



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



MCIA
Maestría en Ciencias
en Ingeniería Ambiental
UMSNH

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

**PROGRAMA DE MAESTRÍA EN CIENCIAS
EN INGENIERÍA AMBIENTAL**

**Medidas de adaptación al cambio climático en la gestión de recurso
hídrico en la cuenca del río Grande de Morelia**

TESIS

Para obtener el grado de

MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

Presenta

JUAN ENRIQUE LOYA VILLAGÓMEZ

Ingeniero Civil

Director de Tesis:

Dr. en Ingeniería Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Co-Director de Tesis:

Dr. en Ingeniería Constantino Domínguez Sánchez

Morelia, Michoacán, septiembre del 2016



DEDICATORIA

A mis padres Elisa y Juan Manuel, por todos los años de cariño e incondicional apoyo, porque sin ellos nada de esto habría sido posible.

Gracias por ser un ejemplo de vida.

A mis hermanos Mayarí Yunuén, Yuritzi Viridiana y Dennis Alexei.



AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.

Al programa de Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), por el apoyo otorgado

A la Universidad Politécnica de Madrid, por permitirme realizar mi estancia de investigación
en sus instalaciones.

A la Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe por su dedicación, conocimiento y apoyo a este
trabajo de investigación y a mi formación personal durante estos años.

Al Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por su tiempo dedicado, sus conocimientos y asesoría.

Al Dr. Constantino Domínguez Sánchez por su tiempo dedicado, sus conocimientos y
asesoría.

Al Dr. Luis Garrote de Marcos por su tiempo y esfuerzo durante mi estancia en Madrid.

A mis sinodales, porque gracias a ellos este trabajo se fue enriqueciendo a lo largo de estos
dos años, gracias a sus conocimientos y experiencia.

A mis compañeros y amigos de la Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental porque en
ellos encontré personas grandiosas, sobre todo grandes amigos.

A mi familia por su paciencia y comprensión durante este largo proceso.



RESUMEN

Este proyecto realiza una importante aportación al conocimiento, al implementar una metodología para la identificación de medidas de adaptación o mitigación a corto y largo plazo, donde los sistemas de recursos hídricos se vean afectados por el cambio climático. Dicha metodología considera el análisis físico del sistema de abastecimiento empleando indicadores que reflejen el comportamiento del sistema, así como un análisis del valor económico del agua.

El procedimiento metodológico parte del análisis de los escenarios climáticos futuros que caractericen la variabilidad climática de los diversos modelos climáticos, seguido de la caracterización hidrología de la zona en estudio, para este proyecto se trabajó en la cuenca del río Grande de Morelia. Donde se obtuvo información climática del INEGI para un periodo histórico (1975-2010). Así como de escenarios futuros proyectados por el INECC considerando dos periodos, corto plazo (2015-2039) y largo plazo (2075-2099).

Las medidas de adaptación se identificaron apoyándose del uso de indicadores capaces de caracterizar el comportamiento del sistema de recurso hídrico bajo los efectos del cambio climático, seleccionando los indicadores grado de satisfacción de la demanda (I1) y de calidad de servicio de la demanda (I2) desarrollados por Martín-Carrasco et al. (2012). Estos indicadores evalúan el comportamiento del sistema de abastecimiento, identificando problemas de escasez de agua apoyándose para su uso de un modelo de simulación. Para este estudio se ha trabajado con el modelo de optimización SIMGES.

Para la identificación de medidas de adaptación se analizaron acciones de gestión que permitieran incrementar la garantía volumétrica en el suministro en la demanda urbana de la ciudad de Morelia. Posteriormente, mediante el análisis físico y económico del sistema se identifican las medidas de adaptación que generan mejoras considerables en el comportamiento del sistema.

Palabras clave: recurso hídrico, cambio climático, adaptación.



ABSTRACT

This project makes an important contribution to knowledge, by the implementation of a methodology to identify mitigation measures in the short and long term, wherever water resource systems are affected by climate change. This methodology considers the physical analysis of the supply systems by the use of indicators that reflect the performance of the system as well as an analysis of the water value in terms of economics.

The methodological procedure initiates with the analysis of future climate scenarios that describe the climate variability of different climate models, followed by the hydrological characterization of the basin of study. For this project we worked in the “rio Grande” basin, located in Michoacán Mexico. Historical data was obtained from INEGI from 1975 to 2010. Future scenarios were projected by the INECC considering two periods, short-term (2015-2039) and long term (2075-2099).

Adaptation measures in the region were identified by relying in the use of indicators that describe the behavior of the water resources system under the effects of climate change. These indicators, that were developed by Martin-Carrasco (2012), consist in the selection of demand satisfaction indicators (I_1) and demand service quality (I_2). The indicators evaluate the supply system performance; they identify water scarcity problems with the use of a simulation model. For this study we worked with the optimization model SIMGES.

To identify adaptation measures, management actions were analyzed in order to increase the water supply in the urban demand of Morelia city. Afterward, by the usage of physical and economic analysis; adaptation measures were identified toward the improvement in the system performance.

Keywords: water resources, climate change, adaptation.



Índice

1	INTRODUCCIÓN	1
2	MARCO TEÓRICO	2
2.1	EL CAMBIO CLIMÁTICO Y LOS RECURSOS HÍDRICOS	2
2.1.1	<i>Los modelos climáticos y los escenarios de emisiones</i>	<i>2</i>
2.1.2	<i>Generación de escenarios de cambio climático</i>	<i>5</i>
2.2	LOS PROBLEMAS DE ESCASEZ DE AGUA	6
2.2.1	<i>Métodos que cuantifican la escasez de agua.....</i>	<i>7</i>
2.2.1.1	Empleo de modelos de gestión de recursos hídricos	7
2.2.1.2	Empleo de indicadores.....	13
2.2.1.3	Indicadores de escasez	15
2.3	MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO EN SISTEMA DE RECURSOS HÍDRICOS	15
2.3.1	<i>Metodología a implementar</i>	<i>16</i>
2.3.1.1	Paso 1: Construcción de escenarios de cambio climático	17
2.3.1.2	Paso 2: Configuración del modelo de optimización y/o simulación.....	17
2.3.1.3	Paso 3: Identificación de indicadores que caractericen el cambio climático	18
2.3.1.4	Paso 4: Identificación de un conjunto de medidas de adaptación.....	23
3	OBJETIVOS	30
3.1	OBJETIVO GENERAL.....	30
3.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	30
4	HIPÓTESIS	31
5	JUSTIFICACIÓN.....	32
6	METODOLOGÍA.....	34
6.1	ANÁLISIS Y CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO.....	34
6.2	RECOPILACIÓN DE INFORMACIÓN Y DATOS.....	34
6.3	ANÁLISIS Y VALIDACIÓN ESTADÍSTICA DE LA INFORMACIÓN.....	35
6.4	GENERACIÓN DE MEDIDAS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO.....	35
7	RESULTADOS	36
7.1	ZONA EN ESTUDIO	36
7.1.1	<i>Infraestructura hidráulica</i>	<i>38</i>
7.1.2	<i>Demandas de la cuenca del río Grande de Morelia</i>	<i>40</i>
7.1.2.1	Demanda agrícola	41
7.1.2.2	Demanda Urbana.....	43
7.1.2.3	Método aritmético.....	45
7.1.2.4	Método geométrico	46
7.1.2.5	Método mínimo cuadrado	47
7.1.2.6	Método de la curva exponencial.....	48
7.1.3	<i>Análisis climático.....</i>	<i>52</i>
7.1.4	<i>Estaciones de precipitación.....</i>	<i>52</i>
7.1.4.1	Análisis de consistencia de datos.....	54
7.1.4.2	Independencia en las series de precipitación.....	54
7.1.5	<i>Estaciones hidrométricas</i>	<i>57</i>



7.2	CAMBIO CLIMÁTICO	58
7.3	MODELACIÓN SUPERFICIAL.....	61
7.3.1	<i>Calibración de Modelo Evalhid</i>	63
7.4	MODELACIÓN SUBTERRÁNEA	67
7.4.1	<i>Acuífero de tipo Autovalores</i>	68
7.4.2	<i>Acuífero Morelia-Querendaro</i>	69
7.4.3	<i>Clasificación del acuífero Morelia-Queréndaro</i>	69
7.4.4	<i>Modelación del acuífero Morelia-Querendaro</i>	70
7.5	ESQUEMA DE SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANDE DE MORELIA.....	74
7.6	ESCENARIOS DE ADAPTACIÓN AL CAMBIO CLIMÁTICO	77
7.6.1	<i>Esquemas de simulación de los escenarios propuestos</i>	78
7.6.2	<i>Análisis de escenario de adaptación al cambio climático</i>	81
8	CONCLUSIONES	89
9	RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS	90
10	BIBLIOGRAFÍA	91
11	ANEXO 1	94
11.1	CÁLCULO DE LA CAPACIDAD DE ALMACENAMIENTO DEL RÍO CHIQUITO.....	94
11.1.1	<i>Localización del nuevo embalse</i>	94



Índice de tablas.

Tabla 2-1. Modelos de circulación General (MCG) utilizados para el CMIP5	3
Tabla 2-2. Escenarios climáticos RCP del quinto informe IPCC	4
Tabla 2-3. Rangos para los parámetros de calibración modelo de Témez	9
Tabla 2-4 Valores de los indicadores que definen los criterios de análisis.....	23
Tabla 2-5. Acciones en la gestión aceptadas en el modelo IMA. Fuente Chávez. A, 2012.....	26
Tabla 7-1. Población histórica de las ciudades de la cuenca del río Grande de Morelia.	44
Tabla 7-2. Método Aritmético aplicado a la población de la ciudad de Morelia.	46
Tabla 7-3. Método geométrico aplicado a la población de la ciudad de Morelia.	47
Tabla 7-4. Método mínimo cuadrado aplicado a la población de la ciudad de Morelia.	48
Tabla 7-5. Método de la curva exponencial aplicado a la población de la ciudad de Morelia.	49
Tabla 7-6. Proyección de la población de la ciudad de Morelia.	49
Tabla 7-7. Análisis comparativo de métodos de cálculo de población Morelia.	50
Tabla 7-8. Proyección de la demanda urbana Morelia.	51
Tabla 7-9. Estaciones meteorológicas principales en la cuenca río Grande de Morelia.	52
Tabla 7-10. Tabla de resultados obtenidos de pruebas de homogeneidad.	54
Tabla 7-11. Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación en estación clave 16023.	55
Tabla 7-12. Resultados de independencia de Anderson para estaciones principales.	55
Tabla 7-13. Estaciones hidrométricas seleccionadas en la cuenca río Grande de Morelia.	57
Tabla 7-14. Estaciones de cambio climático en la cuenca río Grande de Morelia.	60
Tabla 7-15. Parámetros de calibración modelo superficial.....	65
Tabla 7-16. Parámetros calibración de microcuencas en modelo Evalhid.....	66
Tabla 7-17. Acciones elementales ejercidas sobre el acuífero Morelia-Querendaro.....	72
Tabla 7-18. Índices de garantía y grado de escases del sistema del río Grande de Morelia.	82



Índice de figuras.

Figura 2-1. Diferencia entre variables, indicadores e índices. Fuente: Lorenz, 1999	14
Figura 2-2. Curva garantía-suministro por zonas para el uso de agua "k"	19
Figura 2-3. Intensidad de los problemas de escasez de agua bajo los valores de I1 e I2.	23
Figura 7-1. Localización de la cuenca del río Grande de Morelia.	36
Figura 7-2. Cuerpos de agua para la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	38
Figura 7-3. Fuentes de abastecimiento en lps. y %. Fuente: Loya, J.	39
Figura 7-4. Módulos de riego de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	41
Figura 7-5. Demandas promedio mensuales del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. Fuente: Loya, J.	42
Figura 7-6. Principales cultivos del Distrito de Riego 020 "Morelia-Queréndaro". Fuente: Loya, J.	42
Figura 7-7. Cultivos por módulos de riego del Distrito de Riego de Morelia. Fuente: Loya, J.	43
Figura 7-8. Áreas urbanas dentro de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	44
Figura 7-9. Comparativa de métodos aplicados para la ciudad de Morelia. Fuente: Loya, J.	50
Figura 7-10. Selección de método de proyección de población Morelia. Fuente: Loya, J.	50
Figura 7-11. Estaciones meteorológicas en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	53
Figura 7-12. Correlograma de estación 16023, para los límites de Anderson. Fuente: Loya, J.	55
Figura 7-13. Estaciones hidrométricas en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	57
Figura 7-14. Estaciones de cambio climático en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	60
Figura 7-15. Proyecciones de precipitación afectadas por el cambio climático. Fuente: Loya, J.	61
Figura 7-16. Proyecciones temperaturas afectadas por el cambio climático.	61
Figura 7-17. Microcuencas río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	62
Figura 7-18. Resultados mensuales en punto de calibración Santiago Undameo.	65
Figura 7-19. Resultados anuales en punto de calibración Santiago Undameo.	66
Figura 7-20. Resultados del año medio en punto de calibración Santiago Undameo.	66
Figura 7-21. Acuífero Morelia-Queréndaro. Fuente: Loya, J.	71
Figura 7-22. Matriz de Transmisividad del acuífero Morelia-Queréndaro. Fuente: Loya, J.	73
Figura 7-23. Matriz de Coeficiente de almacenamiento del acuífero Morelia-Queréndaro. Fuente: Loya, J.	73
Figura 7-24. Calibración piezométrica del acuífero Morelia - Queréndaro. Fuente: Loya, J.	74
Figura 7-25. Esquema de simulación de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.	75
Figura 7-26. Volumen medio anual de calibración en embalse Cointzio. Fuente: Loya, J.	76
Figura 7-27. Volumen mensual de calibración embalse Cointzio. Fuente: Loya, J.	76
Figura 7-28. Esquema de simulación para la familia de escenarios 4 y 5. Fuente: Loya, J.	79
Figura 7-29. Modificaciones del esquema de simulación escenarios 6. Fuente: Loya, J.	80
Figura 7-30. Esquema de simulación para la familia de escenarios 6. Fuente: Loya, J.	81
Figura 7-31. Demanda urbana de Morelia frente a los escenarios propuestos. Fuente: Loya, J.	82
Figura 7-32. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 4.5 corto plazo. Fuente: Loya, J.	83
Figura 7-33. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 4.5 largo plazo. Fuente: Loya, J.	83
Figura 7-34. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 8.5 corto plazo. Fuente: Loya, J.	83
Figura 7-35. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 8.5 largo plazo. Fuente: Loya, J.	84
Figura 11-1. Localización del embalse propuesto para nuestro esquema de simulación.	94



1 INTRODUCCIÓN

El agua dulce representa solo el 3% de los recursos hídricos del planeta, pero solo el 1% está disponible para actividades humanas. En los últimos años, el uso de este recurso ha ido en aumento, siendo la agricultura la mayor consumidora. Esto ha generado una intervención sobre los sistemas hídricos con la finalidad de incrementar la disponibilidad del recurso para satisfacer dichos requerimientos de agua. Pese a los esfuerzos en la gestión, las fuertes presiones debido a un consumo muchas veces por encima de la disponibilidad del recurso, han generado la aparición de problemas de escasez de agua en varias zonas del planeta.

Algunos estudios realizados sobre los impactos del cambio climático predicen a futuro, importantes reducciones de los recursos hídricos variables según la ubicación geográfica. Esto complica aún más la situación actual de escasez de agua que padecen muchos países.

Tomando en cuenta los problemas actuales de escasez de agua, la intensificación futura de estos problemas debido a escenarios de reducción de los recursos hídricos por efectos del cambio climático, se pronostican a futuro nuevos problemas de gestión y dificultades en la identificación de medidas de adaptación.

En México, aún no se trabaja en la identificación de medidas de adaptación al efecto del cambio climático, por lo tanto, se carece de una metodología para evaluar dichas medidas de adaptación, y esta problemática se puede resolver con la metodología aplicada en este trabajo de tesis.

Actualmente, en México se carece de herramientas para la toma de decisión, pero esto se puede resolver con modelos matemáticos de Sistema de Apoyo a la Decisión (SAD) que permiten generar un gran número de escenarios de simulación.

El problema descrito en el párrafo anterior, es también el problema que presenta la cuenca del río Grande de Morelia, ubicada en el estado de Michoacán de Ocampo. Para esta subcuenca, de la Cuenca del Lago de Cuitzeo, no se cuenta con un modelo con el cual se puedan tomar decisiones adecuadas para eficientar los recursos hídricos. Es por ello que para la presente tesis se empleara el SAD AquaTool, porque en él se puede hacer simulación conjunta de la gestión del recurso hídrico.



2 MARCO TEÓRICO

2.1 *El cambio climático y los recursos hídricos*

El crecimiento exponencial de la población en los dos últimos siglos y la búsqueda de la mejora en su calidad de vida, han impulsado un rápido crecimiento tecnológico que conlleva a una sobre-explotación de los recursos naturales del planeta y la aparición de agentes contaminantes, rompiendo su equilibrio y propiciando cambios climáticos a escala global. El cambio climático antropocéntrico se entiende como el “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana, que altera la composición química de la atmósfera y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables” (CMNUCC 1992).

El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC) en sus diferentes reportes señala que el mundo se está calentando, que el clima está cambiando, que muchos de estos cambios están relacionados con los gases efecto invernadero y que estos cambios afectarán a los recursos hídricos (Bates et al. 2008; IPCC 2007; IPCC 2001). Esto ha producido en los últimos años una preocupación científico-social acerca del posible cambio climático inducido por el aumento del dióxido de carbono (CO₂) y otros gases de efecto invernadero (GEI) en la atmósfera, lo que ha dado lugar a importantes investigaciones al respecto.

2.1.1 *Los modelos climáticos y los escenarios de emisiones*

En la actualidad, la herramienta que permite la investigación del clima, sus fluctuaciones y variaciones, son los modelos de circulación general de la atmósfera (MCG). Estos modelos se consideran como una representación numérica basada en propiedades físicas, químicas y biológicas de los componentes del sistema climático, sus interacciones y procesos de retroalimentación (IPCC 2001). Actualmente, los MCG incluyen modelos de funcionamiento de los océanos denominados Modelo de Circulación General Atmósfera – Océano (AOGCM), que se integran en todo el planeta, en escalas espaciales y temporales razonablemente amplias, en rejillas de decenas a cientos de kilómetros. Estos modelos globales proporcionan características a grandes rasgos de los escenarios climáticos debido a su baja resolución.



Por otro lado, la evolución del sistema climático está condicionada por el comportamiento humano, aspecto que no está contenido en los modelos globales. Por ello se recurre a escenarios alternativos de emisiones que tienen en cuenta dicho comportamiento mediante las emisiones de gases de efecto invernadero, las emisiones de aerosoles, cambios de uso de suelo, la demografía, entre otros. Estos escenarios de emisiones se integran con los AOGCM y permiten conocer las posibles variaciones futuras del clima en los supuestos de los diferentes escenarios de emisiones contemplados.

Tabla 2-1. Modelos de circulación General (MCG) utilizados para el CMIP5

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

Referencia. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

Como parte del desarrollo y actualización de los escenarios de cambio climático regionales en México se llevó a cabo el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5 (CMIP5, por sus siglas en inglés) con la participación de centros internacionales como el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C. (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD).

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



limitaciones de los modelos globales, siendo los resultados proyecciones climáticas bajo los diferentes escenarios de radiación (RCP), utilizados en el 5º Reporte de Evaluación del Panel Intergubernamental de cambio Climático(IPCC).

Escenarios de Vías de Concentración Representativas (VCR) o “Representative Concentration Pathways” (RCP’s). Estos son los escenarios más recientes definidos en 2007, los cuales fueron desarrollados por la “Integrated Assessment Modelling Community” (IAMC). Representantes de las comunidades de desarrolladores de escenarios socio-económicos, modeladores climáticos, mitigación y adaptación se juntaron para, de manera colaborativa, desarrollar estos nuevos escenarios. Estos escenarios tienen su nombre de acuerdo al forzamiento radiativo que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m², RCP 4.5 W/ m², RCP 6.0 W/ m² y RCP 8.5 W/ m²,

Tabla 2-2. Escenarios climáticos RCP del quinto informe IPCC

Nombre	Forzamiento radiativo	Concentración (p.p.m.)	Trayectoria	Modelo que provee el RCP
RCP 8.5	>8.5 Wm ⁻² en 2100	>1,370 CO ₂	Aumentando	MESSAGE (Australia)
RCP 6.0	6.0 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 3 Wm ⁻² antes del 2100 y disminuye después	Pico en 490 CO ₂ antes del 2100 y disminuye después	Aumenta y posteriormente disminuye	IMAGE (Países Bajos)

Referencia. Actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional. Informe Final del Proyecto al INECC, 150 pp. Con resultados disponibles en: <http://escenarios.inecc.gob.mx/index2.html>

Aunque los MCGAO presentan razonables semejanzas a escala global, cuando se evalúan fenómenos hidrológicos que requiere trabajar a mayores resoluciones, estos modelos muestran notables discrepancias. Para estudios a mayor resolución, actualmente se aplican diversas técnicas de proyección regional (downscaling) o de regionalización a partir de los MCGAO, obteniéndose los modelos climáticos regionales (MCR), que cuentan con una mayor resolución espacial (entre 50 y 20 km). Estas técnicas de regionalización pueden clasificarse en dos grupos: dinámicos y estadísticos. Los métodos dinámicos se basan en el anidamiento de modelos climáticos que trabajan en cada región tomando las condiciones de contorno de los resultados de los modelos de circulación global. Los métodos estadísticos analizan las relaciones



estadísticas entre las series locales y las regionales. La consideración de aspectos no lineales, estacionariedad o la correlación espacial entre las estaciones dan lugar a diferentes técnicas.

Estos MCR conllevan incertidumbres asociadas a las distintas opciones y composición de los modelos climáticos globales, de las técnicas de parametrización, de resolución numérica y proyección regional.

2.1.2 Generación de escenarios de cambio climático

Con respecto a los pronósticos de las escorrentías, se pueden encontrar en la literatura diversos métodos que posibilitan su determinación. Los métodos más frecuentes son el empleo de la escorrentía directa simulada por los modelos climáticos y el uso de modelos hidrológicos con información de precipitación y temperatura procedente de modelos climáticos. Otros estudios emplean fórmulas climatológicas que en base a la relación entre las variables precipitación, temperatura y evapotranspiración potencial, determinan los valores de escorrentía.

La información que brindan estas proyecciones y su comparativa respecto a valores actuales, es relevante para el conocimiento de los impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Sin embargo, se deben tener presentes dos aspectos.

Primero, estos escenarios tienen una serie de incertidumbres en su determinación. Para minimizar estos efectos, se propone trabajar con un amplio rango de escenarios hidrológicos que permitan estimar un conjunto de potenciales comportamientos futuros, que cuantifiquen el impacto más probable.

Segundo, la información que ofrecen estos escenarios en su periodo histórico, basados directamente en los modelos climáticos no permite reproducir correctamente la complejidad hidrológica de diversas regiones. La información basada en los resultados de modelos hidrológicos se encuentra condicionada debido al sesgo existente en las variables de precipitación y temperatura, siendo la precipitación una de las variables que con más incertidumbre manejan los modelos de cambio climático. Por lo que algunos autores suelen corregir estos sesgos antes de ser usados como información de entrada a los modelos hidrológicos, siendo el método delta el más usado. Aunque se debe tener presente que al usar este método no se incluye normalmente los cambios en la variabilidad entre el escenario del



periodo histórico y el escenario de cambio climático. Por otro lado, algunos autores consideran que no es posible precisar si los resultados con corrección de sesgo o sin corrección son los mejores.

Por ello, en este trabajo se propone trabajar no solo con los valores medios que presentan diferentes modelos climáticos respecto a su periodo histórico, sino también con su variabilidad, y con los datos observados reales de la zona de estudio, permitiendo la construcción de escenarios que capturen, las características de variabilidad de las aportaciones de diversos modelos climáticos y, por otro, las características hidrológicas reales de la zona de estudio.

2.2 Los problemas de escasez de agua

Recientes estudios han mostrado que cerca de 2 billones de personas viven con serios problemas de escasez de agua y es muy probable que estos problemas se incrementen en el futuro debido a diversos factores, entre ellos el cambio climático (World Resources Institute (WRI) 2000). Conocer y valorar estos problemas, es fundamental para el planteamiento de futuras medidas de adaptación en los sistemas de recursos hídricos.

Así que, en la explotación de los sistemas de recursos hídricos pueden surgir deficiencias en el suministro, de forma que no quede totalmente satisfecha la demanda y se produzca escasez de agua. La magnitud de fallo aceptado está limitada por el criterio de la garantía antes definido, y puede tener una o varias causas: la disminución temporal de los recursos naturales (sequía), la falta de capacidad de regulación de las infraestructuras (o reglas de explotación inadecuadas) y el exceso de demanda. En estos casos, es importante distinguir si los déficits son temporales o permanentes. Las sequías producen déficits temporales, que requieren la aplicación de medidas provisionales. Los déficits permanentes muestran una situación estructural de escasez de agua, que requiere medidas a largo plazo en el marco de la planificación hidrológica.

Cada uso de agua, en función de sus características específicas, requiere una garantía en el suministro diferente. Por ejemplo, el abastecimiento urbano necesita un suministro cuya garantía esté próxima al 100%, mientras que el riego puede admitir un nivel de garantía aceptable inferior.

En la explotación normal de los sistemas de recursos hídricos pueden aparecer situaciones en las que se produzcan déficits en el suministro, en cuyo caso la garantía de la



demanda se reduce. Cuando los déficits sobrepasan de manera sistemática los niveles aceptables, de modo que la garantía cae por debajo del mínimo establecido para cada uso aparecen los problemas de escasez.

Básicamente la escasez de agua puede deberse a la falta de regulación (o reglas de explotación de infraestructuras inadecuadas) y/o al exceso de demanda. Además, bajo la hipótesis de cambio climático, que supondría la alteración permanente de las condiciones hidrológicas, también podrían aparecer problemas de escasez de agua en sistemas que inicialmente no los tuvieran.

2.2.1 Métodos que cuantifican la escasez de agua

Con base en relacionar los recursos hídricos con los diferentes usos demandados, se pueden encontrar diversos métodos para la cuantificación de la escasez de agua. En el presente trabajo se agrupan estos métodos en dos grupos: el primero es mediante el empleo de modelos de gestión del recurso hídrico, y el segundo grupo mediante el empleo de indicadores.

2.2.1.1 Empleo de modelos de gestión de recursos hídricos

Una adecuada gestión de los recursos hídricos cara a una planificación, requiere de información con un alto grado de detalle que permita identificar cuáles son los puntos más vulnerables de un sistema frente al problema de escasez de agua, para posteriormente tomar las acciones correspondientes. Este nivel de detalle requiere el uso de modelos de gestión que mediante simulaciones permitan representar los diversos criterios de gestión del agua en el sistema.

Para este tipo de estudios, se pueden encontrar los modelos dirigidos a identificar los problemas actuales de escasez que presenta un sistema de recursos hídricos.

Otros estudios a futuro, evalúan los problemas de escasez de agua debido a los efectos del cambio climático, bajo la valoración de las garantías de atención para cada demanda del sistema sino también respecto al rendimiento de los sistemas de regulación para atender dichas demandas.

En general estos estudios están dirigidos a casos particulares y en su mayoría buscan identificar criterios para el desarrollo de Planes de cuenca futuros, donde se requiere incluir los



efectos del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos, por lo que la información de entrada requiere un alto grado de detalle.

Modelos seleccionados

Con la finalidad de poder trabajar con una serie de modelos que funcionen correctamente de manera conjunta y debido a las ventajas que estos ofrecen, se decidió escoger los siguientes modelos para llegar a los objetivos planteados en este trabajo y descritos más adelante.

Para realizar la simulación del flujo superficial se seleccionó el modelo EVALHID, por otro lado, para la simulación del sistema subterráneo se escogió el modelo AQUIVAL.

Se trabaja con estos modelos para obtener la información requerida para introducir a la plataforma del Sistema de Soporte de Decisión (SSD) AquaToolDMA, mostrando ventaja sobre otros modelos, puesto que, si se utilizaran algunos de los otros modelos se tendrían problemas de compatibilidad o de pérdida de información. Plataforma desarrollada por el Departamento de Ingeniería Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Y de esta plataforma se utilizará el módulo de simulación de la gestión del recurso hídrico SIMGES

A continuación, se describen de manera detallada cada uno de los modelos seleccionados.

- **EVALHID** (Modelación del flujo superficial)

El programa EVALuación de los recursos HÍDricos (EVALHID) es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía (MPE) en cuencas complejas y con objeto de evaluar la cantidad de recurso hídrico producido en ellas.

Este es un modelo de aplicación semidistribuida. Esto quiere decir que la cuenca a ser modelada se divide en subcuencas y en cada una se plantea uno de los modelos disponibles en el programa. Requiriendo para cada una de ellas datos de series temporales de precipitación, evapotranspiración potencial (ETP) y la superficie de la subcuenca para un mismo período. En general, también es necesaria la disponibilidad de datos aforados, restituidos a régimen natural, que permitan la calibración de los parámetros del modelo (Paredes et al., 2011).

Los modelos matemáticos disponibles en esta herramienta son el modelo de Témez (Témez, 1977), el modelo HBV (Bergstrom, 1995), el modelo Sacramento (Burnash et al.,



1973), el modelo GR4J (Perrin et al., 2003), el modelo GR2M y el modelo AWBM, empleando para este proyecto el de Témez debido a los pocos parámetros requeridos, además de ser un modelo ampliamente probado.

Modelo de TÉMEZ. - Es un modelo agregado de simulación de cuencas del tipo lluvia-escurrimiento. Este modelo no considera la distribución espacial de las variables y parámetros que intervienen en los cálculos y que se sustituyen por valores medios. Debido a esta simplificación, el modelo de Témez se utiliza solo para cuencas pequeñas e intermedias cuando éstas tienen cierta homogeneidad climática, edafológica y geológica, para cuencas de gran tamaño es necesario realizar divisiones en cuencas más pequeñas, funcionando, así como un modelo semiagregado.

Es un modelo de pocos parámetros y el balance de humedad está constituido por el flujo de entrada (precipitación), el cual se reparte en flujos salientes, intermedios y de almacenamiento intermedio.

Los componentes de este modelo son los siguientes:

- Flujos de entrada: la precipitación
- Flujos de salida: la evapotranspiración real, la aportación superficial y la aportación de origen subterráneo
- Flujos intermedios: únicamente la infiltración, agua que pasa de la parte superior del suelo a la zona inferior o acuífero, donde se considera que el tiempo de paso de este flujo por el suelo es inferior al tiempo de simulación (el mes), por lo que la infiltración se identifica con la recarga al acuífero durante el mes “t”.
- Almacenamientos intermedios: la humedad del suelo, y el volumen almacenado en el acuífero.

Los valores dentro de los cuales se recomienda oscilar los parámetros de Témez, se concentran en la Tabla 2-3.

Tabla 2-3. Rangos para los parámetros de calibración modelo de Témez

Parámetro	Mínimo	Máximo
Hmáx	50	250
C	0.2	1
Imáx	10	150
α	0.001	0.9



- **AQUIVAL** (Modelación del flujo subterráneo)

AQUIVAL es un módulo que permite la integración de modelos de acuíferos previamente calibrados en la simulación de recursos hidráulicos, auxiliando al usuario en la modelización por el método de los autovalores, facilitando la entrada de datos mediante un entorno gráfico. La principal característica de este modelo de parámetros distribuidos es la eficiencia computacional, que reduce el tiempo y la memoria utilizada” (Andreu, 2007).

El método de los autovalores (Sahuquillo, 1983) permite obtener una solución analítica de la ecuación lineal del flujo de agua subterránea en dos dimensiones. Se basa en la utilización de la técnica de separación de variables para encontrar soluciones a ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. La separación de la ecuación del flujo conduce a dos problemas. Uno, en el que la variable independiente es el tiempo, que viene expresado por una ecuación diferencial ordinaria lineal y de primer orden y una condición inicial asociada. Otro, en el que las variables independientes son las coordenadas espaciales, que viene expresado por un problema regular de Sturm-Liouville. Donde la solución a este problema consiste en encontrar valores del parámetro desconocido para los cuales la ecuación diferencial tiene soluciones distintas de la trivial. Los valores del parámetro se llaman autovalores (Andrés Sahuquillo *et al.*, 2008).

- **SIMGES** (Modelación conjunta de la cantidad)

Este modelo, es un modelo para la Simulación de la Gestión de cuencas, o bien, simulación de recursos hídricos complejos.

Una de las grandes ventajas que presenta este modelo, es que permite cualquier configuración de la cuenca, sin importar la cantidad de datos o cuan compleja sea nuestra zona de estudio, la única limitante que se puede encontrar, es la capacidad del equipo de cómputo a utilizar.

En este modelo, la gestión de los recursos se realiza mediante reglas de operación de la cuenca que buscan mantener un nivel similar al de llenado en los embalses a partir de curvas de zonalidad de embalse, estas reglas de operación las establece el usuario.

La simulación en SIMGES se realiza por mallado, el cual es establecido por el usuario, además de que se realiza a nivel mensual.



Los elementos que considera SIMGES son los que a continuación se enlistan:

- Embalses
- Aportaciones intermedias
- Conducciones
- Demandas consuntivas
- Elementos de retorno
- Demandas no consuntivas
- Recargas artificiales
- Bombeos adicionales
- Acuíferos

Además, el modelo permite la definición de caudales mínimos ecológicos, así como asignar prioridades para el aprovechamiento del recurso hídrico estudiado.

Los resultados del modelo incluyen la evolución de variables de interés a nivel mensual, anual, y valores medios del periodo simulado, así como el considerar garantías según el tipo de demanda que se desee suministrar.

Por lo tanto, este modelo puede ser utilizado, 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.

El grupo de "Garantías" permite definir los criterios para la identificación de fallos por cada uno de los criterios de garantía mostrados a continuación, los cuales son con los que toma en consideración el modelo SIMGES:



Tipo mensual

- Fallo en un mes si el déficit es mayor que un 1% de demanda mensual.

$$G = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de meses totales}} \right) * 100$$

Tipo anual

- Fallo en un año si en un mes el déficit es mayor que un 15% de demanda mensual o en el año es mayor que 30% de la demanda anual.

$$G = \left(1 - \frac{n^{\circ} \text{ de fallos}}{n^{\circ} \text{ de años totales}} \right) * 100$$

Garantía basada en frecuencia de fallo no permite evaluar:

- Posible magnitud catastrófica del fallo
- Concentración de fallos en un periodo

Criterios basados en déficit:

- Máximo déficit mensual
- Máximo déficit en n meses consecutivos

Criterio Planes Hidrológicos 81

- Demanda Urbana
 - Fallo mensual si suministro < 0.8% demanda
 - Cumple si garantía > 96%
- Demanda industrial /agrícola /otras
 - Fallo anual si
- En algún mes suministro < 0.75 demanda
- En 2 meses consecutivos suministro < 0.8 demanda en cada uno

Criterio UTAH-DWR (Demanda Agrícola)

- Criterios
 - a 1año: fallo < 10% demanda anual
 - a 2 años: fallo < 16% demanda anual
 - a 10 años: fallo < 30% demanda anual



- Cumple si no se da fallo en ningún criterio.

(Muy usado en Planes Hidrológicos en España)

Criterio IPH 2008 (Demanda Urbana)

A efectos de la asignación y reserva de recursos se considerará satisfecha la demanda urbana cuando:

- a) El déficit en un mes no sea superior al 8% de la correspondiente demanda mensual.
- b) En diez años consecutivos, la suma de déficit no sea superior al 10% de la demanda anual.

2.2.1.2 Empleo de indicadores

En el sector del agua se emplean habitualmente dos tipos de indicadores: ambientales y socioeconómicos. Los primeros se emplean en el análisis y evaluación del estado ecológico de las aguas y en el estudio de la sostenibilidad del uso de los recursos hídricos dentro de los ecosistemas. Los segundos son práctica habitual en las evaluaciones de recursos hídricos regionales y mundiales, permitiendo tener en cuenta problemáticas sociales, políticas y económicas que afectan o que resultan afectadas por el agua.

En ambos casos, el uso de indicadores es sumamente útil por su papel clave en la mejora de la toma de decisiones. Los indicadores ambientales permiten incorporar el conocimiento ambiental a la fase de evaluación y análisis de políticas públicas para su ajuste. En el caso de las evaluaciones globales y regionales de recursos hídricos, realizadas fundamentalmente en países en vías de desarrollo, los indicadores tratan de presentar los fenómenos complejos de este sector de manera completa y comprensible, y establecer criterios comparativos para analizar los cambios que se producen en el sector, tanto a nivel espacial como temporal, de forma que los responsables políticos se involucren en la gestión eficaz de estos recursos.

Un indicador, que comprende un dato único (una variable) o un valor resultante de un conjunto de datos (agregación de variables), describe un sistema o proceso que tiene significado más allá del valor literal de sus componentes. Pretende comunicar información sobre el sistema o proceso. El criterio predominante en que se basa la especificación de un indicador es el conocimiento y el juicio científico.

Un índice es una agregación matemática de variables o indicadores, frecuentemente a través de diferentes unidades de medida, de modo que el resultado es adimensional. Un índice pretende proporcionar información compacta y orientada para el desarrollo de la gestión y de las políticas. En un índice, el énfasis no se pone en la justificación científica, sino en que responda a las necesidades de la sociedad.

Lorenz (1999) ha mostrado, ver Figura 2-1, la diferencia entre variables, indicadores e índices, que representan los diferentes estadios de contraste de la información. Los indicadores toman variables y las condensan en conjuntos de información manejables, que se condensan posteriormente en índices. Estos pueden traducirse en información orientada a la política.

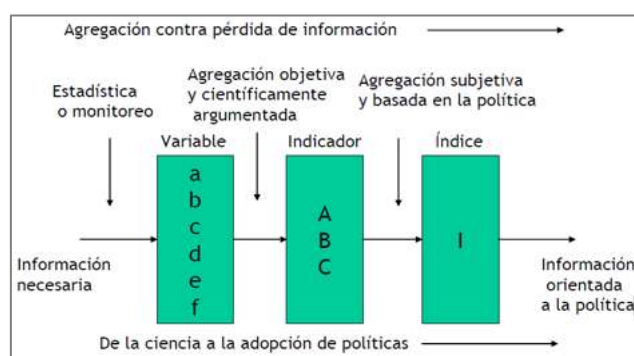


Figura 2-1. Diferencia entre variables, indicadores e índices. Fuente: Lorenz, 1999

En el sector del agua, los indicadores pueden proporcionar diversos tipos de información que se enumeran a continuación (ONU/WWAP 2003):

- I. Descriptiva: reflejando el estado de los recursos y el funcionamiento de los sistemas de aprovechamiento.
- II. Reveladora de tendencias: la medida periódica de los indicadores proporciona series temporales que pueden mostrar tendencias que proporcionarían información sobre el funcionamiento de los sistemas o sobre su respuesta a la gestión.
- III. Comunicación: los indicadores pueden ser un instrumento para comunicar de forma sencilla objetivos y/o resultados.
- IV. Evaluación: mediante comparación del valor de un indicador con un valor de referencia que representa una situación deseable.
- V. Predicción del futuro: mediante la vinculación de indicadores a modelos se puede extender la serie temporal de valores del indicador y estimar su evolución futura.



2.2.1.3 Indicadores de escasez

En Lama, B. (2011) se describen algunos de los indicadores y criterios cuantitativos más empleados en el estudio de la escasez de agua, así como su ámbito de aplicación y datos necesarios para su cálculo. Mientras los indicadores ambientales suelen construirse a través de métodos reglados, es habitual que los indicadores de escasez de agua o de disponibilidad de recursos hídricos no respondan a un método normado.

Así, de los indicadores que menciona, en este proyecto se pretende trabajar con los indicadores de eficiencia desarrollados por Martín-Carrasco *et al.* (2007). Estos indicadores de eficiencia necesitan del cálculo de las garantías con la que se realizan los suministros. La garantía de la demanda puede obtenerse aplicando cualquier criterio, a partir de los déficits mensuales en los que ha incurrido el sistema en servicio.

2.3 Medidas de adaptación al cambio climático en sistema de recursos hídricos

Debido al continuo crecimiento en el uso del recurso hídrico, en pocas décadas el agua pasó de ser abundante y casi ilimitada, a ser un bien cada vez más escaso. Ante este aumento gradual pero constante de los requerimientos de agua, la respuesta de la gestión fue el aumento periódico de la oferta mediante la regulación de la cuenca, con el fin de aumentar la disponibilidad hídrica. Lo que propició la investigación de medios que permitan alcanzar la expansión óptima de los sistemas de recursos hídricos con el fin de satisfacer el incremento que sufrirían las demandas en tipo y cantidad en el futuro.

A futuro las diferentes variables que componen un sistema de recursos hídricos se encuentran rodeadas de incertidumbre. Para tomar decisiones en la gestión de dicho recurso se hace necesario limitar estas incertidumbres. Debido al cambio climático también se pueden encontrar estudios sobre la valoración de estas incertidumbres.

Por otra parte, por efecto de dicho cambio, los caudales se ven significativamente afectados por los fuertes cambios en las variables hidrológicas como precipitación y temperatura, tanto en magnitud como en variabilidad, con impactos importantes en la disponibilidad del recurso hídrico y en las demandas. Provocando una intensificación en los problemas de escasez de agua que actualmente sufren muchos países, poniendo en riesgo el futuro comportamiento de los sistemas de recursos hídricos. Las prácticas de gestión hídrica



actuales pueden no ser suficientemente sólidas para contrarrestar dichos efectos sobre la fiabilidad del abastecimiento, la agricultura, los ecosistemas acuáticos, etc, debido a su falta de manipulación para poder manejar las incertidumbres ligadas al cambio climático. Por lo que se hace necesario identificar medidas de adaptación que brinden información que permita minimizar o eliminar de manera anticipada estos cambios.

El término *adaptación* tiene variados significados, entendiéndose en términos generales como “un ajuste en el comportamiento y características de un sistema que mejoran su capacidad para lidiar con el estrés externo”. Referido al cambio climático el IPCC define la adaptación como un “ajuste de los sistemas ecológicos, sociales o económicas en respuesta a estímulos climáticos reales o previstos y sus efectos o impactos" (IPCC 2001).

El empleo de modelos de gestión de recursos hídricos es también una herramienta importante para el estudio de los impactos del cambio climático y la identificación de las necesidades de adaptación del recurso hídrico. Diversos modelos han sido empleados como herramienta para la identificación de medidas de adaptación,

2.3.1 Metodología a implementar

Para las medidas de adaptación más viables que se puedan identificar para nuestro proyecto, se emplea la metodología descrita a continuación, la cual fue desarrollada en la Universidad Politécnica de Madrid por Chávez, A. *et al.* (2012), que consiste en un procedimiento iterativo que permite identificar un conjunto de medidas de adaptación que mejora el comportamiento de un sistema de recursos hídrico afectado por el cambio climático. Esta metodología se configura bajo el desarrollo de cuatro pasos:

- Paso 1: Elaboración de escenarios de simulación hidrológica que permitan estimar la disponibilidad hídrica futura bajo la hipótesis de cambio climático;
- Paso 2: Configuración de un modelo de optimización y/o simulación del sistema de recursos hídricos, que permita conocer la respuesta del sistema a una demanda determinada;
- Paso 3: Identificación de un conjunto de indicadores que permitan caracterizar el comportamiento de un sistema de recursos hídricos afectado por el cambio climático, mediante el rendimiento del mismo a partir de la cantidad y la calidad del servicio que



proporciona, y de criterios, que permitan calificar la gravedad de los problemas de escasez de agua; y

- Paso 4: Identificación de un conjunto de medidas de adaptación que mejoren el comportamiento de un sistema afectado por el cambio climático.

Cada uno de estos pasos se desarrolla a continuación.

2.3.1.1 Paso 1: Construcción de escenarios de cambio climático

Los escenarios para el análisis de los efectos del cambio climático sobre un sistema de recursos hídricos se construyen mediante la perturbación de series simuladas de aportaciones (denominadas aportaciones de control), que reproducen las aportaciones observadas en régimen natural de la zona de estudio.

Estas alteraciones proceden de la comparación de las series temporales de aportaciones futuras procedentes de modelos climáticos respecto a las aportaciones de control de dichos modelos.

Previsiblemente el cambio climático afectará tanto a las aportaciones como a las demandas y al desarrollo de nueva infraestructura de regulación. Sin embargo, en este estudio se variaron las aportaciones en el escenario futuro, con el fin de conocer el comportamiento de los sistemas de recursos hídricos actuales a la variación en las aportaciones por efecto del cambio climático.

Para la valoración de dicho comportamiento se eligieron dos periodos de análisis:

- 1) Periodo de control: Compuesto por valores de aportaciones, demandas y volúmenes de regulación correspondientes al periodo actual.
- 2) Periodo futuro: Compuesto por varios escenarios, cada uno de ellos conformado por las demandas y los volúmenes de regulación actuales combinados con series alternativas de aportaciones a corto y largo plazo (escenarios hidrológicos futuros - PHF).

2.3.1.2 Paso 2: Configuración del modelo de optimización y/o simulación.

El aprovechamiento de los recursos hídricos puede ser demasiado complejo. En ausencia de un conocimiento perfecto, se representa de forma “sencilla” mediante el concepto de sistema.



Este permite modelar la explotación de los recursos hídricos como un conjunto de elementos, dinámicamente relacionados, que desarrollan una actividad para alcanzar el objetivo de satisfacer unas demandas. De este modo, se puede definir un modelo de gestión de agua como una herramienta de ayuda en la toma de decisiones, para el buen uso económico, social y medioambiental de los recursos hídricos; entendidos como el conjunto formado por el sistema natural, los requerimientos de agua y la infraestructura.

En esta tesis, la construcción del modelo de simulación busca a través del rendimiento del sistema, si la modificación de las condiciones hidrológicas puede poner en riesgo su funcionamiento y así como identificar aquellas medidas que permitan la mejora del rendimiento bajo la presión del cambio climático.

2.3.1.3 Paso 3: Identificación de indicadores que caractericen el cambio climático

Como se menciona en el apartado 2.2.1.3, se han seleccionado los indicadores de eficiencia propuestos por Martin-Carrasco *et al.* (2012) los denominados Índice de satisfacción de la demanda (Demand Satisfaction Index - I_1) y Índice de confiabilidad de la demanda (Demand Reliability Index - I_2), entre otros que permiten la evaluación cuantitativa de los sistemas de recursos hídricos a partir de las garantías con la que se realizan los suministros.

La base para la evaluación del funcionamiento del sistema es el cálculo de la garantía con la que se sirven las demandas. Estas se pueden agrupar en categorías dependiendo del uso que se hace del agua (urbano, agrícola, industria, etc.) y de su importancia para la cuenca. Para cada categoría “k”, se determina el nivel de garantía aceptable “rk”, dependiendo de la naturaleza de la demanda y de los requisitos para el uso del agua. La garantía aceptable será la probabilidad, expresada en tanto por ciento, que el sistema sea capaz de servir adecuadamente a la demanda. Considerando para agrícola, un nivel de garantía aceptable puede ser el 85%, mientras que para abastecimiento urbano deber ser mucho más exigente, en torno al 100%.

El análisis gráfico del funcionamiento del sistema, para cada categoría de demanda, se realiza mediante la curva de Garantía vs. Demanda de la Figura 2-2. Esta curva representa los volúmenes acumulados de las demandas que son servidas con una garantía igual o superior a unos valores determinados.

Todos los datos que se necesitan para representar dicha curva se obtienen de los resultados del modelo de simulación del sistema. El conocimiento de los déficits mensuales, producidos durante el periodo de análisis, permite calcular las garantías con las que se han realizado los suministros.

Para su uso en el contexto del cambio climático, el modelo de simulación deberá simularse con diferentes entradas de agua, procedentes del estudio de la alteración de las aportaciones por este fenómeno.

○ Construcción de la Curva de Garantía – Suministro

La cuantificación de los indicadores I_1 e I_2 se basa en el cálculo de las garantías con las que se sirven las demandas. Para cada categoría de demanda (uso del agua) “k”, el análisis gráfico de estos datos se realiza mediante la curva de Garantía-Suministro Figura 2-1. Esta curva representa los volúmenes acumulados de las demandas que son servidos con una garantía igual o superior a unos valores determinados y de ella se obtienen posteriormente los datos que permiten el cálculo de los indicadores I_1 e I_2 .

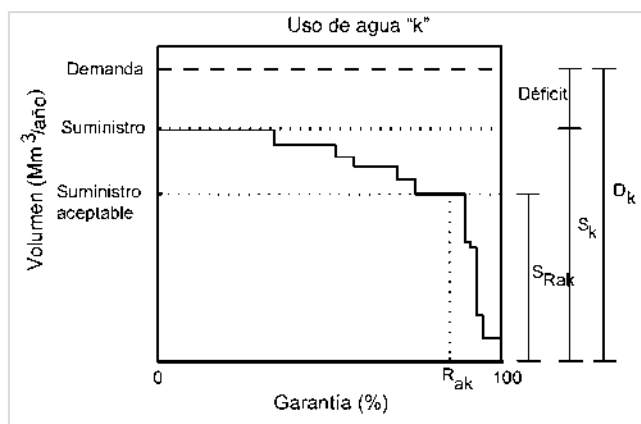


Figura 2-2. Curva garantía-suministro por zonas para el uso de agua “k”.

La construcción de la curva de Garantía-Suministro (G-S) se describe a través de las siguientes operaciones:

- 1) Para cada una de las demandas individuales de un mismo tipo de uso del agua “k”, se determinan los suministros mensuales “ S_{kjt} ” a lo largo del periodo de análisis:

$$S_{kjt} = D_{kjt} - d_{kjt}$$



Donde k = Subíndice del tipo de demanda ($k = 1, 2, \dots, K$); j = Subíndice que identifica a cada una de las demandas de la clase k ($j = 1, 2, \dots, J$); t = Subíndice que identifica los meses del periodo de análisis ($t = 1, 2, \dots, 12T$); T = Número de años del periodo de estudio; D_{kjt} = Demanda mensual requerida (hm^3); d_{kjt} = Déficit mensual (hm^3), resultado del modelo de optimización.

2) Con los datos del apartado anterior, para cada una de las demandas individuales, se calcula la garantía de suministro “ R_{kj} ” correspondiente al periodo de análisis. La garantía de la demanda puede obtenerse aplicando cualquier criterio a partir de los déficits mensuales en los que ha incurrido el modelo. Debe expresar la probabilidad, en tanto por ciento o en tanto por uno, de que el sistema sea capaz de servir adecuadamente la demanda. Mayor información sobre la determinación de la garantía, que describe la probabilidad de un sistema al fallo se puede encontrar en (Estrada Lorenzo 1994; Estrada Lorenzo and Luján García 1993; Hashimoto et al. 1982; Kjeldsen and Rosbjerg 2004).

3) Determinación del suministro total para cada una de las demandas individuales de un tipo de uso de agua “ k ”, en el periodo de estudio con la ecuación:

$$S_{kj} = \sum_{t=1}^{12N} S_{kjt}$$

4) Conocidos de cada usuario S_{kj} y R_{kj} , se ordenan, de mayor a menor garantía estas parejas, resultando (R_{kn}, S_{kn}) . Donde n = Subíndice que identifica la posición en una serie ordenada ($n = 1, 2, \dots, J$); S_{kn} = Suministro total (Hm^3), correspondiente a una demanda individual con garantía R_{kn} , que ocupa la posición n -ésima en una serie ordenada de mayor a menor garantía.

5) A partir de la serie ordenada del apartado 4, se calculan los valores del suministro acumulado con garantía mayor o igual a cada uno de los valores de la garantía obtenidos en el apartado 2 con la ecuación siguiente:

$$S_{kN} = \sum_{n=1}^N S_{kn}$$



Donde N = El número de términos que se consideran en la suma acumulada de la serie ordenada de suministros S_{nk} ($N=1,2,\dots,J$); S_{kN} = Suministro acumulado (hm^3), correspondiente a una garantía mayor o igual a R_{kN} .

6) Se representan gráficamente los pares de puntos (R_{kN}, S_{kN}) para cada uso de agua k de una zona de estudio, obteniéndose la curva mostrada en la Figura 2-2. Curva garantía-suministro por zonas para el uso de agua “ k ”.

En esta curva también se ilustra D_k , y S_k , las cuales se determinan mediante las ecuaciones siguientes respectivamente.

$$D_k = \sum_{j=1}^j \sum_{t=1}^{12T} D_{kjt}$$

$$S_k = \sum_{n=1}^j S_{kn}$$

Donde D_k = Volumen de la demanda total de la clase k solicitada al sistema durante el periodo de análisis (hm^3); S_k = Volumen total suministrado (hm^3) por el sistema para la clase k , durante el periodo de análisis.

Para cada uso de agua k , se determina el nivel de garantía aceptable “ R_{ak} ”, dependiendo de la naturaleza de la demanda y de los requisitos para el uso del agua. De la curva G-S se obtiene “ S_{Rak} ” que es el volumen total suministrado por el sistema durante el periodo de análisis con garantía mayor o igual que “ R_{ak} ”.

○ Indicadores de eficiencia y sistema de clasificación de los problemas de escasez

Grado de satisfacción de la demanda I_1

El grado de satisfacción de la demanda valora la capacidad del sistema para atender sus demandas. Para cada categoría de demanda, se cuantifica mediante un indicador de satisfacción I_1 , calculado como el cociente entre la demanda servida y la demanda solicitada:

$$I_1 = \frac{S}{D}$$

Ecuación del indicador de satisfacción del sistema



Los valores de este indicador son iguales o menores que 1. Si los valores del indicador son altos, el sistema tiene poco déficit, debido a que es capaz de suministrar la mayor parte de la demanda que se le solicita. Los sistemas con indicador alto son menos vulnerables a la escasez, entendiendo como vulnerabilidad la magnitud de los daños producidos debido a la demanda que se deja insatisfecha. Cuando el indicador es bajo, el sistema sólo puede suministrar una parte pequeña de la demanda que se le solicita, lo que significa que el sistema es vulnerable ante la escasez. La razón de esta escasez (exceso de demanda, gestión inapropiada del sistema hidráulico, conflicto entre las demandas consuntivas y no consuntivas, carencia de infraestructuras, etc.) se puede analizar con la ayuda de los restantes indicadores.

Calidad de servicio de la demanda I_2

La calidad del servicio de la demanda valora la bondad con que el sistema satisface sus demandas. Para cada categoría de demanda, se cuantifica mediante el indicador I_2 , calculado como cociente entre la demanda servida con garantía aceptable y la demanda total solicitada:

$$I_{2k} = \frac{S_k^{rk}}{D}$$

Ecuación del indicador de calidad de servicio del sistema

Un valor alto de este indicador significa gran confianza en el que las demandas se satisfagan de modo aceptable. Se trata de sistemas fiables o robustos, que servirán sus demandas incluso en situaciones de escasez. Un valor bajo de este indicador significa que el sistema sirve sus demandas de forma no aceptable y es propenso a sufrir escasez incluso bajo sequías de moderada intensidad. Finalmente, es fácil comprobar que el valor de este indicador es siempre inferior al valor del indicador de satisfacción I_1 .

Estos indicadores en forma conjunta, permiten la identificación de problemas de escasez de agua con diferentes intensidades, a través del análisis del comportamiento del sistema. El sistema de clasificación de dichos problemas se basa en tres rangos: favorable, neutro y desfavorable; los cuales se encuentran acotados por los siguientes valores de los indicadores I_1 e I_2 se muestran en la Tabla 2-4:

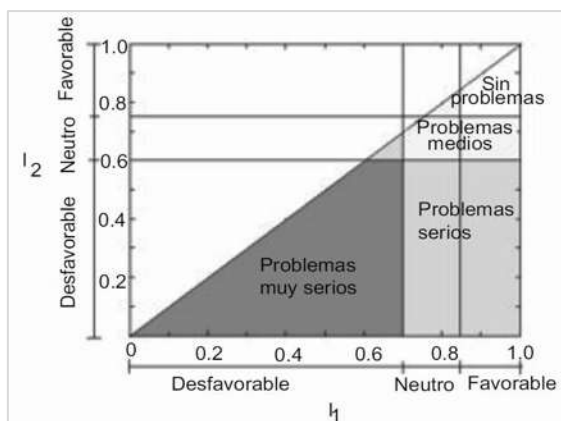


Figura 2-3. Intensidad de los problemas de escasez de agua bajo los valores de I_1 e I_2 .

Se sugiere que valores de I_1 inferiores a 0.7 deben considerarse desfavorables, mientras que no se deben considerar favorables hasta que no superen 0.85. Para I_2 se aconseja que valores inferiores a 0.6 se consideren desfavorables y no sean considerados como favorables hasta que no superen 0.75. No obstante, otros valores subjetivos, basados en la experiencia de los analistas, pueden utilizarse para sistemas que sean bien conocidos; o bien, los límites pueden ser decididos externamente por los responsables de la toma de decisiones.

Tabla 2-4 Valores de los indicadores que definen los criterios de análisis

Indicador	Desfavorable	Neutro	Favorable
I_1	$I_1 < 0.70$	$0.70 \leq I_1 \leq 0.85$	$I_1 > 0.85$
I_2	$I_2 < 0.60$	$0.60 \leq I_2 \leq 0.75$	$I_2 > 0.75$

2.3.1.4 Paso 4: Identificación de un conjunto de medidas de adaptación

En Chávez, A, (2012), la identificación de un conjunto de medidas se realiza de la siguiente manera:

- Construcción del modelo para identificación de medidas de adaptación (IMA).
- Análisis de sensibilidad del sistema frente a la aplicación de acciones en la gestión del recurso hídrico.
- identificación de un conjunto de medidas de adaptación.

i. **Esquema general de construcción del modelo (IMA)**

El poder identificar potenciales medidas de adaptación en un sistema de recursos hídricos, basado en información general que permita la caracterización de los principales



elementos de la cuenca bajo indicadores objetivos proporcionaría una comprensión general de las acciones que potencialmente permitirían la adaptación de los sistemas de recursos hídricos frente a los efectos de cambio climático, así como la identificación de regiones de un sistema que a futuro requieren mayor atención. Bajo estos criterios se emplea el modelo IMA.

Este modelo requiere la construcción del esquema del modelo de la cuenca/sistema, el cual está conformado con los siguientes parámetros de entrada:

- Los elementos que conforman las características físicas del sistema de recursos hídricos. Estos elementos se han agrupado en varios tipos, según su naturaleza:
 - *Por requerimiento de agua:* Como son los diferentes tipos de uso de agua.
 - *Por restricciones:* Como son los caudales medioambientales.
 - *Por infraestructura:* Aquellos elementos que permiten el aprovechamiento y la regulación de los recursos hídricos naturales.
 - *Otros medios de generación de recursos hídricos:* Como son los tratamientos de aguas, la desalinización de aguas de mar o salobres y trasvases.
- Características económicas: El valor económico del agua para cada una de las acciones a realizarse en la cuenca.
- Criterios de asignación del recurso hídricos. Como son las prioridades de uso, garantías aceptables para los diferentes tipos de uso de agua.

Bajo el esquema de la cuenca, la identificación de un conjunto de medidas de adaptación se realiza mediante un proceso iterativo. Este proceso está conformado por cuatro componentes:

- **Componente 1:** Generación de alternativas de adaptación, definidas bajo la aplicación de diversas acciones en la gestión de los recursos hídricos;
- **Componente 2:** Asignación de recursos hídricos mediante el uso del modelo de simulación SIMGES.
- **Componente 3:** Selección de entre las alternativas de adaptación generadas, del mejor comportamiento del sistema de recursos hídricos. La valoración de las mejoras en el comportamiento de un sistema se realiza mediante el uso de indicadores.
- **Componente 4:** Búsqueda del adecuado comportamiento del sistema según criterios del gestor de cuenca. Si bajo la alternativa seleccionada se presenta el mejor



comportamiento del sistema, el análisis finaliza. Si el comportamiento no es el adecuado, se realiza una actualización del sistema con la alternativa de gestión que ha producido el mejor comportamiento y se procede nuevamente al análisis hasta que el comportamiento sea el buscado.

Por lo tanto:

- **Componente 1: Generación de alternativas de adaptación**

Esta generación de alternativas de adaptación busca crear un conjunto de posibles mejoras en el comportamiento de un sistema, de las cuales poder seleccionar la que mejor comportamiento presenta según criterios del gestor de cuenca.

La generación de alternativas de adaptación bajo el enfoque de esta tesis, requiere la aplicación de acciones que modifiquen las propiedades de todos o de ciertos elementos que conforman las características físicas del sistema de recursos hídricos y que forman parte del esquema del modelo a ser simulación. Además, los elementos a ser modificados deben permitir generar mejoras progresivas, es decir, que permitan valorar el comportamiento de un sistema frente a continuas modificaciones de dicho elemento por una determinada acción en la gestión. De esta manera las alternativas de adaptación generadas pueden materializarse en el modelo en estudio con una repercusión cuantificable.

En la literatura se puede encontrar un gran número de acciones en la gestión que pueden aplicarse a un sistema según los problemas que atraviesa y los objetivos de mejoras que se persigan. En la Tabla 2-5 se ilustran algunas de las acciones de gestión que pueden aplicarse bajo el modelo IMA. Estas acciones representan un pequeño grupo del conjunto de posibles acciones que pueden ser aplicadas en un sistema de recursos hídricos.

La aplicación de diferentes acciones en la gestión de un sistema de recursos hídricos permite mejoras físicas en el sistema. Sin embargo, hay que tener presente que la aplicación de dichas acciones tiene asociado un valor económico del agua. Este valor del agua, significa en términos monetarios la utilidad que el agua representa para cada usuario y para cada uso. Este valor del agua varía en el tiempo, sin embargo, en esta tesis se asume trabajar con los valores de agua correspondientes al periodo actual.



Tabla 2-5. Acciones en la gestión aceptadas en el modelo IMA. Fuente Chávez, A, 2012

Características físicas	Elementos	Objetivos	Acción
Requerimientos de agua	Demandas de riego	Reducción de la dotación Cambio en el tipo de cultivo Reducción de las hectáreas de riego Mejora en la eficiencia del riego	Reducción de los volúmenes de agua demandadas
	Demandas de abastecimiento	Mejora en la eficiencia	Reducción de los volúmenes de agua demandadas
Restricciones	Caudales medioambientales	Ajuste de los caudales medioambientales	Incremento o decremento del caudal ecológico
Infraestructura	Aprovechamiento conjunto de aguas superficiales y subterráneas	Aprovechamiento de las aguas superficiales y subterráneas	Modificación de las garantías con las que se atiende un sistema
	Infraestructura de regulación	Incremento de los volúmenes de regulación mediante recrecimiento de embalses	Incremento de los volúmenes de agua suministrada
Otros medios de generación de recursos	Tratamiento de agua	Uso de aguas tratadas	Incremento de los volúmenes de agua suministrada
	Desalinización de agua de mar o salobre	Desarrollo o expansión de desaladoras	Incremento de los volúmenes de agua suministrada

Dado un sistema de recursos hídricos conformado por “N” tipos de elementos (como los mostrados en la Tabla 2-5, se seleccionan “R” de estos “N” tipos de elementos para ser modificados por determinadas acciones, permitiendo la generación de alternativas de adaptación de la siguiente manera:

1. **Cálculo de la acción de gestión a ser aplicada:** Estas acciones se agrupan en dos grupos: reducciones de los volúmenes de agua demandados o incremento en el tamaño de la infraestructura sobre los elementos seleccionados. La determinación del valor de la acción a ser aplicada está dada por la ecuación siguiente:

$$MV_{rs} = \frac{C}{VA_{rs}}$$

Donde r = Subíndice que identifica a cada uno de los tipos de elementos seleccionados para ser modificados por las acciones de gestión (r = 1,2, ...,R); s = Subíndice que identifica a cada uno de los elementos del tipo r (s = 1,2,...,S); C es el coste total impuesto como referencia para el análisis; VA_{rs} es el valor del agua (\$/m³) para cada una de las actuaciones en el elemento s del tipo r; MV_{rs} es la acción de gestión



que representa la reducción de los volúmenes demandados o el aumento del tamaño de la infraestructura.

2. **Generación de alternativas de adaptación:** La generación de este conjunto de alternativas proviene de la alteración de las dimensiones de los elementos que se proponen sean afectados por unas determinadas acciones de gestión para la determinación de medidas de adaptación.

- **Componente 2: Asignación de los recursos hídricos**

La asignación de agua toma en cuenta las características físicas del sistema de recursos hídricos y de los criterios considerados por el gestor de cuenca, como las prioridades en la atención de las demandas del sistema. Estas características se ven reflejadas en el esquema del modelo.

Los criterios para la construcción del modelo, así como la descripción del modelo de simulación SIMGES que usa el modelo IMA para la identificación de medidas de adaptación se han descrito brevemente en el apartado 2.3.1.2 del presente capítulo. Una vez generadas las alternativas de adaptación, se realiza la simulación de cada una de estas alternativas.

- **Componente 3: Selección de entre las alternativas de adaptación generadas, del mejor comportamiento**

La valoración del mejor comportamiento de un sistema afectado por el cambio climático, se realiza mediante el uso de indicadores. Estos indicadores permiten la evaluación cuantitativa de los sistemas de recursos hídricos a partir de las garantías con las que se realizan los suministros. La determinación de estos indicadores, así como la valoración del comportamiento de un sistema bajo los efectos de cambio climático se encuentran descritas en el apartado 2.3.1.3.

El modelo IMA realiza la cuantificación de las mejoras en el comportamiento del sistema, analizando cada una de las alternativas de adaptación generadas. La selección del mejor comportamiento se realiza de la siguiente manera:

1. Cálculo de I_1 e I_2 para cada una de las alternativas de adaptación.
2. Cuantificación de las mejoras en el comportamiento de un sistema. Esta cuantificación se realiza comparando las mejoras generadas por cada una de las alternativas de adaptación



3. Selección del mejor comportamiento. Este mejor comportamiento entre las alternativas de adaptación viene a ser el correspondiente a lo obtenido con los indicadores I_1 e I_2 bajo el elemento que, modificado debido a una determinada acción de gestión aplicada al sistema, permite la mejora del comportamiento del mismo, minimizando los efectos del cambio climático a un mínimo coste.
- **Componente 4: Valoración del comportamiento del sistema bajo unos criterios de óptimo comportamiento**

Se considera que un sistema presenta un óptimo comportamiento cuando no se presentan problemas de escasez de agua. Mediante la valoración bajo I_1 e I_2 este comportamiento se presenta cuando estos indicadores tienen el valor de la unidad (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**). Sin embargo, debido a la característica de los sistemas, de la intensidad en los impactos por efecto del cambio climático, de la forma de gestión de la cuenca, etc., este adecuado comportamiento puede variar según los criterios que impongan los gestores de cuenca y de los riesgos que estén dispuestos a afrontar, pudiendo seleccionarse valores de I_1 e I_2 menores a la unidad.

ii. **Análisis de sensibilidad del sistema frente a la aplicación de diversas medidas de gestión**

La capacidad de respuesta de un sistema de recursos hídricos frente a la modificación de las características de sus elementos debido a la aplicación de determinadas acciones de gestión puede variar, dependiendo de si dichos elementos son o no sensibles a dichas modificaciones.

Por lo tanto, para examinar la sensibilidad del sistema a diversas modificaciones de sus elementos por la aplicación de diferentes acciones de gestión, se propone la modificación de los elementos bajo las acciones seleccionadas por separado y sin la inclusión de los valores del agua correspondientes a dichas acciones, ya que pueden condicionar los resultados. Estos resultados de sensibilidad permiten conocer la respuesta física del sistema a la contribución de cada acción aplicada. Se considera que un sistema tiene alta sensibilidad a una determinada acción cuando al aplicarse dicha acción a un elemento o elementos del sistema, éste experimenta mejoras importantes en su comportamiento, mientras que un sistema tiene baja sensibilidad cuando al aplicarse dichas acciones el sistema no experimenta cambios importantes en su comportamiento.



iii. Identificación de un conjunto de medidas de adaptación

Bajo el conocimiento de aquellos elementos del sistema que alterados por determinadas acciones ofrecen mayor sensibilidad al sistema, se procede a la identificación de un conjunto de medidas de adaptación. En este proceso se considera la incorporación de los valores del agua (aspecto económico) para cada una de las acciones bajo las cuales el sistema ofrece mayor sensibilidad, mediante la aplicación del modelo IMA. Como resultado se obtiene un conjunto de medidas de adaptación que mejorar el comportamiento del sistema de recursos hídrico afectado por los efectos del cambio climático y con un mínimo coste.



3 OBJETIVOS

3.1 Objetivo general

Aplicar una metodología de uso general para identificar medidas de adaptación en sistemas de recursos hídricos, expuestos a los efectos del cambio climático y a un mínimo coste, como lo es caso de la cuenca del río Grande de Morelia. La finalidad es brindar a los gestores de la cuenca del río Grande de Morelia un conocimiento de aquellas medidas que a futuro son más adecuadas, así como la identificación de aquellas regiones que requieren mayor atención.

3.2 Objetivos específicos

- I. Generación de escenarios hidrológicos que contengan las características de variabilidad que presentan diferentes modelos climáticos respecto a sus periodos de control, así como las características hidrológicas de la región de estudio.
- II. Validar teóricamente un conjunto de indicadores que caractericen el comportamiento de los sistemas de recursos hídricos expuestos al riesgo climático en cuencas mexicanas en especial la cuenca del río Grande de Morelia frente a un amplio conjunto de escenarios hidrológicos.
- III. Implementación de la metodología que identifique las medidas de adaptación que permiten minimizar los efectos del cambio climático a un mínimo coste.



4 HIPÓTESIS

La aplicación de la metodología de medidas de adaptación de cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia ayudara a establecer reglas de operación eficientes que permitan obtener una correcta gestión del recurso hídrico.



5 JUSTIFICACIÓN

El impacto inicial del cambio climático en los sistemas hidráulicos es la aparición de déficits en las demandas, sin embargo, falta proponer o analizar metodologías para evaluar las consecuencias de este fenómeno en los sistemas de recursos hídricos.

La búsqueda de alternativas de adaptación, que solucionen o reduzcan posibles problemas de suministro debidos al efecto del cambio climático, depende de la magnitud del impacto, las características del sistema y los recursos disponibles.

Los resultados de estudios hasta ahora realizados sobre los impactos del cambio climático predicen con un alto grado de probabilidad importantes reducciones de los recursos hídricos en el futuro, siendo estas reducciones variables según la ubicación geográfica. Estos resultados complican aún más la actual situación de escasez de agua que padecen muchos países.

Así que brindar un conocimiento general de los impactos que se presentarían a largo plazo en los sistemas de recursos hídricos debido al cambio climático, así como la identificación de medidas de adaptación generales que permitan minimizar dichos impactos, permitiría a los responsables de la gestión del recurso tomar las acciones necesarias para poder minimizar los potenciales impactos, así como conocer las regiones que requieren mayor atención.

En México se carece de una metodología que genere escenarios de cambio climático, así como de escenarios de adaptación a los efectos del cambio climático. Por lo que es necesario desarrollar una herramienta que permita resolver esta problemática para lograr una gestión óptima del recurso hídrico.

Esta necesidad ha motivado la búsqueda de una metodología que permita identificar medidas de adaptación generales a escala de país, permitiendo de esta manera esquematizar las cuencas que la conforman con un nivel de información general, de fácil acceso hoy en día. Además, bajo esta escala de análisis se presenta la posibilidad de poder identificar aquellas cuencas que requieren mayor atención. Para ello se ha buscado que las diferentes herramientas a ser usadas para la determinación de dichas medidas sean de fácil acceso y en lo posible, que brinden resultados de fácil comprensión.



La identificación de dichas medidas de adaptación se basa en el uso de indicadores que permitan caracterizar el comportamiento de un sistema de recursos hídricos frente a los efectos del cambio climático. En el presente proyecto de Tesis se busca que la aplicación de esta metodología permita identificar las medidas de adaptación más adecuadas, hacerle frente a una gestión más detallada del recurso hídrico a futuro.



6 METODOLOGÍA

La metodología a seguir para la realización de este trabajo se integra por varios puntos que van desde la recogida de datos y análisis de la zona de estudio, hasta la realización de las modelaciones y el análisis de los resultados, estos puntos se describen a continuación.

6.1 *Análisis y caracterización de la zona de estudio.*

El primer paso para poder cumplir con los objetivos planeados es la caracterización de la zona de estudio, que se refiere a la información de características propias de la zona de estudio como ubicación geográfica (Región hidrológica, identificación de sistema de cuenca), tipo y uso de suelo, red hidrográfica, cauce principal. Este análisis se realiza con la ayuda de información de mapas vectoriales y de la red hidrográfica, ambos realizados por INEGI y con apoyo del software de Sistemas de Información Geográfica ArcGIS.

6.2 *Recopilación de información y datos.*

Para poder llevar a cabo las modelaciones de cantidad y gestión, son necesarios los recursos y los usos disponibles en la cuenca (Oferta/demanda), datos que serán requeridos por los modelos a utilizar. Así como de evaluar la calidad y confiabilidad de la información, por medio de una o varias pruebas de la consistencia de datos: correlación de datos de estaciones de monitoreo, interpretación de métodos gráficos, análisis estadístico espacial y temporal. Estos datos son:

- i. Recursos superficiales
 - Datos meteorológicos (Precipitación y Temperatura). Estos datos serán obtenidos de la base de datos de Clima Computarizado (CLICOM) a partir de las estaciones climatológicas ubicadas fuera y dentro de la cuenca.
 - Datos de precipitaciones y temperaturas considerando los efectos del cambio climático, los cuales están disponibles para trabajos de investigación en la página del Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC).
 - Las series de evapotranspiración se calculará a partir de los datos de precipitación y temperatura obtenidos anteriormente, utilizando el método de Thornthwaite, tanto para periodo actual como a futuro.



- Gastos en el río principal.
 - Estos caudales se obtendrán de estaciones hidrométricas del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).
- ii. Recursos subterráneos
 - Caracterización del Acuífero Morelia-Querendaro con el modelo Aquival 2.0 considerando lo siguiente:
 - Geometría y condiciones de contorno,
 - Coeficientes de transmisividad, almacenamiento, Porosidad,
 - Conductividad hidráulica,
 - Acciones elementales (Recargas y descargas).
- iii. Usos de la cuenca
 - Demandas urbanas, agrícolas e Industriales.

6.3 Análisis y validación estadística de la información.

Será imperativo realizar una validación de los datos a utilizar en los modelos, para ello se realizará una correlación espacio-temporal para cada estación utilizada y se conocerá su independencia, su sesgo y su consistencia, así como algunos otros estadísticos que ayuden a conocer la calidad de los datos.

6.4 Generación de medidas de adaptación al cambio climático.

Para las medidas de adaptación más viables, se emplea la metodología desarrollada por Chávez, A (2012), descrita en el apartado 2.3.1, que permite identificar un conjunto de medidas de adaptación que mejoran el comportamiento de un sistema de recursos hídrico afectado por el cambio climático.



7 RESULTADOS

A continuación se presentan los resultados parciales obtenidos como parte del avance de proyecto de tesis referentes a la adquisición de los datos necesarios para poder realizar la caracterización de los sistemas estudiados y la modelación hidrológica, que comprende a los datos de estaciones meteorológicas, hidrométricas, demandas urbanas, industriales, distritos de riego así como las series de variables meteorológicas generadas a partir de los escenarios de cambio climático aplicados a la región.

7.1 Zona en estudio

La cuenca pertenece a la Región Hidrológica No. 12 y está comprendida casi en su totalidad en el acuífero Morelia-Queréndaro, formando parte como subcuenca del Lago de Cuitzeo y micro cuenca del Lago de Cuitzeo y Laguna de Yuriria. A su vez esta cuenca se compone por las subcuencas Atapaneo, río Chiquito, Cointzio, Itzícuaró, Lobera y Santiago Undameo.

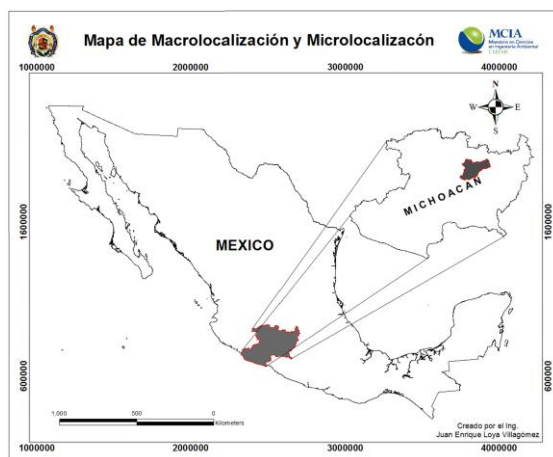


Figura 7-1. Localización de la cuenca del río Grande de Morelia.

La cuenca del río Grande se localiza en la porción centro-norte del estado de Michoacán de Ocampo, entre los paralelos 19°35' y 20°05' de latitud norte y los meridianos 100°45' y 101°25' de longitud oeste. Comprende un área de 1597 km² aproximadamente. Transporta un gasto medio de 60.26 hm³ anuales y presenta una altitud media de aproximadamente 2200 msnm. Abarca casi en su totalidad la superficie de los municipios de Acuitzio, Charo, Huiramba,



Lagunillas, Morelia, y en menor porción Álvaro Obregón, Indaparapeo, Pátzcuaro y Tarímbaro. (Quiroga, Tzintzuntzan y Tacámbaro).

Cabe mencionar que en esta zona del Estado de Michoacán se localiza el mayor número de obras de almacenamiento, entre las que sobresale la Presa de Cointzio, que se encuentra ubicada a 13 km aguas arriba de la ciudad de Morelia, tiene la función de abastecer de agua potable a la ciudad de Morelia y suministrar la mayor demanda del Distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro.

El río Grande de Morelia es el más importante afluente de la región, y este se origina en la unión de los ríos Tiripetio y Tirio aguas arriba de la población del Santiago Undameo, fluye con rumbo noroeste y su caudal es controlado por la presa Cointzio aguas abajo con un gasto medio a la salida del túnel de $1.84 \text{ m}^3/\text{s}$ (BANDAS CONAGUA, 2015).

De la presa de Cointzio hasta su desembocadura en el Lago de Cuitzeo presenta una longitud de aproximadamente 60 kilómetros, así mismo, el río Grande de Morelia toma la función como canal de conducción mientras recibe varias aportaciones que se utilizan para riego. Recibe aportación del río Chiquito y que se une al río Grande en el cruce con la ciudad de Morelia, siendo esta la ciudad más importante y con mayor actividad en el sistema. A partir de esta zona urbana toma rumbo al noreste, constituido por un tramo recto, atravesando de sur a norte los valles Álvaro Obregón-Queréndaro, mediante el denominado río Rectificado de Morelia. Hernández, J, (2014).

El río chiquito de Morelia es el principal afluente del río Grande de Morelia, se origina en la cañada de Jesús del Monte en la región serrana al sureste de la ciudad de Morelia, Michoacán. y tiene una longitud aproximada de 25 km, presentando un escurrimiento de dirección sureste-noroeste cruzando en su totalidad la ciudad de Morelia, donde finalmente se une al cauce del río Grande.

El sistema del río Grande adopta aguas residuales a lo largo de su cauce, así que a 3 km aguas abajo del túnel de salida de la presa Cointzio se encuentra uno de los principales vertedores industriales al afluente del río Grande, la papelería CRISOBA S.A. de C.V. Para sus procesos la planta industrial demanda de manera constante de $11.04 \text{ hm}^3/\text{año}$ (500 l/s)

aproximadamente los cuales son suministrados por el manantial La Mintzita, dicho suministro es retornado al sistema del rio Grande por CRISOBA después de ser empleado.

Los principales cuerpos de agua son el embalse Cointzio ubicada al suroeste de la ciudad, el manantial la Mintzita ubicada al suroeste de la misma y el Lago de Cuitzeo ubicado al norte de la ciudad de Morelia.

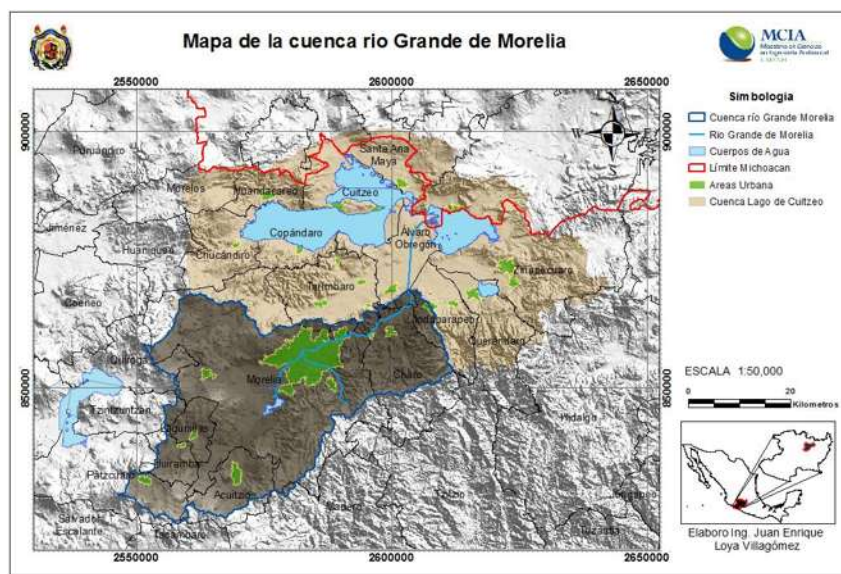


Figura 7-2. Cuerpos de agua para la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

7.1.1 Infraestructura hidráulica

En la cuenca del Lago de Cuitzeo se encuentra ubicado el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, el cual cuenta con 5 módulos de riego abastecidos en su mayoría de manera superficial, para ello se cuenta con la infraestructura de 2 presas de almacenamiento: Cointzio y Malpaís, estos embalses se son gestionados a cargo de la Comisión Nacional del Agua. La presa Cointzio suministra los módulos de riego I, II, III, y IV, y por otra parte la presa Malpaís suministra al módulo de riego V. Para el estudio se consideró solamente la presa Cointzio, puesto que es la que se ubica dentro de la cuenca de río Grande de Morelia.

La presa de almacenamiento Cointzio, se encuentra ubicada a 13 km aguas arriba de la ciudad de Morelia, cuenta con una capacidad total de 79.23 hm³ (CONAGUA, 2009), y se conducen por el cauce del río Grande de Morelia hasta desembocar al lago de Cuitzeo. El volumen del embalse Cointzio ha disminuido en comparación con el volumen obtenido desde su inauguración, cuando tenía la capacidad de almacenar 84.8 hm³. La presa se ha azolvado



desde su apertura en 1940, por lo tanto, las elevaciones, áreas y capacidades del embalse no son las mismas que hace poco más de 70 años.

Presa Cointzio: Esta presa se construyó sobre el río Grande de Morelia, es una presa de usos múltiples: abastecimiento de agua potable, riego y regulación de la corriente del río, en sus inicios también funcionaba para generación de energía eléctrica.

La infraestructura consiste en la presa de almacenamiento Cointzio, 6 presas derivadoras, 14 plantas de bombeo, 109 pozos profundos, 280.6 km. de canales, 292.6 km de drenes, 549.9 km. de caminos y 882 estructuras. Las principales características de esta presa son:

El vaso actualmente cuenta con una capacidad total de 84.4 hm^3 , una capacidad útil de 79.23 hm^3 y una capacidad de azolves de 15.0 hm^3 .

La obra de toma es una tubería a presión alojada en la margen derecha del río, la cual consiste en un túnel. La carga máxima es de 3.80 m. El gasto máximo es de $12.0 \text{ m}^3/\text{s}$. Y una superficie regable de 15758 hectáreas.

La obra de excedencias es un vertedor controlado por cinco compuertas radiales que vierte a un canal. La carga máxima es de 3.50 m. La longitud de la cresta es 29.90 m. Y el gasto máximo es de $600 \text{ m}^3/\text{s}$.

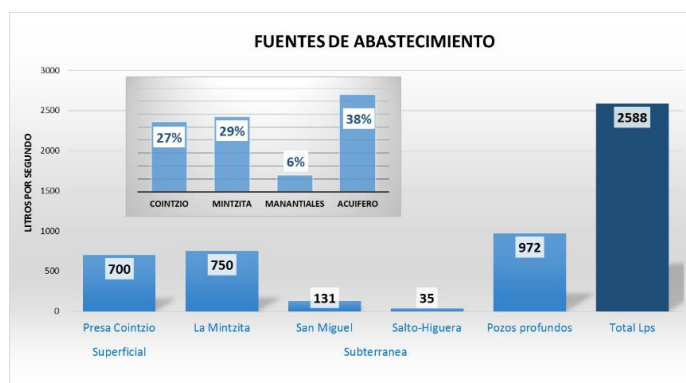


Figura 7-3. Fuentes de abastecimiento en lps. y %. Fuente: Loya, J.

Para el abastecimiento urbano de la ciudad de Morelia se cuenta con tres fuentes básicas: la presa Cointzio aparte de suministrar recurso para los módulos de riego también suministra demandas urbanas, manantiales La Mintzita, San Miguel, El Salto y La Higuera y de extracción subterránea del acuífero Morelia-Querendaro a través de 115 pozos localizados en la mancha



urbana de la ciudad de Morelia. La capacidad total del suministro es aproximadamente 2588 lps, de ellos 700 lps provienen de la presa, 916 lps de los manantiales y 972 lps de los pozos.

Los 700 lps obtenidos del embalse Cointzio son destinados para consumo humano de la ciudad de Morelia, el agua se conduce a la planta potabilizadora de la ciudad a través de un canal de 13.76 km revestido con losas de concreto hidráulico.

Las fuentes de abastecimiento subterráneo vienen a complementar el suministro de las demandas urbanas de la cuenca, demandas que no se alcanzan a suministrar por completo con el recurso superficial de la planta potabilizadora. Para ello se aprovechan el agua de los manantiales antes mencionados;

- Manantial La Mintzita. Es la fuente de agua subterránea más importante, se encuentra ubicado a 4.5 km hacia el suroeste de la ciudad. Aporta aproximadamente 750 lps que representa cerca del 29% de la producción total para el suministro de la ciudad de Morelia. Actualmente cuenta con una concesión de 1100 lps al Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento (OOAPAS), de los cuales se destinan 350 lps para la industria papelera “CRISOBA”, resultando 750 lps para la demanda urbana de la ciudad de Morelia.
- Manantial San Miguel. - el cual se ubica a una distancia aproximada de 11 km al sureste de la ciudad en el poblado de San Miguel del Monte. El agua producida por este manantial está siendo captada por OOAPAS y tiene una producción de 131 lps.
- Manantiales El Salto y La Higuera. - estas fuentes se localizan al poniente dentro de la misma ciudad, se ubican en una zona llamada La Quemada. Los manantiales tienen una producción de 15 y 20 lps respectivamente (35 lps, total), y el agua que se extrae es para abastecer a las colonias cercanas a los manantiales.
- 115 pozos. - ubicados dentro del área urbana de la ciudad son utilizados como complemento al suministro de agua potable, los cuales varía en profundidad y en producción, aportando un gasto aproximado de 972 lps.

7.1.2 Demandas de la cuenca del río Grande de Morelia

Los principales usos de la zona en estudio son el uso Agrícola, Público urbano e industrial.



7.1.2.1 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 ET_o 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.

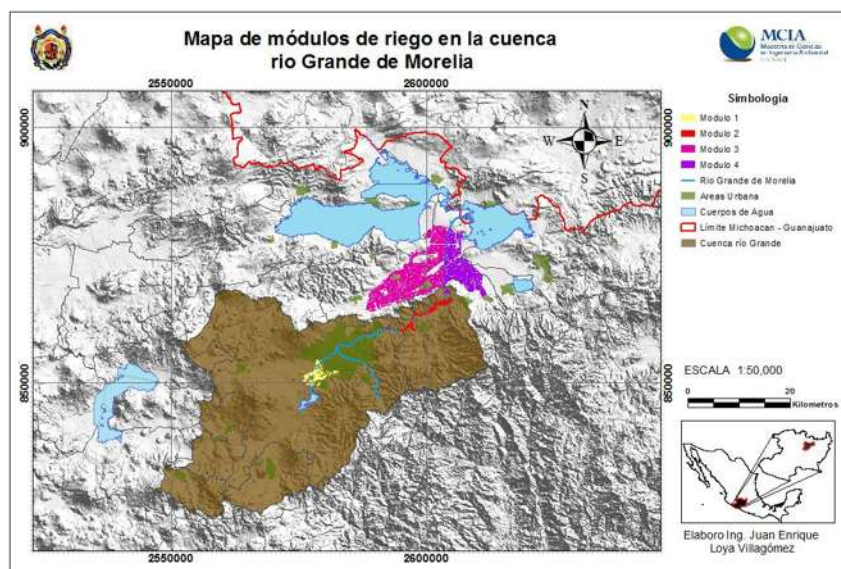


Figura 7-4. Módulos de riego de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

Para el uso agrícola se consideran los 4 módulos de riego pertenecientes al Distrito de Riego 020 "Morelia-Queréndaro", que son abastecidos por el afluente del río Grande que obtiene su caudal principalmente del embalse Cointzio. Según el módulo de riego, es su abastecimiento, ya sea por sistema a gravedad o auxiliado por un bombeo adicional del recurso subterráneo del acuífero "Morelia-Queréndaro", por lo tanto, se tiene para los módulos de riego I y II un abastecidos por sistema a gravedad y los módulos III y IV son abastecidos de manera



conjunta gravedad y bombeo de agua subterránea. La demanda promedio mensual para los cultivos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se muestra en la Figura 7-5:

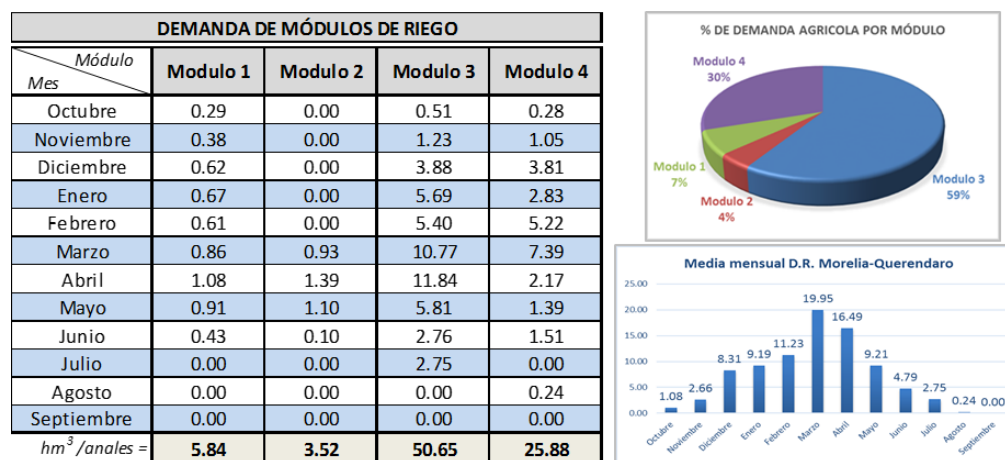


Figura 7-5. Demandas promedio mensuales del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. Fuente: Loya, J.

Como se puede observar el Módulo 3 es el que mayor demanda de agua representa, seguido del Módulo 4, 1 y 2 respectivamente. En promedio los meses de marzo y abril son los de mayor demanda en todo el año, alcanzando un máximo en el mes de marzo de hasta 19.95 hm³/mes, lo que implicara descensos importantes en el volumen de la presa Cointzio en estos meses.

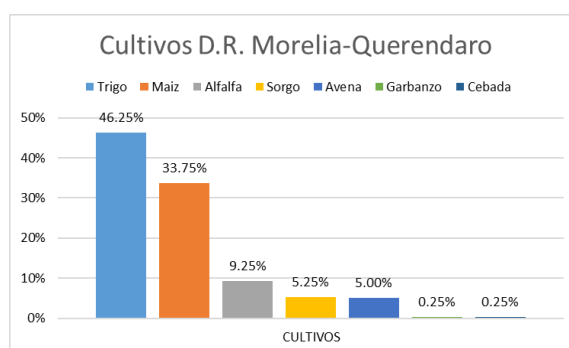


Figura 7-6. Principales cultivos del Distrito de Riego 020 "Morelia-Queréndaro". Fuente: Loya, J.

Los principales cultivos en los módulos de riego del Distrito de Riego 020 de Morelia dentro de la cuenca del río Grande de Morelia son los siguientes.

Para los módulos de riego se cuenta con distintos cultivos, los cultivos dominantes en la zona son trigo con un 46.25%, maíz con 33.75%, alfalfa con 9.25%, sorgo 5.25%, 5.00%, garbanzo y cebada con 0.25% cada uno.



Distribuida mente para cada uno de los módulos de riego dentro de la cuenca del río Grande de Morelia, se presenta en la siguiente tabla las demandas de cultivo. Para lo que se observa que en el módulo 1 el cultivo dominante es la semilla de trigo con un 82% respecto al porcentaje total de este módulo, para el módulo 2 los cultivos presentes son el maíz con 70% y con 30% el trigo, con el módulo 3 se tienen 6 cultivos de los cuales alfalfa y maíz representan más del 60% de los cultivos del módulo con 33% y 31% respectivamente, no así para el módulo 4, que igualmente presenta 6 tipos de cultivos, mostrando como dominante el trigo con 62% seguido del maíz con 22%.

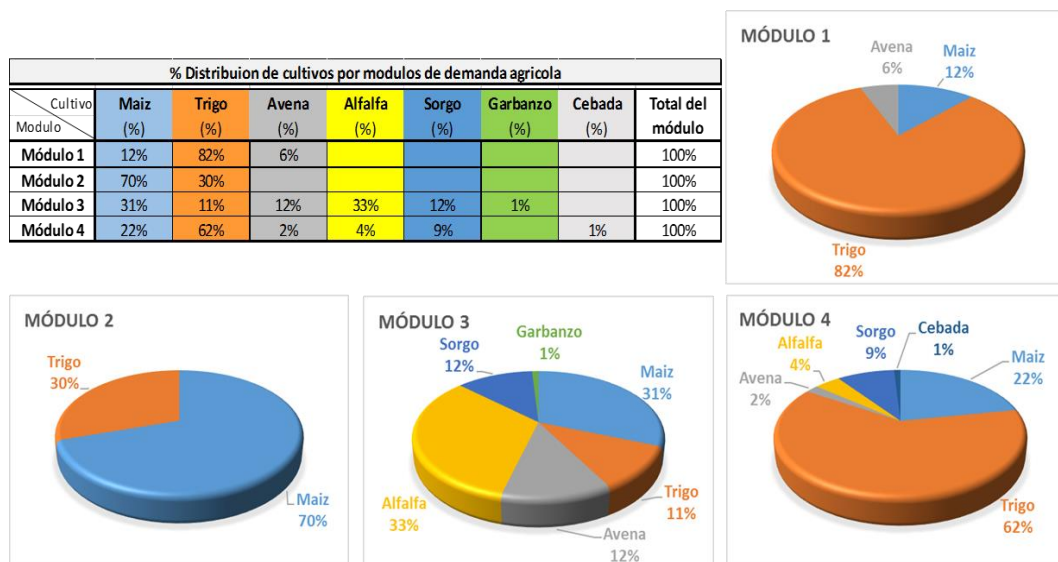


Figura 7-7. Cultivos por módulos de riego del Distrito de Riego de Morelia. Fuente: Loya, J.

7.1.2.2 Demanda Urbana

Para el análisis de la demanda urbana se debe definir la población de diseño actual, esto para estimar la cantidad de recurso hídrico que se pudiera requerir a futuro para satisfacer a la demanda urbana en un periodo de tiempo considerado. Por lo tanto, se requiere analizar algunos métodos de proyección de la población basados en la extrapolación de los datos históricos de crecimiento de población y así suponer la tendencia futura de crecimiento con las mismas tendencias presentadas en el pasado.

La información base para la proyección y estimación de la población futura es la obtenida de la base datos del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI, 2010), tomando la información histórica correspondiente a los municipios considerados en el



área de influencia de este proyecto. En la siguiente imagen se observan las zonas urbanas requeridas para este análisis.

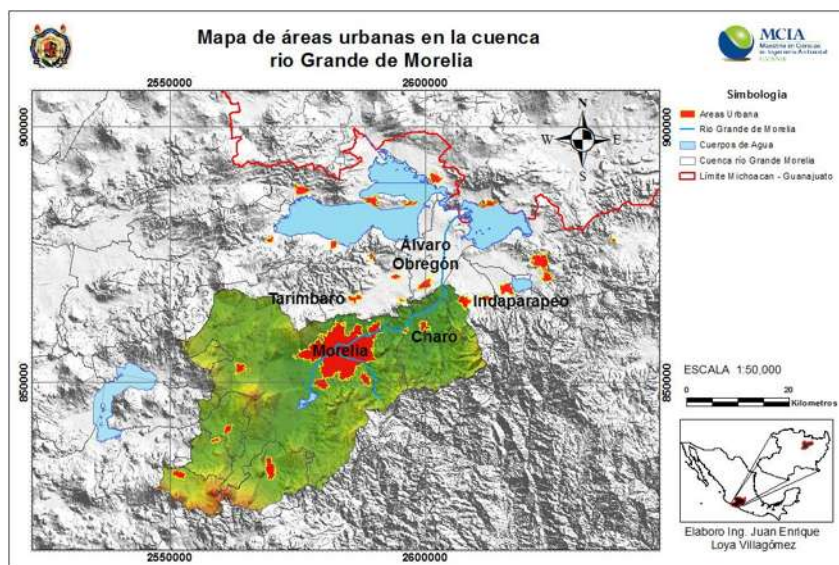


Figura 7-8. Áreas urbanas dentro de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

El municipio de Morelia, es quien presenta la mayor concentración de población dentro de la zona de la cuenca del río Grande de Morelia con 729279 habitantes, ubicado al noreste del estado de Michoacán. Otros municipios de influencia en la zona son Charo (21723 hab.), Tarímbaro (78623 hab.), Álvaro Obregón (20913 hab.) e Indaparapeo (16427 hab.).

Para este análisis se consideran las localidades de estos municipios que se encuentran dentro de los límites de la cuenca del río Grande de Morelia, quedando las poblaciones para estas ciudades de la siguiente manera.

Tabla 7-1. Población histórica de las ciudades de la cuenca del río Grande de Morelia.

Ciudad Año	Población cuenca río Grande			Resto de Cuenca Lago Cuitzeo
	Morelia (Hab)	Tarímbaro (Hab)	Charo (Hab)	
1990	492,901	317	23,447	251,819
1995	578,061	418	25,962	196,719
2000	620,532	1,616	26,960	196,842
2005	684,145	11,988	26,870	185,302
2010	729,279	19,530	29,662	215,265

Las poblaciones de las ciudades de la tabla anterior se calcularon como la concentración de las localidades de ciertos municipios en una sola ciudad, tomando como criterio la cercanía entre ellas. Así que, para la ciudad de Morelia se concentraron solo las localidades de este



municipio, para la Ciudad de Tarímbaro se tomó la población de 4 localidades del Municipio de Álvaro Obregón y 15 del Tarímbaro, para la ciudad de Charo se tomó la población total del municipio de Charo e Indaparapeo, así que como la cuenca del río Grande pertenece a la cuenca del Lago de Cuitzeo se unifica la población del resto de los municipios y localidades sin considerar la población dentro de la cuenca del río Grande de Morelia. A estas ciudades se les procedió a proyectar su población a futuro desde el año 2010 al 2100 con los métodos indicados a continuación.

Los métodos aplicados para la proyección de la población a futuro en este trabajo son las siguientes:

- a) Método aritmético
- b) Método geométrico
- c) Método del Mínimo Cuadrado
- d) Método de la curva exponencial

7.1.2.3 *Método aritmético*

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

$$P_f = P_a + IN$$

Dónde: P_f = Población Futura,

P_a = Población Actual,

I = Incremento Promedio: $\sum \frac{I_D}{N_D}$

$$I_D = \frac{[P_D - P(D - 1)]}{N}$$

Dónde: I_D = Incremento Decenal,

P_D = Población de cada Decena,

$P_{(D-1)}$ = Población de la Decena Anterior,

N = Años transcurridos desde P_D Y $P_{(D-1)}$.



Tabla 7-2. Método Aritmético aplicado a la población de la ciudad de Morelia.

MORELIA			
No.	Año	Población	Incremento
1	1990	492,901	
2	1995	578,061	17,032
3	2000	620,532	8,494
4	2005	684,145	12,723
5	2010	729,279	9,027
			47,276

$$i = 11,818.90$$

Aplicando la fórmula: $P_f = P_a + IN$

$$P_{2015} = 729279 + 11818.9 \times (2015 - 2010) = 788374 \text{ hab.}$$

7.1.2.4 Método geométrico

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

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

Dónde: P_f = Población Futura,

P_a = Población Actual,

r = Tasa de Crecimiento y

n = Años Transcurrido.

$$(1 + r) = \left[\frac{P_D}{P_{(D-1)}} \right]^{\left(\frac{1}{n} \right)}$$

Dónde: P_D = Población de cada Decena,

$P_{(D-1)}$ = Población de la Decena Anterior,

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



Tabla 7-3. Método geométrico aplicado a la población de la ciudad de Morelia.

MORELIA			
No.	Año	Población	Incremento
1	1990	492,901	(1 + r)
2	1995	578,061	1.0324
3	2000	620,532	1.0143
4	2005	684,145	1.0197
5	2010	729,279	1.0129
			4.0792

$$(1 + r)_{Prom} = 1.01981$$

$$\text{Aplicando la fórmula: } P_f = P_a(1 + r)^n$$

$$P_{2015} = 729279 \times 1.01981^{(2015-2010)} = 804431 \text{ hab.}$$

7.1.2.5 Método mínimo cuadrado

Sustituyendo en la fórmula del método aritmético; $P_f = P_a + IN$, lo siguiente:

$$P_f = Y_c = \text{Número de años a proyectar,}$$

$$P_a = b,$$

$$I = a,$$

$$N = x.$$

Obtenemos:

$$Y_c = a + bx$$

Que es la función de regresión lineal, para la línea recta, donde las siguientes ecuaciones sirven para obtener “a” y “b”.

$$b = \frac{N \sum XY \cdot \sum X \sum Y}{N \sum X^2 \cdot (\sum X)^2}$$

$$a = \frac{\sum Y \cdot b \sum X}{N}$$

Para aplicar estas fórmulas es necesario determinar la siguiente tabla.



Tabla 7-4. Método mínimo cuadrado aplicado a la población de la ciudad de Morelia.

MORELIA					
No.	Año 1980	Población (Y _o)	X _o	X _o ²	X _o Y _o
1	1990	492,901	10	100	4,929,010
2	1995	578,061	15	225	8,670,915
3	2000	620,532	20	400	12,410,640
4	2005	684,145	25	625	17,103,625
5	2010	729,279	30	900	21,878,370
Σ =		3,104,918	100	2,250	64,992,560

Sustituyendo los valores de la tabla en las formulas anteriores obtenemos “a” y “b”.

$$b = 11576.8$$

$$a = 389447.60$$

Aplicando la fórmula: $Y_c = a + bx$

$$Y_{2015} = 389447.60 + 11576.8 \times [30 + (2015 - 2010)] = 794,636 \text{ hab.}$$

7.1.2.6 Método de la curva exponencial

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

Dónde: $P_f = Y$,

$P_a = a$,

$(1 + r) = b$,

$N = t$.

Obtenemos:

$$Y = a \cdot b^t$$

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

$$\log b = \frac{n \sum t \log Y_o - \sum t \sum \log Y_o}{n \sum t^2 - (\sum t)^2}$$

$$\log a = \left(\frac{\sum \log Y_o}{n} \right) - \left(\frac{\sum t}{n} \right) \log b$$

Para aplicar estas 2 fórmulas es necesario determinar la siguiente tabla.



Tabla 7-5. Método de la curva exponencial aplicado a la población de la ciudad de Morelia.

MORELIA						
No.	Año 1980	Población Y_0	Log Y_0	t	t^2	t log Y_0
1	1990	492,901	5.6928	10	100	56.9276
2	1995	578,061	5.7620	15	225	86.4296
3	2000	620,532	5.7928	20	400	115.8553
4	2005	684,145	5.8351	25	625	145.8787
5	2010	729,279	5.8629	30	900	175.8868
$\Sigma =$		3,104,918	28.9455	100	2,250	580.9780

Sustituyendo en las fórmulas de “log a” y “log b”:

$$\log b = 0.0082689 \quad b = 1.019222$$

$$\log a = 5.623730881 \quad a = 420,465.9981$$

Sustituyendo valores en la ecuación; $Y = a \cdot b^t$ obtenemos lo siguiente.

$$Y_{2015} = 420465.9981 \times 1.019222^{[2010+(2015-2010)]} = 8181730 \text{ hab.}$$

Enseguida se muestra el resumen y análisis de estos métodos de proyección, visualizando la información referente a la ciudad de Morelia. En la Tabla 7-6. se observa numéricamente la evolución obtenida de estos métodos, tanto que en la Figura 7-9 se observa sus curvas de tendencia.

Tabla 7-6. Proyección de la población de la ciudad de Morelia.

Proyecciones de población futura para la ciudad de Morelia				
	Aritmético	Geométrico	Mínimo cuadrado	Curva exponencial
1990	492,901			
1995	578,061			
2000	620,532			
2005	684,145			
2010	729,279			
2015	788,374	804,431	794,636	818,730
2020	847,468	887,328	852,520	900,502
2025	906,563	978,767	910,404	990,442
2030	965,657	1,079,628	968,288	1,089,365
2035	1,024,752	1,190,884	1,026,172	1,198,168
2040	1,083,846	1,313,604	1,084,056	1,317,838
2045	1,142,941	1,448,971	1,141,940	1,449,460
2050	1,202,035	1,598,287	1,199,824	1,594,228
2055	1,261,130	1,762,990	1,257,708	1,753,455
2060	1,320,224	1,944,666	1,315,592	1,928,585
2065	1,379,319	2,145,064	1,373,476	2,121,207
2070	1,438,413	2,366,112	1,431,360	2,333,068
2075	1,497,508	2,609,939	1,489,244	2,566,089
2080	1,556,602	2,878,893	1,547,128	2,822,383
2085	1,615,697	3,175,563	1,605,012	3,104,275
2090	1,674,791	3,502,804	1,662,896	3,414,321
2095	1,733,886	3,863,767	1,720,780	3,755,335
2100	1,792,980	4,261,928	1,778,664	4,130,407

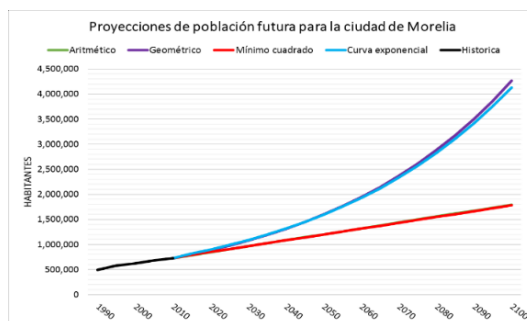


Figura 7-9. Comparativa de métodos aplicados para la ciudad de Morelia. Fuente: Loya, J.

Para identificar el método de proyección de habitantes futuros con mejor comportamiento, respecto a la tendencia histórica, se realiza una regresión de los datos proyectados, comparando estos frente a los datos históricos de los cuales se partió para dichos métodos. Para este proyecto se tienen los datos históricos obtenidos de INEGI para un periodo histórico del año 1990 al 2010 en intervalos de evolución crecientes de 5 años. Analizando los métodos y observando de manera gráfica, se puede observar que el método que se asemeja más con la tendencia histórica en la ciudad de Morelia es el método de mínimo cuadrado.

Tabla 7-7. Análisis comparativo de métodos de cálculo de población Morelia.

Comparación de métodos para la ciudad de Morelia					
Método Año	Aritmético (hab.)	Geométrico (hab.)	Mínimo cuadrado (hab.)	Curva exponencial (hab.)	INEGI (hab.)
1990	492,901	492,621	505,216	508,650	492,901
1995	551,996	543,386	563,100	559,453	578,061
2000	611,090	599,382	620,984	615,330	620,532
2005	670,185	661,148	678,868	676,787	684,145
2010	729,279	729,279	736,752	744,383	729,279

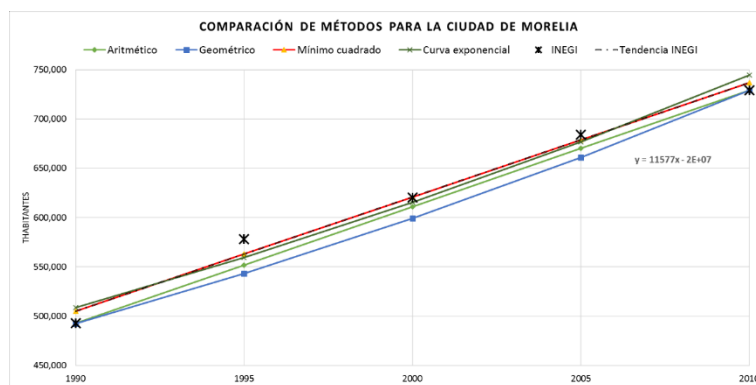


Figura 7-10. Selección de método de proyección de población Morelia. Fuente: Loya, J.

Para la ciudad de Morelia como para las demás ciudades propuestas para este proyecto, se les aplico el mismo análisis para la selección del método más apropiado para cada una de las



ciudades de influencia dentro de la cuenca del río Grande. De igual manera el método que presento resultados similares a la tendencia histórica es el método de proyección de habitantes de mínimo cuadrado.

Con los datos obtenidos del método de proyección de mínimo cuadrado se procede a calcular la demanda urbana de las urbes seleccionadas en la cuenca del río Grande de Morelia. Para ello se emplea un procedimiento basado en las tomas domésticas servidas por el OOAPAS de Morelia (Loya *et al*, 2013). En el cual interfieren diversos factores como el índice de hacinamiento, la tasa de crecimiento poblacional entre intervalos de proyección, la cobertura de red y población abastecida, así como las pérdidas en el sistema de abastecimiento, las cuales se consideraron del 40%, de acuerdo a lo indicado por la CONAGUA.

Tabla 7-8. Proyección de la demanda urbana Morelia.

PROYECCIÓN DE LA DEMANDA DE AGUA PARA LA CIUDAD MORELIA, MICH.										
Población Total										
Año	2010	2015	2020	2025	2039	2040	2075	2085	2099	2100
Concepto										
Población Total	729,279	794,636	852,520	910,404	1,072,479	1,084,056	1,489,244	1,605,012	1,767,087	1,778,664
Crecimiento actual	-	1.48%	1.38%	1.29%	1.09%	1.08%	0.78%	0.73%	0.66%	0.66%
Índice de hacinamiento	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84	3.84
Agua Potable										
Cobertura doméstica	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%	91%
Población servida	663,644	723,118	775,793	828,467	975,956	986,491	1,355,212	1,460,561	1,608,049	1,618,584
Población sin servicio	65,635	71,517	76,727	81,936	96,523	97,565	134,032	144,451	159,038	160,080
Tomas potenciales domésticas	189,916	206,936	222,010	237,084	279,291	282,306	387,824	417,972	460,179	463,194
Tomas domésticas servidas	172,824	188,312	202,029	215,747	254,155	256,899	352,920	380,354	418,763	421,506
Pérdidas físicas	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%	40%
Eficiencia física	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%	60%
Demanda de agua en millones de metros cúbicos										
Doméstico	46.12	50.25	53.91	57.58	67.83	68.56	94.18	101.50	111.75	112.49
Comercial	2.81	3.06	3.28	3.51	4.13	4.18	5.74	6.18	6.81	6.85
Industrial	0.37	0.40	0.43	0.46	0.54	0.55	0.75	0.81	0.89	0.90
Población sin servicio	1.80	1.96	2.10	2.24	2.64	2.67	3.67	3.95	4.35	4.38
total sin pérdidas físicas	51.09	55.67	59.73	63.78	75.14	75.95	104.34	112.45	123.81	124.62
total con pérdidas físicas	85.16	92.79	99.55	106.31	125.23	126.58	173.90	187.42	206.34	207.69
Demanda de agua en litros por segundo										
Doméstico	1,462	1,594	1,710	1,826	2,151	2,174	2,986	3,219	3,544	3,567
Comercial	89.09	97.07	104.15	111.22	131.02	132.43	181.93	196.07	215.87	217.28
Industrial	11.66	12.70	13.63	14.56	17.15	17.33	23.81	25.66	28.25	28.44
Población sin servicio	56.97	62.08	66.60	71.13	83.79	84.69	116.35	125.39	138.05	138.96
total sin pérdidas físicas	1,620	1,765	1,894	2,023	2,383	2,408	3,309	3,566	3,926	3,952
total con pérdidas físicas	2,700	2,942	3,157	3,371	3,971	4,014	5,514	5,943	6,543	6,586
Dotación de Agua en litros/habitante/día										
Dotación por habitante servido	352	352	352	352	352	352	352	352	352	352
Dotación por habitante total	320	320	320	320	320	320	320	320	320	320



Considerando las características de población y el sistema de abastecimiento, se ejemplifica la proyección futura de la demanda urbana de la ciudad de Morelia. Información mostrada en la Tabla 7-8. Proyección de la demanda urbana Morelia..

7.1.3 *Análisis climático*

Se determinaron las condiciones climáticas de la zona de estudio (temperatura y precipitación) con base en información de estaciones meteorológicas de la base de datos de datos CLICOM de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) en el Estado de Michoacán. Posteriormente se aplicará el efecto del cambio climático en dichas variables, resultando condiciones futuras necesarias para aplicarlas en las diferentes climatologías RCP (4.5, 6.0 y 8.5) en periodos de 25 años, el periodo de corto plazo (2015-2039) y largo plazo (2075-2099).

7.1.4 *Estaciones de precipitación.*

Se realizó una preselección de 50 estaciones meteorológicas disponibles que cubrieran la superficie de la cuenca del río Grande de Morelia. Se realizó una selección de estaciones principales, partiendo de un criterio de basado en características de las series de datos del periodo histórico, asignando cierto peso en orden de importancia a las siguientes variables:

- i. Distancia C.G.
- ii. % vacíos
- iii. Intervalo de tiempo
- iv. No. Años

Tabla 7-9. Estaciones meteorológicas principales en la cuenca río Grande de Morelia.

Clave	Coordenadas UTM		Elevación msnm	Periodo		Años	% vacíos	Pp. Media mm	T. Media °C
	X	Y		Inicio	Final				
16016	286631.2164	2201397.4491	1,840	01/09/1969	31/12/2006	37	0.00%	690.9	16.6
16022	260775.7755	2171584.6773	2,096	01/04/1940	31/12/2006	66	9.09%	804.2	17.7
16023	268244.0381	2201076.0354	1,840	01/12/1969	30/04/2001	31	7.10%	833.6	15.5
16027	276241.5183	2208048.7318	1,831	01/03/1923	31/12/2005	82	2.44%	669.0	18.4
16028	277935.5638	2187054.1089	1,987	01/07/1969	30/09/2007	38	3.68%	647.2	17.2
16050	237764.3020	2202278.6440	2,040	01/07/1948	31/12/2006	58	7.24%	866.6	18.0
16081	271881.6046	2178482.3559	1,908	01/05/1947	31/03/2012	64	1.41%	789.3	18.3
16091	286511.3472	2193216.0481	1,840	01/10/1966	31/12/2010	44	5.23%	669.2	18.2
16105	291014.2445	2190305.5659	1,858	01/06/1963	30/09/2012	49	5.71%	705.3	17.9
16109	270625.6621	2139154.3472	1,444	01/01/1922	31/08/2012	90	3.00%	1048.0	25.1
16120	256661.0886	2169181.6283	2,130	01/12/1953	31/10/2007	53	1.13%	849.1	16.2
16254	240393.5207	2189402.3540	2,188	01/01/1982	30/06/2011	29	1.72%	690.6	16.9

Haciendo ponderación de las variables citadas anteriormente, se eligieron 12 estaciones principales de las 50 estaciones preseleccionadas (ver Tabla 7-9), considerando que éstas cubrieran en su totalidad la cuenca. Con estas se obtiene para la cuenca del río Grande de Morelia una precipitación media de 785 mm y una temperatura media de 17.12 °C. utilizando el método de polígonos de Thiessen.

Para que las estaciones seleccionadas sean válidas, deben presentarse de manera homogénea y consistente en la serie temporal. Este comportamiento se evalúa a través de pruebas estadísticas aplicadas a la serie de datos históricos de precipitación obtenidos de CLICOM de cada estación meteorológica seleccionadas para comprobar su homogeneidad y su independencia.

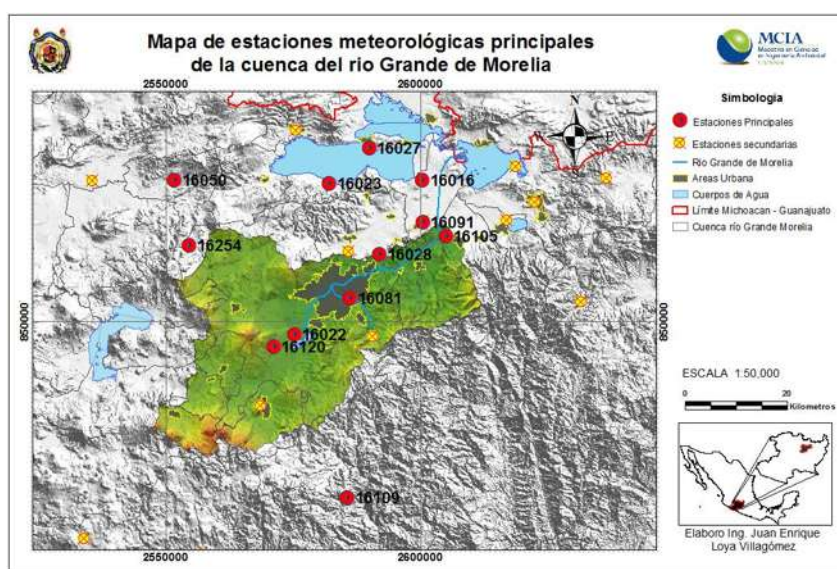


Figura 7-11. Estaciones meteorológicas en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

Una serie de datos es llamada homogénea si es una muestra de una única población. Si la serie es “inhomogénea”, se le deben hacer ajustes o correcciones para volverla homogénea, de manera que las estimaciones estadísticas muestrales sean válidas estimaciones de los parámetros poblacionales (Campos Aranda D.F. 1998).



7.1.4.1 *Análisis de consistencia de datos.*

El presentar una serie homogénea en sus datos indica la calidad y confiabilidad de la información a procesar, las pruebas empleadas para este análisis de consistencia son las siguientes.

1. Test de Helmer
2. Prueba de secuencias
3. t de Student
4. Cramer

Las 2 primeras pruebas se consideran pruebas paramétricas o básicas, las cuales deben aplicarse como primera etapa de análisis. Mientras que las pruebas de t de Student y la de Cramer son pruebas no paramétricas que se aplican solamente si las primeras 2 primeras pruebas no hayan mostrado un comportamiento Homogéneo. De esta manera se seleccionaron las estaciones que cumplieron la homogeneidad para ser utilizadas en este proyecto.

En seguida se muestra la Tabla 7-10 se muestran de los resultados obtenidos de las pruebas de homogeneidad.

Tabla 7-10. Tabla de resultados obtenidos de pruebas de homogeneidad.

Estación	Helmer	Secuencias	t student	Cramer
16016	Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16022	Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16023	Homogeneo	Homogeneo	-	-
16027	No Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16028	Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16045	Homogeneo	Homogeneo	-	-
16055	No Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16081	Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16091	No Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16105	Homogeneo	Homogeneo	-	-
16109	No Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16120	Homogeneo	No Homogeneo	Homogeneo	Homogeneo
16254	Homogeneo	Homogeneo	-	-

7.1.4.2 *Independencia en las series de precipitación.*

Para comprobar que una serie de precipitación se presenta de manera natural, se procede a evaluar su independencia. Para esta prueba de independencia, se calcula el coeficiente de autocorrelación temporal “Tk” de la misma serie de precipitación, y los límites de independencia temporal de Anderson (Anderson, 1941. Citado por Salas et al., 1980).



Por lo tanto, el coeficiente de autocorrelación viene dado por la expresión:

$$\Gamma k(z) = \frac{\sum_{t=1}^{N-k} (z_{t+k} - z)(z_t - z)}{\sum_{t=1}^N (z_t - z)^2}$$

Para los límites de confianza, Anderson propone la siguiente ecuación (Anderson, 1941).

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

En la Figura 7-12 se muestran el correlograma de la estación meteorológica 16023, seleccionada como una de las estaciones principales. Seguido se indican los resultados del análisis de independencia aplicado a las estaciones principales, dando por válidas las estaciones seleccionadas para su utilización en este proyecto.

Tabla 7-11. Límites de Anderson y coeficiente de autocorrelación en estación clave 16023.

Desfase	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<i>rk</i>	0.0514	-0.0332	0.0944	0.0095	-0.1543	-0.0952	-0.0088	-0.2498	-0.2038	-0.0206	0.1840
Límites de Anderson											
<i>Superior</i>	0.3140	0.3185	0.3231	0.3280	0.3331	0.3385	0.3441	0.3500	0.3562	0.3628	0.3698
<i>Inferior</i>	-0.3786	-0.3852	-0.3921	-0.3994	-0.4072	-0.4154	-0.4241	-0.4333	-0.4432	-0.4537	-0.4650

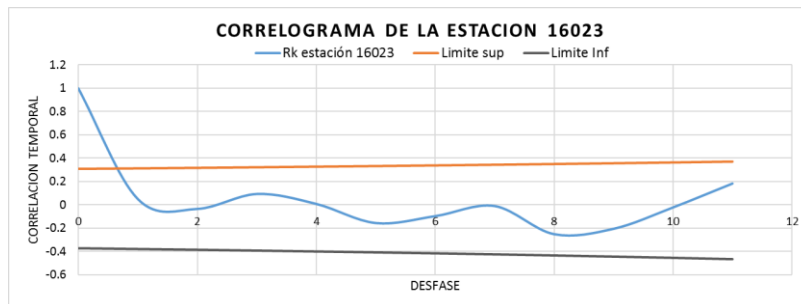


Figura 7-12. Correlograma de estación 16023, para los límites de Anderson. Fuente: Loya. J.

Tabla 7-12. Resultados de independencia de Anderson para estaciones principales.

Estación	Anderson	Estación	Anderson	Estación	Anderson
16016	INDEPENDIENTE	16028	INDEPENDIENTE	16105	INDEPENDIENTE
16022	INDEPENDIENTE	16050	INDEPENDIENTE	16109	INDEPENDIENTE
16023	INDEPENDIENTE	16081	INDEPENDIENTE	16120	INDEPENDIENTE
16027	INDEPENDIENTE	16091	INDEPENDIENTE	16254	INDEPENDIENTE

Una vez seleccionadas las estaciones principales, se observa las series históricas de datos para identificar si presentan datos faltantes, de haber dichos vacíos se procede a realizar un llenado de los datos faltantes.



Para el llenado se seleccionó el método del U.S. National Weather Service “inverso de la distancia euclidiana al cuadrado” (IDW), método basado en el uso de información pluviométrica de estaciones vecinas y de su transporte a la estación que lo requiera. Este método propone calcular el dato de precipitación faltante a diferentes escalas (diaria, mensual o anual) haciendo una ponderación de las lluvias simultáneas de las estaciones auxiliares, respecto de la distancia euclidiana entre las estaciones de apoyo y la estación base.

La distancia euclidiana es la distancia ordinaria derivada del teorema de Pitágoras, para obtenerla se utilizan las coordenadas de cada estación y su respectiva elevación con respecto a la otra estación. Obteniéndose por tanto una matriz de distancias euclidianas de las estaciones principales y de apoyo.

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

Donde x, y, z; son coordenadas de las dos estaciones a evaluar.

Posteriormente se obtiene una matriz de correlación entre las estaciones seleccionadas. Enseguida se deben obtener los pesos de las estaciones seleccionadas empleando la siguiente formula, para la que se consideró como aceptable una correlación mayor o igual a 0.80.

$$Peso\ de\ estación\ i = \frac{(Inv.\ dist.\ euclidiana\ estación\ i)^2}{\sum_{i=1}^n (Inv.\ dist.\ euclidiana)^2}$$

Donde i son las estaciones útiles para llenar el dato faltante.

El dato faltante se obtiene de la suma de las multiplicaciones del peso de cada una de las estaciones frente a su valor respectivo de precipitación.

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

Este llenado de datos se aplicó a las 12 estaciones seleccionadas como principales, a las cuales una vez aplicado el método de llenado de datos se procede a realizarles de nuevo los estadísticos de homogeneidad y límites de Anderson para comprobar que siguen dentro de los parámetros permitidos.

Para los datos de temperatura de las estaciones seleccionadas como principales, el tratamiento de los datos faltantes de cada serie, se llena con la media mensual de cada estación.



Así, para las series de evapotranspiración se obtienen con el método de Thornthwaite, partiendo de las series de precipitación y temperatura de las estaciones seccionadas.

7.1.5 Estaciones hidrométricas

Las estaciones hidrométricas se encuentran ubicadas en puntos de control a lo largo de los cauces para medir los gastos que circulan a través de estos. Dicha información se obtiene del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS), de la CONAGUA.

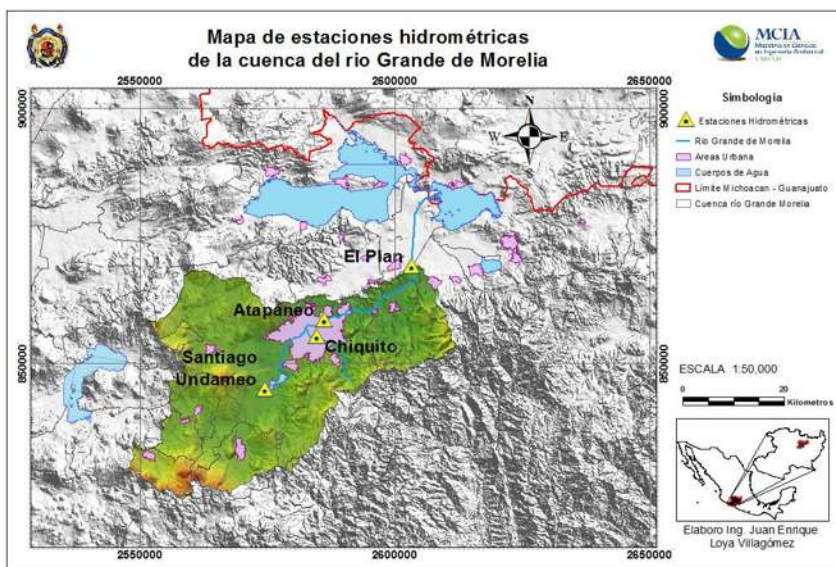


Figura 7-13. Estaciones hidrométricas en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

Se pudo identificar 4 estaciones hidrométricas principales al interior del sistema de cuenca del río Grande de Morelia, tres de ellas ubicadas en el cauce del río Grande, la cuarta estación pertenece a la incorporación del río Chiquito de Morelia. Dichas estaciones se utilizan como auxiliares para la calibración del modelo superficial.

Tabla 7-13. Estaciones hidrométricas seleccionadas en la cuenca río Grande de Morelia.

Estación	Nombre	Estado	Afluente	Latitud	Longitud
12347	Santiago Undameo	Michoacán	rio Grande de Morelia	19.601389	-101.288056
12224	Chiquito	Michoacán	rio Chiquito de Morelia	19.695833	-101.190278
12221	Atapaneo	Michoacán	rio Grande de Morelia	19.725000	-101.176389
12588	El Plan	Michoacán	rio Grande de Morelia	19.819444	-101.011111

Santiago Undameo. Se encuentra localizada sobre el río Grande de Morelia, muy cerca de la cola del embalse de la presa Cointzio y aguas abajo de la confluencia de los arroyos



Tiripetío y Tirio, en las cercanías del poblado de Santiago Undameo. Registra los volúmenes procedentes de la parte alta de la cuenca y tiene un área de aportación de 621.7 km².

Chiquito. Se encuentra localizada en el cauce del río chiquito y recibe escurrimientos del sureste de la ciudad de Morelia, su microcuenca de captación tiene un área de 87 km². El objetivo de su ubicación es conocer el régimen de aportaciones de la corriente al río Grande de Morelia

Atapaneo. Se encuentra localizada sobre el río Grande de Morelia, aproximadamente a 2.5 km al noreste de la ciudad de Morelia y 1.75 km aguas abajo del cruce de la carretera a Cuitzeo con el río, recibe escurrimientos de la cuenca media abarcando el Noreste y centro de la cuenca, también recibe múltiples descargas de aguas servidas de la ciudad de Morelia, tiene un área de captación (sin considerar Chiquito, Santiago Undameo) de 450.73 km² y el objeto de su instalación es conocer el régimen de la corriente en este sitio para su aprovechamiento.

El Plan. Se encuentra localizada sobre el río Grande de Morelia, en el cruce con la carretera de Álvaro Obregón a Indaparapeo, aproximadamente a 3.5 km de la primera población, dentro del municipio de Álvaro Obregón del estado de Michoacán. La microcuenca de captación de esta estación hidrométrica es la porción norte de la cuenca después de la estación hidrométrica Atapaneo. El objetivo de su instalación es conocer los volúmenes sobrantes escurridos, por el río Grande de Morelia, al Lago de Cuitzeo después de todos sus aprovechamientos y tiene un área de captación (sin considerar las estaciones previas) de 363 km².

7.2 Cambio climático

El Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), es el organismo oficial mexicano encargado de la gestión de información de cambio climático. Esta información es desarrollada a partir del Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados Fase 5, (CMIP5, por sus siglas en inglés) realizado por centros internacionales de modelación del clima mediante un conjunto de experimentos numéricos para estudiar la predecibilidad del clima, explorando los alcances y limitaciones de los modelos globales.

Los resultados colectados con el CMIP5 son el sustento del quinto reporte de evaluación del IPCC (IPCC-AR5, por sus siglas en inglés). Toda la información generada por el CMIP5 ha



pasado por un robusto procedimiento de control de calidad de datos la cual es descrita por Stockhause, *et al.* (2012).

En México se han desarrollado escenarios climáticos regionales: el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C, (CICESE), el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA) y Centro de Ciencias de la Atmósfera (CCA-UNAM) en coordinación con el Instituto Nacional de Ecología (INE) ahora Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (INECC), financiado por el fondo del Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) y administrado por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD), llevaron a cabo el estudio “Actualización de Escenarios de Cambio Climático para México como parte de los productos de la Quinta Comunicación Nacional”. En dicho estudio se utilizaron las integraciones de larga duración para dos periodos de tiempo: Futuro cercano (2015-2039) y futuro lejano (2075-2099). A su vez se consideró un escenario base (1961-2000) y para proyecciones futuras se seleccionaron los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5.

Para integrar las simulaciones de los 15 modelos se aplicó una metodología de ensamble ponderado denominado REA (Reliability Ensemble Averaging, en inglés), estimando con ello el grado de fiabilidad de cada uno modelos climáticos (AOGCM, por sus siglas en inglés). Estos modelos regionalizados cuentan con una resolución de espacial de 50 km x 50 km o mallas representativas de 0.5° x 0.5°.

Bajo el esquema de esta información, es necesario determinar estaciones de cambio climático presentes en la zona en estudio, posteriormente descargar sus series climáticas de precipitación y temperatura para aplicar el tratamiento adecuado a la información obtenida para poder utilizar los datos de manera confiable.

En la Tabla 7-14 y Figura 7-14 mapa se muestran la ubicación de las estaciones climáticas seleccionadas para el proyecto.



Tabla 7-14. Estaciones de cambio climático en la cuenca río Grande de Morelia.

Estaciones de cambio climático (INECC)				
Est_CC	Longitud	Latitud	X	Y
CC 1	-101.75	19.25	210910.327600	2130778.294000
CC 2	-101.25	19.25	263495.747600	2130021.331000
CC 3	-100.75	19.25	316066.967900	2129416.065000
CC 4	-101.75	19.75	211798.241700	2186155.105000
CC 5	-101.25	19.75	264221.818900	2185381.643000
CC 6	-100.75	19.75	316631.438800	2184763.182000
CC 7	-101.75	20.25	212708.041700	2241534.291000
CC 8	-101.25	20.25	264965.790000	2240744.566000
CC 9	-100.75	20.25	317209.827700	2240113.098000

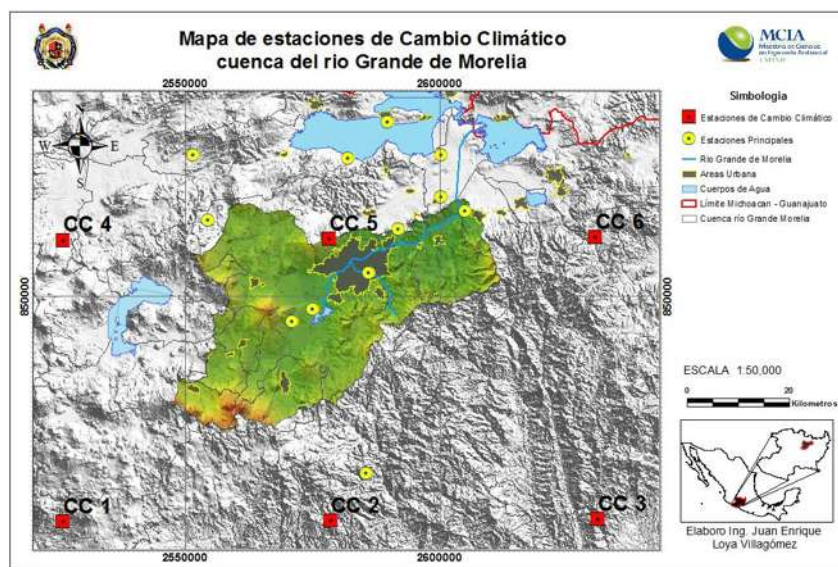


Figura 7-14. Estaciones de cambio climático en la cuenca río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

Se puede observar en la gráfica siguiente, se presenta la precipitación promedio anual de la cuenca del río Grande de Morelia. Alcanzando a percibir parte de la hipótesis del trabajo, que es la disminución de la precipitación producido por el aumento de la temperatura en la zona en estudio.

Donde a corto plazo de 2015-2039 se muestra para el escenario más desfavorable RCP 8.5, una disminución media del 3.85% respecto al periodo de control, en lo que concierne al periodo a largo plazo llega a disminuir hasta un 10.3% relativo al escenario histórico.

Así mismo, esta disminución de la precipitación afecta en el decremento de la aportación superficial del recurso hídrico a la cuenca del río Grande de Morelia.

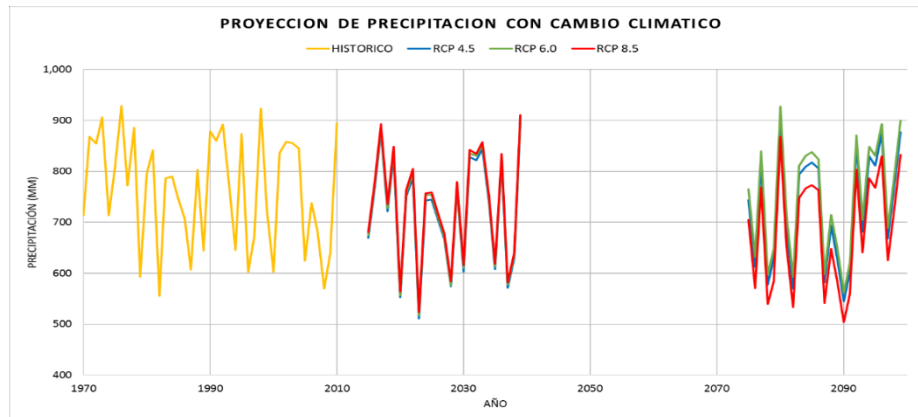


Figura 7-15. Proyecciones de precipitación afectadas por el cambio climático. Fuente: Loya, J.

En la Figura 7-16 se observa la temperatura media de la cuenca del río Grande de Morelia que en el periodo a corto plazo el comportamiento en el incremento de la temperatura es similar para los 3 escenarios climáticos RCP, mostrando un incremento entre 1°C y 2°C respecto del periodo histórico que al 2010 era de 18°C. No obstante, para el periodo de 2075-2099 se hace más notorio el desfase entre escenarios, mostrando que el escenario RCP 8.5 es el más desfavorable con las temperaturas más elevadas que van de 21.7 °C a 23.3 °C.

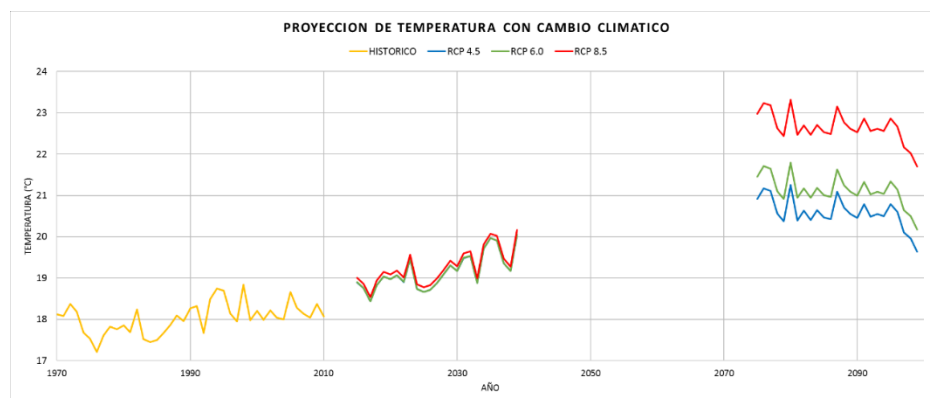


Figura 7-16. Proyecciones temperaturas afectadas por el cambio climático.

7.3 Modelación superficial

La modelación de los escurrimientos para la cuenca del río Grande de Morelia se realiza bajo el esquema de la herramienta informática EVALHID desarrollada por la Universidad Politécnica de Valencia. esta herramienta es utilizada bajo el modelo de Témez.

Esta herramienta permite la modelación del ciclo hidrológico. Además, realiza una valoración general de la cuenca sin considerar la distribución espacial de las variables y de los



parámetros que intervienen en los cálculos, valores que son sustituidos por valores medios, es por ello que dicho modelo se limita para cuencas pequeñas y de tamaño medio, en donde puede existir cierta homogeneidad en clima, edafología y geología.

Para aplicar el modelo de Témez a la cuenca de estudio apoyado de esta herramienta informática, es necesario determinar microcuencas de la zona en estudio, mismas que están definidas por la red de drenaje y la topografía de la zona.

El modelo de Témez considera al suelo como un almacenamiento único en el que existe una entrada de lluvia y una salida de agua evapotranspirada. El excedente de agua se reparte entre el agua que escurre de manera superficial y el agua que se infiltra, se almacena y fluye a través del acuífero para posteriormente descargar en los ríos (Sahuquillo et al., 2008).

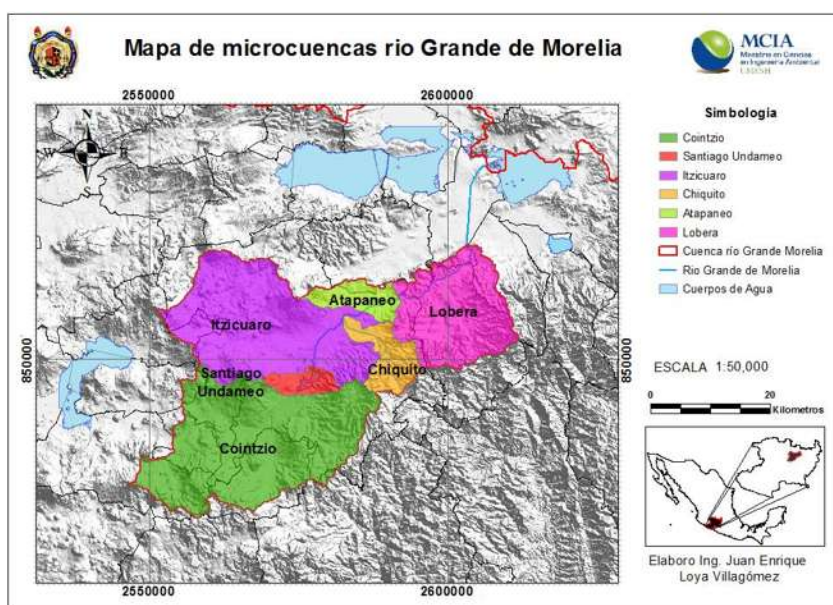


Figura 7-17. Microcuencas río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

Una vez definidas las microcuencas, se establecieron puntos de aforo para realizar la calibración requerida para el modelo. Para nuestro estudio las estaciones de control son las 4 estaciones hidrométricas establecidas anteriormente, una de ellas se ubica aguas arriba del embalse Cointzio, adicionado a dos estaciones ubicadas sobre el afluente del río Grande de Morelia más una adicional sobre el cauce del río Chiquito de Morelia previo a su incorporación con el río Grande.



Así mismo, se definen zonas de influencia de cada estación climatológica sobre la cuenca, determinando estas, a través de los polígonos de Thiessen. Esto permitirá generar series de precipitación, temperatura y evapotranspiración para cada microcuenca necesaria para alimentar el modelo superficial. Al definir estas zonas y la influencia de estos factores climatológicos se procede a la calibración y validación del modelo.

7.3.1 Calibración de Modelo Evalhid.

Para la etapa de calibración, se utiliza el algoritmo evolutivo SCE-UA (Shuffled Complex Evolution method desarrollado por The University of Arizona), (Duan et al., 1994). Este algoritmo ha sido adecuado para ser utilizado con los datos que genera EVALHID, sin embargo, éste se encuentra programado en una hoja de cálculo separada del programa.

El algoritmo SCE funciona a partir de una combinación de procedimientos deterministas y aleatorios, iniciando en diferentes puntos de búsqueda (individuos) los cuales se organizan en equipos (complex) y la solución global óptima se plantea como un proceso evolutivo (evolution) basado en la reproducción (cruce, mutación, recombinación) en donde además existe una mezcla entre los equipos (Casas, 2013).

Indicadores de ajuste

Para la evaluación de la calidad o certeza con que se presentan las modelaciones respecto a los datos reales observados, se hace uso de un grupo de indicadores de ajuste mencionados en el calibrador SCE-UA. A continuación, se presentan las expresiones matemáticas que permiten obtenerlos y los rangos bajo los cuales se clasifican las modelaciones.

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

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

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



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

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

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

$$r^2 = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim}) (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{sim}(t) - \bar{Q}_{sim})^2 \sum_{t=1}^n (Q_{obs}(t) - \bar{Q}_{obs})^2}}$$

Los indicadores mencionados anteriormente son los que se encuentran sugeridos en el calibrador SCE-UA de la herramienta EVALHID, sin embargo, esto no limita el uso de otros indicadores que permitan evaluar la calidad de las simulaciones obtenidas del modelo respecto a los datos medios, tales como la desviación estándar (RSR) y el porcentaje de parcialidad (PBIAS). Seguido se muestran contenidos en una tabla los parámetros de ajuste de los indicadores empleados para el desarrollo de este proyecto.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]}{\left[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y^{mean})^2} \right]}$$

$$PBIAS = \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs})} \right]$$



Tabla 7-15. Parámetros de calibración modelo superficial.

Calidad de Ajuste	NSE	r^2	RSR	PBIAS
Very good	$0.75 < \text{NSE} \leq 1.00$	$0.90 < r^2 \leq 1.00$	$0.00 \leq \text{RSR} \leq 0.50$	$\text{PBIAS} < \pm 10$
Good	$0.65 < \text{NSE} \leq 0.75$	$0.75 < r^2 \leq 0.89$	$0.50 < \text{RSR} \leq 0.60$	$\pm 10 \leq \text{PBIAS} < \pm 15$
Satisfactory	$0.50 < \text{NSE} \leq 0.65$	$0.50 < r^2 \leq 0.74$	$0.60 < \text{RSR} \leq 0.70$	$\pm 15 \leq \text{PBIAS} < \pm 25$
Unsatisfactory	$\text{NSE} \leq 0.50$	$r^2 \leq 0.50$	$\text{RSR} > 0.70$	$\text{PBIAS} \geq \pm 25$

Teniendo establecida la manera en que se evaluarán las modelaciones para determinar si la calibración se encuentra dentro de los rangos aceptables, se muestra la calibración de la estación de control a la entrada del embalse Cointzio.

La primera zona de calibración se refiere a los escurrimientos correspondientes a la microcuenca Cointzio. Tiene un área de influencia de 617.523 km², cuyo punto de calibración es la estación hidrométrica 12347 “Santiago Undameo”, que presenta los registros de entradas mensuales a la presa de Cointzio. En las siguientes graficas se muestra la distribución de los escurrimientos respecto al periodo de calibración, periodo que comprende de 1975-1986, siendo este dónde se presenta una serie de información constante obtenida del Banco Nacional de Datos de Aguas Superficiales (BANDAS).

Se muestran 3 graficas, una con distribución mensual, la segunda representando la distribución anual y la tercera muestra las aportaciones medias mensuales consideradas para este periodo de calibración.

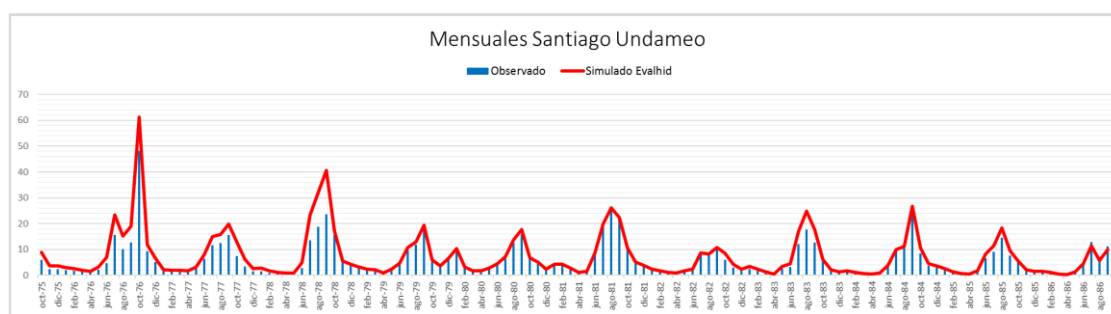


Figura 7-18. Resultados mensuales en punto de calibración Santiago Undameo.

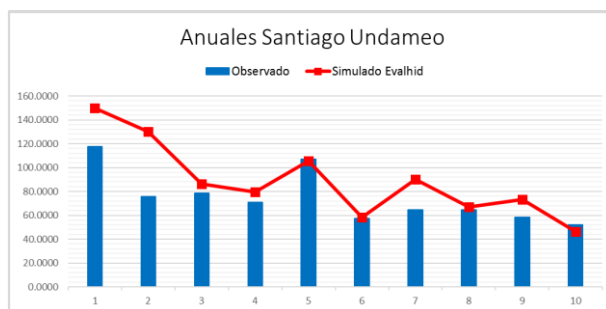


Figura 7-19. Resultados anuales en punto de calibración Santiago Undameo.

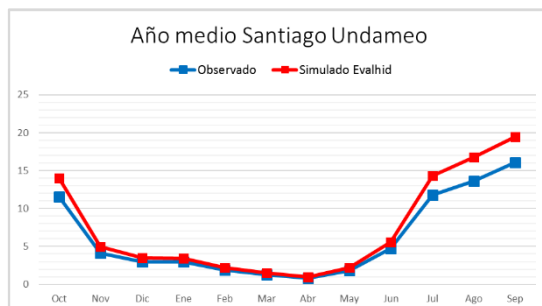


Figura 7-20. Resultados del año medio en punto de calibración Santiago Undameo.

En la Tabla 7-16 se pueden observar los parámetros introducidos en las microcuencas correspondientes para cada punto de calibración observado dentro de la cuenca del río Grande de Morelia. Se da por entendido la calibración de estos modelos cuando los indicadores antes mencionados presentan en su análisis valores próximos a la unidad o según el criterio considerado por el gestor de cuenca.

Tabla 7-16. Parámetros calibración de microcuencas en modelo Evalhid.

Estación Control	Santiago Undameo	Chiquito	Atapaneo		El Plan	
Microcuenca	Cointzio	Chiquito	Itzicuaros	Santiago Undameo	Atapaneo	Lobera
Hmax	72	115	100	100	350	330
c	0.3	0.2	0.3	0.3	0.32	0.32
lmax	135	65	168	168	280	290
alfa	0.26	0.3	0.13	0.1	0.35	0.34
NSE	0.815	0.776	0.791		0.897	
r ²	0.970	0.881	0.910		0.951	
RSR	0.430	0.473	0.457		0.321	
PBIAS	20.860	6.342	11.302		10.071	
NSE	Very good	Very good	Very good		Very good	
r ²	Very good	Good	Very good		Very good	
RSR	Very good	Very good	Very good		Very good	
PBIAS	Satisfactory	Very good	Good		Good	



7.4 Modelación subterránea

Para la modelación subterránea del recurso hídrico, se indica el uso del modelo Aquival 2 para distintos tipos de acuíferos. Los acuíferos pueden ser simulados en función de la disponibilidad de datos o del detalle requerido (de tipo agregado o distribuido). En específico, los modelos distribuidos utilizan la técnica de Autovalores para simulación de acuíferos en sistemas con uso conjunto del agua, manteniendo la precisión de los métodos de diferencias finitas, resolviendo de manera más eficiente y en menor tiempo la ecuación diferencial de flujo.

Puesto que la solución dada por la técnica de Autovalores es en el supuesto de una ecuación de tipo lineal, los casos donde existe no-linealidad (por ejemplo, el secado de un río, manantial o desconexión del río, producto de bombeos), tienen que ser tratados de manera especial, ya sea asumiendo variación de nivel piezométrico en el acuífero es despreciable y las propiedades hidrodinámicas del mismo se mantienen en el tiempo, o bien, haciendo ajuste a valores de caudal de salida y niveles piezométricos, mediante la introducción de acciones exteriores ficticias que compensen este efecto. Todo esto incluido en el módulo de modelación Aquival 2 (2011).

AQUIVAL (Andreu y Capilla, 1996), que es utilizado como un módulo de pre-proceso y simulación de acuíferos, que resuelve la ecuación de flujo subterráneo con el método de Autovalores, permitiendo la integración de modelos de acuífero de tipo distribuido en un modelo de simulación del uso conjunto.

La particularidad de este módulo es la posibilidad de resolver la ecuación de flujo subterráneo de manera directa y explícita (para cada paso de tiempo), mediante el método de Autovalores, proporcionando alturas piezométricas en puntos seleccionados, intercambios río-acuífero, descargas por manantiales, variaciones volumétricas del acuífero, etc. Este módulo ha sido modificado por Hernández *et al.* (2014), para considerar las no linealidades presentes en las relaciones río-acuífero, conexión (perfecta e imperfecta) y desconexión de acuíferos y manantiales al sistema superficial y condiciones de contorno no nulas, las cuales se exponen en apartados subsecuentes del trabajo de tesis.



7.4.1 *Acuífero de tipo Autovalores.*

Se trata de acuíferos en los que se construye un modelo de parámetros distribuidos en los que se ejercen acciones puntuales que condicionan la respuesta total del acuífero. De acuerdo a Sahuquillo y Andreu (1987), el uso de modelos lineales de acuífero resueltos con la técnica de Autovalores, resultan más eficientes para simular el comportamiento del flujo subterráneo de manera suficientemente aproximada. Se proporciona de manera explícita y directa respuestas específicas que son de interés del modelador, mediante el uso de parámetros de control y las acciones ejercidas sobre el acuífero (acciones elementales), se implementan como la combinación lineal de acciones unitarias.

De acuerdo a Paredes *et al.* (2010), es conveniente el disponer con un modelo calibrado en diferencias o elementos finitos o en su defecto, usar el módulo AQUIVAL 2 (2011) para calibrar un modelo de acuífero por Autovalores, del cual se obtienen matrices de Transmisividad (T) y Almacenamiento específico (SF), usadas para multiplicar el vector de estado del acuífero y obtener la respuesta de los parámetros de control usados. La técnica de Autovalores sigue los siguientes pasos para su implementación:

- i. Definir características hidrodinámicas del acuífero, geometría, condiciones de contorno e iniciales
- ii. Elaborar o importar una malla de diferencias o elementos finitos según sea la forma del acuífero y obtener un sistema de ecuaciones diferenciales con las alturas de los nodos de la malla como incógnitas
- iii. Obtener Autovalores y Autovectores correspondientes al cambio de base, que se puede realizar con el módulo AQUIVAL 2
- iv. Definir acciones elementales incidentes
- v. Definir parámetros de control de interés
- vi. Decidir el truncamiento del número de Autovalores a utilizar en la simulación (eficiencia en tiempo de cálculo)
- vii. Obtener matrices complementarias: matriz reducida de Autovectores AR , matriz diagonal de Autovalores α y la matriz de modificación de estado ψ



7.4.2 *Acuífero Morelia-Queréndaro*

El acuífero Morelia-Queréndaro forma parte de la Región Hidrológica No. 12, su gestión pertenece a la Comisión de Cuenca Lago de Pátzcuaro desde el año 2004. Se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 35' y 20° 05' de latitud norte y los meridianos 100° 45' y 101° 25' de longitud oeste, comprende una superficie aproximada de 3,510 km².

Colinda al sur con los acuíferos Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente con los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, referentes al estado de Michoacán. Al norte colinda con los acuíferos Ciénega Prieta-Moroleón y Lago de Cuitzeo, del estado de Guanajuato, al poniente con los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro.

Geopolíticamente abarca la totalidad de los municipios de Cuitzeo, Huandacareo, Santa Ana Maya, Copandaro, Tarímbaro, Álvaro Obregón; de manera parcial los municipios de Morelos, Chucándiro, Morelia, Quiroga, Lagunillas, Acuitzio, Charo, Zinapécuaro, Queréndaro e Indaparapeo; y pequeñas porciones de los municipios de Pátzcuaro, Huiramba y Huaniqueo.

El acuífero pertenece al Organismo de Cuenca VIII Lerma-Santiago-Pacífico, y es jurisdicción territorial de la dirección local de Michoacán. Su territorio se encuentra totalmente vedado y sujeto a las disposiciones de cuatro decretos publicados en el Diario Oficial de la Federación en los años 1956, 1964, 1975 y 1987 (CONAGUA 2009a).

De acuerdo con los resultados reportados en el último censo realizado en el año 2007, se registraron 986 pozos y 23 manantiales. El uso principal del agua es agrícola (54%), el segundo lugar lo ocupa el público urbano (40%) y en menor medida los otros usos (6%) para este análisis se utilizaron los pozos activos. La extracción de agua subterránea de acuerdo con la estimación del Registro Público de Derechos de Agua (REPDa, 2007), es de 162.2 hm³/año.

7.4.3 *Clasificación del acuífero Morelia-Queréndaro*

De acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, en general de tipo libre, con presencia de condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia



de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada, así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, donde se localiza el Lago de Cuitzeo; la porción inferior está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas.

El medio granular y fracturado conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general permeabilidad media a alta y espesor promedio de 300 a 400 m.

Las distintas unidades que conforman el acuífero muestran variaciones: al poniente está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas, cuya geometría es controlada por los sistemas de fallas W-E; hacia Álvaro Obregón y Queréndaro está conformado principalmente por sedimentos clásticos del tamaño de gravas y arenas y hacia la zona contigua al lago de Cuitzeo por sedimentos arcillosos, brechas andesíticas, basaltos así como brechas y cenizas basálticas.

De manera general las rocas presentan permeabilidades que van de medias a altas, de igual manera las transmisibilidades se encuentran en los rangos medios a altos, por lo tanto, los espesores del acuífero son relativamente grandes. El acuífero por lo tanto es capaz de captar elevados volúmenes de la precipitación.

7.4.4 Modelación del acuífero Morelia-Queréndaro

La aplicación del modelo AQUIVAL 2 con base en la técnica de autovalores parte de la definición de las características hidrodinámicas del acuífero, así como de sus condiciones de contorno e iniciales. Esto para realizar la discretización del acuífero Morelia-Queréndaro construyendo una malla con 235 celdas de flujo horizontal de 3 km de ancho x 3 km de largo, llamadas para AQUIVAL “celdas activas”, comprendiendo una superficie total de 2115 Km².

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). Considerándose como parámetros hidrodinámicos a las acciones elementales y los parámetros de control.

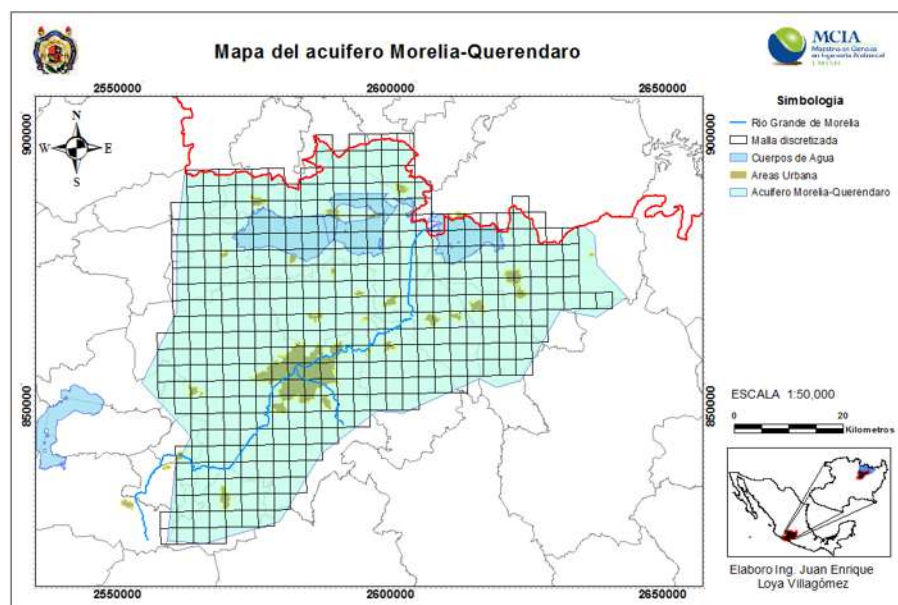


Figura 7-21. Acuífero Morelia-Querendaro. Fuente: Loya, J.

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.

Por lo que las acciones elementales consideradas para este caso en estudio son:

- Recarga vertical. Recarga considerada tanto espacial como temporalmente para cada una de las celdas discretizadas del acuífero, obtenida del modelo lluvia-escurrimiento Evalhid.
- Recarga inducida. Recarga constituida por retornos de riego en la zona agrícola del Distrito de Riego 020 “Morelia-Querendaro” 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. Esta se recibe a través de 13 canales de las zonas altas 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 esta se consideraron bombeos realizados por los módulos 3, 4 y 5 del distrito de riego 020. 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.** Esta se dividió considerando volúmenes extraídos por medio de pozos profundos en la ciudad de Morelia y en demandas urbanas de otras poblaciones del acuífero.

Las acciones elementales presentan un volumen de extracción o recarga al acuífero, estas se presentan en la tabla siguiente y se presentan en Hm³/mes, las acciones con signo positivo indican un volumen de ingresos de agua al acuífero y las acciones con signo negativo presentan una salida del mismo.

Tabla 7-17. Acciones elementales ejercidas sobre el acuífero Morelia-Queréndaro.

Mes	Modulo 3	Modulo 4	CRISOBA	Morelia	Tarimbaro	Charo	Urbana Cuenca	Agrícola	Industrial	Recarga vertical	Recarga induhorizonta
	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)	(hm ³ /año)
Octubre	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.345	-0.054	34.350	16.682
Noviembre	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.308	-0.054	0.000	9.302
Diciembre	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.003	-0.054	0.000	7.333
Enero	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-4.935	-0.054	10.130	20.149
Febrero	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-4.883	-0.054	174.084	48.629
Marzo	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-4.605	-0.054	0.000	7.333
Abril	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-3.404	-0.054	0.000	7.335
Mayo	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-3.483	-0.054	0.043	7.571
Junio	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.202	-0.054	56.224	33.689
Julio	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.345	-0.054	300.172	61.773
Agosto	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.345	-0.054	210.040	57.596
Septiembre	-0.453	-0.238	-0.920	-4.973	-0.252	-0.258	-1.944	-5.192	-0.054	93.346	58.735

Respecto a los parámetros de control, con la información obtenida de estudios realizados para el monitoreo de los niveles piezométricos de la zona en estudio, se plantea la calibración del modelo, seleccionando un grupo de celdas que permitan observar el comportamiento del modelo a través de un periodo de tiempo considerable empleando los niveles estáticos de los pozos monitoreados, los cuales están incluidos en la zona de 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 como parámetros de control.

- 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 paso siguiente 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 del SF (Coeficiente de almacenamiento).

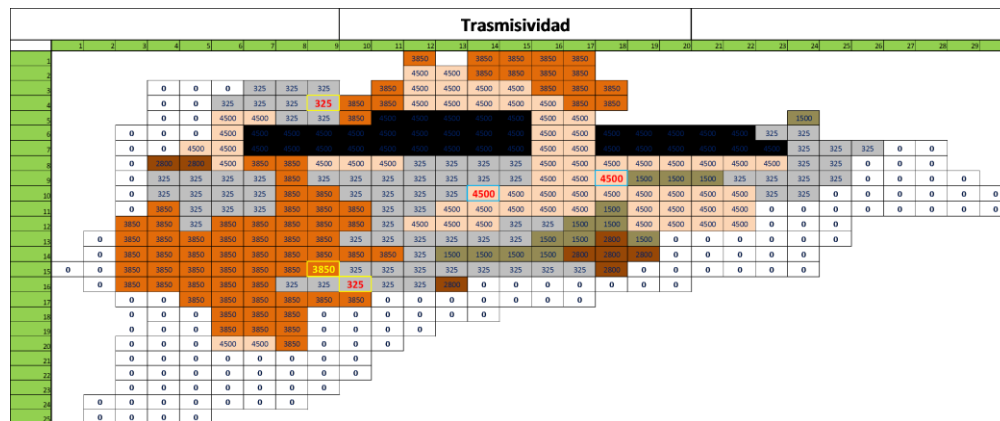


Figura 7-22. Matriz de Transmisividad del acuífero Morelia-Querendaro. Fuente: Loya, J.

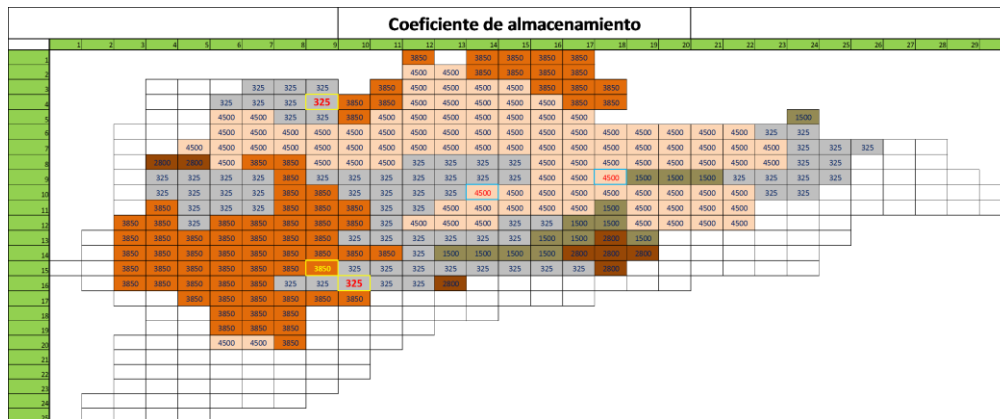


Figura 7-23. Matriz de Coeficiente de almacenamiento del acuífero Morelia-Querendaro. Fuente: Loya, J.

Al plantear estas matrices de Transmisividad y de Coeficiente de almacenamiento, se comienza con la simulación de la modelación del acuífero Morelia-Querendaro, y para observar que los resultados obtenidos de dichas simulaciones son representativos o presentan una correlación aceptable se comparan con los datos introducidos como parámetros de control, en nuestro caso, los pozos de extracción mediante el nivel de su piezómetro estático.



Si la comparación del nivel piezométrico simulado presenta desfase frente al dato observado en un periodo de tiempo considerable, se procede a iterar los datos de transmisividad y de coeficiente de almacenamiento, siempre y cuando no rebasen los límites de estos parámetros, de acuerdo al tipo de litología y tipo de suelo, según sea el caso. Esto para intentar representar de manera general el comportamiento hidrodinámico en los distintos estratos del acuífero. La variación efectuada en estas matrices, traen consigo la continua comparación con los niveles piezométricos, resultando en una calibración que para fines de este proyecto fue de manera gráfica.

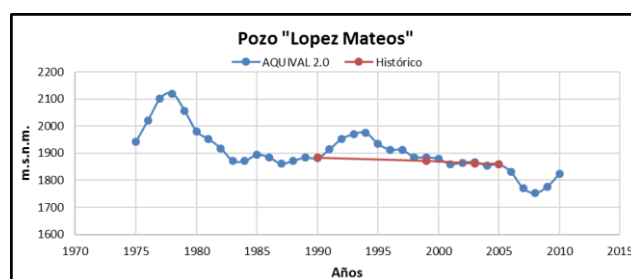


Figura 7-24. Calibración piezométrica del acuífero Morelia - Queréndaro. Fuente Loya, J.

Por lo tanto, para la calibración este tema de estudio, se utilizaron los valores de los últimos años, esto debido a que la información obtenida es poca más sin embargo se trató de representar lo mejor posible la realidad conocida.

Para la calibración se procuró que para los últimos años que los niveles piezométricos fueran muy similares a los que se tenían registro para diferentes pozos de Morelia, Módulo 3 y Módulo 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

De acuerdo a la formulación del modelo matemático, este presenta un ajuste en los primeros 5 años y posteriormente se ajusta a las condiciones que representan la realidad del acuífero, a esto se le llama periodo de calentamiento y se observa en todas las gráficas de calibraciones.

7.5 Esquema de simulación de la cuenca del río Grande de Morelia.

Para la gestión del sistema de recursos hídricos se realizó el esquema de la cuenca del río Grande de Morelia adaptado para la simulación se compone por embalses, tramos de río con y sin recarga al acuífero, demandas consuntivas, tomas de demandas, acuífero de autovalores y nodos que representan las tomas, las confluencias y bifurcaciones. Este esquema de simulación



se actualizó con base al elaborado por Loya *et al.*, 2013, el principal objetivo de la actualización es representar espacialmente con mayor grado de detalle la cantidad del agua en la cuenca del río Grande de Morelia.

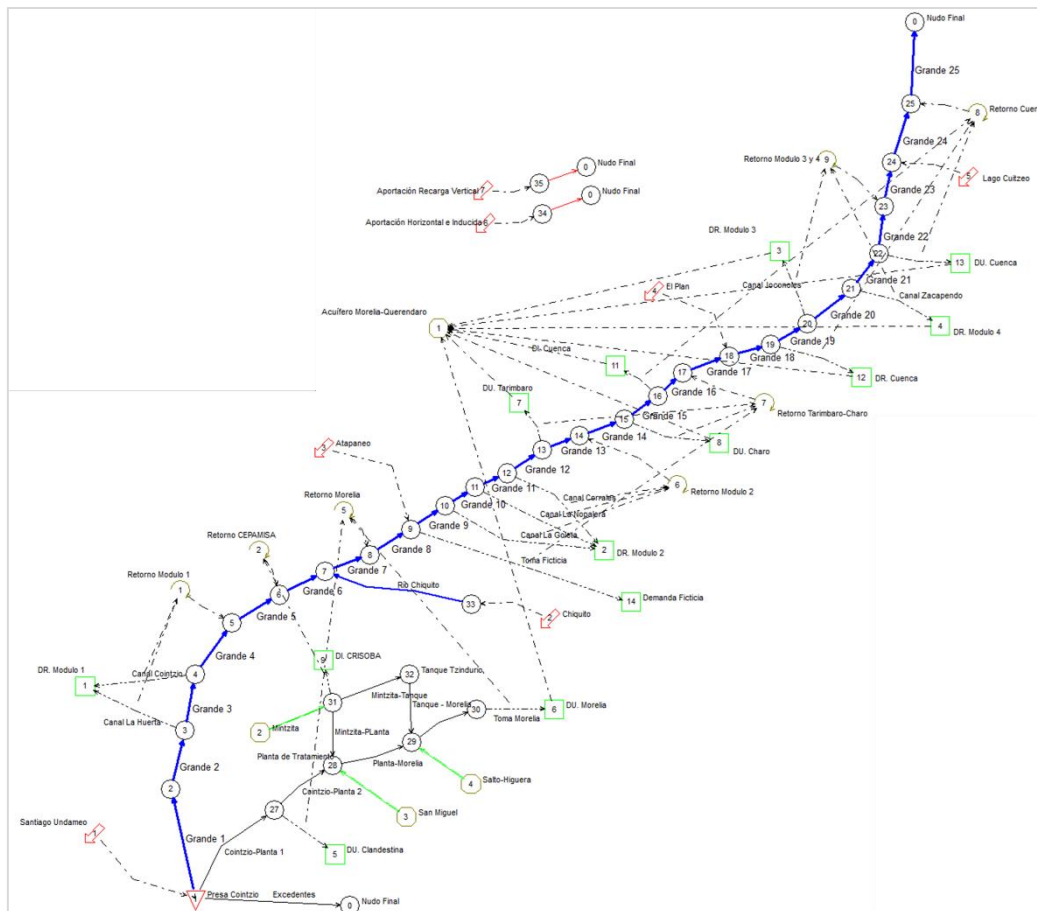


Figura 7-25. Esquema de simulación de la cuenca del río Grande de Morelia. Fuente: Loya, J.

En dicho esquema se cuenta con la presencia de:

- 37 Nodos sistema físico.
- 1 Embalses denominado “Cointzio”.
- 34 Tramos río tipo 1, entre ellos 25 son Tramos de río Grande Morelia, 1 Tramo río Chiquito, resto conexiones del sistema.
- 2 Tramos río tipo 2, son de conexión de las recargas.
- 7 Aportaciones intermedias, Santiago Undameo, Chiquito, Atapaneco, El Plan, Lago Cuitzeo, Recarga Vertical e Induhorizontal.



- 12 Demandas consuntivas: Urbanas (Morelia, Tarimbaro, Charo y Resto de cuenca), Industrial (CRISOBA y resto de Cuenca), Agrícolas (Módulos 1,2,3 y 4; Resto de la cuenca) y toma Clandestina
- 4 Acuíferos: 1 Acuífero autovalores Morelia-Querendaro, 3 acuíferos tipo manantial (Mintzita, San Miguel y El Salto-Higuera).
- 3 Bombeos adicionales: correspondientes a los acuíferos tipo manantial.
- 7 Retornos: corresponden a las tomas de las distintas demandas presentes.

Una vez realizado el esquema con todas sus componentes se realiza una simulación con los valores actuales y se intenta calibra el esquema, es decir lo simulado debe ser lo más parecido posible a la realidad, para el río Grande se calibró el embalse Cointzio, verificando que los volúmenes mensuales simulados sean similares a los volúmenes históricos. Se presentan pequeñas diferencias entre ambos volúmenes, sin embargo, se considera que el comportamiento de los volúmenes es aceptable.

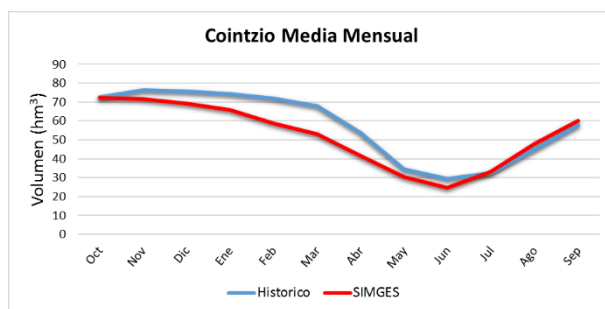


Figura 7-26. Volumen medio anual de calibración en embalse Cointzio. Fuente: Loya, J.

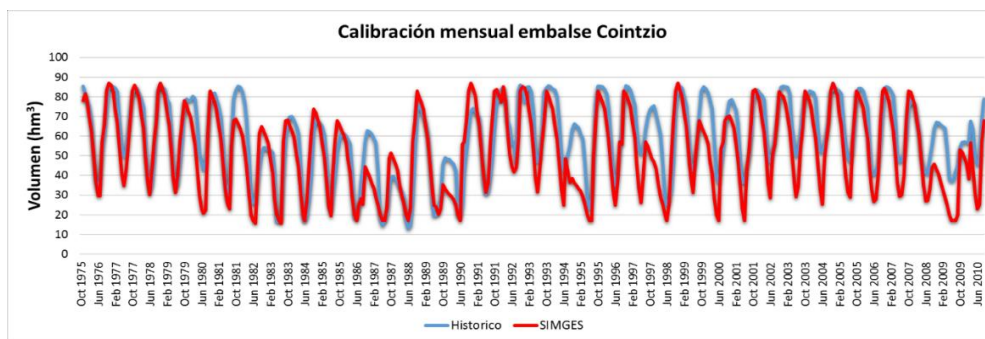


Figura 7-27. Volumen mensual de calibración embalse Cointzio. Fuente: Loya, J.



7.6 Escenarios de adaptación al cambio climático

Se proponen escenarios de simulación para la corrección y prevención al efecto del cambio climático y mejorar el suministro del recurso hídrico para la demanda urbana, principalmente para la ciudad de Morelia, ya que es la demanda de mayor importancia en la zona, puesto que concentra la mayor cantidad de habitantes en la cuenca en estudio.

Estos escenarios son evaluados en el Modelo de simulación para los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5 para poder analizar la mejora en la gestión de la demanda urbana y determinar cuál de los escenarios de simulación es el más viable para la debida corrección a los efectos del cambio climático para los periodos a corto plazo desde el 2015 hasta el 2039, y a largo plazo desde 2075 hasta el 2099.

Así como también se plantea optimizar la eficiencia del sistema hidráulico que abastece a la ciudad de Morelia, la cual actualmente es del 60% por las pérdidas físicas en el mismo, se analizara su eficiencia al 75% que sería la eficiencia más factible que se podría alcanzar; según la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) entre el 25 y 50% de agua suministrada en países primermundistas de Europa se pierde por causas de infiltración o derrame, robo y en general por el deterioro de la infraestructura hidráulica.

Los escenarios propuestos que serán evaluados y simulados con apoyo del modelo SIMGES son los siguientes:

1. Simulación de la situación actual de la cuenca del río Grande, considerando todas las fuentes de abastecimiento existentes como lo son la presa Cointzio, manantiales y pozos profundos, además toma en cuenta las demandas actuales. Con el objeto de conocer la situación de partida, propuesta que llamaremos **Escenario 1**.
2. Simulación de la situación futura de la cuenca, considerando la variación de la oferta del recurso hídrico afectado por los escenarios climáticos RCP 4.5, 6.0 y 8.5. así como del incremento en las demandas para los periodos antes mencionados. Proyección que llamaremos **Escenarios 2A, 2B y 2C** respectivamente.
3. Simulación futura de la cuenca, tomando de base los escenarios 2, incrementando la eficiencia del sistema de abastecimiento del 60% al 75%. **Escenarios 3A, 3B y 3C**.



4. Partiendo del criterio de los escenarios 2, se analiza el incremento de la oferta del recurso hídrico incorporando al esquema un nuevo embalse posicionado aguas arriba del río Chiquito de Morelia. **Escenarios 4A, 4B y 4C.**
5. Considerando la situación propuesta de los escenarios 3, se intenta aumentar la oferta incluyendo el nuevo embalse en el río Chiquito de Morelia. **Escenarios 5A, 5B y 5C.**
6. En este escenario se plantea incrementar la oferta, aumentando la oferta en el sistema, añadiendo a los escenarios 5 una conducción nueva desde la presa Cointzio a la planta potabilizadora de Morelia. **Escenarios 6A, 6B y 6C.**

7.6.1 Esquemas de simulación de los escenarios propuestos

Simulación de la situación actual (**Escenario 1**).

En este escenario se consideran todas las fuentes de abastecimiento de agua como son la presa de Cointzio, los manantiales: Mintzita, Salto-Higuera y San Miguel y pozos profundos tomando en cuenta una demanda clandestina de 180 lps (0.473 Hm³/mes), tal como se muestra en el esquema de simulación de la Figura 7-25. El escenario presenta una demanda actual (considerando pérdidas) de 2700 lps (7.096 Hm³/mes).

Se considera que el 40% de agua suministrada para la demanda urbana se desperdicia debido a las pérdidas físicas en la red de distribución, las cuales llegan a recargar el acuífero Morelia-Queréndaro. La otra parte del suministro que realmente llega para la demanda urbana se considera que el 85% es agua que retorna al sistema por el drenaje de la ciudad y el restante 15% es consumido por la población.

Las familias de **escenarios 2 y 3** emplean el mismo esquema de simulación que presenta el escenario actual (**Escenario 1**), diferenciando la familia 2 por los volúmenes demandados, así como la disposición del recurso hídrico brindado por las alteraciones climáticas futuras. De igual manera para la familia de escenarios 3 que considera las variaciones de los usos y recursos de los escenarios 3 respondiendo adicionalmente al incremento de la eficiencia del sistema de abastecimiento en el orden del 75%.

Ahora bien, para las familias de **escenarios 4 y 5** partimos de los criterios y variaciones climáticas de la familia 2 para analizarlas tomando parte del incremento en la fuente de



abastecimiento adicionando una medida estructural, la cual sería el desarrollo de un embalse nuevo aguas arriba del río Chiquito de Morelia que prevé optimizar el suministro a esta ciudad.

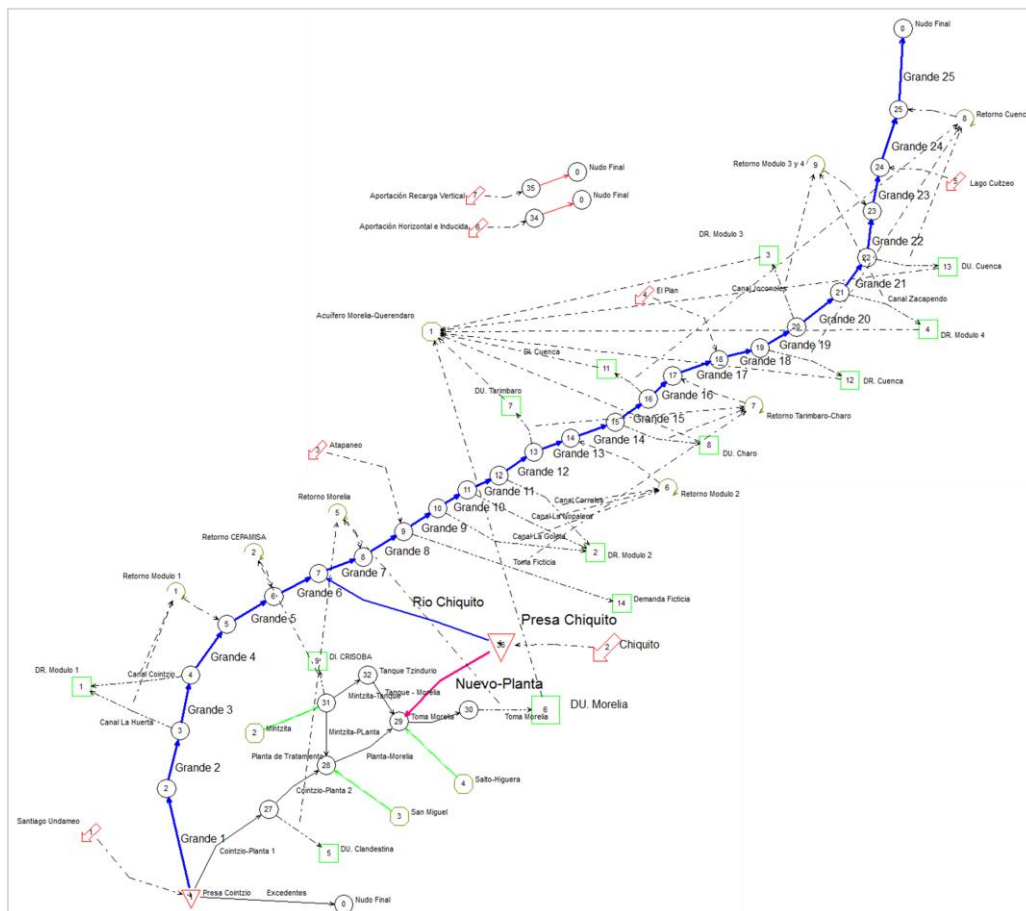


Figura 7-28. Esquema de simulación para la familia de escenarios 4 y 5. Fuente: Loya, J.

En las modificaciones del esquema se incluyen los siguientes nuevos elementos:

- Se incluye un nuevo embalse de nombre “Embalse Propuesto” para almacenar las aportaciones del río Chiquito, su ubicación es al sureste a pocos kilómetros de la ciudad. Para introducir el embalse en nuestro esquema requerimos parámetros físicos del mismo como son:
 - Volumen máximo que es la capacidad máxima de agua que puede almacenar (10.70 Hm³),
 - Volumen objetivo es la capacidad de agua con que se desee que esté operando el embalse es un volumen entre el volumen máximo y el volumen medio (5 Hm³),



- Volumen mínimo que es un volumen para azolves (1 Hm³). También se debe introducir en la ficha del embalse los datos de las curvas cota-superficie – volumen (ver ANEXO 1.) así como valores de evaporación similares al del embalse Cointzio.
- Volumen inicial de 3 Hm³ y un caudal máximo de sueltas de 0.9 Hm³/mes.
- La aportación del río Chiquito la cual se unirá al embalse propuesto, de ahí toma su cauce al río Chiquito.
- Se introduce una conducción adicional tipo 1 denominada “Nuevo-Planta” que parte del Embalse Propuesto para incorporarse al nudo 29 con una capacidad de 343 lps (0.90 Hm³/mes).
- Otra consideración, es dejar de suministrar la demanda Clandestina, para que los 700 lps que vienen de la presa Cointzio a la planta potabilizadora sea aprovechada en su totalidad por la ciudad y así aumentar más la oferta a la demanda urbana.

En cuanto al esquema de simulación requerido para la familia de **escenarios 6** se toma de base el esquema del escenario 5, en el cual se propone aumentar aún más la oferta del recurso hídrico, añadiendo al esquema una línea de conducción paralela a la existente la cual va desde la presa hasta la planta potabilizadora y cuyo nombre asignado es Cointzio-Planta 3 y el cual llevará un gasto medio de 380 lps (1 Hm³/mes).

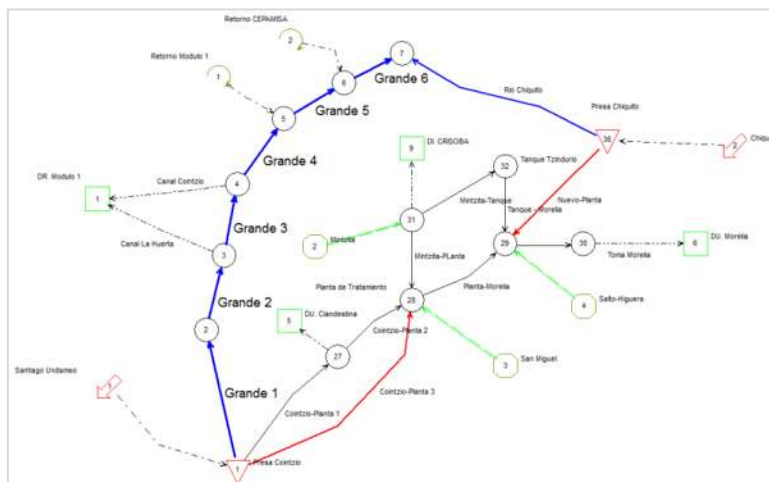


Figura 7-29. Modificaciones del esquema de simulación escenarios 6. Fuente: Loya, J.

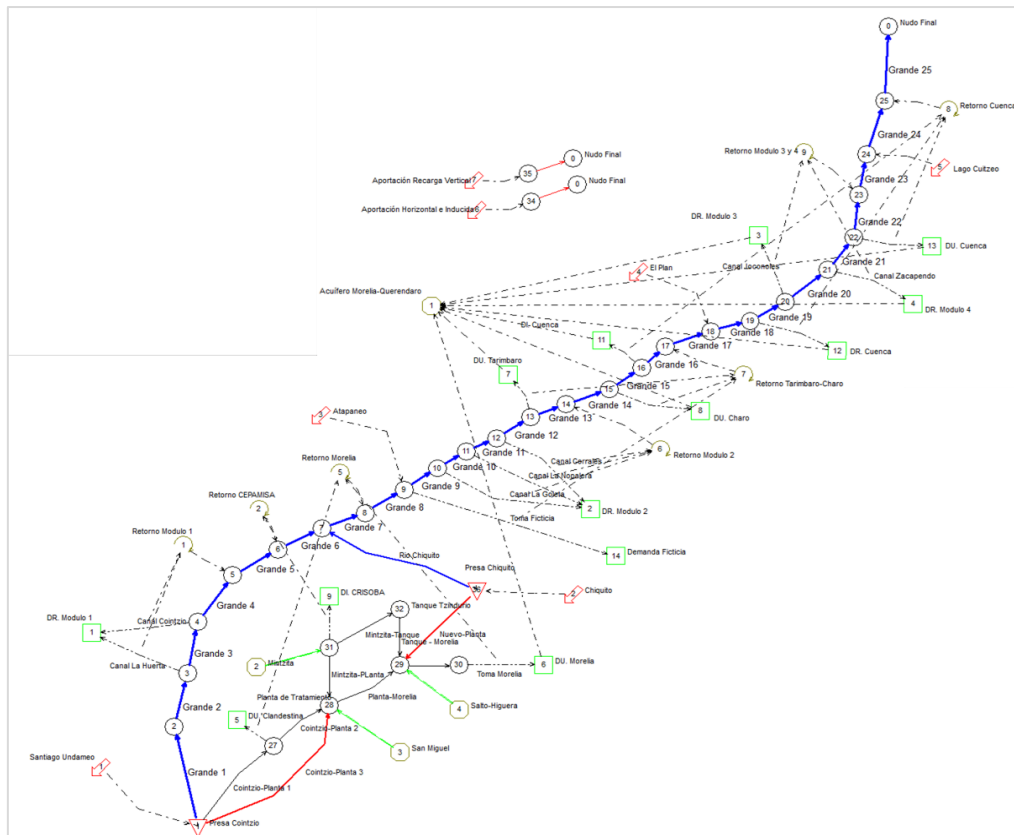


Figura 7-30. Esquema de simulación para la familia de escenarios 6. Fuente: Loya, J.

7.6.2 Análisis de escenario de adaptación al cambio climático

Aplicando los indicadores de eficiencia evaluando el Índice de satisfacción de la demanda (I_1) y el Índice de confiabilidad de la demanda (I_2), para cada uno de los escenarios propuestos, se procede a construir la curva garantía suministro para cada tipo de demanda frente al efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia.

Para fines de demostrar los efectos del cambio climático en nuestra cuenca, bastaría con mostrar 2 de los escenarios climáticos, los cuales serían el escenario pesimista RCP 8.5 y el optimista RCP 4.5.

Partiendo del escenario actual, el cual se considera que actualmente no presenta problemas en el suministro del recurso hídrico y la garantía volumétrica es satisfactoria, se procede al análisis de los posibles escenarios propuestos.

Con base en la metodología propuesta en este proyecto, se cuenta principalmente con 3 tipos de demandas en nuestro sistema. Demandas que se tienen que observar tanto de manera



individual, como conjunta, considerando los criterios asignados para sus garantías en el modelo SIMGES. Puesto que para que una demanda urbana sea aceptable en el sistema, debe presentar mínimo un 95% de garantía volumétrica en el suministro, no así, para la demanda de riego que se considera aceptable con 85%. Esto porque la prioridad de abastecimiento en el sistema es el abastecimiento urbano.

Enseguida se observa una tabla resumen de los índices de garantías obtenidos de las múltiples simulaciones desarrolladas en el modelo SIMGES, donde además podemos ver la catalogación de escases según el valor de estos índices de satisfacción y suministro de la demanda del sistema.

Tabla 7-18. Índices de garantía y grado de escases del sistema del río Grande de Morelia.

Escenario	Periodo	I ₁	I ₂	Escases	Escenario	Periodo	I ₁	I ₂	Escases
Escenario 1	E.Actual	0.96	0.96	Sin Problemas	Escenarios 2	2015-2039	0.89	0.61	Problemas Medios
Escenarios 2	2015-2039	0.89	0.61	Problemas Medios	RCP 8.5	2015-2039	0.89	0.61	Problemas Medios
RCP 4.5	2075-2099	0.70	0.49	Problemas Serios	RCP 8.5	2075-2099	0.68	0.27	Problemas Muy Serios
Escenarios 3	2015-2039	0.96	0.66	Problemas Medios	Escenarios 3	2015-2039	0.96	0.66	Problemas Medios
RCP 4.5	2075-2099	0.86	0.54	Problemas Serios	RCP 8.5	2075-2099	0.84	0.30	Problemas Serios
Escenarios 4	2015-2039	0.94	0.61	Problemas Medios	Escenarios 4	2015-2039	0.94	0.61	Problemas Medios
RCP 4.5	2075-2099	0.74	0.49	Problemas Serios	RCP 8.5	2075-2099	0.72	0.40	Problemas Serios
Escenarios 5	2015-2039	0.98	0.98	Sin Problemas	Escenarios 5	2015-2039	0.98	0.98	Sin Problemas
RCP 4.5	2075-2099	0.91	0.54	Problemas Serios	RCP 8.5	2075-2099	0.88	0.43	Problemas Serios
Escenarios 6	2015-2039	0.97	0.96	Sin Problemas	Escenarios 6	2015-2039	0.97	0.97	Sin Problemas
RCP 4.5	2075-2099	0.93	0.53	Problemas Serios	RCP 8.5	2075-2099	0.90	0.28	Problemas Serios

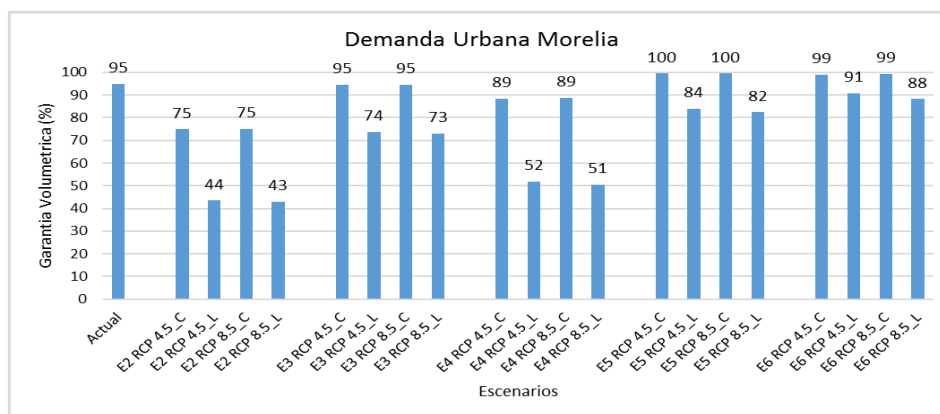


Figura 7-31. Demanda urbana de Morelia frente a los escenarios propuestos. Fuente: Loya, J.

En la Figura 7-31, se observa el comportamiento de la demanda urbana de la ciudad de Morelia en cuanto a la garantía volumétrica de suministro se refiere, frente a los periodos y escenario de simulación propuestos.

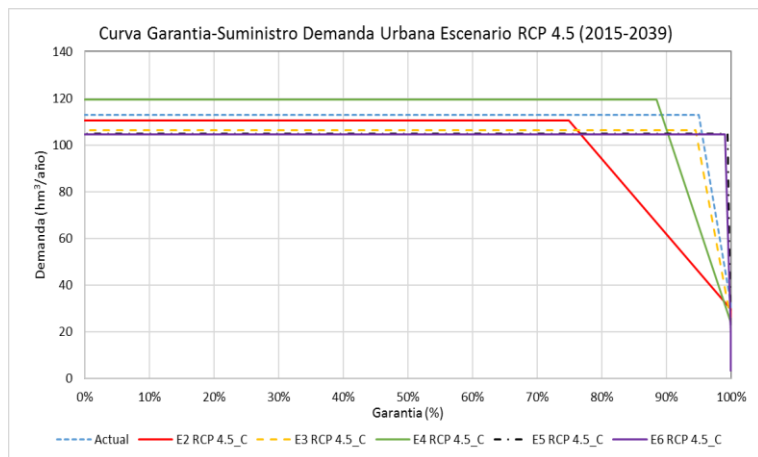


Figura 7-32. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 4.5 corto plazo. Fuente: Loya, J.

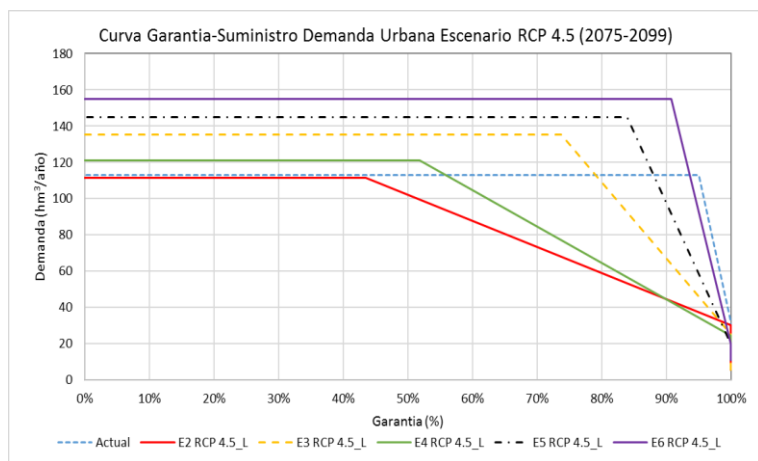


Figura 7-33. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 4.5 largo plazo. Fuente: Loya, J.

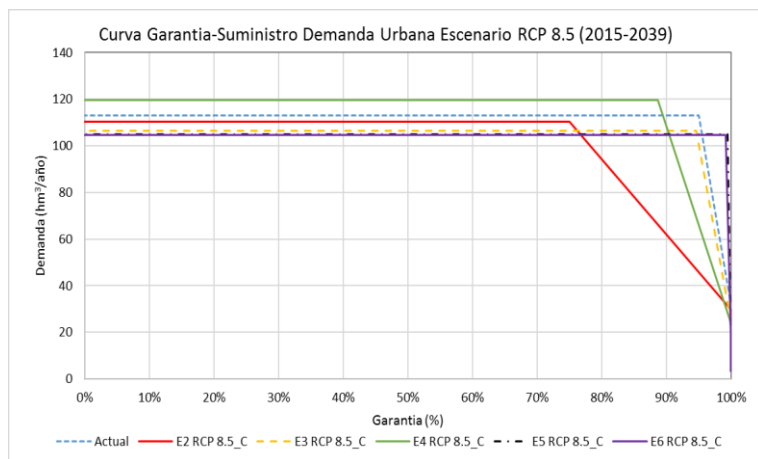


Figura 7-34. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 8.5 corto plazo. Fuente: Loya, J.

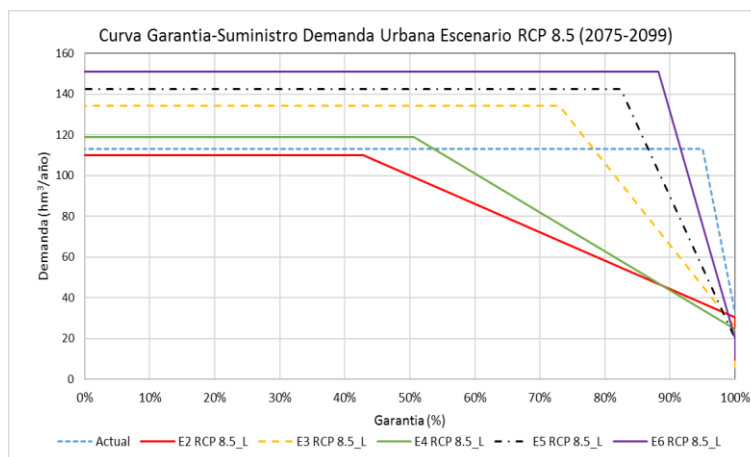


Figura 7-35. Curva garantía-suministro demanda urbana, escenario RCP 8.5 largo plazo. Fuente: Loya, J.

Respecto a las curvas garantía suministro mostradas anteriormente y a la gráfica de la demanda urbana de Morelia de los distintos escenarios propuestos para la adaptación al cambio climático. Se puede observar que la familia de escenarios 2 tiende a decrecer la garantía de suministro. Se observa también que la garantía urbana de la ciudad de Morelia queda por debajo del nivel de garantía de suministro aceptable entorno al 95% de suministro. En cuanto al grado de escases que se puede asignar respecto a la metodología planteada sería un sistema con problemas medios en el periodo a corto plazo, sin embargo, a largo plazo estos problemas se agudizan hasta pudiéndose presentar problemas muy serios.

Para la familia de escenarios 3, se considera el incremento de la eficiencia del sistema de abastecimiento, este presenta resultados satisfactorios respecto al abastecimiento de la demanda urbana, siendo esta la de mayor prioridad. Sin embargo, al incluir medidas constructivas al sistema, esta disponibilidad de agua para abastecimiento urbano comienza a mostrar mejoras en cuanto a su gestión. De igual modo, al observar los resultados a largo plazo, este se ve afectado al no llegar a garantizar suministros aceptables.

Al considerar incluir un embalse en las aguas del río Chiquito de Morelia, frente a los efectos del cambio climático, nos brinda una cantidad adicional de aportación superficial a la zona, así, con este tipo de elementos se puede gestionar un poco más el agua para el periodo 2015-2039. Caso contrario, al visualizar a largo plazo, donde la garantía de la demanda urbana decrecería hasta un 50%. Reflejando escases media a futuro hasta presentar problemas serios.



Ahora bien, si desarrollar una obra como el embalse, nos da la pauta para aprovechar de mejor manera las aportaciones superficiales. Este comportamiento mejora sustancialmente al combinar el aumento de la oferta, utilizando medios de infraestructura y la rehabilitación del sistema de abastecimiento al aumentar su eficiencia del 60% al 75%, combinación mostrada en la familia de escenarios 5. Donde las garantías a corto plazo son aceptables incrementando hasta en un 100%, y comparándolo con los resultados a largo plazo, no se muestra demasiado desfavorable, puesto que considerando que transcurren más de 30 entre los periodos considerados, se muestran resultado entorno al 80%. En cuanto a cuestiones de grado de escases, se puede considerar que para el 2039 el sistema se mantiene sin problemas. Sabiendo que estos resultados pueden mejorar con futuras gestiones.

Ya se observó que, si incluimos estas mejoras proyectadas con la familia de escenarios 5, al sistema de recursos hídricos del río Grande de Morelia mejoro el comportamiento y las garantías se mostraron favorables para el abastecimiento urbano. Por lo tanto, al plantear lo marcado para el escenario 6, se percibe que los problemas de escases son menores, respecto a los presentados con los demás escenarios, puesto que estos escenarios se plantean en gestionar de manera más eficiente las aportaciones superficiales, en este escenario se incluye una conducción adicional a lo que actualmente existe, conducción que se proyecta para obtener los volúmenes excedentes del embalse Cointzio con valores medios de 380 lps. Las garantías volumétricas que se pueden alcanzar son hasta del 99% para el periodo 2015-2039. Y para el periodo subsecuente se contemplan garantías de hasta el 91% para abastecimiento urbano.

Así, que de las propuestas antes mencionadas se puede indicar que el o los escenarios de simulación de mejor comportamiento, basado en el análisis de los indicadores de cambio climático, es el aumentar el aprovechamiento de las fuentes de abastecimiento superficiales, gestionarlas de forma eficiente, medidas indicadas en los escenarios 4, 5 y 6. Estos escenarios pueden verse mejorados con algunas medidas aplicadas con reglas de operación del sistema de abastecimiento y para ello se debe conocer este con mayor detalle.

El aplicar estas medidas de gestión, se puede garantizar el suministro de agua potable a la población actual y futura de la ciudad de Morelia. Puesto que son medidas que se han venido desarrollando en otros sistemas de recursos hídricos. Ahora, cabe considerar la incertidumbre de la viabilidad de llevarse a cabo estas recomendaciones, mismas que a su vez llevan un valor



económico agregado, siendo este un factor decisivo ante el gestor de cuenca para la toma de decisiones. Porque no siempre la medida más eficiente es la que se implementa. Habría que considerar la eficacia de estas acciones al tomar decisiones y seleccionar la que sea más adecuada según el grado de complejidad en su aplicación.

Observadas estas medidas de adaptación o mitigación a la vulnerabilidad del efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia, se puede insinuar, que el cambio climático y sus efectos nos están afectando nuestro ecosistema, mismo que nosotros creamos y el mismo que estamos destruyendo para ello es necesario hacerle frente a los elementos que producen dicho cambio climático, como lo son los gases de efecto invernadero, que son la principal causa de que las variables climáticas se verán afectadas como el incremento de la temperatura y a la disminución de la precipitación y por lo tanto es importante desarrollar investigación de manera integral que nos permitan planificar los recursos para el futuro.

Valor económico de las medidas de adaptación al cambio climático

Respecto al valor económico que implicaría implementar estas medidas de adaptación, en la metodología desarrollada por Chávez, A. (2012). se conceptualiza a la productividad del agua o eficiencia económica del agua, como la producción agrícola por unidad de volumen de agua. Así que para este trabajo se está haciendo énfasis en la demanda urbana, por lo tanto, este criterio de eficiencia económica del agua se modificara por el valor económico que representa la construcción o remodelación de infraestructura para la distribución del recurso hídrico en la zona en estudio.

Para la evaluación de las medidas de adaptación analizadas en este proyecto, considerando costos de referencia de infraestructuras similares a las propuestas. Así que, partiendo de las necesidades requeridas por estas medidas de gestión, se tiene lo siguiente para las distintas familias de escenarios:

- Respecto a los escenarios 1, supone observar el escenario actual con la infraestructura existente, así como de las demandas y recursos actuales.
- Con los escenarios 2, no se propone mejora alguna, solo visualiza futuros comportamientos del sistema frente a los efectos del cambio climático, por eso no se presenta solución estructural.



- Para el escenario 3 se sugiere incrementar la eficiencia del sistema de abastecimiento del actual 60% a una mejora del 75%. De manera que, en este escenario el rehabilitar la infraestructura existente conllevaría un costo económico elevado, cabe mencionar que el desarrollo de esta, además del costo económico produciría un costo social y político. Por ende, evaluar este tipo de medidas se torna complejo para su análisis respecto a lo definido en este proyecto.
- Respecto la familia de escenarios 4, se evalúa la posible implementación de un nuevo embalse, para este embalse, se tomó de referencia el costo de la construcción de la presa Centenario de la Revolución Francisco J. Mújica, ubicada en el estado de Michoacán. Se consideró este embalse por la cercanía a la cuenca del río Grande de Morelia.
- El embalse J. Mújica considera un volumen de almacenamiento máximo de 100 hm³, respecto a los 10.57 hm³ del embalse propuesto, representando cerca del 10% del almacenamiento de referencia. El costo de la licitación de esta infraestructura en el año 2006 fue de poco más de 1500 millones de pesos, pero el costo total de la obra se incrementó hasta poco más de 2862 millones de pesos. Así que, considerando el almacenamiento y el costo de referencia, se tiene como posible costo del nuevo embalse un aproximado de 300 millones de pesos.
- Ahora bien, para los escenarios 5 se propone el combinar las probables mejoras indicadas en los escenarios 3 y 4. En este escenario podemos considerar el valor del escenario 4, por las consideraciones antes mencionadas acerca de los escenarios 3.
- Para el escenario 6 se consideran los criterios del escenario 5, incluyendo una nueva conducción desde la presa Cointzio a la planta potabilizadora de Morelia. En esta se considera un aproximado de 10 km de canal con un costo aproxima de 3 millones de pesos por kilómetro de canal, dando un aproximado de 30 millones de pesos por el nuevo canal. Por lo tanto, este escenario consideraría un costo aproximado de 330 millones de pesos sin considerar las limitaciones de los escenarios 3.



Por lo tanto, para dar mayor garantía volumétrica a la demanda urbana de la cuenca del río Grande de Morelia con base en el mejor comportamiento de los escenarios de simulación propuestos y el costo que implicaría su aplicación, la familia de escenarios 6 sería el escenario idóneo para hacerle frente a la posible escasez a causa de los efectos del cambio climático tanto para el periodo 2015-2039 y 2075-2099 con una inversión aproximada de poco más de 330 millones de pesos.



8 CONCLUSIONES

Una vez realizado este proyecto se concluye, que los efectos del cambio climático afectaran de manera importante en la cuenca del río Grande de Morelia, presentando disminución en sus precipitaciones a causa del incremento de las temperaturas de la zona, produciendo escasez del recurso hídrico en escenarios futuros.

Por lo tanto, la aplicación de la metodología de medidas de adaptación al cambio climático nos auxiliaría en identificar posibles soluciones para reducir esta posible escasez, así como mantener o incrementar una garantía volumétrica aceptable del recurso hídrico en la zona en estudio.

La metodología propuesta permite identificar un conjunto de indicadores de eficiencia que permitan valorar el comportamiento de un sistema de recursos hídricos frente a los efectos del cambio climático. La identificación de estos indicadores se ha realizado en cuenca del río Grande de Morelia. Se seleccionaron los indicadores de calidad de servicio (I1) y de confiabilidad de la demanda (I2) porque permiten valorar la fiabilidad y garantía del servicio prestado.

Así que la metodología utilizada permite identificar para diferentes medidas de adaptación, distintos grados en la mejora del sistema y los posibles costos correspondientes a dichas mejoras. Así mismo se brinda a los tomadores de decisiones el poder seleccionar la alternativa que más se ajuste a los requerimientos de gestión.

Para la adecuada gestión del recurso hídrico, las medidas de adaptación muestran un amplio abanico de posibles alternativas de solución tanto de manera estructurales como no estructurales. La selección dependerá del nivel de mejora y del coste que se persiga en el sistema.

Por lo tanto, se puede afirmar que la aplicación de esta metodología permite identificar medidas de adaptación que mejoran el comportamiento del sistema de recursos hídrico de la cuenca del río Grande de Morelia considerando los efectos del cambio climático, bajo la aplicación de diferentes medidas de gestión. Además de proporcionar una vista generalizada de las regiones de la cuenca que requieran más atención frente a los posibles efectos del cambio climático, incluyendo un análisis del sistema con el uso de indicadores de escasez y el análisis del valor del agua.



9 RECOMENDACIONES Y LÍNEAS FUTURAS

De acuerdo a las conclusiones desarrolladas en este proyecto, con base a la metodología empleada, se puede observar la magnitud del proyecto y su aplicación en zonas donde se desee conocer el grado de escasez que el cambio climático pudiera general. Pudiéndose aplicar a nivel de cuenca del Lago de Cuitzeo u otro nivel que lo requiera, respecto al interés de los tomadores de decisión.

Además de las medidas adaptación propuestas para este proyecto, se pueden proponer reglas de operación para generar una gestión adecuada del sistema de abastecimiento existente en la cuenca y reducir la explotación de agua subterránea y fomentar la recuperación del acuífero, también el considerar la reutilización del agua para usos que no requieran agua potable.

Se puede analizar y proponer medidas de gestión del recurso hídrico respecto a la demanda agrícola del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro, la cual presenta poco más del 60% de la demanda total de la cuenca del río Grande de Morelia. Esto para obtener mayor eficiencia y utilidad por hectárea de cultivo.

Actualizar la base de datos de los distintos organismos responsables de la obtención de información como hidrológica, climática, geológica y demográfica. Así, con mayor cantidad y calidad de información se podría llegar a resultados más contundentes y con mayor fiabilidad para dar solución temprana y disminuir a la posible vulnerabilidad del sistema de gestión a los efectos del cambio climático.

Desarrollar un Modelo de Circulación General Atmósfera – Océano nacional, que represente mejor el comportamiento climático, respecto a variables locales, esto para reducir la incertidumbre generada al implementar modelos desarrollados por otros países.



10 BIBLIOGRAFÍA

- Andreu, J., Solera, A., Capilla, J., Ferrer, J. (2007). Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. *Manual del usuario*, 106 pp. Valencia, España.
- Bates B, Kundzewicz ZW, Wu S, Palutikof J. (2008). Climate change and water. . *IPCC Technical Paper VI*.
- Burnash, R.J.C., Ferral, R.L., McGuire R.A. (1973). A generalized streamflow simulation system – conceptual modeling for digital computers. *U.S. Department of Commerce, National Weather service and State of California, Department of Water Resources*.
- Casas, A. G. (2013). Evaluación del recurso hídrico en la cuenca del río Turia (España) mediante la aplicación de modelos semiagregados de Precipitación-Escorrentía. *Tesis de maestría, Universidad Politécnica de Valencia*, 157 pp. Valencia, España.
- Chávez, A. (2012). Propuesta metodológica para la identificación de medidas de adaptación al cambio climático en sistemas de recursos hídricos. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Madrid*, 247 pp. Madrid, España.
- Comisión Nacional del Agua. (2007b). Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatío - Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia – Queréndaro y Pastor Ortiz en el estado de Michoacán (Pastor Ortiz). *Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales*, 196 pp. D.F, México.
- Convención Marco de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. (1992). *Organización de las Naciones Unidas*. FCCC/INFORMAL/83*GE.05-61702 (S) 130605.
- Correa, A. (2012). Modelación hidrológica distribuida subterránea incluyendo aspectos medioambientales. *Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 105 pp. Morelia, Michoacán, México.
- Duan, Q., Sorooshian, S. y Gupta, V. K. (1994). Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *Journal of Hydrology, Vol. 158*, 265-284 pp.
- Falkenmark, M. et al. (1989). Macro-scale Scarcity Requires Micro-scale Approaches: Aspects of Vulnerability in Semi-arid Development. *Natural Resources Forum. Vol. 13*.



- García, D. (2012). Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia. *Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 192 pp. Morelia, Michoacán, México.
- García, L. (2015). Evaluación del impacto del cambio climático en los recursos hídricos en la cuenca del río Tuxpan, Michoacán. *Tesis de Maestría. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 192 pp. Morelia, Michoacán, México.
- Hernández, J. (2010). Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos. *Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 207 pp. Morelia, Michoacán, México.
- Hernández, M. A. (2015). Metodología de integración de modelos de acuíferos en sistemas de uso conjunto, mediante la evaluación eficiente de condiciones de contorno no lineales presentes en relaciones río-acuífero. *Tesis Doctoral, Universidad Politécnica de Valencia*, 340 pp. Valencia, España.
- IPCC. (2001). Tercer Informe de Evaluación. Cambio climático 2001. Impactos, adaptación y vulnerabilidad. *Resumen para responsables de políticas y Resumen técnico*, 101 pp.
- IPCC. (2007). Climate change 2007: Contribution of Working Groups I, II and III. *Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, 1-104 pp.
- Lama, B. (2011). Metodología de evaluación e identificación de políticas de adaptación al cambio climático en la gestión de recursos hídricos. *Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Madrid*, 278 pp. Madrid, España.
- Loya, J. (2013). Medidas de mitigación al efecto de cambio climático en la demanda urbana de la cuenca del río Grande de Morelia. *Tesis de Licenciatura. Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo*, 161 pp. Morelia, Michoacán, México.
- Martin-Carrasco F, Garrote L, Iglesias A, Mediero L. (2012). Diagnosing Causes of Water Scarcity in Complex Water Resources Systems and Identifying Risk Management Actions. *Water Resources Management*. doi: 10.1007/s11269-012-0081-6.



- Martín-Carrasco, F.J, Garrote, L, Mediero, L. (2007). Drought-induced water scarcity in water resources systems, Extreme hydrological events: new concepts for security. *NATO Science Series. IV: Earth and Environmental Sciences. Vol. 78*, 301-312 pp.
- Ohlsson, L. (1998). Water and Social Resource Scarcity. *WATSCAR II*.
- ONU/WWAP. (2003). 1er Informe de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos en el Mundo: Agua para todos, agua para la vida. *UNESCO* . París, Nueva York y Oxford: Berghahn Books.
- Paredes, J., Solera, A., Andreu, J., Lerma, N. (2011). Herramienta EvalHid para la evaluación de recursos hídricos. *Manual técnico, Grupo de Ingeniería de Recursos Hídricos, Universidad Politécnica de Valencia*, 50 pp. Valencia, España.
- Rodríguez J, Weatherhead E, Knox J, Camacho E. (2007). Climate change impacts on irrigation water requirements in the Guadalquivir river basin in Spain. *Regional Environmental Change 7*. doi: 10.1007/s10113-007-0035-3, 149-159 pp.
- Sahuquillo, A., Cassiraga, E., Solera, A., Murillo, J. M. (2008). Modelos de uso conjunto de aguas superficiales y subterráneas. *Instituto Geológico y Minero de España*, 367 pp. Valencia, España.
- Seckler, D., et al. (1998). World water demand and supply, 1990 to 2025: Scenarios and issues. *Research Report 19. Colombo, Sri Lanka: International Water Management Institute*.
- Sullivan, C. (2002). Calculating a Water Poverty Index. *World Development Vol. 30, No. 7*, 1195-1210 pp.
- Temez, J. (1977). Modelo matemático de transformación precipitación aportación.
- World Resources Institute. (2000). World Resources 2000-01. Oxford Press, New York.



11 ANEXO 1.

11.1 Cálculo de la capacidad de almacenamiento del río Chiquito.

11.1.1 Localización del nuevo embalse

El nuevo embalse que se propondrá para mejorar la gestión de la demanda urbana de Morelia, almacenará el agua del río Chiquito, estará ubicado al sureste, a pocos kilómetros de la ciudad, cerca del poblado Jesús del Monte, el cual tendrá una capacidad de almacenamiento de 10.70 hm³ y una superficie de 52.15 ha.

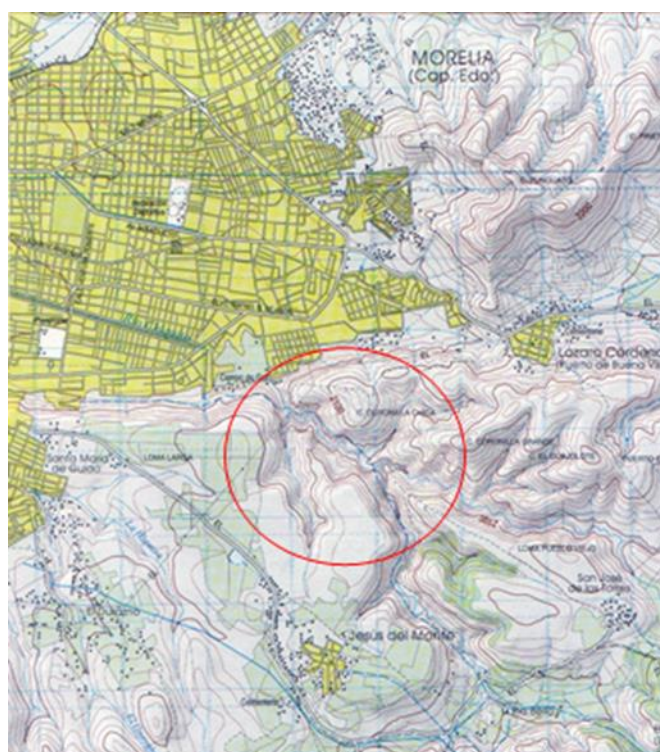


Figura 11-1. Localización del embalse propuesto para nuestro esquema de simulación.

Un embalse es un depósito artificial de agua que se forma mediante un dique o una presa en el curso de un río o arroyo, con el fin de almacenar sus aguas para distintos usos. El agua de los embalses se utiliza en el abastecimiento de las poblaciones, para regar los terrenos y para la producción de energía eléctrica. Además, los embalses construidos en los cursos alto y medio de algunos ríos regulan las variaciones de su caudal debidas a las precipitaciones.



Para introducir el nuevo embalse en nuestro esquema de simulación, necesitamos parámetros físicos del mismo como son: volúmenes máximos, objetivos y mínimo, así como las curvas de Elevación-Área y Elevación-Volumen las cuales fueron obtenidas con ayuda de una carta topográfica y con un programa de computadora.

Curvas de Nivel del Embalse

