.; los cuales no son representados satisfactoriamente a escala global.

Los métodos más empleados para la regionalización de modelos son: la creación de modelos de circulación general a alta resolución, modelos anidados de área limitada, y los métodos empírico-estadísticos o estadísticos-dinámicos.

En el año 2007, el Panel Intergubernamental del Cambio Climático propuso una metodología hecha con el fin de servir como guía para la generación de escenarios climáticos regionales.

Para poder aplicar esta metodología, es necesario que la regionalización de los escenarios de cambio climático cumpla con las siguientes características:



- Consistencia a nivel regional con las proyecciones globales.
- Plausibilidad física y realismo.
- Información apropiada para las evaluaciones de impactos (resolución, horizonte y variables).
- Representatividad del rango potencial de cambio climático regional.
- Actualidad de las simulaciones (experimentos numéricos más recientes).
- La más alta resolución espacial y Validez (que reproduzcan en lo posible el clima observado).
- Representatividad de sus resultados (seleccionar salidas de modelos que den un rango representativo de los posibles cambios futuros).
- Comparabilidad con estudios anteriores.
- Ser útiles para los estudios de impactos, vulnerabilidad y adaptación.

Debemos tomar en cuenta que para estimar los potenciales impactos del cambio climático y definir acciones de prevención, es necesario conocer la magnitud, ubicación y plazo al cual se puede presentar una condición anómala del clima en una determinada zona de estudio.

La Metodología para la reducción a escala de los modelos globales se realizó con la herramienta “Climate Predictability Tool” desarrollada por el Instituto Internacional para la sociedad y el clima de la Universidad de Columbia. Esta herramienta, permite relacionar patrones de gran escala con condiciones regionales del clima.

El CPT es una herramienta de regionalización de pronósticos estacionales basada en la corrección de errores sistemáticos en las salidas de los modelos a través de identificar patrones espaciales.

La metodología CPT estima a detalle las condiciones regionalizadas del clima realizando predicciones de alta resolución espacial, además realiza un análisis de



correlaciones canónicas y de regresión para determinar las componentes principales del modelo para cada mes.

Para llevar a cabo el proceso de regionalización estadística se necesitan dos bases de datos: Las salidas de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera y los datos observados puntuales o en malla regular de alta resolución.

El CPT se basa en un esquema de ajuste de las salidas de un Modelo Global de Circulación Atmosférica, siguiendo como prototipo una simulación conocida como Model Output Statistics, la cual corrige los errores sistemáticos de los MCG.

La suposición más importante para utilizar la metodología CPT es inherente a todas las técnicas estadísticas en las que se estima que la relación entre el campo de gran escala de baja resolución (MCG) y el de alta resolución (a nivel local) permanece constante. Es importante tomar en cuenta que la climatología regional debe ser comparada con la global en un periodo no menor de 20 años, sin embargo, es común tomar 30 años como base de estudio.

Las principales ventajas de la metodología Climate Predictability Tool son:

- Permite la estimación de incertidumbre, medida a través de la dispersión entre regionalizaciones.
- A partir de la escala espacial del campo observado, se pueden realizar regionalizaciones a la medida de las necesidades del usuario.
- Se pueden realizar evaluaciones del modelo comparado con la tendencia de los últimos 20 o 30 años a escala regional considerando la incertidumbre asociada a los modelos.

Por otra parte, deben considerarse las siguientes desventajas:

- La metodología parte de la hipótesis de que las relaciones de las variables en los campos de baja resolución a alta resolución no cambian.



- Se debe considerar los errores de reducción de escala en el esquema CPT.
- No permite el análisis de eventos extremos de manera directa por que no construye campos diarios.
- Requiere de un generador de tiempo estocástico para estimar cambios en la actividad de eventos hidrometeorológicos extremos.
- Requiere preparar los campos de los experimentos de los MCG para poderlos ingresar a la CPT.

La herramienta CPT, se puede comparar con los resultados de los modelos numéricos dinámicos de alta resolución como el “Simulador de la Tierra” o el “PRECIS” del Hadley Center (UK), para estimar las diferencias de resultado asociadas con el uso de 2 técnicas diferentes de regionalización.

Los datos utilizados para la generación de escenarios de cambio climático regionalizados deben corresponder a una base de datos de las variables temperatura y precipitación de un periodo histórico de 30 años, con resolución temporal mensual y con una resolución espacial de 50km x 50km.

3.2 Recopilación de datos

3.2.1 Estaciones climatológicas

Estas estaciones son utilizadas para obtener los datos de precipitación y temperatura.

Para el caso en estudio se utilizaron estaciones climatológicas ubicadas dentro de la cuenca y cercanas a la misma. Para obtener los datos de las estaciones se utilizó el Extractor Rápido de Información Climatológica (ERIC III) así como la base de datos CLICOM.



Una vez ubicadas se procedió a seleccionar las estaciones principales procurando que estas abarquen la superficie de la cuenca. Para llevar a cabo esta selección se realizó una discretización de acuerdo a los pesos de las variables (datos de las estaciones), estos pesos se determinaron en base al porcentaje de vacíos, la cantidad de años en funcionamiento y los periodos que han trabajado dichas estaciones.

Una vez que se han seleccionado las estaciones principales, se realiza el llenado de las mismas; es decir, se llenan los vacíos que presenten las estaciones en su serie histórica. Para este llenado se utiliza el método del inverso de la distancia euclidiana al cuadrado, el cual es aceptado por la Comisión Nacional del Agua.

El primer paso es obtener la matriz de las distancias euclidianas a partir del teorema de Pitágoras para cada par de estaciones, con la siguiente ecuación:

$$Dist. Euclidiana = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 + (z_i - z_j)^2}$$

En donde x, y, z; son las coordenadas de las dos estaciones a evaluar (i,j).

Se obtienen los valores inversos de las distancias y así se tendrá la matriz de la distancia inversa, después de obtener la matriz de correlación de todas las estaciones.

El siguiente paso es determinar el peso de todas las estaciones a utilizar con la siguiente ecuación, descartando aquellas que tengan una correlación menor a 0.80.

$$Peso\ estacion\ i = \frac{(inv.\ distancia\ euclidiana\ de\ la\ estación\ i)^2}{\sum_{i=1}^n (inv.\ distancia\ euclidiana)^2}$$

Donde i se refiere a las estaciones útiles para el llenado faltante.

Ese dato faltante es obtenido de la suma de las multiplicaciones del peso de cada una de las estaciones por su respectivo valor de precipitación.

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



Una vez que se han llenado las estaciones correspondientes, se validan los datos de cada una de ellas.

Para el caso de las temperaturas, estas son obtenidas de las estaciones principales, y en caso de algún dato faltante se utiliza la media mensual de cada estación.

A partir de la información de temperatura se obtienen los valores de evapotranspiración de acuerdo a la metodología de Thornthwaite.

3.2.2 Estaciones hidrométricas

La información que proporcionan estas estaciones se utilizan para medir el gasto en los ríos. Estos datos son obtenidos del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), de la Comisión Nacional del Agua.

Esta información es utilizada para la calibración del modelo superficial y del modelo de gestión. Para nuestro caso se utilizaron estaciones hidrométricas del Río Grande, Río Chiquito y Río Queréndaro.

3.2.3 Información del acuífero Morelia Queréndaro

Esta información es necesaria para poder llevar a cabo la simulación del acuífero, ya que consiste en información relacionada con los niveles piezométricos en diversas zonas del acuífero. Para nuestro caso en estudio, se utilizó información proporcionada por el estudio “Determinación de la disponibilidad de agua en el Acuífero Morelia-Queréndaro”

3.2.4 Información de Presas



Se obtuvo información del funcionamiento de vaso de las presas existentes en la cuenca a través de información proporcionada por CONAGUA. En este caso se requirió información de la presa de Cointzio y de la presa de Malpais

3.2.5 Demanda urbana

Mediante el uso de información vectorial proporcionada por el INEGI, se localizan los centros de población dentro del territorio de la cuenca. Una vez determinados, se utiliza la información de censos de población para determinar las proyecciones de población que serán de utilidad para el modelo de gestión.

3.2.6 Demanda Industrial y Agrícola.

Los datos referentes a la demanda agrícola e industrial, son obtenidos del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa) perteneciente a la Comisión Nacional del Agua. En estos registros se tienen los títulos de concesión, asignación y premisos de descarga.

Para el caso de las demandas agrícolas, estas se obtienen directamente de los distritos de riego. Con los datos de estas demandas se establece parte de la topología de modelación conjunta.

3.3 Análisis y validación estadística de los datos

Para asegurar que el modelo represente de manera fidedigna la situación real de la cuenca, es necesario realizar una validación de los datos que se van a utilizar en los modelos, para ello se realiza una correlación espacio-temporal para cada estación utilizada con la finalidad de determinar su independencia y su consistencia.

Lo primero que se debe de validar es la independencia de las series de precipitación, lo cual consiste en 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 fases temporales.

Lo primero que se hace es determinar los coeficientes de autocorrelación (r_k) con la siguiente ecuación:



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

Donde:

j = muestra de datos

k = desfase (años)

n = número de datos de la muestra

Una vez obtenidos los valores de autocorrelación para desfases desde 1 hasta n/3, se obtienen los límites de Anderson para un límite de confianza del 95% con la siguiente expresión:

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

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. Para el método de Secuencias se saca la media de la precipitación anual y posteriormente se le asigna el valor negativo a cada año que tenga una precipitación anual por debajo de la media y se asigna un valor positivo cuando la precipitación anual es mayor a la media. El siguiente paso es contabilizar el número de cambio de pendientes y finalmente se compara el valor obtenido con el valor de la siguiente tabla:

Tabla 3 Rangos para la evaluación de la consistencia mediante el método de secuencias

Datos (n)	μ	Datos (n)	μ
12	5 a 8	32	13 a 20
14	5 a 10	34	14 a 21
16	6 a 11	36	15 a 22
18	7 a 12	38	16 a 23



20	8 a 13	40	16 a 25
22	9 a 14	50	22 a 30
24	9 a 16	60	26 a 36
26	10 a 17	70	31 a 41
28	11 a 18	80	35 a 47
30	12 a 19	100	45 a 47

Otra forma de evaluar la consistencia de una estación climatológica es mediante el método de Helmert, el cual consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento; es decir, si el signo asignado en el método de Secuencias a un año es seguido por un año con el mismo signo se considera que existe una secuencia (S) de lo contrario existe un cambio (C). Para que una serie sea homogénea, la diferencia entre secuencias y cambios debe ser igual a cero o estar dentro de un rango aceptable, el cual se calcula con la siguiente ecuación:

$$S - C = \pm \sqrt{n - 1}$$

Donde n es el número de datos.

3.4 Modelo lluvia - escurrimiento

El modelo de Témez (Témez, 1977) pertenece al grupo de los denominados modelos agregados de simulación de cuencas (Estella, 1992). El modelo opera realizando balances de humedad entre los distintos procesos de transporte de agua que tienen lugar en un sistema hidrológico durante las diferentes fases del ciclo hidrológico. Todo el proceso está gobernado por el principio de continuidad y de balance de masas, y regulado por leyes específicas de reparto y transferencia entre los distintos términos del balance.

El modelo realiza una valoración global, ya que no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos, que se



sustituyen por un valor medio, por lo que se limita su aplicación a cuencas pequeñas o intermedias en las que existe cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica. Para su aplicación en cuencas de mayor tamaño es necesario realizar una subdivisión en cuencas más pequeñas, por lo que el modelo puede funcionar como modelo semiagregado.

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

El modelo considera el terreno dividido en dos zonas:

- Una zona superior, 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.

3.5 Requerimiento de cultivos

El procedimiento para calcular las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego se basan principalmente en los métodos presentados en los Estudios de Riego y Drenaje de la FAO número 24 “Las Necesidades de los cultivos” y el número 33 “Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos.”

De acuerdo a la documentación propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) los resultados obtenidos para el cálculo de la evapotranspiración por el Método de Penman-Monteith con respecto a



medidas lisimétricas efectuadas en condiciones climáticas diversas son las más ajustadas.

Para el cálculo de los requerimientos de los cultivos para cada escenario se utiliza el programa de cómputo Cropwat 8 la FAO. (Smith, Clarke FAO 1998). Cropwat es un programa para calcular las necesidades en agua de los cultivos y las necesidades de riego a partir de informaciones sobre el clima y los cultivos, el procedimiento para calcular las necesidades de agua de los cultivos y las necesidades de riego se basan principalmente en los métodos presentados en los Estudios de Riego y Drenaje de la FAO número 24 “Las Necesidades de los cultivos” (Doorembos y Pruitt. Roma, reimpresión de 1986) y el número 33 “Efectos del agua sobre el rendimiento de los cultivos”.

3.6 Demanda urbana

El análisis de la demanda urbana futura se realiza mediante la obtención de una población de proyecto que es la cantidad de personas que se espera tener en una localidad de diseño y analizar que volumen de agua será requerido. Por lo tanto, es necesario analizar los diferentes métodos de proyección de población que pueden ser por comparación o por ajuste de curvas por mínimos cuadrados. Estos métodos se basan en una extrapolación de datos históricos de crecimiento de la población, que suponen que la población crecerá en el futuro con las mismas tendencias como en el pasado. Los métodos para obtener el incremento de la población son:

- Método de crecimiento por comparación.
- Método de mínimos cuadrados lineal.
- Método de mínimos cuadrados exponencial.



- Método de mínimos cuadrados logarítmico.
- Método de mínimos cuadrados Potencial.

Para el cálculo del incremento de la población se utiliza el programa DATOS BASICOS de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) 2007. Donde además de hacer la proyección de la población se pueden conocer los incrementos que se pueden presentar en la demanda urbana. En las grandes ciudades los incrementos en la población y la demanda urbana ocasionaran déficits de abastecimiento para esta y otras demandas.

3.7 Modelación del acuífero

El método de los autovalores se utiliza en aquellos acuíferos conectados con un río para los que se considera necesario el uso de un modelo de parámetros distribuidos. Consecuentemente se requiere una localización detallada de las acciones que se ejercen sobre dichos acuíferos, así como de las respuestas del acuífero. Se ha demostrado que el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987) es el más eficiente para sistemas que puedan ser supuestos lineales, en los que interesa conocer las respuestas (parámetros de control) y sobre los que se ejerzan acciones que puedan ser descritas como combinaciones lineales de unas acciones unitarias predeterminadas (acciones elementales). La aplicación del método de los autovalores permite integrar en un único modelo las transferencias entre las distintas celdas en las que se ha discretizado el acuífero, reflejar el efecto de las extracciones producidas por los bombeos, así como plantear escenarios futuros.

Para la aplicación del método se ha utilizado el programa AQUIVAL incluido en el módulo SSD AQUATOOL.

La metodología que utiliza el programa AQUIVAL es la siguiente:



- Definición de geometría, condiciones de contorno y elaboración de una malla de diferencias finitas o elementos finitos adaptada a la forma del acuífero.
- Definición de las características hidrodinámicas del acuífero (transmisividades, coeficiente de almacenamiento).
- Definición de acciones elementales.
- Definición de los parámetros de control.
- Definición de la simulación.
- Calibración y validación.

Para la discretización del acuífero, condiciones de contorno y condiciones iniciales es necesario tener conocimientos hidrológico e hidrogeológico del acuífero en estudio, de forma que todos aquellos datos de entrada requeridos para la construcción del modelo de autovalores sean lo más cercanos a la realidad del acuífero.

Las acciones elementales son todos aquellos volúmenes que entran y salen del acuífero a lo largo del tiempo en una zona específica, es decir todos los bombeos, las salidas por evapotranspiración, las salidas por manantiales, la recarga vertical del o por lluvia, así como las transferencias laterales de entrada y de salida.

Los parámetros de control nos indican la evolución del acuífero y nos indican el estado en cualquier parte de la simulación del acuífero, por ejemplo, un parámetro de control pueden ser las salidas totales del acuífero, los niveles piezométricos en una celda o conjunto de celdas, el volumen total almacenado, entre otros.

El modelo de los autovalores puede ser definido para régimen permanente (sin bombeos) así como para el régimen transitorio. Este modelo puede tomar como datos



de partida los resultados obtenidos del anterior modelo definido en régimen permanente. El modelo a régimen transitorio, se puede utilizar para plantear una serie de escenarios futuros. Se puede dar el caso que debido a la intensa explotación del acuífero se produzca un cambio en las direcciones del flujo y si, por lo tanto, que ya no se producen las salidas naturales de los acuíferos hacia el río y, por tanto, afectando de manera considerable el sistema superficial.

Una vez construido y calibrado el modelo subterráneo mediante el método de autovalores, el modelo puede conectar con el modelo de simulación superficial para crear un modelo de uso conjunto mediante el módulo SIMGES.

3.8 Sistema de Gestión de Recursos Hídricos SIMGES

El modelo de simulación del sistema de recursos hídricos de la cuenca del lago de Cuitzeo utilizado en esta tesis ha sido desarrollado con el programa SIMGES perteneciente al Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL (Andreu et al. 1996).

El programa SIMGES perteneciente a AQUATOOL 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 y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. El uso de SIMGES permite modelar con extrema flexibilidad el sistema hidrográfico considerado, cuya sucesiva simulación proporciona los valores de suministro para cada demanda. El modelo admite cualquier configuración dentro de unos límites impuestos únicamente por capacidades de hardware, y por tanto es utilizable para cualquier esquema de recursos hidráulicos.



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.

La gestión de los recursos hidráulicos se efectúa mediante reglas de operación que permitan reproducir cualquier regla de gestión en los embalses usando para ello unas curvas de zona de embalse. Estas curvas son las reglas de explotación propiamente dichas y son suministradas por el usuario del modelo.

Se admite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como de diferentes prioridades de los usuarios para el aprovechamiento del agua.

La simulación y gestión del sistema superficial se efectúan a un tiempo mediante el uso de un algoritmo de optimización de redes de flujo conservativo.

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 y objetivos de producción hidroeléctrica.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de todas las variables de interés a nivel mensual, a nivel anual, valores medios del período de simulación, así como



garantías. Todo ello permite que el modelo pueda ser utilizado, entre otras finalidades para:

- Determinar las garantías que se obtienen para distintas hipótesis de infraestructura y de evolución de demandas, así como para distintas reglas de explotación de la cuenca.
- Establecer de reglas de explotación más adecuadas para unos niveles exigidos de garantías.
- Estimar los beneficios o perjuicios derivados de la alteración de prioridades de usos del agua.
- Determinar de capacidades de embalse, de conducciones, y de instalaciones de bombeo para unos niveles de demanda y de garantía dados.



4. Resultados

4.1 Determinación de series de precipitación y temperatura con efectos de cambio climático.

Para estudiar los efectos del cambio climático en una determinada región, es necesario conocer las series históricas de las precipitaciones y temperaturas del lugar.

Para conocer las series históricas de temperaturas y precipitaciones de la zona de estudio, fue necesario ubicar geográficamente la cuenca, los municipios y las estaciones climatológicas cercanas.

Para la ubicación de las estaciones climatológicas se utilizó la base de datos ERIC III (IMTA, 1997) y CLICOM (SMN), se obtuvieron las coordenadas (x, y), elevaciones y códigos de las estaciones de medición del clima y con la ayuda del programa ArcGis, se superpusieron los mapas de la cuenca, estaciones y localidades de la zona de estudio.

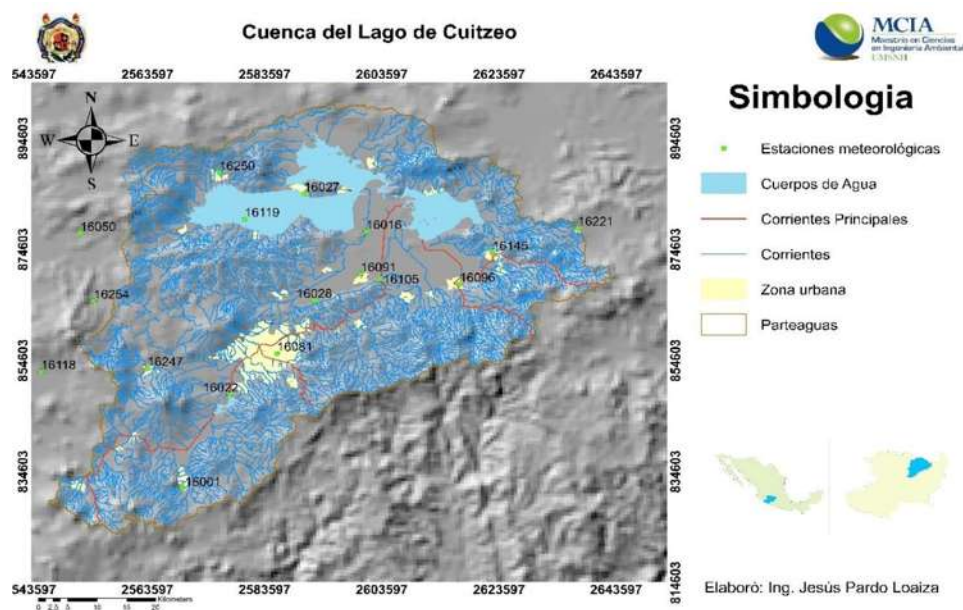


Figura 6 Ubicación de estaciones climatológicas



Inicialmente, se planteó trabajar con las estaciones climatológicas que se encontraban en las inmediaciones de la cuenca; resultando 82 estaciones seleccionadas.

Tabla 4 Estaciones climatológicas

Código	Nombre	X	Y	Z
16001	ACUITZIO DEL CANJE	-101.333	19.483	2070
16002	AGOSTITLAN	-100.617	19.533	2380
16004	ALVARO OBREGON	-101.033	19.833	1800
16012	CAJONES	-101.933	19.2	480
16016	CARRILLO PUERTO	-101.083	19.917	1840
16017	CASA BLANCA	-101.463	20.324	1700
16020	CIUDAD HIDALGO (DGE)	-100.567	19.7	2020
16022	COINTZIO	-101.25	19.6	1950
16023	COPANDARO DE GALEANA	-101.666	19.904	1500
16027	CUITZEO	-101.317	19.967	1831
16028	CUITZILLO GRANDE	-101.117	19.767	1840
16034	EL JACAL	-101.333	19.917	1500
16049	ETUCUARO	-101.083	19.4	1612
16050	HUANIQUEO	-101.503	19.896	1950
16052	HUINGO	-100.833	19.917	1832
16057	JIMENEZ	-101.75	19.933	
16058	JUNGAPEO	-100.5	19.433	1430
16070	LA VILLITA	-100.68	19.148	60
16071	LOS AZUFRES	-100.633	19.8	2800
16079	MELCHOR OCAMPO	-100.5	19.333	
16080	MORELIA	-101.167	19.683	1903
16081	MORELIA	-101.183	19.7	1915



16084	PANINDICUARO	-101.767	19.983	1638
16086	PASTOR ORTIZ	-101.587	20.311	1692
16087	PATZCUARO	-101.617	19.533	2043
16091	PLANTA BOMBEO A.ZINZIMEO	-100.983	19.883	1384
16092	PSA. AGOSTITLAN	-100.617	19.55	2380
16096	PSA. MALPAIS	-100.883	19.75	1831
16097	PSA. PUCUATO	-100.7	19.633	2505
16098	PSA. SABANETA	-100.683	19.617	2513
16100	PUENTE SAN ISIDRO	-101.533	19.85	1989
16104	PURUANDIRO	-101.517	20.083	1994
16105	QUIRIO	-100.983	19.8	1830
16107	SAN CARLOS	-100.8	19.267	685
16109	SAN DIEGO CURUCUPATZEO	-101.183	19.333	1020
16114	S.MIGUEL DEL MONTE	-101.133	19.617	2000
16116	SAN SEBASTIAN	-100.95	19.817	2070
16117	SANTA FE DEL RIO	-101.783	20.2	1700
16118	SANTA FE	-101.533	19.733	2056
16119	STA.RITA	-101.233	19.917	1880
16120	SANTIAGO UNDAMEO	-101.3	19.6	2000
16123	TACAMBARO	-101.467	19.233	1755
16127	TARETAN	-101.917	19.333	1170
16133	TURICATO	-101.417	19.567	795
16135	TUZANTLA	-100.583	19.217	666
16136	TZITZIO	-100.917	19.583	1850
16139	VILLA MADERO	-101.267	19.4	2227
16140	VILLA MADERO	-101.267	19.4	2135
16142	ZACAPU	-101.783	19.817	1980
16145	ZINAPECUARO	-100.667	19.883	1920
16147	ZIRITZICUARO	-102	19.083	2525
16152	CD. HIDALGO	-100.567	19.7	2020



16155	COPANDARO	-101.083	19.933	1981
16159	EL ROSARIO	-101.723	20.125	1720
16161	LA VILLITA	-100.68	19.148	
16163	TUZANTLA	-100.567	19.2	
16168	ARIO DE ROSALES	-101.733	19.2	1840
16187	ESC. TEC. AGRO. 139	-101.117	19	505
16188	TIRINDARO	-101.75	19.767	2500
16213	IRIMBO	-100.5	19.75	2235
16221	UCAREO UNION DE FRUT.	-100.833	19.917	
16225	VILLA JIMENEZ	-101.747	19.92	1980
16231	LAS CRUCES	-101.383	19.933	2070
16232	EL DEVANADOR	-100.817	19.383	
16234	GALEANA	-101.569	20.035	1550
16235	HUAJUMBARO	-100.733	19.667	2285
16237	EL LIMON	-100.783	19.233	
16238	MELCHOR OCAMPO	-100.65	19.1	
16240	EL PUEBLITO	-101.917	19.817	1100
16241	TEFETAN	-100.9	19.417	2235
16243	ZIQUITARO	-101.889	20.062	1920
16245	SAN CARLOS	-100.783	19.233	
16247	CAPULA	-101.383	19.667	1708
16248	CAURIO DE GUADALUPE	-101.858	19.923	1523
16250	HUANDACARO	-101.267	19.817	2285
16253	TANACO	-101.983	19.75	1850
16254	TEREMENDO	-101.483	19.783	2350
16255	UCAREO	-100.683	19.9	2800
16257	STA. ISABEL DE AJUNO	-101.617	19.533	2550
16258	PRESA TUXPAN	-100.5	19.567	
16512	EL COLEGIO	-101.183	19.7	1900
16515	LA SANDIA	-101.667	19.25	



Debido a que no existen estaciones meteorológicas automatizadas, los datos históricos de las precipitaciones y temperaturas contienen errores y vacíos que deben ser identificados, analizados y corregidos por medio de la generación de series de precipitaciones y temperaturas históricas obtenidas con el método de llenado de datos faltantes conocido como: “inverso de la distancia euclidiana al cuadrado”. Este procedimiento requiere de un análisis de datos que permita determinar si las series de datos de las distintas estaciones muestran datos confiables.

Como consecuencia, el proceso de llenado de datos se convierte en una metodología tediosa y complicada; por ello, fue necesario establecer una serie de filtros que nos permitieran acotar el número de estaciones climatológicas dentro de la zona de estudio.

Cabe destacar que, de acuerdo a lo establecido por el IPCC, para poder realizar una regionalización los Modelos de Circulación General de la Atmósfera, se debe contar con un periodo histórico mínimo de 20 años. Además, se condicionó a las estaciones a cumplir con un periodo de comparación de 10 años correspondientes a la década 2000-2010. Por lo cual, las estaciones seleccionadas para el estudio del cambio climático en la cuenca del lago de Cuitzeo, deben cumplir un periodo de información mensual de las variables temperatura y precipitación correspondiente al periodo Enero 1975- Diciembre 2010.

En general, las variables climatológicas son medidas de manera puntual, por lo que es importante señalar que las lluvias y precipitaciones son diferentes en sitios ubicados a los alrededores de la zona de estudio. Debido a lo anterior, es necesario comparar los datos de la estación en estudio con los registrados en las estaciones cercanas.



Como consecuencia de la operación manual de las estaciones, se encontró que existen periodos donde no se realizó el registro de la cantidad de lluvia que precipitó en determinado lugar, ni de la temperatura ambiente. En el caso de las lluvias, se sabe que existen meses húmedos y meses secos en un periodo de un año. Por lo que, si se registra una medición pequeña en un mes húmedo, se debe de verificar si se presentaron sequías en el lugar o si la falta de datos diarios ocasionó la desviación de los datos. En el caso de la temperatura, la lógica que se emplea para identificar anomalías es similar; pues si se observa una temperatura muy alta en época de invierno, será probable que exista una variación ocasionada por un error humano en el registro.

Cabe resaltar, que para el estudio de la variable precipitación, los resultados son más sensibles a los errores que los de la variable temperatura.

Cuando se verifica la existencia datos faltantes en las series climatológicas, es necesario hacer un llenado de datos que permita obtener una serie histórica completa; y así, poder proceder con el análisis que ayude a identificar el escenario climático al que tiende la superficie de influencia de la cuenca del Lago de Cuitzeo. Algunos de los métodos existentes para la deducción de datos faltantes en series de temperatura y precipitación son los siguientes:

- Método del Promedio Aritmético.
- Método de Regresión Lineal Simple.
- Método del U.S. National Weather Service (Inverso de la distancia al cuadrado).
- Método de la Relación Normalizada (Matriz $\pm 10\%$).



4.2 Criterio de selección de estaciones climáticas

El objetivo de obtener series históricas de precipitación y temperatura, es determinar los efectos del cambio climático para el periodo de estudio Enero 1980-Diciembre 2010.

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), realizó una regionalización de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera correspondientes a los 3 Escenarios de Cambio Climático (RCP 8.5, RCP 6.0 y RCP 4.5).

Es importante señalar que los Modelos Regionalizados no representan detalladamente la variabilidad del clima de la zona de estudio debido a la poca resolución de los modelos globales; por lo cual, es necesario comparar las series de precipitación real con las series de precipitación modelada. Se decidió analizar la serie precipitación de las estaciones en la zona de estudio, debido a que la variable temperatura es muy uniforme a escala espacial y temporal.

Para poder realizar la posterior comparación de las series reales contra las proyectadas es necesario ubicar estaciones que midan el cambio climático para el periodo de Enero 2000 – Diciembre 2010.

De lo anterior, surge el primer filtro para reducir el número de estaciones meteorológicas. Los criterios para disminuir las estaciones son los siguientes:

De acuerdo a la ubicación de las Estaciones que miden el Cambio Climático, determinar el Área de Influencia de los Polígonos de Thiessen para éstas estaciones. Una vez conocida la superficie de los polígonos de Thiessen para el Cambio Climático, determinar las estaciones ubicadas dentro de la zona de estudio. Si alguna estación no cumple esta condición, será desechada.



Primeramente, debemos ubicar las estaciones de cambio climático. Las condiciones que debemos tomar en cuenta para situar las Estaciones de Cambio Climático son las siguientes:

- a. El área de influencia de cada estación debe de ser de 2500km², para obtener una resolución de los Modelos de Circulación General de la Atmósfera de 50km x 50km (de acuerdo a los polígonos de Thiessen).
- b. La estación principal del cambio climático debe estar geográficamente situada en el mismo punto del centro de gravedad de la cuenca o del acuífero.
- c. La distancia mínima entre estaciones en sentido vertical y horizontal será de 50km.

De acuerdo a la localización de estas estaciones climáticas, se lleva a cabo el primer filtro, reduciendo a 75 la cantidad de estaciones climatológicas ya que se encuentran dentro del área de influencia de las primeras. Posteriormente se procede a caracterizar cada una de las estaciones de cambio climático.

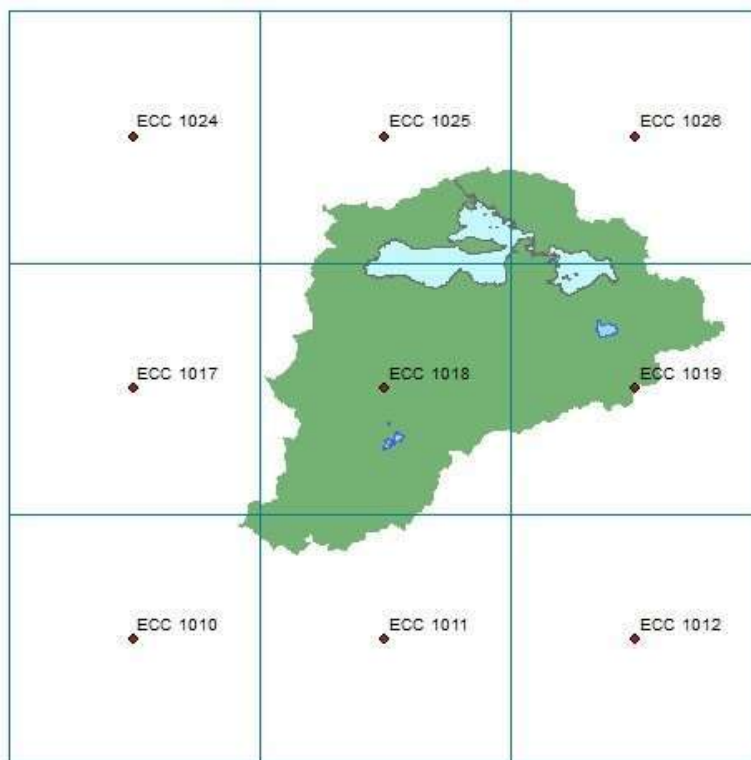


Figura 7 Estaciones de cambio climático

Una vez analizados los datos de cada estación, se seleccionaron 18 estaciones principales (tabla 5). Además de analizar los pesos totales de las estaciones se analizó su ubicación geográfica, ya que es importante que toda la cuenca quede rodeada de estaciones de precipitación con información adecuada.



Tabla 5 Estaciones principales

CLAVE	X	Y	Nombre	Elevación (msnm)	Precipitación media (mm)	Temperatura (°C)
16022	263105.43	2172276.28	Cointzio	1950	837.866	17.752
16001	254707.31	2155675.79	Acuitzio del Canje	2070	879.457	16.323
16118	230875.61	2176976.47	Santa Fe, Quiroga	2056	768.588	16.519
16254	240138.51	2189536.71	Teremendo, Teremendo	2350	746.388	17.374
16247	249103.22	2177221.44	Capula	1708	829.14	15.721
16250	262055.5	2212372.81	Huandacareo Cuitzeo	2285	861.209	18.047
16119	266239.01	2203876.51	Sta. Rita, Copándaro de G.	1880	732.78	19.903
16027	276496.91	2208277.47	Cuitzeo	1831	747.338	18.421
16091	285914.63	2193624.07	Planta de Bombeo Zinzimeo	1384	683.256	18.144
16105	289290.2	2192635.18	Quirio	1830	686.17	18.008
16016	286988.42	2201270.71	Carrillo Puerto	1840	713.117	16.54
16096	302815.9	2191433.46	Presa Malpais	1831	789.401	17.657
16145	308535.3	2197047.37	Zinapecuaro	1920	810.062	18.248
16221	323269.09	2201176.34	Ucareo	1800	751.198	14.406
16028	277890.15	2189008.2	Cuitzillo el Grande	1840	700.127	17.212
16081	271334.05	2179498.44	Morelia (DGE) Bosque	1915	786.222	18.712
16050	238029.35	2201829.41	Huaniqueo	1950	867.331	17.983
16155	220899.84	2203071.84	Copandaro Jimenez	1981	810.062	15.493

Para llevar a cabo la validación de los datos de las estaciones climatológicas, se determinó la dependencia de cada estación. En las siguientes figuras se muestran autocorrelogramas para algunas estaciones, así como sus límites de Anderson correspondientes, donde se puede apreciar que la estación es independiente ya que su autocorrelograma queda dentro de los límites de Anderson.

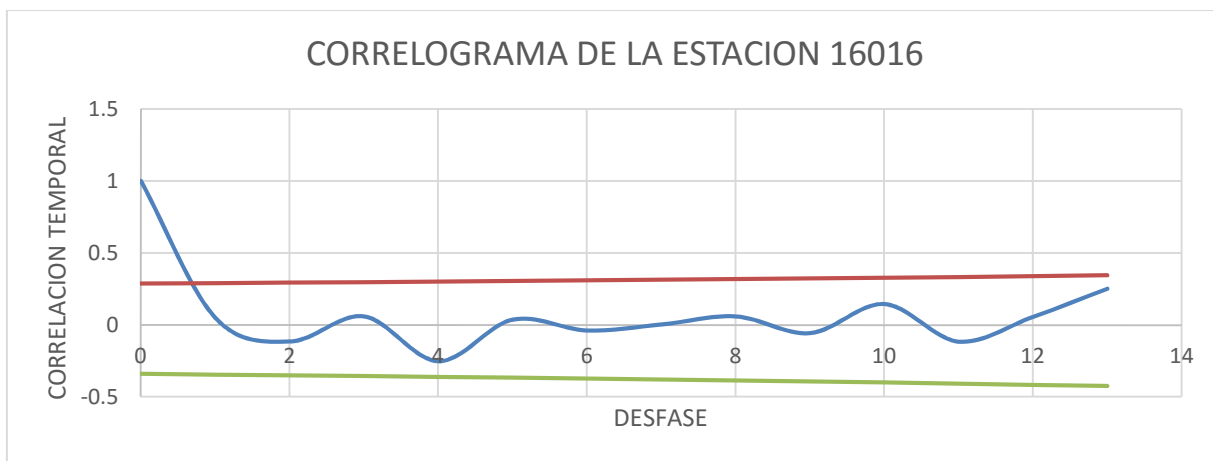


Figura 8 Correlograma de la estacion16016

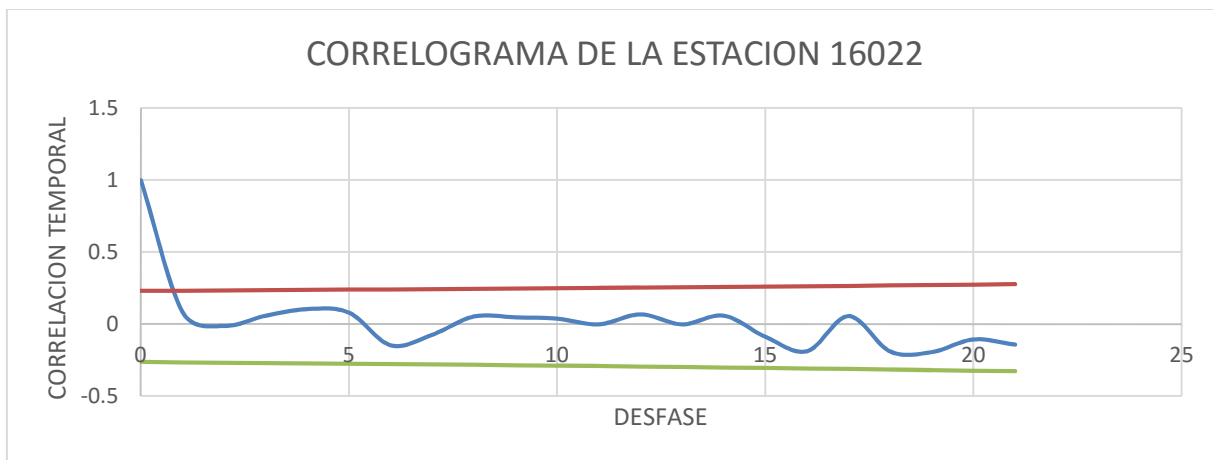


Figura 9 Correlograma de la estacion16022

Al analizar cada una de las 18 estaciones, todas resultaron independientes.

Una vez realizada esta prueba, se analizó la consistencia de los datos con los métodos de Secuencia y Helmert.



Tabla 6 Prueba de Helmert y Secuencias de la estación 16022

Año	Precipitación (mm)	Secuencia	Helmert	Año	Precipitación (mm)	Secuencia	Helmert
1941	901.9	+	C	1961	700	-	S
1942	743.4	-	C	1962	851.7	+	C
1943	703.3	-	S	1963	909.9	+	S
1944	719	-	S	1964	950.1	+	S
1945	586.2	-	S	1965	870.7	+	S
1946	391.6	-	S	1966	892.8	+	S
1947	720.2	-	S	1967	1096.1	+	S
1948	736.6	-	S	1968	1110.6	+	S
1949	716	-	S	1969	791	+	S
1950	869	+	C	1970	643.4	-	C
1951	578.2	-	C	1971	785.6	+	C
1952	776.2	-	S	1972	848.2	+	S
1953	614.8	-	S	1973	878.6	+	S
1954	783.3	+	C	1974	308	-	C
1955	900.2	+	S	1975	845.3	+	C
1956	748.1	-	C	1976	987.1	+	S
1957	707.7	-	S	1977	851.5	+	S
1958	1392.3	+	C	1978	1018.6	+	S
1959	941.7	+	S	1979	664	-	C
1960	640.7	-	C	1980	923.8	+	C

Como se puede observar en la tabla anterior, el número de cambio de pendientes en el caso de la estación 16022 es de 13 (cambios de signo). Por tanto, se concluye que, de acuerdo con el método de secuencias, la estación es consistente.

Para el método de Helmert, se tiene que la diferencia entre secuencias (S) y cambios (C) es de 4, estando dentro del rango $\pm\sqrt{n-1}$, (± 7.55), por lo que es consistente.



En la siguiente tabla se muestran los resultados del análisis de consistencia para las estaciones climatológicas principales.

Tabla 7 Homogeneidad de las estaciones principales

Homogeneidad				
	Pruebas Paramétricas		Pruebas No Paramétricas	
Estación	Helmer	Secuencias	t Student	Cramer
16119	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16119	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16247	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16001	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16016	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16022	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16027	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16028	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16050	HOMOGENEO	HOMOGENEO		
16081	HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16091	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16096	HOMOGENEO	HOMOGENEO		
16105	HOMOGENEO	HOMOGENEO		
16118	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16145	NO HOMOGENEO	NO HOMOGENEO	HOMOGENEO	HOMOGENEO
16155	HOMOGENEO	HOMOGENEO		
16250	HOMOGENEO	HOMOGENEO		
16254	HOMOGENEO	HOMOGENEO		



4.3 Validación de series futuras.

Para determinar las series futuras de precipitación, primeramente, se debe definir la serie histórica de lluvias en la zona de estudio. Se deben de establecer criterios que permitan comparar la climatología de la región con la climatología proyectada con los Modelos Globales de Circulación General de la Atmósfera. Para evaluar el efecto del cambio climático en las series de precipitación y temperatura en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, se realizará una comparación de las series de precipitación y temperatura observadas en el periodo Enero 2000 a Diciembre 2010 con las series proyectadas con los Modelos Globales propuestos por el IPCC para el mismo periodo. Debido a que las series de datos no se encuentran representados con la misma escala, es necesario homogenizar las unidades de medición. En términos de predicción de series de climatologías futuras solo es posible representar las condiciones medias probables de ocurrencia.

Debido a que este estudio incluye periodos de estudio de 30 años y además se adicionará la variable del cambio climático, los pronósticos de las condiciones medias del clima en un futuro lejano solo pueden ser representados mediante la creación de Escenarios Climáticos.

Las consideraciones en la elaboración de escenarios de cambio climático incluyen proyecciones del estado futuro de los sistemas naturales, sociales y económicos, tales como el cambio de estado de los ecosistemas, los cambios en la concentración de gases de invernadero en la atmósfera y el desarrollo socioeconómico, entre otros factores. Diversos escenarios para el futuro han sido creados en el contexto del cambio climático global. Sin embargo, con la metodología que mencionaremos a continuación podremos regionalizar las predicciones de los modelos globales para la proyección de escenarios climáticos en el contexto de la climatología histórica de la Cuenca.



Para poder establecer como impactará el Cambio Climático en la escala de regiones específicas, se requiere profundizar el conocimiento del clima histórico a esa escala espacial; es decir, se requiere tener identificadas con gran nivel de detalle las variaciones climáticas que ocurren en cada región de interés.

La acción de explicar y demostrar las causas de los cambios en el clima se conoce como atribución del cambio climático, y consiste en establecer, con un nivel de confianza dado, el origen más probable de un cambio detectado en el clima. Dada la fuerte interdependencia entre el clima y las actividades humanas, cualquier cambio climático tendrá diversas implicaciones para la economía y la sociedad.

El clima cambia en muchas escalas diferentes tanto en el espacio como en el tiempo. El análisis de las variaciones climáticas en escalas espaciales pequeñas (por ejemplo, en la escala de una entidad federativa) implica un mayor nivel de detalle en las observaciones, las cuales darán cuenta de procesos locales. Así, la señal de cambio del clima en una localidad particular puede diferir de la señal planetaria y el comportamiento observado localmente no necesariamente será idéntico al del promedio de toda la Tierra. De allí la importancia de analizar los datos climáticos locales con el fin de comprender el posible impacto del calentamiento planetario en regiones específicas.

Con el fin de facilitar y optimizar el cálculo de series futuras de precipitación y temperatura con efectos del cambio climático, es recomendable que las estaciones seleccionadas para el análisis de la Cuenca cumplan con los siguientes requisitos:

- Las estaciones seleccionadas deben cubrir la mayor parte de la región de interés.
- La distribución geográfica de las estaciones debe estar espacialmente equilibrada (evitar tener muchas estaciones en una parte de la región y muy pocas en otra).



- Las estaciones seleccionadas deben tener el mayor número posible de años con datos completos (observados únicamente, sin estimaciones ni interpolaciones).
- Las estaciones deben seleccionarse para un periodo de tiempo común en el que el porcentaje de datos existentes sea lo más grande posible.

Como mencionamos anteriormente, el parámetro más importante en la generación de Escenarios es la preparación de series de precipitación y temperatura que representen lo más fielmente posible la climatología histórica de la región.

Existen algunas recomendaciones para identificar irregularidades en los registros históricos de las estaciones climatológicas. Sin importar la zona de estudio, es conveniente verificar que las series de precipitación y temperaturas obtenidas de las bases de datos de las estaciones en estudio sean validadas según los siguientes criterios:

- Es necesario reconocer los errores lógicos en las mediciones (que la temperatura máxima no sea menor que la mínima, que no existan valores de lluvia menores que cero).
- Debemos comparar las series obtenidas de la base de datos vs los registros originales en papel o en el registro del instrumento.
- Marcar como datos por verificar los valores que exceden un límite predeterminado y validarlos (es común la práctica de utilizar el límite de ± 4 desviaciones estándar para el caso de la temperatura).
- Realizar una cuidadosa inspección visual de las gráficas de la serie de tiempo.
- En el caso de valores extremos, recurrir a fuentes de información alternas para ver si existe evidencia física que justifique los datos (paso de frentes, impacto de ciclones tropicales o situaciones meteorológicas sinópticas específicas).



Las series de precipitación y temperatura de las estaciones se obtuvieron para un periodo de 30 años. Sin embargo, determinación que el periodo histórico de datos sería del Enero-1980 a Diciembre-1999; mientras que el periodo de comparación será de Enero-2000 a Diciembre-2010.

Los Modelos de Circulación General de la Atmósfera tienen una resolución espacial de 300km x 300km, dicha resolución se puede identificar por medio de una malla reticular constituida por cuadrados con área de 300 km x 300 km, y en cuyo centro de gravedad se ubica una estación de cambio climático. Al regionalizar los Modelos, el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático proyectó Modelos reducidos a una escala espacial de 50km x 50km o con mallas representativas de 0.5° x 0.5°, donde nuevamente las Estaciones de Medición de Cambio Climático se localizaron en el centro de gravedad.

Tabla 8 Estaciones de CC

Nombre	Longitud	Latitud	X_UTM	Y_UTM
--------	----------	---------	-------	-------



1010	-101.75	19.25	210898.504	2130804.85
1011	-101.25	19.25	263486.075	2130047.86
1012	-100.75	19.25	316059.446	2129442.57
1017	-101.75	19.75	211786.432	2186182.53
1018	-101.25	19.75	264212.158	2185409.04
1019	-100.75	19.75	316623.926	2184790.55
1025	-101.25	20.25	264956.141	2240772.84
1026	-100.75	20.25	317202.324	2240141.34

Para conocer las series futuras de precipitación y temperaturas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo, primero debemos de establecer un punto de comparación entre las series de precipitación y temperatura históricas y las proyectadas por los MCG regionalizados.

La estación de cambio climático con mayor influencia es la ECC1018. Las series de precipitación para los MCG, proyectan valores de Enero-2000 a Diciembre-2099, dichas series son representadas por medio de porcentaje de precipitación o anomalía de precipitación. Mientras que las series de temperatura, se proyectan para el mismo periodo, pero se representan en variación de temperatura o anomalía de temperatura.

Debido a que las estaciones climatológicas que se ubican en el área de influencia de la ECC1018 se encuentran distribuidas aleatoriamente en toda la



superficie, debemos crear series de precipitación y temperaturas en una estación ficticia con las mismas coordenadas que la ECC1018.

Para la creación de las series en la estación ficticia, necesitaremos las series completas de datos de todas las estaciones principales y secundarias para el periodo Enero-1980 a Diciembre-2010. Las series históricas de cada estación meteorológica, deben ser trasladadas a las coordenadas -101.25, 19.75. El traslado de las series de precipitación y temperaturas se realizará por el Método U.S. National Weather Service o Inverso de la Distancia al Cuadrado, el cual fue utilizado para la deducción de datos faltantes de las estaciones.

Existe una diferencia en la metodología para la creación de series históricas en la estación ficticia con respecto a la deducción de datos faltantes de las estaciones. Dicha discrepancia radica en que para la obtención de las series de precipitación y temperatura en las mismas coordenadas donde se ubica la ECC1018, el peso de las estaciones es el mismo durante los 30 años; pues existe homogeneidad en el registro de datos durante todo el periodo. Así que la fórmula para obtener las precipitaciones y temperaturas históricas en las coordenadas de la ECC1018, será la misma desde Enero 1980 a Diciembre 2010.

Cabe resaltar que, con el traslado de la información, las variables estarán representadas por altura de precipitación en mm y temperaturas en °C. Para poder realizar la comparación de los datos históricos observados vs los datos proyectados regionalizados, es necesario expresar la variabilidad del clima histórica en %PP y $\pm^{\circ}\text{C}$.

4.4 Determinación de las aportaciones en la cuenca del lago de Cuitzeo.



Para poder determinar tanto las aportaciones presentes y futuras de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, es necesario delimitar la cuenca en subcuencas de acuerdo a las aportaciones que se vayan a establecer en el esquema de simulación para la modelación del sistema, para este caso se han determinado diecisiete subcuencas.

Tabla 9 Relación de Subcuencas de Cuitzeo

Nombre	Área (km2)
Atapaneo	66.60
Chiquito	87.55
Cointzio	617.52
Copándaro	811.66
Huandacareo	267.05
Santa Ana Maya	217.54
Iramuco	96.16
Araró	110.50
Zinapécuaro	80.89
Itzícuaró	490.83
Lobera	295.64
Charo	65.35
Malpais	191.07
Queréndaro	136.26
Indaparapeo	36.26
Santiago Undameo	44.02

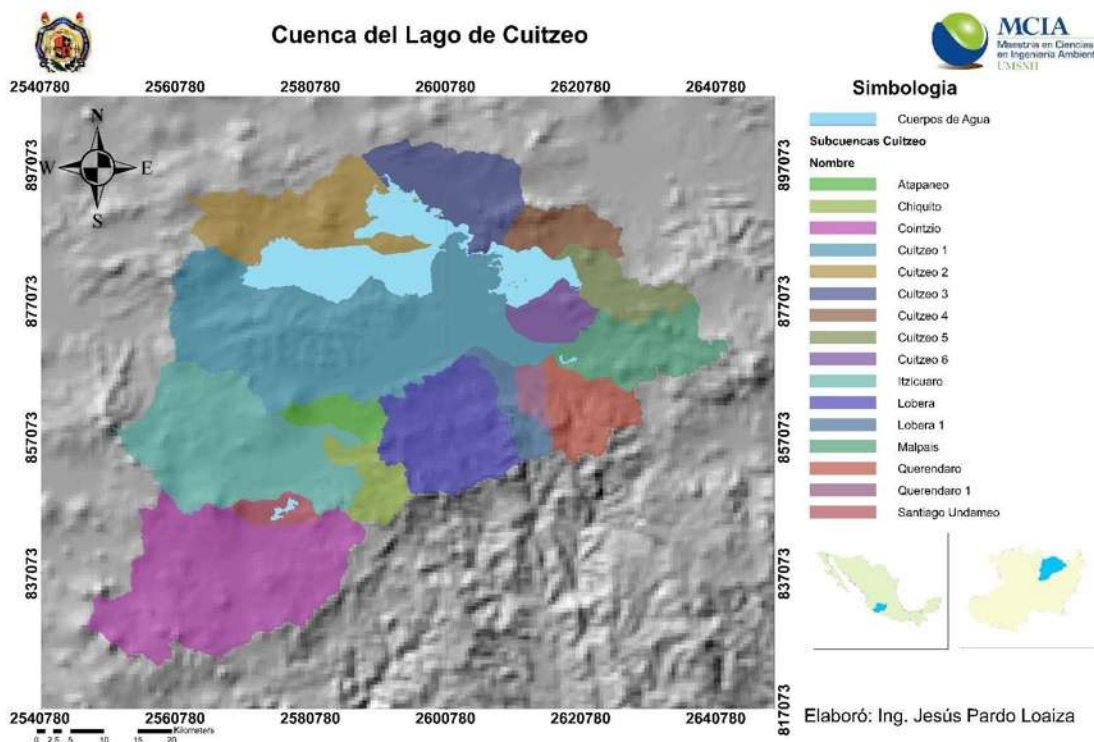


Figura 10 Subcuencas del área del estudio

La definición de estas subcuencas parte de la información hidrométrica con que se cuenta en la cuenca, teniendo más estaciones en el cauce del Río Grande, ya que por un lado cruza la ciudad de Morelia y además es la principal fuente de agua para los módulos de riego existentes. Además, se cuenta con estaciones hidrométricas para el Río Queréndaro y la presa de Malpais.

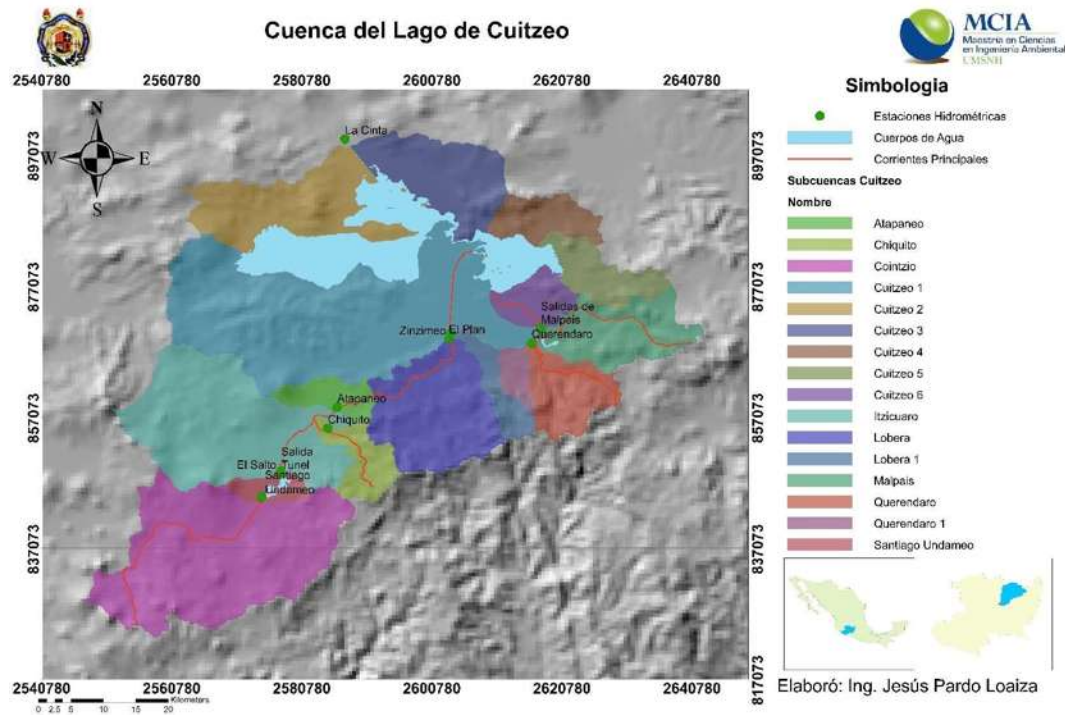


Figura 11 Estaciones hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo

La información histórica en estas estaciones es importante ya que son indispensables para llevar a cabo la calibración del modelo de escorrentía que será utilizado en el modelo Simges.

Una vez que se tienen definidas las subcuencas con las que se va a trabajar, se determinan las áreas por medio de herramientas de SIG y junto con la información de precipitación y evapotranspiración se procede a utilizar el modelo de Témez para la determinación de las aportaciones presentes y futuras.

Para realizar la modelación de precipitación escorrentía se hizo uso del programa EvalHid (Paredes *et al.* 2012), el cual es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (Témez, HBV, Sacramento) en cuencas complejas y con el objetivo de evaluar la cantidad de recurso hídrico que producen las mismas. Este programa está integrado dentro del Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL para el desarrollo de modelos relativos a la planificación y gestión de recursos hídricos.



Las características principales del programa son las siguientes:

- Disponibilidad de diferentes modelos de precipitación aplicables según diferentes factores.
- Permite el desarrollo de modelos para grandes cuencas y sistemas complejos.
- Escala temporal configurable y definida por el usuario.
- Posibilidad de modelar, para las subcuencas seleccionadas, exclusivamente la parte superficial estimando la infiltración como una salida del programa.
- Acople con el modelo de simulación de la gestión SIMGES y uso del mismo para la modelación de la parte subterránea.

Los modelos de precipitación disponibles, inicialmente, son Témez, HBV, y Sacramento. Los tres presentan diferentes niveles de complejidad en la modelación hidrológica y han sido ampliamente aplicados. El modelo de Témez es el que se utiliza para este caso ya que es un modelo de pocos parámetros con una larga trayectoria de aplicación para la evaluación de recursos hídricos. Existe suficiente experiencia en su aplicación como para que tenga interés su consideración. Su bajo número de parámetros lo hace especialmente adecuado en cuencas con un número reducido de datos.

Para llevar a cabo la simulación, puntos de desagüe superficial son utilizados para obtener la escurrimiento en un punto determinado como suma de la escurrimiento total de varias cuencas o subcuencas. En el modelo se pueden definir diferentes puntos de desagüe de escurrimiento. En la definición de los datos de las subcuencas, se puede definir un punto de desagüe. Esta elección es opcional por lo que una subcuenca no tiene por qué tener un punto de desagüe. Diferentes subcuencas pueden compartir un mismo punto de desagüe. Así el programa, como un resultado adicional, nos proporciona la escurrimiento que se produce en cada punto de desagüe fruto de la suma de escurrimientos de diversas subcuencas.

El programa permite que en una subcuenca se modele solo la parte superficial dejando la subterránea para que se considere con las diferentes herramientas de modelación disponibles en el programa SIMGES o cualquier otro programa que incorpore la modelación de acuíferos. En primer lugar, se definen un conjunto de puntos de desagüe subterráneos. Seguidamente, cuando en una subcuenca se indica que tiene un punto de desagüe subterráneo, se calcula la producción de escurrimiento superficial, el balance de humedad en el suelo y la infiltración. Esta última variable es



un resultado que se da de forma adicional y de forma acumulada para cada punto de desagüe subterráneo.



Figura 12 Vista del programa EvalHid

Para el análisis de la cuenca del Lago de Cuitzeo, se definieron seis puntos de desagüe superficiales, los cuales concuerdan con estaciones hidrométricas existentes. De esta manera se podrá llevar a cabo la comparativa de los resultados simulados con los observados en dichas estaciones.

Tabla 10 Estaciones hidrométricas en la Cuenca del Lago de Cuitzeo

Estación	Nombre	x	y
12221	Atapaneo	-101.1763889	19.725
12224	Chiquito	-101.1902778	19.69583333
12314	Queréndaro	-100.8894444	19.81166667
12323	Salidas de Malpais	-100.8755556	19.83194444
12347	Santiago Undameo	-101.2880556	19.60138889
12365	El Salto	-101.2597222	19.6375
12588	El Plan	-101.0111111	19.81944444



El periodo de simulación para calibrar la información fue de 1975 a 1985, ya que en este periodo se cuenta con información en todas y cada una de las estaciones de aforo. Para llevar a cabo esta calibración se utilizó la información histórica de las estaciones de Santiago Undameo y de la estación Queréndaro, ya que en estas estaciones se cuenta con un caudal a régimen natural. Una vez definido el periodo de simulación se procede a llevar a cabo los cálculos de los parámetros adecuados con los siguientes resultados.

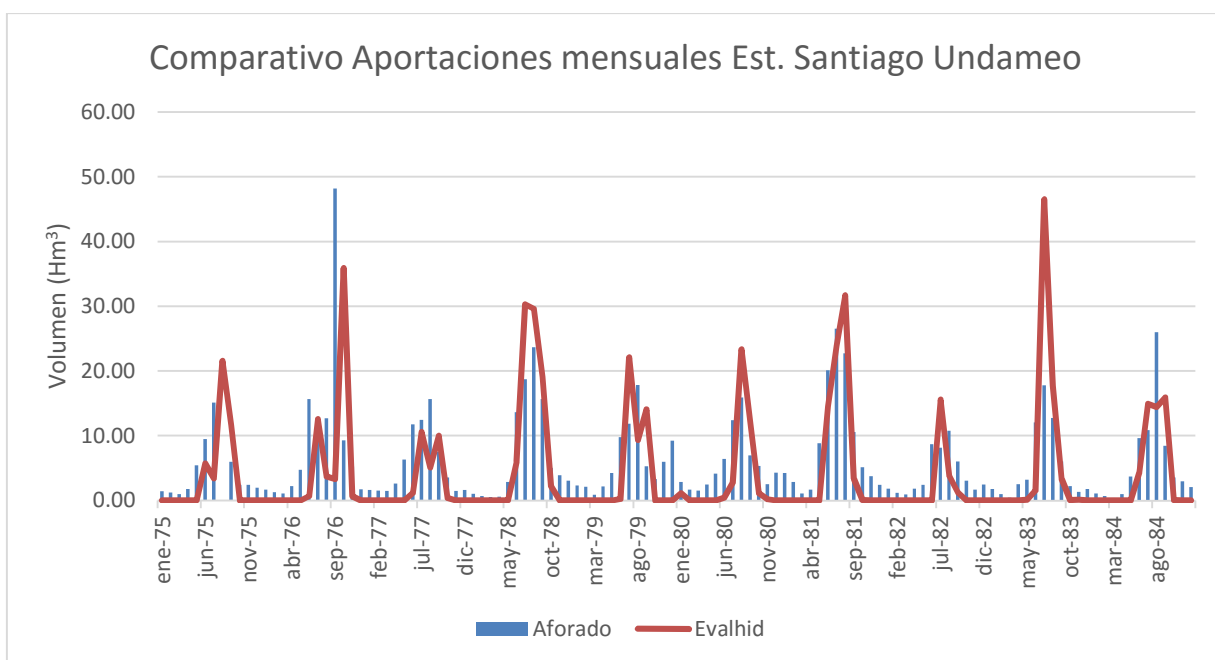


Figura 13 Comparativa de aportaciones mensuales simuladas y reales de la estación Santiago Undameo

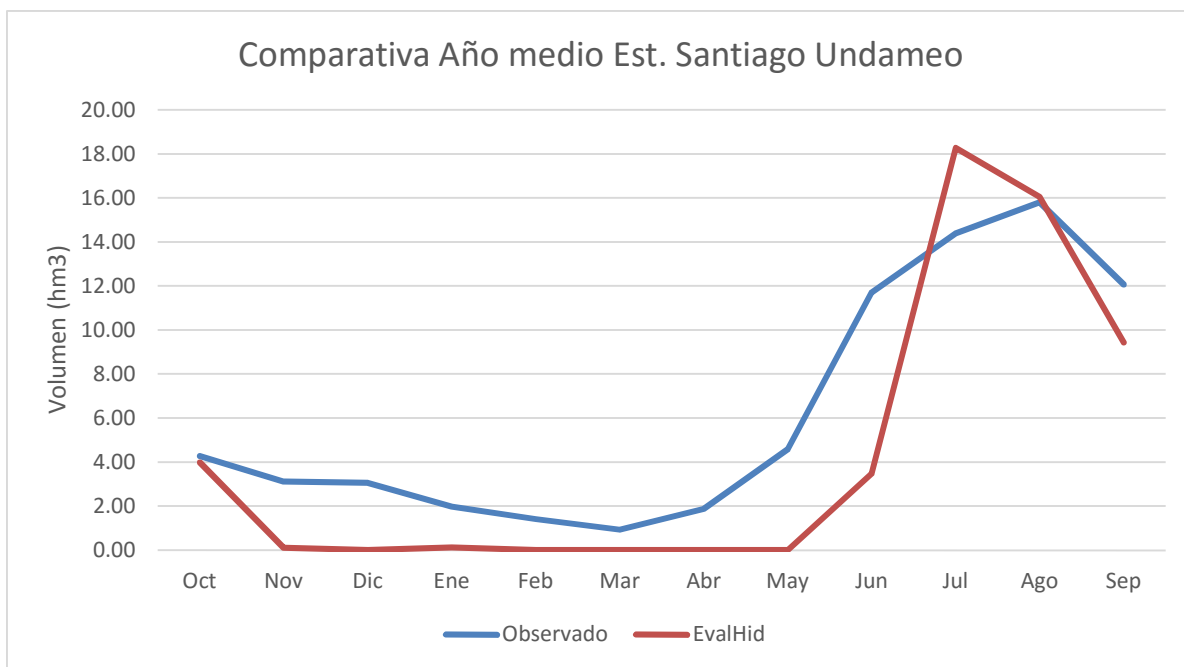


Figura 14 Comparativa de año medio simulado y real de la Est. Santiago Undameo

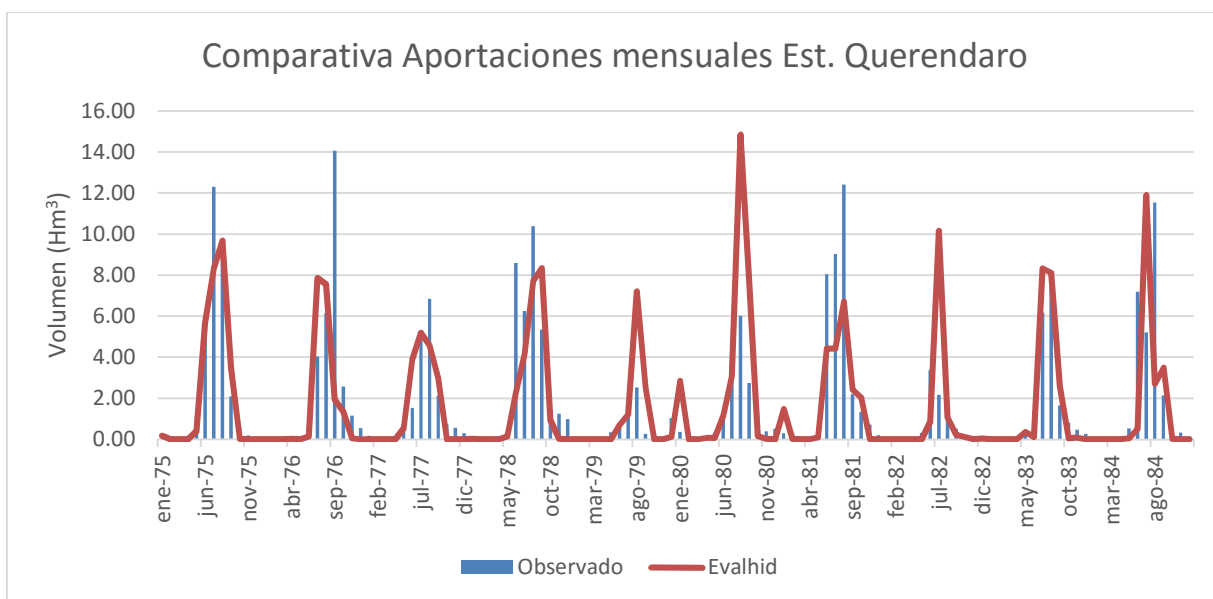


Figura 15 Comparativa de aportaciones mensuales simuladas y reales de la estación Queréndaro

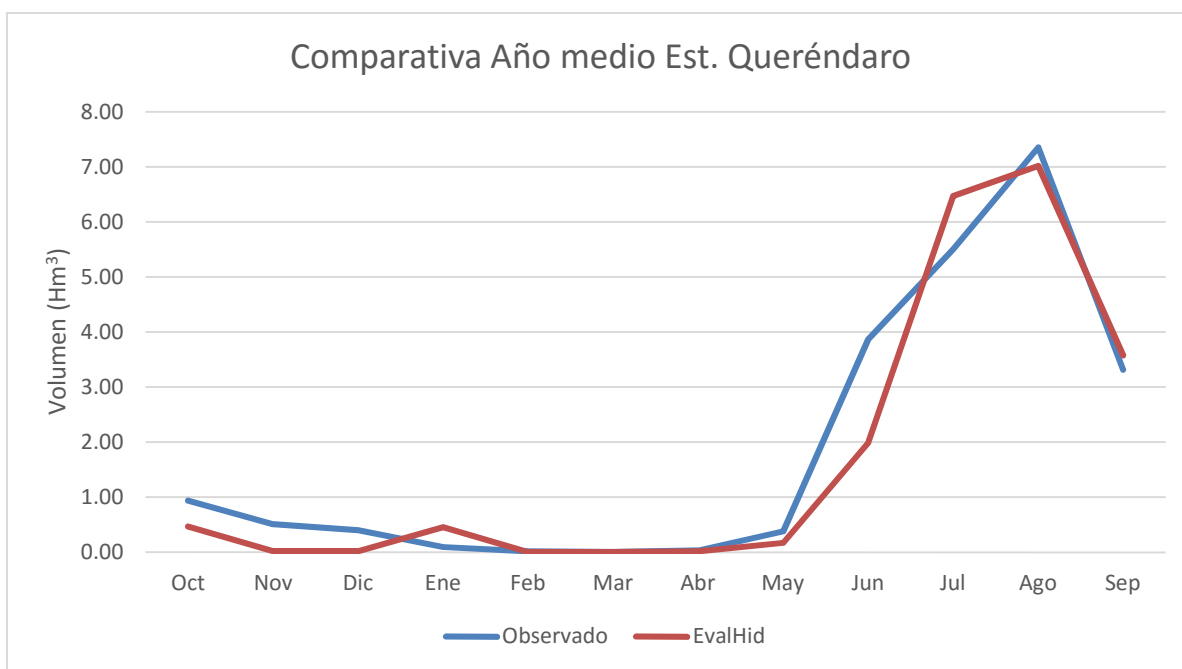


Figura 16 Comparativa de año medio simulado y real de la Est. Queréndaro

Como se puede observar en las figuras 10 y 12, el propósito de la calibración es de es igualar el año medio simulado con el año medio real de manera que los resultados arrojados por la simulación en EvalHid sean apegados a la realidad. Los parámetros utilizados para la obtención de los escurrimientos en la Cuenca fueron los siguientes:

Tabla 11 Parámetros utilizados en el cálculo de las aportaciones

Estación de aforo		
Parámetros	Santiago	Queréndaro
Témez	Undameo	
Hmax (mm)	119.99	20.07
excedente	44.94%	10%
lmax (mm)	206.22	149.97
Alfa	0.42	0.77



A continuación, se presentan las aportaciones obtenidas de algunos de los puntos de desagüe superficiales definidos para el estudio:

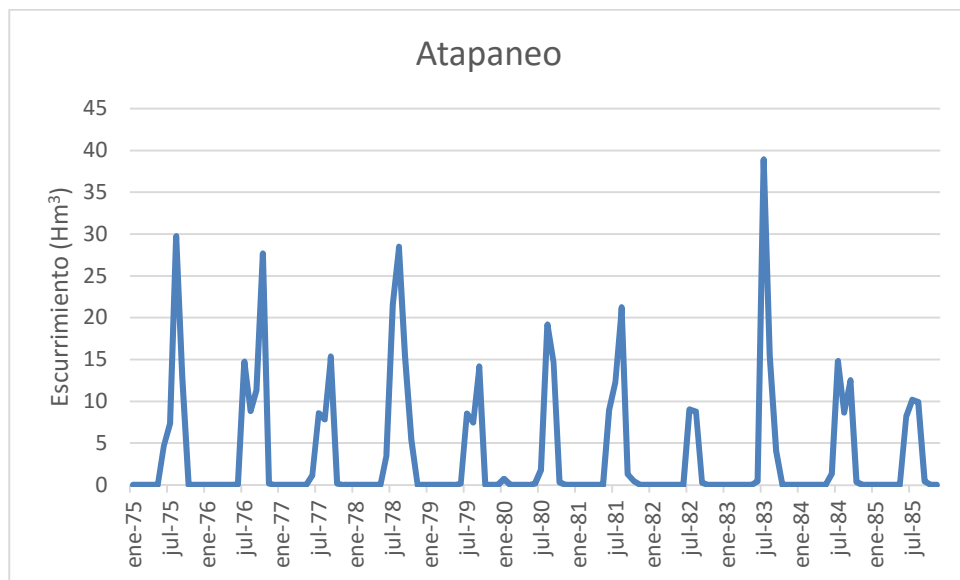


Figura 17 Escurrimiento superficial de la Aportación Atapaneo

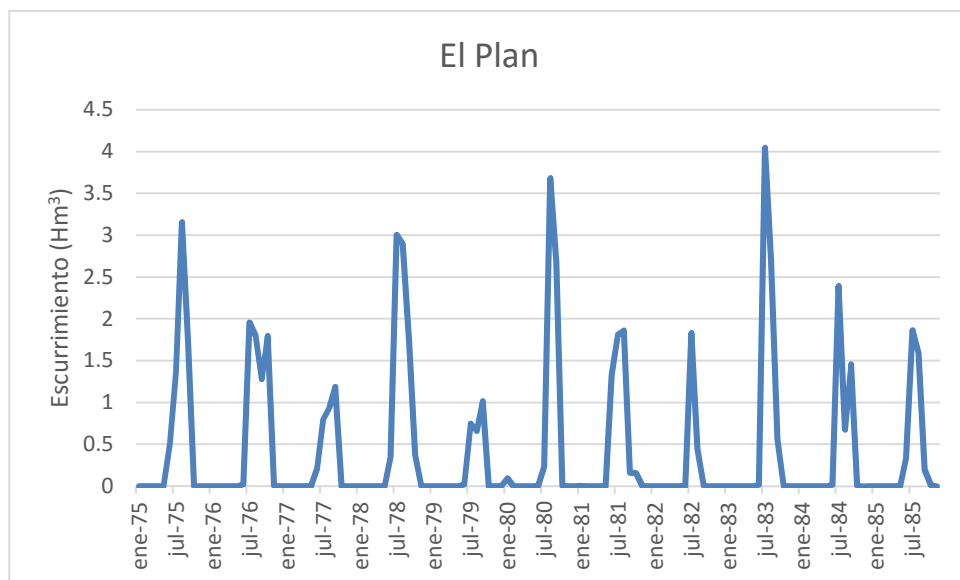


Figura 18 Escurrimiento superficial de la Aportación El Plan

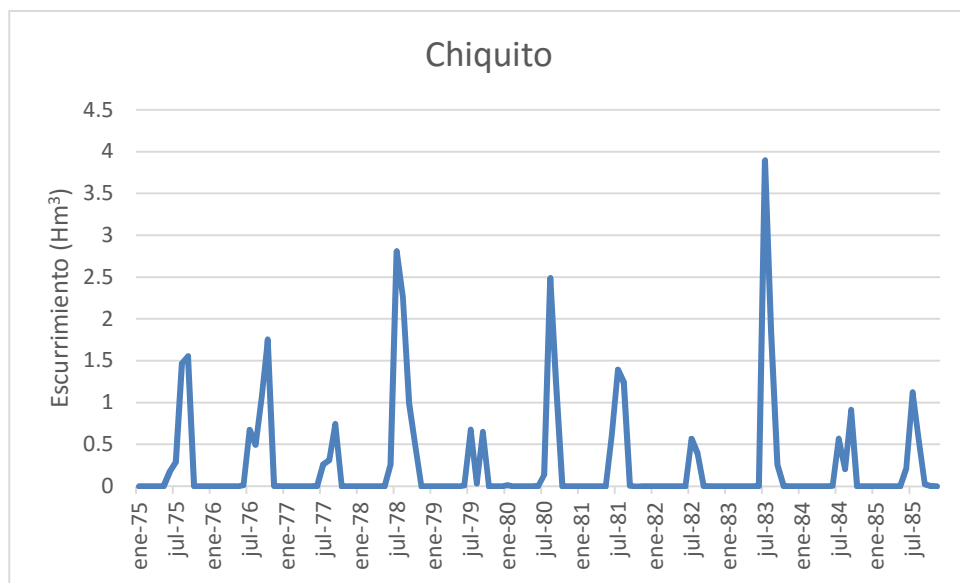


Figura 19 Escurrimiento superficial de la Aportación Chiquito

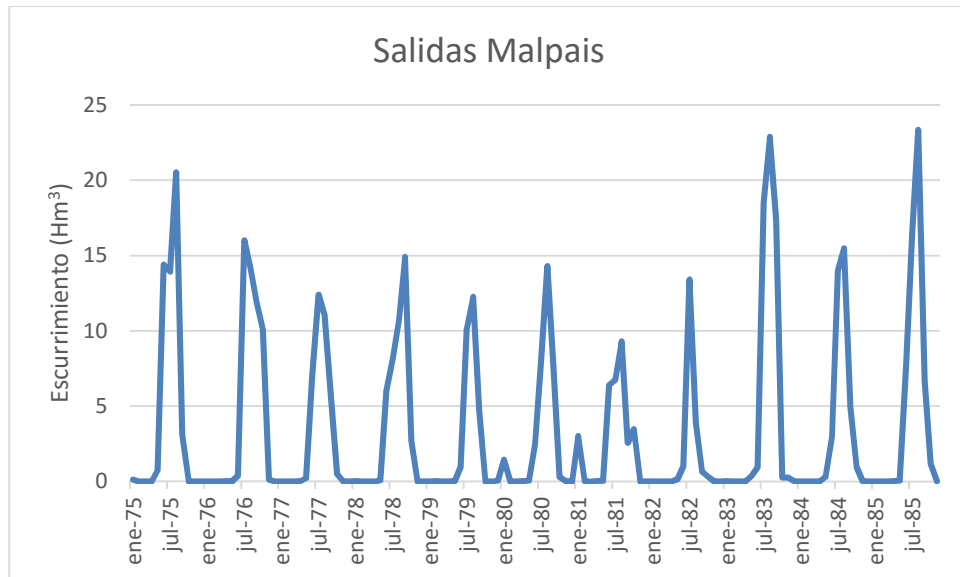


Figura 20 Escurrimiento superficial de la Aportación Salidas Malpais



4.5 Determinación de las aportaciones futuras en la cuenca del lago de Cuitzeo.

Como ya se ha comentado, las series de datos a utilizar en el estudio son las proporcionadas por el INECC, estas series de datos son proyecciones climáticas bajo los diferentes escenarios de radiación (RCP4.5, RCP6.0 y RCP8.5). Para cada escenario existirán dos series de datos, futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099).

Una vez que se ha realizado la calibración del modelo de Témez en el programa Evalhid, se introducen las series de datos modificadas para obtener las aportaciones para cada escenario presentado. Estas series se pueden comparar mediante el año medio con los datos históricos para poder observar la alteración que sufrirían las aportaciones en la cuenca.

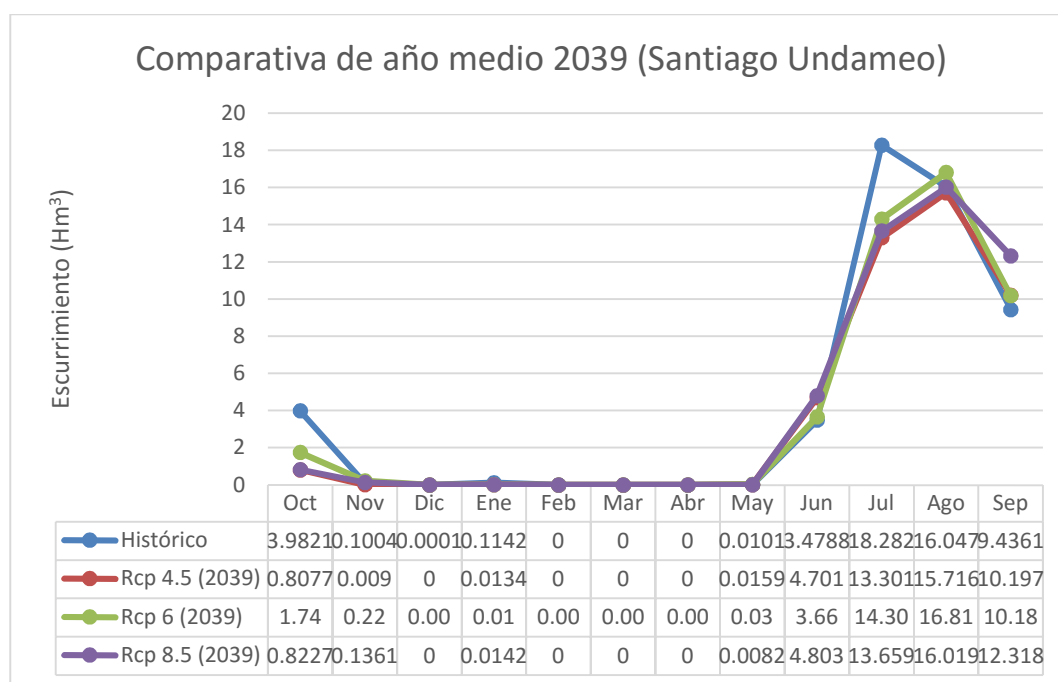


Figura 21 Comparación del año medio de la aportación de Santiago Undameo (futuro cercano)



En la figura 21, se puede observar que existirá una reducción en las aportaciones, aunque no de una manera significativa. La diferencia entre las diferentes proyecciones es mínima debido a que se mantiene la misma tendencia.

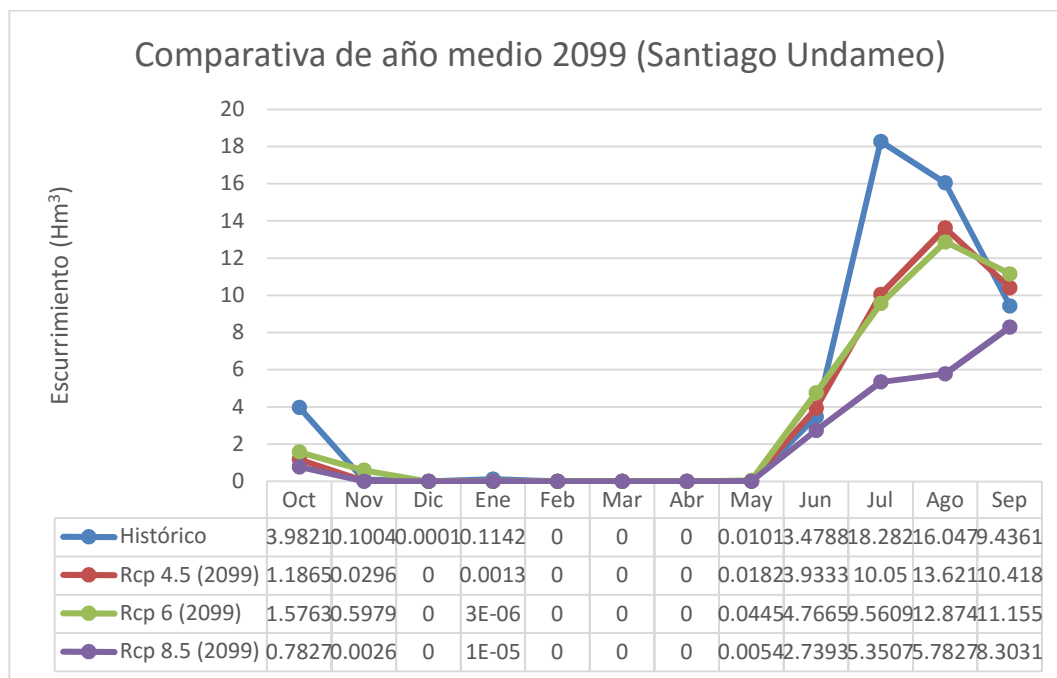


Figura 22 Comparación del año medio de la aportación de Santiago Undameo (futuro lejano)

En el caso de la figura 22, la proyección del escenario RCP 8.5 sufrirá un decremento con relación a la información histórica en los meses húmedos (julio-octubre) y mantiene la misma tendencia en los demás meses. Por el contrario, para los otros escenarios la tendencia se mantiene a la baja como en el caso del futuro cercano, siendo muy similares entre ellas.

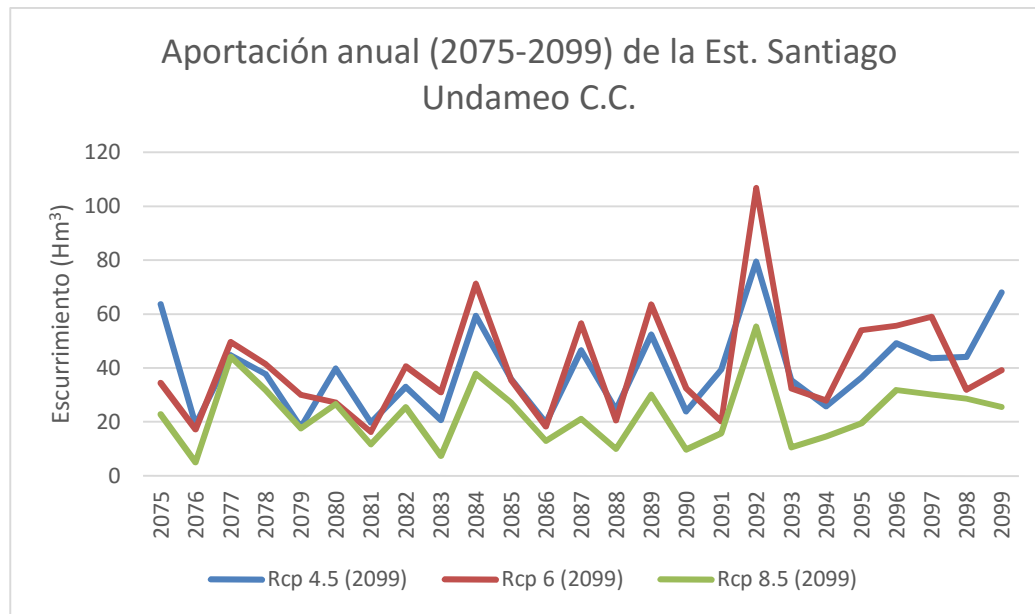


Figura 23 Aportación anual (2075-2099) de la Est. Santiago Undameo C.C.

Observando el comportamiento de los escurrimientos de la estación hidrométrica de Santiago Undameo en el futuro lejano (2075-2099), se observa claramente que la condición más desfavorable se presentará si se dan las condiciones que favorezcan al Rcp 8.5.

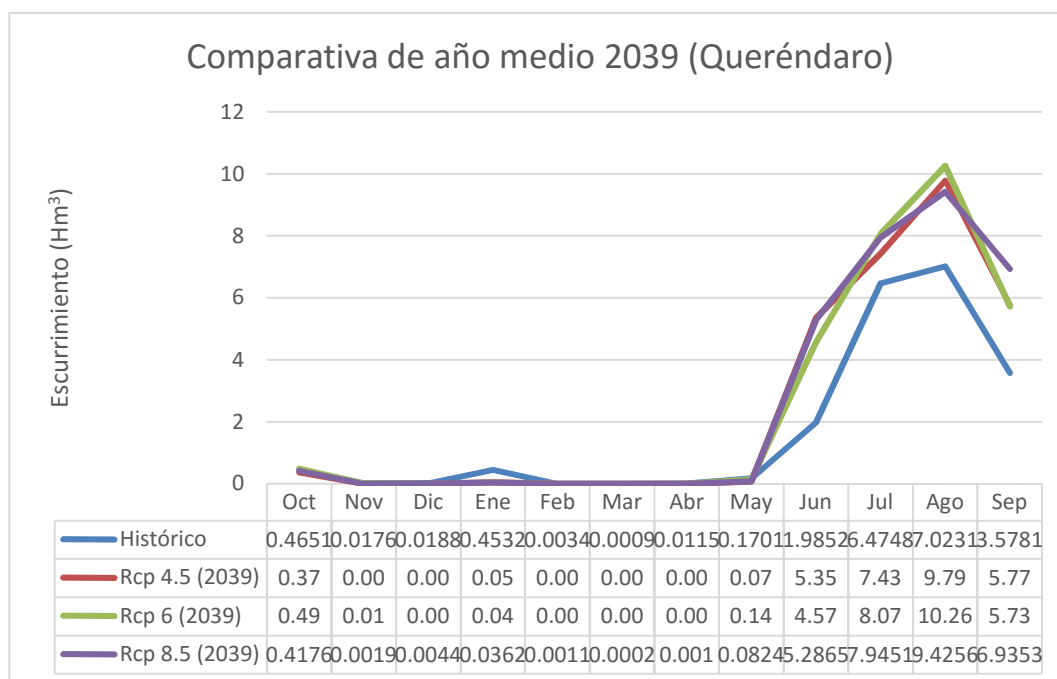


Figura 24 Comparación del año medio de la aportación de Queréndaro (futuro cercano)

En el caso de la aportación de la estación Queréndaro a futuro cercano, se observa en la figura 24 que la variación de los escurrimientos es contraria a la que se presenta aguas arriba de la cuenca, ya que se presenta un escurrimiento mayor al que se observa en los meses húmedos del periodo histórico.

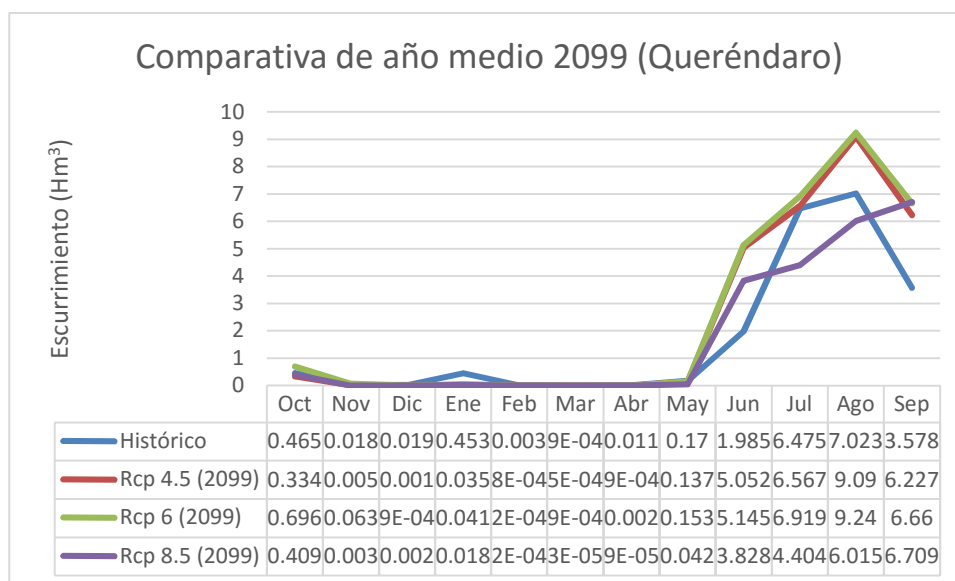


Figura 25 Comparación del año medio de la aportación de Queréndaro (futuro lejano)

Para el futuro lejano, en la figura 25 se observa que se mantiene la misma tendencia que en el futuro cercano, a excepción del escurrimiento con el escenario Rcp 8.5, donde si se da una disminución en el escurrimiento, incluso por debajo del escurrimiento histórico en los meses húmedos.

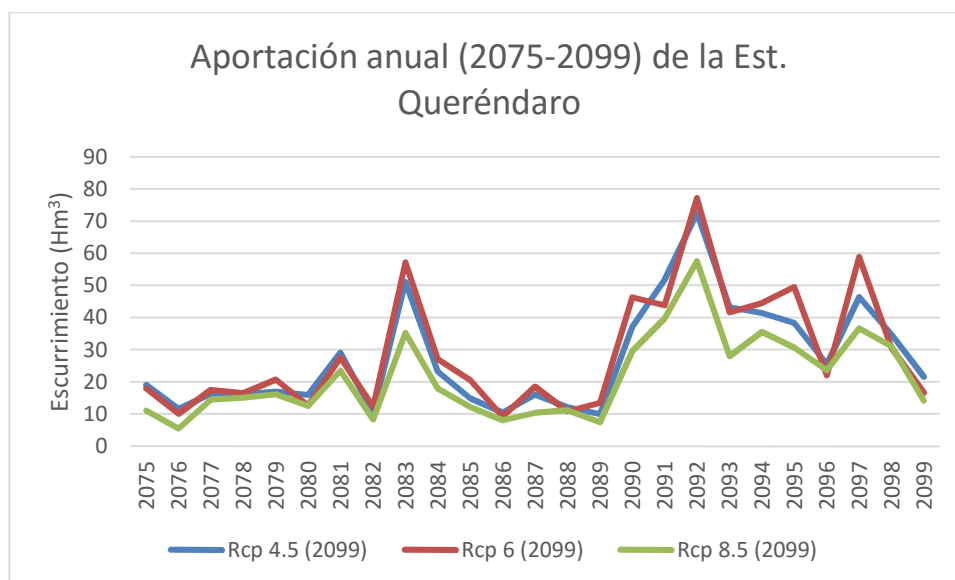


Figura 26 Aportación anual (2075-2099) de la Est. Queréndaro



Al observar el comportamiento anual de los escurrimientos de la estación hidrométrica de Queréndaro en el futuro lejano (2075-2099), se observa que no hay gran diferencia entre los diferentes escenarios, aunque se alcanza a apreciar que la condición más desfavorable se presenta en el escenario Rcp 8.5.

4.6 Modelación del Acuífero Morelia - Queréndaro.

El acuífero Morelia-Queréndaro se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán se encuentra localizado entre los paralelos 19°35' a 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°45' a 101°25' de longitud oeste. Geográficamente colinda con el estado de Guanajuato al norte, con el poblado de Quiroga al occidente, Zinapécuaro al oriente y al sur con las Sierras Altas y Mil Cumbres; el acuífero abarca parcialmente o totalmente 21 municipios del estado, cuenta con una superficie aproximada de 3,507 km².

El acuífero se considera de manera general de tipo libre; de acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, cuenta con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo (Conagua 2009).

Para la discretización del acuífero se tomaron las siguientes consideraciones:

- El acuífero se dividió en cuadrados con una superficie de 3000 metros de largo por 3000 metros ancho, considerando como zona de flujo horizontal 235 celdas (celdas activas en Aquival) con un área total de 2115 km² (Figura 27).
- La dirección del flujo subterráneo se realiza predominantemente en dirección del lago de Cuitzeo (Figura 28).
- La totalidad del lago de Cuitzeo se considera de nivel constante teniendo importantes entradas de gasto de la cuenca del río Grande de Morelia, la cuenca del río Queréndaro y Zinapécuaro y zonas aledañas al lago.
- Se considera un nivel de referencia 0 en la celda 7-8 localizada en el lago de Cuitzeo con una elevación constante de 1795.4 msnm.

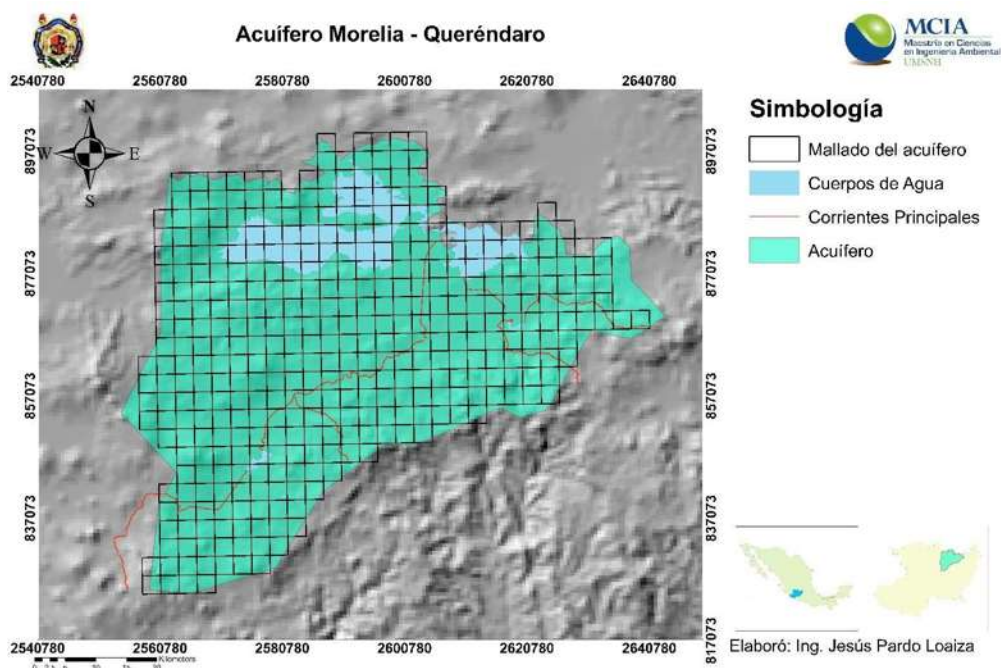


Figura 27 Discretización del acuífero

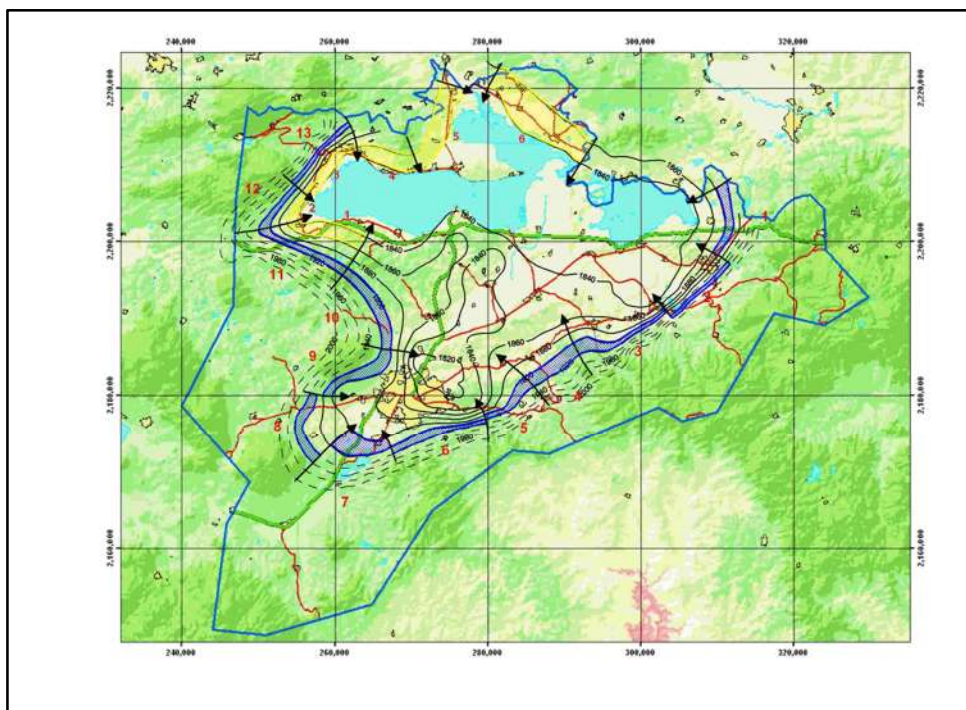


Figura 28 Red de flujo subterráneo (Conagua 2007)



Para la definición de los parámetros hidrodinámicos se utilizaron los valores obtenidos de las pruebas bombeo realizadas en el estudio “Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán” (Conagua 2007).

Además, el modelo requiere de acciones elementales, estas acciones son todos aquellos volúmenes que entran y salen del acuífero a lo largo del tiempo en una zona específica, es decir todos los bombeos, las salidas por evapotranspiración, las salidas por manantiales, la recarga vertical por lluvia, así como las transferencias laterales de entrada y de salida.

- Recarga vertical. La recarga se consideró tanto espacial como temporalmente para cada una de las celdas discretizadas del acuífero.
- Recarga inducida. Esta recarga está constituida por recarga por retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 y por retornos por fugas de la red de abastecimiento de agua potable. Se consideró que esta recarga es uniforme a lo largo de todo el distrito de riego.
- Recarga horizontal. Recibe recarga horizontal a través de 13 canales de las zonas altas de del acuífero y posiblemente de los acuíferos colindantes por lo que se considera que existe recarga horizontal uniforme en las celdas perimetrales del acuífero.
- Demanda agrícola. Para la demanda agrícola se consideraron los bombeos realizados por los módulos 3, 4 y 5 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. De acuerdo a la información proporcionada por el distrito (ubicación de pozos y volumen total de bombeo) se asignó un peso específico para cada celda involucrada.
- Demanda urbana. Las demandas urbanas se dividieron en: demandas urbanas de la zona de Morelia y demandas urbanas de otras poblaciones del acuífero.

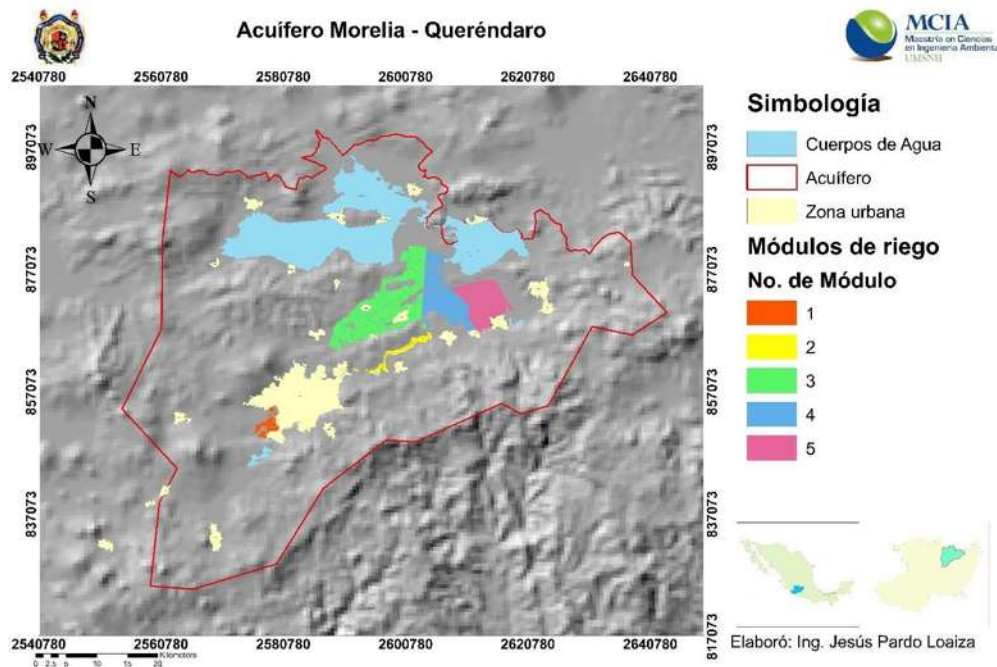


Figura 29 Ubicación de las áreas urbanas y las áreas de riego en la zona de estudio

Con base en la información disponible se procedió a asignarles a cada una de las celdas de la malla las propiedades que describirán el estado inicial del acuífero para la simulación (posteriormente para la calibración estos valores serán ajustados en función de la evolución de los niveles piezométricos).

- Transmisividad

Para la asignación de la transmisividad se utilizaron los valores obtenidos de las pruebas de bombeo realizadas en el estudio “Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío-Contepec-Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán”. En él se realizaron e interpretaron 7 pruebas de bombeo en las que observa que los valores de T (prueba de abatimiento) varían de 1.900×10^{-3} a 0.053×10^{-3} m²/s y de T (prueba de recuperación) varían de 3.42×10^{-3} a 0.80×10^{-3} m²/s, en tanto que para K se obtuvieron valores que oscilan entre 0.10 y 3.99 m/d en las pruebas de abatimiento (figura 26).

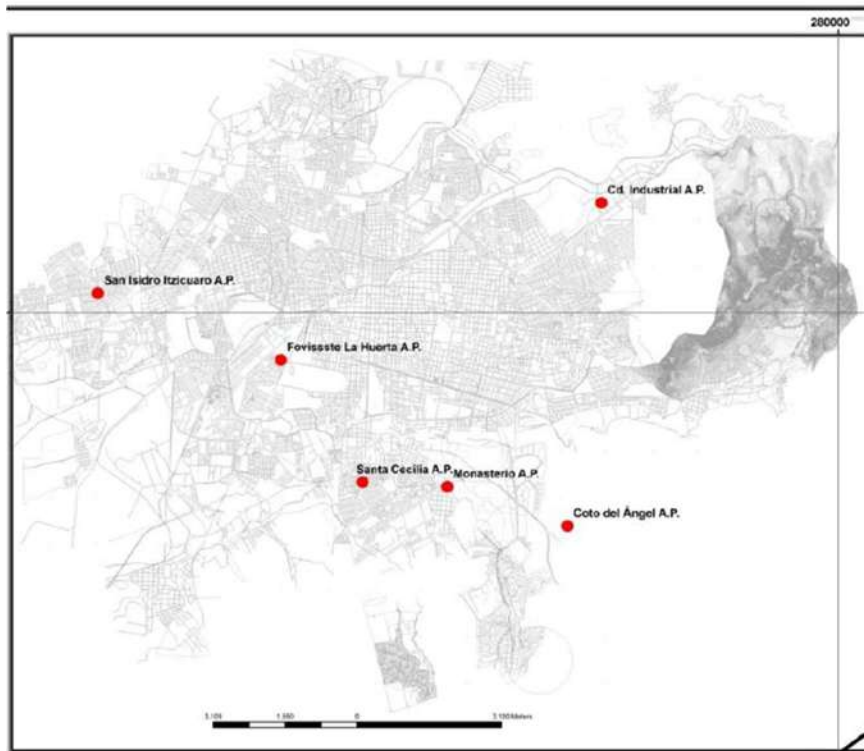


Figura 30 Ubicación de los pozos con pruebas de abatimiento

- Coeficiente de almacenamiento

El coeficiente de almacenamiento inicial se fijó en valor uniforme de 0.13 con base en estudios de modelación anteriores, sin embargo, para llevar a cabo la calibración estos valores fueron modificados en diferentes ocasiones.

- Niveles piezométricos iniciales

Las cargas iniciales se estimaron a partir de la configuración de niveles de agua correspondientes al “Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativa de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán” (1977).



- Nivel externo

El nivel externo se determinó a partir del modelo digital de elevaciones (MDE) correspondiente a la zona estudio, para lo cual fue necesario el uso del programa de cómputo Aquival con el que fue georeferenciada la malla que define el modelo y superpuesta con el MDE, obteniendo después el nivel medio de cada celda.

Para las acciones elementales consideraron todos aquellos volúmenes de agua que entran y salen del acuífero a lo largo del tiempo en una zona específica, es decir todos los bombeos, las salidas por evapotranspiración, las salidas por manantiales, la recarga vertical por lluvia, así como las transferencias laterales de entrada y de salida.

- Recarga vertical.

La recarga se consideró tanto espacial como temporalmente para cada una de las celdas discretizadas del acuífero. Esta serie de valores fueron obtenidas cuando se trabajó con la información de lluvia en el programa Evalhid.

- Distribución espacial

Para la distribución espacial de la recarga vertical en el acuífero es necesario conocer el coeficiente de reparto que se le asignará a cada una de las celdas del modelo.

Utilizando los mapas creados en SIG de la determinación de recarga vertical media en el acuífero, en el cual como se recordará se calcularon los mapas que describen de forma espacial la recarga de cada mes.

- Distribución temporal

Para la determinación de la distribución temporal de la recarga se partió de la afirmación de que la recarga vertical media mensual es directamente proporcional a la precipitación que se tiene en el mes. Para esto fue necesario contar con las series de precipitaciones y las precipitaciones medias mensuales utilizadas para el cálculo de la recarga y que fueron determinadas con anterioridad. Utilizando la relación de la precipitación del mes de cada año entre la precipitación media mensual se obtuvo un coeficiente que multiplicado por la recarga media mensual nos proporciona la recarga que se tendrá en el mes de ese año.



- Recarga inducida.

Esta recarga está constituida por recarga por retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 y por retornos por fugas de la red de abastecimiento de agua potable. De acuerdo al análisis ya mencionado anteriormente se tiene un volumen de 38.5 Hm³. Se consideró que esta recarga es uniforme a lo largo de todo el distrito de riego.

- Recarga horizontal.

Recibe recarga horizontal a través de 13 canales de las zonas altas de del acuífero y posiblemente de los acuíferos colindantes por lo que se considera que existe recarga horizontal uniforme en las celdas perimetrales del acuífero con un volumen de 87 Hm³/año.

- Demanda agrícola.

Para la demanda agrícola se consideraron los bombeos realizados por los módulos 3, 4 y 5 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. De acuerdo a la información proporcionada por el distrito de riego (ubicación de pozos y volumen total de bombeo) se determinaron los volúmenes medios demandados en los módulos. Además, se tomó en consideración los bombeos fuera del módulo del riego, ya que, aunque no forman parte primordial del estudio. Si se deben de tomar en cuenta ya que forman parte del acuífero.

Debido a que no se contó con la información necesaria para la determinación del volumen que se extrae de cada uno de los pozos de cada módulo la asignación del peso que se tendrá en cada una de las celdas de la malla involucradas se hizo en función del área de influencia de los pozos, es decir, en las celdas con más densidad de pozos el coeficiente de reparto es mayor.

- Demanda urbana.

Para la demanda urbana se consideraron los volúmenes extraídos por los pozos profundos que se encuentran en las zonas urbanas de todo el territorio del acuífero. Se llevó a cabo la clasificación de las demandas urbanas por zonas de acuerdo a los municipios que forman parte de la cuenca del Lago de Cuitzeo. En la siguiente figura se presenta la distribución de las zonas urbanas:

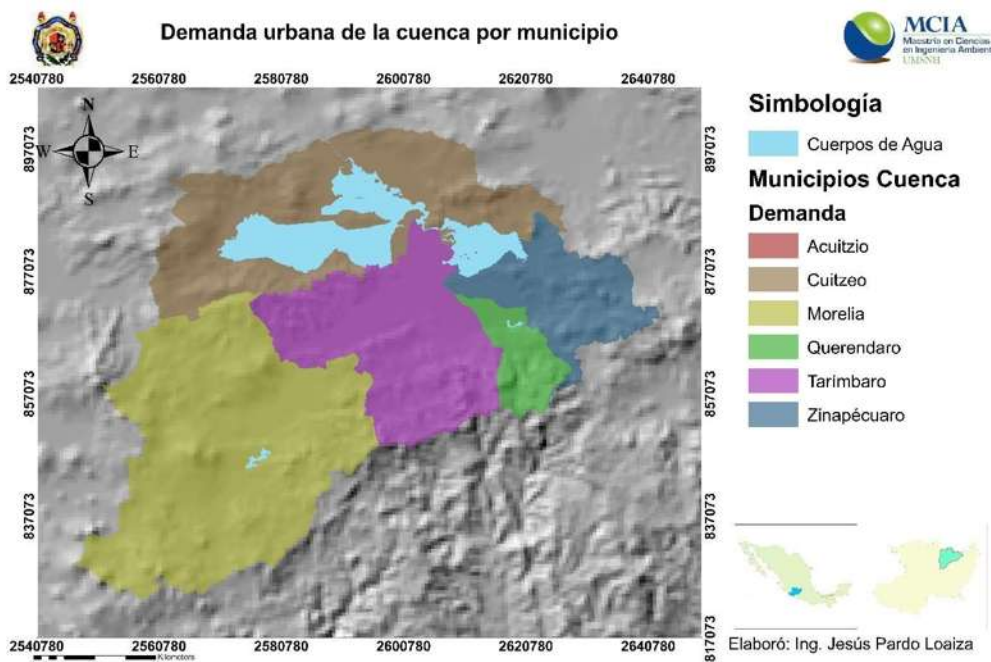


Figura 31 Distribución de la demanda urbana

Los parámetros de control nos indican la evolución del acuífero en función del comportamiento del modelo generado a través de Aquival, indicando el estado en cualquier parte de la simulación del acuífero. Por ejemplo, un parámetro de control pueden ser las salidas totales del acuífero, los niveles piezométricos en una celda o conjunto de celdas, el volumen total almacenado, entre otros.

De acuerdo la información obtenida de estudios se dispone de la información necesaria para monitorear el comportamiento de los niveles piezométricos a lo largo de varios años. Para la calibración del modelo se seleccionaron un grupo de celdas que permitirán observar el comportamiento del modelo a través de los niveles estáticos de los diferentes pozos monitoreados dentro de cada celda, las cuales están ubicadas en zonas de mayor importancia como lo es la ciudad de Morelia y en los módulos 3 y 4 del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro. A continuación, se presentan los principales pozos utilizados.

- Pozo Villa Universidad, municipio de Morelia
- Pozo López Mateos, municipio de Morelia
- Pozo Tejaro (Los Izquierdo, El Borrego), municipio de Tarímbaro



- Pozo El Zapote de Arredondo, municipio de Álvaro Obregón
- Pozo San José Cuaro, municipio de Huandacareo

El siguiente paso es el cálculo de autovalores y autovectores. Este es un proceso independiente del modelo de discretización del acuífero. Se determina a partir de las matrices T (Transmisividad) y SF (Coeficiente de almacenamiento)

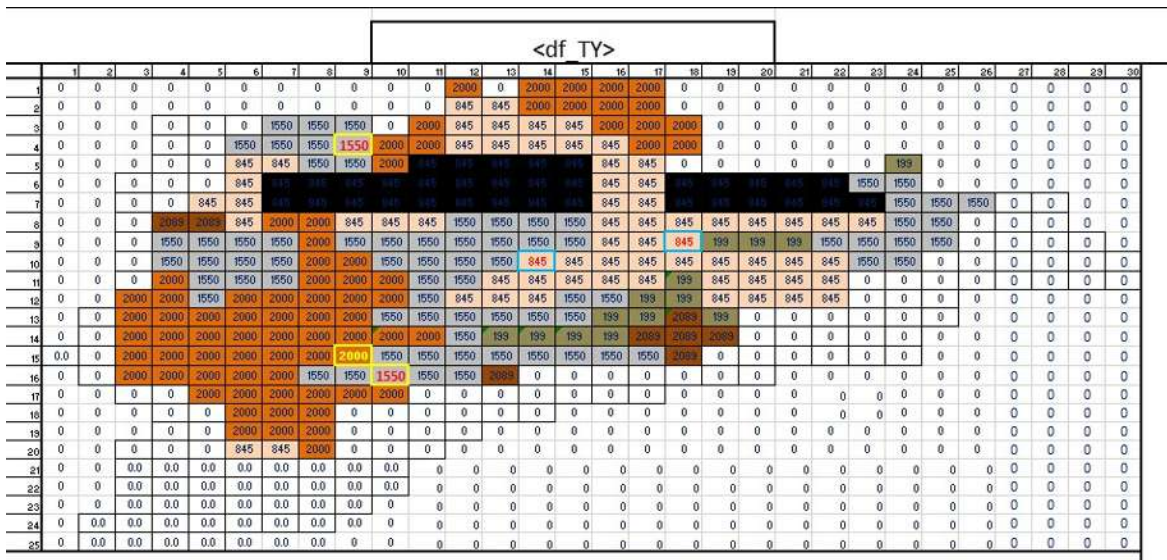


Figura 32 Transmisividades del acuífero Morelia-Querendaro

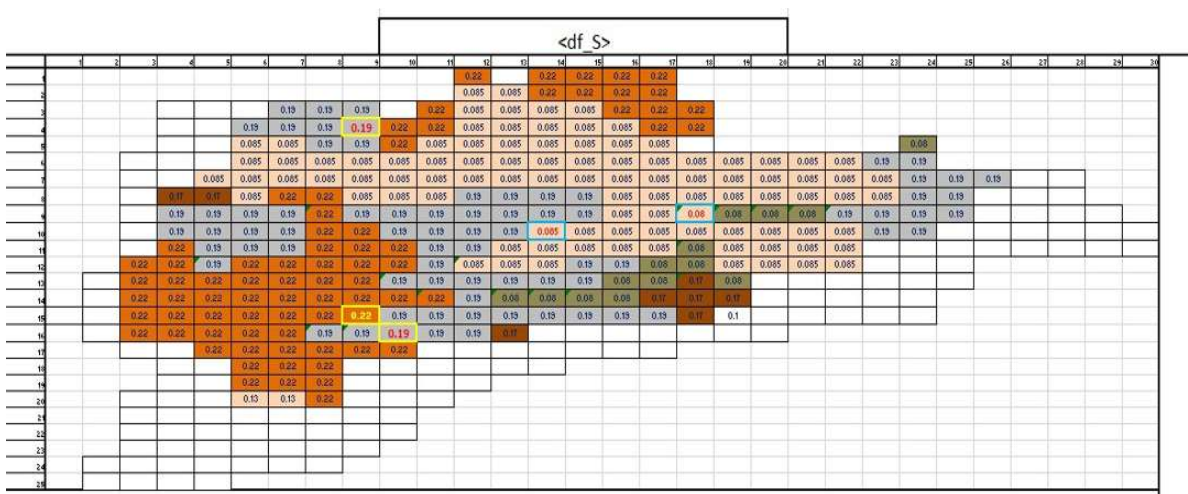


Figura 33 Coeficientes de almacenamiento del acuífero Morelia-Querendaro



Una vez definido el escenario y realizado el cálculo de los autovalores se puede empezar a trabajar con las simulaciones. Todas las simulaciones que se van a crear estarán relacionadas con un escenario de finido por los parámetros ingresados al modelo anteriormente.

Para iniciar la simulación es necesario definir el número de acciones elementales, el número de parámetros de control y el periodo de meses en el que simulará el modelo, que en este caso fue de 37 años.

Una vez ingresados los parámetros hidrodinámicos y de las acciones elementales del modelo, se realiza la calibración de este.

Los resultados de la calibración del modelo subterráneo en Aquival se muestran a continuación, donde se muestran los cambios en los niveles piezométricos para las celdas de calibración.

Tabla 12 Calibración de los niveles piezométricos del acuífero

No. Celda	Celda 26		No. Celda	Celda 92	
Año	2007	2010	Año	2007	2010
Histórico	1835.00	1834.00	Histórico	1835.17	1834.41
Simulado	1856.77	1897.21	Simulado	1828.61	1846.68
Diferencia	-21.77	-63.21	Diferencia	6.56	-12.27

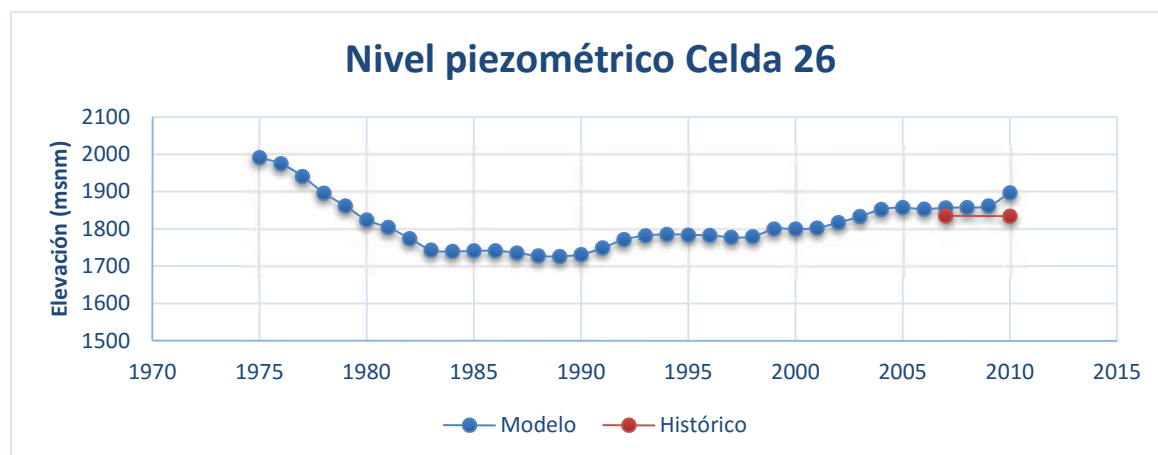


Figura 34 Nivel piezométrico de la celda 26

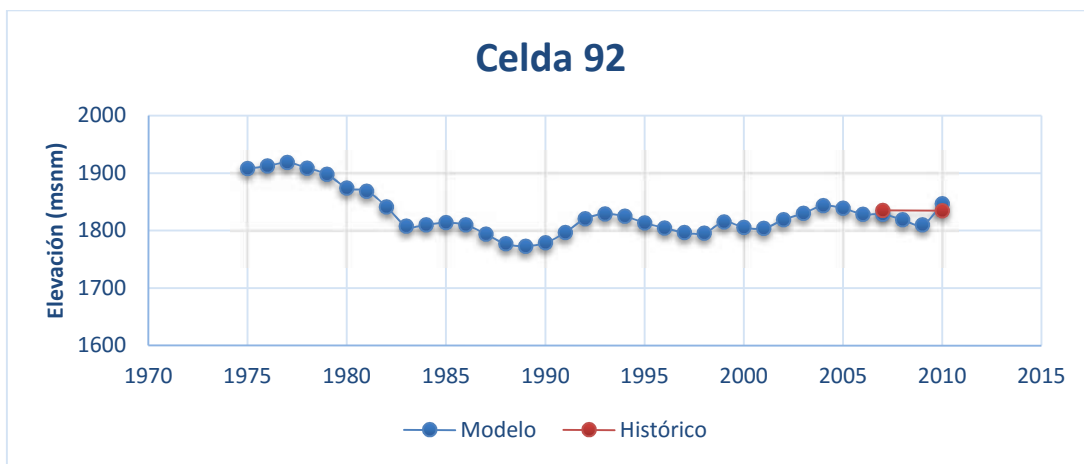


Figura 35 Nivel piezométrico de la celda 92

4.7 Cálculo de la demanda urbana y agrícola en la Cuenca del Lago de Cuitzeo

4.7.1 Demanda agrícola

Para el cálculo de los requerimientos de los cultivos se implementó la metodología desarrollada por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) mediante la publicación No 56 de la Serie Riego y Drenaje de la FAO, titulada "Evapotranspiración del cultivo - Guías para el cálculo de los requerimientos de agua del cultivo (2009)", así como el software CROPWAT 8.0 basado en la publicación anteriormente mencionada.

El cálculo de los Requerimientos de Agua del Cultivo (RAC), CROPWAT requiere de datos de evapotranspiración (ET_o), para esto es necesario ingresar datos



de temperatura, humedad, velocidad del viento y radiación solar, lo cual permite al programa CROPWAT calcular la ETo aplicando la ecuación de Penman-Monteith, y para calcular el requerimiento del cultivo es necesario contar con datos de suelo y lluvia para la zona de estudio.

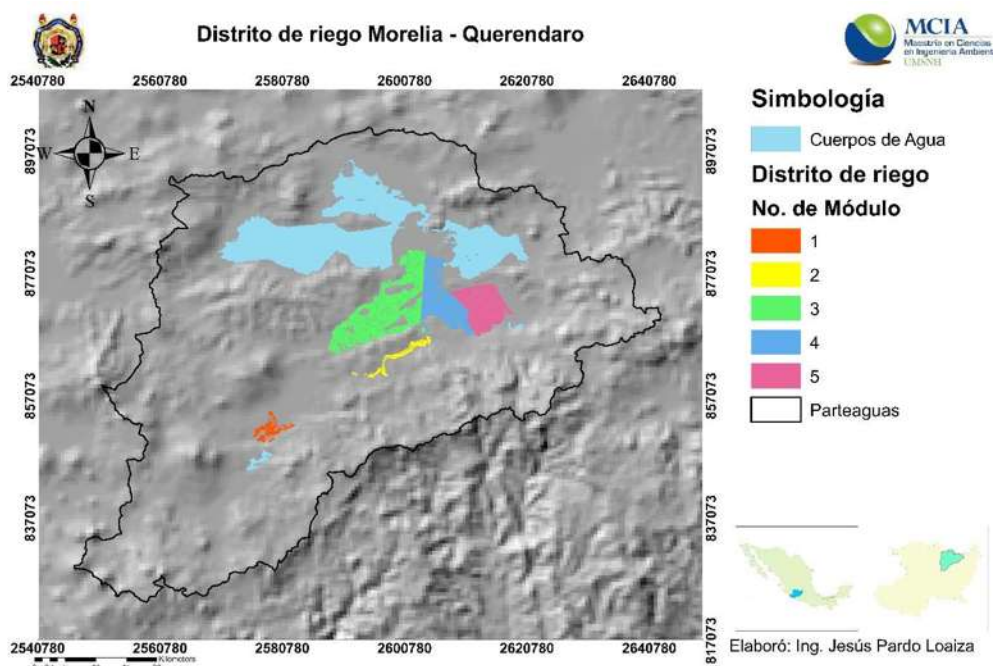


Figura 36 Distrito de riego Morelia - Queréndaro

El río grande abastece 4 Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, mientras que el Río Queréndaro abastece al Módulo 5. De los cuales el Módulo 1 y 2 son abastecidos superficialmente y los Módulos 3, 4 y 5 son abastecidos mediante uso superficial y subterráneo. Los cultivos que se siembran en el Distrito de Riego se presentan en la siguiente figura, en el Módulo 1 prevalece el cultivo del trébol, en el Módulo 2 el maíz, en el Módulo 3 alfalfa y maíz, y en el Módulo 4 y 5 prevalece el trigo y maíz.

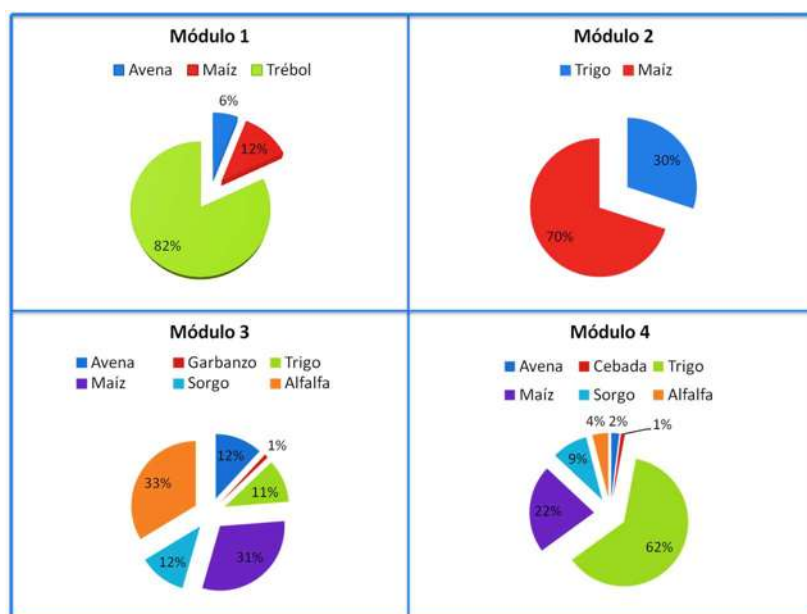


Figura 37 Relación de cultivos en algunos módulos del distrito de riego Morelia Queréndaro

La demanda promedio mensual para los cultivos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se muestra en la tabla 7, el Módulo 3 es el más importante debido a que es el que mayor demanda de agua representa, seguido del Módulo 5, 4, 1 y 2 respectivamente. Los meses de febrero a marzo son los de mayor demanda en todo el año, alcanzando un máximo en el mes de abril lo que implicara descensos importantes en el volumen de la presa Cointzio en estos meses.



Tabla 13 Relación del volumen bruto de los módulos de riego

Mes	Mod. 1	Mod. 2	Mod. 3	Mod. 4	Mod. 5
Octubre	0.288	0.000	0.515	0.000	0.000
Noviembre	0.379	0.000	1.614	0.281	0.115
Diciembre	0.622	0.000	4.714	1.718	0.295
Enero	0.669	0.128	6.523	4.025	2.127
Febrero	0.606	0.519	6.295	3.456	0.617
Marzo	0.860	0.930	12.176	5.449	6.684
Abril	1.076	1.394	15.794	7.625	4.093
Mayo	0.911	1.101	8.432	2.444	0.141
Junio	0.427	0.096	3.197	1.613	1.844
Julio	0.000	0.000	2.750	1.505	0.000
Agosto	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Septiembre	0.000	0.000	0.766	0.240	0.000

4.7.2 Demanda urbana

Se define a la población de proyecto como la cantidad de personas que se espera tener en una localidad de diseño y analizar que volumen de agua requerirán. Por lo tanto, es necesario analizar los diferentes métodos de proyección de población que pueden ser por comparación o por ajuste de curvas por mínimos cuadrados. Estos métodos se basan en una extrapolación de datos históricos de crecimiento de la población, que suponen que la población crecerá en el futuro con las mismas tendencias como en el pasado. Los métodos para obtener el incremento de la población son:

- Método de crecimiento por comparación.
- Método de mínimos cuadrados lineal.
- Método de mínimos cuadrados exponencial.
- Método de mínimos cuadrados logarítmico.
- Método de mínimos cuadrados Potencial.

Los resultados de cada uno de los métodos fueron promediados para de ahí definir una proyección por cada municipio. Se recurrió a la información de censos del Inegi para determinar la población actual de la cuenca



A continuación, se presentan proyecciones de población de los municipios principales

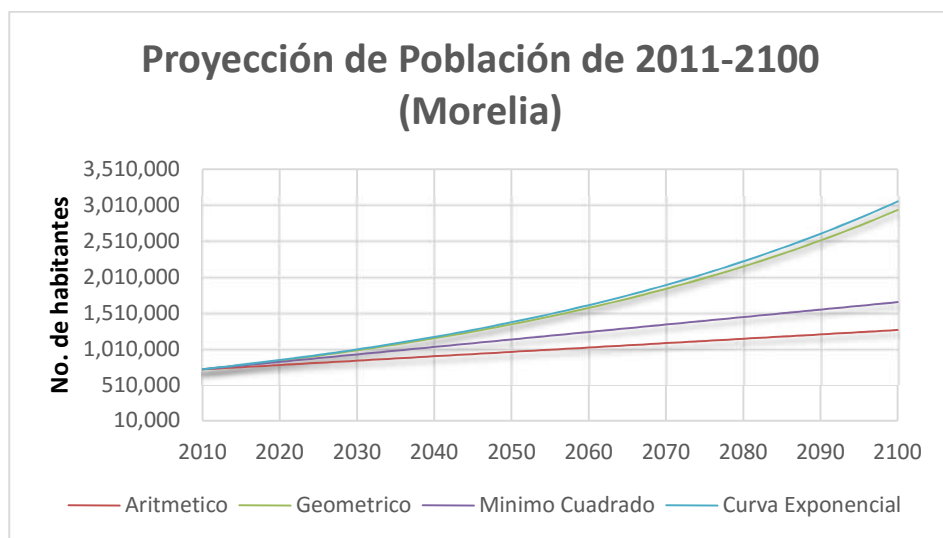


Figura 38 Proyección de población Morelia

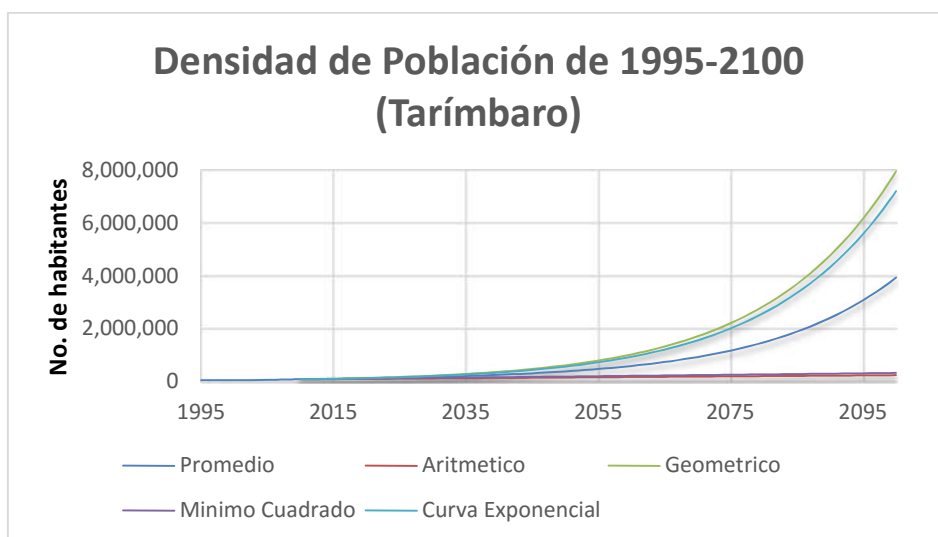


Figura 39 Proyección de población Tarímbaro

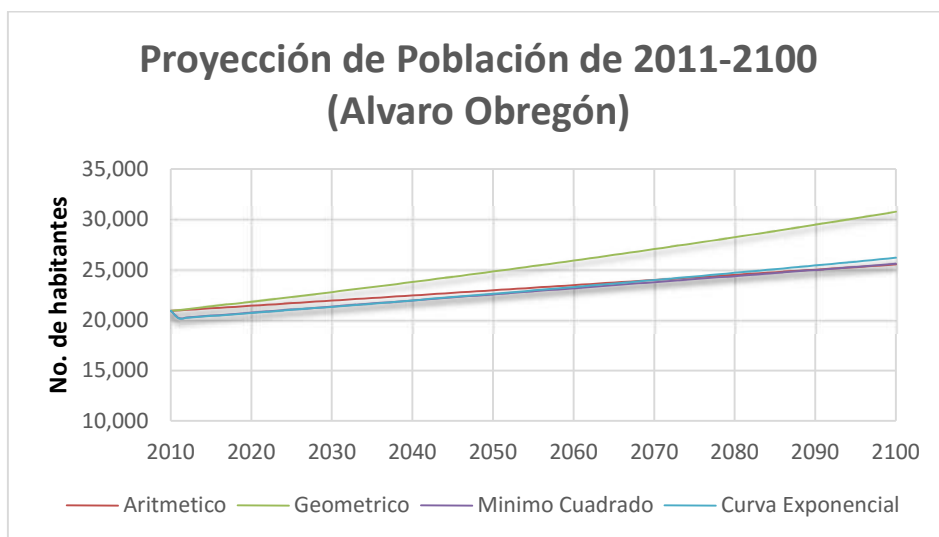


Figura 40 Proyección de población Álvaro Obregón

Una vez determinada la población actual y futura de la cuenca se determinó la demanda urbana de acuerdo a la metodología utilizada por el OOAPAS (Loya, 2013), la cual considera el incremento de población, el índice de hacinamiento, la cobertura de red, la población abastecida, así como las pérdidas en el sistema, las cuales se consideraron del 50%, de acuerdo a lo que establece la CONAGUA.

Además, se agruparon las poblaciones por zona para facilitar el manejo del modelo de gestión. Y por último se promedió una demanda urbana para futuro cercano (2039) y para futuro lejano (2099). Quedando de la siguiente manera

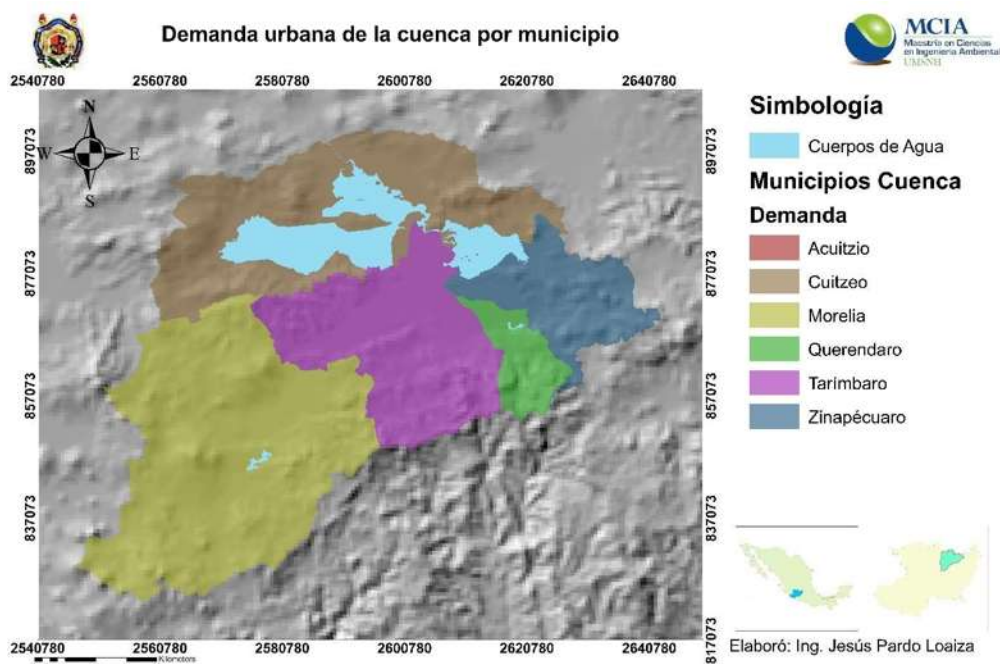


Figura 41 Distribución de la demanda urbana

Tabla 14 Demanda urbana por zona (histórica y futura)

Demanda (Hm ³ /año)			
Zona	Histórica	2039	2099
Cuitzeo	6.032	5.795	6.756
Morelia	96.932	120.375	245.547
Tarímbaro	9.716	21.062	220.735
Querendaro	1.151	1.040	1.086
Zinapécuaro	5.174	4.769	4.911

De acuerdo a la tabla anterior, se puede observar que en las zonas de Morelia y Tarímbaro se tendrá un incremento significativo en la demanda, lo que se puede traducir en problemas de abastecimiento para esos escenarios.



4.8 Esquema de simulación de la cuenca del Lago de Cuitzeo en el programa SIMGES.

El esquema de simulación para la gestión de la cuenca del Lago de Cuitzeo fue realizado en el programa SIMGES y se presenta a continuación:

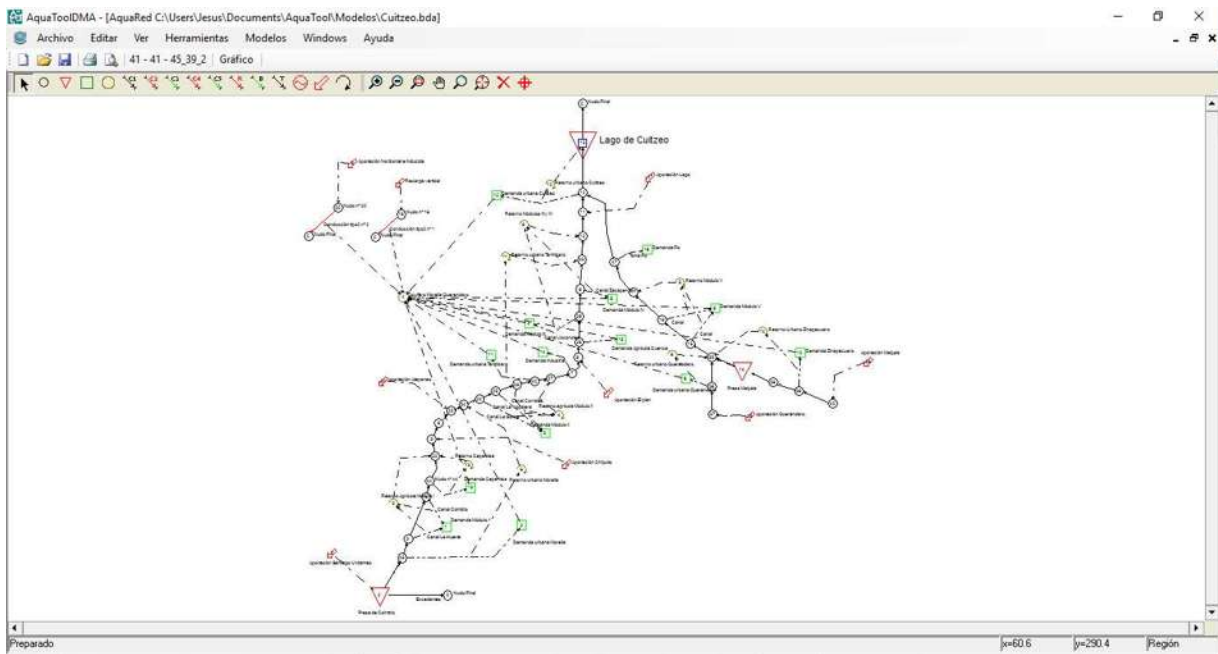


Figura 42 Esquema de simulación de la Cuenca del Lago de Cuitzeo en el entorno SIMGES

El esquema de simulación puede ser combinado de diferentes formas. Los elementos que se pueden llegar a considerar el programa SIMGES son los siguientes:

- Embalses (superficiales). Los cuales son definidos mediante sus parámetros físicos, sus parámetros de gestión (volúmenes máximos, volúmenes objetivos, y prioridad de almacenamientos con respecto a otros embalses).
- Aportaciones intermedias. Se consideran como tales aquellas que no puedan ser consideradas o no convenga sean consideradas directamente como entradas de embalse.



- Conducciones. Se contempla bajo esta misma denominación a los tramos de río, canales, y cualquier otra conexión que convenga establecer. Quedan definidas por sus parámetros físicos (incluyendo capacidades máximas), y por sus posibles caudales mínimos (normalmente ecológicos).
- Demandas consuntivas. Son aquellos elementos que utilizan el agua y en los que parte de ella es consumida y por tanto se pierde para el sistema. Quedan incluidas dentro de este tipo tanto las zonas regables como las demandas urbanas e industriales.
- Elementos de retorno. Son simplemente definiciones de puntos de reintegro de agua al sistema provenientes de demandas consuntivas.
- Recarga artificial. Son elementos cuyo flujo va a recargar acuíferos, utilizándose para tal fin los sobrantes. Se definen por sus características físicas.
- Bombeos adicionales. Son elementos de captación de agua procedente de acuíferos que es incorporada al sistema superficial para su utilización en lugar distinto de la zona donde se efectúa el bombeo.
- Acuíferos. Quedan definidos mediante sus parámetros físicos y mediante unos parámetros de explotación, que una vez rebasados anulan las extracciones. El modelo permite contemplar varios tipos de acuíferos.

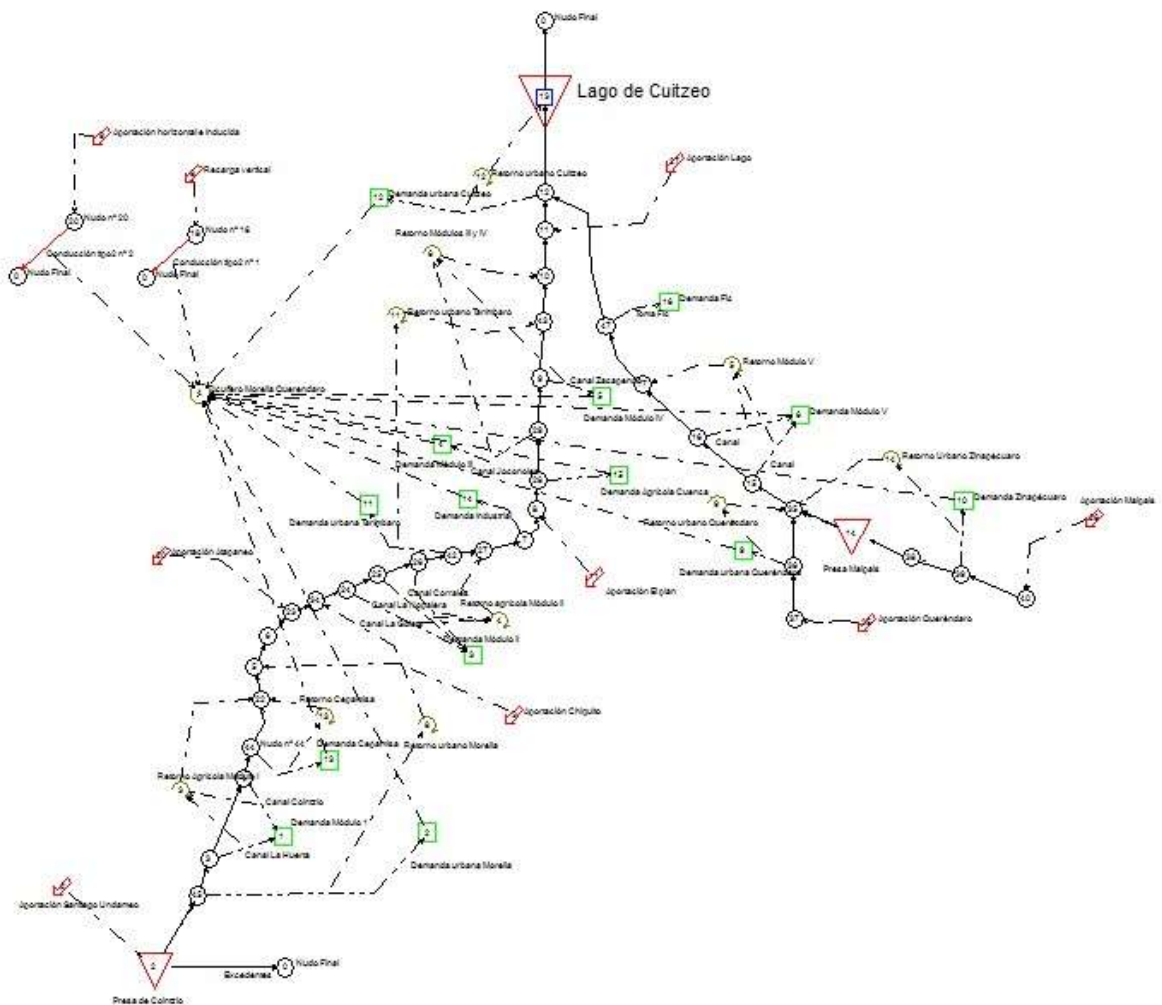


Figura 43 Detalle del esquema de simulación SIMGES de la Cuenca Lago de Cuitzeo

Para el caso de estudio se toman en cuenta las siguientes consideraciones:

- Se cuenta con dos embalses, que corresponden a la presa de Cointzio y a la presa de Malpaís.
- La conducción del recurso hídrico se lleva a cabo a través del Río Grande y del Río Queréndaro.
- Las demandas consuntivas principales corresponden a la demanda urbana de la ciudad de Morelia, las demandas por los módulos de riego y los demás asentamientos ubicados dentro de la zona.



- El lago de Cuitzeo es considerado dentro del esquema también como un embalse.
- Se considera además la interacción con el acuífero Morelia-Queréndaro.

Parte fundamental para la simulación en SIMGES es la información con que se cuenta de los dos embalses (Cointzio y Malpaís), ya que con estos datos es posible la calibración del modelo.

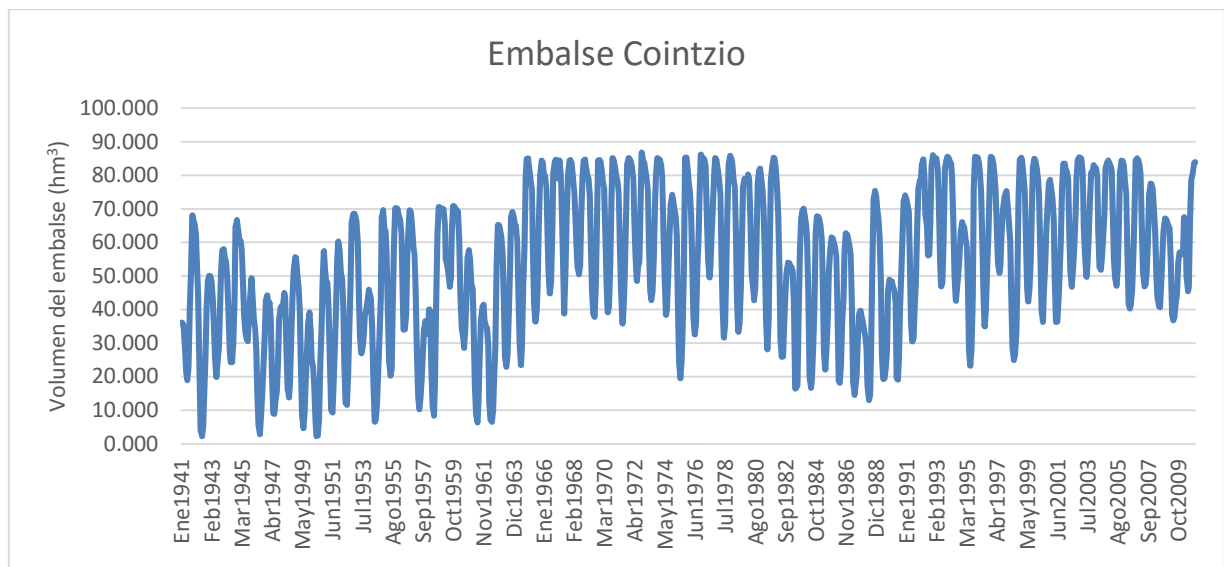


Figura 44 Volúmenes históricos de la Presa de Cointzio

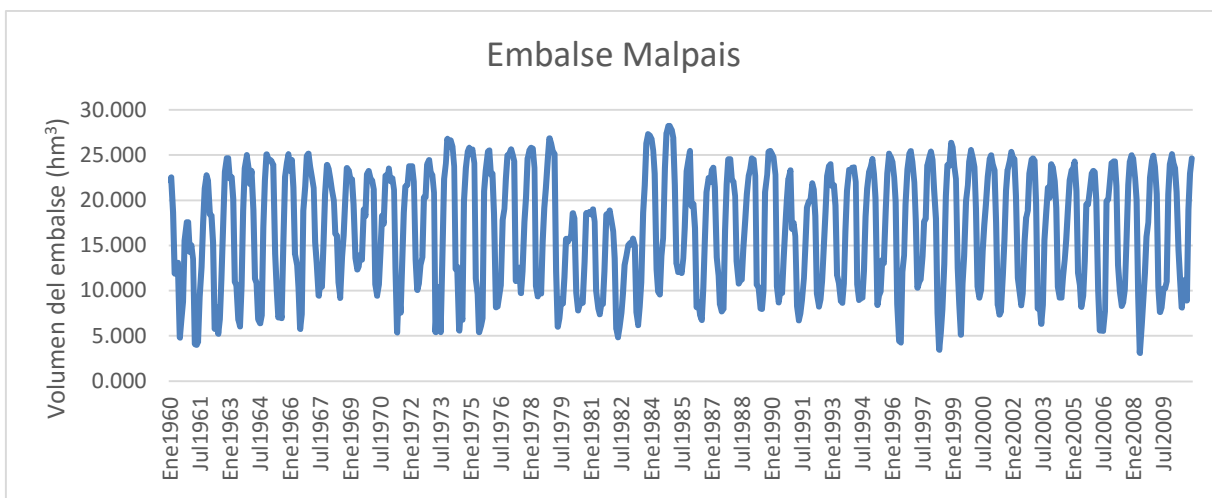


Figura 45 Volúmenes históricos de la presa Malpais

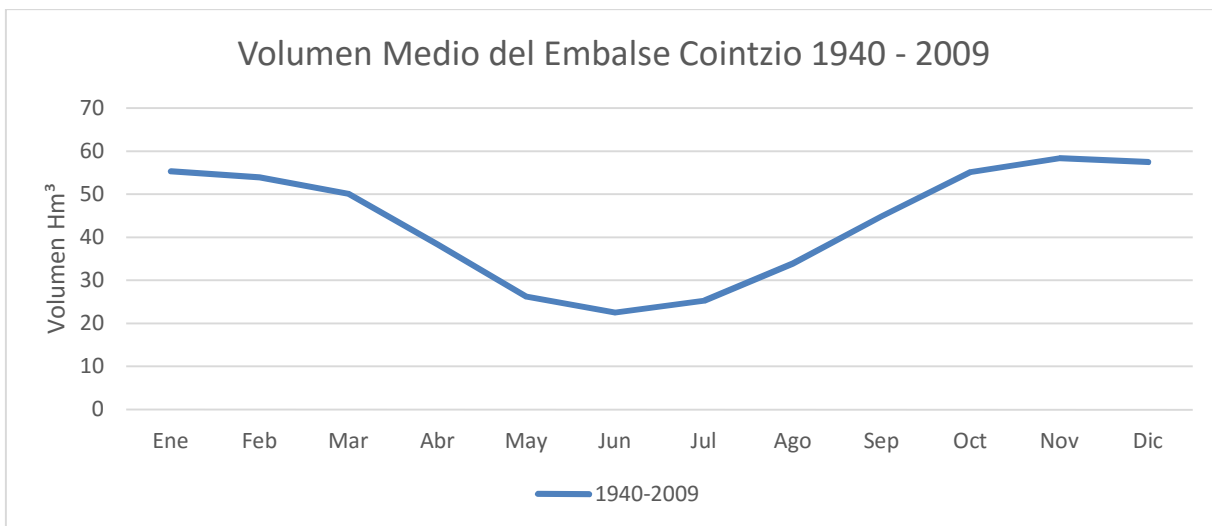


Figura 46 Volumen medio histórico de la Presa de Cointzio

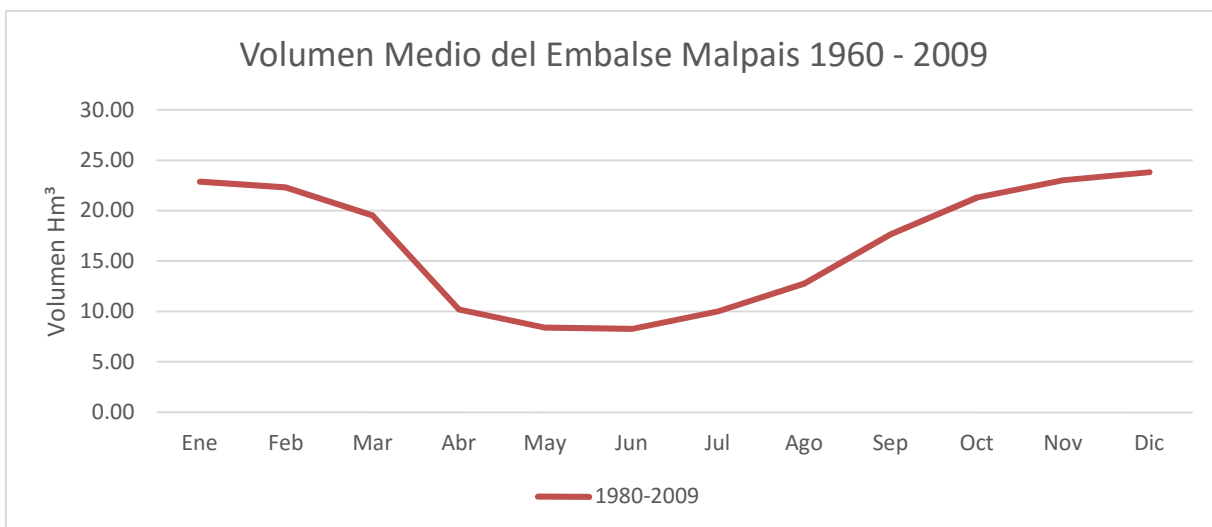


Figura 47 Volumen medio histórico de la Presa Malpais

En las siguientes figuras se muestran los resultados de la calibración en los embalses, donde se contrastan los resultados de la modelación con los datos aforados tanto en la presa de Cointzio y en la presa Malpais.

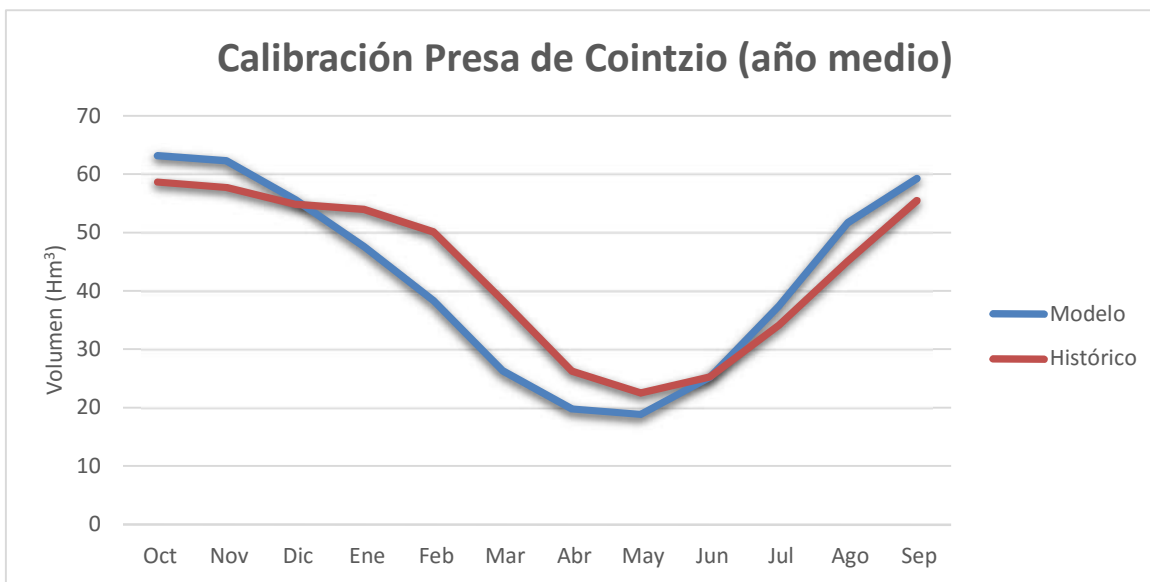


Figura 48 Calibración de la presa de Cointzio (año medio)

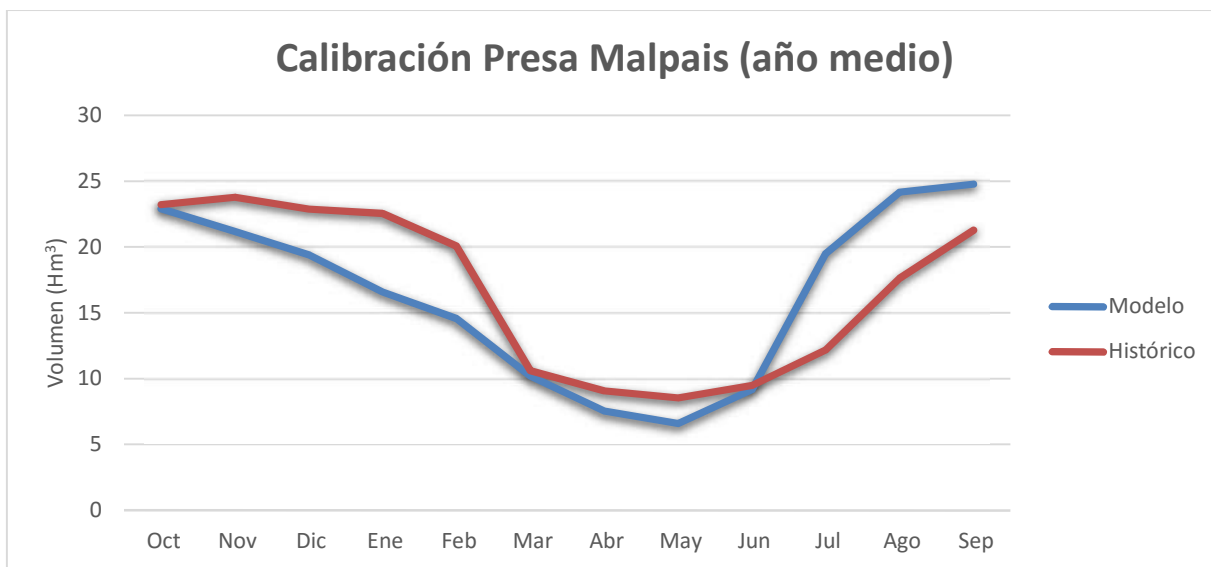


Figura 49 Calibración de la presa Malpais (año medio)

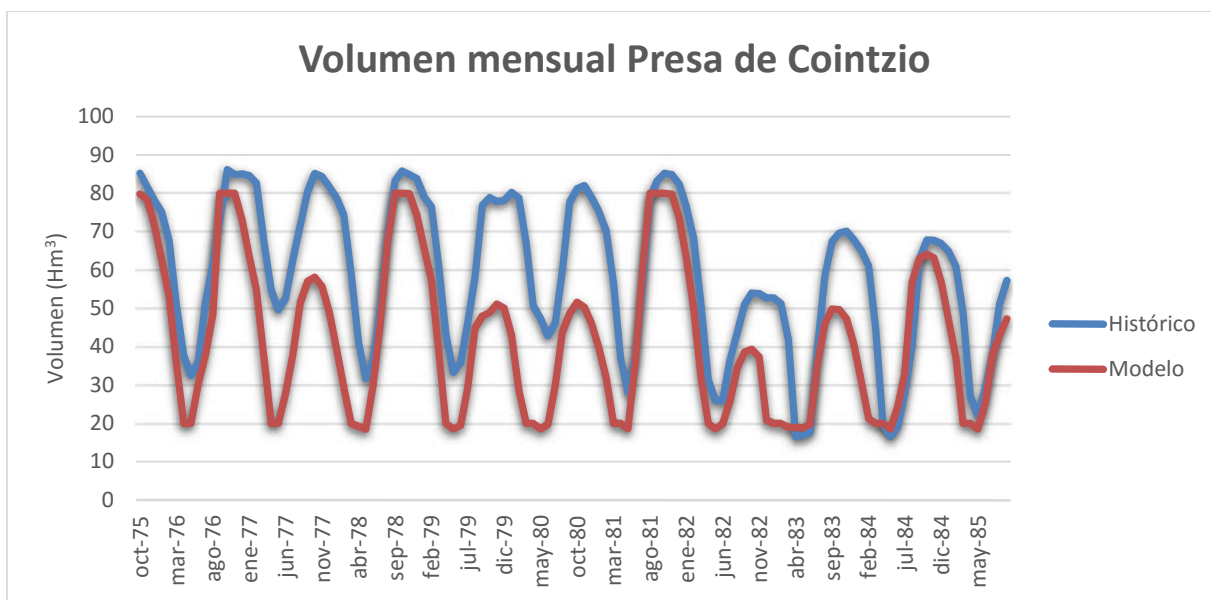


Figura 50 Comparativa de volumen mensual de la presa de Cointzio

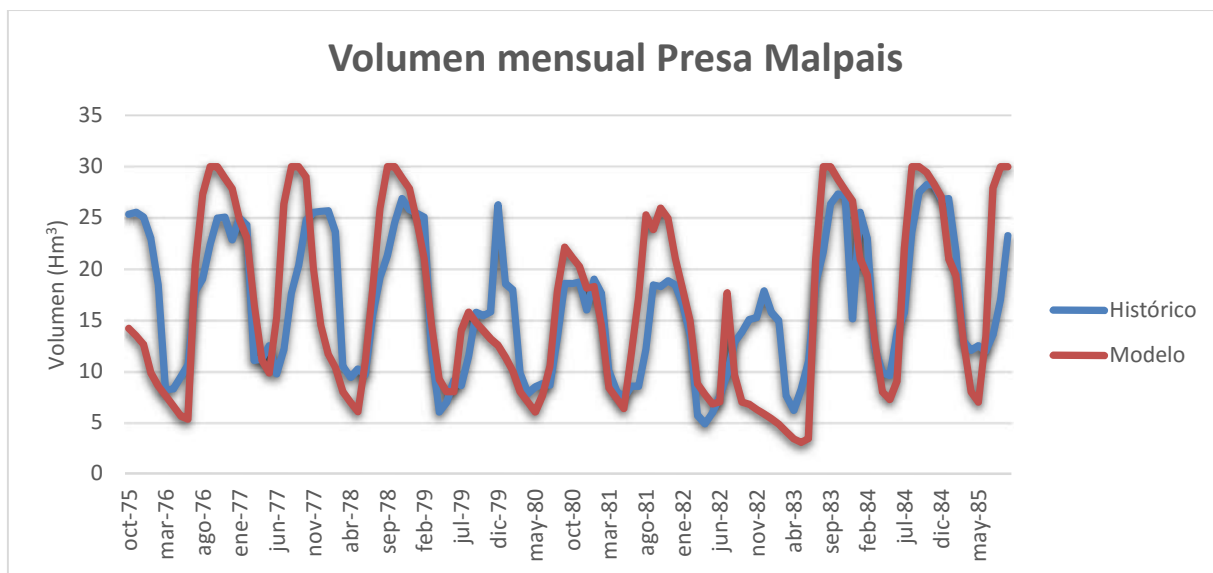


Figura 51 Comparativa de volumen mensual de la presa Malpais

Adicionalmente, también se compararon los resultados de la modelación con la información histórica de las estaciones hidrométricas a lo largo de los cauces principales, como lo es el caso de la estación de Atapaneo.

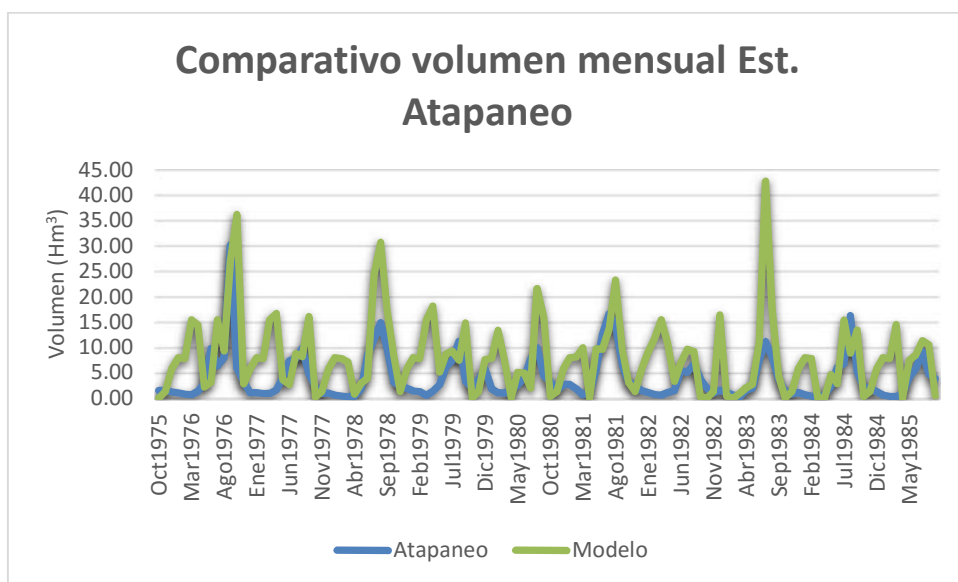


Figura 52 Comparativa de volumen mensual de la Est. Atapaneo



A continuación, se presentan los indicadores de ajuste para las calibraciones antes descritas:

Tabla 15 Indicadores de ajuste de calibraciones del modelo de gestión

Calibración	Indicadores de ajuste		
	NSE	ln NSE	r^2
Presa Cointzio	0.91	0.84	0.95
Presa Malpais	0.85	0.79	0.88
Es. Atapaneo	0.59	0.64	0.76

Como puede apreciarse en la tabla, los índices de ajuste se pueden considerar aceptables, por lo que la calibración del sistema de recursos hídricos de la cuenca del Lago de Cuitzeo se acepta.

Dentro de esta misma simulación se puede observar el comportamiento del Lago de Cuitzeo en base a los volúmenes finales que reproduce el modelo de gestión, siendo los siguientes:

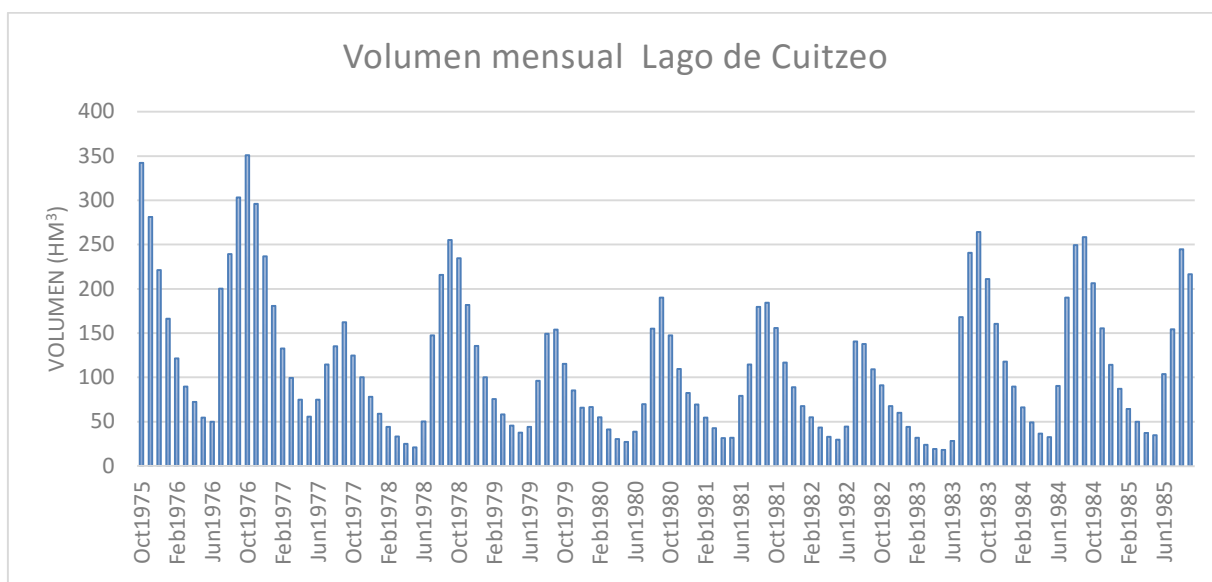


Figura 53 Volumen mensual del Lago de Cuitzeo



Como se puede apreciar en la figura anterior, el lago presenta fuertes variaciones en su volumen final, tal y como ocurre con el lago en la realidad. Desafortunadamente, no existen registros extensos sobre la volumetría del lago que se puedan comparar con los resultados obtenidos con el modelo.

Una vez que el sistema se encuentra calibrado, se pueden introducir los valores de aportación afectados por la variable de cambio climático.

4.9 Simulación de la cuenca del Lago de Cuitzeo con el efecto del Cambio Climático.

Una vez que el sistema se encuentra calibrado, se pueden introducir los valores de aportación afectados por la variable de cambio climático.

La información que se vio afectada por el cambio climático fue la correspondiente a las aportaciones superficiales y a la recarga vertical para el modelo subterráneo; así como los requerimientos de agua de los distintos módulos de riego.

Además, se tomaron en cuenta las proyecciones de población para la demanda urbana requerida en el territorio de la cuenca.

Los embalses se consideraron con sus mismas dimensiones, ya que, aunque se lo que se hizo en este estudio fue una proyección, no se puede saber si en algún momento en el futuro se llevara a cabo alguna modificación a la infraestructura existente en la cuenca.

La evolución del volumen medio mensual del embalse Cointzio para el periodo (2015 - 2039) se presenta en la siguiente figura, donde se puede observar un ligero descenso en el volumen del embalse, principalmente en los meses de octubre – febrero, meses donde el déficit para el suministro de la demanda se puede incrementar de manera más importante. Se observa también que los tres escenarios presentan la misma tendencia y no se observa mucha diferencia entre ellos.

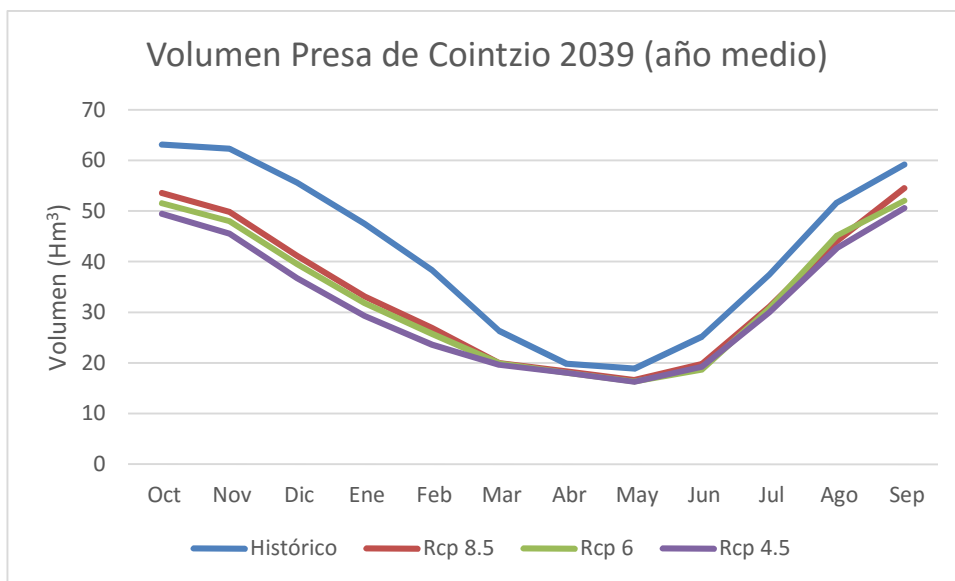


Figura 54 Comparativa del volumen medio de la presa de Cointzio (2039)

Para el periodo (2075-2099), la diferencia en la evolución del volumen medio mensual del embalse Cointzio de los escenarios de CC con respecto al escenario histórico es más significativa. Se observa un enorme déficit en el volumen del embalse, principalmente en el escenario Rcp 8.5, lo que indica que el embalse se encontraría en sus niveles mínimos durante todo el año. Los otros dos escenarios presentan una tendencia similar a la baja a comparación del escenario histórico. Esta información se presenta en la siguiente figura.

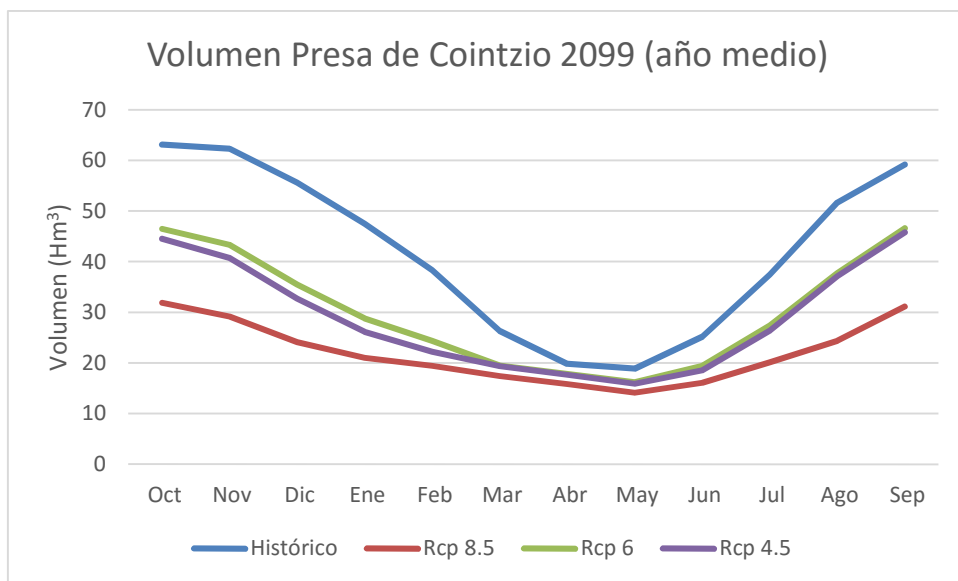


Figura 55 Comparativa del volumen medio de la presa de Cointzio (2099)

En el caso del embalse Malpais, la evolución del volumen medio mensual para el periodo (2015 - 2039) es prácticamente la misma de los tres escenarios Rcp con respecto al escenario histórico. Esto quiere decir que en esta zona de la cuenca no existen cambios significativos en cuanto a las aportaciones superficiales y subterráneas con respecto a las que se tienen en la actualidad. A continuación, se presenta la figura donde se puede observar este comportamiento.

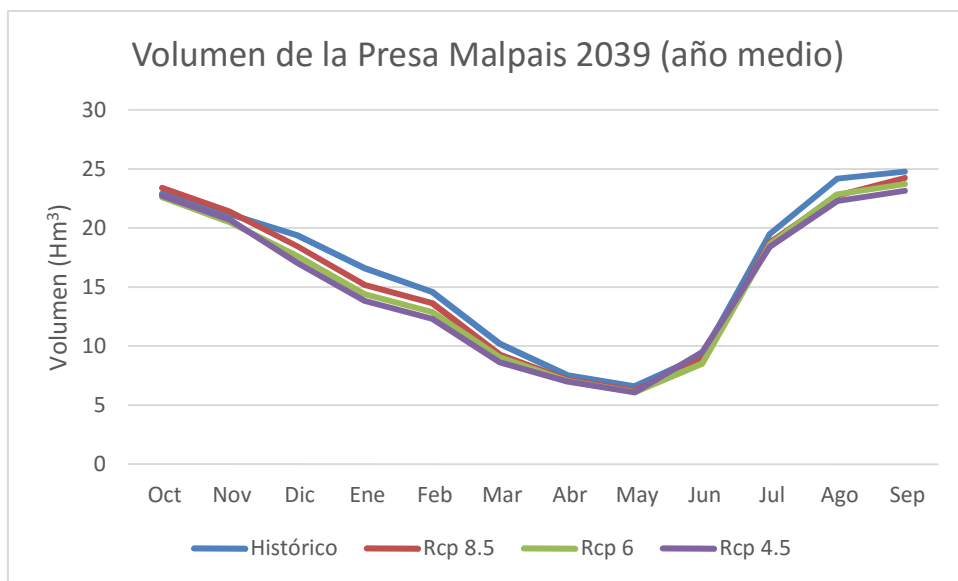


Figura 56 Comparativa del volumen medio de la presa Malpais (2039)

Para el periodo (2075-2099), la evolución del volumen medio mensual del embalse Malpais de los escenarios de CC con respecto al escenario histórico es a la baja. Se observa una disminución en el volumen del embalse, principalmente en el escenario Rcp 8.5, durante todo el año. Al igual que como ocurre con la presa de Cointzio, los escenarios Rcp 4.5 y 6.0 observan una tendencia similar a la baja a comparación del escenario histórico. Esta información se presenta en la siguiente figura.

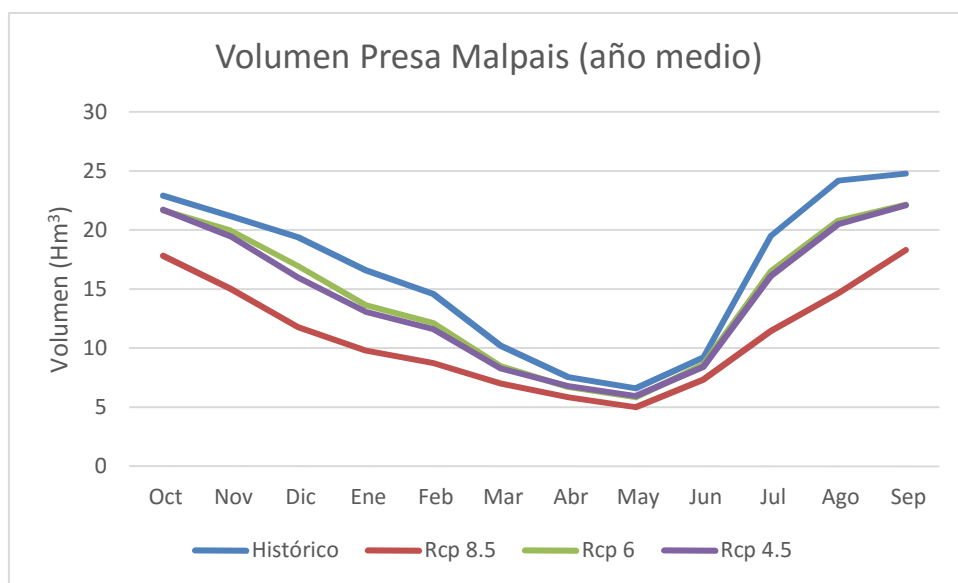


Figura 57 Comparativa del volumen medio de la presa Malpais (2099)

En el caso del Lago de Cuitzeo, la modelación nos indica que tanto para futuro cercano y para futuro lejano, el volumen será muy similar en todos y cada uno de los escenarios de cambio climático. Esto se debe en gran parte a que en la zona cercana a lago las precipitaciones serán mayores a las que se tienen en el registro histórico.

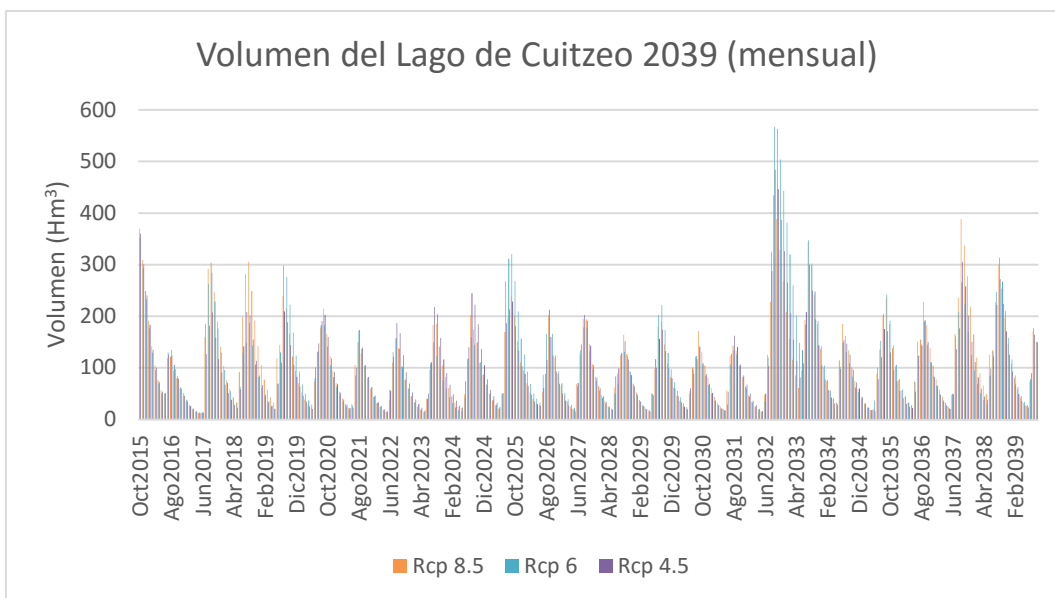


Figura 58 Comparativa del volumen del Lago de Cuitzeo (2039)

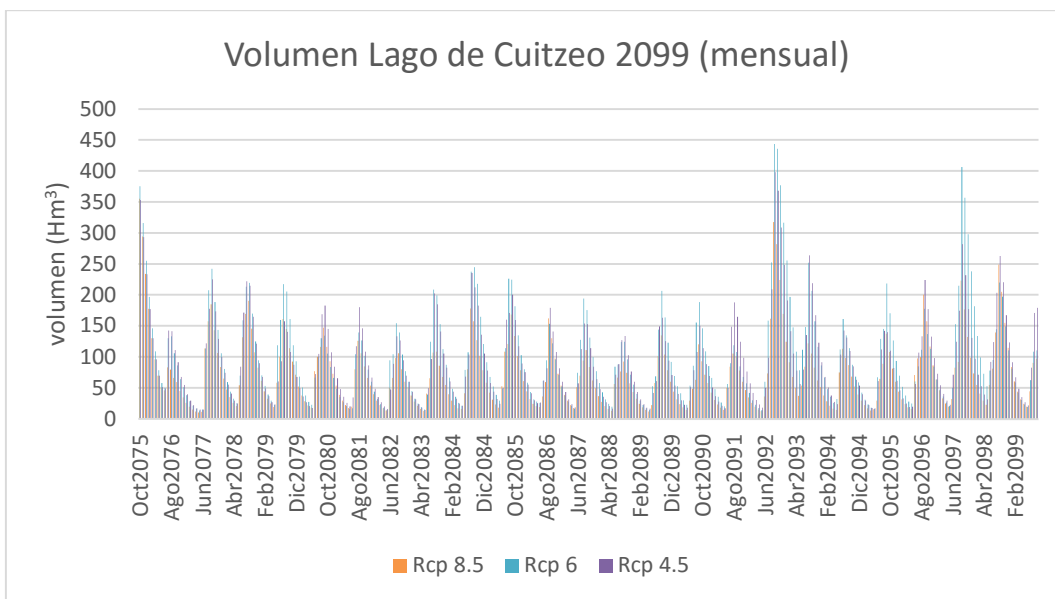


Figura 59 Comparativa del volumen del Lago de Cuitzeo (2099)



En la parte subterránea del modelo de gestión, que es lo concerniente al acuífero Morelia – Queréndaro, el modelo de gestión presenta dos indicadores que nos permite evaluar el desempeño del acuífero ante los efectos del cambio climático. El primero de ellos se refiere a la recarga neta del acuífero y se presenta en las siguientes figuras.

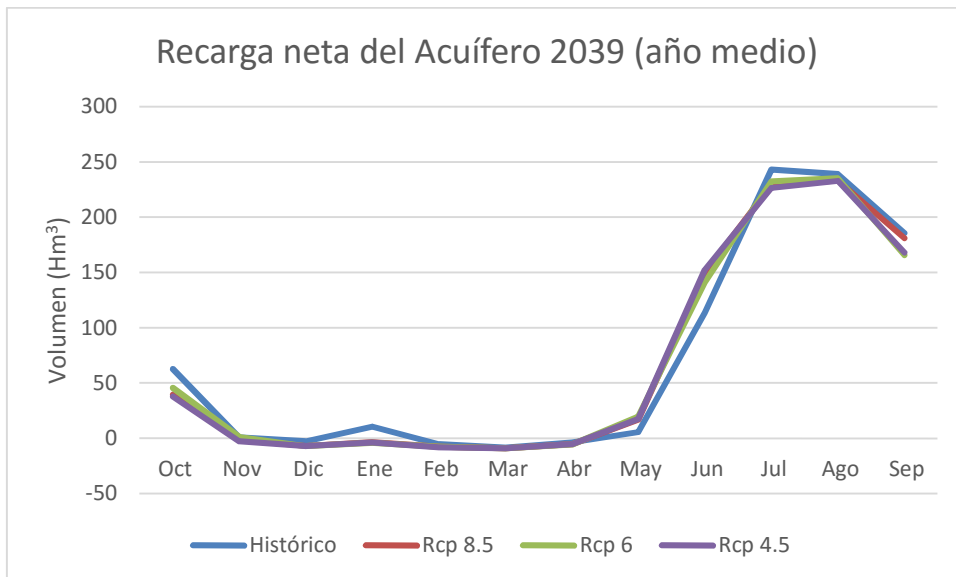


Figura 60 Comparativa de la recarga neta del acuífero (2039)

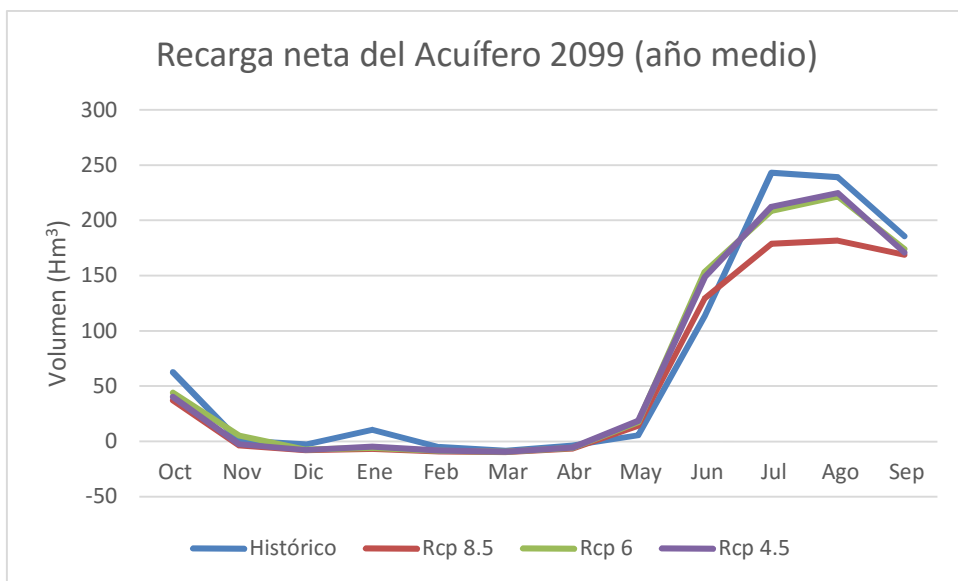


Figura 61 Comparativa de la recarga neta del acuífero (2009)

En la primera figura se observa que la recarga es prácticamente la misma en cada escenario de cambio climático en comparación con la recarga histórica, mientras que para el futuro lejano se puede apreciar que el acuífero tendrá menos recarga en todos los escenarios, en especial en el escenario Rcp 8.5 que es el más desfavorable.

El segundo indicador que se tiene para determinar el comportamiento del acuífero tiene que ver con los bombeos que se dan en el mismo y se pueden observar en las siguientes figuras.

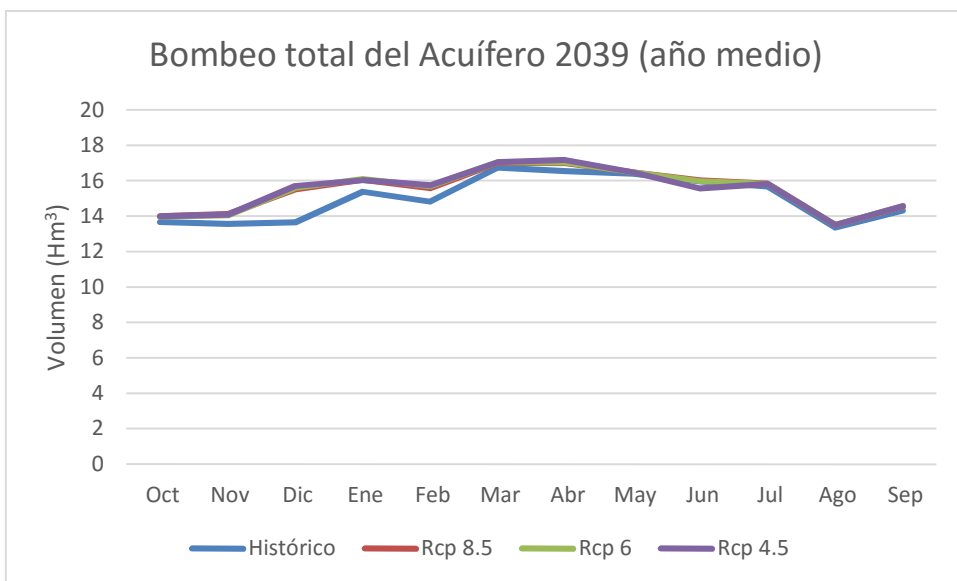


Figura 62 Comparativa del bombeo total del acuífero (2039)

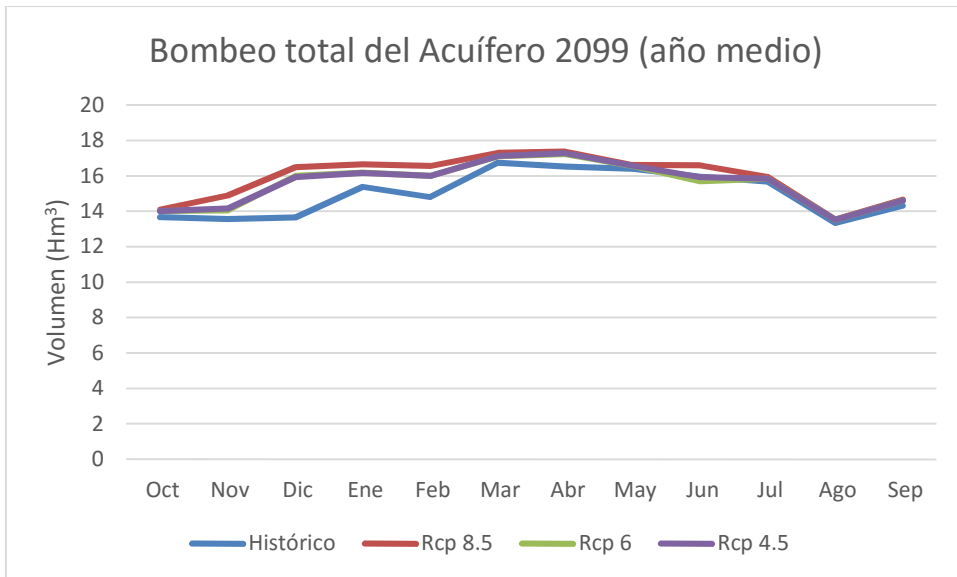


Figura 63 Comparativa del bombeo total del acuífero (2099)

En el caso del indicador de bombeo, tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano se puede observar un incremento en el bombeo en los meses secos, esto debido a que se tiene un incremento en las demandas urbanas y agrícolas para el modelo de gestión.



4.10 Determinación de reglas de operación para la gestión de la cuenca del Lago de Cuitzeo ante el efecto del Cambio Climático.

Una vez que el modelo de gestión ha sido calibrado y modelado con los diferentes escenarios de cambio climático, se pueden proponer y analizar diversas reglas de operación.

Para el análisis de las demandas existen varios criterios:

- **Garantía Mensual.** Identifica el número de meses en los que se reproduce un fallo en el sistema, considerando como fallo un déficit mayor al 70% de la demanda mensual.
- **Garantías Volumétricas.** Es el cociente entre el déficit acumulado y la demanda total a satisfacer en el periodo analizado.
- **UTAH-DWR.** Utilizado para el análisis de las garantías de las demandas agrícolas. Considera que se presenta un fallo en el sistema cuando el déficit en un año supera el 50% de la demanda anual, cuando el déficit de dos años consecutivos supera el 75% de la demanda anual y cuando el déficit de diez años consecutivos excede el 100% de la demanda anual.
- **Garantía Anual.** Representa el porcentaje de garantía año con año donde se entrega la totalidad del agua demandada, considerándose déficit al presentarse una garantía menor al 30% de la demanda anual.

Para este trabajo se propusieron algunas reglas de operación enfocadas a satisfacer las demandas existentes en la cuenca, tomando en cuenta la variable de cambio climático.

Como primer paso se obtuvieron las garantías volumétricas de las demandas existentes, en el escenario histórico con la finalidad de saber las garantías actuales que se presentan en el sistema.



Tabla 16 Garantías volumétricas del escenario histórico

Demanda	Garantía Volumétrica (%)
Demanda urbana Morelia	92.61
Demanda urbana Tarímbaro	96.664
Demanda urbana Cuitzeo	100
Demanda urbana Queréndaro	100
Demanda urbana Zinapécuaro	67.51
Demanda Módulo I	60.281
Demanda Módulo II	31.252
Demanda Módulo III	65.443
Demanda Módulo IV	61.105
Demanda Módulo V	70.249
Demanda Cepamisa	100

Se observa en la tabla que en general las demandas urbanas cumplen con el suministro de agua que deben de llevar a las comunidades. En tanto que en el caso de las demandas agrícolas se presenta un déficit considerable.

El siguiente paso es comparar las garantías volumétricas históricas con las garantías generadas con cada uno de los escenarios de cambio climático, tanto en el futuro cercano como en el futuro lejano. Esto con la finalidad de poder proponer alguna regla de operación que nos ayude a mitigar los efectos del cambio climático. Estos valores fueron obtenidos de las modelaciones con cambio climático, sin cambiar ninguna especificación del suministro de agua a las demandas.



Tabla 17 Garantías volumétricas originales

Garantía volumétrica (%)							
Demanda	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	71.407	71.588	71.846	34.574	34.834	32.668
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	50.249	50.56	50.397	4.707	4.742	4.337
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	68.142	68.447	67.445	67.145	67.618	65.042
Demanda Módulo I	60.281	35.465	36.034	38.503	28.665	30.991	13.566
Demanda Módulo II	31.252	4.836	7.212	7.458	3.41	5.708	1.611
Demanda Módulo III	65.443	46.695	48.173	49.472	41.896	43.274	32.075
Demanda Módulo IV	61.105	38.584	40.346	42.214	32.912	34.924	21.325
Demanda Módulo V	70.249	60.634	62.96	66.822	56.938	60.243	42.44
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

Al analizar la tabla, se observa que el valor de las garantías disminuye considerablemente conforme va pasando el tiempo. En el caso de las demandas urbanas, es de especial atención el caso de la demanda de Tarimbaro, que pasa de un 96% a apenas un 4.33% en el escenario Rcp 8.5 para el año 2099. Esto es debido al crecimiento poblacional tan acelerado que fue proyectado para la zona y que es el más fuerte dentro de toda la cuenca. En el caso de las demandas agrícolas, la fuerte demanda que requieren las zonas urbanas provoca que el suministro a la zona agrícola se vea aún más comprometido que en el escenario histórico.

El siguiente paso es proponer reglas de operación con la finalidad de mejorar las garantías de las demandas existentes dentro de la cuenca. A continuación, se presentan algunas opciones de estas reglas.



4.10.1 Regla de operación A, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas.

Al realizar el cálculo de las demandas urbanas, fue considerado que se tiene el promedio un 50% de pérdidas en la red de distribución de las zonas urbanas. Es por eso que una primera medida para mejorar la gestión de la cuenca del Lago de Cuitzeo es la de disminuir las pérdidas, esto se puede lograr mejorando la infraestructura existente en cada una de las comunidades que forman parte de la Cuenca. Para poder ver reflejado de mejor manera esta acción, se consideró una eficiencia del 90% en las redes de distribución de la demanda urbana para así poder observar las posibles mejoras en las garantías volumétricas. En la siguiente tabla se muestran los resultados llevando a cabo esta acción.

Tabla 18 Garantías volumétricas Regla de operación A

Garantía volumétrica (%)							
Demanda	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	100	100	100	69.139	69.665	65.316
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	90.695	91.128	91.032	9.416	9.484	8.673
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	100	100	100	98.552	98.621	98.426
Demanda Módulo I	60.281	35.458	36.047	38.52	28.704	30.985	13.608
Demanda Módulo II	31.252	4.841	7.201	7.472	3.462	5.693	1.611
Demanda Módulo III	65.443	46.695	48.197	49.498	41.97	43.275	32.109
Demanda Módulo IV	61.105	38.585	40.379	42.271	32.982	34.929	21.356
Demanda Módulo V	70.249	60.719	63.48	67.094	57.451	60.407	42.714
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

En el análisis de los resultados, se observa una mejora en las garantías de las demandas urbanas, tal es el caso de la demanda de Zinapecuaro, la cual se encuentra para todos los escenarios por arriba del 95%. Sin embargo, en el caso de la demanda urbana de Tarimbaro, la población que se tiene proyectada para el año 2099 hace muy complicado que se puedan satisfacer las necesidades de todas las personas que habitarían la zona.



En el caso de las demandas agrícolas, se sigue presentando un déficit similar en las garantías.

4.10.2 Regla de operación B, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción en la demanda agrícola.

La segunda regla de operación considera el mismo mejoramiento en la eficiencia de las demandas urbanas, con la variación de que se reduce el suministro a las demandas agrícolas con la finalidad de privilegiar el abastecimiento de la población, el cual siempre tiene prioridad. Los resultados se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 19 Garantías volumétricas Regla de operación B

Garantía Volumétrica (%)							
Demanda	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	100	100	100	69.146	69.67	65.342
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	90.701	91.15	91.042	9.417	9.484	8.673
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	100	100	100	98.552	98.621	98.426
Demanda Módulo I	60.281	38.125	38.644	41.247	30.988	33.337	14.944
Demanda Módulo II	31.252	5.425	8.161	8.43	3.88	6.385	1.797
Demanda Módulo III	65.443	48.99	50.543	51.902	44.729	46.002	34.643
Demanda Módulo IV	61.105	41.238	42.847	42.337	35.565	37.905	23.455
Demanda Módulo V	70.249	64.931	67.799	67.094	61.356	63.93	45.442
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

Al observar los resultados obtenidos, se tiene que restricción del 10% al suministro de las demandas agrícolas no impacta en los resultados de las garantías volumétricas, por lo que los valores se mantienen prácticamente iguales con respecto a la regla de operación A. Es por ello que se consideró una mayor restricción a la demanda agrícola para observar el impacto en las garantías.



4.10.3 Regla de operación C, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción del 20% en la demanda agrícola.

La siguiente regla de operación considera las mismas condiciones pasadas para la demanda urbana, con una restricción del 20% en el suministro a las demandas agrícolas con la finalidad de mejorar los resultados obtenidos con la regla de operación B, con los siguientes resultados.

Tabla 20 Garantías volumétricas Regla de operación C

Demanda	Garantía Volumétrica (%)						
	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	100	100	100	69.173	69.688	65.361
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	90.792	91.232	91.148	9.422	9.484	8.675
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	100	100	100	98.552	98.63	98.426
Demanda Módulo I	60.281	39.799	40.881	43.634	32.554	35.445	16.061
Demanda Módulo II	31.252	6.773	10.305	10.665	4.67	7.63	2.064
Demanda Módulo III	65.443	51.32	53.199	54.765	47.271	48.892	37.421
Demanda Módulo IV	61.105	44.303	46.017	48.056	38.267	40.684	25.66
Demanda Módulo V	70.249	69.109	71.329	76.141	65.586	67.91	48.689
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

Los resultados muestran una ligera mejoría en las garantías a las demandas agrícolas, pero aún siguen presentando fallos, en el caso de las demandas urbanas, siguen teniendo buenos resultados, con excepción de Tarímbaro para el periodo 2099.



4.10.4 Regla de operación D, considerando una mejora en la eficiencia de la distribución del agua en las demandas urbanas y una reducción del 30% en la demanda agrícola.

Esta regla de operación restringe a un 30% las demandas agrícolas, y mantiene las condiciones pasadas para la demanda urbana de las demás reglas de operación, esta regla tendría la máxima eficiencia con la que se podría trabajar para mejorar la gestión en la cuenca del Lago de Cuitzeo. Estas restricciones presentan los siguientes resultados.

Tabla 21 Garantías volumétricas Regla de operación D

Demanda	Garantía Volumétrica (%)						
	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	100	100	100	69.304	69.728	65.399
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	91.251	91.429	91.397	9.452	9.492	8.686
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	100	100	100	98.552	98.63	98.428
Demanda Módulo I	60.281	42.733	43.931	46.609	35.085	38.153	17.194
Demanda Módulo II	31.252	11.021	15.407	16.251	6.468	10.63	2.645
Demanda Módulo III	65.443	54.999	57.447	59.163	50.703	52.488	41.031
Demanda Módulo IV	61.105	47.99	51.045	52.603	41.955	44.653	28.529
Demanda Módulo V	70.249	72.938	74.405	79.233	69.391	71.045	52.478
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

Al igual que con las reglas de operación pasadas, se produce una mejora en las garantías de las demandas agrícolas sin que estas lleguen a ser suficientes para evitar fallos en el sistema. Las garantías de las demandas urbanas permanecen igual, donde se siguen presentando fallos para las condiciones más desfavorables.



4.10.5 Regla de operación E, considerando un mayor bombeo en las demandas urbanas y agrícolas que tengan interacción con el Acuífero Morelia-Queréndaro.

Una última variación en la definición de reglas de operación es la de favorecer la explotación del acuífero, esto se lograría a través del aumento en los bombeos permitidos para las demandas que utilizan el agua subterránea. Para realizar esta regla de operación se duplico la cantidad de agua que podía bombear en cada una de estas demandas. Los resultados de esta regla de operación son los siguientes:

Tabla 22 Garantías volumétricas Regla de operación E

Garantía Volumétrica (%)							
Demanda	Escenario Actual	Cambio Climático 2039			Cambio Climático 2099		
		4.5	6	8.5	4.5	6	8.5
Demanda urbana Morelia	92.61	100	100	100	63.897	64.156	61.991
Demanda urbana Tarimbaro	96.664	100	100	100	66.68	66.715	66.311
Demanda urbana Cuitzeo	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Querendaro	100	100	100	100	100	100	100
Demanda urbana Zinapecuaro	67.51	100	100	100	100	100	100
Demanda Módulo I	60.281	35.465	36.034	38.503	28.665	30.991	13.566
Demanda Módulo II	31.252	4.836	7.212	7.458	3.41	5.708	1.611
Demanda Módulo III	65.443	60.07	61.516	62.577	57.266	58.243	50.477
Demanda Módulo IV	61.105	65.337	67.09	68.182	62.184	63.328	54.284
Demanda Módulo V	70.249	82.761	84.131	87.18	79.901	81.831	69.81
Demanda Cepamisa	100	100	100	100	100	100	100

Al analizar los resultados de esta regla de operación, se observa que se tienen menos fallos en comparación con las reglas de operación anteriores. Especialmente en las demandas urbanas de Morelia y Tarímbaro, donde a pesar de que existen fallos, estos son menores. En el caso de las demandas agrícolas, se observa que los módulos de riego que utilizan agua subterránea mejoran sustancialmente.

El problema de esta regla de operación radica en que al favorecer la sobre explotación del acuífero, se provoca mayor déficit en la recarga de este. Un ejemplo de esto se observa al comparar la recarga neta y los bombeos del acuífero históricos con la condición más desfavorable de los escenarios de cambio climático (Rcp 8.5 2099).

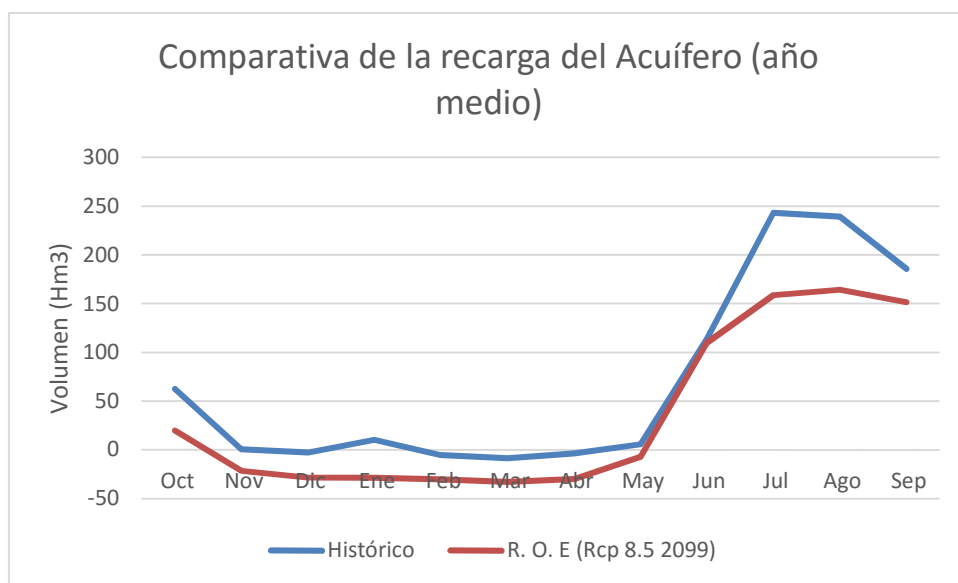


Figura 64 Comparativa de la recarga del Acuífero 2099

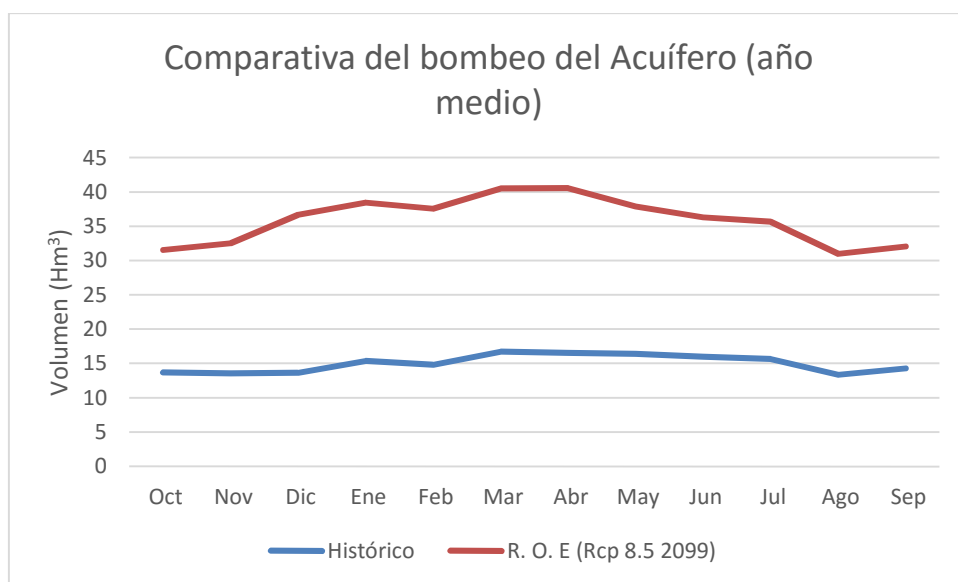


Figura 65 Comparativa del bombeo del Acuífero 2099

5. Conclusiones y recomendaciones



5.1 Conclusiones

Una vez llevado a cabo este trabajo, se concluye que el cambio climático impactara de manera importante en las precipitaciones y temperaturas dentro del territorio de la cuenca, modificando la cantidad de agua que abastece el sistema, tanto de manera superficial como de manera subterránea.

Al incluir la variable de cambio climático en el modelo de gestión, se obtienen resultados que nos indican que se tendrán afectaciones en la disponibilidad tanto superficial como subterránea. Lo cual sirve como una advertencia para llevar a cabo acciones para mitigar sus efectos.

También se concluye que la realización de un modelo de gestión, considerando todos los elementos que integran el sistema, permite determinar de mejor manera las necesidades hídricas de la cuenca del Lago de Cuitzeo, además de que permite observar necesidades específicas de cada elemento que conforma el sistema.

Con la modelación de la cuenca, se pudieron evaluar distintas reglas de operación, en las cuales se pudo observar que es factible realizar una mejor distribución del recurso hídrico.

Una vez evaluadas las reglas de operación, se observó que es posible mejorar la eficiencia del sistema restringiendo las demandas, sin embargo, en algunos casos la necesidad de la población es muy alta debido al acelerado crecimiento demográfico en ciertas zonas de la cuenca.

La otra opción consiste en favorecer la sobre explotación del acuífero, dando como resultado mejores garantías para las demandas dentro de la cuenca, sin embargo, la recarga del acuífero sería mucho menor lo cual provocaría un problema a futuro en una cuenca que ya está considerada como sobre explotada.

5.2 Recomendaciones



La gestión de los recursos hídricos requiere un conocimiento conjunto del sistema superficial y del subterráneo de una cuenca. Sin embargo, se deben de tomar en cuenta otras variables que deben ser consideradas en la gestión; estas variables son la calidad del agua y las sequías.

Se han realizado algunos estudios donde se ha determinado la contaminación del Lago de Cuitzeo y de las descargas que llegan a él. Debido a que la calidad del agua es importante para la disponibilidad hídrica, es necesario incluirla en la modelación de los recursos hídricos. Actualmente se tienen estaciones de monitoreo de calidad, pero la información que ofrecen es limitada, por lo que es necesario mejorar la calidad de la información para poder llevar a cabo estudios más certeros sobre este tema.

El estudiar las sequías puede permitir prever estos fenómenos para poder tomar medidas preventivas, lo cual ayudara a disminuir las afectaciones que se puedan presentar en las distintas demandas.

Otra investigación que se puede generar es la de modificar o implementar nueva infraestructura dentro de los sistemas de distribución a las demandas, para mejorar su eficiencia y por consecuencia optimizar la gestión de la Cuenca del Lago de Cuitzeo.

Por último, al observar el problema que puede llegar a representar en el sistema el crecimiento demográfico acelerado en la cuenca, es necesario llevar a cabo políticas para controlar de la mejor manera posible el desarrollo urbano de la zona.

6. Referencias

Aboites, A. Luis. 1998. **El agua de la nación: Una historia política de México 1888-1946**. CIESAS, México, D. F.

Andreu, J., Solera A., Capilla J. y Ferrer J. 2007. **Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta**. Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España).



Andreu, J., 1992. **Modelo OPTIGES de optimización de la gestión de esquemas de recursos hídricos:(manual del usuario)**. Servicio de Publicaciones, Universidad Politécnica. Valencia, España.

Andreu, J., Capilla, J., y Sanchís, E., 1996. **AQUATOOL, a generalized decision-support system for water-resources planning and operational management**. Journal of hydrology, 177(3), 269-291.

Bravo M. y Barrera G. 2012. **Contribuciones para el desarrollo sostenible de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, Michoacán**. INIFAP-UNAM. Michoacán. México.

Capilla, J., y Andreu, J. 1996. **AQUIVAL: A GUI for groundwater modelling incorporated into the simulation of complex water resources systems**. Hydraulic Engineering Software, 71-80.

Castelán, C. E. 2003. **El recurso hídrico en México: Análisis de la situación actual y perspectivas futuras**. Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C., Miguel Ángel Porrúa, The Nippon Foundation, México, D.F.

CEAC-CONAGUA. 2009. **Programa de gestión Integral de los Recursos Naturales de la Cuenca del Lago de Cuitzeo**. CCLC, Silva M., Morelia, Michoacán, México.

Chávez, R.A. 2004. **La explotación racional de las aguas subterráneas: comentarios sobre la situación actual** en: Hacia una gestión integral del agua en México: Retos y alternativas, Tortejada, C., Guerrero, V. y R. Sandoval (coords). Serie La gestión de los recursos hídricos. Cámara de Diputados- Centro del Tercer Mundo para el Manejo del Agua, A.C.- Miguel Ángel Porrúa, México, D.F.

Comisión de las comunidades europeas, 2000. **Comunicación de la comisión al consejo y al parlamento europeo sobre políticas y medidas de la UE para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero: Hacia un Programa Europeo sobre el Cambio Climático (PECC)**. Bruselas, Bélgica.

Comisión Nacional del Agua (2012a). **Ley de Aguas Nacionales 2012**. Decreto de modificaciones del 8 de Junio. Diario Oficial de la Federación, México, D.F.

Comisión Nacional del Agua. 2006. **La gestión del agua en México. Avances y retos**. Comisión Nacional del Agua, México.



Conde-Álvarez, C., & Saldaña-Zorrilla, S. (2007). **Cambio climático en América Latina y el Caribe: impactos, vulnerabilidad y adaptación. Ambiente y desarrollo**, 23(2).

Del Valle, F. H. 1991. **Aguas subterráneas**. Cuadernos de apoyos académicos No. 14. Universidad Autónoma Chapingo, Estado de México, México.

DHI, 2003, **MIKE BASIN: Rainfall-Runoff Modeling Reference Manual**, Danish Hydraulic Institute, Copenague, Dinamarca.

Diccionario Aguamarket 2001. Diccionario de agua.
<http://www.aguamarket.com/diccionario/index.asp>. Fecha de consulta: Noviembre 2012.

Duarte, C. M., Alonso, S., Benito, G., Dachs, J., Montes, C., Pardo Buendía & Valladares, F. 2006. **Cambio Global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra**. CSIC, España.

DWRC. 2000. **CALSIM Water Resources Simulation Model**. Department of Water Resources, BayDelta Office, California

Estrada-Porrúa M., 2001. **Cambio Climático Global: Causas y consecuencias**. Revista de Información de análisis (16), 7- 17. INEGI

García R., 2011. **Simulación numérica del transporte de contaminantes, en el Río Grande de Morelia**. Tesis de Maestría. México. D.F.

Grigg, N. S., 1996. **Water Resources Management: Principles, Regulations, and Cases**. New York: McGraw-Hill, ISBN10: 007024782X.

Hernández, B. L. 2007. **Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar**. Tesis doctoral. Valencia, España.

Hernández B.J., 2011. **Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos**. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil UMSNH. pp 200.



Hornsby A. 2000. **Agua Subterránea: El Recurso Oculto**. Departamento de Ciencias de la Tierra y el Agua, Servicio Cooperativo de Extensión, Instituto de Ciencias Alimenticias y Agrícolas, Universidad de Florida.

IPCC. 2007. **Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático**. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido).

IPCC. 2012. **Managing the Risks of Extreme Events and Disasters to Advance Climate Change Adaptation**. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido).

Johansen, B. O. 1999, 17 reimpresión. **Introducción a la teoría general de sistemas**. Limusa-Noriega Editores, México D. F.

Karpack, L.M., y R.N. Palmer, **The Use of Simulation Modeling to Evaluate the Effect of Regionalization on Water Supply Performance**, Water Resources Series Technical Report No. 134, University of Washington, Seattle, Washington, March 1992.

Labadie, J. 1995. **MODSIM: River basin network flow model for conjunctive stream-aquifer management**. Department of civil engineering of Colorado State University.

Llamas, R. M., Fornés J. M., Hernández-Mora N. y Martínez L. 2001. **Aguas subterráneas reto y oportunidades**. Serie ciencia y economía No. 5. Fundación Marcelino Botín y Ediciones Mundi-Prensa, Madrid, España.

López D. C., Cavazos R. A., Ferriño A. L. y Vera J. A., 2012. **Indicadores hidrológicos en el cambio climático en la cuenca del Río Pílon**. Memorias del XXII Congreso Nacional de Hidráulica. Asociación Mexicana de Hidráulica.

Loucks, D. P., Salewicz, K. A., y Taylor, M. R.: **IRIS: An Interactive River System Simulation Model, General Introduction and Description**, International Institute for Applied Systems Analysis, Laxenburg, Austria, 1990.

Loya, J.E. 2013. **Medidas de mitigación al efecto de cambio climático en la demanda urbana de la cuenca del río grande de Morelia**. Tesis de Licenciatura,



Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 160pp.

Martínez, A. K y Schlüpmann. K. 1993. **La ecología y la economía**. Fondo de Cultura Económica, México, D.F.

Ortiz, R. G. 2001. **Administración del agua. Aplicación de instrumentos de política hidráulica en escenarios alternativos**. IMTA. Jiutepec. México

Palma, B., Conde, C., Morales, R., & Colorado, G. 2007. **Escenarios de cambio climático para Veracruz**. En: Plan Estatal de Acción Climática del Estado de Veracruz.

Samaniego, J. 2009. **Cambio climático y desarrollo en América Latina y el Caribe: una reseña**. Documentos de proyectos, (232).

Sepúlveda, S. 2002. **Desarrollo sostenible microregional: Métodos de planificación local**. IICA. San José, Costa Rica

SUMA, 2011. **Plan Rector, Estrategia de Cambio Climático del Estado de Michoacán**. Gobierno del Estado de Michoacán. Morelia, Michoacán. México.

Témez, J.R. 1977. **Modelo matemático de transformación precipitación-aporación**. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica-ASINEL.

U.S. Environmental Protection Agency (2012). **Inventory of U.S. Greenhouse Gas Emissions and Sinks: Glossary**, <http://www.epa.gov/climatechange/ghgemissions/usinventoryreport.html>

Periódico Oficial del Estado de Michoacán de Ocampo (2014). **Ley de Cambio Climático del Estado de Michoacán de Ocampo**. Sección Séptima, No. 71, pub. 21 de enero del 2014.