



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**



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

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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA
GESTIÓN DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DE UN SISTEMA DE
RECURSOS HIDRICOS DESARROLLADO, CASO CUENCA DEL RÍO
GRANDE DE MORELIA**

para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta
JOEL HERNÁNDEZ BEDOLLA

Ingeniero Civil

Director de Tesis:
Dr. en Ingeniería Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Co-Director de Tesis:
Dr. en Ingeniería Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Morelia, Michoacán, Septiembre de 2014



**UNIVERSIDAD MICHOACANA
DE SAN NICOLÁS DE HIDALGO**

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



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

**EVALUACIÓN DEL EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO SOBRE LA
GESTIÓN DE LA CANTIDAD Y CALIDAD DE UN SISTEMA DE
RECURSOS HIDRICOS DESARROLLADO, CASO CUENCA DEL RÍO
GRANDE DE MORELIA**

para obtener el grado de
MAESTRO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA AMBIENTAL

presenta
JOEL HERNÁNDEZ BEDOLLA

Ingeniero Civil

Director de Tesis:
Dr. en Ingeniería Sonia Tatiana Sánchez Quispe

Co-Director de Tesis:
Dr. en Ingeniería Ruth Alfaro Cuevas Villanueva

Morelia, Michoacán, Septiembre de 2014





Índice

1	Introducción.....	1
2	Marco Teórico	3
2.1	Cambio climático	3
2.1.1	Historia del cambio climático	3
2.1.2	Efecto Invernadero	8
2.1.3	Gases de efecto invernadero.....	10
2.1.4	Evidencia del cambio climático	13
2.1.5	Escenarios de Emisión de GEI.....	14
2.1.6	Modelos de Circulación General.....	21
2.1.7	Regionalización de los MCG	22
2.1.8	Legislación en Materia de cambio climático.....	23
2.2	Calidad del agua.....	26
2.2.1	Contaminantes convencionales del agua.....	27
2.2.2	Modelos de gestión de calidad y cantidad del agua	30
2.2.3	Modelación en conducciones	31
2.2.3.1	Hidráulica de ríos.....	31
2.2.3.2	Dispersión longitudinal	32
2.2.3.3	Aireación	32
2.2.3.4	Modelación de calidad del agua	33
2.2.4	Legislación en materia de calidad del agua.....	35
2.3	Cantidad del agua.....	39
2.3.1	Escurrimiento superficial y recarga al acuífero.....	39
2.3.2	Demanda de los cultivos	42
2.3.3	Modelación hidráulica de acuíferos	45
2.3.3	Agua para uso urbano.....	46



2.4 Sistema de GRH AQUATOOL/SIMGES/AQUIVAL/GESCAL.....	47
3 Antecedentes.....	49
3.1 Calidad del agua.....	49
3.2 Modelación superficial y subterránea	51
3.3 Trabajos realizados en la cuenca del río Grande de Morelia	53
3.4 Programas de gobierno que incluyen adaptación al cambio climático	54
4 Justificación.....	56
5 Hipótesis	58
5.1 Hipótesis general.....	58
5.2 Hipótesis específicas.....	58
6 Objetivo	59
6.1 Objetivo general.....	59
6.2 Objetivos específicos	59
7 Metodología.....	60
7.1 Recolección de datos	61
7.1.1 Características físicas del río.....	61
7.1.2. Modelo hidráulico	61
7.1.3 Parámetros de calidad del agua	63
7.2. Análisis estadístico de datos.	63
7.1 Deducción, consistencia y homogeneidad de los datos de precipitación.....	63
7.1.1 Deducción de datos faltantes.....	63
7.1.2 Consistencia de datos de precipitación.....	64
7.1.3 Homogeneidad de los datos de precipitación.....	65
7.2 Análisis estadísticos para la calibración y validación de las modelaciones matemáticas	66
7.3 Elaboración del Modelo de cantidad.....	68
7.4 Elaboración del modelo de calidad	69
7.5 Elaboración del modelo subterráneo.....	70



7.6	Elaboración del modelo conjunto	70
7.7	Modelación incluyendo escenarios de cambio climático.....	71
7.7.1	Determinación de los modelos y escenarios	71
7.7.2	Determinación de la precipitación y temperatura.	72
7.7.3	Modelación incluyendo cambio climático.	73
8	Resultados.....	74
8.1	Zona de estudio	74
8.2	Obtención de las Aportaciones a través de EVALHID	77
8.2.1	Características meteorológicas de la cuenca	78
8.2.2	Calibración	80
8.3	Retornos Urbanos	83
8.4	Demanda Agrícola	85
8.5	Sistemas de Apoyo a la Decisión.....	87
8.6	Calibración del sistema superficial	89
8.7	Características del río Grande de Morelia	92
8.8	Volumen de escurrimiento.....	95
8.9	Resultados de la simulación del río grande mediante HEC-RAS.....	97
8.9.1	Dispersión Longitudinal.....	99
8.9.2	Aireación	100
8.9.3	Diseño de las modelaciones hidráulicas en Hec-Ras	101
8.10	Estaciones de calidad del agua.....	102
8.11	Calibración Calidad	104
8.12	Sistema Subterráneo	110
8.12.1	Clasificación del acuífero Morelia-Queréndaro	111
8.12.2	Calibración de sistema subterráneo.....	114
8.13	Escenarios de cambio climático.....	120



8.14 Evidencia del cambio climático	122
8.15 Proyección de la temperatura para las estaciones de calidad del agua.	124
8.16 Efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales	126
8.17 Efecto del cambio climático en las demandas agrícolas	128
8.18 Demanda urbana futura	129
8.19 Efecto del cambio climático en la Gestión de la cantidad del agua.....	134
8.19.1 Análisis de resultados de garantías mediante diferentes criterios de Evaluación para las demandas agrícolas	137
8.19.2 Análisis de resultados para la demanda urbana por medio del criterio IPH 2008	140
8.20 Efecto del cambio climático en el agua subterránea.....	140
8.21 Déficits en el sistema de la cuenca del río Grande de Morelia.....	141
8.22 Efecto del cambio climático en la Gestión de la Calidad del Agua.....	142
8.23 Discusión de los Modelos Elaborados	160
8.24 Discusión de los resultados obtenidos	162
8.25 Vulnerabilidad Riesgo y adaptación al cambio climático	165
8.26.1 Vulnerabilidad y Riesgo.....	165
8.26.2 Adaptación al cambio climático.....	172
9 Líneas de investigación futuras	172
10 Bibliografía.....	174



DEDICATORIA:

A Dios

Por permitirme cumplir con un objetivo más en mi vida y por la sabiduría que me ha dado.

A mis padres:

Raymundo Hernández Gutiérrez y Lucía Bedolla Melgarejo que me dieron la vida y me han apoyado en todo lo que he necesitado, además me han dado la fuerza para seguir adelante, siempre están en mi corazón y en mi mente.

A mis hermanos:

Claudia, Ricardo y Aurora gracias por estar conmigo y apoyarme durante todos mis estudios, gracias por creer en mí.

A mis sobrinos:

Elizabeth, Yoset, Alan Uriel, Zareth Amauri y Johan Yael por hacerme recordar esos hermosos momentos de mi infancia

Al amor de mi vida:

Guadalupe Zamudio Méndez por apoyarme, estar conmigo y ser mi motivo de inspiración.

A mis asesoras de tesis:

Dra. Sonia Tatiana Sánchez Quispe Dr. Javier Paredes Arquiola y Dra. Ruth Alfaro Cuevas Villanueva por el apoyo y su conocimiento transmitido que me han permitido el desarrollo de esta tesis.



Resumen

El cambio climático es un fenómeno que se ha demostrado en los últimos años, sus afectaciones serán a escalas globales y con efectos en diferentes sectores. Los registros de observaciones y las proyecciones climáticas aportan abundante evidencia de que los recursos de agua dulce son vulnerables y pueden resultar gravemente afectados por el cambio climático, con muy diversas consecuencias para las sociedades humanas y los ecosistemas. De acuerdo a las proyecciones más recientes del IPCC mediante los escenarios RCP 8.5, 6.0 y 4.5 se verán afectados la cantidad y calidad del agua. La disponibilidad, la contaminación, la estabilidad, la accesibilidad y la utilización de los alimentos, esto ocasionara una disminución de la seguridad alimentaria y un aumento de la vulnerabilidad de diferentes zonas de estudio.

Este estudio está diseñado para evaluar y mejorar las cuencas hidrográficas enfoque de modelo en la caracterización de impactos del cambio climático sobre la disponibilidad del agua y la calidad del agua en un sistema complejo de recursos hídricos. Para esto se llevó a cabo un análisis secuencial de diferentes modelos para determinar escurrimientos naturales, recarga subterránea, demandas agrícolas, demandas urbanas y concentración de DBO_5 y O_2 en río. El modelo lluvia escurrimiento utilizado fue el de Témez, incorporado al software EVALHID se utilizó para determinar escurrimientos superficiales y recarga subterránea al acuífero; se utilizó el método de Penman-Monteith-FAO mediante el programa CROPWAT 8.0 para estimar las demandas agrícolas; la estimación de la población se determinó con diferentes métodos de crecimiento y la demanda urbana mediante la metodología de OOAPAS 2010; el acuífero se modelo mediante el método de autovalores y el programa AQUIVAL; La gestión de recursos hídricos se llevó a cabo mediante el programa AQUATOOL y las extensiones SIMGES (cantidad del agua ríos y presas)/ AQUIVAL (acuíferos) y GESCAL (calidad de agua en ríos, presas y acuíferos).

Los resultados indican decremento en la disponibilidad del agua, incrementos en las demandas, disminución en los escurrimientos, incremento en déficits en las demandas, acentuación en la contaminación del agua y disminución de la calidad de la misma. El escenario más crítico es el RCP 8.5, seguido del RCP 6.0 y el menos crítico RCP 4.5.

Palabras clave. Cambio climático, cantidad del agua, calidad del agua.



Abstract

Climate change is a phenomenon that has been shown in recent years, his affectations will be in global scales and its effects on different sectors. Records of observations and climate projections provide abundant evidence that freshwater resources are vulnerable and can be severely affected by climate change, with very different consequences for human societies and ecosystems. According to the most recent projections by IPCC RCP 8.5, 6.0 and 4.5 scenarios affected the quantity and quality of water. Availability, pollution, stability, accessibility and utilization of food, this would cause a decrease in food security and increased vulnerability of different areas of study.

This study is designed to evaluate and improve watershed model approach in the characterization of impacts of climate change on water availability and water quality in a complex system of water resources. For this we conducted a sequential analysis of different models to determine natural runoff, groundwater recharge, agricultural demands, urban demands and BOD₅ concentration in river and O₂. Rainfall runoff model used was Témez incorporated EVALHID software, it was used to determine surface runoff and groundwater recharge to the aquifer; the Penman-Monteith-FAO used by CROPWAT 8.0 program to estimate agricultural demands; the estimation of the population was determined with different methods of growth and urban demand by OOAPAS methodology 2010; the aquifer model by the method of autovalores and AQUIVAL program; the water management was carried out by the program AQUATOOL and extensions SIMGES (water quantity, rivers and dams) / AQUIVAL (aquifers) and GESCAL (water quality in rivers, reservoirs and aquifers). The results indicate decrease in water availability, increased demand, decreased runoff, increased deficits demands, stress on water pollution and decreased quality of it. The most critical is the RCP 8.5 scenario, followed by the RCP 6.0 and RCP 4.5 less critical.

Key words. Climatic change, Water quality, water quantity,



1 Introducción

El concepto de cambio climático, surge por primera vez en el siglo XIX, como resultado de estudios geológicos que encontraron que desde épocas prehistóricas, la tierra había sufrido varios cambios de clima. Por mucho tiempo, los primeros cálculos del impacto humano sobre los cambios en el clima se discutieron acaloradamente, pero fue en los años 1960 que la evidencia científica comenzó a apoyar la noción de que las actividades humanas pudieran en realidad afectar el clima global. (Martínez *et al.*, 2004).

Las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) resultantes de ciertas actividades humanas, han sido la principal causa del inusual calentamiento del planeta durante los últimos 150 años (Barros et al., 2005, IPCC, 2007,).

La disponibilidad y calidad del agua determinan la productividad de las principales actividades de subsistencia, y ambos aspectos han disminuido en años recientes en México, por lo que el sector hídrico es uno de los más interesados en promover estrategias de adaptación ante el cambio climático (SEMARNAT 2012).

El 73% de los cuerpos de agua del país están contaminados, ya que 80% de las descargas de centros urbanos y 85% de las industriales se vierten directamente a éstos. El uso de aguas no tratadas para el riego es una práctica común en 180,000 ha de 5,670,000 ha de área total de riego; la continua mezcla de estas aguas con afluentes de consumo humano en épocas de lluvias incrementa la vulnerabilidad de la salud en zonas urbanas (INE, 2012). A partir de las evaluaciones de calidad del agua para los tres indicadores de la misma (DBO₅, DQO y SST), aplicadas por CONAGUA a los sitios de monitoreo en el año 2009, se determinó que 21 cuencas están clasificadas como fuertemente contaminadas en algún indicador, en dos de ellos o en todos (INE 2012).

Los cambios climáticos globales tienen mayor potencial para alterar la calidad del agua son el incremento de la temperatura, la reducción de la precipitación, el incremento de la evapotranspiración entre otros Parry *et al.*, (2007) e IPCC (2007). El agua en ríos podrá experimentar cambios en los procesos de transporte de sedimentos, nutrientes, carbón orgánico disuelto, patógenos, pesticidas y contaminación térmica, lo cual podrá tener un



impacto negativo en los ecosistemas, en la salud pública y en la confiabilidad y operación de sistemas de suministro de agua para diferentes usos (Cárdenas *et al.*, 2010).

El aumento de las temperaturas afectará también las propiedades físicas, químicas y biológicas de los lagos y ríos de agua dulce, y sus efectos sobre numerosas especies de agua dulce, sobre la composición de las comunidades y sobre la calidad del agua serían predominantemente adversos (IPCC, 2007).

Debido a la importancia de la disponibilidad y calidad del agua es necesario realizar estudios que involucren estas dos variables de manera conjunta, y así conocer cuantitativa, cualitativamente, temporal y espacial los efectos del cambio climático.

En este trabajo se realizará la gestión de la calidad del agua en la subcuenca del Río Grande de Morelia aplicando escenarios de cambio climático desarrollados por el Plantel Intergubernamental de cambio climático (IPCC).



2 Marco Teórico

2.1 Cambio climático

El cambio climático es la modificación del clima con respecto al periodo histórico a una escala global o regional. Tales cambios se producen a muy diversas escalas de tiempo y sobre todos los parámetros meteorológicos: temperatura, presión atmosférica, precipitaciones, nubosidad, entre otros. En teoría, son debidos tanto a causas naturales como antropogénicas.

El clima depende de un gran número de factores que interactúan de manera compleja como un estado cambiante de la atmósfera, mediante sus interacciones con el mar y el continente, en diversas escalas de tiempo y espacio. En ocasiones puede ocurrir que un parámetro meteorológico como la precipitación o la temperatura se desvíe de su valor medio de muchos años, hablando de una anomalía climática ocasionada por forzamientos internos, como inestabilidades en la atmósfera y/o el océano; o por forzamientos externos, como puede ser algún cambio en la intensidad de la radiación solar recibida o incluso cambios en las características del planeta resultado de la actividad humana. El clima puede variar de muchas formas, por tal motivo, pronosticarlo a largo plazo no es fácil (Martínez y Fernández, 2004).

En la actualidad no queda duda de que la temperatura global del planeta está aumentando y de que los regímenes de lluvia están cambiando. Es importante mencionar que en escalas de tiempo de miles o millones de años las concentraciones en gases de efecto invernadero cambiaron considerablemente de manera natural, produciendo importantes variaciones en la temperatura, más sin embargo éstas se produjeron en millones de años.

2.1.1 Historia del cambio climático

Las actividades humanas se presentan a una escala que comienza a interferir con sistemas naturales, como el clima. El cambio climático es un asunto complejo y de enorme dificultad; por ello, los responsables de políticas necesitan una fuente de información objetiva acerca de las causas del cambio, sus posibles repercusiones medioambientales y socioeconómicas. Conscientes de esta necesidad, la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA) constituyen en 1988 el IPCC.



El Grupo de Expertos, formado por más de 2.500 científicos procedentes de 190 países, es un órgano intergubernamental abierto a todos los países miembros del PNUMA y de la OMM, el cual decide su estructura, principios, procedimientos y programa de trabajo. Celebra reuniones plenarias aproximadamente una vez al año, y a ellas suelen asistir centenares de representantes de gobiernos y de organizaciones participantes (Hernández 2007).

La función principal del IPCC es evaluar la información importante para la comprensión del riesgo al cambio climático por inducción humana, para ello se basa en la evaluación, publicación y revisión de literatura científica-técnica (Hernández et al., 2011)

El IPCC se estructura en tres grupos de trabajo y un Equipo especial sobre inventarios nacionales de gases de efecto invernadero:

- Grupo de trabajo I: evalúa los aspectos científicos del sistema climático y del cambio de clima.
- Grupo de trabajo II: examina los aspectos científicos, técnicos, medioambientales, económicos y sociales de la vulnerabilidad (sensibilidad y adaptabilidad) al cambio climático de los sistemas ecológicos, de los sectores socioeconómicos y de la salud humana, así como las consecuencias negativas y positivas (impactos) para aquéllos, dando especial preponderancia a las cuestiones regionales, sectoriales y transectoriales.
- Grupo de trabajo III: evalúa las opciones que permitirían limitar las emisiones de gases de efecto invernadero y atenuar por otros medios los efectos del cambio climático.

La contribución principal del IPCC es la presentación de reportes de evaluación que contienen aspectos científicos, técnicos, económicos y sociales asociados al sistema climático y al cambio climático. A la fecha se han presentado cuatro reportes:

- Primer Reporte de Evaluación en 1990
- Segundo Reporte de Evaluación en 1995
- Tercer Reporte de Evaluación en 2001
- Cuarto Reporte de Evaluación en 2007



➤ Quinto Reporte de Evaluación 2013

La Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) fue adoptada en mayo de 1992 y entró en vigor en marzo de 1994. Los países adheridos hasta la actualidad son 195. Permite, entre otras cosas, reforzar la conciencia pública, a escala mundial, así como la estabilización de las concentraciones de gases de efecto invernadero en la atmósfera a un nivel que impida interferencias antropogénicas peligrosas en el sistema climático.

A partir de 1995 y cada año se realiza la Conferencia de las Partes (CP) la cual se encarga de mantener los esfuerzos internacionales por resolver los problemas del cambio climático. Examina la aplicación de la Convención y los compromisos de las Partes en función de los objetivos de la Convención, los nuevos descubrimientos científicos y la experiencia conseguida en la aplicación de las políticas relativas al cambio climático. Una labor fundamental de la CP es examinar las comunicaciones nacionales y los inventarios de emisiones presentados por las Partes. Tomando como base esta información, la CP evalúa los efectos de las medidas adoptadas por las partes y los progresos realizados en el logro del objetivo último de la convención (tabla 1).

Dentro de los acuerdos más importantes se encuentra el Protocolo de Kioto sobre el cambio climático, que es un acuerdo internacional que tiene por objetivo reducir las emisiones de seis gases que causan el calentamiento global: dióxido de carbono (CO_2), gas metano (CH_4) y óxido nitroso (N_2O), además de tres gases industriales fluorados: Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6). De acuerdo a López et al., (2013) el Protocolo de Kyoto (PK, acordado en 1997, CP 3) es, nominalmente, el único acuerdo internacional jurídicamente vinculante que establece compromisos de reducción de emisiones para los países industrializados y economías en transición. Durante el primer período de compromisos (1PC), 37 países industrializados se comprometieron a reducir sus emisiones (de 6 gases efecto invernadero) en un 5.2%, respecto a sus emisiones de 1990, durante el período 2008-2012.

La decimoctava Conferencia de las Partes (CP 18) sobre cambio climático ratificó el segundo periodo de vigencia del Protocolo de Kyoto desde el 1 de enero de 2013 hasta el 31 de



diciembre de 2020. La duración de este segundo periodo del Protocolo será de ocho años, con metas concretas al 2020; se acordaron compromisos de reducción de emisiones (6 gases más Trifluoruro de nitrógeno NF3) en una cuantificación no menor al 18% respecto a las emisiones de 1990, por parte de la Unión Europea (Sin embargo, este proceso denotó un débil compromiso de los países industrializados, tales como Estados Unidos, Rusia, Japón y Canadá, los cuales decidieron no respaldar la prórroga.

La cumbre de Varsovia o Conferencia de las Partes (CP19) sobre el cambio climático, presento una asistencia de 192 países con nuevas conversaciones para forjar un nuevo acuerdo mundial sobre el cambio climático con la mirada puesta en el futuro acuerdo de Paris que entrara en vigor a partir de 2020. Algunos países mostraron su escepticismo ante el cambio climático, como Australia, otros como Polonia (país sede) se resisten a reducir sus emisiones, los países en vías de desarrollo tienen compromisos más claros para favorecer las economías bajas en carbono (del Valle 2014).

De acuerdo Grupo de Trabajo de la Plataforma de Durban (ADP) 2014 y a Del Valle 2014, los resultados de esta cumbre fueron escasos ya que en vez de establecerse compromisos de reducción de emisiones de los GEI, solo se establecieron contribuciones algo que no cumple con las expectativas de la Unión Europea (UE). Mas sin embargo se logró trabajar en 5 ejes los cuales se enlistan a continuación

Se avanzó en la implementación efectiva del sistema ya establecido de lucha contra el cambio climático; se sentaron las bases del proceso de negociación del nuevo acuerdo climático global que deberá adoptarse en Paris 2015 (CP21), incluido el proceso para la presentación de compromisos de reducción de emisiones de todos los países; se estableció un mecanismo internacional para hacer frente a las pérdidas y daños asociadas al cambio climático, con el que dar respuesta a las necesidades de los países más vulnerables al cambio climático; se dio paso adelante importante en materia de mitigación en el sector forestal de países en desarrollo (REDD+), al acordar reglas metodológicas y aspectos financieros con los que avanzar en este sector clave; se aprobó un conjunto de decisiones en materia de financiación que incluyen las relativas al Fondo Verde para el Clima y al Programa de trabajo sobre financiación a largo plazo.



Tabla 1. Conferencias de las Partes y principales conclusiones.

CP	Nombre	País	Fecha	Conclusiones
1	Cumbre de Berlín	Alemania	Marzo-Abril 1995	Cambio de las obligaciones de los países industriales, las cuales no eran las adecuadas
2	Cumbre de Ginebra	Suiza	Julio de 1996	Aceptar conclusiones científicas de los expertos del IPCC en su segunda evaluación
3	Cumbre de Kioto	Japón	Diciembre de 1997	Elaboración del protocolo de Kioto, disminución de 6 gases de efecto invernadero
4	Cumbre de Buenos Aires	Argentina	Noviembre de 1998	Detalles financieros, tecnológicos, comercio de emisiones y el desarrollo limpio sobre el protocolo de Kioto
5	Cumbre de Bonn	Alemania	Octubre- Noviembre 1999	Acuerdo de disminuir las emisiones un 5,2 por ciento en el periodo 2008-12 respecto de los niveles de 1990. (Excepto Estados Unidos)
6	Cumbre de la Haya	Holanda	Noviembre del 2000	Europa y Estados Unidos rompieron su diálogo, al subrayar sus discrepancias sobre cómo determinar los métodos de reducción de la emisión de gases contaminantes.
7	Cumbre Marrakech	Marruecos	Noviembre del 2001	Traducir a texto jurídico el acuerdo político conseguido en Bonn para salvar los problemas técnicos relacionados con la financiación, el régimen de cumplimiento del Protocolo
8	Cumbre de Nueva Delhi	India	Octubre- Noviembre 2002	La transferencia de tecnología de los países desarrollados y reducir al mínimo el impacto del cambio climático en los países en desarrollo.
9	Cumbre de Milán	Italia	Diciembre del 2003	La Conferencia parte con la idea de que existen pocas expectativas de avanzar en el cumplimiento de las metas de reducción de emisiones, tras la negativa de Rusia a ratificar el Protocolo de Kioto.
10	Cumbre Buenos Aires	Argentina	Diciembre del 2004	Preparar la definitiva entrada en vigor del protocolo de Kioto a falta de la adhesión de EE.UU
11	Cumbre de Montreal	Canadá	Noviembre- Diciembre 2005	El acuerdo fue mantener las negociaciones que comprometen en principio a los países que han ratificado Kioto, lo que no incluye ni a los Estados Unidos ni a otros países con grandes emisiones, como China o India.
12	Cumbre de Nairobi	Kenya	Noviembre del 2006	Se aprobó una nueva revisión del Protocolo de Kioto en 2008 y la ayuda a los países pobres a adaptarse al cambio climático. Otro idea es la de estabilizar las concentraciones de CO ₂ en la atmósfera reduciendo las emisiones en un 50% sobre los valores del año 2000, llegando a estabilizarse para el año 2050.
13	Cumbre de Bali	Indonesia	Diciembre del 2007	Inició el proceso de negociación para el segundo periodo de cumplimiento del Protocolo de Kioto, que tendría vigencia entre 2012 y 2020.
14	Cumbre de Poznan	Polonia	Diciembre del 2008	Se acordó el impulsar las ayudas destinadas a los países pobres para hacer frente a los efectos del cambio climático. Mantiene la referencia de Bali sobre la reducción de emisiones de GEI entre un 25 y un 40% para los países industrializados.



15	Cumbre de Copenhague	Dinamarca	Diciembre del 2009	Se logró fijar la meta de que el límite máximo para el incremento de la temperatura media global sea 2°C
16	Cumbre de Cancún	México	Diciembre del 2010	creación del Fondo Verde y promover la innovación, desarrollo y difusión de tecnologías limpias
17	Cumbre de Durban	Sudáfrica	Noviembre-Diciembre 2011	USA, China, India y Sudáfrica acordaron disminuir emisiones. Los países desarrollados tendrán que rebajar sus emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.
18	Cumbre de Doha	Qatar	Noviembre-Diciembre 2012	Prolongar el cumplimiento del Protocolo de Kioto, reducción de un 18% para 2020, el cual solo han firmado 15% de las emisiones globales
19	Cumbre de Varsovia	Polonia	Noviembre 2013	Se reconoce la urgencia de apoyar a los pueblos afectados por los impactos del cambio climático. Acuerdo para que los países presenten sus objetivos de reducción de emisiones antes del Paris 2014 (CP21)
20	Cumbre de Lima	Perú	Diciembre 2014	

2.1.2 Efecto Invernadero

La atmósfera es un filtro radiativo, que deja pasar los rayos solares; unos de ellos son absorbidos por la superficie, que se calientan en consecuencia y entonces emite la radiación terrestre, que es absorbida por la atmósfera y las nubes. Las capas atmosféricas y las nubes van sucesivamente absorbiendo, calentándose y re-emitiendo hacia arriba y hacia abajo radiación térmica procedente de abajo. El resultado de este complejo mecanismo es sencillo: la atmósfera superficial es cálida y se va enfriando conforme uno asciende a través de ella.

De acuerdo a Hernández (2007) El balance de energía del sistema climático a manera de porcentaje lo podemos expresar de la siguiente manera. De cada 100 unidades del flujo total de radiación solar (o de onda corta) que llega al tope de la atmósfera, 23 unidades son absorbidas por ésta, de las cuales, 4 unidades corresponden al agua líquida en las nubes y 19 unidades corresponden al oxígeno estratosférico y al vapor de agua troposférico. La superficie de los océanos y los continentes absorben 46 unidades. Las 31 unidades restantes se reflejan a hacia el espacio exterior, de las cuales, 8 unidades que están constituidas por los gases que componen la atmósfera, se dispersan hacia el espacio exterior, 17 unidades son reflejadas por las nubes y las 6 unidades restantes son reflejadas por la superficie del planeta.



De la energía absorbida por el sistema climático, las primeras 69 unidades son convertidas en calor, debido al movimiento de la atmósfera (energía cinética) y de los océanos (energía potencial). Las restantes 31 unidades no participan en los procesos e interacciones del sistema climático (Peixoto, J.P. y A.H. Oort,).

De las 115 unidades de radiación de onda larga, 106 son absorbidas por los GEI, y sólo 9 unidades escapan hacia el espacio exterior. Adicionalmente, la atmósfera recibe desde la superficie un flujo de calor sensible de 7 unidades y 24 unidades de calor latente.

Para analizar los impactos en el clima del planeta, se usa un modelo de circulación general de la atmósfera (MCG) en el que se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes.

La radiación de onda larga absorbida por los GEI (106 unidades) es irradiada nuevamente en todas direcciones. 60 unidades son irradiadas hacia el espacio exterior contribuyendo al enfriamiento del sistema tierra-atmósfera. La parte re-irradiada hacia la superficie de la tierra (100) unidades reduce su pérdida de calor e incrementa la temperatura de la tierra. Esto explica el denominado efecto invernadero (Peixoto, J.P. y A.H. Oort,).

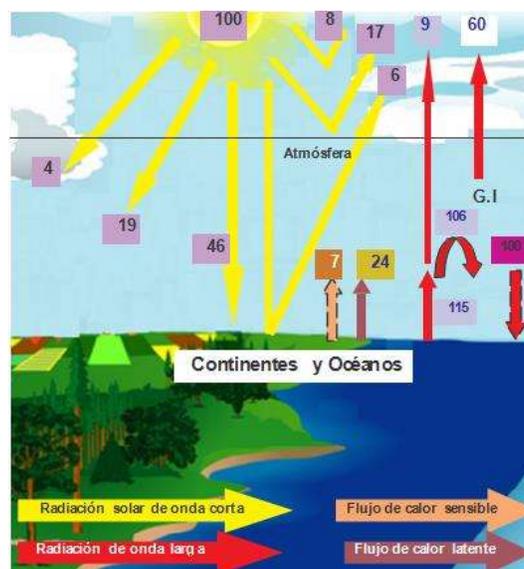


Figura 1. Esquema del balance de calor del sistema climático (Hernández 2007).



2.1.3 Gases de efecto invernadero

Se denomina gases de efecto invernadero a aquellos capaces de atrapar la radiación infrarroja que escapa de la superficie de la Tierra hacia el espacio y transferirla, en forma de calor, al resto de los gases que forman la atmósfera. Esta capacidad depende de su estructura molecular y su tiempo de residencia en la atmósfera, antes de ser transformado en otro compuesto. Entre más compleja es su estructura y más grande su tiempo de residencia en la atmósfera, mayor es su Potencial de Calentamiento Global PCG (Martínez y Fernández, 2004).

Los gases de efecto invernadero directo (con capacidad para influir en la concentración atmosférica) son el dióxido de carbono (CO_2) con un 76%, el metano (CH_4) con 13%, el óxido nitroso (N_2O) con 6% y los halocarbonos con 5%. Entre los halocarbonos se encuentran los clorofluorocarbonos, como el freón (CCl_2F_2) que es uno de los gases controlados por el Protocolo de Montreal por sus efectos en la capa estratosférica de ozono; y los compuestos diseñados para sustituirlos, los hidroclorofluorocarbonos. El Potencial de Calentamiento Global de los GEI por acuerdo internacional se usa un escenario a 100 años. El compuesto de referencia es el CO_2 , y el PCG establece a cuántos gramos de CO_2 equivale un gramo de otro compuesto, es decir se realiza una normalización con respecto al CO_2 (IPCC 2001 y 2007).

Tabla 2. Potenciales de calentamiento global en relación con el dióxido de carbono para los principales gases de efecto invernadero (fuente IPCC 2001).

Gas		vida media (años)	Potencial de calentamiento global Horizonte temporal		
			20 años	100 años	500 años
Dióxido de carbono	CO_2	-	1	1	1
Metano	CH_4	12	62	23	7
Óxido nitroso	N_2O	114	275	296	156
CFC-12	CCl_2F_2	100	10200	10600	5200
HCFC-21	CHCl_2F	2	700	210	65

Las concentraciones de gases de efecto invernadero, en la atmósfera y su forzamiento radiactivo total, han aumentado como resultado de las actividades humanas. Los gases de efecto invernadero alcanzaron niveles máximos en 1990 y continúan aumentando (figura 2). El dióxido de carbono (CO_2) y el metano (CH_4) atmosféricos han variado en gran medida a



lo largo del tiempo, más sin embargo, las concentraciones atmosféricas actuales son mayores que en el periodo histórico. En términos del forzamiento radiactivo causado por los gases de efecto invernadero emitidos por actividades humanas, el CO_2 y el CH_4 son los más importantes; a partir de la era industrial, la concentración del CO_2 y CH_4 , se han incrementado la mayoría se debe al uso de combustibles fósiles y a la deforestación.

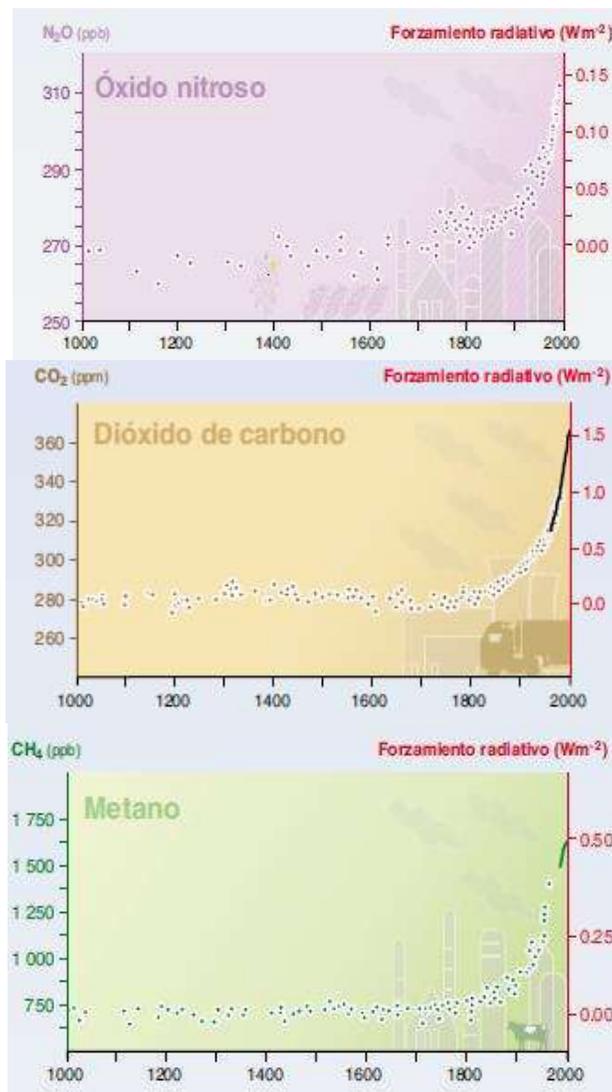


Figura 2. Registros de cambios ocurridos en la composición atmosférica durante el último milenio indican un rápido aumento de 3 gases de efecto invernadero (CO_2 , CH_4 , N_2O), que se puede atribuir principalmente al crecimiento industrial desde el 1750 (IPCC 2001).

El cambio climático fundamentalmente, es producto de la industrialización y de los patrones de consumo de los países desarrollados y en vías de desarrollo. Evidencia de esto son las concentraciones de CO_2 , CH_4 y N_2O en la atmósfera a escala global, los cuales han



aumentado considerablemente por efecto de las actividades humanas desde 1750 (figura 2), y en la actualidad exceden por mucho los valores preindustriales, los cuales se determinaron mediante el análisis de núcleos de hielo acumulados durante miles de años (IPCC 2001).

De acuerdo al IPCC (2013) el forzamiento radiativo total es positivo y ha dado lugar a la absorción de energía por el sistema climático debido principalmente al incremento en las concentraciones de CO₂. El forzamiento radiativo antropógeno total de 2011, en relación con 1750 es de 2.29 (1.13 a 3.33) W/m², y ha aumentado más rápidamente desde 1970 que en decenios anteriores. La mejor estimación del forzamiento radiativo antropógeno de 2011 es un 43% superior al previsto en el Cuarto Informe de Evaluación para el año 2005. Esto se debe a una combinación del crecimiento continuo de la mayoría de las concentraciones de los GEI y a estimaciones más precisas del forzamiento radiativo por aerosoles, que indican un efecto de enfriamiento más débil (Figura 3).

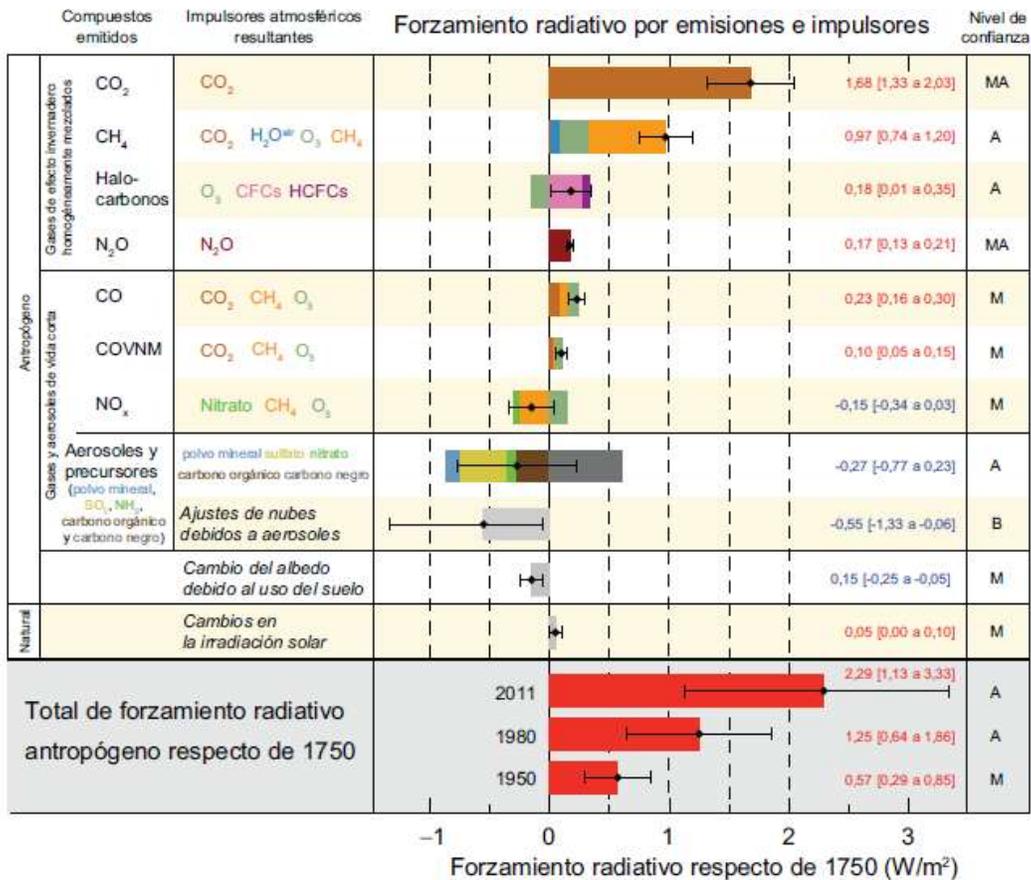


Figura 3. Estimaciones del forzamiento radiativo en 2011 respecto a 1750, en base a los diferentes GEI emitidos, impulsores atmosféricos resultantes, nivel de confianza de las estimaciones de cada uno de ellos (MA: muy alto, Alto: A, M: medio, B: bajo). IPCC 2013.



2.1.4 Evidencia del cambio climático

Para corroborar que los GEI provocan el calentamiento global y en general el cambio climático se debe evaluar si los cambios observados son congruentes con la respuesta esperada de forzantes externos e incoherentes con otras posibles explicaciones físicamente plausibles.

De acuerdo al Plantel Intergubernamental de expertos sobre el cambio climático (2007), el aumento observado del promedio mundial de las temperaturas desde mediados del siglo XX se debe en su mayor parte, muy probablemente, al aumento observado de las concentraciones de GEI antropógenos. Ya que es extremadamente improbable que el cambio climático se presente sin un forzamiento externo y muy probable que no se deba exclusivamente a causas naturales conocidas.

Se ha detectado la influencia humana en el calentamiento de la atmósfera y el océano en alteraciones del ciclo global del agua, en reducciones de la cantidad de nieve y hielo, en la elevación media mundial del nivel del mar y en cambios en algunos fenómenos climáticos extremos. Esta evidencia de la influencia humana es mayor desde que se elaborara el Cuarto Informe de Evaluación. Es sumamente probable (90 a 99%) que la influencia humana haya sido la causa dominante del calentamiento observado (IPCC 2013).

DE acuerdo al IPCC (2013) Es sumamente probable que más de la mitad del aumento observado en la temperatura media global en la superficie en el periodo 1951 a 2010 haya sido causado por la combinación del incremento de las concentraciones de los GEI antropogénicas y de otros forzamientos antropógenos. Es probable que los GEI hayan contribuido al calentamiento de la superficie en un $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$ durante el periodo de 1951 a 2010, siendo probable que las contribuciones de otros forzamientos como aerosoles, se sitúen en un rango de $-0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, Es probable que la contribución de los forzamientos naturales se sitúe en un rango de $-0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}$, y así mismo es probable que la variabilidad interna natural se sitúe en el mismo rango. En conjunto, la evaluación de esas contribuciones es coherente con el calentamiento observado entre $0.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ a lo largo del mencionado periodo. En la figura 4 se hace una comparación del cambio climático observado en tres indicadores a gran escala en la atmósfera, criosfera y el océano.

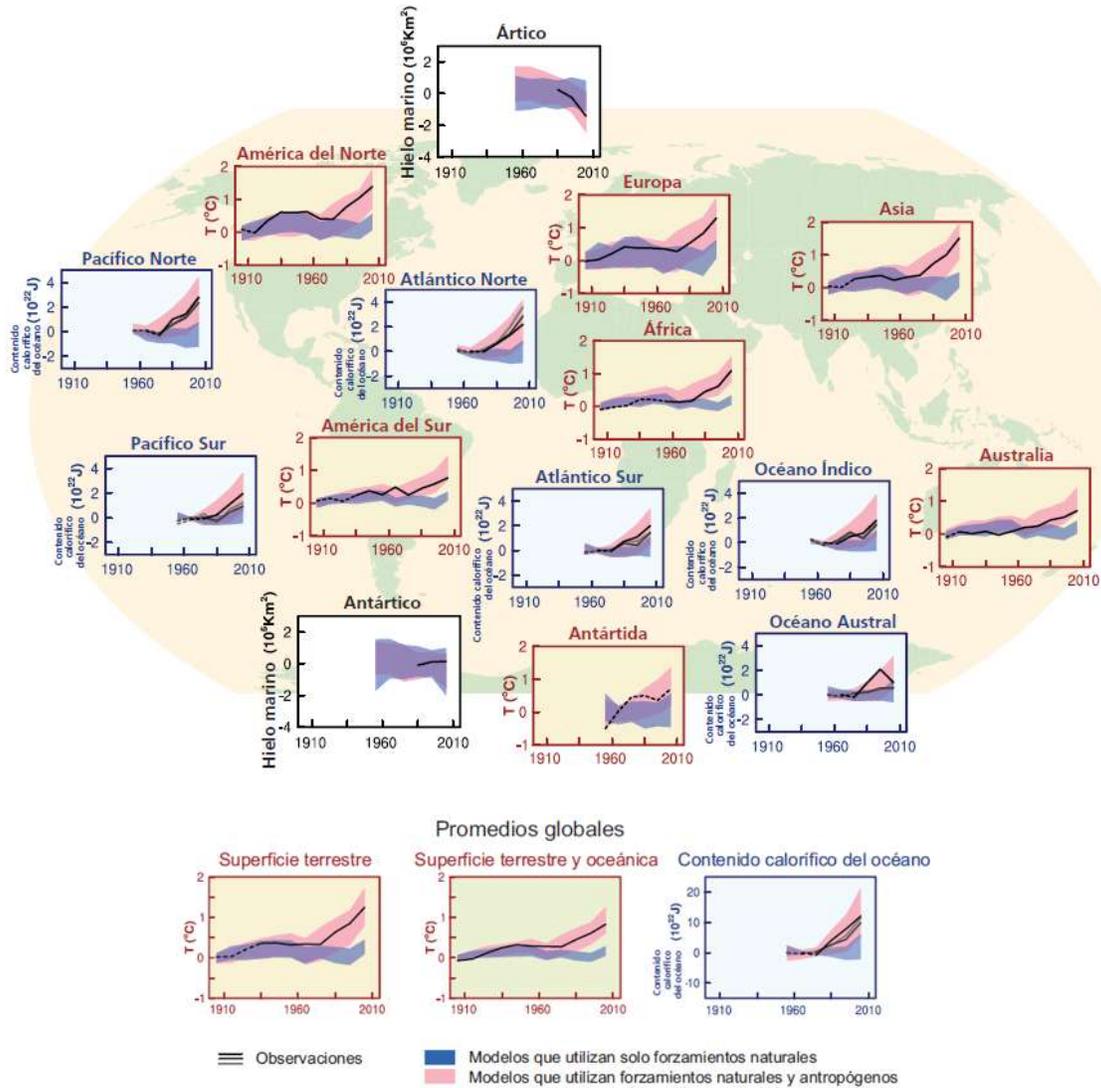


Figura 4. Comparación del cambio climático observado en tres indicadores a gran escala en la atmósfera, criosfera y el océano: cambios en la temperatura del aire en la superficie terrestre, extensión del hielo marino y contenido calorífico contenido en las capas oceánicas superiores. También se muestran los cambios en promedio global con resultados de modelos que usan forzamientos naturales y antropógenos (IPCC 2013).

2.1.5 Escenarios de Emisión de GEI

Un escenario de cambio climático es una descripción espacial y temporal, físicamente consistente, de rangos plausibles de las condiciones climáticas futuras, basada en un cierto número de suposiciones y en la actual comprensión científica de nuestro sistema climático. Sirven para exponer el conjunto de la información actualmente disponible sobre la posible evolución del clima, para poder aplicarla a las evaluaciones de impacto del cambio climático.



Los escenarios pueden representar una variable o un conjunto de variables como la precipitación, temperatura, población mundial actividad industrial, emisiones de CO₂, nivel medio del mar entre otros. La mayoría de los escenarios son construidos en base a la evolución de las tendencias climáticas pasadas (Magaña y Caetano 2007, Hernández 2010).

Los escenarios más importantes son los desarrollados por el IPCC entre los años 1992 y 2012 los cuales tienen una base científica, y bajo ciertas condiciones establecen la proyección de cambios de temperatura y precipitación.

Escenarios IS92 del IPCC. En 1992, el IPCC publicó unos escenarios de emisiones que servían de base para los modelos de la circulación mundial, con el fin de desarrollar unos escenarios sobre el cambio climático. Los denominados escenarios IS92 constituyeron un gran paso adelante. Eran los primeros escenarios mundiales que proporcionaban estimaciones de todos los gases de efecto invernadero.

Escenarios SRES/IE-EE del IPCC. Según el IPCC (2001) y (2007) los escenarios presentan cuatro líneas evolutivas (A1, A2, B1 y B2) y para cada línea evolutiva, se han desarrollado varios escenarios distintos basados en diferentes evoluciones de las diferentes variables que intervienen en el cambio climático, como escenarios socioeconómicos, escenarios de cambio de uso en la tierra, escenarios de incremento de población, escenarios ambientales (temperatura y precipitación), escenarios de incremento en el nivel del mar.

Los escenarios de cambio climático en su conjunto, describen futuros divergentes que cubren una parte considerable de las incertidumbres inherentes a las principales fuerzas determinantes. Abarcan una gran diversidad de características “futuras” decisivas, como el cambio demográfico, el desarrollo económico o el cambio tecnológico. Por esa razón, su plausibilidad o su viabilidad no deberían considerarse solamente en base a una extrapolación de las tendencias económicas, tecnológicas y sociales actuales. Las consideraciones de los escenarios de SRES/IE-EE del IPCC se presentan en la tabla 3, donde la línea evolutiva A2 presenta las condiciones más drásticas de cambio, seguido del escenario A1B con las condiciones medias y el escenario optimista (B1) que presenta las condiciones de cambio menos drásticas. En base a estas consideraciones se realizaron las proyecciones 200-2100 que se presentan en la figura 5.



Tabla 3. Características de los escenarios de cambio climático (IPCC 2001 y 2007).

Línea Evolutiva	Crecimiento económico	Crecimiento de población mundial	Introducción de tecnologías nuevas y limpias	Uso de combustibles fósiles	Uso de combustibles no fósiles
A1B	Rápido	Máximo a mediados de siglo	Rápida	Si	Si
A2	Lento	Rápido y en continuo crecimiento	Lenta	Si	No
B1	Rápido	Máximo a mediados de siglo	Muy rápida	No	Si
B2	Intermedio	Progresivo continuo crecimiento	Lenta	Si	Si

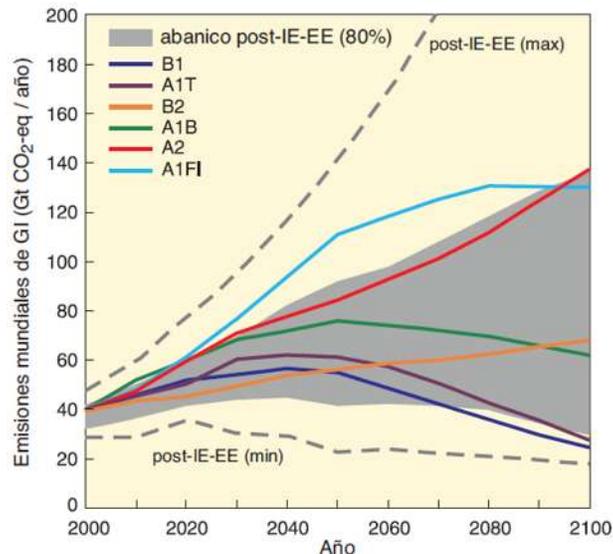


Figura 5. Escenarios de emisiones de GEI entre 2000 y 2100 en ausencia de políticas ambientales.

Escenarios de Vías de Concentración Representativas (VCR) o “Representative Concentration Pathways” (RCPs). 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 (Rojas 2012). Este proceso es fundamentalmente distinto a la manera en que se habían desarrollado los escenarios anteriores y es descrito en Moss et al (2010) y en más detalle en van Vuuren et al., (2011). Del paper de Moss et al (2010). Estos escenarios tienen su nombre de acuerdo al forzamiento



radiativo que producen al año 2100: VCR 2.6 W/m², VCR 4.5 W/m², VCR 6.0 W/m² y VCR 8.5 W/m², en la tabla 4 se presentan las características principales de estos escenarios y en la figura 6 se presentan las emisiones de los GEI para el presente siglo (IPCC 2007b, Rojas 2012, Cavazos *et al.*, 2013).

Tabla 4. Características principales de los escenarios VCR (IPCC 2007b).

Características de los escenarios Vías de concentración representativas (VCR)			
Nombre	Forzamiento radiativo Watts/m ²	Concentración (ppm CO ₂ -eq)	Evolución
VCR8.5	>8,5 en 2100	> ~1370 en 2100	En aumento
VCR6	Estabilización en ~6 a partir de 2100	~850 (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización
VCR4.5	Estabilización en ~4.5 a partir de 2100	~650 (estabilización, a partir de 2100)	Estabilización
VCR3-CD*	Máximo a ~3 antes de 2100; disminución posterior	Máximo a ~490 antes de 2100; disminución posterior	*Culminación seguida de Disminución

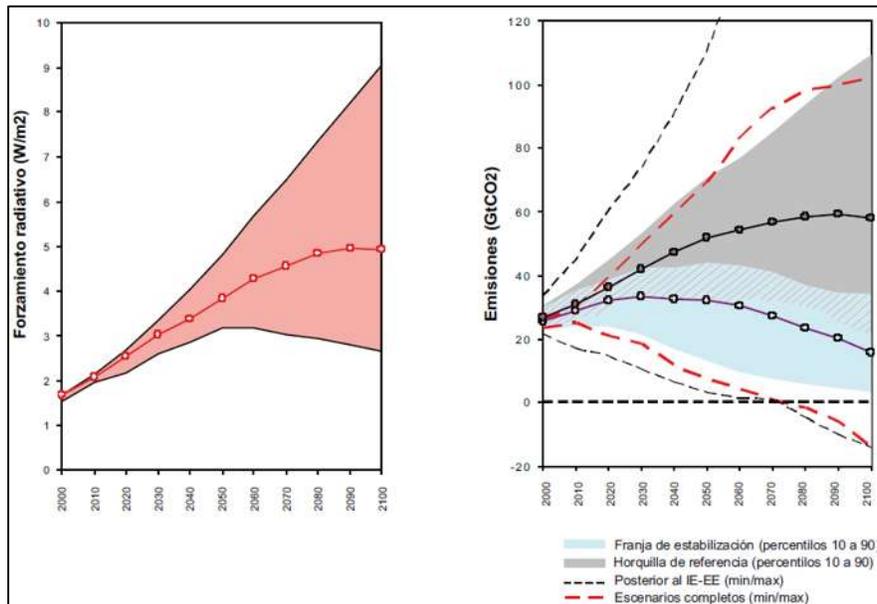


Figura 6. Forzamientos radiativos y emisiones de GEI en el periodo 200-2100 (IPCC 2007b)

Estos nuevos escenarios se comparan en conjunto con los antiguos escenarios SRES. En la figura 7 se puede ver que el nuevo escenario VCR 2.6 (o “required by science”) tiene concentraciones mucho más bajas que cualquiera de los escenarios SRES, y que el escenario



VCR8.5 llega a fines de siglo con concentraciones de CO₂ más altas que el escenario SRES A2.

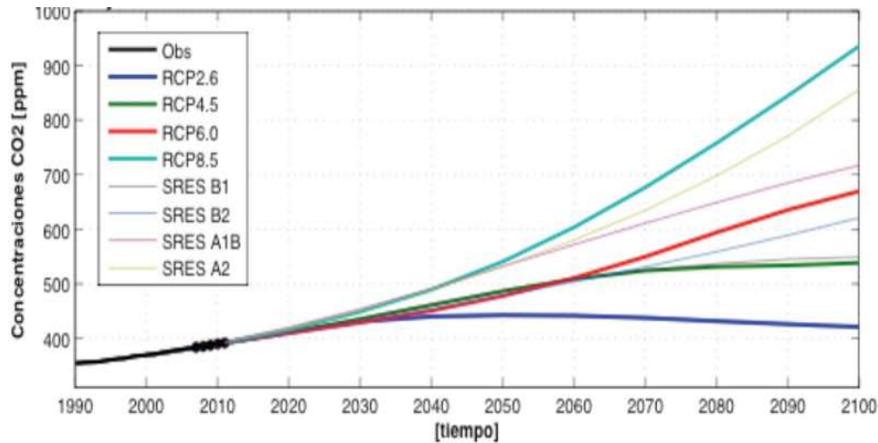


Figura 7. Comparación de los escenarios SRES y VCR (Rojas 2012).

De acuerdo al IPCC (2013) es probable que, para fines del siglo XXI, la temperatura global en superficie sea superior en 1.5°C a la del periodo entre 1850 y 1900 para todos los escenarios considerados de las trayectorias en concentración representativas (RCP), excepto para el escenario RCP 2.6. Es probable que la temperatura sea superior a los 2°C para los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5 y más probable que improbable que sea superior para el escenario 4.5. El calentamiento continuara después de 2100 en todos los escenarios RCP excepto para el RCP 2.6 y además mostrara una variabilidad interanual y decenal y no será uniforme entre regiones (figura 8). Las proyecciones en promedio para los dos últimos decenios apuntan que las temperaturas se incrementarán de 0.3°C a 1.7 °C (RCP 2.6), de 1.1°C a 2.6°C (RCP 4.5), de 1.4°C a 3.1°C(RCP 6.0) y de 2.6°C a 4.8°C (RCP 8.5).

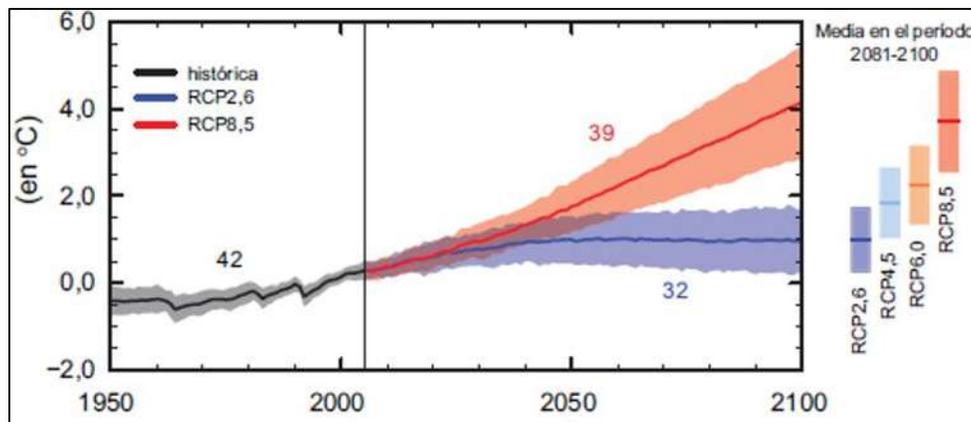


Figura 8. Escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 para la temperatura media global de la superficie. IPCC 2013.

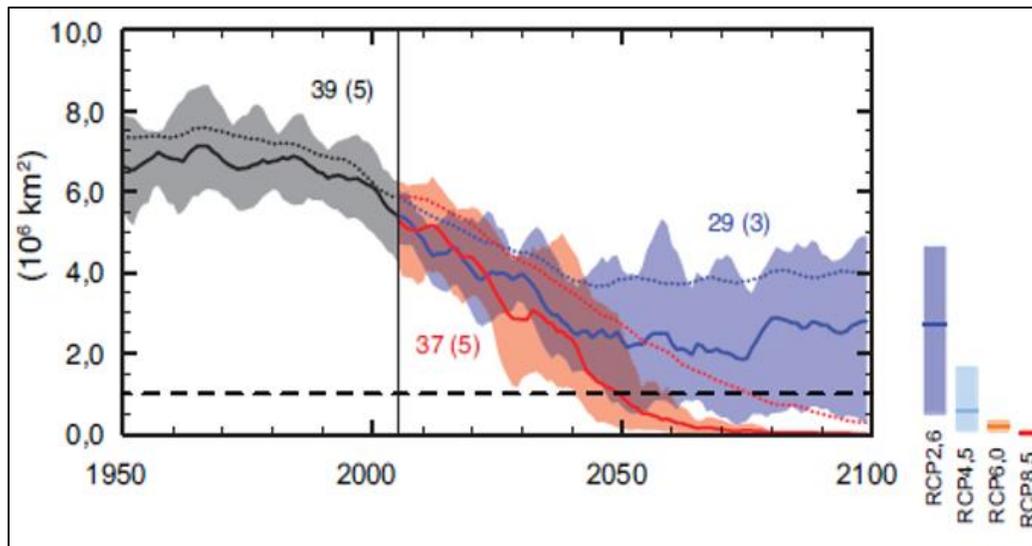


Figura 9. Escenarios RCP 2.6, 4.5, 6.0 y 8.5 para la extensión del hielo marino en septiembre en el hemisferio norte. IPCC 2013.

Es muy probable que la cubierta del hielo del Ártico siga menguando y haciéndose más delgada, y que el manto de nieve en primavera en el hemisferio norte disminuya a lo largo del siglo XXI a medida que vaya aumentando la temperatura media global de la superficie, el volumen global de los glaciares continuara reduciéndose.

De acuerdo al IPCC (2013) Las proyecciones del promedio de varios modelos apuntan a que para finales de siglo habrá disminuido la extensión de hielo marino durante todo el año. El rango de disminuciones varía desde el 43%, en el caso des escenario RCP 2.6 hasta el 94%, en el caso del escenario RCP 8.5, en este último escenario, en septiembre, y desde el 8%, en el caso del RCP 2.6, hasta el 34%, en el caso del RCP 8.5 en febrero con un nivel de confianza medio (figura 9)

En relación con el promedio de 1850 a 1900, las proyecciones apuntan a que es probable que para final de siglo XXI, la temperatura global en superficie sea superior en 1.5 °C para los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5, (90-99%). Es probable que la temperatura sea superior a 2°C para los escenarios RCP 6.0 y RCP 8.5, (90-99%). Es improbable que la temperatura sea superior a 4°C para los escenarios RCP 2.6, RCP 4.5 y RCP 6.0 (nivel de confianza alto) y es tan probable como improbable que sea superior a 4°C para el escenario 8.5. En la figura 10a se presenta la distribución espacial de la temperatura para los casos extremos (RCP 2.6 y RCP 8.5), con el objetivo de abarcar las posibilidades que se puedan presentar en la superficie del planeta IPCC (2013).

Por otro lado, los cambios que se producirán en el ciclo global del agua, en respuesta al calentamiento durante el siglo XXI, no serán uniformes. Se acentuará el contraste en las precipitaciones entre las regiones húmedas y secas y entre las estaciones húmedas y secas, si bien podrá haber excepciones regionales (figura 10b).

Los cambios proyectados en el ciclo del agua para los próximos decenios muestran patrones a gran escala similares a los proyectados para el final del siglo, aunque de menor magnitud, los cambios a corta plazo y a escala regional estarán influidos para la variabilidad interna natural y podrán verse afectados por las emisiones antropógenas.

Es muy probable que para el final del siglo sean más intensos y frecuentes los fenómenos de precipitación extrema en la mayoría de los continentes y en las latitudes media, así como en las regiones tropicales húmedas, esto conforme aumente la temperatura de la superficie de la tierra. También existe un nivel de confianza alto de que el fenómeno El Niño/Oscilación del Sur (ENOS) seguirá siendo el modo dominante de variabilidad interanual del pacifico tropical con efectos que se sentirán a nivel mundial

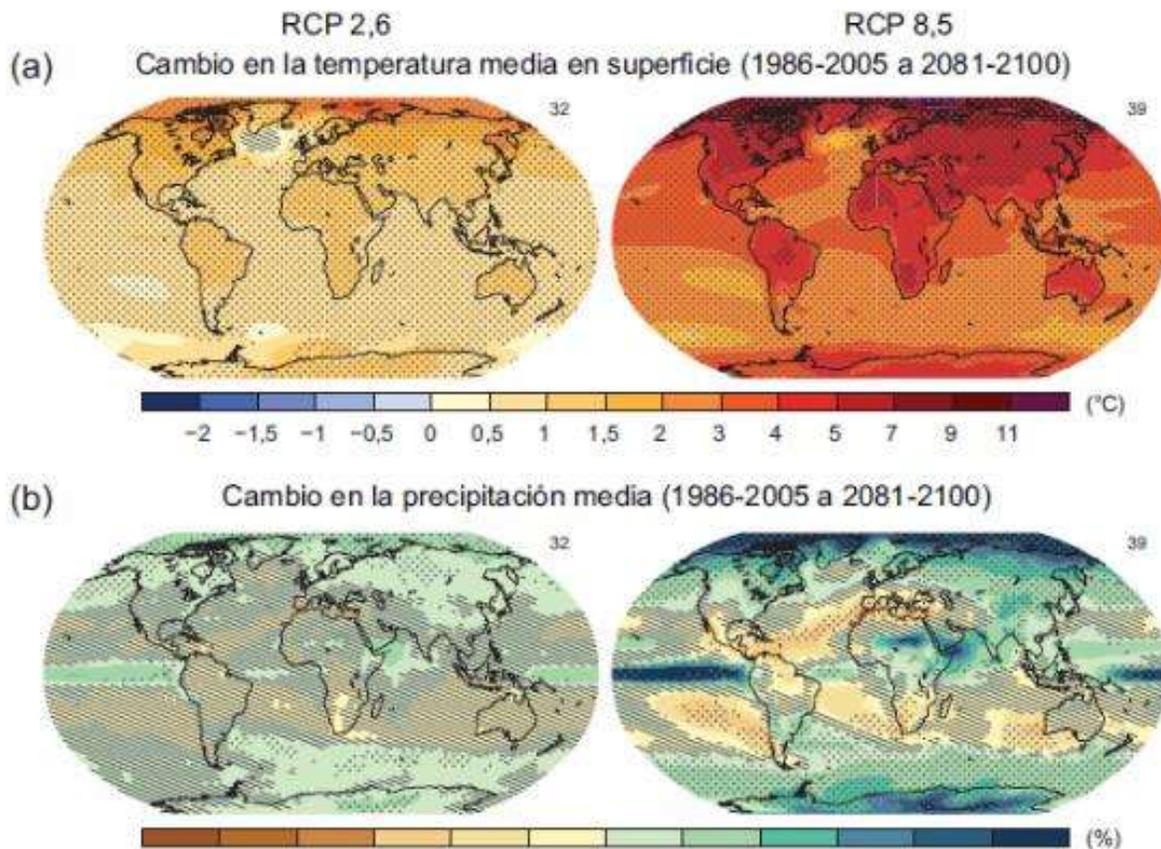


Figura 10 Cambio en la temperatura (a) y precipitación (b) con respecto a 1986-2005 y para los dos escenarios mas



2.1.6 Modelos de Circulación General

Para analizar los impactos en el clima del planeta, se usa un modelo de circulación de la atmósfera en el que se impone una anomalía en la temperatura de superficie del mar y de tierra firme. Las alteraciones o anomalías climáticas que dicho forzante produzca se obtienen comparando con aquella simulación en la que no se impone el forzante. Ésta ha sido la filosofía seguida en el uso de modelos del clima para determinar los impactos de los forzantes. Evidentemente, para que un modelo climático sea considerado útil para usarse como herramienta de análisis debe poder simular, al menos aproximadamente, el ciclo anual promedio del clima (IPCC 2001, Moss *et al.*, 2010).

Esencialmente un modelo climático, está constituido por un sistema de ecuaciones diferenciales en derivadas parciales. Estas ecuaciones expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático que son: la conservación del momento, de masa, la ecuación de estado de los gases, la conservación de la energía y la conservación de vapor de agua, respectivamente (Sordo C 2006). Actualmente, los MCG incluyen además modelos de funcionamiento de los océanos denominados modelos de circulación general acoplados océano atmósfera (MCGAO-A).

Para el estudio del cambio climático se realiza un manejo de los forzantes radiativos, efectuándose simulaciones numéricas en donde se aumentan gradualmente las concentraciones de gases de efecto invernadero. Dependiendo de qué tipo de aumento en estos gases se proponga, será la respuesta en el clima que se obtenga. La mayoría de los modelos del clima sugieren que a mayor concentración de gases de efecto invernadero, mayor será la magnitud de la anomalía climática. No existe un experimento climático único para analizar el cambio climático, pues depende de cómo se piensa que serán las emisiones. Una buena descripción de qué son los modelos de circulación del clima aparece en el Tercer Reporte de Evaluación (TAR, por sus siglas en inglés) del Grupo I del PICC. En ella se analizan los elementos de los modelos que, por su complejidad y también por su importancia en el clima, requieren consideración especial (IPCC 2001).

Los MCGAO-A se basan en la resolución del conjunto de ecuaciones matemáticas que expresan las leyes de la Física y que gobiernan la dinámica de la atmósfera y el océano, por



tal motivo es un sistema complejo no lineal de ecuaciones diferenciales que no tienen solución analítica. Todas estas ecuaciones se resuelven a través de métodos numéricos en el cual se divide el espacio ocupado por la atmósfera y el océano en celdas tridimensionales en las cuales se asignan valores a las diferentes variables que caracterizan el estado físico de la atmósfera y el océano.

Para observar las evoluciones temporales de las variables en cada celda de la malla del modelo se resuelven las ecuaciones a partir de los valores iniciales. Estas evoluciones se obtienen en intervalos de tiempo cuya duración debe estar en concordancia con el tamaño de las celdas. Cuanto menor sea dicho tamaño, también ha de serlo el tiempo de simulación. La resolución espacial de la parte atmosférica de los MCGAO-A actuales varía entre 2° y 10° de latitud y longitud en la horizontal (entre 220 km y 1100 km) y en la vertical se consideran de 10 a 30 capas entre la superficie y el tope superior de la atmósfera, cada una con espesores variables, mientras que las resoluciones horizontales y verticales de la parte oceánica suelen ser similares o algo superiores a las atmosféricas (van Vuuren *et al.*, 2006).

2.1.7 Regionalización de los MCG

La resolución espacial típica de los Modelos de Circulación General (MCG) de 300 km x 300 km no permite considerar los forzantes del clima local (topografía, uso de suelo, ciclo hidrológico). Según Orlando (2010) algunas veces, los impactos de las variaciones del clima global cobran características especiales muy particulares en regiones de topografía marcada, en islas o en regiones de contrastes en el uso de suelo, factores que generan circulaciones de mesoescala. Por tales motivos es necesaria la reducción de escala espacial de salidas de MCG en donde se incorporan elementos que resultan en circulaciones de mesoescala y/o clima local en las proyecciones de cambios atmosféricos, agregando así un valor agregado a las salidas directas de los MCG. Es claro que mucho de ese valor agregado, dependerá del entendimiento de los procesos que generan clima local o regional y de la disponibilidad de datos para poderlo representar.

La base de la reducción de escala estadística es que existen relaciones entre el clima local y el de gran escala (dinámicas o estadísticas), que permiten determinar condiciones locales a partir de información de baja resolución, y que estas relaciones permanecen válidas aún bajo



condiciones climáticas futuras. Las técnicas estadísticas de reducción de escala se refieren a métodos en los que los cambios regionales o locales, correspondientes a procesos de menor tamaño que la resolución espacial del MCG, son calculados como función del clima de gran escala.

Los escenarios de cambio climático regional, de acuerdo a Orlando (2010) se pueden obtener a través de técnicas de reducción de escala (downscaling) estadísticas o dinámicas.

- En las técnicas estadísticas de reducción de escala las variables del clima regional o local se obtienen generando un modelo estadístico que las relaciona con las variables de gran escala del modelo de circulación general.
- Las técnicas dinámicas son los Modelos de Clima Regional. Estos modelos son similares a los modelos de clima global pero de mayor resolución espacial y por lo tanto contienen una mejor representación de elementos dentro del dominio de interés.

El esquema CPT permite aplicar las técnicas estadísticas de reducción de escala de regresión por componentes principales (PCR) así como diferentes análisis de correlación, estandarizar los campos de los MCG, muestrear los datos, re-calibrar las ecuaciones, normalizar los campos, sustituir valores faltantes, entre otros (Magaña Y Caetano 2007).

2.1.8 Legislación en Materia de cambio climático

La Ley General de Cambio climático en México es de reciente creación, se publicó en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 6 de junio del 2012, y entro en vigor a partir del 10 de Octubre del 2012 y aun no se expide ninguna norma oficial. En materia de los recursos del agua se describen seis artículos, los cuales se presentan a continuación:

Artículo 8. Son atribuciones de la federación las siguientes:

- VI. Establecer, regular e instrumentar las acciones para la mitigación y adaptación al cambio climático, de conformidad con esta Ley, los tratados internacionales aprobados y demás disposiciones jurídicas aplicables, en las materias siguientes:
 - a) Preservación, restauración, conservación, manejo y aprovechamiento sustentable de los recursos naturales, los ecosistemas terrestres y acuáticos, y los recursos hídricos;



Artículo 28. Corresponde a las entidades federativas las siguientes atribuciones:

- a) Preservación, restauración, manejo y aprovechamiento sustentable de los ecosistemas y recursos hídricos de su competencia

Artículo 29. Se consideran acciones de adaptación

- V. Los programas hídricos de cuencas hidrológicas;

Artículo 30. Las dependencias y entidades de la administración pública federal centralizada y paraestatal, las entidades federativas y los municipios, en el ámbito de sus competencias, implementarán acciones para la adaptación conforme a las disposiciones siguientes:

- X. Elaborar los diagnósticos de daños en los ecosistemas hídricos, sobre los volúmenes disponibles de agua y su distribución territorial;

Artículo 67. El Programa deberá contener, entre otros, los elementos siguientes:

- III. Las metas sexenales de adaptación relacionada con la gestión integral del riesgo; aprovechamiento y conservación de recursos hídricos...

En 2013 se publicó la Estrategia Nacional de Cambio Climático (ENCC) visión 10-20-40 emitida por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental y la Dirección General de Políticas para el Cambio Climático en el cual se establece que la comunidad científica internacional, es necesario que todos los países reduzcan sus emisiones de GEI para evitar que sus efectos se agraven. Para México este desafío conlleva problemas sociales, económicos y ambientales, sistemas productivos y ecosistemas. En esta estrategia se plantean tres ventanas temporales 10 20 y 40 años. El reto para el país es enorme ya que se plantean reducir un 30% las emisiones en 2020 y un 50% en 2050, esto con respecto al año 2000.

En esta estrategia se plantean los diferentes instrumentos de política de cambio climático en los tres órdenes de gobierno donde se ha avanzado en materia de creación de leyes a nivel estatal, actualmente se encuentran publicadas cinco leyes estatales de cambio climático: Veracruz (noviembre de 2010), Chiapas (diciembre de 2010), Distrito Federal (junio de 2011), Quintana Roo (mayo de 2012) y Baja California (junio de 2012). En la Quinta



Comunicación Nacional ante la CMNUCC se menciona que ocho entidades cuentan con programas estatales de cambio climático: Chiapas, Distrito Federal, Guanajuato, Hidalgo, Nuevo León, Puebla Tabasco y Veracruz. En la Quinta Comunicación Nacional ante la CMNUCC se menciona que 16 entidades cuentan con comisiones estatales intersecretariales de cambio climático: Campeche, Coahuila, Distrito Federal, Durango, Guanajuato, Guerrero, Jalisco, Michoacán, Querétaro, Quintana Roo, San Luis Potosí, Tabasco, Tamaulipas, Tlaxcala, Veracruz y Yucatán (Figura 11).

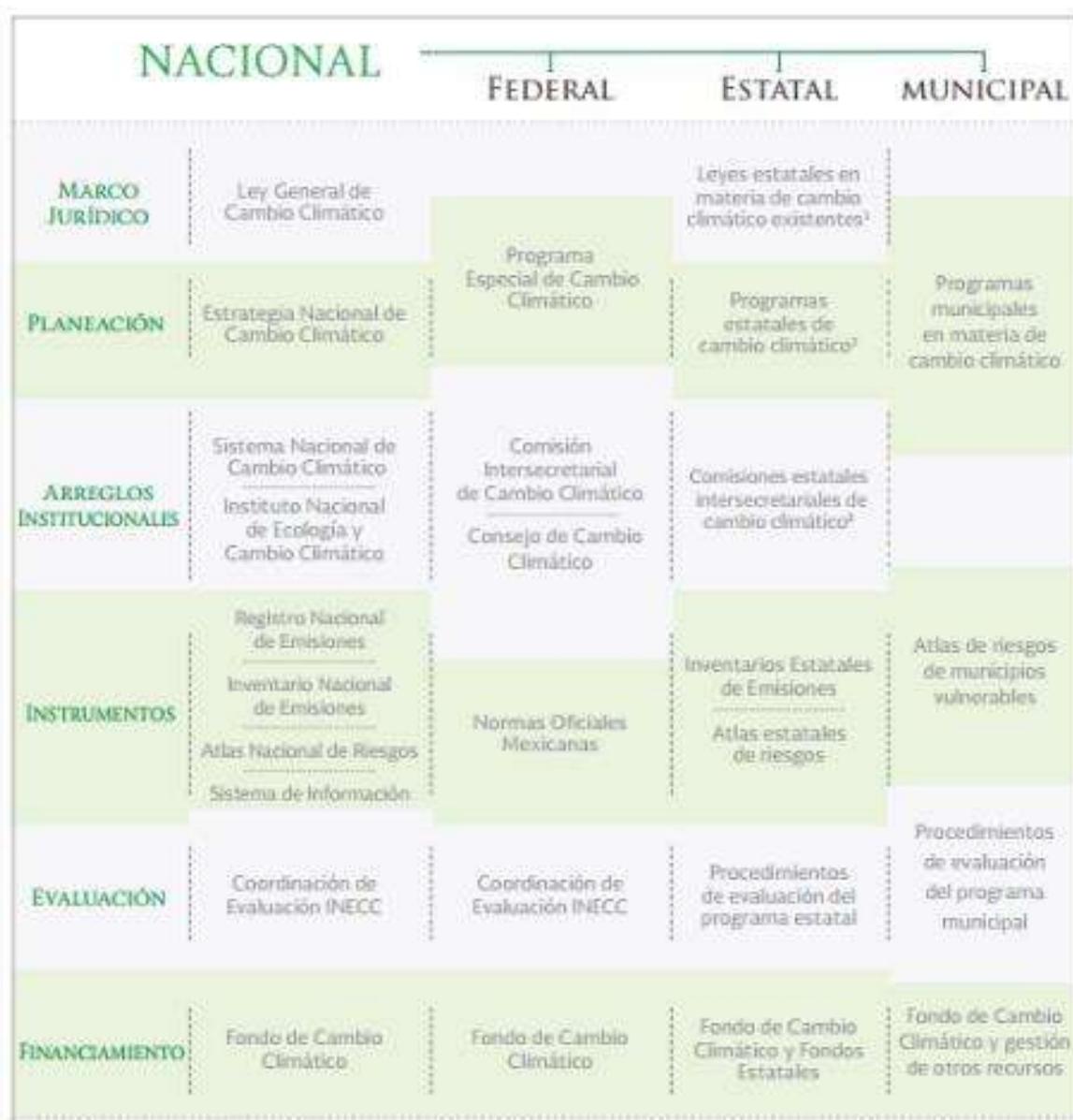


Figura 11. Instrumentos de política de cambio climático en los tres órdenes de gobierno.
Fuente: SEMARNAT (2012).



El Programa especial de Cambio Climático 2014-2018 publicado en el DOF el 28/04/2014 establece objetivos, estrategias y líneas de acción a nivel nacional para una adaptación y mitigación al cambio climático, en materia de agua hay diferentes acciones que se llevan a cabo en materia agua, en el contexto de disponibilidad, uso, aprovechamiento, contaminación y depuración, y como estas acciones mitigaran el efecto del cambio climático en los recursos hídricos.

En el Capítulo II alineación y metas nacionales, en la meta nacional México prospero, con el objetivo de Impulsar y orientar un crecimiento verde incluyente y facilitador que preserve nuestro patrimonio natural al mismo tiempo que genere riqueza, competitividad y empleo, estrategia 4.4.2. Implementar un manejo sustentable del agua, haciendo posible que todos los mexicanos tengan acceso a ese recurso y el objetivo 5 establece "Detener y revertir la pérdida de capital natural y la contaminación del agua, aire y suelo", SEMARNAT.

2.2 Calidad del agua.

El agua en ríos, acuíferos y lagos contiene muchos materiales disueltos que dependen de las condiciones geológicas y climáticas; estos materiales definen las características químicas del agua. Las características biológicas son definidas por la flora y la fauna dentro de los cuerpos de agua. La temperatura, carga de sedimentos, y el color son características físicas de la calidad del agua. La contaminación puede ser definida como la alteración de algunos aspectos físicos, químicos o de las características biológicas del agua.

El agua se acidifica y pierde oxígeno, lo que repercute en el desarrollo de la fauna y flora acuática. Por los efectos del calentamiento global y el incremento en la temperatura de los cuerpos de agua se puede presentar mayor cantidad de nitritos o nitratos, entre otros contaminantes, lo que significa que ese líquido no se puede consumir.

En México se determinó que cuando la temperatura del agua se incrementó en esos lugares entre 0.72 y 1.38 °C en los últimos años, implicó efectos drásticos sobre la flora, fauna y potabilidad de la misma. (IMTA 2010).

Los parámetros para definir la calidad del agua son: físicos (temperatura, turbiedad, color, olor y sabor) microbiológicos (microorganismos patógenos productores de enfermedades) y químicos (sustancias inorgánicas y sustancias orgánicas).



Aunque es inminente que la calidad del agua se verá afectada por el cambio climático, pocos estudios se han dirigido a la modelación de sus impactos potenciales en comparación con aquellos que se han enfocado a flujos y otras variables hidrológicas.

Lo anterior se debe en gran medida, a que generalmente no se cuenta con una base de datos de calidad del agua nutrida, confiable y consistente que pueda ser utilizada para alimentar a los modelos hidrológicos dinámicos. Además la complejidad de la modelación hídrica se incrementa con la inclusión de parámetros de calidad del agua (Whitehead, 2009).

2.2.1 Contaminantes convencionales del agua.

La contaminación del agua es un concepto relativo asociado a las características físicas, químicas y biológicas que impiden o dificultan su uso según las aplicaciones a las que valla destinada (Morrenis *et al.*, 2002). Un contaminante es toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en el agua altere o modifique su composición, condición natural y autoreguladora (LGEEPA, 2012). Dentro de la modelación matemática ciertos constituyentes se conocen como contaminantes convencionales debido a su consideración a lo largo de la historia; estos son: el oxígeno disuelto, la materia orgánica, temperatura, salinidad, coliformes, todos los relacionados con el ciclo del nitrógeno, fosforo, algas, eutrofización, entre otros (Paredes *et al.*, 2004).

Temperatura. Las primeras modelaciones de la temperatura del agua en sistemas naturales aparecieron en la década de los 60: Burt (1958); Delay and Seaders (1966); Raphael (1962). En general, la modelación de la temperatura del agua en sistemas naturales se realiza mediante el planteamiento del balance térmico, debido a que es difícil que se cuenten con todos los datos necesarios, la temperatura si es medida se puede introducir como un dato y considerarse en todos los procesos tales como la velocidad de las reacciones, que se consideran en el modelo aumenta con la temperatura, según la ecuación de Arrhenius:

$$k(t) = K(20)\theta^{T-20}$$

Donde $K(t)$ es el valor de la constante a la temperatura T , $K(20)$ es el valor de la constante a 20°C y θ es el factor de corrección de temperatura y depende del proceso.

Oxígeno disuelto. El oxígeno ha sido considerado tradicionalmente como el principal indicador de salud de un sistema natural (Monerris *et al.*, 2002). Los factores que influyen



en la concentración del oxígeno son la temperatura, el nitrógeno (nitrógeno orgánico, amonio y nitratos), el fósforo y el fitoplancton.

Ciclo del nitrógeno. Se lleva a cabo mediante tres procesos: amonificación, nitrificación y desnitrificación, Paredes *et al.*, (2009) los describe de la siguiente manera (figuras 12 y 13):

1. **Amonificación.** Los vertidos de aguas residuales incorporan a los sistemas naturales tanto nitrógeno orgánico (particulado y disuelto) como amonio. Diferentes animales, plantas y microorganismos realizan el proceso de amonificación o paso de nitrógeno orgánico a amonio.
2. **Nitrificación.** En un ambiente aeróbico bacterias del género *Nitrosomona* convierte el amonio en ión nitrito. Los nitritos son rápidamente oxidados a nitratos en un solo paso principalmente por la bacteria del género *Nitrobacter*.
3. **Desnitrificación.** En medios aeróbicos el compuesto final del nitrógeno es el nitrato (NO_3^-). Cuando la masa de agua, por el motivo que sea, se queda sin oxígeno disuelto se produce el proceso de desnitrificación por el cual el nitrato pasa a nitrógeno gas y este se escapa a la atmósfera. Este proceso es el resultado de actividad de algunas bacterias anaeróbicas y heterótrofas como las *Pseudomonas denitrificans* y *Paracoccus denitrificans*.

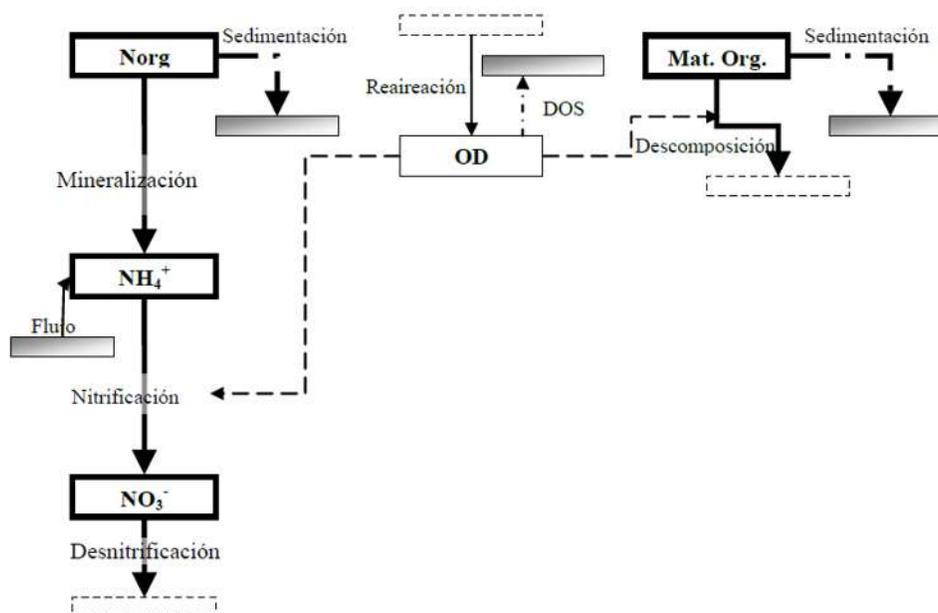


Figura 12. Procesos considerados en la modelación del oxígeno disuelto junto con el ciclo del nitrógeno. Fuente: Paredes *et al.*, (2009).

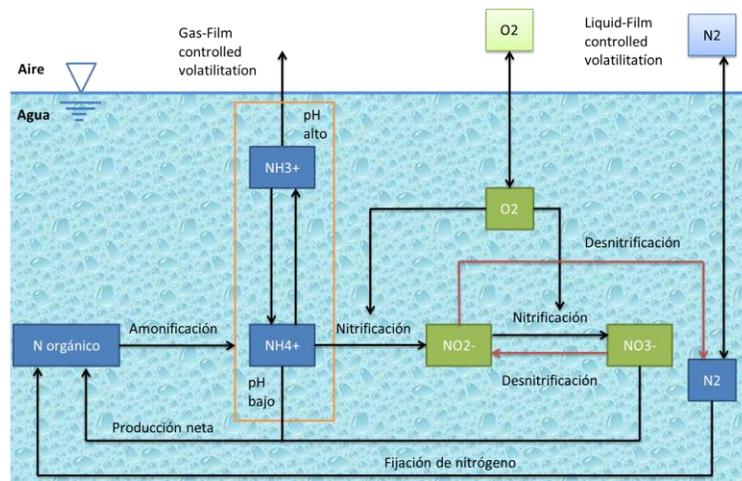


Figura 13. Ciclo del nitrógeno en. Adaptada de Paredes *et al.*, (2009).

Eutrofización. Con la aparición de los procesos de eutrofización y su modelación, la consideración del oxígeno disuelto queda embebida en la modelación biológica en donde se consideran los nutrientes, la biomasa de algas, la materia orgánica y el oxígeno disuelto. La eutrofización fue definida por Vollenweider (1968) como un enriquecimiento de los nutrientes y el subsiguiente deterioro progresivo de la calidad del agua principalmente en lagos (cuerpos de agua lénticos) debido a la proliferación vegetal con las repercusiones consiguientes en el metabolismo global de las aguas afectadas. Debido a que en la mayoría de los casos el fósforo es el nutriente limitante, los primeros modelos consistían en relaciones semiempíricas entre diferentes características hidráulicas de los embalses y el aporte de fósforo (Vollenweider 1968 y 1975; Larsen y Mercier 1976).

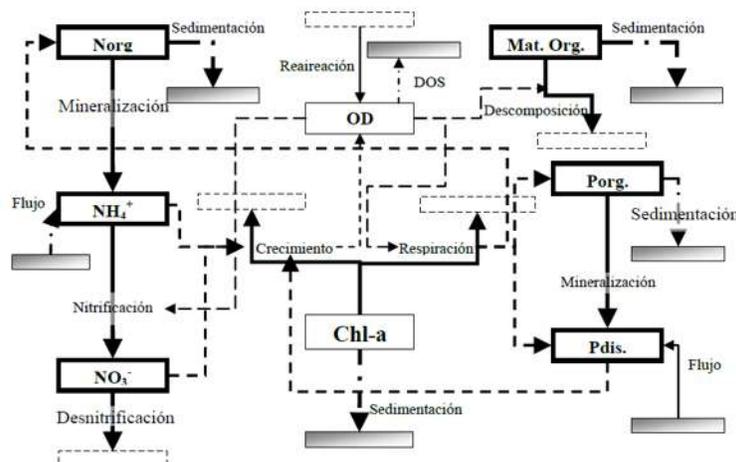


Figura 14. Procesos considerados en la modelación de un problema de eutrofización Paredes *et al.*, (2009).



Posteriormente surgieron las relaciones entre el contenido de fósforo y la concentración de clorofila a, parámetro empleado como indicador de la población de fitoplancton. El entendimiento del proceso de eutrofización en la actualidad se fue mejorando a través de los años y ha sido factible su realización debido a la aparición de las computadoras (figura 14), Paredes *et al.*, (2004).

2.2.2 Modelos de gestión de calidad y cantidad del agua

Un modelo de gestión de calidad y cantidad del agua permiten la modelación de sistemas superficiales (ríos, presas) o subterráneos (acuíferos), con los parámetros convencionales de calidad de la agua, algunos permiten la modelación de contaminantes como metales pesados. De acuerdo a Paredes *et al.*, (2004) los problemas de gestión y calidad han sido tratados por separado. La necesidad de considerar ambos aspectos en una estrategia común ha sido planteada por diversos autores como Loucks (1987), Arnold and Orlob (1989) y Strzepek and Chapra (1990).

El módulo HEC-5 -Simulation of flood control and conservation systems- fue desarrollado en 1973, y ha sido uno de los módulos más ampliamente usados tradicionalmente en tareas de simulación de la planificación y la gestión de sistemas de embalses (Solera 2004).

La herramienta MODSIM (Azevedo, 1993) es una aplicación informática desarrollada para la conexión del modelo de simulación de recursos hídricos de redes de flujo MODSIM con el módulo de calidad para ríos QUAL2E. El desarrollo ha sido aplicado a la cuenca del río Piracicaba en Brasil (Azevedo, 1993) y en el río Arkansas Colorado-USA (Dai y Labadie 2001).

El módulo MIKE-BASIN permite la modelación de la gestión del agua incluyendo embalses, tramos de río o canal, demandas, acuíferos (como depósitos). En cuanto a la modelación de la calidad del agua permite la modelación de: constituyentes arbitrarios, oxígeno disuelto junto con la DBO, el amonio y un término fijo que representa el efecto de las algas y del consumo de oxígeno por parte de los sedimentos.

AQUATOOL (sistema de apoyo a la decisión para la gestión de cuencas complejas) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad



Politécnica de Valencia, permite crear los esquemas de simulación para la cuenca en estudio, así como visualizar las reglas de operación del mismo (Andreu *et al.*, 2007).

De acuerdo a Andreu *et al.*, (2007) AQUATOOL cuenta con el módulo SIMGES (simulación de gestión) que es el que permite hacer la gestión del sistema así como evaluar múltiples elementos (presas, tramos de ríos de distintos tipos, acuíferos, demandas, consuntivas y no consuntivas). También cuenta con el módulo GESCAL (gestión de la calidad), el cual permite la modelación de temperatura, contaminantes arbitrarios, oxígeno disuelto y materia orgánica carbonosa (MOC), ciclo del nitrógeno: nitrógeno orgánico, amonio y nitratos, y su afección sobre el oxígeno disuelto. También permite la modelación de eutrofización, lo cual incluye: ciclo del nitrógeno, fitoplancton (como clorofila-a, fósforo orgánico e inorgánico; y su afección sobre el oxígeno disuelto (Paredes *et al.*, 2004 y 2009). Debido a que se utilizará el modelo de gestión Aquatool se utilizará la metodología utilizada en el módulo de gestión de la calidad (GESCAL).

2.2.3 Modelación en conducciones

De acuerdo a Paredes *et al.*, (2004 y 2009), independientemente del constituyente que se esté modelando, la ecuación diferencial que se resuelve para simular la evolución de la calidad del agua en el tramo de río es la misma y viene definida por el siguiente balance de materia:

$$0 = \frac{d}{dx} \left(E \frac{dC}{dx} \right) - \frac{d(uC)}{dx} + \frac{S_d + C_e q_e - C q_s + \sum W_i}{V}$$

En donde: E representa la dispersión ($m^2 \text{día}^{-1}$); C la concentración del constituyente (mg/l); C_e la concentración del constituyente en el acuífero al que está conectado el río (mg/l); x la distancia a lo largo del tramo de río (m); u la velocidad (m/día); V el volumen de la masa de agua (m^3); q_e es el caudal que aporta el acuífero ($m^3 \text{día}^{-1}$); q_s el posible caudal filtrante al acuífero ($m^3 \text{día}^{-1}$); S_d cantidad de masa aportada de forma difusa al tramo de río (gr/día). $\sum W_i$ (M) representa el conjunto de procesos que eliminan o aportan materia al elemento.

2.2.3.1 Hidráulica de ríos

Para la obtención de la velocidad puede ser por medio de la ecuación de Manning



$$u = \frac{R_h^{\frac{2}{3}} I^{\frac{1}{2}}}{n}$$

En donde: R_h (m) representa el radio hidráulico que se obtienen como el cociente entre el área mojada y el perímetro mojado. I (m/m) representa la pendiente del canal y n es el número de Manning o de rugosidad. La velocidad se obtiene en ms^{-1} .

También puede ser obtenido por el método de Leopold and Maddock (1953) donde se establecen relaciones potenciales entre las distintas variables hidráulicas y el caudal.

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 Q^{\beta_1} \\ h &= \alpha_2 Q^{\beta_2} \\ b &= \alpha_3 Q^{\beta_3} \end{aligned}$$

Donde u representa la velocidad (ms^{-1}); Q es el caudal circulante (m^3s^{-1}); h es el tirante (m); b el ancho del río (m). Los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 y β_3 son parámetros que se establecen de forma empírica y que por continuidad deben cumplir:

$$\beta_1 + \beta_2 + \beta_3 = 1; \quad \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \alpha_3 = 1$$

2.2.3.2 Dispersión longitudinal

Puede ser calculada a través de la expresión establecida por Fischer *et al.*, (1979):

$$E = 0.011 \frac{u^2 b^2}{hu^*}; \quad u^* = \sqrt{ghs}$$

Donde u^* es la velocidad gravitacional (ms^{-1}) g es la aceleración gravitacional (ms^{-1}) y s la pendiente del canal.

2.2.3.3 Aireación

Muchos investigadores han desarrollado fórmulas para predecir la aireación en los arroyos y ríos, revisiones completas se pueden encontrar en referencias como (Bowie et al., 1985). De acuerdo a Chapra (1997), Entre estos, los primeros tres se usan con mucha frecuencia: O'Connor-Dobbins (1958), Churchill *et al.*, (1962), y Owens-Gibbs (1964), Thackston and Krenkel (1966),



$$\text{O'Connor – Dobbins} \quad k_a = 3.93 \frac{u^{0.5}}{h^{1.5}}$$

$$\text{Churchill } et \text{ al.}, \quad k_a = 5.026 \frac{u}{h^{1.67}}$$

$$\text{Owens – Gibbs} \quad k_a = 5.32 \frac{u^{0.67}}{h^{1.85}}$$

$$\text{Thackston and Krenkel} \quad k_a = 24.9 \frac{(1 + \sqrt{F})u^*}{h}$$

Donde:

Ka → Constante de Aireación (1/d)

F → Número de Froude

La fórmula O'Connor-Dobbins suele dar valores menores que las fórmulas de Churchill y Owens-Gibbs. Una posible explicación es que el flujo es más lento, los canales más profundos de lo que O'Connor-Dobbins realiza, donde los canales son más idealizados (es decir, más como un canal) de corrientes rápidas y poco profundas, donde las estructuras de caída y rápidos puede mejorar la aireación. La formula de O'Connor-Dobbins tiene la aplicación más amplia, ya que es apropiada para moderadas a corrientes profundas con moderadas a bajas velocidades. La fórmula Churchill se aplica para profundidades similares, pero para flujos más rápidos. Finalmente se utiliza la relación de Owens-Gibbs para los sistemas menos profundas (Chapra 1997).

2.2.3.4 Modelación de calidad del agua

Materia Orgánica. Para la modelación de materia orgánica se consideran los siguientes procesos: degradación por microorganismos heterótrofos y sedimentación de la parte particulada.

$$\text{Materia Orgánica} \sum W_i = -k_d \theta_d^{T-20} \frac{O}{O + k_d^{1/2}} L - \frac{VS_L}{h} L$$

Donde:

k_d → constante de degradación (T^{-1});

θ_d → constante por corrección de la temperatura de la constante k_d ;

T → temperatura de la masa de agua;



$O \rightarrow$ concentración de oxígeno disuelto;
 $L \rightarrow$ concentración de MOC en el río (M/V);
 $VSL \rightarrow$ velocidad de sedimentación (mdía^{-1});
 $h \rightarrow$ altura de la masa de agua.

Nitrógeno Orgánico. Se consideran los procesos de Incremento de concentración por la amonificación del nitrógeno orgánico y la sedimentación.

$$\text{Nitrógeno Orgánico} \sum W_i = -k_{noa} \theta_{noa}^{T-20} N_o - \frac{VS_{No}}{h} N_o$$

Donde:

$k_{noa} \rightarrow$ constante de amonificación (día^{-1});
 $\theta_{noa} \rightarrow$ coeficiente de corrección de la constante anterior por temperatura;
 $N_o \rightarrow$ concentración de nitrógeno orgánico en el río (MT^{-1});
 $VS_{No} \rightarrow$ velocidad de sedimentación del nitrógeno orgánico (mdía^{-1});
 $h \rightarrow$ altura de la masa de agua.

Amonio. Los procesos considerados son el incremento de concentración por la amonificación del nitrógeno orgánico y la disminución de la misma por la nitrificación.

$$\text{Amonio} \sum W_i = +k_{noa} \theta_{noa}^{T-20} N_o - \left(+k_{nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + k_{n1/2}} \right) N_a$$

En donde:

$k_{nai} \rightarrow$ constante de nitrificación de paso a nitritos (día^{-1});
 $\theta_{nai} \rightarrow$ corrección por temperatura de la constante de nitrificación;
 $k_{n1/2} \rightarrow$ constante de semisaturación del nitrógeno (mg l^{-1});
 $O \rightarrow$ concentración de oxígeno disuelto;
 $Na \rightarrow$ concentración de amonio (NH_4^+) en el río (mg l^{-1});

Nitritos y Nitratos. En el proceso de modelación de los nitratos se tiene en cuenta el efecto del incremento de concentración por la transformación de amonio y la disminución de los mismos por procesos de desnitrificación.

$$\text{Nitratos} \sum W_i = \left(k_{nai} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + k_{nai 1/2}} \right) N_a - \left(k_{no3} \theta_{no3}^{T-20} \frac{k_{no3 1/2}}{O + k_{no3 1/2}} \right) N_{o3}$$

Donde:



N_{o3} → concentración de nitratos (mg l^{-1});
 k_{no3} → constante de desnitrificación (día^{-1});
 θ_{no3} → factor de corrección de temperatura para la constante anterior;
 $k_{no3\ 1/2}$ → constante de semisaturación para tener en cuenta que la desnitrificación sólo se produce en momentos de anoxia.

Oxígeno disuelto. Se consideran los siguientes procesos: consumo de oxígeno disuelto en el proceso de degradación de materia orgánica carbonosa y consumo de oxígeno disuelto en el proceso de nitrificación.

$$O.D. \sum W_i = +k_a \theta_{ka}^{T-20} (O_{sat} - O) - +k_d \theta_d^{T-20} L - r_a \left(k_{Na} \theta_{nai}^{T-20} \frac{O}{O + k_{N\ 1/2}} \right) N_a$$

Donde:

O → concentración de oxígeno disuelto en el río (mg l^{-1});
 O_{sat} → concentración de saturación de oxígeno disuelto (mg l^{-1});
 k_a → constante de reaireación (día^{-1});
 θ_{ka} → factor de corrección por temperatura;
 r_a → representa el consumo de oxígeno por oxidación de amonio (mgO/mgN)

2.2.4 Legislación en materia de calidad del agua

La Ley de Aguas Nacionales es la máxima legislación en materia de agua en calidad y cantidad, fue publicada en el Diario Oficial de la Federación (DOF) el 1° de diciembre de 1992 y su última reforma publicada DOF fue el 07-06-2013, a continuación se presentan los artículos en materia de calidad y cantidad del agua.

Artículo 9 Fracción XLV. La CONAGUA Deberá mantener actualizado y hacer público periódicamente el inventario de las aguas nacionales, y de sus bienes públicos inherentes y de la infraestructura hidráulica federal; clasificar las aguas de acuerdo con los usos, y elaborar balances en cantidad y calidad del agua por regiones hidrológicas y cuencas hidrológicas;

Artículo 14 BIS Fracción XIV. El Ejecutivo Federal establecerá las medidas necesarias para mantener una adecuada calidad del agua para consumo humano y con ello incidir en la salud pública; para el mejor cumplimiento esta política, se coordinará y solicitará los apoyos necesarios a los estados, Distrito Federal y municipios.

Artículo 86. La autoridad del agua tendrá que:



Fracción III. Formular programas integrales de protección de los recursos hídricos en cuencas hidrológicas y acuíferos, considerando las relaciones existentes entre los usos del suelo y la cantidad y calidad del agua;

Fracción VIII. Vigilar, en coordinación con las demás autoridades competentes, que se cumplan las normas de calidad del agua en el uso de las aguas residuales;

ARTÍCULO 87 (Artículo reformado DOF 29-04-2004). "La Autoridad del Agua" determinará los parámetros que deberán cumplir las descargas, la capacidad de asimilación y dilución de los cuerpos de aguas nacionales y las cargas de contaminantes que éstos pueden recibir, así como las metas de calidad y los plazos para alcanzarlas, mediante la expedición de Declaratorias de Clasificación de los Cuerpos de Aguas Nacionales, las cuales se publicarán en el Diario Oficial de la Federación, lo mismo que sus modificaciones, para su observancia.

Las declaratorias contendrán:

Fracción I. La delimitación del cuerpo de agua clasificado;

Fracción II. Los parámetros que deberán cumplir las descargas según el cuerpo de agua clasificado conforme a los periodos previstos en el reglamento de esta Ley;

Fracción III. La capacidad del cuerpo de agua clasificado para diluir y asimilar contaminantes, y

Fracción IV. Los límites máximos de descarga de los contaminantes analizados, base para fijar las condiciones particulares de descarga.

Por otro lado la Ley General del Equilibrio Ecológico y la Protección al ambiente en el capítulo III titulado Prevención y Control de la Contaminación del Agua y de los Ecosistemas Acuáticos abarca 18 artículos en los cuales se habla de la contaminación del agua y de los ecosistemas, dentro de estos los más importantes son los siguientes

Artículo 117. Para la prevención y control de la contaminación del agua se considerarán los siguientes criterios:



Fracción I. La prevención y control de la contaminación del agua, es fundamental para evitar que se reduzca su disponibilidad y para proteger los ecosistemas del país;

Fracción II. Corresponde al Estado y la sociedad prevenir la contaminación de ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos y corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;

Fracción III. El aprovechamiento del agua en actividades productivas susceptibles de producir su contaminación, conlleva la responsabilidad del tratamiento de las descargas, para reintegrarla en condiciones adecuadas para su utilización en otras actividades y para mantener el equilibrio de los ecosistemas;

Fracción IV. Las aguas residuales de origen urbano deben recibir tratamiento previo a su descarga en ríos, cuencas, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua, incluyendo las aguas del subsuelo;

Artículo 118. Los criterios para la prevención y control de la contaminación del agua serán considerados en:

Fracción I. La expedición de normas oficiales mexicanas para el uso, tratamiento y disposición de aguas residuales, para evitar riesgos y daños a la salud pública;

Fracción II. La formulación de las normas oficiales mexicanas que deberá satisfacer el tratamiento del agua para el uso y consumo humano, así como para la infiltración y descarga de aguas residuales en cuerpos receptores considerados aguas nacionales;

Fracción IV. El establecimiento de zonas reglamentadas, de veda o de reserva en términos de la Ley de Aguas Nacionales;

Fracción V. Las concesiones, asignaciones, permisos y en general autorizaciones que deban obtener los concesionarios, asignatarios o permisionarios y en general los usuarios de las aguas propiedad de la nación, para infiltrar aguas residuales en los terrenos, o para descargarlas en otros cuerpos receptores distintos de los alcantarillados de las poblaciones; y

Fracción VII. La clasificación de cuerpos receptores de descarga de aguas residuales, de acuerdo a su capacidad de asimilación o dilución y la carga contaminante que éstos puedan recibir.

Artículo 119. La Secretaría expedirá las normas oficiales mexicanas que se requieran para prevenir y controlar la contaminación de las aguas nacionales, conforme a lo dispuesto en



esta Ley, en la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y las demás disposiciones que resulten aplicables.

Artículo 119 Bis. En materia de prevención y control de la contaminación del agua, corresponde a los gobiernos de los Estados y de los Municipios, por sí o a través de sus organismos públicos que administren el agua, así como al del Distrito Federal, de conformidad con la distribución de competencias establecida en esta Ley y conforme lo dispongan sus leyes locales en la materia:

Fracción I. El control de las descargas de aguas residuales a los sistemas de drenaje y alcantarillado;

Fracción II. La vigilancia de las normas oficiales mexicanas correspondientes, así como requerir a quienes generen descargas a dichos sistemas y no cumplan con éstas, la instalación de sistemas de tratamiento;

Fracción III. Determinar el monto de los derechos correspondientes para que el municipio o autoridad estatal respectiva, pueda llevar a cabo el tratamiento necesario, y en su caso, proceder a la imposición de las sanciones a que haya lugar, y

Fracción IV. Llevar y actualizar el registro de las descargas a los sistemas de drenaje y alcantarillado que administren, el que será integrado al registro nacional de descargas a cargo de la Secretaría.

Artículo 120. Para evitar la contaminación del agua, quedan sujetos a regulación federal o local:

Fracción I. Las descargas de origen industrial;

Fracción II. Las descargas de origen municipal y su mezcla incontrolada con otras descargas;

Fracción III. Las descargas derivadas de actividades agropecuarias;

Fracción VI. La aplicación de plaguicidas, fertilizantes y sustancias tóxicas;

Fracción VII. Las infiltraciones que afecten los mantos acuíferos; y

Artículo 121. No podrán descargarse o infiltrarse en cualquier cuerpo o corriente de agua o en el suelo o subsuelo, aguas residuales que contengan contaminantes, sin previo tratamiento y el permiso o autorización de la autoridad federal, o de la autoridad local en los casos de descargas en aguas de jurisdicción local o a los sistemas de drenaje y alcantarillado de los centros de población.



Artículo 123. Todas las descargas en las redes colectoras, ríos, acuíferos, cuencas, cauces, vasos, aguas marinas y demás depósitos o corrientes de agua y los derrames de aguas residuales en los suelos o su infiltración en terrenos, deberán satisfacer las normas oficiales mexicanas que para tal efecto se expidan, y en su caso, las condiciones particulares de descarga que determine la Secretaría o las autoridades locales. Corresponderá a quien genere dichas descargas, realizar el tratamiento previo requerido.

Artículo 128. Las aguas residuales provenientes de los sistemas de drenaje y alcantarillado urbano, podrán utilizarse en la industria y en la agricultura, si se someten en los casos que se requiera, al tratamiento que cumpla con las normas oficiales mexicanas emitidas por la Secretaría, y en su caso, por la Secretaría de Salud.

Artículo 133. La Secretaría, con la participación que en su caso corresponda a la Secretaría de Salud conforme a otros ordenamientos legales, realizará un sistemático y permanente monitoreo de la calidad de las aguas, para detectar la presencia de contaminantes o exceso de desechos orgánicos y aplicar las medidas que procedan. En los casos de aguas de jurisdicción local se coordinará con las autoridades de los Estados, el Distrito Federal y los Municipios.

2.3 Cantidad del agua

La cantidad del agua influye de manera importante en la calidad de la misma, debido a que las descargas urbanas y los retornos son similares a escala interanual, los cambios en las aportaciones o el volumen que ingresa al río, condiciona la calidad del agua.

Por otro lado, la cantidad del agua condiciona el volumen que se abastece a las diferentes demandas, y si se busca la sustentabilidad de la cuenca se tratará de buscar que el volumen que se genera naturalmente en la cuenca, sea cuando mucho igual al volumen medio generado, en caso de que las demandas sean mayores la cuenca presentará déficit de suministro en el sistema.

2.3.1 Esguerrimiento superficial y recarga al acuífero

A finales de los setentas se diseñó un modelo lluvia esguerrimiento de manera estacional, el cual contaba con un reducido número de parámetros a diferencia de otros modelos que



contaban con un gran número de parámetros y que su obtención o estimación es muy difícil de obtener, ante esta necesidad surge el modelo de Témez (Témez 1977), este modelo permite que se produzca excedente sin necesidad de que el suelo este totalmente saturado, además de realizar un reparto más realista del excedente, entre el agua que constituye el escurrimiento superficial y la recarga al acuífero.

Según Ruiz et al., (1998) el modelo de Témez presenta una serie de características que lo convierten en cuasi-distribuido. Este modelo se puede aplicar a zonas de características iguales de manera estacional dando muy buenos resultados en escala mensual, además nos permite evaluar los recursos hídricos en grandes cuencas. El modelo simula los procesos implicados en la producción de escurrimiento mediante ecuaciones de transferencia y balance. Las principales variables implicadas son la evapotranspiración real, infiltración, humedad en el suelo, volumen de agua almacenada en los acuíferos, aportaciones superficiales y aportaciones subterráneas tal como se muestra en la figura 15.

De acuerdo a Hernández L. et al., (2007) la obtención de las aportaciones está fundamentada en la interacción entre el clima y la superficie del suelo, y su cubierta. La capacidad de retener agua por parte del suelo, y de ser utilizada por las plantas, trae como consecuencia que el agua de lluvia, o una parte de ella quede retenida y disponible para que las plantas la evapotranspiren. La reserva de agua utilizable por las plantas, que es función de la capacidad de campo, punto de marchitez permanente, densidad aparente y profundidad radicular media, incorpora agua de precipitación y transmite agua a la atmósfera por evapotranspiración de un modo continuo llenándose o vaciándose, según sean superiores las entradas o las salidas, hasta que se llega a un punto en que el suelo no admite más agua, se llena la reserva y se genera el escurrimiento o la recarga de los acuíferos con los excedentes.

Se pueden utilizar datos mensuales de precipitación y evapotranspiración en base a las estaciones meteorológicas que se encuentren en y cerca de la zona de estudio, además de ser necesario contar con estaciones hidrométricas o de aforo ubicadas en lugares estratégicos, también es de vital importancia contar con el coeficiente de escurrimiento de la cuenca que depende del uso y el tipo de suelo, así como los acuíferos con los que está conectado el sistema superficial y de estos a su vez conocer el coeficiente de desagüe del acuífero que se puede estimar mediante la relación de las salidas por manantiales y las salidas totales.

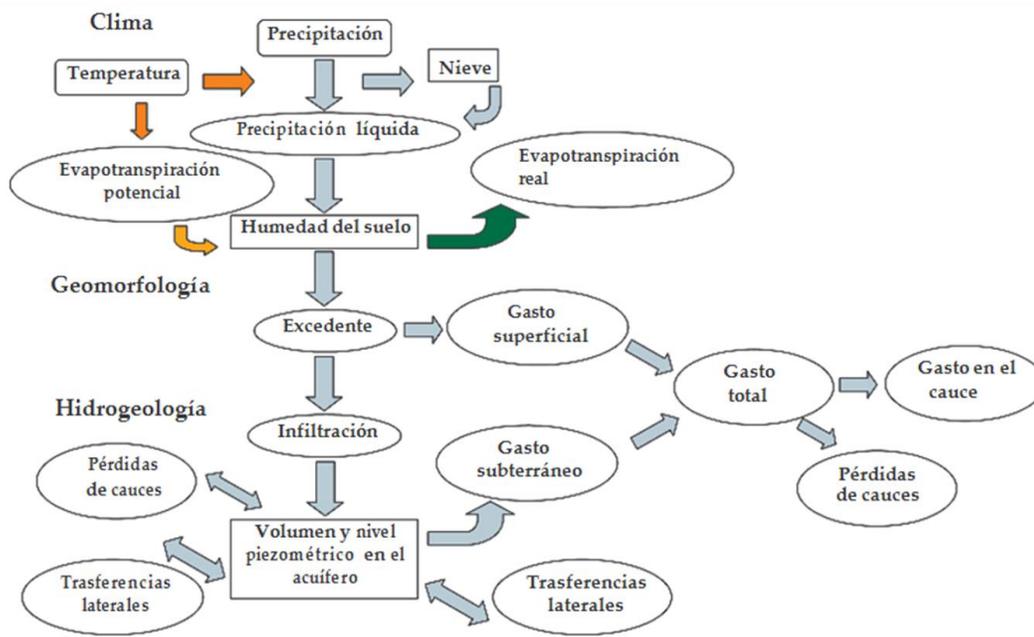


Figura 15. Diagrama de Flujo del modelo de Temez (Perez 2005).

Una vez conociendo las variables de entrada al modelo se procede a la calibración del mismo mediante análisis paramétrico de la capacidad máxima de almacenamiento hídrico, la infiltración máxima, el coeficiente de escurrimiento y la relación salidas naturales del acuífero entre las salidas totales del mismo. El modelo hidrológico permite la evolución de las variables implicadas siendo posible poder evaluar el cambio climático en los recursos hídricos o la alteración de los usos del suelo, los impactos antropogénicos.

El modelo de Temez ha sido incorporado a el programa EVALHID (EVALUación de los recursos HÍDRICOS), que es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escurrecimiento en cuencas complejas (Paredes *et al.*, 2013). Este programa permite realizar las modelaciones mensuales o diarias en una cuenca compleja de manera semidistribuida, lo cual le da una mayor versatilidad respecto a otros modelos, este software permite incorporar algunos otros modelos como el modelo HBV (Bergström, 1995), de gran tradición en países nórdicos, permite la modelación hidrológica con un número no muy elevado de parámetros por lo que es bastante versátil en muchas ocasiones, además del modelo Sacramento, (Burnash *et al.*, 1973) también conocido como “SAC-SMA” es un



modelo de alto número de parámetros, hasta 16, lo que permite modelar en gran detalle procesos hidrológicos cuando se tiene gran disponibilidad de datos (Paredes *et al.*, 2013).

2.3.2. Demanda de los cultivos

Para el cálculo de los requerimientos de los cultivos se implementó la metodología (figura 16) 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, así como el software CROPWAT 8.0 basado en la publicación anteriormente mencionada.

Para 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.

El grupo de expertos recomendó la adopción del método combinado de Penman-Monteith como una nueva norma para el cálculo de la evapotranspiración de referencia y sugirió procedimientos para el cálculo de los distintos parámetros. El método FAO Penman-Monteith fue desarrollado mediante la definición del Cultivo de referencia como un cultivo hipotético de referencia con una altura asumida de 0.12 m, una resistencia superficial fija de 70 s m⁻¹ y un albedo de 0.23. La superficie de referencia se asemeja a una superficie extensa de pasto verde de altura uniforme, creciendo activamente, sombreando totalmente la tierra y con un adecuado aporte de agua. El método supera las deficiencias del anterior método FAO Penman y proporciona valores más consistentes con el uso real de agua por parte de los cultivos en todo el mundo. (FAO 2009).

Es necesario contar con los datos de precipitación, ya que estos son utilizados por CROPWAT para calcular la precipitación efectiva como datos de entrada para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos (RAC) y de la programación de riego. Por último, los datos de cultivos son necesarios para los cálculos de los RAC, y también datos de suelo si el usuario desea determinar la programación de riego.



Aunque normalmente CROPWAT calcula los requerimientos de los cultivos y las programaciones para un cultivo, también puede calcular un esquema de suministro de agua, que es básicamente la combinación de los requerimientos de agua de varios cultivos, cada uno con su fecha de siembra (patrón de cultivo).

El programa CROPWAT se organiza en 8 módulos diferentes, de los cuales 5 son módulos de datos de entrada y 3 son de cálculo. Estos módulos son accesibles a través del menú principal pero se pueden acceder más fácilmente a través de la Barra de módulos que está permanentemente visible en la parte izquierda de la ventana principal. Esto permite al usuario combinar fácilmente diferentes datos climáticos, de cultivo y de suelo para el cálculo de los requerimientos de agua de los cultivos, la programación de riego y la entrega de agua en esquemas multicultivos (figura 16).

Los módulos de entrada de datos de CROPWAT son los siguientes:

1. Clima/ETo: se ingresan los datos de temperatura mínima, temperatura máxima y se pueden estimar los datos de velocidad del viento, humedad y insolación, con estos datos se puede realizar el cálculo de la ETo Penman-Monteith
2. Precipitación: para ingresar datos de precipitación y el método de la Soil Conservation Service (USDA) para calcular la precipitación efectiva.
3. Cultivo: para ingresar datos del cultivo como son el coeficiente de desarrollo Kc para las etapas de inicio, desarrollo y fin de temporada, la duración de cada una de las etapas en días, la profundidad radicular, el agotamiento crítico, la respuesta del rendimiento y la fecha de siembra. Opcionalmente se puede agregar la altura del cultivo.
4. Suelo: para ingresar las características principales del suelo como son: la humedad del suelo disponible, la tasa máxima de infiltración de la precipitación, la profundidad radicular máxima y el agotamiento inicial de humedad del suelo.
5. Patrón de cultivo: aquí ingresamos todos los cultivos que intervienen en una misma zona geográfica, es decir los principales cultivos de Módulos de los distritos de riego.

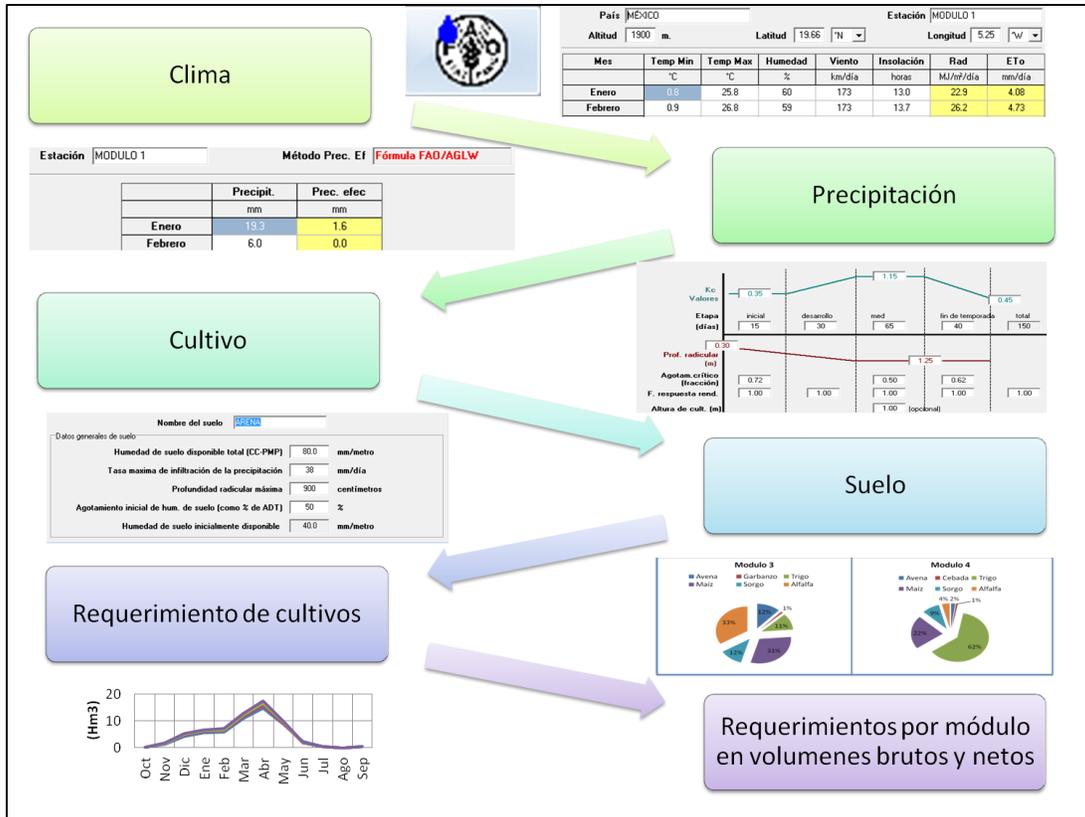


Figura 16. Diagrama de cálculo por el método de Penman-Monteith-FAO (2009).

La disponibilidad se cuantifico por medio de modelos lluvia escurrimiento restituidos a régimen natural, de acuerdo al modelo de Témez, (1977); los retornos urbanos de acuerdo a la metodología del OOAPAS (Loya, 2013) y las demandas de los cultivos de acuerdo a la FAO (2009).

Si se incluye el cambio climático en la cantidad del agua, la disponibilidad media de esta, disminuirá, debido a al incremento de temperatura y menor precipitación media anual en la cuenca. Estos cambios en la disponibilidad afectaran de manera importante el abastecimiento, lo que implicara problemas sociales (por la falta del recurso) y políticos (debido a la distribución del recurso). El conocer el efecto del cambio climático, es importante para ver como es el efecto y así poder establecer estrategias de mitigación.

De acuerdo a la UNESCO (2014) La demanda de agua dulce se incrementará significativamente en las próximas décadas. Este incremento presentará grandes retos y presión sobre los recursos en casi todas las regiones, especialmente en los países en desarrollo



y las economías emergentes. Además los responsables políticos, planificadores y profesionales pueden tomar medidas para superar las barreras que existen entre sus respectivos sectores.

2.3.3. Modelación hidráulica de acuíferos

Este método ha sido ampliamente utilizado debido a que se puede integrar en un sistema de gestión de los recursos hídricos, el método de los autovalores se utiliza en aquellos acuíferos conectados con un río para los que se considera necesario el uso de un modelo de parámetros distribuidos. Consecuentemente se requiere una localización detallada de las acciones que se ejercen sobre dichos acuíferos, así como de las respuestas del acuífero. Se ha demostrado que el método de los autovalores (Andreu y Sahuquillo, 1987) es el más eficiente para sistemas que puedan ser supuestos lineales, en los que interesa conocer las respuestas (parámetros de control) y sobre los que se ejerzan acciones que puedan ser descritas como combinaciones lineales de unas acciones unitarias predeterminadas (acciones elementales). La aplicación del método de los autovalores permite integrar en un único modelo las transferencias entre las distintas celdas en las que se ha discretizado el acuífero, reflejar el efecto de las extracciones producidas por los bombeos, así como plantear escenarios futuros (figura 17). Para la aplicación del método se ha utilizado el programa AQUIVAL incluido en el módulo SSD AQUATOOL.

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

Las acciones elementales son todos aquellos volúmenes que entran y salen del acuífero a lo largo del tiempo en una zona específica, es decir todos los bombeos, las salidas por evapotranspiración, las salidas por manantiales, la recarga vertical del o por lluvia, así como las transferencias laterales de entrada y de salida. Los parámetros de control nos indican la evolución del acuífero y nos indican el estado en cualquier parte de la simulación del acuífero, por ejemplo un parámetro de control pueden ser las salidas totales del acuífero, los



niveles piezométricos en una celda o conjunto de celdas, el volumen total almacenado, entre otros.

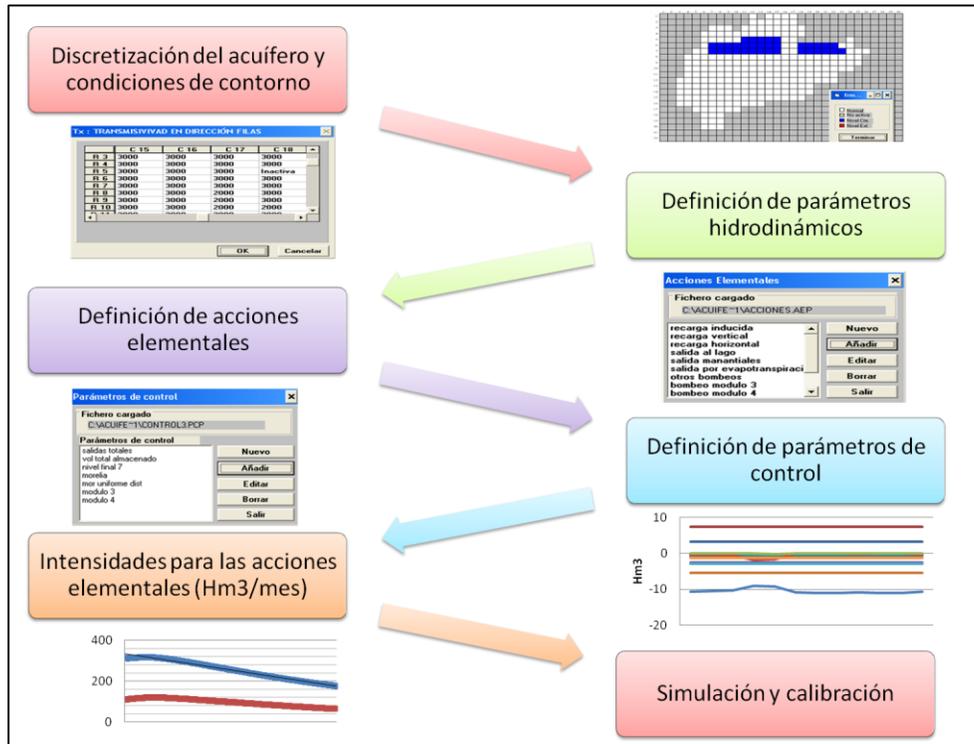


Figura 17. Diagrama de flujo para la simulación subterránea de acuíferos por el método de los autovalores mediante AQUIVAL.

2.3.3 Agua para uso urbano

La población se encuentra en constante cambio dentro de los sistemas de gestión de los recursos hídricos y es la más importante variable dentro de las reglas de operación, las ciudades en México se encuentran en constante crecimiento, lo que implica una mayor cantidad del recurso hídrico y es necesario ajustar las reglas de operación o ver cuál es la manera de la que se abastecerá la población. Debido a esto es importante analizar el crecimiento de la población incluyendo o no el efecto del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos.

El obtener la población de proyecto que es la cantidad de personas que se espera tener en una localidad de diseño y analizar que volumen de agua requerirán. Por lo tanto es necesario analizar los diferentes métodos de proyección de población que pueden ser por comparación o por ajuste de curvas por mínimos cuadrados. Estos métodos se basan en una extrapolación



de datos históricos de crecimiento de la población, que suponen que la población crecerá en el futuro con las mismas tendencias como en el pasado. Los métodos para obtener el incremento de la población son:

1. Método de crecimiento por comparación.
2. Método de mínimos cuadrados lineal.
3. Método de mínimos cuadrados exponencial.
4. Método de mínimos cuadrados logarítmico.
5. Método de mínimos cuadrados Potencial.

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

2.4 Sistema de GRH AQUATOOL/SIMGES/AQUIVAL/GESCAL

La evaluación integrada de los recursos hídricos debe de considerar los sistemas subterráneo y superficial como complementarios, ya que de ambos se extrae agua para todos los usos además de considerar la calidad del agua en cada uno de ellos. En la actualidad el medio ambiente y los usuarios están demandando mayor cantidad de agua, por tal motivo es de vital importancia tener un manejo adecuado del suministro a la demanda. Todas las decisiones tomadas dentro de la cuenca afectan directamente a los usuarios de los distintos sectores, lo cual implica, el tomar las decisiones correctas al planificar el uso del agua y así, evitar el mal uso, el desperdicio, o incluso desastres dentro de la cuenca.

En base a todas estas necesidades surgen los sistemas de apoyo a la decisión como una herramienta de diseño para ayudar a contestar preguntas específicas facilitando el empleo de modelos de simulación y optimización para la gestión de los recursos hídricos.

AQUATOOL (modelo para la gestión de cuencas complejas con uso conjunto) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia que esencialmente nos permite crear los esquemas de simulación complejos incluyendo sistemas superficiales, subterráneos y calidad del agua (figura 18).



El programa SIMGES perteneciente a AQUATOOL es un modelo general para la simulación de los sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamientos superficiales y subterráneos (AQUIVAL), de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. El uso de SIMGES permite modelar con extrema flexibilidad el sistema hidrográfico, cuya sucesiva simulación proporciona los valores de suministro para cada demanda (Hernández et al. 2007). Adicionalmente se agrega el sistema GESCAL que permite la modelación de diferentes contaminantes en cuerpos de agua incluyendo los resultados de las simulaciones de la gestión (SIMGES), estos resultados permiten evaluar espacial y temporalmente los cambios en la calidad del agua de acuerdo a diferentes reglas de operación o incluso plantear estrategias de solución como son plantas de tratamiento de aguas residuales, entre otros.

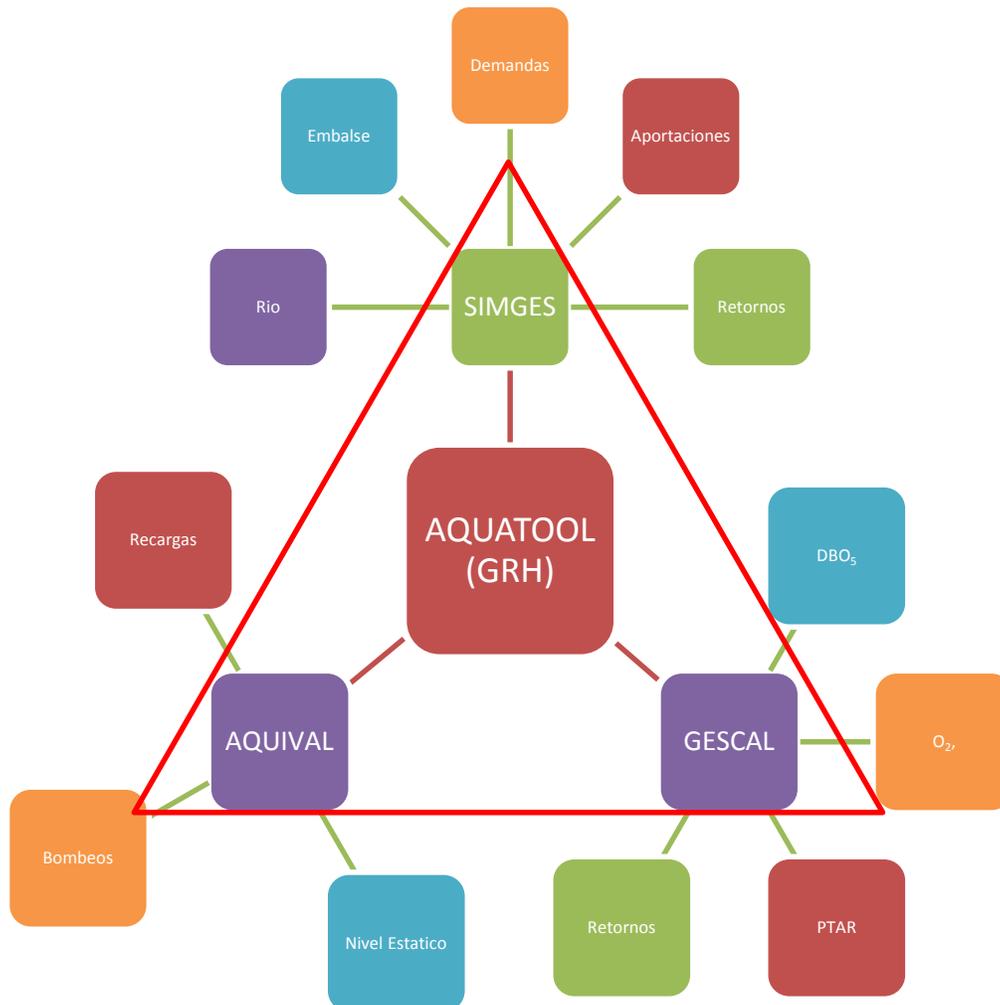


Figura 18. Características principales de la Gestión de Recursos Hídricos mediante AQUATOOL



3 Antecedentes

Como se mencionó en el apartado 2 hay solo algunos modelos desarrollados con algunas aplicaciones como HEC-5, MODSIM, MIKE-BASIN, Aquatool, en el caso de modelación de la gestión incluyendo cambio climático no existe evidencia de trabajos realizados y México son pocos los estudio que se centran en la modelación de calidad del agua. En los siguientes párrafos se describirá el trabajo más reciente en México tanto en modelación superficial y subterránea de cantidad del agua, así como de calidad del agua incluyendo cambio climático.

3.1 Calidad del agua

IMTA (2010), realizó la estimación del cambio climático sobre la calidad del agua en cuerpos superficiales, en las cuencas del río Bravo, Lerma Chapala y río Grijalva, se utilizó una metodología determinístico-conservativa, para los escenarios A1B y A2 regionalizados para México. La estimación del impacto se llevó a cabo mediante la proyección de dos indicadores importantes de calidad del agua: Demanda Bioquímica de Oxígeno a cinco días (DBO_5) y Demanda Química de Oxígeno (DQO). Los resultados obtenidos indican incrementos en la contaminación constantes en el próximo siglo, reduciendo la calidad del agua (figura 19).

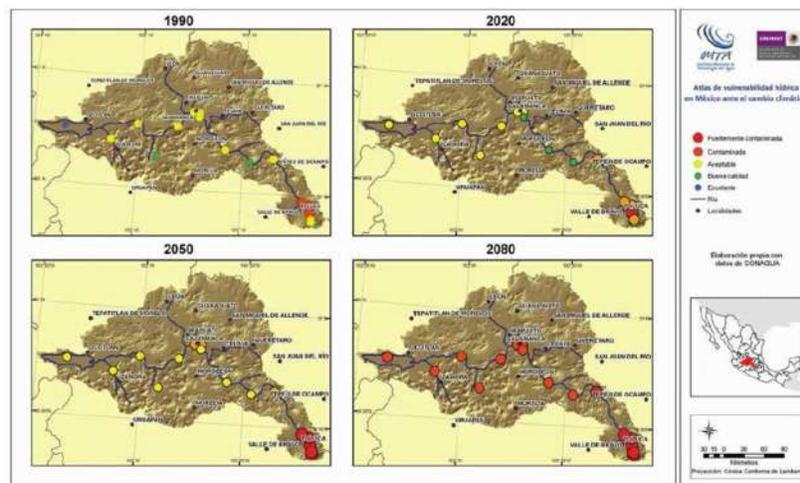


Figura 19. Cuenca Lerma Chapala Escenario A1B (DBO_5). Fuente IMTA (2010)

De la Mora *et al.*, (2011), hace un análisis del cambio climático e impacto de cambio climático en la concentración de oxígeno disuelto en el lago de Chapala, se utilizaron datos ponderados o un ensamble multimodelo para el escenario A2 del IPCC. Se utilizó climatología de referencia 1961-2003 y modelaron de los años 2031 a 2060 y se concluyó



que el oxígeno disuelto fue menor en 0.3 mg/l con respecto a la climatología de referencia (figura 20).

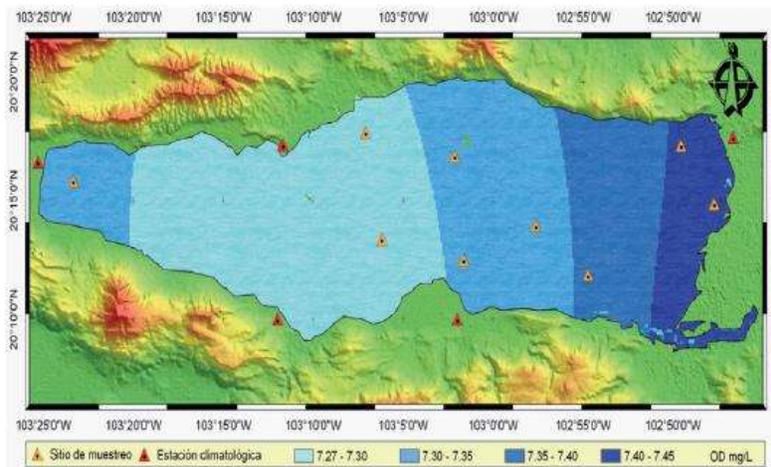


Figura 20. Distribución espacial de OD en el mes de diciembre (2051-2060). Fuente: De la Mora *et al.*, (2011)

De manera general la calidad del agua en México ha sido tratada en las estaciones de monitoreo y a través de análisis estadísticos e índices de calidad, trabajos como cambio climático en la calidad del agua del lago de Pátzcuaro (Sánchez *et al.*, 2012), donde se evaluaron los siguientes parámetros: dureza, alcalinidad, conductividad, nitrito, y fosfato.

Otros trabajos realizados con cambio climático de acuerdo al IMTA (2010) llevaron a cabo estudios de calidad del agua con modelos hidrológicos dinámicos que requieren bases de datos nutridas y que pueden predecir variables como escurrimiento, oxígeno disuelto, DBO₅, amonio, nutrientes. Los lugares donde se aplicaron estas metodologías han sido principalmente en Europa, utilizando diferentes modelos y con estudios que abarcan el siglo XXI (tabla 5).

Trabajos realizados en México no incluyen cambio climático. Ejemplos como estos son los siguientes: Carabias L. J. *et al.*, (2000) Samboni *et al.*, (2007), Jiménez (2007), Lima *et al.*, (2007), Mazarí (2007) Jiménez *et al.*, (2011), Páez *et al.*, (2011), Marín *et al.*, (2012); más sin embargo utilizan índices de calidad del agua, en estaciones de monitoreo; la información recopilada es necesaria en caso de pretender realizar modelación de calidad del agua e incluir cambio climático.



Tabla 5. Estudios de modelación de impactos de cambio climático sobre la calidad del agua. (WBUDG = Water Budget; SWAT = Soil and Water Assessment Tool; HBV = Hydrologiska Byråns Vattenbalansavdelning; CAT = Climate Assessment Tool).

Autor	Cuenca de estudio	GCM	Periodo de estudio	Modelo hidrológico	Resultados
Mimikov et al 2002	Grecia	HadCM2;UKHI	2050s	WBUDG	Decrecimiento en el escurrimiento y OD; incremento en la DBO y amonio
Varanou et al., (2002)	Grecia	HadCM2; ECHAM; CSIRO; CGCM	2080s	SWAT	Decrecimiento en el escurrimiento y transporte de nutrientes
Bouraoui et al., (2004)	Finlandia	Ninguno (retrospectivo)	1965-1998	SWAT	Incremento en el corrimiento invernal; incremento en el transporte de nutrientes anual
Arheimer (2005)	Suecia	HadAM3H;HAD CM2;ECHAM4/O PYC3	2071-2100	HBV	Incrementos de los nutrientes de 10% a 33%
Imhoff et al., (2007)	Maryland	ECHAM4	2010-2039	CAT	Incrementos de los nutrientes de 10%

En otros proyectos se realiza la modelación superficial de calidad del agua y que tampoco incluyen cambio climático son los siguientes: Domínguez *et al.*, (2005), Arcos *et al.*, (2012), Izurieta (2012).

Por otro lado Fiona *et al.*, (2013) hace un análisis de la calidad del agua incluyendo cantidad de la misma lo cual proporciona una mayor versatilidad a los resultados de calidad del agua. Yuzhou *et al.*, (2013) determino que la calidad y la cantidad del agua se verán afectados para ya que son muy sensibles a la variación del clima, esto para los escenarios A2 y B1 en California. Utilizo el programa SWAT para los escurrimientos superficiales, además determino el incremento de la temperatura del agua con respecto a la temperatura del aire. Los resultados indican incremento en los escurrimientos en los meses de invierno y disminución del escurrimiento en temporada de verano

3.2 Modelación superficial y subterránea

En el caso de la modelación hidrológica superficial donde el principal efecto es la disminución del escurrimiento y el incremento en la evapotranspiración y la demanda fueron realizados por Hernández *et al.*, (2011, 2012) Bello *et al.*, 2012., García *et al.*, (2012). López *et al.*, (2012). Otros autores como Patiño y Martínez (2010), Mundo *et al.*, (2012), Rivas y Montero (2012) realizaron análisis de manera general de recursos superficiales, en los cuales concluyeron disminución de la disponibilidad del recurso hídrico. Junxu *et al.*, (2014) evaluo



los escenarios RCP 8.5, RCP 4.5 y RCP 3.0, donde concluyen que el primero ocasiona mayor impacto en los escurrimientos que en los otros dos el cambio climático se vuelve más lento.

Fai *et al.*, (2013) realizó un análisis de escurrimientos con un modelo lluvia escurrimiento (CATCHMOD) incluyendo cambio climático, al sur de Inglaterra. (2013) Fishea *et al.*, (2014) utilizó el modelo SWAT para representar el ciclo hidrológico en el centro de Italia, mediante los escenarios A2 y B2 donde concluyó que el cambio climático ocasionaría disminución en el escurrimiento y recarga. Huicheng *et al.*, (2013) utilizó también el programa SWAT para determinar los escurrimientos en diferentes cuencas del medio oeste de Estados Unidos, principalmente Illinois, se analizaron los escenarios A2, A1b y B1, los principales resultados indican disminuciones en el escurrimiento entre el 40% y 50% con respecto al período histórico. Yue-Ping (2013) determinó los efectos del cambio climático mediante los escenarios A2, A1b y B1 para la cuenca del río Qiatang en China. Se concluye que habrá disminución sustancial del escurrimiento superficial anual, indicando eventualmente menor recursos disponibles para la región. Otros trabajos con respecto a los mismos escenarios y conclusiones son los elaborados por Yuzhou *et al.*, (2013) en California, Mukand *et al.*, (2014) en Cepal. Binnin *et al.*, (2014) analizó los escenarios A2 y B2 para determinar los escurrimientos y cambios en la humedad del suelo y evapotranspiración

Mimikou *et al.*, (2000) determinó la cantidad y la calidad del agua modelando DBO y O₂, con conclusiones como disminución en escurrimientos e incremento en contaminación del río. Perez *et al.*, (2012) determinó el escurrimiento y la recarga así como calidad del agua (NO₃), para los escenarios A2, A1b y B2, estos indican decrementos en el escurrimiento entre el 19% y el 50%.

Kapil *et al.*, (2013) realizó un análisis de disponibilidad media en la cuenca del Himalaya, este análisis incluye escurrimiento superficial y recarga subterránea así como un análisis de calidad del agua en NO₃, esto se realizó mediante el programa SWAT, además se incluyó una modelación subterránea mediante MODFLOW, así el transporte de contaminantes del agua subterránea (NO₃) mediante MT3DMS, una vez calibrados y analizados los modelos realizó la evaluación del efecto del cambio climático para los escenarios A2, B2 y A1b, las principales conclusiones son un incremento en la presión sobre el recurso hídrico.



Yanali *et al.*, (2013) realizó una modelación de escurrimientos y embalses que satisfacen demandas agrícolas con el objetivo de ver cuáles son las reglas de operación óptimas para la correcta distribución de agua ante los efectos de cambio climático de los escenarios A2 y B2.

3.3 Trabajos realizados en la cuenca del río Grande de Morelia

El departamento de Hidráulica de la Universidad Michoacana en los últimos años se ha preocupado por la gestión integral de los recursos hídricos elaborando proyectos con el fin de mejorar el conocimiento acerca del cambio climático y sus efectos en los recursos hídricos (superficial, subterráneos, distritos de riego, conjuntos). A continuación se describen algunas publicaciones y trabajos realizados.

Evaluación del cambio climático en la gestión de sistemas de recursos hídricos (en la cuenca del río Grande de Morelia). Este trabajo desarrollado por Hernández *et al.*, (2010) con el objetivo primordial de analizar de manera integral cuantitativa el efecto del cambio climático en los sistemas de recursos hídricos, y conocer el efecto en los cambios en las demandas urbanas y agrícolas, en la disponibilidad del agua superficial y subterránea, en las aportaciones de la cuenca, en las recargas al acuífero, en la evaporación (embalse) y evapotranspiración (cuenca y módulos de riego). Mediante un modelo de gestión en el cual se evaluaron las garantías y los fallos que se producen en las demandas agrícolas, urbanas e industriales, así el análisis de la evolución del acuífero y los embalses que permitieron observar el estado general de los recursos hídricos.

Modelación superficial de la calidad del agua en la cuenca del río Grande de Morelia (tesis en marcha). El objetivo principal es recopilar información de la CONAGUA y hacer las primeras modelaciones y calibración del sistema superficial a la salida de la cuenca del río Grande de Morelia.

Modelación hidrológica distribuida subterránea incluyendo aspectos medioambientales. Correa *et al.*, (2012). Obtuvo la evolución de nitrógeno en la cuenca del río grande de Morelia y en el acuífero Morelia Queréndaro; también realizó la modelación del acuífero Morelia-Queréndaro con el objetivo de calibrar los niveles piezómetros en los años 1980-2007.



Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río Grande de Morelia. García *et al.*, (2012). El objetivo principal fue la obtención de los escurrimientos analizando el modelo de cambio climático que represente mejor las características para la cuenca del río Grande de Morelia y obtener los escurrimientos superficiales.

3.4 Programas de gobierno que incluyen adaptación al cambio climático

A partir del 2007 el gobierno federal empezó a realizar programas enfocados al cambio climático con el objetivo de conocer las zonas vulnerables, maneras de adaptación, políticas de desarrollo, desarrollar información, crear instrumentos de apoyo que sirvan al apoyo de toma de decisiones, entre otras, las cuales se presentan a continuación (INE y SEMARNAT 2012).

Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2009-2012. Realizar acciones específicas que reduzcan la vulnerabilidad, mediante la evaluación de la vulnerabilidad del país y desde la valoración económica de las medidas prioritarias, y mejoras en la información, políticas y estrategias de desarrollo.

Programas Sectoriales 2007-2012. Definir metas y acciones de las Secretarías de Estado en materia de cambio climático

Programa Nacional de Estadística y Geografía (PNEG) 2010-2012. Producir información que permita el mejor conocimiento del territorio y de la realidad económica, social y del medio ambiente del país.

Programa Anual de Estadística y Geografía (PAEG) 2011. Generar el marco conceptual para la integración de información sobre cambio climático. Promover entre los integrantes del sistema nacional de información estadística y geográfica la formulación de propuestas de indicadores sobre cambio climático.

Programa Estatal de Acción ante el Cambio Climático (PEACC) 2008-2013. Crear instrumentos de apoyo para el diseño de políticas públicas sustentables y acciones relacionadas en materia de cambio climático.



Plan de Acción Climática Municipal (PACMUN) 2011-2013. Crear capacidades entre los tomadores de decisiones de los municipios sobre cambio climático y sus impactos, así como promover políticas públicas a nivel local.

Programa Especial de Cambio Climático (PECC) 2013-2018. Realizar acciones específicas en cuanto a la adaptación al cambio climático en 3 pilares fundamentales y en mitigación de cambio climático para la reducción de emisiones con 5 pilares con el objetivo principal de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero

Otros que están en su etapa final para su publicación es el registro nacional de emisiones, el cual se encuentra en fase final y la elaboración de su reglamento, el sistema de información de cambio climático, en proceso de diseño por INEGI y la agenda de riesgos climáticos que también se encuentra en elaboración y se encuentra coordinado por la secretaria de gobernación (SEGOB) y el centro nacional de prevención de desastres (CENAPRED).



4 Justificación

El sector hídrico es considerado uno de los más vulnerables al cambio climático, pues será propenso a alcanzar una situación de amenaza para la provisión en materia en muchos de los países menos desarrollados del mundo, afectando millones de personas más pobres (IPCC, 1997).

La calidad del agua del mundo está disminuyendo, fundamentalmente debido a las actividades humanas. El creciente aumento de la población, la rápida urbanización, el vertido de nuevos patógenos y nuevos productos químicos de las industrias y las especies invasoras son factores fundamentales que contribuyen al deterioro de la calidad del agua.

Por otro lado el cambio climático y, en particular, el aumento de las temperaturas y los cambios en las características hidrológicas, como sequías e inundaciones, afectarán la calidad del agua y acentuarán su contaminación.

La vulnerabilidad de la población mexicana en cuanto a los impactos en la salud ante el cambio climático se relaciona con condiciones para la aparición de brotes de enfermedades transmitidas por el agua (Leal *et al.*, 2008), por lo que es necesario trabajar en entender los efectos principales y así establecer estrategias para la adaptación y disminución de la vulnerabilidad.

Los estudios son escasos, principalmente debido a la falta de datos y de monitoreo sobre la calidad del agua a nivel nacional y mundial; así como la falta de conocimientos acerca de los posibles efectos de los contaminantes naturales y antropógenos en el medio ambiente y en la calidad del agua.

Hace falta mejorar los conocimientos y los modelos acerca del cambio climático en lo que respecta al ciclo hidrológico y calidad del agua en periodos de tiempo que faciliten la toma de decisiones. Por otro lado la modelación de la calidad del agua conjunta es de vital importancia y necesaria para la evaluación de las propiedades físicas, químicas y biológicas en los cuerpos de agua, (Mannina y Viviani, 2010) ya que los modelos calibrados con datos de campo, sirven como herramientas de planeación (Camacho y González, 2008; Lopolito *et al.*, 2011), permitiendo establecer relaciones causa efecto para estudiar el comportamiento de contaminantes en los ríos bajo diferentes escenarios (Robles y Camacho, 2005).



El principio de la sustentabilidad es conocer de manera integral todos los factores que se encuentran relacionados con los recursos hídricos, y poder establecer las mejores decisiones en cuanto a prevención, tratamiento y restauración. Por los motivos antes mencionados es necesario realizar estudios que permitan conocer el efecto cuantitativo y cualitativo del cambio climático sobre dichos recursos.

En México son escasos los estudios que evalúen los efectos del cambio climático en los recursos hídricos de manera integral cuantitativa y cualitativamente y que analicen la evolución de las diferentes demandas que se pueden presentar en cuencas desarrolladas. Los pocos estudios de los que se tiene conocimiento analizan de manera muy general la disponibilidad del agua y de manera puntual la calidad del agua lo que solamente da un panorama de las condiciones en el momento del monitoreo, por lo tanto es difícil conocer los efectos a escalas mayores, es decir a nivel de cuenca.

Por otro lado dentro de los impactos más importantes en México, la sequía es uno de los que tienen las mayores consecuencias sociales, económicas y ambientales. Desde la segunda mitad del 2010, un déficit de lluvias significativo en 19 entidades del país alcanzó nivel de sequía severa y provocó pérdidas superiores a los 15,000 millones de pesos (respecto a 234,713 millones de pesos del PIB solamente en el sector agropecuario), debido a las hectáreas perdidas en cultivos de maíz, frijol y en cabezas de ganado. Además, la falta de agua afectó a más de 2,350 comunidades, con aproximadamente 2 millones de habitantes en total. La sequía produjo en 2011 (figura 21 pérdidas en 1.8 millones de hectáreas cultivables (de 21 millones con las que cuenta México); y la muerte de 50,000 cabezas de ganado (de 30,553,891 en total) en 2011 (INE y SEMARNAT 2012).

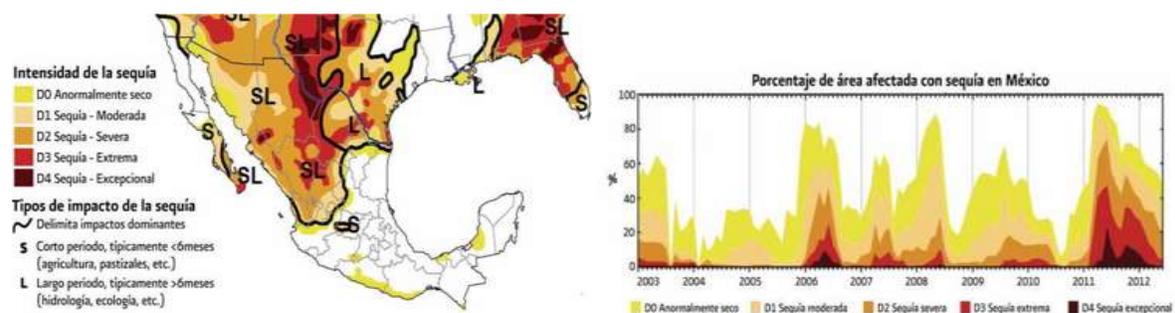


Figura 21. Superficie afectada en México por la sequía entre el 2003 y 2012 (INE y SEMARNAT 2012).



5 Hipótesis

5.1 Hipótesis general

1. Evaluar el efecto del cambio climático sobre la gestión de la cantidad disponible y calidad de un sistema de recursos hídricos desarrollado, esta afectación será negativa para el caso de aplicación que es la cuenca del río grande de Morelia,

5.2 Hipótesis específicas

El decremento de precipitación y el incremento de temperatura inducen:

1. Menor disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca
2. Mayor déficit en las demandas que son abastecidas por sistema superficial y subterráneo
3. Mayor evaporación ocasionando mayor concentración de los contaminantes. (Zhu *et al.*, 2006)
4. Aumento en la carga de nutrientes debido a los diferentes escenarios de gestión (Justic *et al.*, 1997)
5. Decremento en oxígeno disuelto (Breuer *et al.*, 2002, Lewis 2006).
6. Las reglas de operación (manejo del recurso) modifican claramente la cantidad y la calidad del agua



6 Objetivo

6.1 Objetivo general.

1. Conocer el efecto del cambio climático sobre la cantidad del agua y la calidad del agua a través de diferentes índices y evaluaciones a nivel regional o de cuenta.

6.2 Objetivos específicos

1. Determinar el cambio de precipitación y temperatura en la cuenca del río Grande de Morelia
2. Determinar el efecto del cambio climático en las aportaciones de la cuenca
3. Determinar el incremento en las diferentes demandas (agrícola y urbana) debido al cambio climático y al incremento de población
4. Realizar modelaciones hidráulicas con diferentes escurrimientos, para conocer el funcionamiento hidráulico del río grande de Morelia
5. Determinar el incremento de temperatura para el río Grande de Morelia con el efecto del cambio climático
6. Modelar el DBO_5 y O_2 en el río Grande de Morelia
7. Modelar DBO_5 y O_2 con el efecto del cambio climático río Grande de Morelia.
8. Determinar el incremento en la contaminación debido al cambio climático para el presente siglo.
9. Reflejar la evolución espacio temporal de la calidad del agua en los sistemas modelados, fruto de las diferentes alternativas de gestión, depuración, contaminación y uso del recurso.



7 Metodología

La gestión de sistemas de recursos hídricos se realiza a escala regional, es decir a nivel de subcuenca y debido a la complejidad de los procesos e interacciones entre los mismos la información disponible y los resultados de la presente tesis servirán para la determinación de las condiciones medias de ocurrencia en la misma, así como de la evaluación de diferentes escenarios para la correcta toma de decisiones dentro de la subcuenca en estudio.

Para el presente proyecto se enfocara en la gestión del recurso hídrico, a partir de metodologías ya desarrolladas y las más utilizadas en los ámbitos internacionales, esto debido a que el objetivo principal es conocer el efecto del cambio climático en la gestión de los recursos hídricos, el enfoque principal en la disponibilidad media de la cuenca, así como el abastecimiento a las demandas, los retornos al río, los déficits en las demandas, así como en las concentraciones de constituyentes en el río, que en este caso son DBO₅ y O₂.

La elección y el análisis de los escenarios de cambio climático, así como de los datos de las estaciones climáticas son importantes, debido a que en base a estos se obtuvo la disponibilidad del recurso hídrico en la zona de estudio, y a partir de estos datos se determinaron los volúmenes que se generan mensualmente a régimen natural en la cuenca; esto mediante el modelo de Témez mediante el programa EVALHID (EVALUación de los recursos HÍDRicos), que es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escorrentía en cuencas complejas (Paredes *et al.*, 2013).

Conjuntamente se analizaron las demandas al sistema de explotación, de las cuales son dos principalmente, la demanda urbana y la agrícola, de estas dos, la segunda se verá mayormente afectada por el incremento de temperatura y la primera se verá afectada por el crecimiento de la población.

Las demandas agrícolas se obtienen para periodos actuales y para los diferentes escenarios de cambio climático futuros utilizando para ellos la metodología propuesta por la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) para el cálculo de las necesidades hídricas de los cultivos.



Por otro lado se determinó la demanda urbana de acuerdo a la metodología utilizada por el OOAPAS (Ioya 2013), la cual considera el incremento de población, el índice de hacinamiento, la cobertura de la red, la población abastecida, así como las pérdidas en el sistema.

7.1 Recolección de datos

Los datos necesarios se obtendrán de las redes de monitoreo de cantidad y calidad del agua en la subcuenca del Río Grande de Morelia, así como datos pertenecientes a la cuenca y el acuífero, la población de la ciudad de Morelia, las demandas al sistema (agrícolas, urbanas e industriales). Por otro lado las características físicas del río que se obtendrán de los estudios realizados en la subcuenca.

7.1.1 Características físicas del río

Las características físicas del río son la base del estudio hidráulico así como del estudio de modelación de calidad del agua, estos datos se obtuvieron de los datos proporcionados por la Comisión Nacional del Agua y por la UAQ (2008) y CONAGUA (2009), así como los mapas vectoriales escala 1:50,000 versión 4 y con la red hidrográfica versión 2.0 en formato shape, escala 1:50000 determinada por la INEGI (2010). Los datos tomados o determinados a partir de los estudios mencionados son los siguientes;

- Longitud
- Ancho de la Sección
- Pendiente del fondo
- Coeficiente de Rugosidad.
- Pendiente transversal
- Cuenca de captación
- Drenes
- Retornos agrícolas

7.1.2. Modelo hidráulico

El programa HEC-RAS tiene como predecesor el programa HEC-2 el cual inició con dos programas entre los años 1962 y 1963, esta primera versión fue desarrollada por Sill S.



Eichert. La versión actual del HEC-2 fue desarrollada en el año de 1991 cuya última versión fue la 4.6.2. En el mismo período, durante 1990 comenzó el proyecto “NEXGEN” de HEC, en el cual se desarrolla HEC-RAS, HEC-HMS y HEC-FDA. La primera versión del HEC-RAS aparece en el año de 1995, las siguientes versiones aparecen en abril del año 1996 y en abril de 1997 (Hernández 2013, Sánchez *et al.*, 2009).

El sistema de ecuaciones es resuelto en HEC-RAS es mediante el sistema de Saint-Venant, el cual está constituido fundamentalmente por la ecuación de conservación de masa y de conservación de cantidad de movimiento (Sánchez *et al.*, 2009)

Ecuación de conservación de la masa

$$\frac{1}{B} \frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial y}{\partial t} = 0$$

Ecuación de conservación de cantidad de movimiento

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial \left(\frac{Q^2}{\Delta} \right)}{\partial x} + gA \left(\frac{\partial y}{\partial x} + S_f + S_e \right) = 0$$

Este sistema de ecuaciones es válido para canales prismáticos o no prismáticos, el uso de los términos S_f y S_e en la ecuación, que representan las tasa de pérdida de energía a medida que el flujo a lo largo del canal, ilustra la relación tan cercana entre las consideraciones de energía y momentum en la descripción del flujo.

La ecuación que resuelve el modelo entra cada dos secciones transversales es la siguiente:

$$WS_2 = WS_1 + \frac{1}{2g} (\alpha_1 U_1^2 - \alpha_2 U_2^2) + h_e$$

Donde WS_1 , WS_2 , es el nivel de la superficie libre del agua, α_1 , α_2 , es el coeficiente de corrección de energía, U_1 , U_2 , es la velocidad media, g es la aceleración debida a la gravedad y h_e es la pérdida de energía.

Los resultados esperados de la modelación hidráulica permiten conocer características del río como velocidad de flujo, tirante máximo, superficie libre del agua, número de Froude y a partir de estas se pueden conocer otros componentes del río como la dispersión longitudinal, la reaireación que son necesarias para la modelación de la calidad del agua.



7.1.3 Parámetros de calidad del agua

Para la determinación de la calidad en el río, se utilizará información de calidad del agua monitoreada por la Comisión Nacional del Agua CONAGUA, las cuales son:

- Oxígeno disuelto
- Temperatura
- DBO₅

Estos datos permitirán calibrar el modelo conjunto. Además se realizará una recopilación y análisis de los estudios previos de la cuenca del río grande y de bases de datos como: Mapas vectoriales escala 1:50,000 (INEGI), Red Hidrográfica 1:50,000 versión 2.0 (INEGI) para la caracterización, modelación y conocimiento del sistema de gestión.

7.2. Análisis estadístico de datos.

Para evitar errores es necesario realizar un tratamiento y validación de las estaciones del sistema. Una vez validados los datos se realizará un análisis de los mismos, esto con el fin de conocer su evolución espacio temporal de la calidad del agua en la cuenca.

Se realizará una correlación de los datos de las estaciones de monitoreo con el fin de observar la homogeneidad de los datos y se efectuará un análisis estadístico espacial y temporal que a partir análisis varianza a partir de las formulaciones de Wapole *et al.*, (1999) y Kuehl (2000) para cada una de las variables a modelar y encontrar si existe diferencia significativa entre las concentraciones medias de cada estación de monitoreo.

7.1 Deducción, consistencia y homogeneidad de los datos de precipitación

7.1.1 Deducción de datos faltantes

El llenado de datos se realizó por el Método del U.S. National Weather Service (Inverso de la distancia al cuadrado). Se basa en el uso de información pluviométrica de estaciones vecinas y su transporte a la estación base o estaciones cercanas donde se tiene carencia de datos de lluvia. Se recomienda utilizar 3 o 4 estaciones auxiliares para el llenado de datos de la estación principal. Este método propone calcular el dato de precipitación faltante (a nivel diario, mensual o anual) haciendo una ponderación de las lluvias simultáneas de las



estaciones auxiliares, respecto de la distancia entre las estaciones secundarias y la estación base.

Para calcular el dato de la estación base, se debe usar la fórmula del promedio ponderado, como se muestra a continuación:

$$P_x = \frac{\sum(P_i * w_i)}{\sum w_i}, \text{ donde } w_i = \frac{1}{D_i^2}$$

P_x es el dato de precipitación deducido para la estación “x” para el período faltante (mm) P_i es a precipitación registrada en el mismo período en la estación auxiliar “i” (mm), W_i es el factor de ponderación, en función de la distancia “ D_i ” que separa la estación auxiliar “i” de la estación base y “ D_i ” es la distancia que separa la estación “i” de la estación base (km).

En caso de los datos de precipitación se realizó un análisis consistencia de datos mediante diferentes pruebas que se presentan a continuación:

7.1.2 Consistencia de datos de precipitación

Prueba Estadística de la t de Student. Las herramientas de análisis Prueba t de dos muestras permiten comprobar la igualdad de las medias de población que subyacen a cada muestra. La prueba es poderosa para detectar la inconsistencia en la media, además de ser un test robusto. Se entiende que un test es robusto cuando es insensible a la forma de distribución de probabilidades de la serie, debido a lo anterior se recomienda al aplicar la prueba de la t de Student de n_1 y n de cada media que se compara, las medias sean similares. El estadístico de la prueba de t de Student se utilizó para corroborar el llenado de datos de las diferentes estaciones, el cual se realizó por el método de Inverso de la distancia al cuadrado está definida por la ecuación siguiente

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

Siendo s_1^2 y s_2^2 las varianzas de x en los dos periodos de registro, respectivamente. Entonces $n_1 s_1^2$ puede ser calculada con la ecuación:



$$n_1 s_1^2 = \sum_1^{n_1} x_i^2 - \frac{1}{n_1} \left[\sum_1^{n_1} x_i \right]^2$$

El valor absoluto de t_d se compara generalmente con el valor de t de la distribución t de Student de dos colas y con un valor de significancia del 5%. Estos análisis se realizaron a todas las estaciones llenadas con el objetivo de determinar que las series no tienen variaciones significativas una vez realizado el llenado de datos, es decir se comparó la serie de datos de precipitación original y la estación con la información determinada mediante el método del inverso de la distancia al cuadrado previamente descrito (IDW).

7.1.3 Homogeneidad de los datos de precipitación

De acuerdo a Campos Aranda D.F.(1998) 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.

Las pruebas estadísticas que se aplican a los datos de la serie cuya homogeneidad se investiga, son ejemplos de ellas las pruebas Helmet, de las secuencias, la t de student y Cramer. Las primeras dos pruebas son para conocer si es homogénea una serie y las dos siguientes son cuando se analizar diferentes periodos de las series. Por tales motivos se analizaran las pruebas de Helmet y de las secuencias.

Prueba estadística de Helmet. Con fines prácticos se puede decir que una series de lluvias anuales y en general cualquier serie climatológica, presenta como alternativas a la homogeneidad, los cambios bruscos (saltos) de su valor medio la tendencia o alguna forma de oscilación.

La prueba de Helmet consiste en analizar el signo de las desviaciones de cada evento de la serie con respecto a su valor medio. Si una desviación es seguida por otra de signo – contrario, un cambio (c) será registrado cada año, excepto el primera, definirán una secuencia o un cambio. Si la serie es homogénea, la diferencia entre el número de secuencias (s) y el número



de cambios (c) en el registro deberá ser cero dentro de los límites de un error probable, el cual de hecho depende de la longitud del registro (n) es decir:

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

Prueba estadística de secuencias. Esta prueba es bastante común y muy sensitiva; se realiza contando el número de secuencias (u) arriba o abajo la media o mediana de la serie. Usando el valor se marca A si es mayor y con B si es menor, cada dato o evento de la serie; la secuencia o sucesión de valores de A o B son contabilizadas y para concluir que la serie es homogénea el número de secuencias u debe estar comprendido entre un rango recomendado por Campos (1998).

Si se obtiene un alto número de secuencias esto puede ser una indicación de oscilación de la serie, mientras que un número reducido de rachas será una indicación de una tendencia o cambio en la media.

7.2 Análisis estadísticos para la calibración y validación de las modelaciones matemáticas

Se analizaron diferentes parámetros de calibración, los cuales son el coeficiente de correlación (R^2), Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), Error cuadrado medio (RMSE), desviación estándar (RSR) y porcentaje de parcialidad (PBIAS). En base a estos rangos se estableció una matriz de colores para observar más fácilmente el rango en el cual se encuentran los estadísticos utilizados.

El valor de la correlación indica la consistencia de los valores reales frente a los valores predichos, si estos siguen una línea de mejor ajuste. A valores de R^2 son inferiores o muy cercanos a cero, el modelo predicción se considera inaceptable o pobre. Si los valores son cercanos a uno, entonces la predicción del modelo es perfecto (Santhi *et al.*, 2001). Sin embargo, R^2 sólo describe la cantidad de la dispersión observada se explica por la predicción, por lo tanto R^2 se utilizaran otros parámetros.

El índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E) indica la consistencia con la que se miden valores reales y que estos coinciden valores predichos, o el ajuste lineal de los valores reales frente a la línea de mejor ajuste. E oscila entre menos infinito (pobre modelo) a 1·0 (perfecto modelo). Por ejemplo, si el cuadrado de las diferencias entre las predicciones del modelo y



las observaciones es tan grande como la variabilidad en los datos observados, entonces, $E = 0.0$; si se excede, entonces $E < 0.0$ (es decir, la media observada es mejor que el predictor). Por lo tanto, un valor de cero para E indica que la media observada, es tan bueno como un predictor como el modelo, mientras que los valores negativos indican que la media observada es un mejor predictor que el modelo. E ha sido ampliamente utilizado para evaluar el rendimiento de los modelos hidrológicos (Wilcox *et al.*, 1990). Una limitación de E es el hecho de que las diferencias se calculan entre los valores observados y predichos como valores al cuadrado. Como resultado valores más grandes en un tiempo series están fuertemente sobrestimado mientras que los valores más bajos se descuidan (Legados y McCabe, 1999).

La ecuación del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe es la siguiente:

$$E = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2}$$

Donde:

$O \rightarrow$ son los valores observados reales

$P \rightarrow$ son los valores estimados con el modelo

RMSE resume el error promedio entre lo observado y lo simulado usando las mismas unidades que las variables aleatorias. Cuanto menor RMSE mejor será el rendimiento de los modelos, y un valor de cero representa la simulación perfecta de los datos observados (Chu y Shirmohammadi, 2004). RMSE resume la diferencia en las unidades de media observada y simulada. El uso de medidas de error absolutos utilizando RMSE proporciona una evaluación del error en las unidades de la variable. El RMSE indica el sesgo (desviación de la pendiente real desde la línea 1:1) en comparación con la variación que puede ocurrir (Willmott, 1984). RMSE es sesgada cuando grandes valores atípicos están presentes. La ecuación para estimarla, es la siguiente:

$$RSME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_{pi} - Q_{oi})^2}{n}}$$

Donde RMSE es el error cuadrado medio, Q_{pi} el valor simulado para el evento i , Q_{oi} el valor observado para el evento i , y n el tamaño de la muestra.

El estadístico RSR es la relación de la RMSE y desviación estándar de los datos, RSR varía desde el valor óptimo de 0, lo que indica cero RMSE o variación residual y por lo tanto



perfecto modelo de simulación, a un valor positivo grande. Cuanto menor RSR, menor es el RMSE, y mejor el modelo rendimiento de simulación (Moriassi *et al.*, 2007).

$$RSR = \frac{RSME}{STDEV_{obs}}$$

Donde RSR es igual a RMSE menos las observaciones relación de la desviación estándar, RMSE es el error cuadrado medio y $STDEV_{obs}$ Una desviación estándar los datos observados. PBIAS mide la tendencia media de la modelación entre los valores más grandes y pequeños que sus valores medidos. El valor óptimo de PBIAS es 0.0, con valores de baja magnitud indicando modelo de simulación es más preciso. Los valores positivos indican que la modelación son valores de sesgo subestimados, mientras que los negativos indican que el sesgo del modelo ha sido sobreestimado (Gupta *et al.* 1999). PBIAS es la desviación de los datos que han sido evaluados, y este se calcula de acuerdo a la siguiente expresión:

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

Donde PBIAS es el porcentaje de parcialidad, el valor Y_i^{obs} los datos reales observados i , y Y_i^{sim} es el valor i producto de la simulación. De acuerdo a Parajuli *et al.*, (2008) se presenta una calificación del desempeño de los modelos para su calibración y validación, en la tabla se presentan dicha clasificación.

Tabla 6. Clasificación de la eficiencia de los modelos para diferentes parámetros estadísticos. Parajurli *et al.*, 2007

Calibration	R ²	E	RSR	PBIAS
Excellent	<0.9	<0.9	0-0.25	<10
Very good	0.75-0.89	0.75-0.89	0.26-0.5	11--15
Good	0.5-0.74	0.5-0.74	0.51-0.6	16--25
Fair	0.25-0.49	0.25-0.49	0.61-0.7	26--30
Poor	0.00-0.24	0.00-0.24	0.71-0.89	31--35
Unsatisfactory	<0	<0	>0.9	>=36

7.3 Elaboración del Modelo de cantidad

En base a todas las necesidades que implican una cuenca desarrollada (aportaciones, demandas, retornos, presas, ríos, acuíferos, etc...) surgen los sistemas de apoyo a la decisión



como una herramienta de diseño para ayudar a contestar preguntas específicas facilitando el empleo de modelos de simulación y optimización para la gestión de los recursos hídricos.

AQUATOOL (modelo para la gestión de cuencas complejas con uso conjunto) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia que esencialmente nos permite crear los esquemas de simulación para la cuenca en estudio.

El programa SIMGES perteneciente a AQUATOOL es un modelo general para la simulación de los sistemas de recursos hidráulicos complejos, en los que se dispone de elementos de regulación o almacenamientos superficiales y subterráneos, de captación, de transporte, de utilización y/o consumo, y de dispositivos de recarga artificial. El uso de SIMGES permite modelar con extrema flexibilidad el sistema hidrográfico, cuya sucesiva simulación proporciona los valores de suministro para cada demanda (Hernández *et al.*, 2007).

Para la modelación es necesario contar con información de los escurrimientos que es previamente obtenida de acuerdo a un modelo lluvia escurrimiento el cual se calibra de acuerdo a los estadísticos del apartado anterior, además de agregar las diferentes demandas al sistema de gestión producto de las reglas de operación para el sistema de gestión de los recursos hídricos desarrollado.

7.4 Elaboración del modelo de calidad

Para la modelación se debe modificar el archivo de gestión de cantidad de los recursos hídricos para agregar las nuevas consideraciones a modelar y se deben conocer las características físicas y de calidad de ríos mencionadas en el apartado 7.1 y 7.2 respectivamente, además de características como el volumen de vertido, variación temporal y concentraciones de vertidos, elementos de contaminación difusa, calidad del acuífero, retornos y tomas, además es necesario estimar las series de calidad de las aportaciones.

Una vez creado el modelo se realizará la modelación de cada una de las variables y se calibrarán las constantes mencionadas anteriormente, con el fin de que los datos reales sean iguales a los que se tienen en las estaciones de monitoreo; se utilizarán las siguientes constantes las cuales servirán para la calibración del modelo, estas se obtendrán de la literatura como (Paredes *et al.*, 2004 y 2007):



- Constante de reaireación
- Constante de degradación de materia orgánica
- Velocidad de sedimentación de la materia orgánica

Una vez calibrado el sistema se podrá hacer un análisis de la contaminación actual del sistema, conocer las zonas más contaminadas y saber el motivo principal de la contaminación.

7.5 Elaboración del modelo subterráneo

El modelo subterráneo se elaboró en base a las características principales del acuífero, este es de suma importancia, ya que abastece gran parte de las demandas actuales y es la única forma de poder abastecer la creciente demanda de agua en la subcuenca. La metodología utilizada para la zona de estudio fue primeramente la definición de geometría, condiciones de contorno y elaboración de una malla de diferencias finitas o elementos finitos adaptada a la forma del acuífero. Posteriormente se definieron las características hidrodinámicas del acuífero (transmisividades, coeficiente de almacenamiento), La definición de acciones elementales (bombeos y recargas) se realizó de forma distribuida en todo el acuífero. Para controlar la evolución del nivel estático y el volumen de almacenamiento en el acuífero se realizó la definición de los parámetros de control. Finalmente se define el periodo de la simulación, calibración y la validación. Una vez calibrado el acuífero se incorpora como parte del sistema de gestión de recursos hídricos.

7.6 Elaboración del modelo conjunto

En esta fase se modela el sistema completo con los valores de calidad del agua para un periodo representativo y se comparan con los datos históricos, y de esta manera poder validar los parámetros calibrados y ver posibles errores que se hayan tenido en la calibración. De ser necesario se hacen ajustes al modelo y se repite la modelación conjunta, en caso de que la modelación demuestre las condiciones de cantidad y calidad de manera adecuada y realista, se dice que se ha validado el sistema de gestión y es representativo en cuanto a cantidad y calidad.



7.7 Modelación incluyendo escenarios de cambio climático

Una vez construido el sistema de gestión se simularán los diferentes escenarios de cambio climático. Los escenarios de cambio climático del IPCC (2007) proporcionan cambios en variables como temperatura y precipitación, esto ocasionara disminución en la cantidad y calidad del agua. En cantidad afectaran a los escurrimientos superficiales y recargas a acuífero, en cuanto a demandas, el incremento en estas conllevara a una mayor demanda al sistema de gestión, por lo tanto una menor disponibilidad en los recursos hídricos superficiales (presas). En cuanto a los procesos llevados en el rio se incrementara la carga de contaminantes y la velocidad de reacciones ocasionado un deterioro de la calidad del agua y por lo tanto el deterioro del ecosistema acuático presente en cuerpos superficiales.

7.7.1 Determinación de los modelos y escenarios

Los escenarios obtenidos a través de los Modelos de Circulación Acoplados Océano Atmosfera (MCGAO-A) en la actualidad son los más confiables, debido a que tienen un fundamento teórico, y tratan de predecir el clima en base no solo a los comportamientos históricos de las variables, sino al comportamiento futuro de las mismas, expresando resultados de mayor calidad que los otros dos tipos de escenarios.

De acuerdo a Magaña *et al.*, (2007) la generación de los escenarios de cambio climático es una de las etapas más importantes dentro de los estudios de riesgo ante cambio climático, pues de ellos depende la dirección de los resultados de la evaluación. La selección de los escenarios debe ser una decisión balanceada y cuidadosamente planeada. Los escenarios de cambio climático deben ser seleccionados para brindar información que sea: fácil de obtener o derivar; suficientemente detallada para ser utilizada en los estudios de impacto; representativa del rango de incertidumbres de las proyecciones y; físicamente consistente en el sentido espacial. En la práctica, sin embargo, es difícil poder reunir todas esas características en un escenario, pues la representación de ellas depende, en buena medida, del método que se emplee en la creación del escenario.

A partir de estos escenarios es necesaria una reducción de escala de 250 km x 250 km que son los resultados de los MCG, a una escala de 50 km x 50 km. Esto para contar con una mejor resolución espacial y mejor calidad en los resultados ya que el proceso de



regionalización no es solamente interpolación, sino que se ve afectada por todas condiciones, como las topográficas, climatológicas, hidrológicas, uso y tipo de suelo de la zona. Esta reducción de escala nos proporciona datos de mayor calidad para el área de estudio con lo cual se pueden hacer análisis de disponibilidad de los recursos hídricos. (Hernández *et al.*, 2011).

De acuerdo a la información de Magaña y Caetano (2007) México cuenta con escenarios regionalizados gracias a investigadores del Centro de Ciencias de la Atmósfera, de la Universidad Autónoma de México (UNAM). En conjunto con la Secretaria de Medio Ambiente y Recursos Naturales (SEMARNAT) y el Instituto Nacional de Ecología, el cual presenta de más de 20 MCG usados por el IPCC, con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos de escenarios de cambio climático regionalizados para México, considerando escenarios de emisiones de GEI (A2, A1B, B1, COMMITED) con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC 2007.

Los más recientes escenarios regionalizados para México fueron presentados por Cavazos *et al.*, (2013) en el proyecto “actualización de escenarios de cambio climático para México como parte de los productos de la quinta comunicación nacional”, en el cual se publicaron los escenarios RCP 4.5, RCP 6.0 y RCP 8.5 para un ensamble multimodelo formado de 15 escenarios de diferentes instituciones del mundo y para un futuro cercano (2015-2039) y para finales de siglo (2075-2099).

7.7.2 Determinación de la precipitación y temperatura.

Se determinaron las condiciones climáticas de la zona de estudio (temperatura y precipitación) con información de la base de datos para el Estado de Michoacán CLICOM y con información de la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). Posteriormente se aplicará el cambio climático en las dos variables y se tendrá el clima para las condiciones futuras en periodos de 30 años de los escenarios SRES; 2010-2039, 2040- 2069, y 2070-2099 (Magaña y Caetano 2007; Leal *et al.*, 2008; Hernández *et al.*, 2011). También se utilizaran los escenarios RCP (4.6 6.0 y 8.5) en sus diferentes climatologías (Cavazos *et al.*, 2013, IPCC 2013).



En base a estos parámetros se puede modelar oxígeno disuelto, ciclo del nitrógeno y contaminantes arbitrarios. La modelación de cada uno de los datos dependerá de la cantidad y calidad de las series obtenidas. También se utilizarán datos de calidad del agua de una investigación que se está llevando actualmente por la Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo, Maestría en Ciencias en Ingeniería Ambiental, en donde se espera contar con datos que proporcionen más detalles de las condiciones de calidad del agua.

En el caso de la temperatura, ya que es factor en la velocidad de las reacciones, se realizará una correlación con los datos de temperatura media mensual del río y temperatura media mensual atmosférica y se realizará una regresión lineal para obtener la ecuación que pueda aplicarse a las condiciones requeridas.

7.7.3 Modelación incluyendo cambio climático.

Una vez que se determinaron las nuevas características de calidad y cantidad en el sistema de gestión se procederá a hacer modelaciones en periodos de 30 años (2010-2039, 2040-2069 y 2070-2099) para los escenarios SRES y periodos de 25 años para los escenarios RCP, y posteriormente se realizará un análisis de resultados de factores para conocer si es significativo el cambio climático en la calidad del agua y de serlo así en que porcentaje se tienen incremento, además de utilizar índices y criterios de calidad para conocer el nivel de contaminación futura.

De acuerdo a los resultados de las diferentes modelaciones se determinaron cuáles fueron los escenarios que presentan la información con mayor grado de precisión. Se analizaron las series temporales y espaciales de precipitación y temperatura. Se analizaron las diferencias en los volúmenes de escurrimiento a nivel mensual y promedio anual de los escurrimientos superficiales y la recarga al acuífero.

En las modelaciones de gestión conjunta de los sistemas de recursos hídricos, se analizó el volumen medio anual de la presa Cointzio para ver las similitudes entre los escenarios RCP con resolución de 1 km y los de resolución de 50 km, además de hacer la comparación con los escenarios SRES, y de este análisis se determinó la importancia de la temporalidad y la espacialidad de las series de precipitación y temperatura.



8 Resultados

8.1 Zona de estudio

La cuenca del río Grande de Morelia se ubica en la Región Hidrológica No. 12, zona B formando parte como subcuenca del Lago de Cuitzeo y micro cuenca del Lago de Cuitzeo y Laguna de Yuriria como se muestra en la figura 22.

La zona de estudio se localiza en la porción centro-norte 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 un área de 1487 km² aproximadamente (Río Grande y Afluentes). Las elevaciones topográficas que se observan en la zona varían de 1840 msnm, en la porción centro-norte (el lago de Cuitzeo y el poblado Álvaro Obregón) hasta de 2500 msnm en los cerros llamados los Cuantes que se ubican en la parte occidental de la región. La altitud media del valle es aproximadamente de 2000 msnm (figura 23).

Geográficamente colinda con el estado de Guanajuato al norte, con el poblado de Quiroga Michoacán al occidente, con el municipio de Zinapécuaro al oriente y al sur con la sierra alta y mil cumbres.

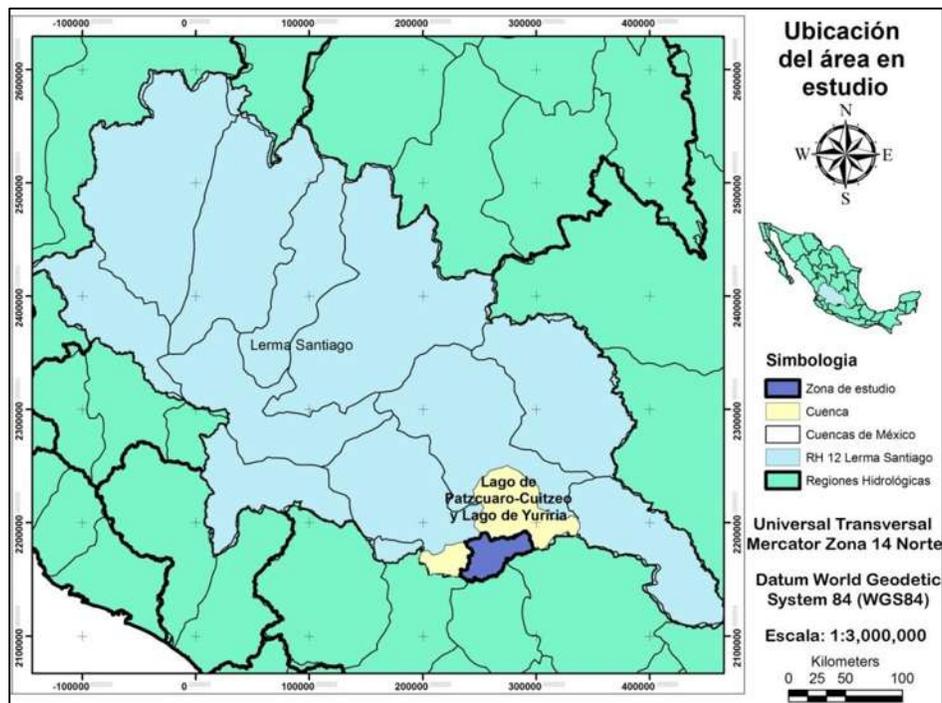


Figura 22. Ubicación del área de estudio

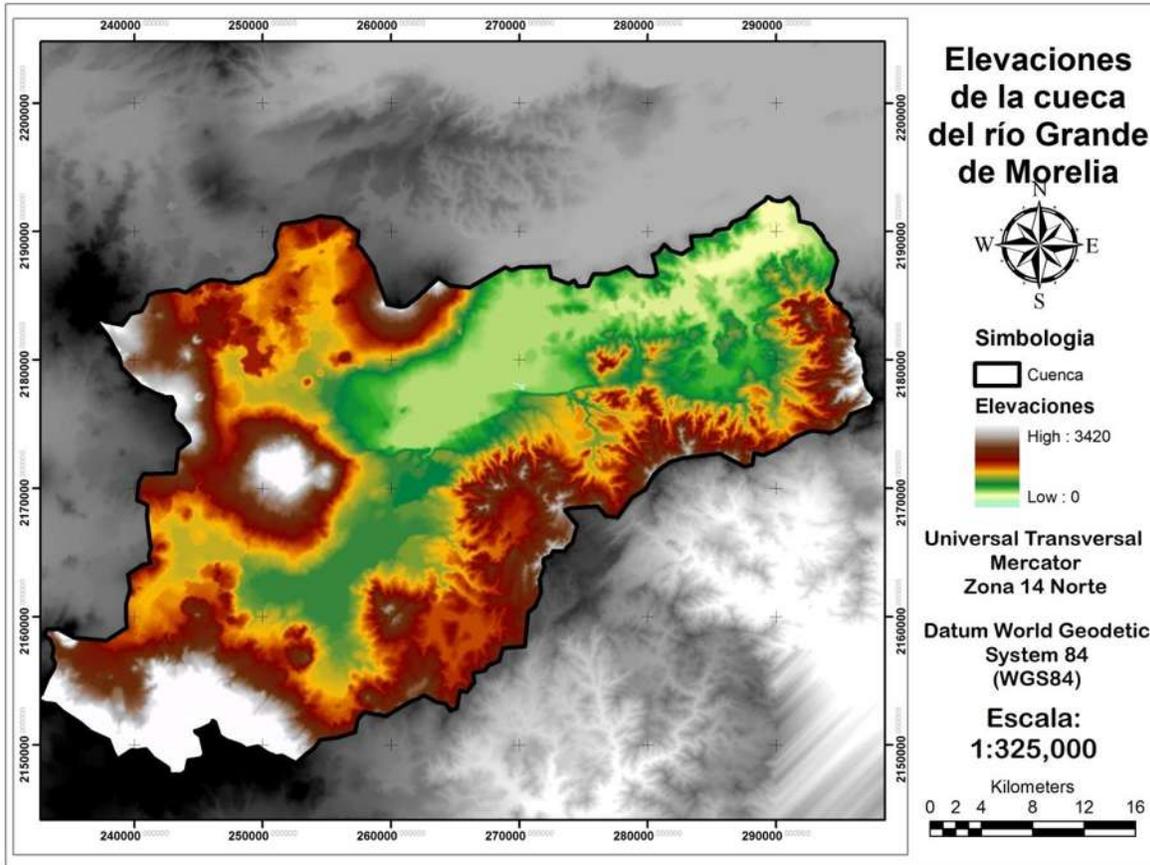


Figura 23. Elevaciones de la cuenca del río Grande de Morelia.

La cuenca del río Grande se dividió para su estudio en 7 subcuencas (figura 25) con el objetivo de determinar las zonas de captación de las estaciones hidrométricas y de calidad del agua de la Comisión Nacional del Agua y de las estaciones de calidad del agua (Díaz *et al.*, 2013).

La presa Cointzio capta los escurrimientos de la cuenca a la que se conoce como Cointzio, la cual tiene un área de 663.44 km² aproximadamente. Es escurrimiento en esta subcuencas es debido a la precipitación y solamente algunas poblaciones que no afectan significativamente el volumen ni la calidad del agua.

Aguas abajo después de la presa Cointzio se ubica la subcuenca denominada dren la alberca (50 km²), debido a que es el escurrimiento más importante presente en la subcuenca, recibe los escurrimientos de los drenes Cointzio (margen izquierda), el Peral (margen derecha) procedentes del escurrimiento natural y del Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (DR-020-M-Q), así como el retorno procedente de la CEPAMISA que es abastecido por el manantial la Mintzita.



Después de la subcuenca del dren la alberca se ubica la subcuenca del río chiquito la cual se encuentra al sureste de la ciudad de Morelia y tiene un área de 86.95 km²; es una cuenca hortoniana y recibe escurrimientos naturales así como escurrimientos procedentes del sureste de la ciudad de Morelia.

La subcuenca Atapaneo tiene un área de 400.74 km² recibe escurrimientos de la mayoría de la ciudad de Morelia con excepción del sureste, el dren Itzicuaro es el más importante de la cuenca, está ubicado a la margen derecha del río y recibe escurrimientos del dren el Parial; por la margen derecha del río grande se encuentran los drenes el Calabozo, el Carrizal, Cienega Grande (hay retorno del Módulo 1 del DR-020-M-Q), aguas abajo se encuentra en dren arroyo de tierras que se abastece de la parte sur de la ciudad de Morelia.

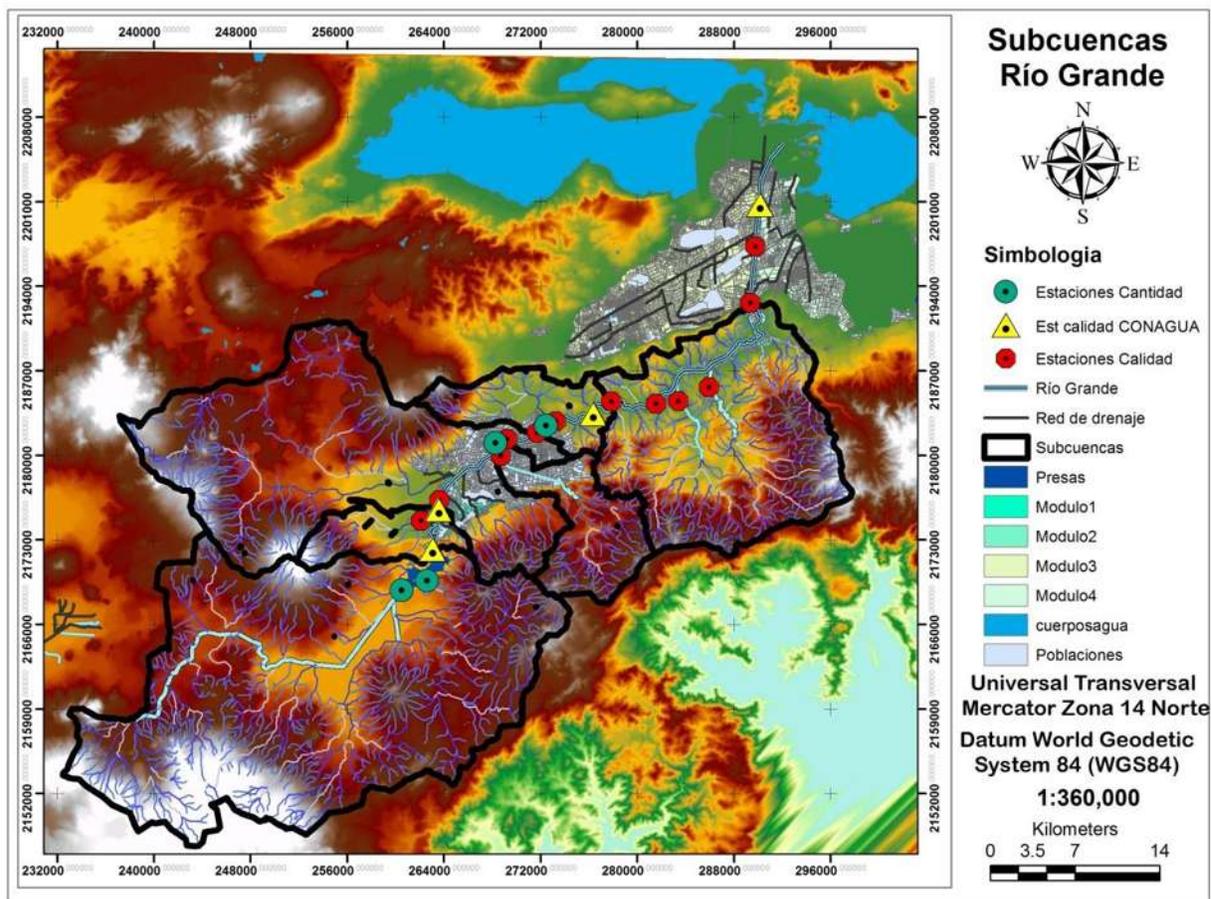


Figura 24. Subcuencas del río Grande de Morelia.

A las afueras de la ciudad de Morelia se ubica la subcuenca denominada Módulo 2, debido a que el límite norte de la subcuenca colinda con el inicio del Módulo 2 del DR-020-M-Q tiene



un área de 67.4 km² y presenta varios escurrimientos, el más importante nace en el cerro de Quinceo extendiéndose por la parte norte de la ciudad hasta llegar al río grande 2 km del libramiento norte.

La subcuenca arroyo la lobera es la última de las cuencas que se analizarán, esta subcuenca cuenta con un área de 295.96 km², y los dos arroyos más importantes son el arroyo el arroyo el Rile y la Lobera; el Rile descarga al río grande antes que la Lobera (más importante de la subcuenca. Esta cuenca también recibe retornos del Módulo 2 del DR-020-M-Q.

8.2 Obtención de las Aportaciones a través de EVALHID

Con el objetivo de representar espacialmente la cantidad del agua, se calcularon los escurrimientos mediante el modelo de Temez y programa EVALHID (EVALUación de los recursos HÍDRicos), es un módulo informático para el desarrollo de Modelos Precipitación-Escurrimiento en cuencas complejas.

Para la representación de la cuenca del río grande de Morelia, la cuenca se dividió en subcuencas, esto con el objetivo de la calibración del modelo superficial en 4 estaciones hidrométricas, las cuales están distribuidas a lo largo de la cuenca y estas son:

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 una 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.

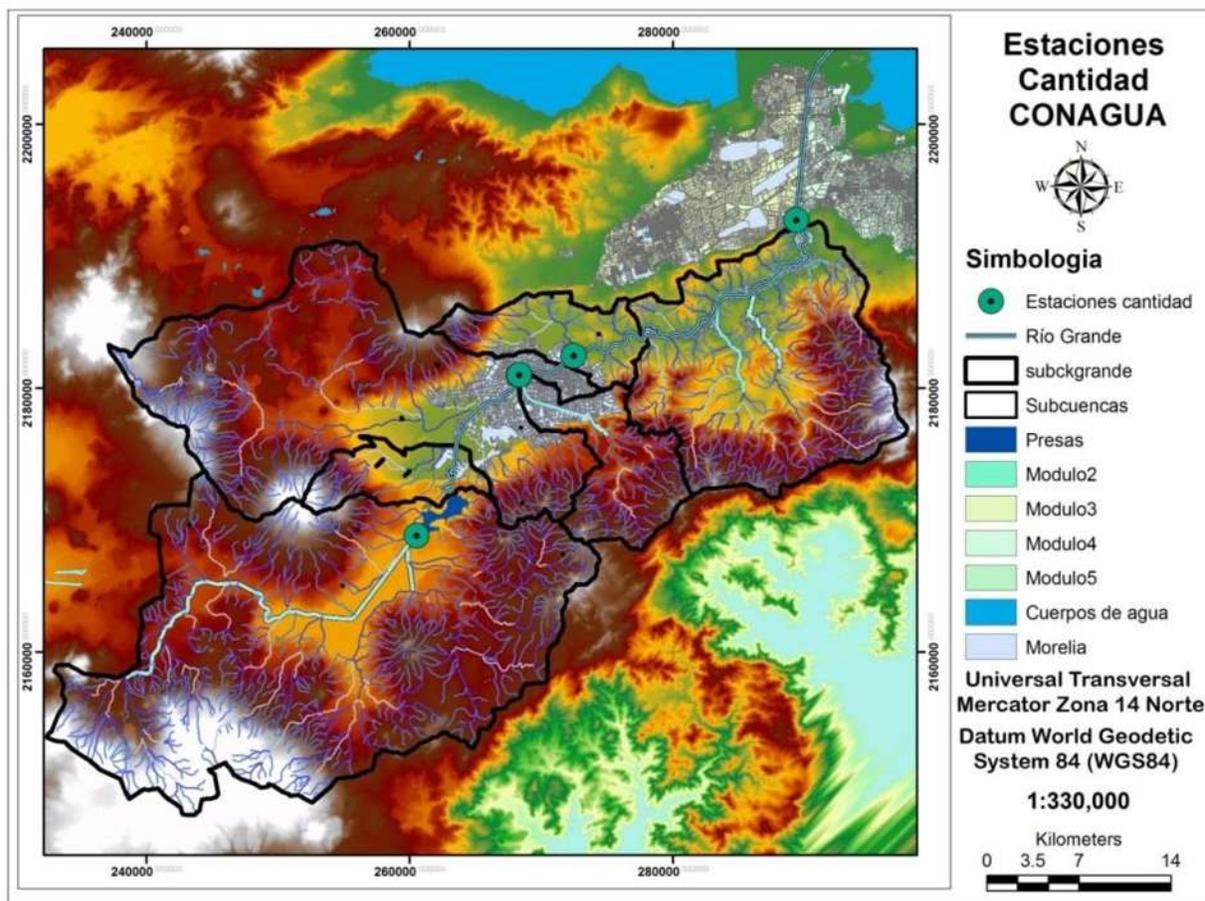


Figura 25. Estaciones hidrométricas de la subcuenca Cointzio.

8.2.1 Características meteorológicas de la cuenca

Las variables climáticas para reflejar el cambio climático en la cuenca del río grande de Morelia son la temperatura y la precipitación, estas fueron obtenidas a partir de la base de



datos CLICOM (2011) corresponden al periodo de 1975 a 2012, la información contenida en esta base de datos es de orden mensual y corresponde a cada una de las variables climáticas para el periodo antes mencionado. Para los años restantes se obtuvo a partir de datos proporcionados por la CONAGUA (2012). Las estaciones climatológicas consideradas son 21 (figura 26), obtenidas de las bases datos CLICOM y CONAGUA (para los últimos años).

Debido a la distribución de las estaciones climáticas y a la concepción de la modelación en EVALHID, (modelación semidistribuida) es necesario realizar una subdivisión de las subcuencas en microcuencas, con el objetivo de realizar una distribución espacial de las estaciones climáticas con las microcuencas correspondientes. En la figura 27 se observan las microcuencas en las que se dividió la cuenca del río grande de Morelia.

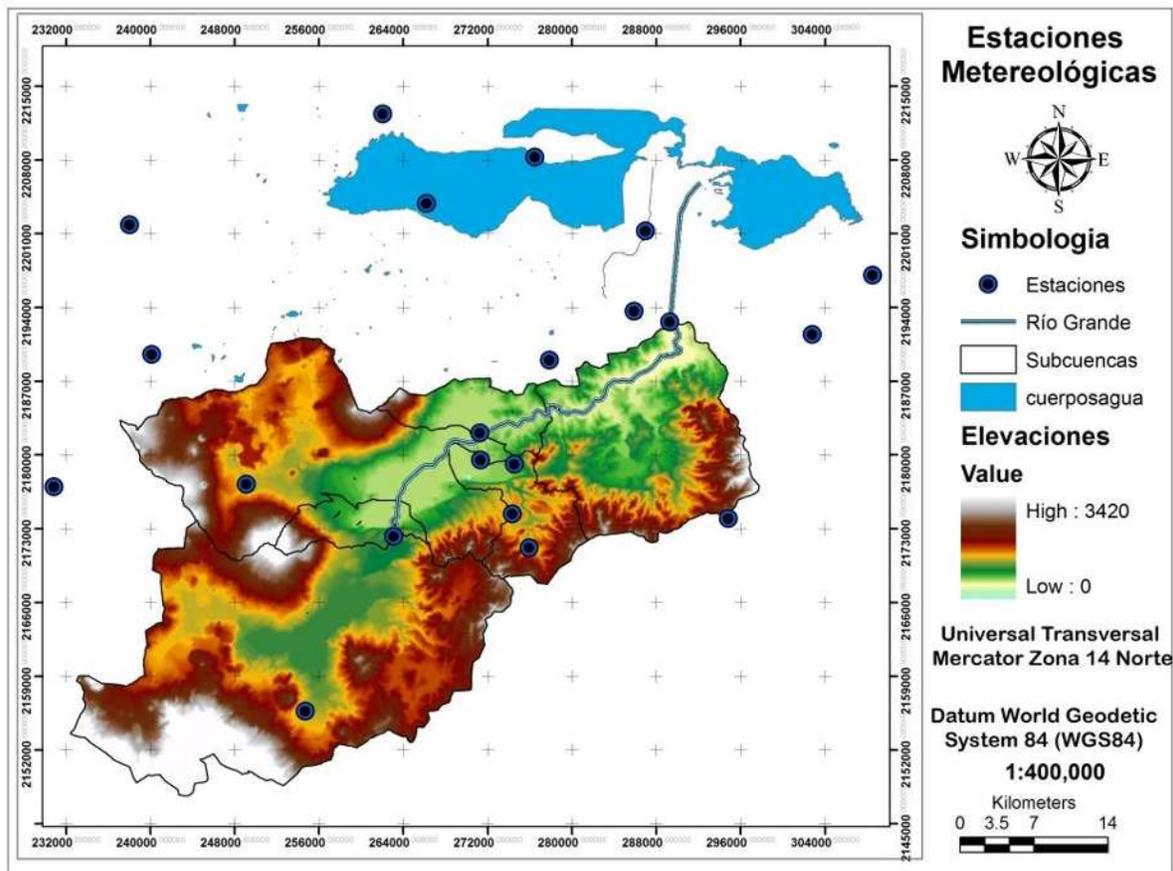


Figura 26 Estaciones meteorológicas cercanas a la cuenca en estudio

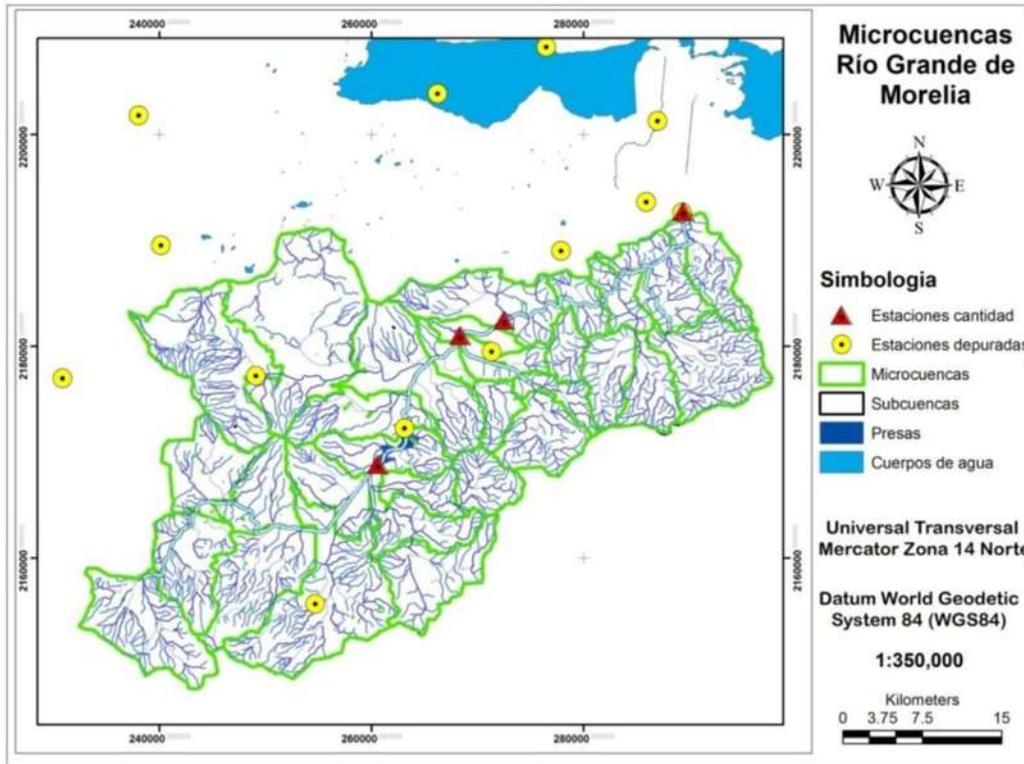


Figura 27. Microcuencas de la cuenca del río grande de Morelia.

8.2.2 Calibración

La modelación se llevó a cabo mediante el algoritmo SCEUA el cual permite la calibración de los parámetros del modelo (H_{max} , I_{max} , C , α) en base a los escurrimientos observados en las estaciones hidrométricas. La función objetivo es minimizar el error cuadrático de los escurrimientos observados y simulados en base a un promedio de cuatro funciones objetivo, una por cada parámetro.

Los datos observados y los datos para la calibración tienen 10 años en común, de 1975 a 1985, los registros históricos de lluvias y ETP (Thornwaite), se encuentran disponibles hasta la actualidad, por lo tanto se calibraron los escurrimientos de 1975 a 1985 y se generaron escurrimientos de 1986 a 2012. Para todos los casos se realizó un análisis estadístico t para muestras emparejadas con un 95% de confianza y todos los resultados cumplieron dicha prueba, además presentaban un coeficiente de correlación de Pearson mayor a 0.75. En las figuras 28, 31, 32 y 33 se observan los escurrimientos totales mensuales en hectómetros cúbicos observados y simulados para las cuatro estaciones hidrométricas a régimen natural y en las figuras 29 y 30 se presentan la calibración interanual y anual para la estación



hidrométrica Santiago Undameo donde se puede visualizar el volumen simulado y observado.

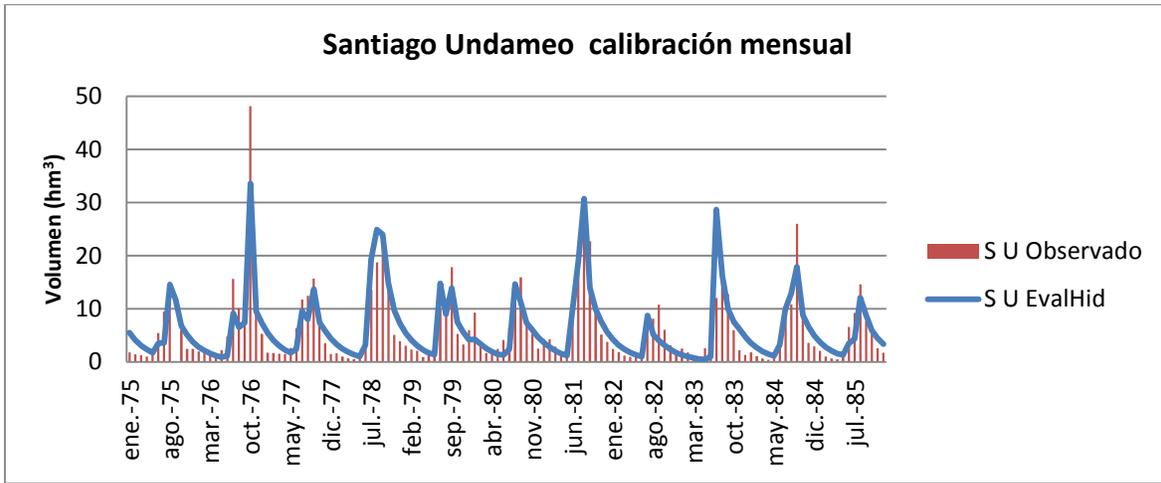


Figura 28. Calibración Mensual de la estación hidrométrica Santiago Undameo

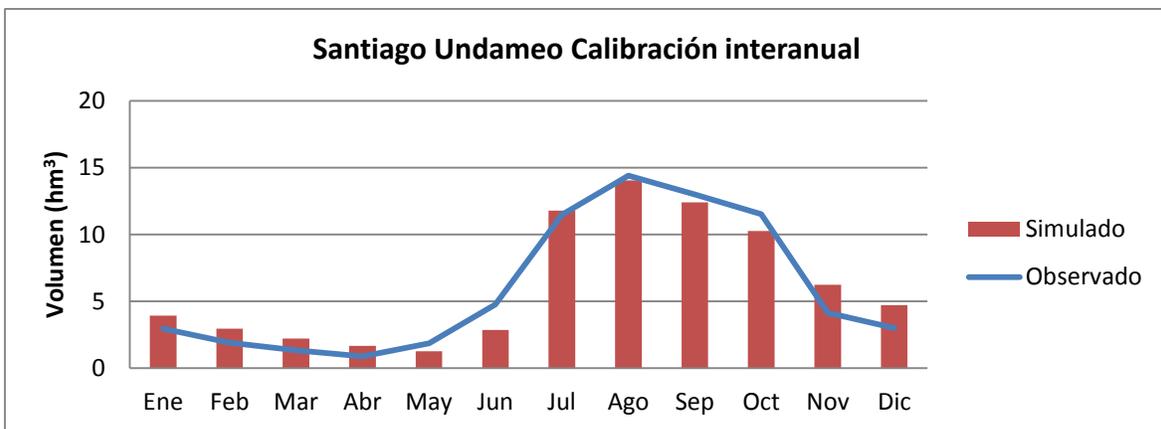


Figura 29. Calibración Interanual de la estación hidrométrica Santiago Undameo

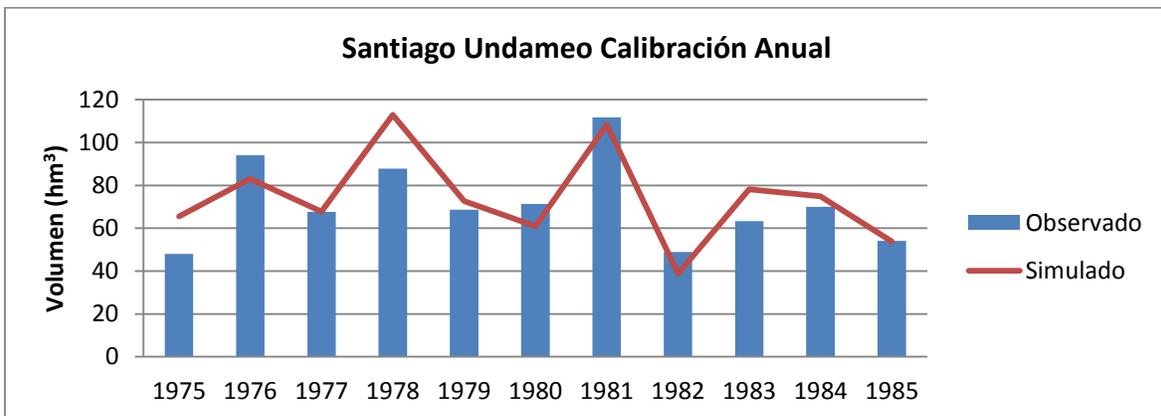


Figura 30. Calibración Anual de la estación hidrométrica Santiago Undameo

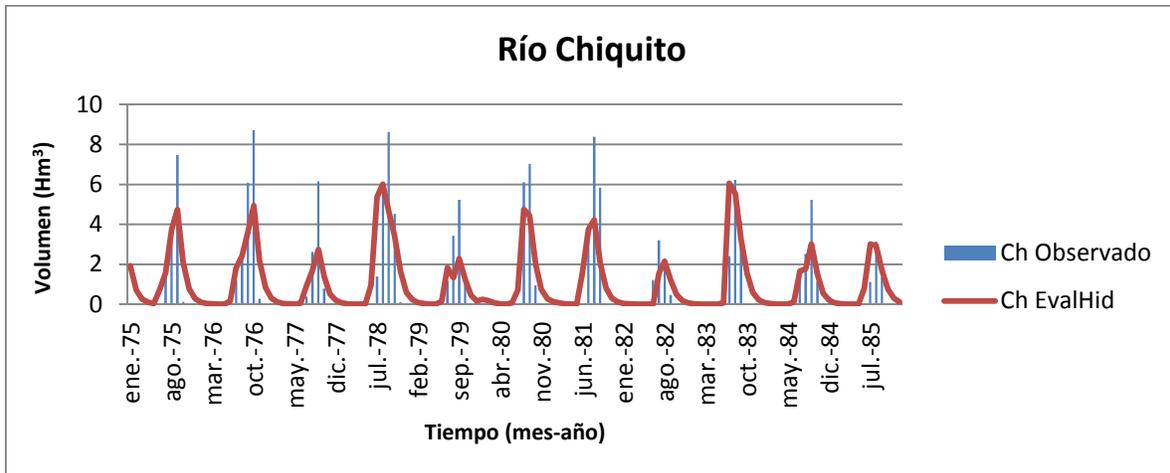


Figura 31. Calibración Mensual de la estación hidrométrica Río Chiquito

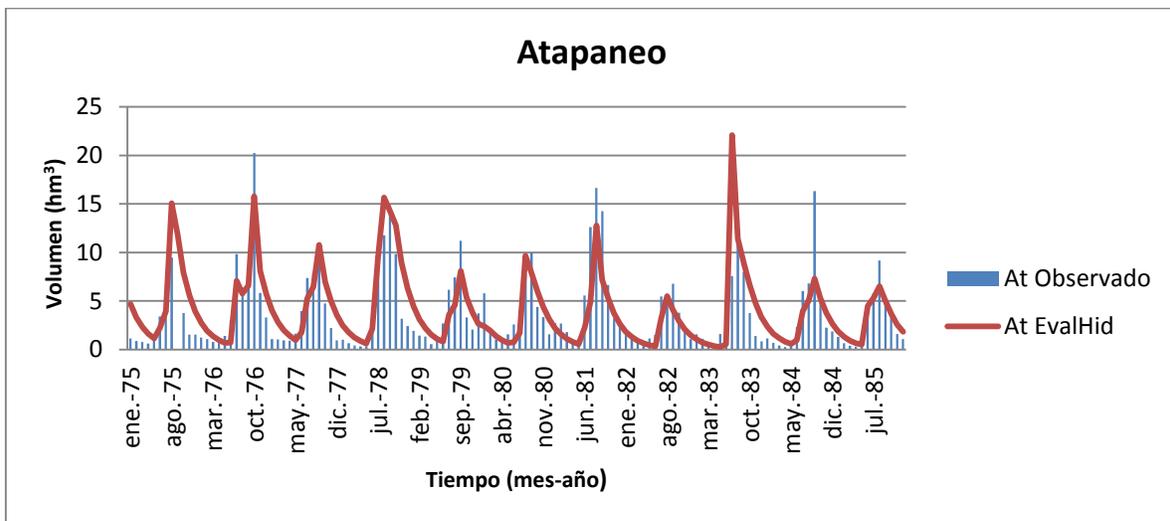


Figura 32. Calibración Mensual de la estación hidrométrico Atapaneo

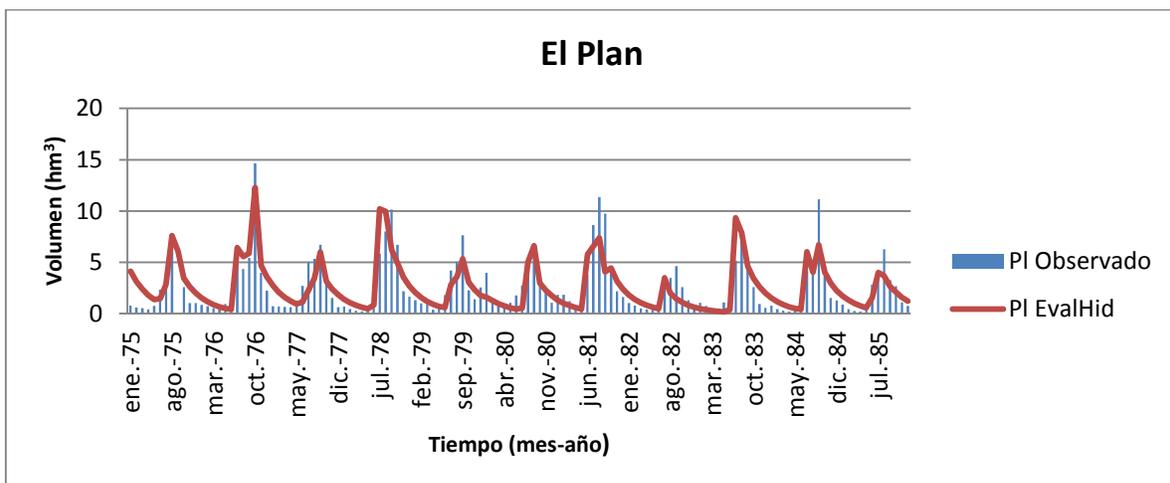


Figura 33. Calibración Mensual de la estación hidrométrica El Plan



Con los datos calibrados se extendieron las series de aportaciones hasta el 2012 y la cuenca en promedio anual genera 183.2 hm³/año en el periodo 1975-2012, de los cuales el 41.78% se genera en la parte alta de la cuenca, es decir el volumen que llega a la presa Cointzio, en la subcuenca de Atapaneo se genera el 28.10%, el 21.84% en la cuenca natural de el plan y el 8.28% de los escurrimientos pertenecen a la subcuenca Chiquito. En la figura 34 se presenta la distribución interanual de las aportaciones de las subcuencas del río Grande de Morelia.

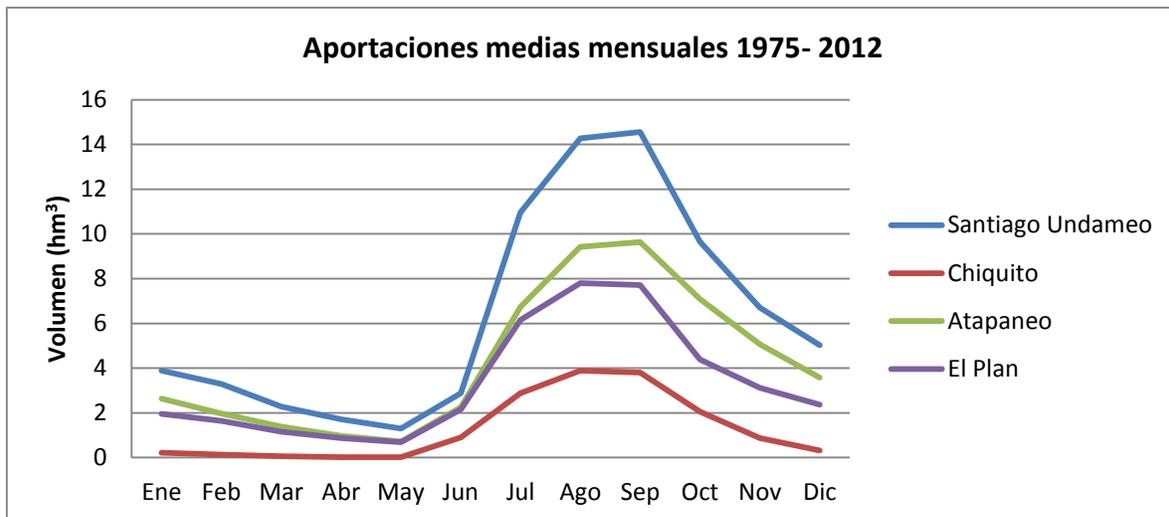


Figura 34. Aportaciones interanuales calibradas de las subcuencas del río grande de Morelia.

8.3 Retornos Urbanos

La ciudad de Morelia ha crecido aceleradamente en las últimas décadas lo cual está ocasionando incrementos en la presión en diferentes sectores, entre ellos el agua y los retornos de las aguas servidas al río grande de Morelia, su población actual es de 795219 y es abastecimiento es de 3257 l/s de los cuales el 50% se pierde en el sistema y el 80% de éste, regresa como agua servida al rio grande de Morelia, es decir 1303 l/s (OOAPAS, 2007). Por otro lado la concentración del agua es de 272.2 mg/L de DBO₅ de acuerdo a la cara caracterización del 83% de las descargas de la ciudad de Morelia realizadas por el OOAPAS (2007).

La distribución espacial se realizó por medio de microcuencas de abastecimiento y por fuente de aportación, esto debido a que no se tienen datos de caracterización por descarga, en la figura 35 se observan las microcuencas que se ven afectadas por los retornos urbanos, donde



algunas de ellas se encuentran totalmente urbanizadas y otras en proceso de urbanización; en base a la distribución de las aportaciones (figura 36) se calculó la distribución espacial de las descargas en el río grande de Morelia.

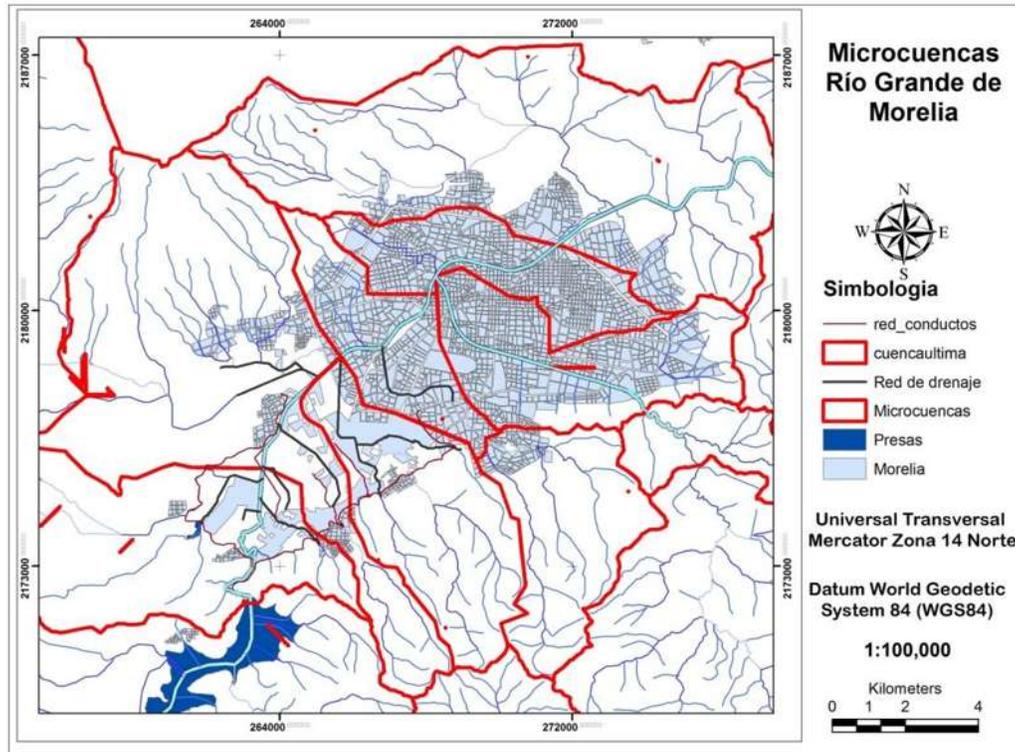


Figura 35. Microcuencas de captación de aguas servidas de la ciudad de Morelia

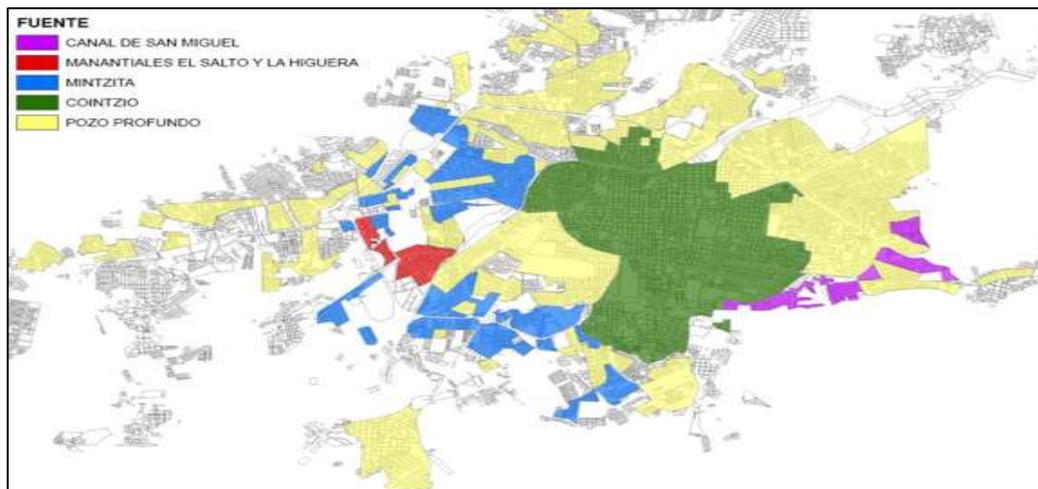


Figura 36. Distribución espacial del agua para uso urbano por fuente de abastecimiento.

Por otro lado la distribución temporal se realizó en base a la población de la ciudad de Morelia, la cual ha crecido a un ritmo acelerado, lo que ocasiona incrementos en la demanda



de agua para uso urbano y por lo tanto mayor agua servida en el río grande, lo que ocasiona una contaminación en el río grande de Morelia. El cálculo se realizó por medio de la metodología que utiliza (OOAPAS), En la figura 37 se muestran las subcuencas y el incremento del volumen en las aguas servidas desde 1975 hasta 2013

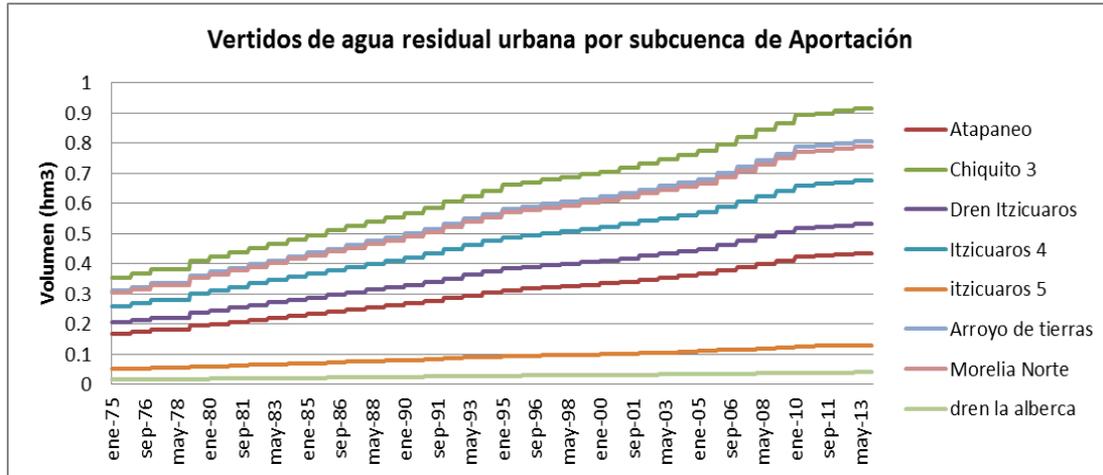


Figura 37. Vertidos históricos por Microcuenca de aportación

8.4 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.

Para 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.

El río grande abastece 4 Módulos del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro, de los cuales el Módulo 1 y 2 son abastecidos superficialmente y los Módulos 3 y 4 son abastecidos mediante uso superficial y subterráneo. Los cultivos que se siembran en el Distrito de Riego se presentan en la figura 38, en el Módulo 1 prevalece el cultivo del trébol, en el Módulo 2 el maíz, en el Módulo 3 alfalfa y maíz, y en Módulo 4 trigo y maíz.

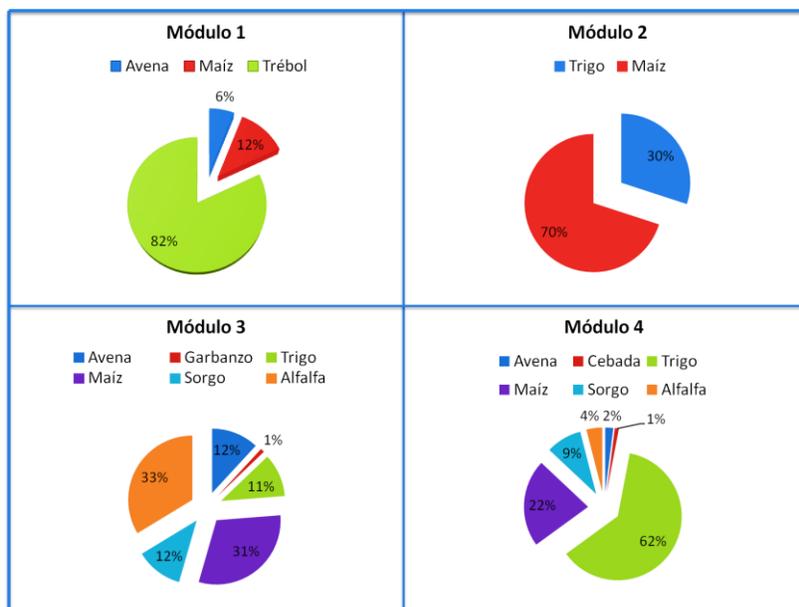


Figura 38. Cultivos para los cuatro Módulos analizados en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (Hernández 2011).

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

Tabla 7. Demanda bruta del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Mes	Módulo 1	Módulo 2	Módulo 3	Módulo 4
Octubre	0.115	0.000	0.206	0.000
Noviembre	0.483	0.030	1.320	0.110
Diciembre	0.629	0.200	4.140	1.089
Enero	0.646	0.073	5.540	3.254
Febrero	0.700	0.104	5.891	2.639
Marzo	0.874	0.795	10.880	5.215
Abril	1.523	1.531	14.731	7.364
Mayo	1.014	1.066	8.794	2.370
Junio	0.287	0.043	2.244	1.160
Julio	0.000	0.000	0.550	0.301
Agosto	0.000	0.000	0.000	0.000
Septiembre	0.000	0.000	0.306	0.048
Σ	6.272	3.841	54.603	23.549



8.5 Sistemas de Apoyo a la Decisión

Los sistemas de apoyo a la decisión han surgido como herramienta de diseño para ayudar a contestar preguntas específicas facilitando el empleo de los modelos de simulación y optimización para la gestión de los recursos hídricos.

Aquatool (sistema de apoyo a la decisión para la gestión de cuencas complejas) ha sido desarrollado por el departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia, nos permite crear los esquemas de simulación para la cuenca en estudio, así como visualizar las reglas de operación del mismo.

Aquatool cuenta con el módulo SIMGES (SIMulación de la GESTión) que es el que permite hacer la gestión del sistema así como evaluar múltiples elementos. El suministro de agua en la cuenca se evalúa con los índices de garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas, agrícolas, industriales, entre otras (Andreu et al. 1996). Para esto se debe realizar el análisis cuantitativo en la cuenca del río Grande de Morelia, el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro y acuífero Morelia-Queréndaro, se procede mediante el modelo de gestión de recursos hídricos, Aquatool, para reproducir la gestión del sistema y evaluar las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas, establecidas en dicho sistema. De esta manera pueden conocerse las repercusiones futuras que tendría la disminución de los recursos hídricos en el sistema de explotación. Los resultados obtenidos al aplicar la metodología, han permitido estimar los posibles efectos del cambio climático en los recursos hídricos, estas estimaciones corresponden a los cambios en las demandas de riego, demandas urbanas e industriales, evapotranspiraciones, en las aportaciones, en los niveles y recargas de los acuíferos, tanto anuales como mensuales, en los niveles medios de los embalses y en la evaluación de las garantías y fallos que se producen en las demandas urbanas y agrícolas una vez realizadas las simulaciones con el modelo de gestión.

Para calcular las necesidades hídricas en cantidad, espacio y tiempo implica disponer de un sistema de recursos hidráulicos, que permita hacer una distribución de las aportaciones a la estructura de la demanda. Estas aportaciones están condicionadas por el ciclo hidrológico que condiciona la estructura del sistema que a su vez viene fijada por los diversos usos y aplicaciones del agua.



8.6 Calibración del sistema superficial

Para la gestión de los sistemas de recursos hídricos se realizó el esquema de la cuenca del río Grande de Morelia adoptado para la simulación está compuesto por embalses, tramos de río con y con recarga al acuífero, tomas de demandas, demandas consuntivas, acuífero de autovalores y nodos que representan las tomas, confluencias y bifurcaciones. Este esquema de simulación se actualizó en base a los datos de Hernández *et al.*, 2011, el objetivo principal de la actualización es representar espacialmente con mayor detalle la cantidad y la calidad del agua (contaminación) en el río grande de Morelia. El esquema se dividió en 30 tramos de río, 13 aportaciones naturales, 8 retornos al río y 9 demandas, (figura 39).

Una vez realizado el esquema con todas sus componentes se realiza una simulación y se calibra el esquema, es decir lo simulado debe ser lo mayor posible a la realidad, para río grande se calibró el embalse Cointzio, y se verificó que los volúmenes mensuales sean similares a los volúmenes históricos. La evolución de la calibración en el embalse interanual se presenta en la figura 40 donde se puede observar que siguen la misma tendencia los volúmenes simulados y los volúmenes aforados. Se presentan pequeñas diferencias entre ambos volúmenes, más sin embargo en general el comportamiento de los volúmenes es aceptable.

En la figura 41 se puede observar el embalse calibrado, donde el coeficiente de correlación es de 0.90 entre los volúmenes aforados y los simulados. En promedio anual el volumen aforado es de 60.01 hm³ y el volumen simulado es de 59.31 hm³, solamente teniendo un error anual de 0.75 hm³.

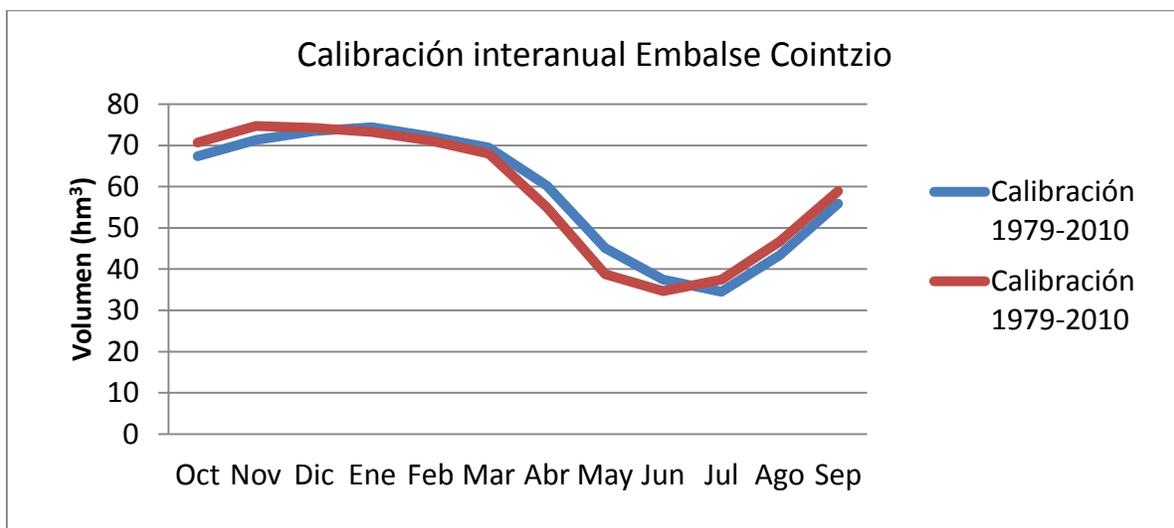




Figura 40. Volumen interanual calibrado en la presa Cointzio para los años 1979-2010.

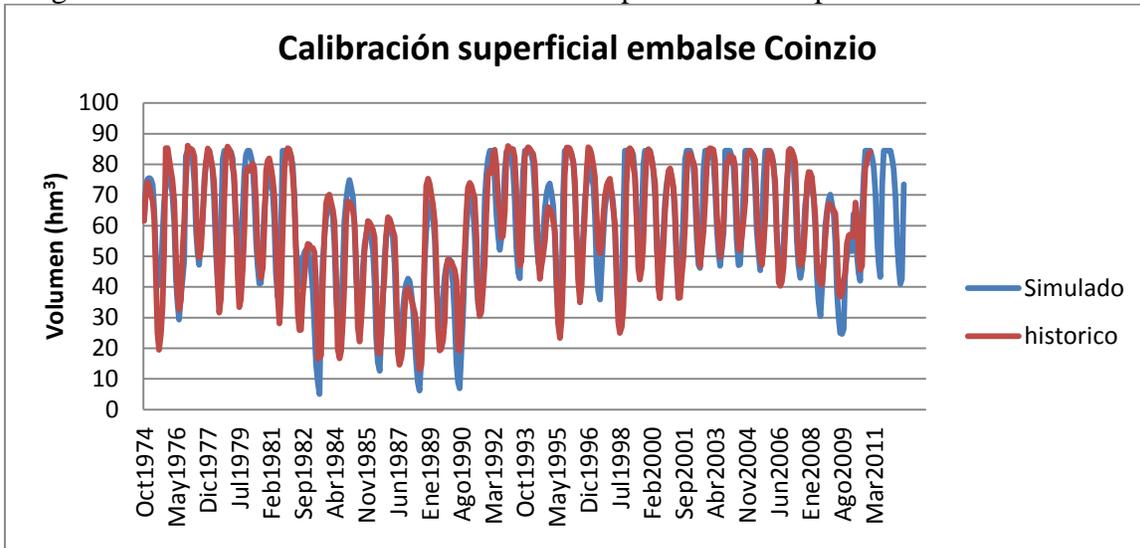


Figura 41. Volumen histórico y simulado (calibración y validación) en la presa Cointzio para los años 1975-2012.

Posteriormente a la calibración se realizó la validación espacial y temporal en dos estaciones de aforo a régimen alterado, las cuales son estación Atapaneo y el Plan (figura 25). En estas estaciones se realizaron en dos periodos históricos de acuerdo a los datos reales de la estación de aforo, en el caso de la estación de Atapaneo se realizaron dos comparaciones, la primera en los años más recientes de la estación de aforo (1969-1995) y los datos de la simulación 1971-2012, en donde los valores simulados e históricos presentan una misma tendencia excepto en el mes de marzo (figura 42), en el periodo histórico con datos disponibles de la estación Atapaneo (figura 43), la variación se da en los meses de marzo y abril, recordando que para este caso no necesariamente tienen que tener una buena correlación debido a que se están comparando periodos históricos diferentes (1971-2012 y 1943-1995).

Para el caso de la estación del Plan, que es la estación que registra los volúmenes después de abastecer todas las demandas (volumen que llega al Lago de Cuitzeo), presenta variaciones en los meses de octubre, noviembre y diciembre para el periodo 1978-2003 simulado e histórico, como se observa en la figura 44, en el caso del periodo histórico (1974-2012 simulado, 1978-2003 histórico) las variaciones son similares al caso anterior.

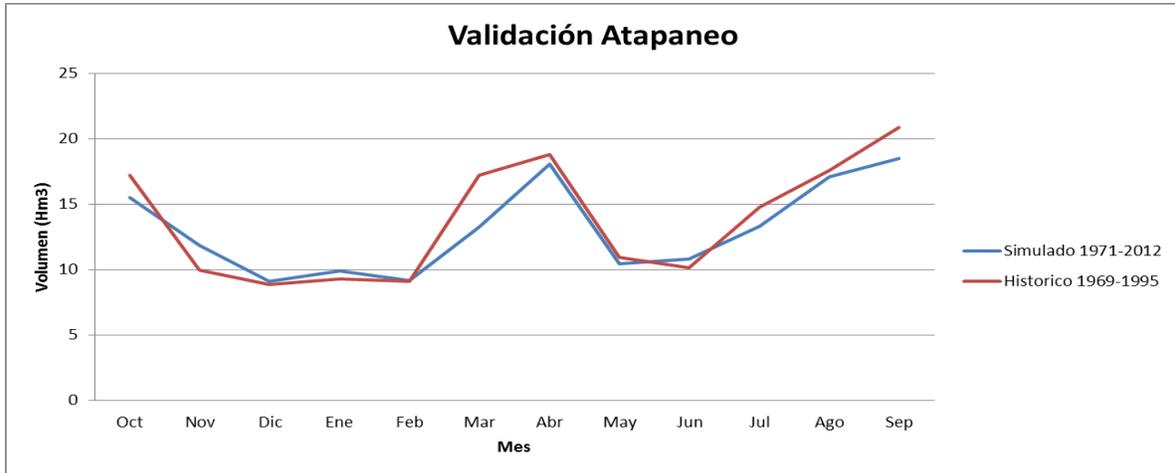


Figura 42. Validación de la estación de aforos Atapaneo para el periodo más reciente

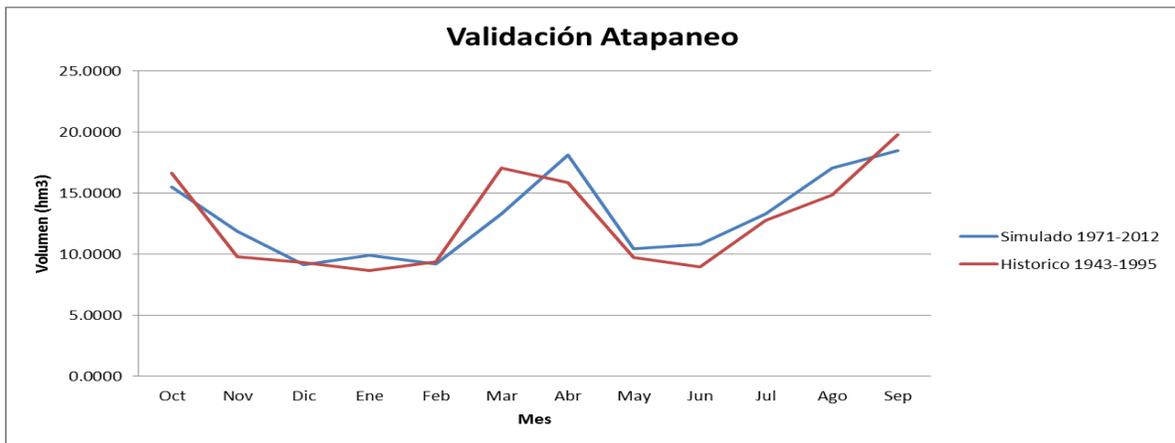


Figura 43. Validación de la estación de aforos Atapaneo para el periodo histórico disponible de información.



Figura 44. Validación de la estación de aforos el Plan para el periodo histórico disponible de información.



Figura 45. Validación de la estación de aforos el Plan para el periodo histórico más reciente.

8.7 Características del río Grande de Morelia

Se determinó la pendiente del río grande de Morelia desde la presa y hasta el lago de Cuitzeo mediante el método de Taylor y Schwarz que es el método más exacto en el cálculo de la pendiente del cauce principal (Aparicio 1992; Campos 1992; CONAGUA 2011) y con información del levantamiento topográfico realizado por la UAQ en 2008. Las pendientes mayores se encuentra en los primeros 2000 metros de cauce y en el resto del río las pendientes son pequeñas, la pendiente media del cauce es del 0.0485%, lo cual indica es una cuenca de valle o planicie. Las elevaciones del río Grande de Morelia se presentan en la figura 46.

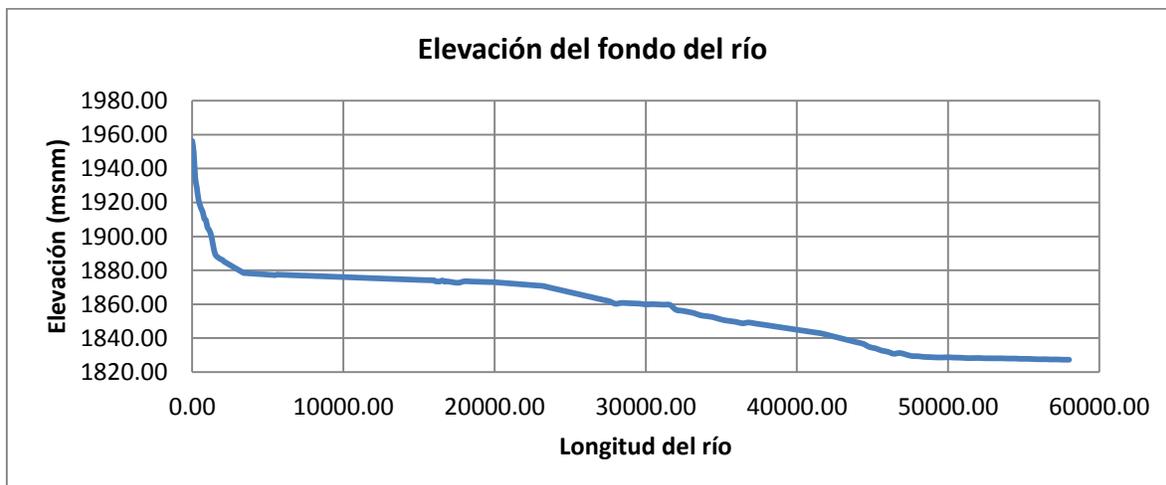


Figura 46. Elevaciones del río Grande de Morelia

La subcuenca del río grande se encuentra regulada por la presa Cointzio, la cual aporta un volumen al río grande, y a su vez éste, abastece diferentes demandas y recibe retornos y



descargas, las cuales afectan el volumen de escurrimiento y la calidad del mismo, en la tabla 8 y figura 47 se describen las características físicas que afectan el volumen del escurrimiento del río, así como la calidad del agua. La presa de Cointzio satisface diferentes demandas agrícolas y urbanas en su trayecto a la presa de Cointzio, para su estudio ha sido dividido en 30 tramos, con el objetivo del cálculo del volumen del escurrimiento superficial, este se modificó a partir del realizado por Barajas 2001 y Hernández 2011.

Tabla 8. División del río Grande en base a las características de calidad y cantidad del agua.

Nombre	L (m)	S L (m)	Pendiente (%)	Inicio del tramo	Fin del tramo
Grande 1	130	130	5.40	Presa (Calidad Cointzio)	Toma La huerta
Grande 2	1680	1810	2.82	Toma La huerta	Toma Cointzio
Grande 3	3415	5225	0.27	Toma Cointzio	Dren Alberca
Grande 4	150	5375	0.23	Dren Alberca	Estación Calidad Puente el Frijolar
Grande 5	740	6115	0.03	Estación Calidad Puente el Frijolar	Estación Calidad PT 1
Grande 6	2450	8565	0.03	Estación Calidad PT 1	Dren Itzicuaru
Grande 7	830	9395	0.00	Dren Itzicuaru	Dren Cienega Grande
Grande 8	1221	10616	0.00	Dren Cienega Grande	Dren Arroyo de Tierras
Grande 9	2580	13196	0.05	Dren Arroyo de Tierras	Aportación Chiquito
Grande 10	1115	14311	0.03	Aportación Chiquito	Estación Calidad Av J
Grande 11	1440	15751	0.03	Estación Calidad Av J	Descarga Morelos Norte
Grande 12	1270	17021	0.08	Descarga Morelos Norte	Estación Calidad L.L
Grande 13	990	18011	0.09	Estación Calidad L.L	Estación Cantidad A
Grande 14	859	18870	0.01	Estación Cantidad A	Estación Calidad C.I.
Grande 15	3439	22309	0.06	Estación Calidad C.I.	Estación Calidad Aldea (CNA)
Grande 16	2355	24664	0.15	Estación Calidad Aldea (CNA)	Estación Calidad Atap
Grande 17	500	25164	0.10	Estación Calidad Atap	Río los Pirules
Grande 18	1359	26523	0.12	Río los Pirules	Derivadora la Goleta
Grande 19	1648	28171	0.19	Derivadora la Goleta	Planta de Tratamiento
Grande 20	2126	30298	0.03	Planta de Tratamiento	Estación Calidad L.G
Grande 21	1900	32197	0.20	Estación Calidad L.G	Derivadoras Corrales y La Nopalera
Grande 22	1100	33297	0.07	Derivadoras Corrales y La Nopalera	Arroyo el Rile
Grande 23	3820	37117	0.13	Arroyo el Rile	Arroyo la Lobera
Grande 24	4441	41558	0.12	Arroyo la Lobera	Derivadora Quirio (MOD 3)
Grande 25	650	42208	0.14	Derivadora Quirio (MOD 3)	Arroyo Indaparapeo
Grande 26	1531	43739	0.12	Arroyo Indaparapeo	Derivadora Zacapendo
Grande 27	2121	45861	0.26	Derivadora Zacapendo	Estación Calidad Alb. Ob
Grande 28	4682	50543	0.06	Estación Calidad Alb. Ob	Estación Calidad Aer.
Grande 29	3486	54028	0.01	Estación Calidad Aer.	Estación Río Grande (CNA)
Grande 30	3972	58000	0.02	Estación Río Grande (CNA)	Lago de Cuitzeo

A partir de los datos de la UAQ (2008) y CONAGUA (2012) se determinaron las características físicas de las secciones del cauce y se realizó un promedio de la pendiente longitudinal (tabla 8), pendiente transversal, ancho promedio del cauce y rugosidad (tabla 9) para obtener las secciones idealizadas por cada tramo de río, estos resultados son necesarios para la modelación de los escurrimientos en el río grande.



Tabla 9. Datos promedio usados para la modelación hidráulica del río Grande UAQ (2008)

Nombre	Ancho	Rugosidad	Pendiente	Talud (s)
	(m)	(adim)	(%)	(m/m)
Grande 1	14.95	0.03	5.40	0.792
Grande 2	14.88	0.03	2.82	0.422
Grande 3	9.88	0.03	0.27	0.666
Grande 4	10.00	0.03	0.23	0.588
Grande 5	10.00	0.03	0.03	0.684
Grande 6	10.00	0.03	0.03	0.683
Grande 7	10.00	0.03	0.00	0.684
Grande 8	10.00	0.030	0.00	0.687
Grande 9	10.00	0.024	0.05	0.682
Grande 10	10.00	0.030	0.03	0.682
Grande 11	10.00	0.030	0.03	0.682
Grande 12	10.00	0.030	0.08	0.683
Grande 13	10.00	0.030	0.09	0.683
Grande 14	10.00	0.030	0.01	0.683
Grande 15	10.00	0.030	0.06	0.683
Grande 16	10.00	0.030	0.15	0.683
Grande 17	10.00	0.030	0.10	0.682
Grande 18	10.00	0.030	0.12	0.683
Grande 19	10.00	0.030	0.19	0.683
Grande 20	10.00	0.030	0.03	0.578
Grande 21	10.00	0.030	0.20	0.665
Grande 22	10.00	0.030	0.07	0.683
Grande 23	10.00	0.030	0.13	0.695
Grande 24	10.00	0.030	0.12	0.683
Grande 25	10.00	0.030	0.14	0.683
Grande 26	10.00	0.030	0.12	0.683
Grande 27	10.00	0.030	0.26	0.744
Grande 28	17.99	0.030	0.06	0.459
Grande 29	22.89	0.030	0.01	0.292
Grande 30	19.72	0.030	0.02	0.332

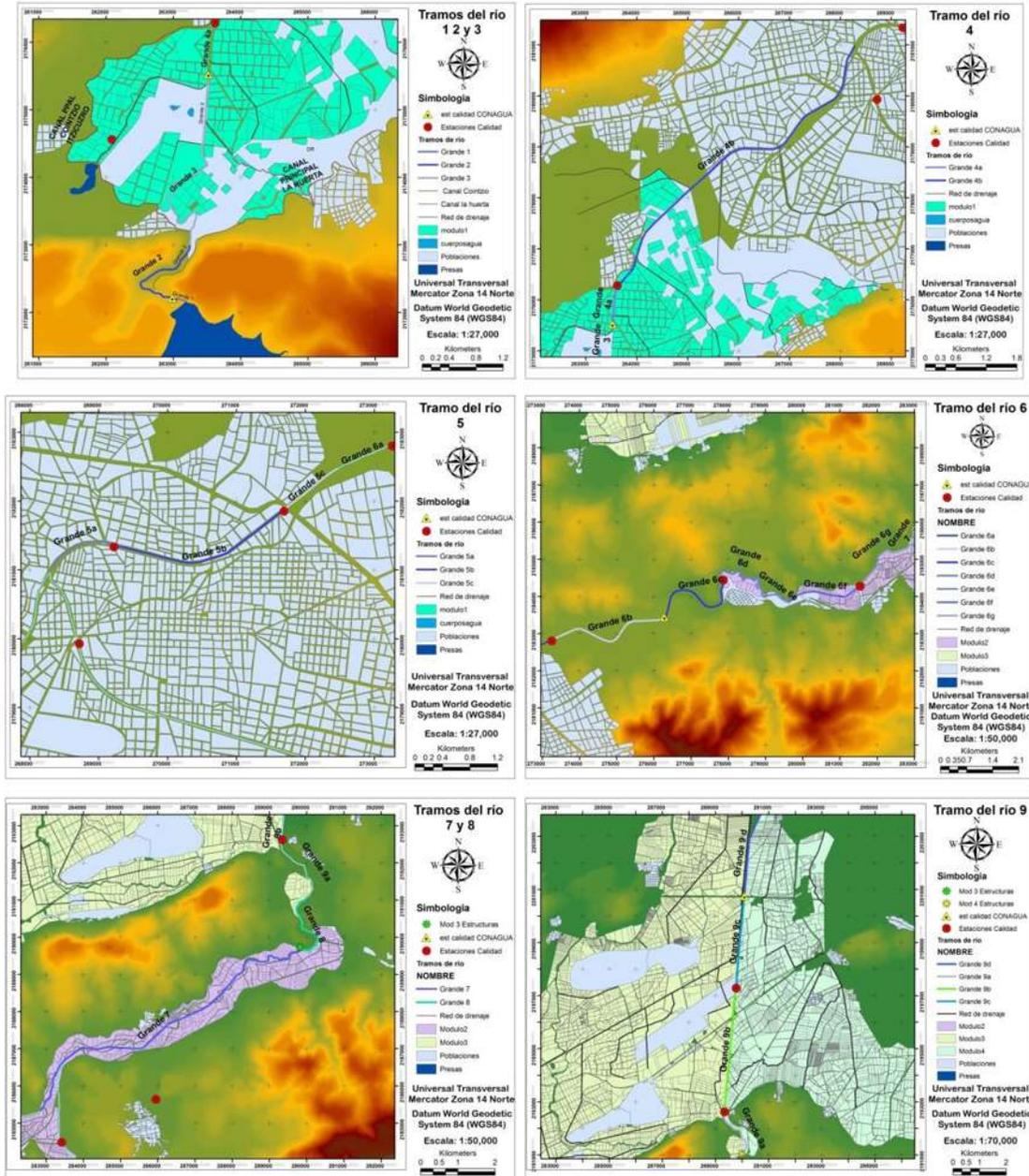


Figura 47. División y subdivisión del río grande de Morelia para su estudio.

8.8 Volumen de escurrimiento

Una vez calibrado y validado el esquema de simulación, se analizó el volumen anual e interanual que circula por el río grande de Morelia, donde se observó que el volumen de escurrimiento se va incrementando debido a las aportaciones y retornos y al final en los últimos tramos del río disminuye debido a los Módulos 3 y 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (figura 48). Para observar el comportamiento interanual se analizaron los tramos de río con similar escurrimiento, en donde se observó un máximo local en la



temporada de estiaje entre los meses de febrero-mayo (máximo en abril), y el máximo global se presenta en la temporada de lluvias en el mes de septiembre (Grande 10 al 30), lo cual es lógico debido a que en estos meses la demanda se reduce al mínimo y las precipitaciones son las mayores del año (figura 49). En la tabla 10 se presentan promedios por temporadas, con el fin de realizar simulaciones del río con diferentes escurrimientos.

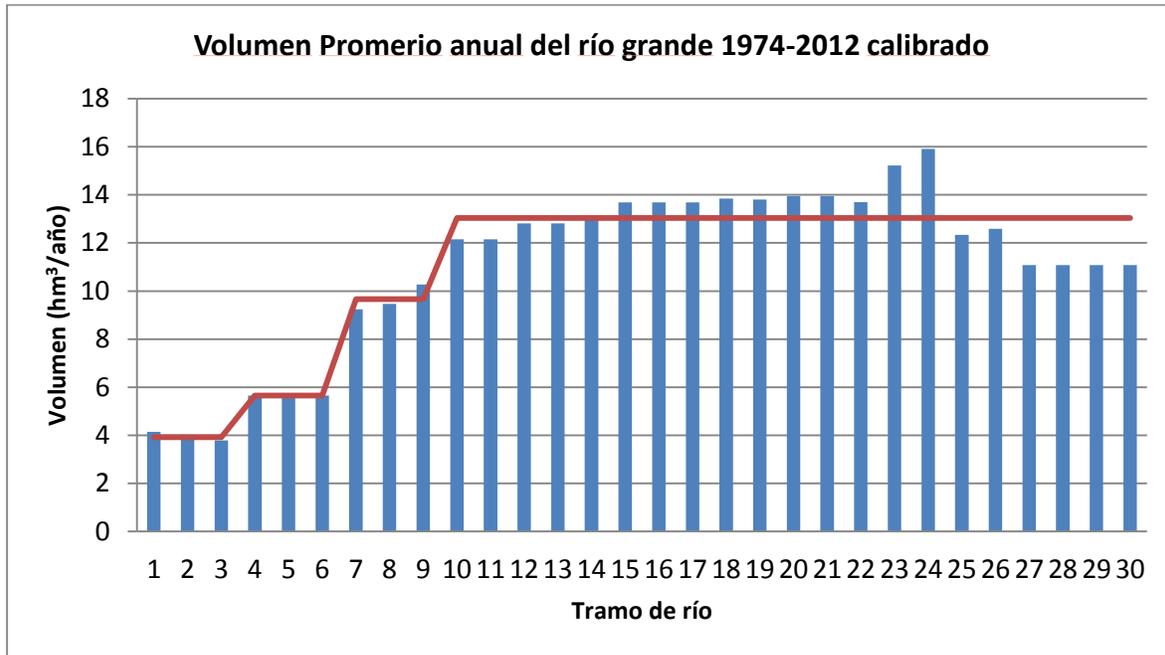


Figura 48. Volumen de escurrimiento promedio anual en el río grande de Morelia.

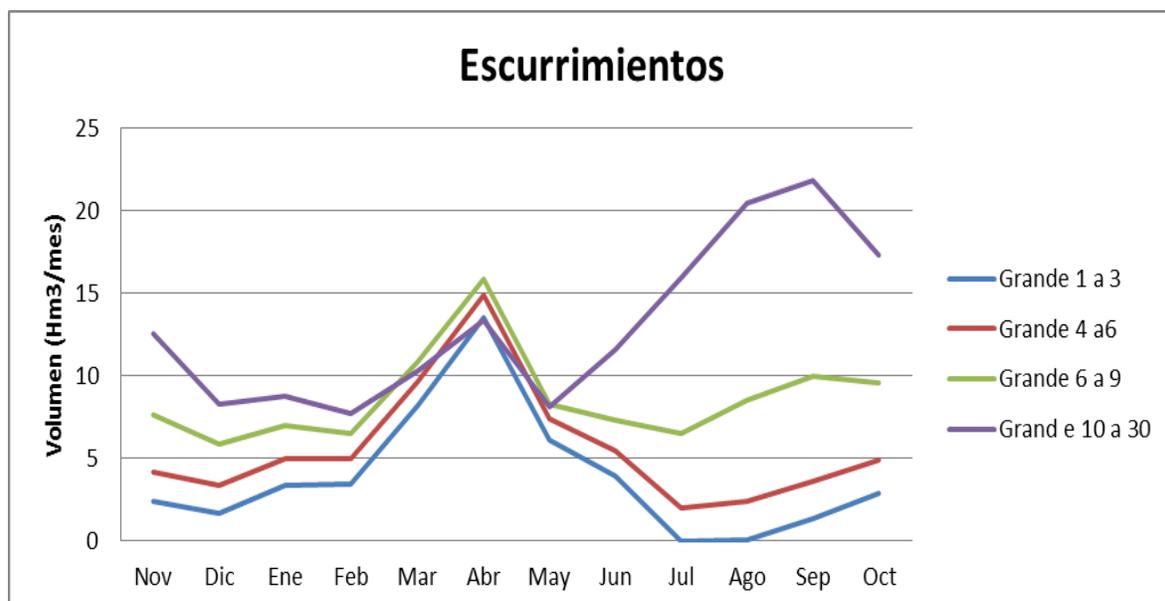


Figura 49. Volumen de escurrimiento promedio interanual por tamos con volumen similar en el río grande de Morelia.



Tabla 10. Volumen de escurrimiento promedio en el río grande temporada de estiaje y temporada de lluvias.

Volumen simulación en SIMGES (hm3/mes)				
Meses/Río	Grande 1 a 3	Grande 4 a 6	Grande 6 a 9	Grande 10 a 30
Nov-May	5.53	7.06	8.86	9.89
Jun-Oct	1.66	3.69	8.37	17.43

Volumen simulación en HEC-RAS (m3/s)				
Meses/Río	Grande 1 a 3	Grande 4 a 6	Grande 6 a 9	Grande 10 a 30
Nov-May	2.11	2.69	3.37	3.76
Jun-Oct	0.63	1.40	3.19	6.63

8.9 Resultados de la simulación del río grande mediante HEC-RAS

Debido a la gran cantidad de información, la simulación del río grande de Morelia para los escurrimientos del río (tabla 11) se realizaron las simulaciones del río grande a cada 100 m en las donde las secciones son uniformes y para las secciones que no son uniformes se realizó a cada 400 m. En la figura 50 se muestran las características físicas y los resultados de la modelación de una sección y en la figura 51 se presenta el esquema de simulación.

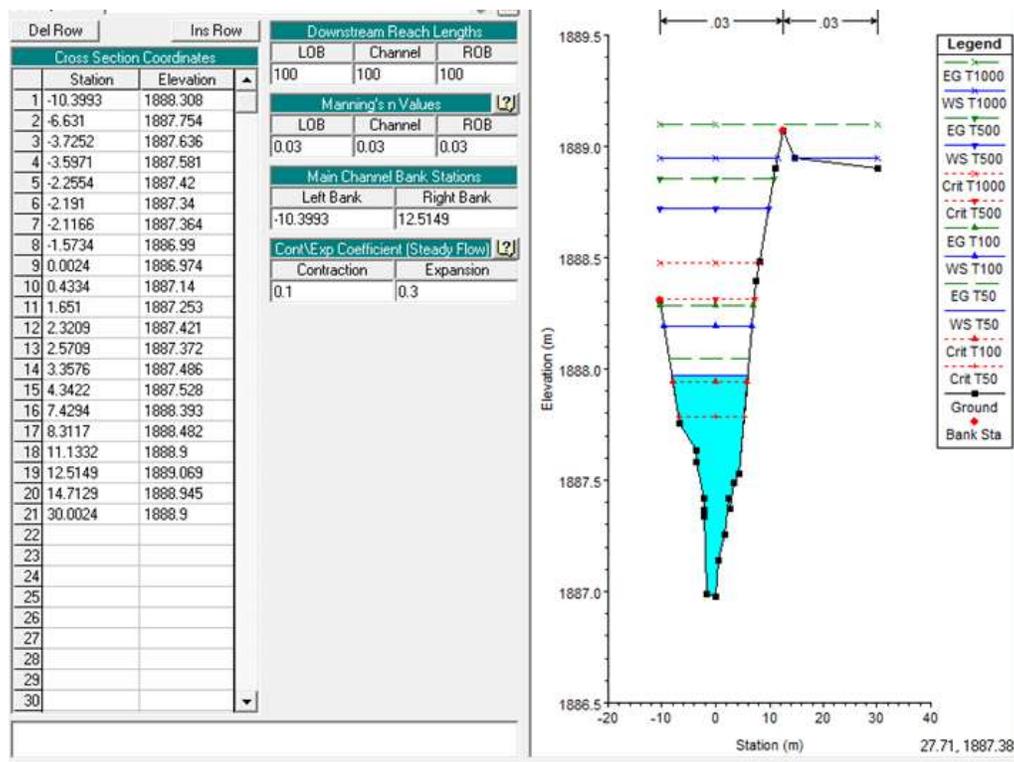


Figura 50. Ejemplo de sección transversal del río grande de Morelia

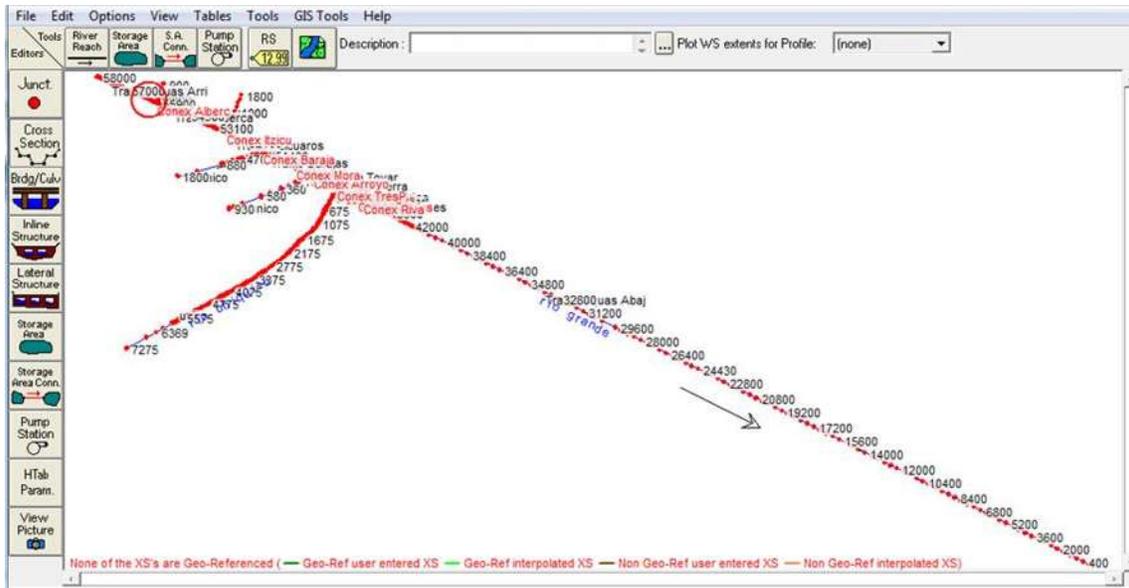


Figura 51. Esquema de simulación del río grande en el modelo HEC-RAS.

Las velocidades en el río grande en los primeros dos tramos (2000 m) son mayores por las fuertes pendientes, por lo tanto el régimen del escurrimiento en estos tramos es supercrítico, y en los siguientes tramos del río la pendiente disminuye drásticamente por lo tanto el régimen en los tramos subsecuentes es subcrítico, y el tirante se incrementa de manera gradual hasta el final del río (tabla 11). Por lo tanto en los primeros 2000 m será mayor la dispersión longitudinal así como mayor aireación en el río.

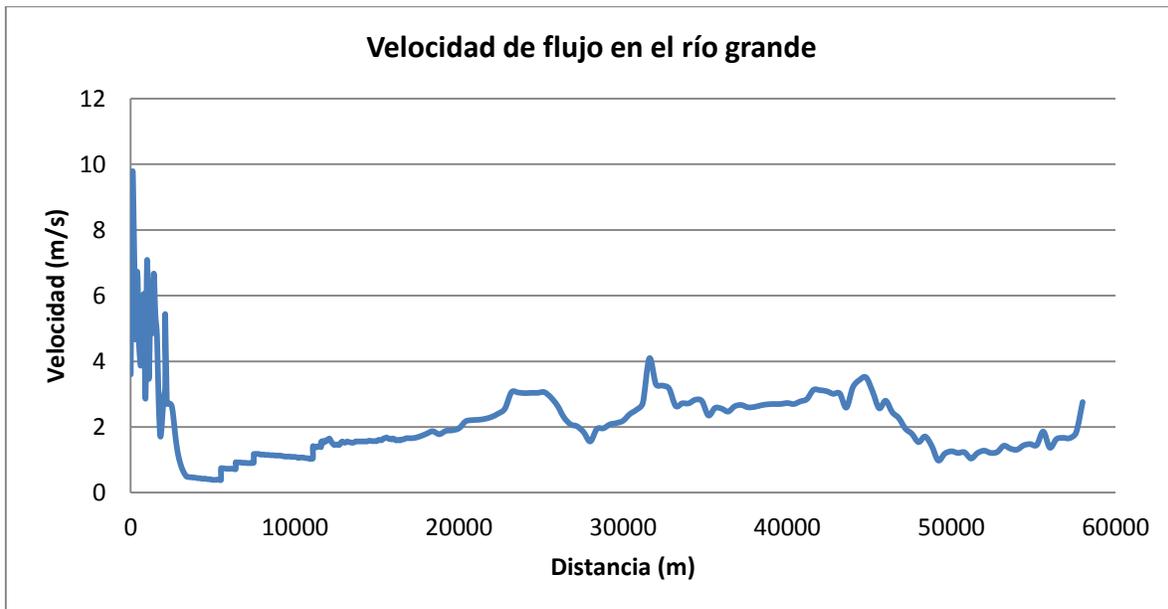


Figura 52. Velocidad del flujo en el río grande de Morelia



8.9.1 Dispersión Longitudinal

La dispersión longitudinal se calculó como se indica en el apartado 2.2.3.2; se concluyó que para el río grande de Morelia la dispersión es importante en los primeros 3 tramos, debido a la mayor pendiente longitudinal y a la mayor velocidad. En la tabla 10 se presenta los resultados promedio de la dispersión longitudinal de acuerdo a Fisher *et al.*, (1979) donde se aprecia que los tramos Grande 1, 2 y 3 la dispersión es importante, y los tramos siguientes todos son menores de 0.8, lo que indicará que la dispersión no es importante en estos tramos.

Tabla 11. Resumen de las características hidráulicas del río grande de Morelia

Nombre	Velocidad (m/s)	Froude (adim)	Tirante (m)	E (m ² /d)
Grande 1	3.38	3.27	0.20	94.00
Grande 2	1.75	1.45	0.34	65.49
Grande 3	0.59	0.47	0.32	23.61
Grande 4	0.65	0.46	0.57	1.86
Grande 5	0.32	0.15	0.57	5.58
Grande 6	0.37	0.15	0.65	5.05
Grande 7	0.44	0.18	0.68	6.55
Grande 8	0.44	0.18	0.68	6.31
Grande 9	0.50	0.19	0.77	6.65
Grande 10	0.51	0.19	0.88	5.74
Grande 11	0.51	0.18	0.89	5.95
Grande 12	0.49	0.17	1.20	3.61
Grande 13	0.42	0.14	1.39	3.23
Grande 14	0.49	0.18	0.91	5.47
Grande 15	0.62	0.24	0.75	8.49
Grande 16	0.86	0.39	0.56	14.45
Grande 17	0.89	0.40	0.53	14.45
Grande 18	0.97	0.46	0.50	20.85
Grande 19	0.77	0.36	0.82	18.10
Grande 20	0.53	0.19	0.90	4.97
Grande 21	0.91	0.43	0.82	18.78
Grande 22	1.12	0.61	0.68	30.99
Grande 23	0.85	0.39	0.76	13.23
Grande 24	0.81	0.35	0.58	13.00
Grande 25	0.95	0.44	0.50	17.47
Grande 26	0.90	0.42	0.54	16.42
Grande 27	1.20	0.62	0.64	30.22
Grande 28	0.22	0.06	2.66	0.60
Grande 29	0.07	0.02	3.84	0.14
Grande 30	0.06	0.01	4.44	0.03



8.9.2. Aireación

La aireación al igual que la dispersión depende de las características físicas e hidráulicas del río, por lo tanto la aireación será importante en los tramos Grande 1, 2 y 3 y en el resto del río será menor. Los métodos resueltos para la dispersión se describen en el apartado 2.2.3.3.; los resúmenes de los resultados indican aireaciones en los primeros tres tramos se encuentra entre 5.3 y 97.5 (1/d) (figura 53) y los tramos 4 a 9 (figura 54) presentan una dispersión entre 0.24 y 4.33. Los métodos ordenados de menor a mayor de acuerdo a los resultados obtenidos son los siguientes: O'Conor-Dobbins, Owens and Gibbs, Langbien and Durum, Churchill, Thackston and Krenkel.

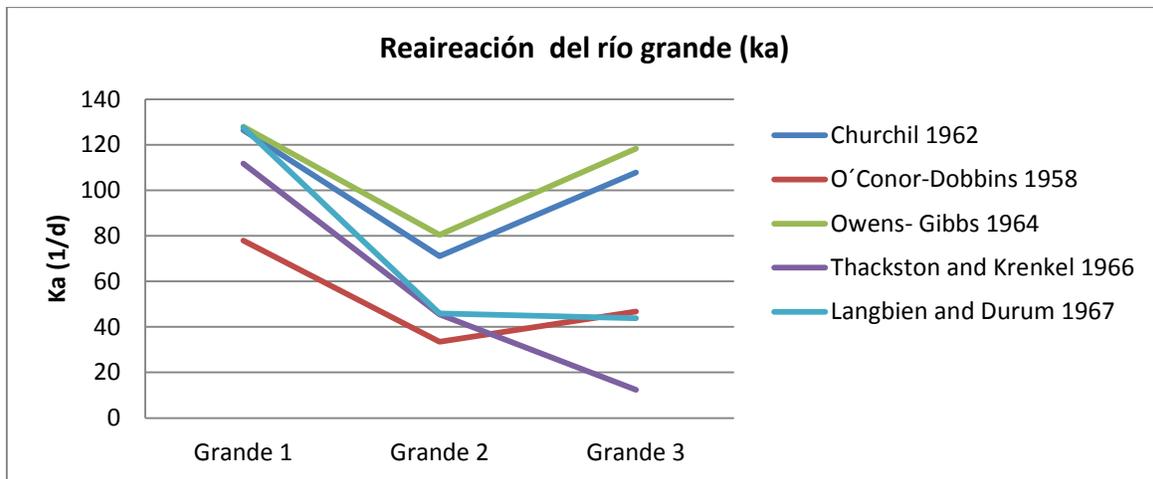


Figura 53. Reaireación del río grande para los tramos 1 a 3.

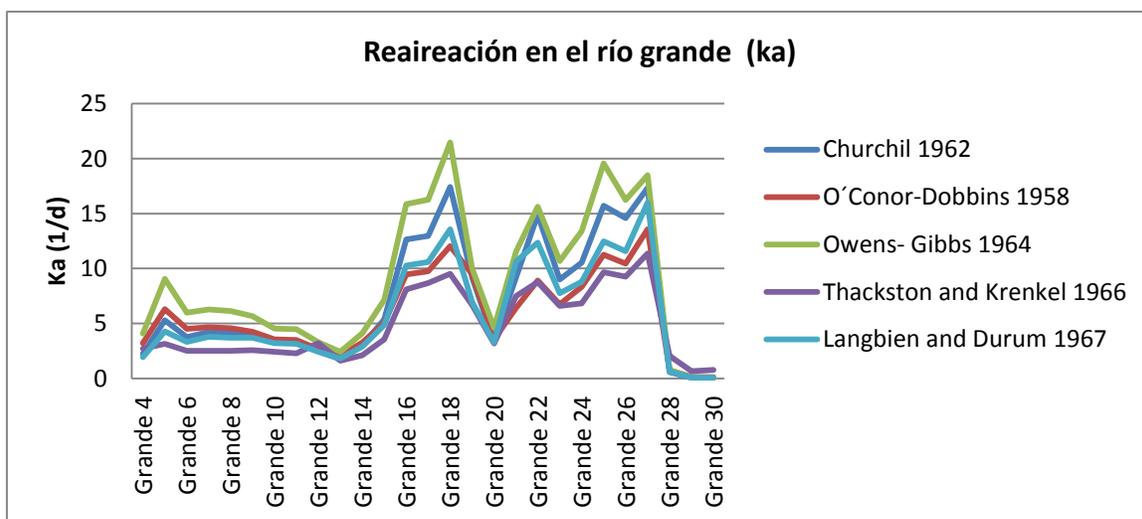


Figura 54. Aireación del río grande para los tramos 4 a 30.



8.9.3 Diseño de las modelaciones hidráulicas en Hec-Ras

Para la modelación de la calidad del agua del río grande se ingresarán las condiciones más críticas, es decir las que proporciona el método de Thackston and Krenkel, la cual relaciona además de la velocidad y el tirante de agua, el régimen del cauce (número de Froude) y la pendiente longitudinal del río.

Para el caso de estudio y como se mencionó anteriormente se realizaron modelaciones con diferentes escurrimientos abarcando los máximos y mínimos escurrimientos que circulan por el río grande de Morelia para lo cual se realizó un diseño de modelaciones hidráulicas con conocer los valores de los coeficientes α_1 , β_1 , α_2 , β_2 , α_3 y β_3 , en promedio para los 30 tramos que se dividió el río grande de Morelia.

Para el diseño de las modelaciones se abarcaron los máximos y mínimos a con una distribución uniforme a cada 2 hm³ (figura 55) y a partir de estos resultados se tomaron los promedios para los 30 tramos del río y así establecer los diferentes coeficientes α_1 , β_1 (figura 56), α_2 , β_2 (figura 57), α_3 y β_3 para el río en estudio.

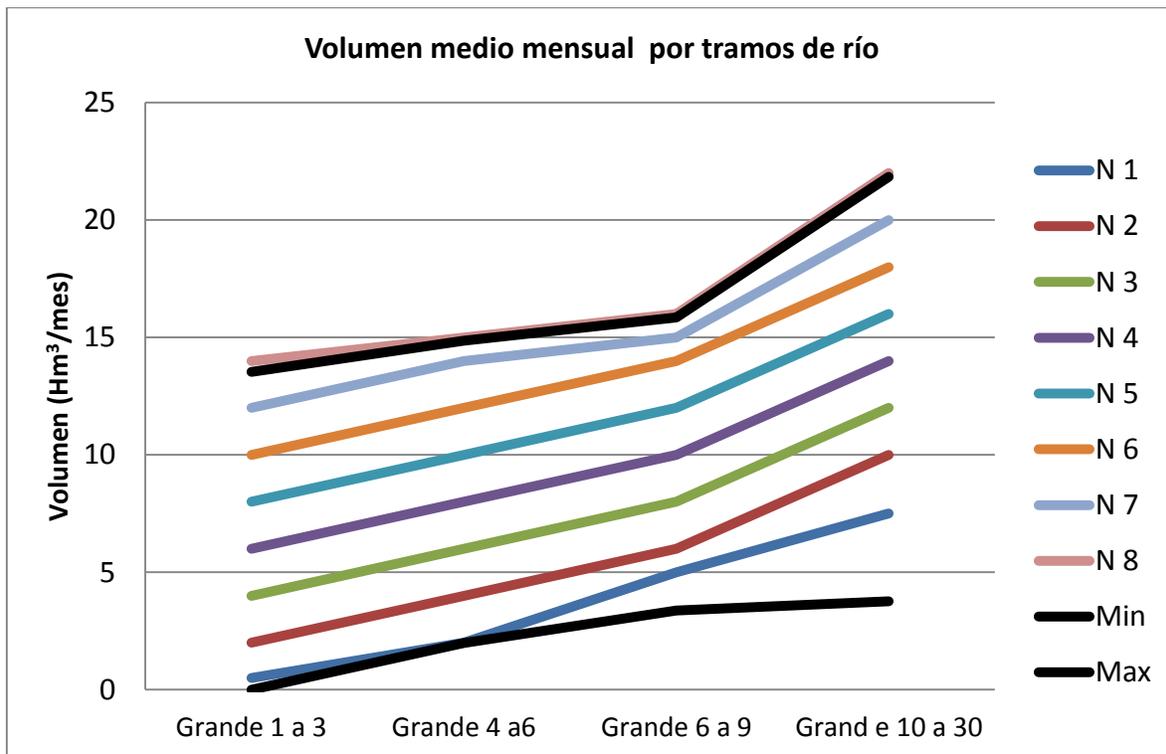


Figura 55. Diseño de modelaciones hidráulicas para diferentes tramos de río y volumen.

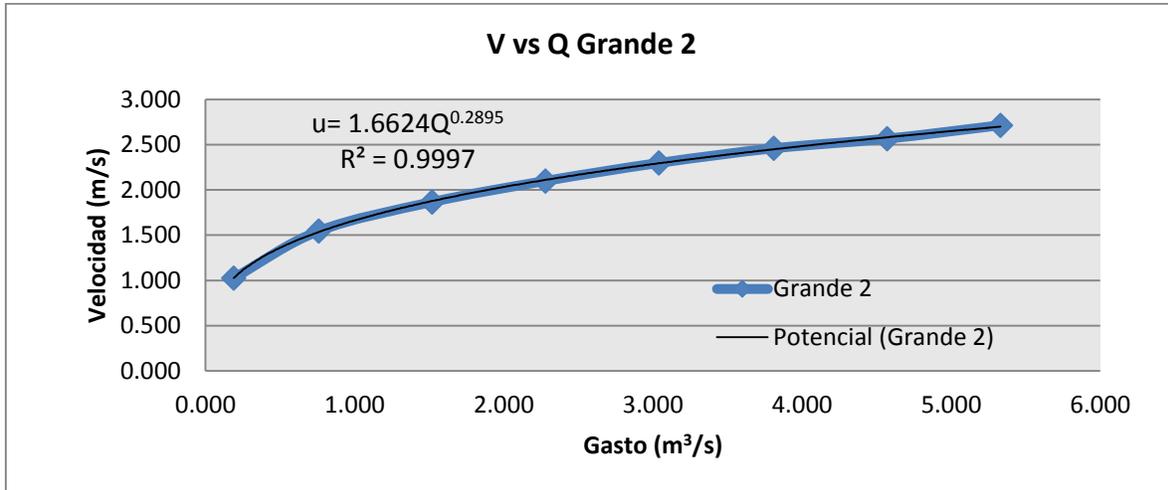


Figura 56. Cálculo de los factores α_1 y β_1 para el tramo grande 2.

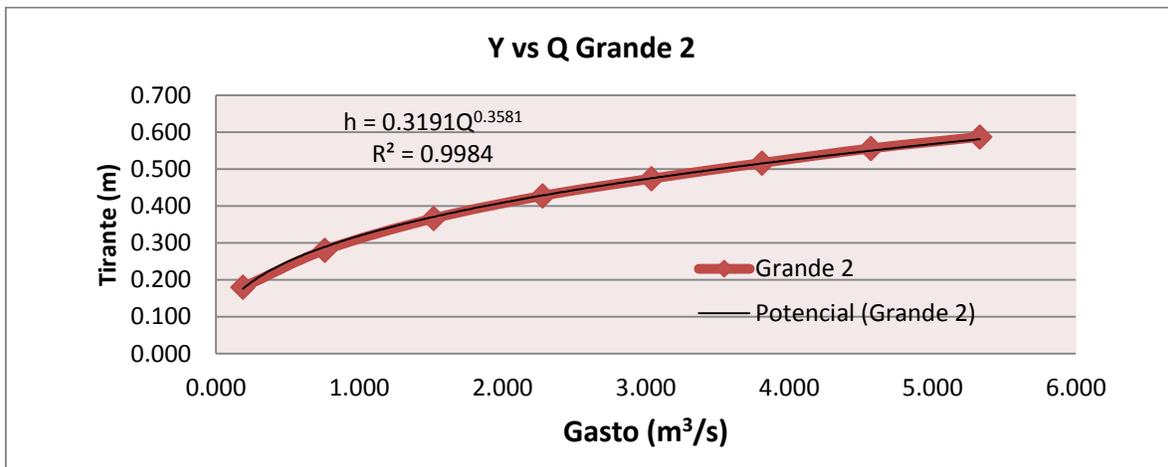


Figura 57. Cálculo de los factores α_2 y β_2 para el tramo grande 2.

8.10 Estaciones de calidad del agua

Las estaciones de calidad monitoreadas por la Comisión Nacional del Agua para la cuenca del río grande de Morelia son 4, Cointzio que se encuentra aguas abajo de la presa Cointzio, el puente frijolar que se encuentra antes de la ciudad de Morelia, la aldea se encuentra a la salida de Morelia y la estación río grande se encuentra en el tramo final del cauce (figura 58). Por otro lado hay estaciones de calidad por muestreos realizados en 2012 y 2013 Díaz (2013). Los muestreos se ubican en: CRISOBA (CEP), Planta de tratamiento (PT1), Av. Jacaranda (Av. J), Río Chiquito (R.Ch), Lib. Lomas de Morelia (L.L), Ciudad Industrial (C.I), Atapaneco (ATAP), La Goleta (L.G), Álvaro Obregón (Al. Ob), Aeropuerto (AER), Arroyo Charo 1 (A.C.1) y Arroyo Charo 2 (A.C.2). En la tabla 12 se observa la ubicación de las estaciones



de calidad del agua de la Comisión Nacional del Agua, así como las realizadas por Díaz (2013).

Tabla 12. Ubicación de las estaciones de calidad del agua dentro de la cuenca del río Grande de Morelia.

Sitio	Coordenadas geográficas		Dependencia
	N	O	
Cointzio	19°37'51.3"	101°15'36.58"	CONAGUA
P. Aldea	19°44'1.9"	101° 8'5.30"	CONAGUA
P. Frijolar	19°39'39.10"	101°15'19.69"	CONAGUA
Salida .G.	19°53'30.19"	101° 0'18.47"	CONAGUA
CEP	19°39'07.2"	101°16'08.3"	UMSNH
PT1	19°40'03.9"	101°15'16.4"	UMSNH
Av.J	19°42'50.5"	101°12'06.4"	UMSNH
R. Ch	19°42'04.6"	101°12'23.1"	UMSNH
L.L	19°43'08.4"	101°10'42.0"	UMSNH
C.I	19°43'39.9"	101°09'48.5"	UMSNH
Atap	19°44'35.0"	101°07'10.9"	UMSNH
L.G	19°44'31.0"	101°05'04.7"	UMSNH
A.C 1	19°44'38.5"	101°04'00.4"	UMSNH
A. C 2	19°45'17.2"	101°02'34.0"	UMSNH
Ál. Ob.	19°49'05.6"	101°00'40.2"	UMSNH
Aer.	19°51'37.2"	101°00'27.2"	UMSNH

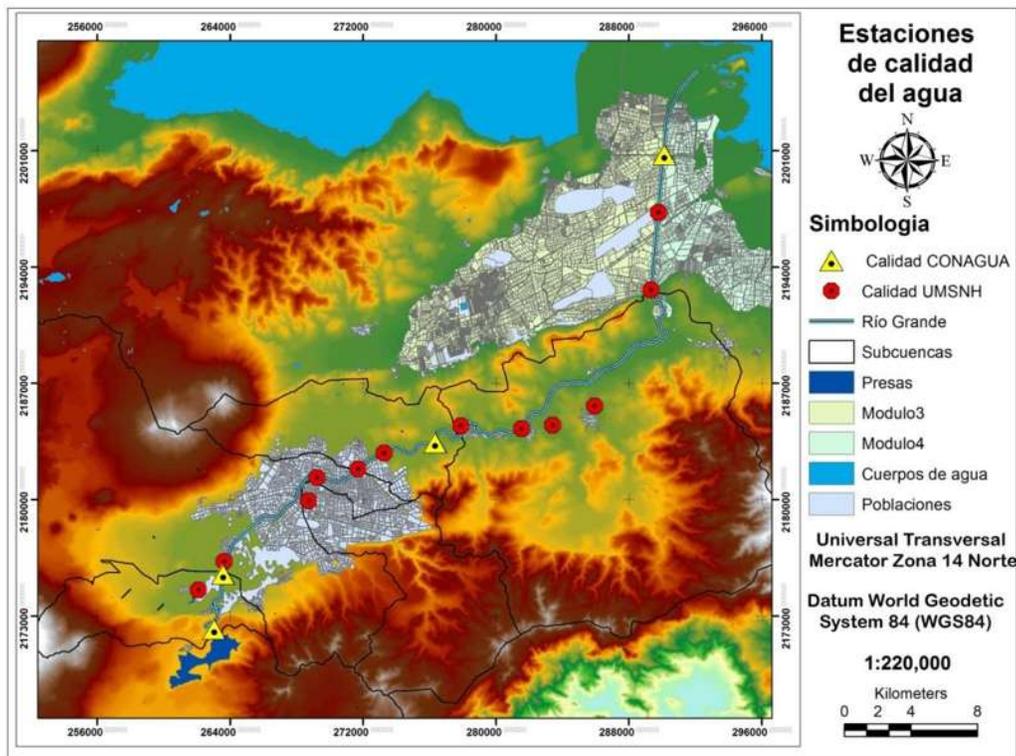


Figura 58. Estaciones de monitoreo de calidad del agua CONAGUA (2011) y Díaz (2013).



Las estaciones monitoreadas por Díaz (2013) se utilizaron para realizar los ingresos de los datos en el modelo de simulación, estos muestreos se realizaron en la temporada de estiaje (noviembre-mayo) durante el 2012 y 2013, por lo tanto es una limitación para la modelación de la calidad del agua. Por otro lado el monitoreo que realiza la CONAGUA es trimestralmente, y se tienen registros a partir del 2000 al 2010. Las estaciones monitoreadas por la Comisión Nacional del Agua, se utilizarán para la calibración y validación del modelo. El oxígeno disuelto, los sólidos sedimentables y la DBO_5 promedio para el periodo 2000-2010 (trimestral) indican una afectación importante desde el tramo 3 del río grande y hasta su desembocadura con el lago de Cuitzeo, donde se incrementa la carga de materia orgánica, así como la demanda por parte de los sedimentos (tabla 13).

Tabla 13. Parámetros de calidad del agua de las estaciones de monitoreo

Estación	O.D. (mg/L)	S.Sed. (mg/L)	DBO_5 (mg/L)
Cointzio	6.991	0.116	2.525
El frijolar	2.755	0.355	59.089
La aldea	0.126	0.929	50.414
Río Grande	0.626	0.670	36.652

8.11 Calibración Calidad

El agua en ríos, acuíferos y lagos contiene muchos materiales disueltos que dependen de las condiciones geológicas y climáticas; estos materiales definen las características químicas del agua. Las características biológicas son definidas por la flora y la fauna dentro de los cuerpos de agua. La temperatura, carga de sedimentos, y el color son características físicas de la calidad del agua. La contaminación puede ser definida como la alteración de algunos aspectos físicos, químicos o de las características biológicas del agua.

La contaminación del agua es un concepto relativo asociado a las características físicas, químicas y biológicas que impiden o dificultan su uso según las aplicaciones a las que valla destinada (Morrenis et al., 2002). Un contaminante es toda materia o energía en cualquiera de sus estados físicos y formas, que al incorporarse o actuar en el agua altere o modifique su composición, condición natural y autoreguladora (LGEEPA, 2012). Dentro de la modelación matemática ciertos constituyentes se conocen como contaminantes convencionales debido a su consideración a lo largo de la historia; estos son: el oxígeno disuelto, la materia orgánica, temperatura, salinidad, coliformes, todos los relacionados con el ciclo del nitrógeno, fosforo, algas, eutrofización, entre otros (Paredes et al., 2004).



De acuerdo a la información disponible se realizó la modelación de DBO₅ y oxígeno disuelto modificando los parámetros de degradación de materia orgánica y velocidad de sedimentación de la materia orgánica en el río con el objetivo de que la DBO₅ y el O₂ se asemejen a lo mostrado en las 4 estaciones de calidad del agua que registra CONAGUA. En las figuras 59 y 60 se muestra la calibración mensual e interanual de DBO₅ respectivamente, para la estación la aldea aguas debajo de la ciudad de Morelia (después de los retornos urbanos) donde la concentración de DBO₅ en promedio es de 64.28 mg/L. El Oxígeno por otro lado es prácticamente cero (figuras 61 y 62) con un promedio interanual de 0.03 mg/L.

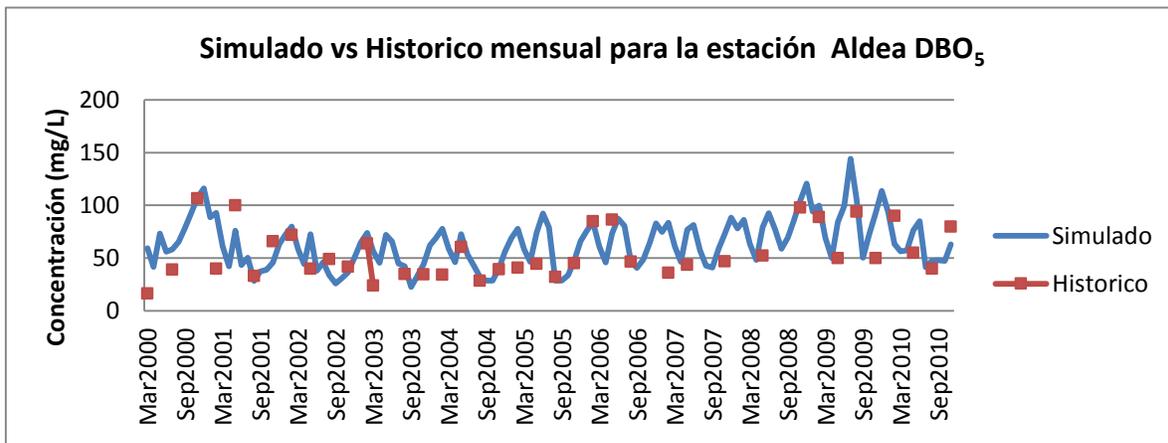


Figura 59. Calibración mensual de la DBO₅ para la estación Aldea.

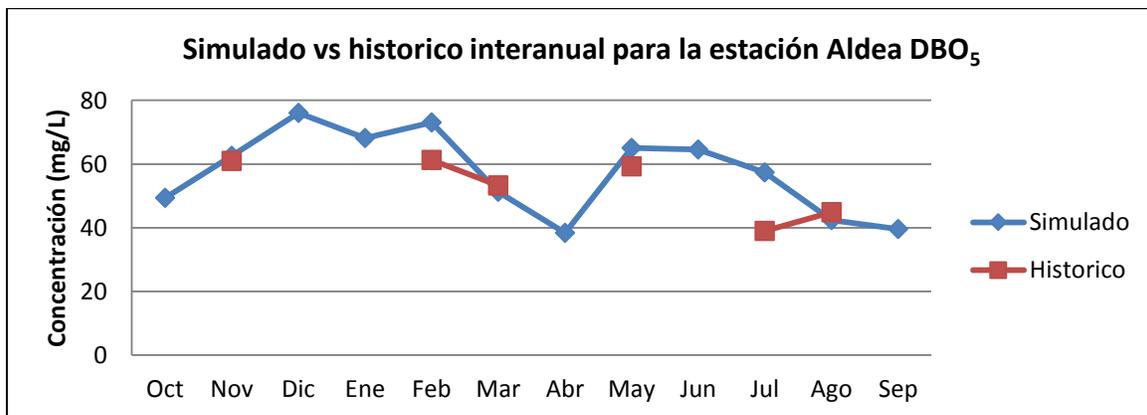


Figura 60. Calibración interanual de la DBO₅ para la estación aldea.

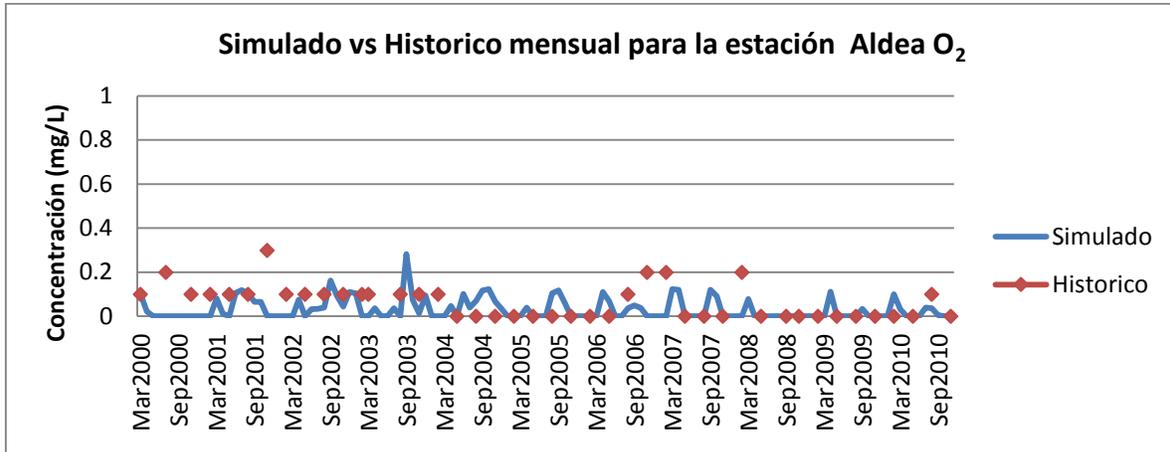


Figura 61. Calibración mensual de O₂ para la estación Aldea



Figura 62. Calibración interanual de O₂ para la estación Aldea

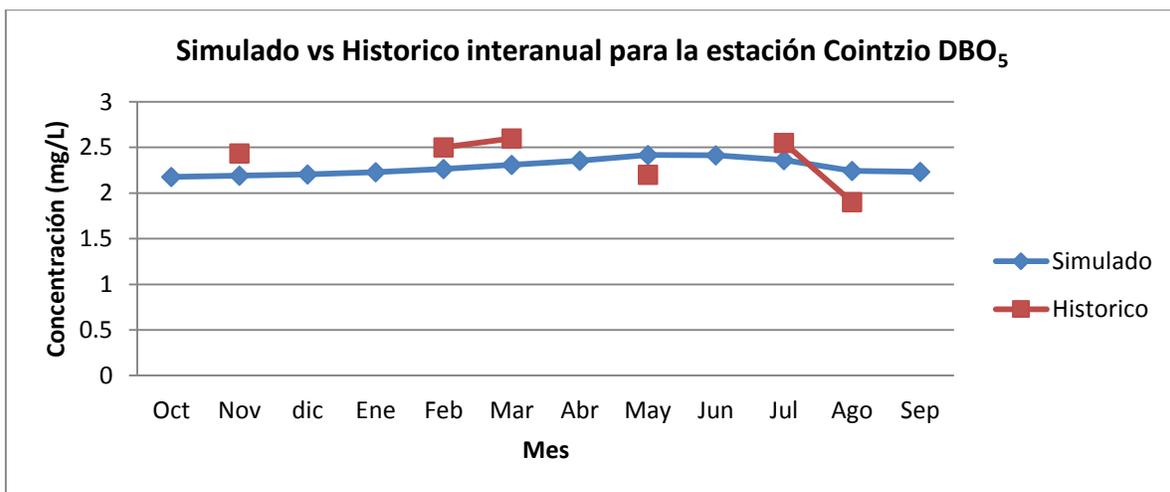


Figura 63. Calibración interanual de DBO₅ para la estación Cointzio

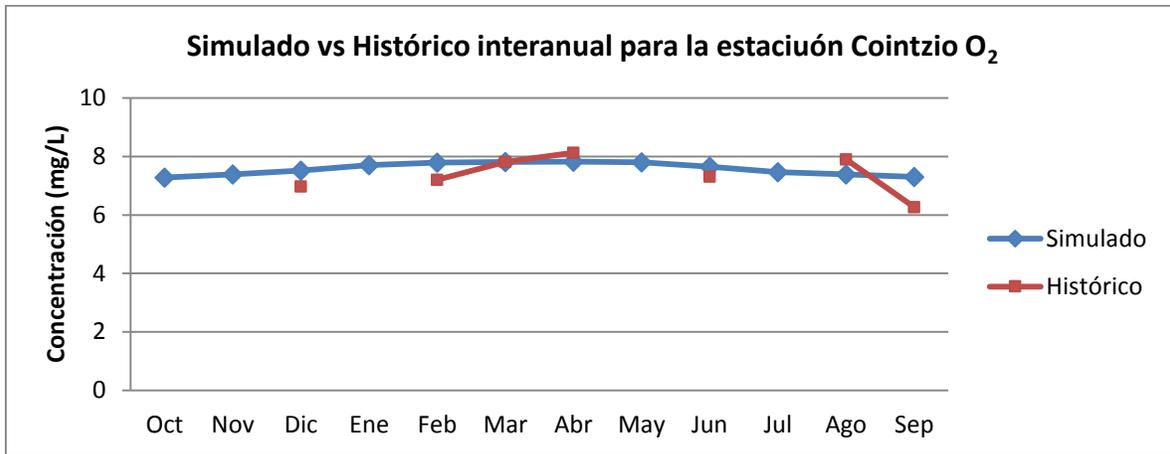


Figura 64. Calibración interanual de DBO₅ para la estación Cointzio



Figura 65. Calibración interanual de DBO₅ para la estación Frijolar

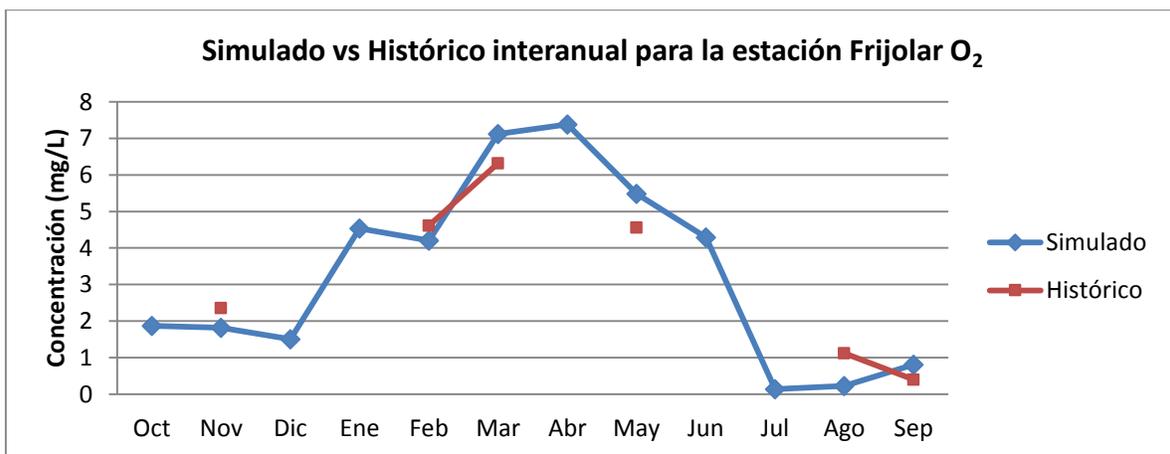


Figura 66. Calibración interanual de O₂ para la estación Frijolar

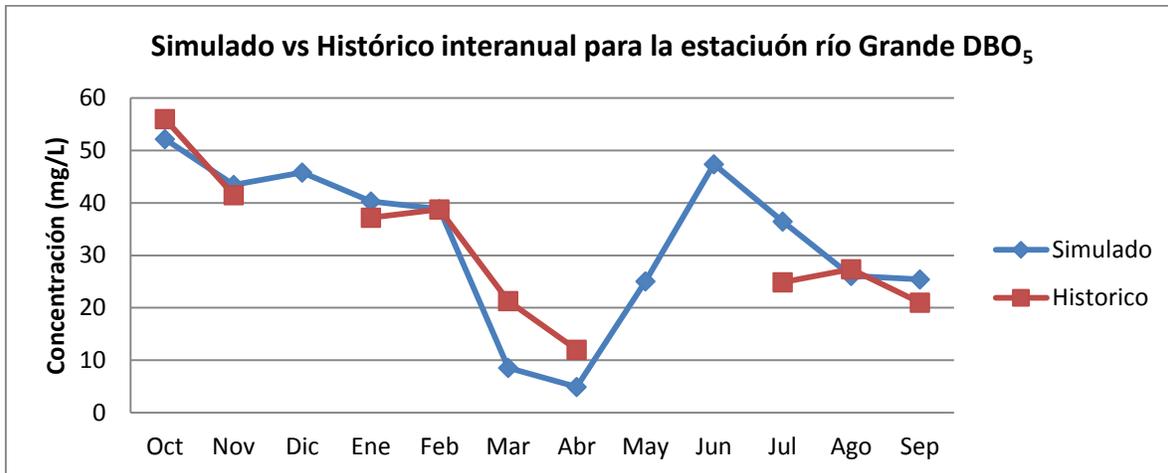


Figura 67. Calibración interanual de DBO₅ para la estación río Grande.

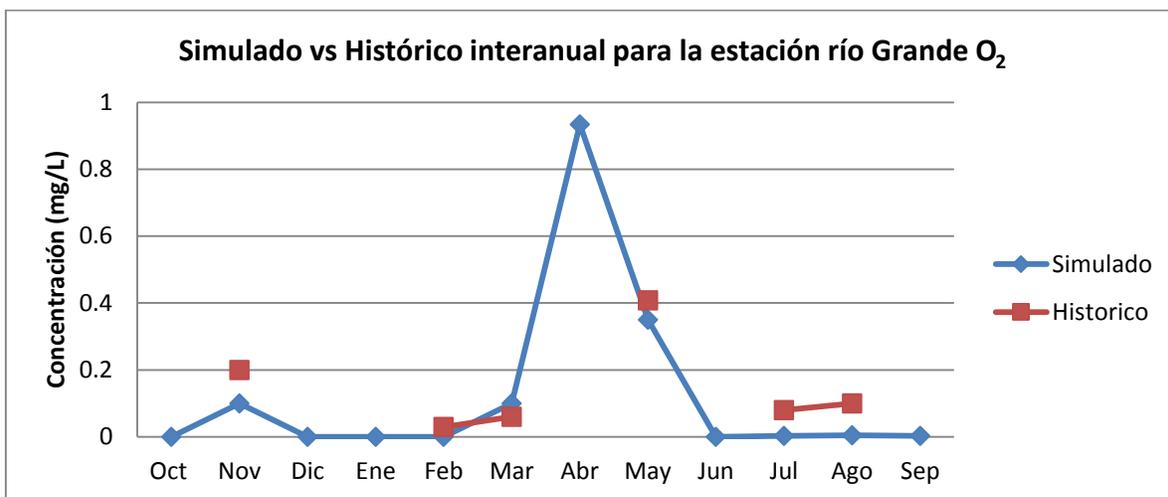


Figura 68. Calibración interanual de O₂ para la estación río Grande

En las figuras 63 a 68 se muestran las calibraciones interanuales de las estaciones analizadas, en estas se puede observar que en Cointzio las concentraciones presentan las mejores condiciones, en la estación el frijoliar la calidad del agua se ve deteriorada principalmente por la descarga de la planta papelera CEPAMISA, posteriormente se ve afectada por una serie de descargas de la ciudad de Morelia, estas se reflejan en la estación la Aldea. Finalmente antes de incorporarse al lago de Cuitzeo se encuentra la estación río Grande, esta estación es importante ya que, con esta calidad ingresa al lago de Cuitzeo. Se analizaron diferentes parámetros de calibración. En la tabla 14 se presentan dichos estadísticos, los cuales son el coeficiente de correlación (R^2), Índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (E), Error cuadrado medio (RMSE), desviación estándar (RSR) y porcentaje de parcialidad (PBIAS). En base a



estos rangos se estableció una matriz de colores para observar más fácilmente el rango en el cual se encuentran los estadísticos utilizados. Se utilizó azul para una calibración excelente, verde para calibración muy buena, amarillo para una calibración buena, mostaza cuando hay fallas, naranja cuando es muy pobre y rojo cuando la calibración no es buena. Para que se considerara una estación calibrada se aceptó solamente un parámetro se encuentre en situación de falla y todos los demás debían permanecer en el rango de calibración buena a excelente.

Los parámetros antes mencionados se determinaron para las 4 estaciones (Cointzio, Frijolar, Aldea y río Grande) de calidad del agua y para los parámetros DBO₅ y O₂. En el caso de la DBO₅ de los parámetros analizados, máximo un caso por estación se permitió que la calibración se encuentre con fallas, debido a que estos estadísticos se enfocan de una manera diferente en el error de la muestra. Solamente en las estaciones que se presentaron fallos (cercanos al límite bueno) en un parámetro fue en el Frijolar (aportaciones y retornos importantes) y el río Grande (salida al lago de Cuitzeo), además de las consideraciones y suposiciones que se realizaron y a falta de presupuesto para realizar muestreos y conocer condiciones más detalladas de las concentraciones de DBO₅ y O₂. En general se tiene un buen desempeño en los estadísticos BIAS, R², D, y PBIAS; la estación de calidad de la Aldea y Cointzio presentaron calibraciones de buenas a muy buenas (tabla 15).

En el caso del oxígeno disuelto las estaciones que presentaron mejores resultados en la modelación de la gestión de la calidad fueron, la estación frijolar y río grande con calibraciones de buenas a muy buenas, la estación Cointzio y frijolar presentaron un parámetro en condición de falla cercano al límite de bueno (tabla 15).

Tabla 14. Valoración de la calidad del agua en función de diferentes estadísticos.

Calibration	R ²	E	RSR	PBIAS
Excellent	<0.9	<0.9	0-0.25	<10
Very good	0.75-0.89	0.75-0.89	0.26-0.5	11--15
Good	0.5-0.74	0.5-0.74	0.51-0.6	16--25
Fair	0.25-0.49	0.25-0.49	0.61-0.7	26--30
Poor	0.00-0.24	0.00-0.24	0.71-0.89	31--35
Unsatisfactory	<0	<0	>0.9	>=36



Tabla 15. Calibración de DBO₅ y O₂ para las cuatro estaciones analizadas

Parámetro	DBO ₅				O ₂			
	Cointzio	Frijolar	Aldea	Río Grande	Cointzio	Frijolar	Aldea	Río Grande
BIAS	Very good	Very good	Very good	Good	Very good	Very good	Very good	Very good
R ²	Good	Good	Very good	Very good	Good	Very good	Very good	Very good
E	Good	Fair	Very good	Good	Fair	Good	Good	Good
D	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good	Good
RSR	Good	Good	Good	Fair	Good	Good	Fair	Good
PBIAS (m)	Very good	Excellent	Good	Excellent	Excellent	Excellent	Good	Good

8.12 Sistema Subterráneo

El acuífero Morelia-Queréndaro se ubica en la Región Hidrológica No. 12, zona B también pertenece a la Comisión de Cuenca Lago de Pátzcuaro desde 2004. Se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán, entre los paralelos 19° 26' y 20° 08' de latitud norte y los meridianos 100° 38' y 101° 29' de longitud oeste, abarca una superficie aproximada de 3,510 km².

Colinda al sur con Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente con los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta, en el 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).



En la zona que comprende el acuífero se han realizado ocho estudios, que van de los años 1977 al 2009. Algunos presentan con información hidrogeológica, con el objetivo de evaluar las condiciones de disponibilidad de agua en la zona. Los estudios realizados son los siguientes:

Estudio geohidrológico preliminar de la zona de Morelia - Queréndaro, Michoacán (SARH, 1977). Estudio de exploración geofísica y actividades geológicas complementarias en la zona de Morelia -Álvaro obregón, Michoacán (SARH, 1988). Estudio geohidrológico cuantitativo del acuífero Morelia-Queréndaro, Michoacán. (CNA, 1990). Estudio de diagnóstico de las condiciones geohidrológicas actuales y análisis de alternativas de operación del acuífero de Morelia-Queréndaro, Michoacán (CNA, 1993). Registros de litología, acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1995). Registros de piezometría, acuífero Morelia-Queréndaro (CNA, 1997). Estudio geohidrológico de la zona sur-poniente de Morelia (OOAPAS, 2006). Actualización hidrogeológica de los acuíferos: Maravatio – Contepec - Epitacio Huerta, Zacapu, Morelia-Queréndaro y Pastor Ortiz, en el estado de Michoacán (IMTA 2007). Determinación de la disponibilidad de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), estado de Michoacán (CONAGUA 2009a). Modelación del acuífero Morelia Querendaro Con AQUIVAL (2013).

Los resultados y conclusiones de los últimos dos estudios estudio fueron la base para la elaboración del presente documento, más sin embargo se analizó toda la información que pudiera ser valiosa en los estudios antes presentados, para tener una mejor idea del funcionamiento del acuífero Morelia-Queréndaro.

8.12.1 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 alledaña 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 un 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.

El acuífero Morelia-Queréndaro se puede clasificar de la siguiente manera:

Acuífero del Valle de Morelia.-Este valle se ubica en la porción poniente de la faja de lomas y valles; su sistema acuífero está alojado principalmente en tobas pumíticas con horizontes líticos y arcillosos y tobas soldadas o ignimbritas fracturadas y alteradas, así como también en derrames basálticos y flujos piroclásticos, depósitos lacustres y tobas pumíticas. Recibe recarga principalmente horizontal de las partes altas, además de la precipitación e infiltración de la zona y de la red de canales del Módulo 1 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro. Presenta descargas naturales por medio del manantial Mintzita y San Miguel principalmente.

Acuífero de la planicie de Álvaro Obregón-Queréndaro.- El acuífero de este valle es el de mayor área en la zona de estudio, tanto en extensión superficial, así como en espesor, el cual aumenta hacia el lago de Cuitzeo. Las rocas que se alojan son variables, pero por lo general en su porción superior son clásticas y del tamaño de gravas y arenas; se alojan también basaltos y tobas pumíticas, en las laderas centro y norte; en las laderas sur se encuentran los clásticos y lacustres los cuales suprayacen a las andesitas basálticas Miocénicas, lo que propicia un semiconfinamiento, al igual que en la cabecera del valle. Este acuífero tiene importantes recargas tanto de los acuíferos de la zona de Morelia, los acuíferos de la zona



contigua del lago de Cuitzeo y por transferencias laterales de las zonas altas, también tiene una importante recarga por la precipitación, por los retornos de la zona urbana y por los retornos y red de canales de los Módulos 2, 3, 4 y 5 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro.

Acuífero en la zona contigua al lago de Cuitzeo.- Este acuífero está formado principalmente por brechas andesíticas en la porción sur del Lago de Cuitzeo, con distribución espacial muy irregular y a lo largo de fallas, como el relleno de la fosa tectónica, de espesor variable, derrames y efusiones basálticas, así como brechas y cenizas de la misma composición que afloran al norte y noreste del Lago. Su recarga proviene de la infiltración por lluvia, constituido por las rocas volcánicas, a través del fracturamiento que presentan, el flujo escurre hacia el lago de Cuitzeo en donde ocurre la descarga natural, también presenta salidas por evapotranspiraciones donde los niveles piezométricos se encuentran a menos de 10 m de profundidad y por medio de manantiales.

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), es de 162.2 hm³/año.

Por otro lado y según datos del INEGI, (2010) de la población que se encuentra en el área de estudio el municipio más importante es Morelia, la cabecera municipal cuenta con 650142 habitantes para el año 2010, por su parte el municipio de Tarímbaro cuenta con 78623 habitantes, estos dos municipios son los que concentran el mayor número de población del área de estudio, el resto de los municipios se encuentran en un rango que va desde los 321 habitantes correspondientes a solo una pequeña parte del municipio de Lagunillas, hasta los 42000 habitantes para el municipio de Zinapécuaro.

La población para el acuífero en los últimos 20 años se ha incrementado de manera considerable. Para el año 1990 el acuífero Morelia-Queréndaro contaba con 668695 habitantes, incrementándose en un 13% para el año 1995, en el 2000 se incrementó un 17%. Para el año 2005 la población alcanzó un 28% y finalmente para el 2010 el porcentaje que se alcanzó fue de 40% llegando así a los 937802 habitantes. La población en el acuífero se está



incrementando de manera importante, lo que implica un aumento en la demanda urbana, y debido a que el abastecimiento a esta demanda tiene la mayor prioridad, será de vital importancia su evolución ante el cambio climático.

8.12.2 Calibración de sistema subterráneo

La modelación del acuífero Morelia-Queréndaro es necesaria para la estimación de los niveles piezométricos en el acuífero, así como para ver su evolución a lo largo del tiempo, incluyendo los efectos del cambio climático. Al igual que en las aportaciones es necesario una calibración donde están interactuando todas las recargas, así como todos los bombeos realizados en el acuífero y además debemos conocer los niveles piezométricos para poder calibrar el acuífero. Una vez calibrado será posible ver el funcionamiento del acuífero y la disminución de los niveles para el periodo de años que se desee estimar.

De acuerdo a los intereses de la modelación del acuífero Morelia-Queréndaro, que son los niveles piezométricos en la zona de Morelia y el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro incluyendo el cambio climático; es necesario realizar ciertas hipótesis y la discretización del acuífero, tratando de alcanzar los objetivos y para no trabajar innecesariamente en la modelación, ya que requiere de trabajo arduo para la calibración del modelo.

El acuífero se definió considerando las condiciones reales que se presentan a continuación. La malla se discretizó de 3000 metros de largo y 3000 metros, se consideró zona de flujo horizontal en 235 celdas teniendo un área total de 2115 km². La totalidad del lago de Cuitzeo se considera de nivel constante tiene importantes entradas de gasto de la cuenca del río Grande de Morelia, la cuenca del río Queréndaro Zinapécuaro y zonas aledañas al lago. La dirección del flujo subterráneo se realiza predominantemente en dirección del lago de Cuitzeo. Recibe recarga horizontal a través de 13 canales de las zonas altas de del acuífero y posiblemente de los acuíferos colindantes que son: los acuíferos Ciénega Prieta-Morelón y Lago de Cuitzeo ubicados al norte en el estado de Guanajuato, los acuíferos Pastor Ortiz-La Piedad, Zacapu y Lagunillas-Pátzcuaro localizados al poniente, al sur recibe recarga de los acuíferos Tacámbaro-Turicato y Huetamo y al oriente de los acuíferos, Ciudad Hidalgo-Tuxpan y Maravatio-Contepec-Epitacio Huerta (figura 69), en el estado de Michoacán. (CONAGUA 2009a).

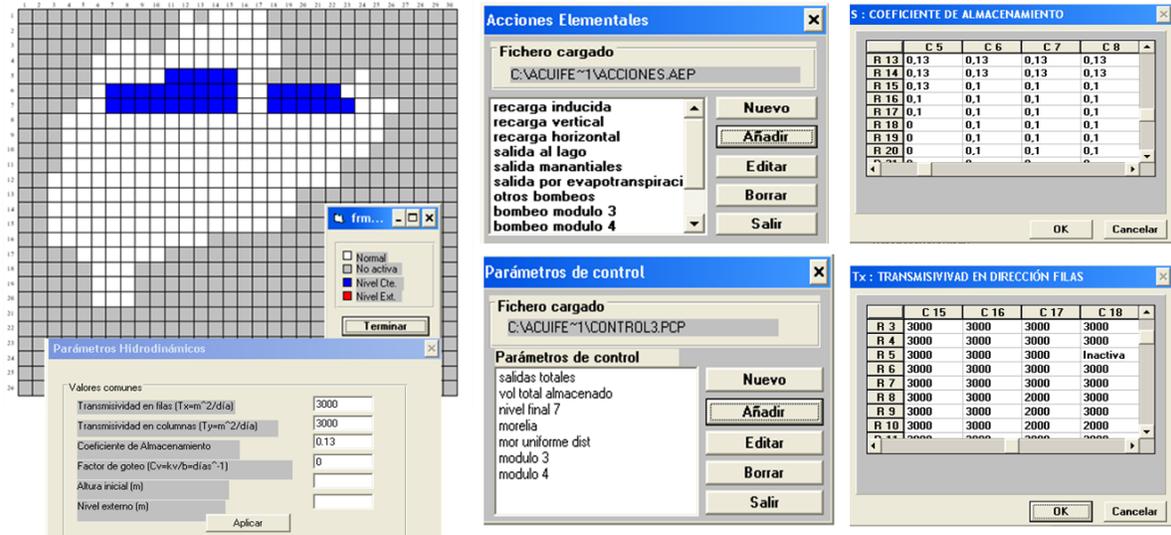


Figura 69. Acuífero Morelia-Queréndaro discretización en AQUIVAL.

El acuífero Morelia-Queréndaro se considera de manera general de tipo libre; de acuerdo con la información geológica, geofísica, hidrogeológica y cortes litológicos de pozos, es posible determinar la existencia de un acuífero heterogéneo y anisótropo, cuenta con condiciones locales de semiconfinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. Se considera un nivel de referencia 0 en la celda 7-8 localizada en el lago de Cuitzeo con una elevación constante de 1795.4 msnm.

Tabla 16. Intensidades mensuales y anuales en promedio anual para las diferentes acciones elementales ejercidas sobre el acuífero Morelia-Queréndaro

Mes	Recarga Inducida (hm ³)	Recarga Horizontal (hm ³)	Recarga vertical (hm ³)	Salidas al lago (hm ³)	Salidas por manantial (hm ³)	Evapotranspiración (hm ³)
Octubre	3.208	7.333	4.892	-0.275	-0.777	-5.350
Noviembre	3.208	7.333	0.074	-0.275	-0.777	-5.350
Diciembre	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Enero	3.208	7.333	1.051	-0.275	-0.777	-5.350
Febrero	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Marzo	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Abril	3.208	7.333	0.000	-0.275	-0.777	-5.350
Mayo	3.208	7.333	0.078	-0.275	-0.777	-5.350
Junio	3.208	7.333	20.345	-0.275	-0.777	-5.350
Julio	3.208	7.333	45.773	-0.275	-0.777	-5.350
Agosto	3.208	7.333	50.661	-0.275	-0.777	-5.350
Septiembre	3.208	7.333	38.843	-0.275	-0.777	-5.350
Σ=	38.500	88.000	161.717	-3.300	-9.324	-64.200



Tabla 16. Continuación

Mes	Otros bombeos (hm ³)	Módulo 3 (hm ³)	Módulo 4 (hm ³)	Morelia (hm ³)	Mintzita (hm ³)	CEPAMISA (hm ³)
Octubre	-10.607	-0.390	-0.020	-2.500	-2.952	-1.296
Noviembre	-10.555	-0.376	-0.087	-2.500	-2.952	-1.296
Diciembre	-10.276	-0.646	-0.094	-2.500	-2.952	-1.296
Enero	-9.076	-1.864	-0.076	-2.500	-2.952	-1.296
Febrero	-9.154	-1.706	-0.156	-2.500	-2.952	-1.296
Marzo	-10.873	-0.083	-0.061	-2.500	-2.952	-1.296
Abril	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Mayo	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Junio	-10.863	-0.153	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Julio	-11.017	0.000	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Agosto	-10.979	-0.037	0.000	-2.500	-2.952	-1.296
Septiembre	-10.675	-0.294	-0.048	-2.500	-2.952	-1.296
$\Sigma=$	-126.109	-5.549	-0.542	-30.000	-35.424	-15.552

En el acuífero se consideraron todas las acciones elementales presentes, las cuales presentan un volumen de extracción o recarga al acuífero, estas se presentan en la tabla 16 y se presentan en hectómetros cúbicos 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.

Para la simulación en AQUIVAL se inició con los datos promedio de transmisividad y coeficiente de almacenamientos presentados en estudios previos, posteriormente para su calibración se modificaron los coeficientes de almacenamiento y transmisibilidad para encontrar un mejor comportamiento en el acuífero y en las zonas de interés.

Para la calibración se utilizaron los valores de los últimos años teniendo en cuenta que la información obtenida es muy poca más sin embargo se trató de representar lo mejor posible la realidad. Cuando son adoptados valores de transmisividad de 3000 m²/día en las celdas de modelo (tanto en X como Y para la todo el acuífero excepto el Módulo 3 y el Módulo 4 del Distrito de Riego que se utilizaron valores de 2000 m²/día en x e y , y un coeficiente de almacenamiento promedio de 0.13 para la zona de Morelia, 0.15 para los distritos de riego y 0.135 para el resto del acuífero , se observó que el modelo del acuífero Morelia-Queréndaro en AQUIVAL evoluciona de manera similar a la piezometría registrada en la zona de estudio.



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.

En la ciudad de Morelia se calibraron diferentes zonas de acuerdo a la información de diferentes pozos, como el de la colonia López Mateos que cuenta con registros de los años 1990, 1999, 2003 y 2005, en base a esta información se calibro el acuífero para esta zona (figura 70), la pendiente promedio de descenso para esta celda es de 7.723 cm/mes con un descenso de 38.6 m desde 1969 a 2010. Para la celda concerniente a Villa universidad se tiene información de los años 1980, 1992 y 2003 (figura 71), donde se observa que la tendencia es la disminución del nivel estático en una pendiente de 7.439 cm/mes y un descenso de más de 37 m desde 1969. Indaparapeo (figura 72) al igual que en la ciudad de Morelia presenta descensos importantes pero menores al de la ciudad de Morelia, la pendiente de descenso para esta celda es de 6.872 cm/mes y el descenso de 1969 a 2012 es de 35.8 m (datos de calibración 2007 y 2012).

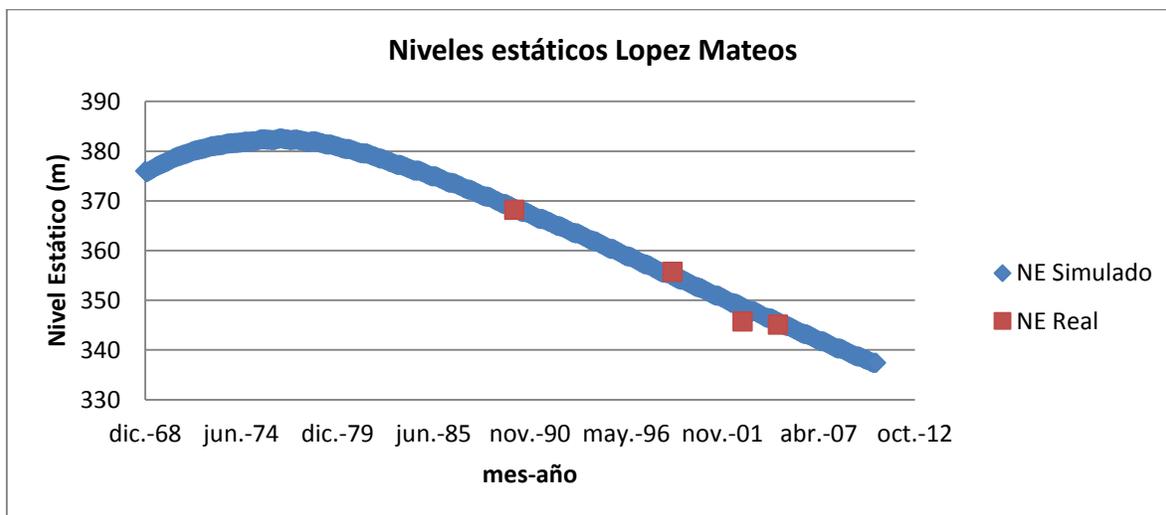


Figura 70. Nivel estático simulado y real para la Celda concerniente a la Colonia López Mateos.

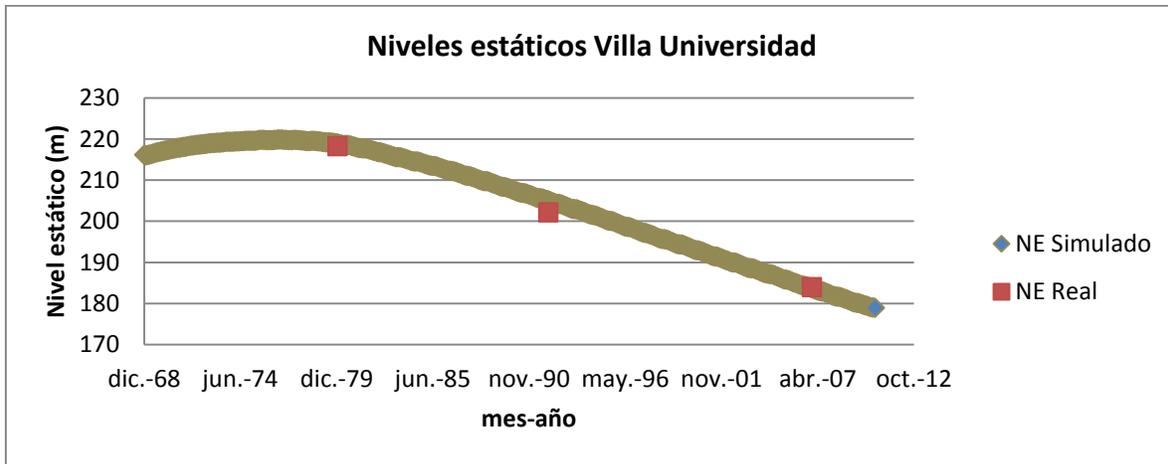


Figura 71. Nivel estático simulado y real para la Celda concerniente a la Colonia Villa Universidad.

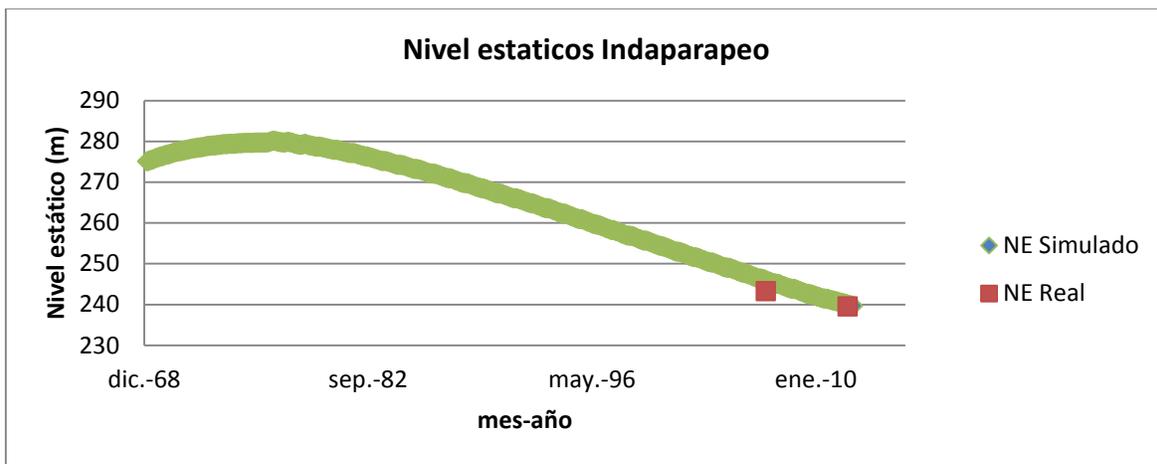


Figura 72. Nivel estático simulado y real para la Celda Indaparapeo.

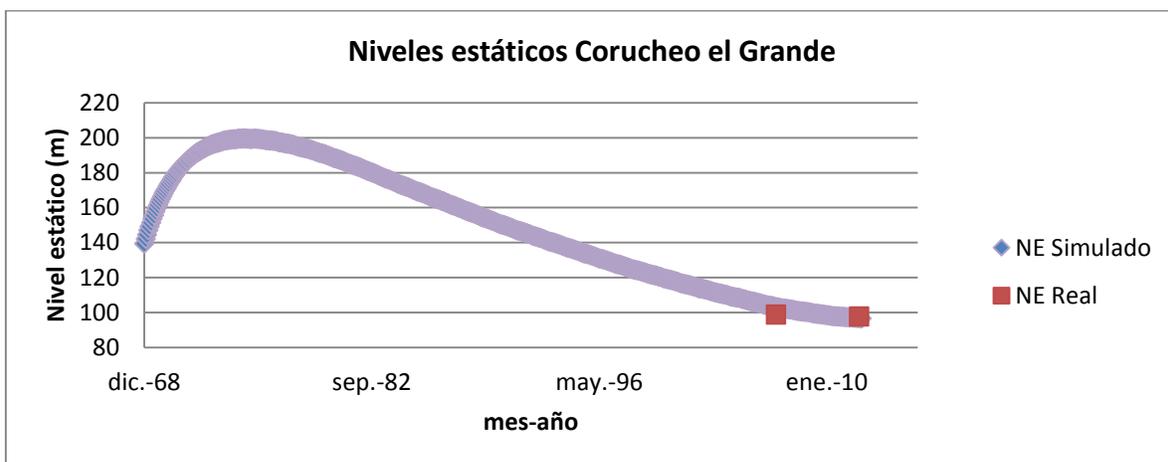


Figura 73. Nivel estático simulado y real para la Celda Corucho el Grande.



En caso de la celda correspondiente a Corucheo el grande se calibro con los años 2007 y 2012, el descenso correspondiente a los años 1969 a 2012 es de 42.9 m con una pendiente de descenso mensual de 8.238 cm (figura 73).

Hay otros parámetros de control que se realizaron en el acuífero como el descenso generalizado para la ciudad de Morelia, para el Modulo 3 y Modulo 4 del distrito de riego 020 Morelia Queréndaro (figura 74) y el descenso generalizado para el acuífero. Estas acciones servirán para conocer la evolución espacial y temporal a nivel regional para conocer los descensos en el acuífero. La ciudad de Morelia presenta un abatimiento promedio de 37.67 m desde 1969, lo cual indica un descenso anual de 090.4 cm y mensual de 7.534 cm. En el caso del Modulo 3 del distrito de riego el descenso anual es de 37.647 cm y mensual de 3.137 cm esto debido a la cercanía con el lago y que el flujo subterráneo es con dirección al lago. El Modulo 4 presenta descensos de 47.758cm/año y 3.965 cm/año, a pesar de no tener un gran abatimiento estos descensos son importantes debido a la cercanía con el lago de Cuitzeo y a la conexión con el Lago. Por lo tanto estos cambios pueden ocasionar que el acuífero pierda conexión con el lago, provocando perdida de volumen en el lago adicional a la que se puede ver afectada por el escurrimiento superficial. Estas zonas son de importancia para el presente estudio y se incorporaron para los efectos del cambio climático en el sistema de recursos hídricos.

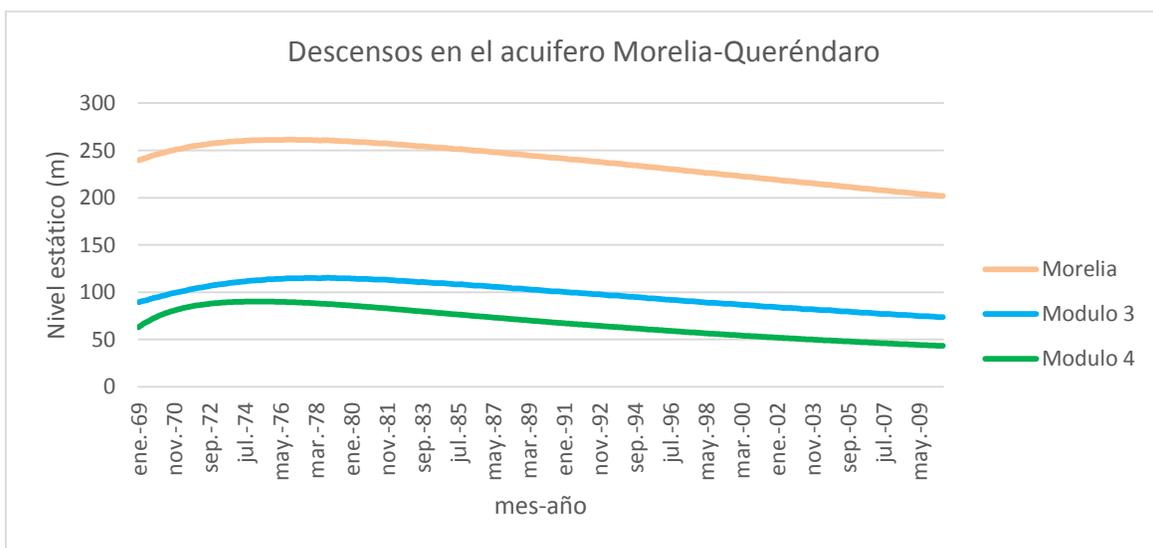


Figura 74. Descensos promedio para diferentes zonas de interés en el acuífero.



8.13 Escenarios de cambio climático

Los Modelos de Circulación General Atmosfera Océano Atmosfera (MCGAO-A) regionalizados parten de los resultados del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC), en su Cuarto Informe de Evaluación (AR4, 2007). El INE (2007) presenta de más de 20 MCGAO-A usados por el IPCC, con una o más realizaciones cada uno, y con la aplicación del método estadístico, permite que se tengan entre 50 y 90 experimentos de escenarios de cambio climático regionalizados para México, considerando escenarios de emisiones de GEI (A2, A1B y B1) con lo cual se ha podido estimar el rango de cambios en temperatura y precipitación, de la misma forma como lo presentó el IPCC en el AR4.

Los escenarios disponibles presentan cambios mensuales para la precipitación en % y para la temperatura en °C, para el periodo 2000 a 2099. Las estaciones de cambio climático establecidas para México regionalizadas se encuentran a una distancia aproximada de 50 km distribuidos en una malla regular (figura 76). Los escenarios disponibles presentan cambios mensuales para la precipitación en % y para la temperatura en °C, para el periodo 2000 a 2099. Para el análisis se establecieron periodos de 30 años ya que se ha considerado que en este periodo de tiempo se alcanza una mayor confianza de ocurrencia de los fenómenos e impactos de cambio climático (INE, 2007).

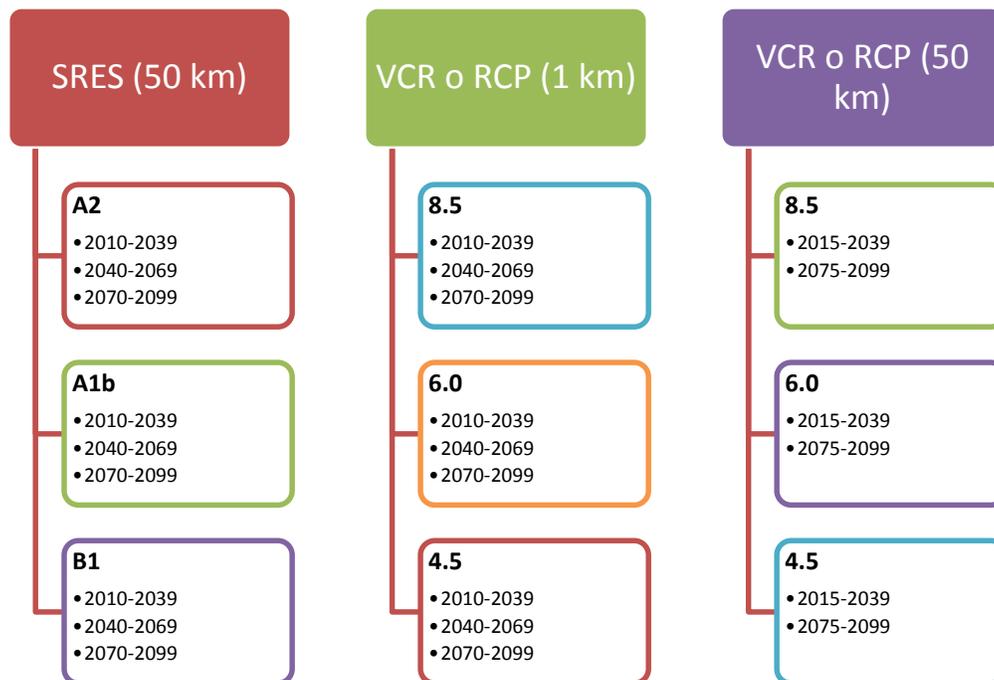


Figura 75. Escenarios de cambio climático SRES y VCR o RCP



Los escenarios RCP se tienen periodos de 25 y años para un futuro cercano (2015-2039) y para un futuro lejano (2075-2099) los cuales se presentaran en el AR5 a finales del 2013. De estos escenarios se analizaron 2 resoluciones diferentes 50 km los proporcionados por el Instituto Nacional de Ecología y Cambio Climático (<http://escenarios.inecc.gob.mx>) y resolución de 1 km (30 años), en la figura 77 se observa un ejemplo de la resolución. Estos escenarios fueron elaborados por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) por sus siglas en inglés, en el Proyecto Research on Forest Climate Change: Potential Effects of Global Warming on Forests and Plant Climate Relationships in Western North America and Mexico, (<http://forest.moscowfsl.wsu.edu/climate>). En la figura 75 se presentan los diferentes escenarios y resoluciones analizados. Las principales diferencias entre los escenarios RCP y los SRES se presentan a continuación.

- Los escenarios RCP tienen menor varianza temporal de la temperatura y siempre positiva, mientras que los escenarios SRES presentan mayor varianza incluso disminuyendo la temperatura en los meses julio a octubre.
- Los escenarios RCP presentan anomalías mayores en la temperatura media a finales de siglo
- Los escenarios SRES en la temperatura media no superan los 4°C y los RCP no supera los 5°C..

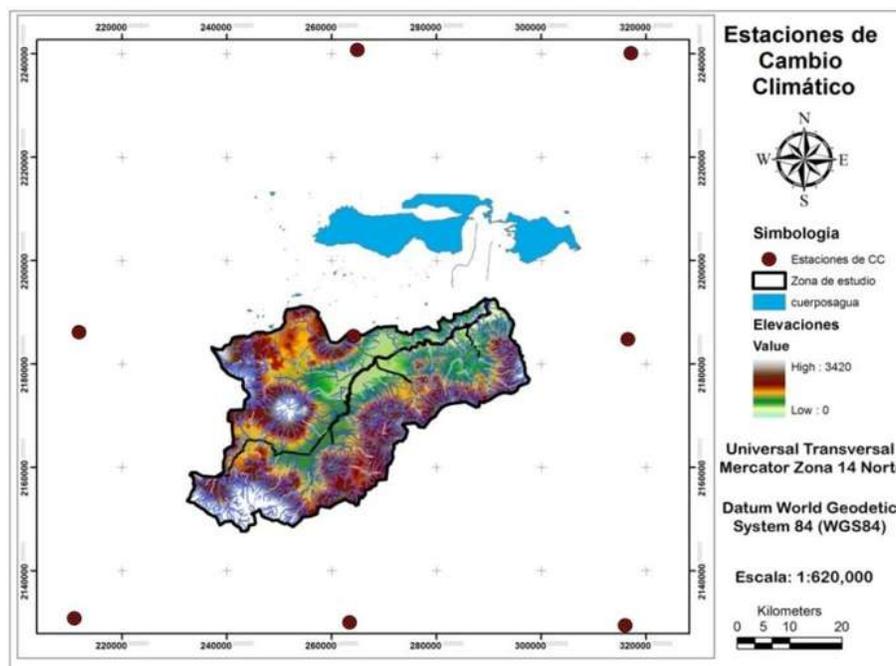


Figura 76. Estaciones de cambio climático. INE (2007 y 2012)

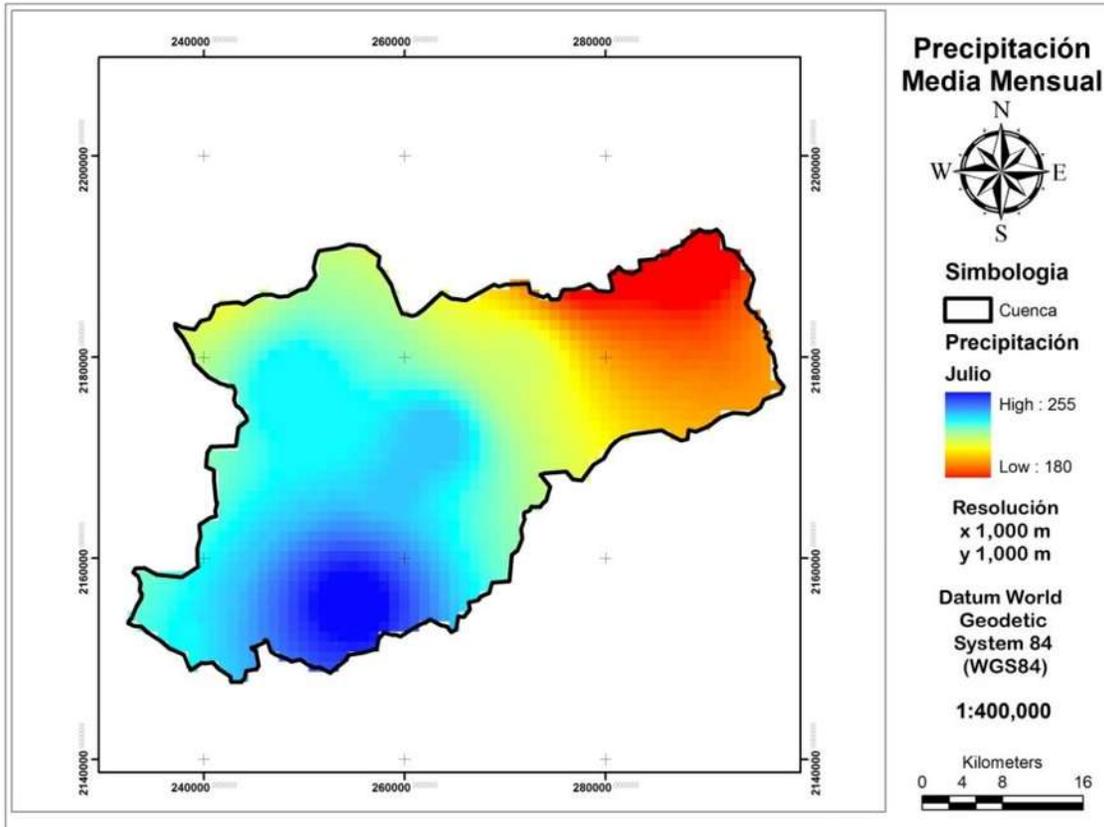


Figura 77. Mapa de precipitación media mensual, resolución espacial de los escenarios elaborados por la USDA, (2012).

8.14 Evidencia del cambio climático

La información de las temperaturas para las estaciones de calidad del agua ha sido obtenida de la Comisión Nacional del agua. Se realizó por lo tanto un análisis de correlación entre la temperatura ambiente y la temperatura del río para determinar la relación de la temperatura del río con respecto a la temperatura ambiente, ya que de esta última se tienen registros completos tanto del periodo histórico como de los diferentes escenarios de cambio climático (RCP con resolución espacial de 1 km, RCP con resolución espacial de 50 km y SRES con resolución espacial de 50 km).

De acuerdo a los resultados del análisis estadístico la temperatura en la cuenca del río grande en la cabecera (Cointzio) no presenta incrementos significativos de acuerdo al análisis de varianza con un grado de confianza del 95%. En el caso de las estaciones siguientes el análisis temporal indica que son significativamente diferentes, el cambio es más notorio y la temperatura del cauce tiene una tendencia con incrementos de 0.3 a 1 °C en los últimos 10 años (figura 78 y 79).

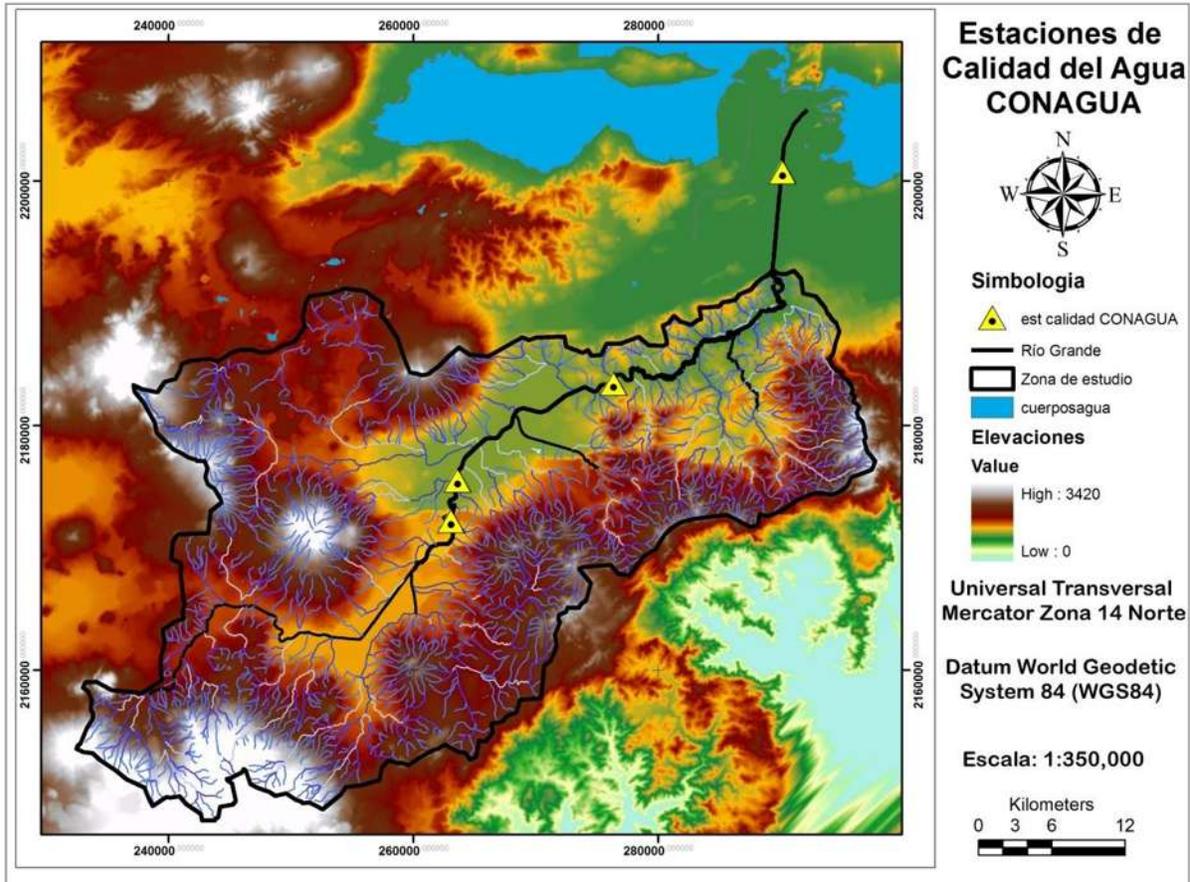


Figura 78. Estaciones de calidad del agua monitoreadas por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA 2012).

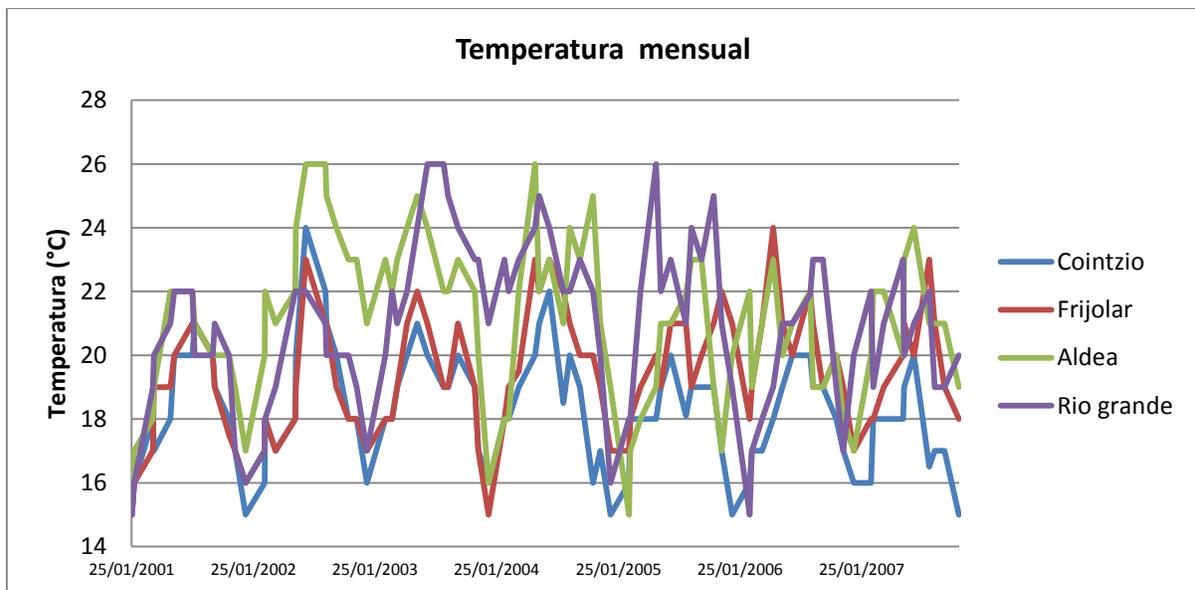


Figura 79. Temperatura mensual 2001-2008 de las estaciones de calidad del agua (CONAGUA, 2012).



Al correlacionar los datos de temperatura del cauce con la temperatura ambiente de los últimos 10 años se observó que la temperatura del ambiente es muy similar a la temperatura del río, las ecuaciones de las regresiones para las diferentes estaciones se ajustan en un 99.9% y los resultados de regresión indican que la temperatura media del río es igual en el caso de la estación Cointzio, y en las otras estaciones la temperatura del río es menor que la temperatura ambiente entre un 7 y un 20% (figura 80).

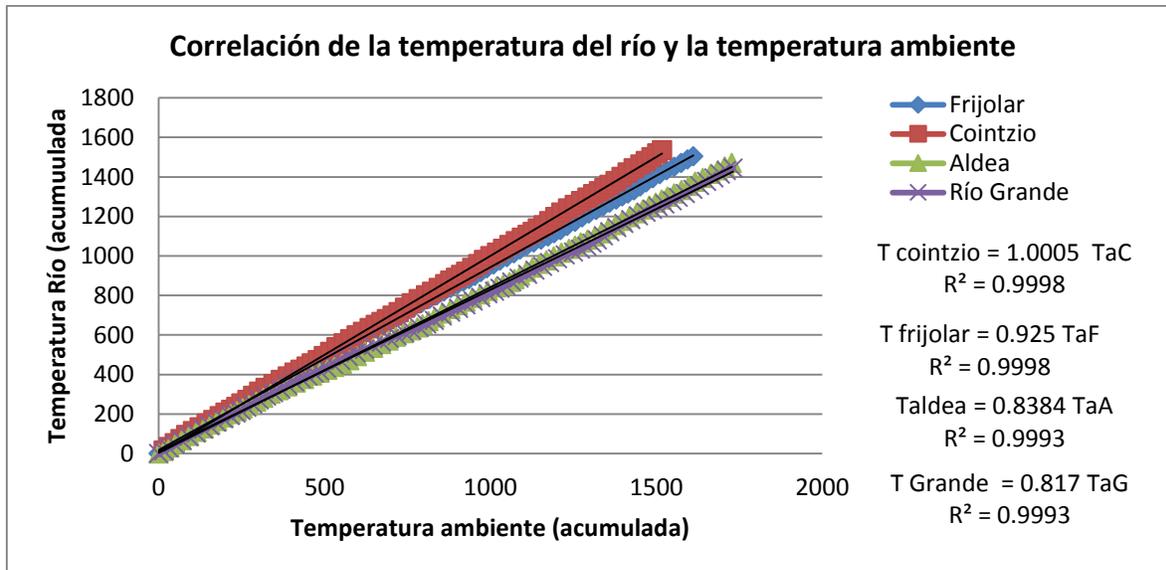


Figura 80. Correlación de la temperatura ambiente y la temperatura de las estaciones de calidad del río grande de Morelia.

8.15 Proyección de la temperatura para las estaciones de calidad del agua.

Para el análisis se establecieron periodos de 25 y 30 años ya que se considera que en este periodo de tiempo se alcanza una mayor confianza de ocurrencia de los fenómenos e impactos de cambio climático, además de que los escenarios de cambio regionales se realizaron para este mismo periodo de tiempo (INE 2007, 2012), para calibración 20 años y 5 y 10 años para la validación. Por tales motivos se proponen los siguientes escenarios y climatologías para la temperatura media mensual de los escenarios SRES: A2 2010-2039, A2 2040-2069, A2 2070-2099, A1b 2010-2039, A1b 2040-2069, A1b 2070-2099, B1 2010-2039, B1 2040-2069 y B1 2070-2099. Por otro lado los escenarios actuales se dividen en 3 RCP 4.5 2015-2039, RCP 4.5 2075-2099, RCP 6.0 2015-2039, RCP 6.0 2075-2099, RCP 8.5 2015-2039, RCP 8.5 2075-2099. Los resultados indican que las temperaturas son más drásticas en los escenarios RCP y presentan mayor varianza en los escenarios SRES, el escenario más crítico es el RCP 8.5 2075-2099, después es escenario A2 2070-2099, el RCP



6.0, y el RCP 4.5. El escenario más optimista es el B1 en los tres periodos de tiempos analizados (tablas 17 y 18).

Tabla 17. Incremento de la temperatura media anual mediante los escenarios SRES.

Estación	A2			A1b			B1		
	2010 2039	2040 2069	2070 2099	2010 2039	2040 2069	2070 2099	2010 2039	2040 2069	2070 2099
Cointzio	0.799	1.586	2.757	0.240	0.719	1.206	0.748	1.223	1.633
El frijolar	0.875	1.738	3.02	0.263	0.788	1.321	0.820	1.340	1.789
La aldea	0.905	1.797	3.124	0.272	0.815	1.367	0.848	1.386	1.850
Río grande	0.768	1.665	2.947	0.618	1.265	2.013	0.722	1.167	1.624

Tabla 18. Incremento de la temperatura media anual mediante los escenarios RCP

Estación	RCP 2015-2039			RCP 2075-2099		
	4.5	6.0	8.5	4.5	6.0	8.5
Cointzio	1.220	1.222	1.343	2.437	3.041	4.537
Frijolar	1.222	1.228	1.355	2.443	3.051	4.576
Aldea	1.221	1.229	1.349	2.439	3.053	4.558
Río Grande	1.215	1.223	1.318	2.411	3.052	4.442

En la figura 81 se presentan los 9 escenarios de anomalías de temperatura en el caso de la estación río grande, se puede apreciar que el escenario SRES A2 estima los mayores incrementos de la temperatura, seguido del B1 el cual tiene cambios pequeños pero siempre positivos, y el escenario A1b por otro lado presenta las anomalías tanto positivas como negativas, lo que implica un promedio anual menor más sin embargo las condiciones serán más extremas.

En el caso de los escenarios RCP los incrementos de temperatura tienen la misma tendencia siendo el escenario más crítico el RCP 8.5 2075-2099 con incrementos de hasta 4.6 °C para la cuenca en estudio, el escenario intermedio es el 6.0 2075-2099 con incrementos de 3°C y el menos crítico el RCP 4.5 2075-2099 con incrementos en el orden de los 2.4 °C para la cuenca de río Grande de Morelia, estos mismos escenarios en el periodo 2015-2039 los incrementos son similares y todos se encuentran en el orden de 1.2 °C a 1.4°C (figura 82).

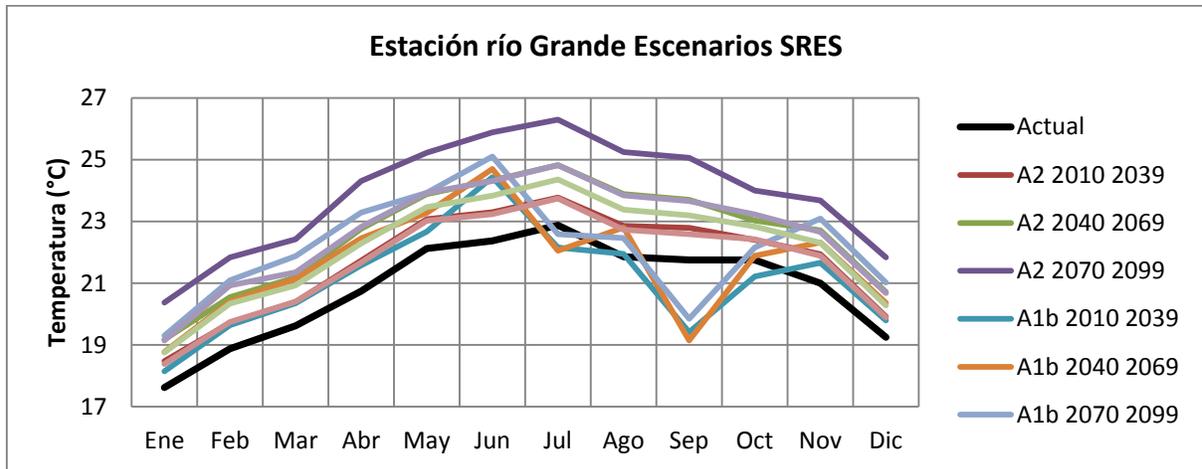


Figura 81. Temperatura futura en la estación del río grande para los diferentes escenarios de cambio climático SRES.

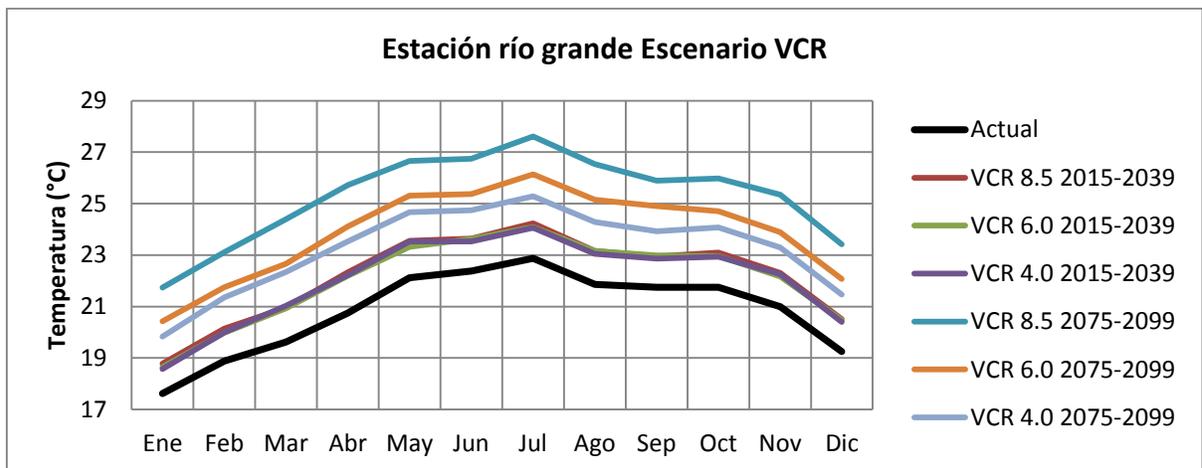


Figura 82. Temperatura futura en la estación del río grande para los diferentes escenarios de cambio climático VCR.

8.16 Efecto del cambio climático en los escurrimientos superficiales

Los escurrimientos superficiales condicionan la disponibilidad media anual del recurso hídrico, en todos los escenarios analizados, las aportaciones disminuyeron sobre todo en los meses con mayor escurrimiento (julio-octubre), en las figuras 83 84 y 85 se presentan los resúmenes de las aportaciones que llegan a la presa Cointzio para finales de siglo, en todos los escenarios en estudio. Las principales diferencias entre los escenarios para los escurrimientos son en la distribución interanual (importante para la disponibilidad mensual), los escenarios RCP de resolución de 50 km tiene el mayor decremento en el mes de agosto y en la resolución de 1 km para los mismos escenarios el decremento es similar en el año, esto se debe a que los primeros son una serie temporal (de mucho menor resolución) y los



segundos son mejores espacialmente pero no presentan serie temporal (1 valor por cada 30 años por mes). Por otro lado los escenarios SRES son más variables, el A2 es el más crítico, el A1b el promedio y el B1 los efectos son mínimos.

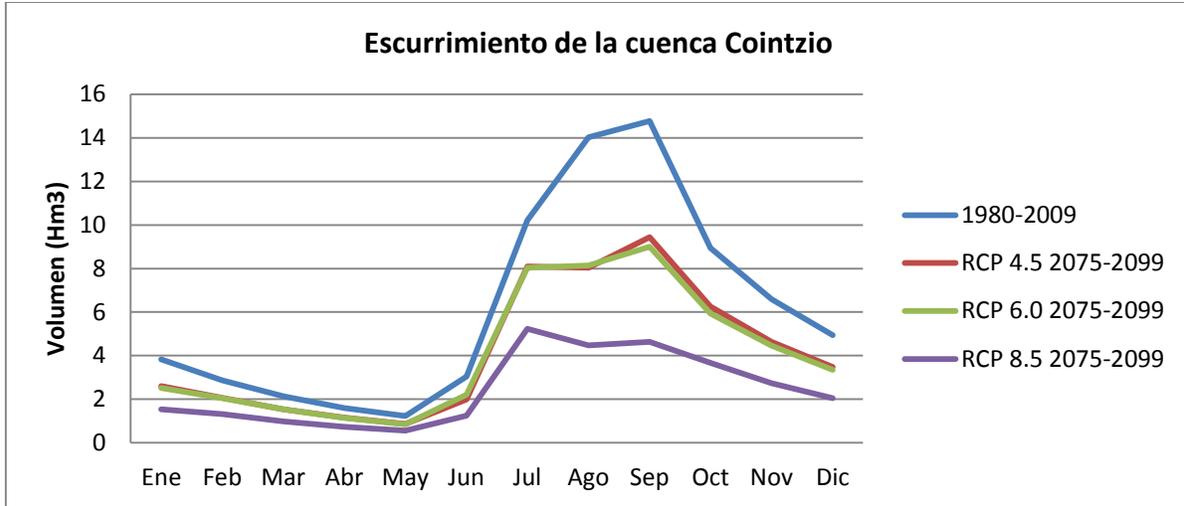


Figura 83. Escurrimientos de la cuenca Cointzio para los escenarios RCP o VCR (resolución 50 km).

Respecto al volumen de escurrimiento los escenarios más críticos son los RCP de resolución de 50 km con decrementos de la aportación del 60% (RCP 8.5 2070-2099), seguido del SRES A2 2070-2099 con un decremento del 59% y el escenario RCP 8.5 2075-2099 de resolución de 1 km presentó un decremento del 55%. Estos mismos resultados se obtuvieron para las 4 aportaciones en la cuenca, río chiquito, Atapaneo y el Plan, en total 24 escenarios analizados por cada subcuenca.

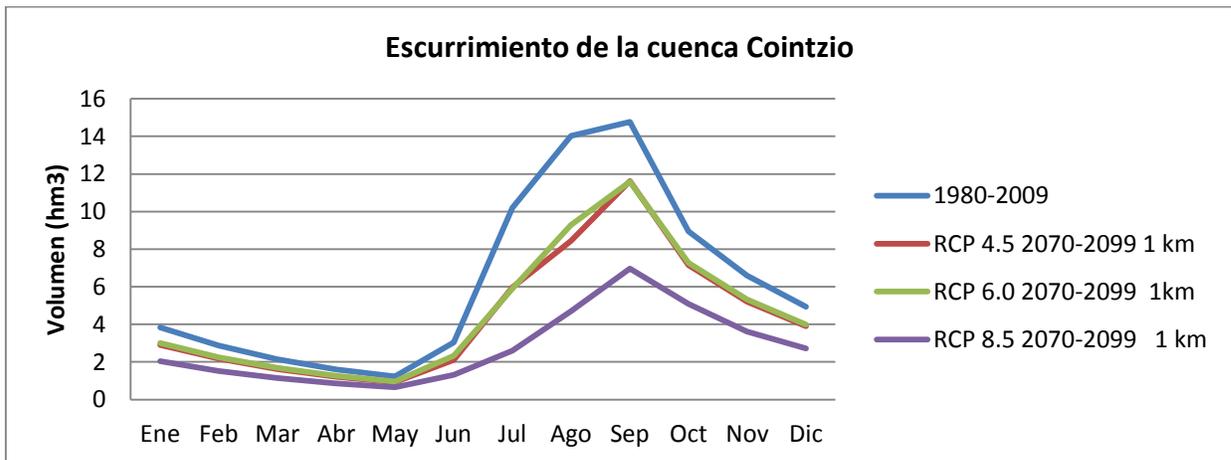


Figura 84. Escurrimientos de la cuenca Cointzio para los escenarios RCP o VCR (resolución 1 km).

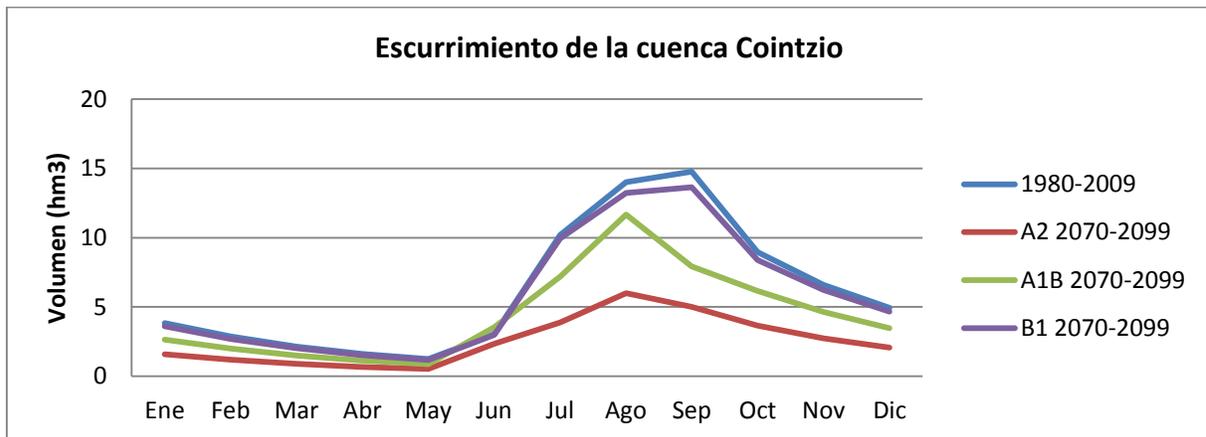


Figura 85. Escurrecimientos de la cuenca Cointzio para los escenarios SRES (50 km)

8.17 Efecto del cambio climático en las demandas agrícolas

La demanda agrícola se verá afectada en el próximo por dos factores principalmente, el incremento de evapotranspiración y menor precipitación, lo cual indicara que la necesidad del cultivo. Se evaluaron 24 escenarios por Módulo de distrito de Riego, un total de 96 escenarios, de estos se presentarán los resultados del Módulo 3 del Distrito de Riego ya que representa el 62% de la demanda total del Distrito.

Los escenarios menos críticos en este caso son los escenarios RCP resoluciones 1 y 50 km con incrementos en las demandas similares, para el caso del escenario RCP 8.5 2070-2099 (1 km) la demanda se incrementará en un 19.84% mientras que para el mismo escenario pero resolución de 50 km el incremento en la demanda será del 18.86%. Los escenarios con mayor incremento en la demanda son los pertenecientes a la familia SRES A2 2070-2099 con un 26.91% de incremento de la demanda del Módulo 3 (figuras 86 a 88).

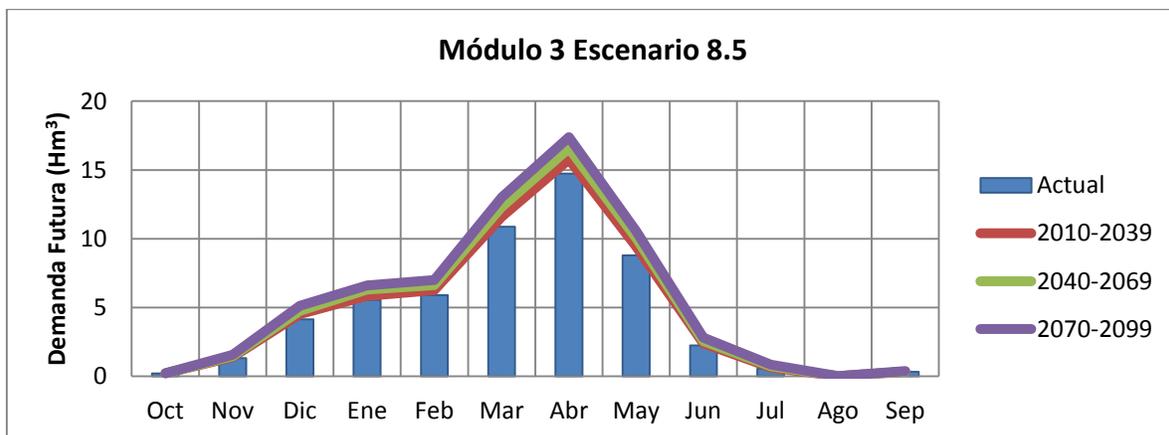


Figura 86. Escenarios de cambio climático RCP 8.5 resolución de 1 km para el Módulo 3.

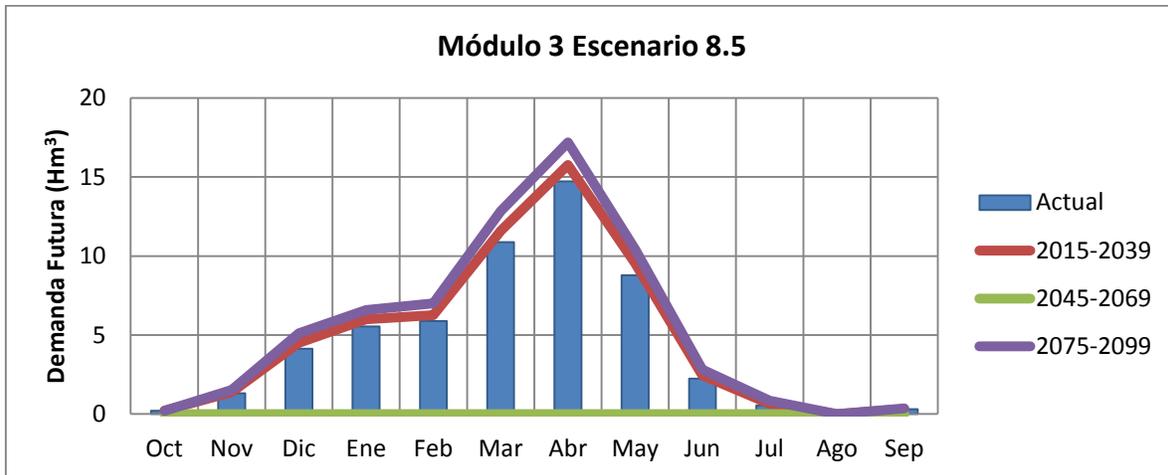


Figura 87. Escenarios de cambio climático RCP 8.5 resolución de 50 km para el Módulo 3.

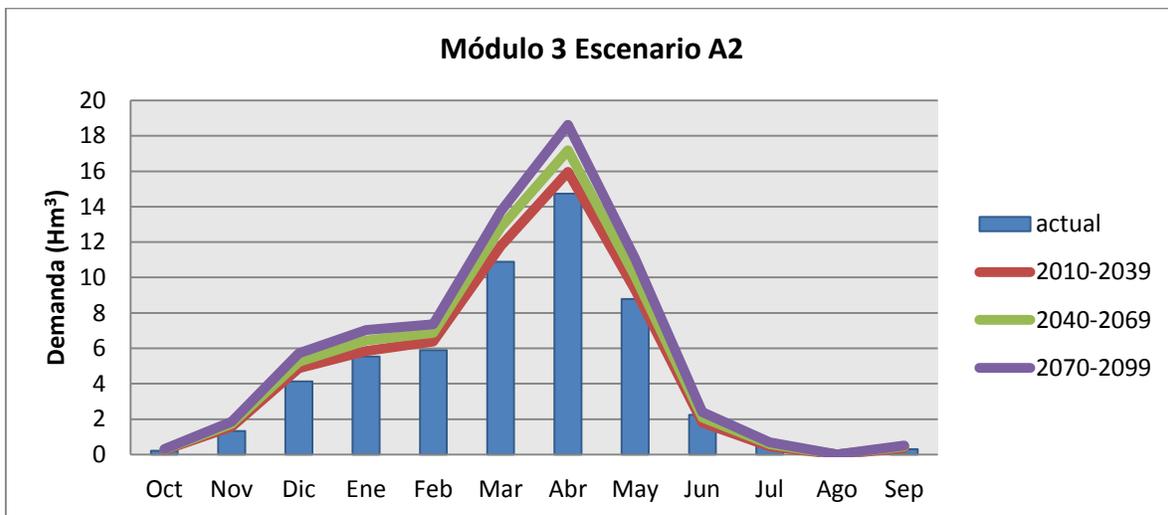


Figura 88. Escenarios de cambio climático SRES A2 resolución de 50 km, Módulo 3.

8.18 Demanda urbana futura.

La población de Morelia se encuentra en crecimiento y en un futuro no será excepción, de acuerdo a al Periódico Oficial del Gobierno Constitucional de Ocampo, en la segunda sección del tomo CXLIX No 52 con fecha del 14 de Julio del 2010 y titulado Programa de desarrollo urbano del centro de la población de Morelia, hay una reserva de área urbanizable de 9963 ha. EL 1 de agosto del 2012 en el mismo periódico se establecen los planes parciales de desarrollo urbano de las Zonas con mayor Coeficiente de Urbanización (CUR), la zona Poniente, Oriente y Norte de Morelia el cual es de 1 en los tres casos (tabla 19 y figura 89). En base a esta información la población creciente se asentara en estas tres zonas las cuales tienen una capacidad de albergar más de 1, 000,000 de personas, lo cual es lo proyectado para el próximo siglo.



Tabla 19. Coeficiente de Urbanización (CUR) para las distintas zonas de Morelia

Nombre	CUR
Zona Poniente	1.000
Zona Oriente	1.000
Zona Norte	1.000
Cuenca del manantial la Mintzita	0.200
Zona Sur	0.150
Centro Histórico	na
Sector Revolución (Noreste)	na
Sector Republica (Noroeste)	na
Sector Nueva España (Sureste)	na
Sector Independencia (Suroeste)	na

En la actualidad en estas zonas la densidad de población es baja comparada con su capacidad de urbanización, el coeficiente de ocupación es menor comparado con las zonas por dentro del libramiento de la ciudad de Morelia, en la tabla 20 se presenta la densidad de población para cada una de estas zonas, donde la zona oriente tiene la mayor cantidad de área por urbanizar, por lo tanto, la menor densidad de población.

Tabla 20. Densidad de Población para las zonas a urbanizar (PDUM, 2010)

Zona	Viv/ha	Densidad (Hab/ha)
Norte	14.900	63.030
Poniente	8.100	34.270
Oriente	6.210	24.840

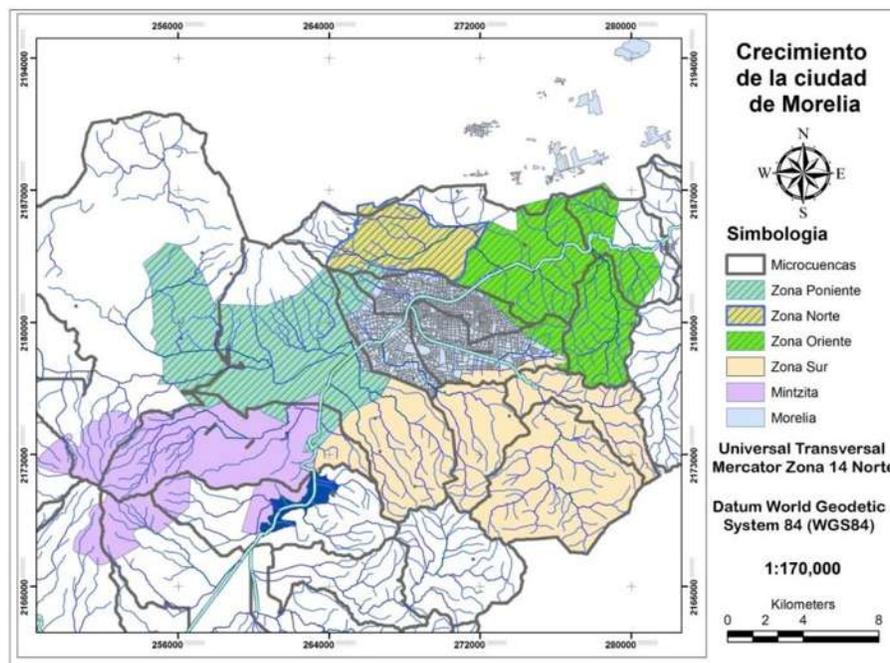


Figura 89. Zonas de división de la ciudad de Morelia.

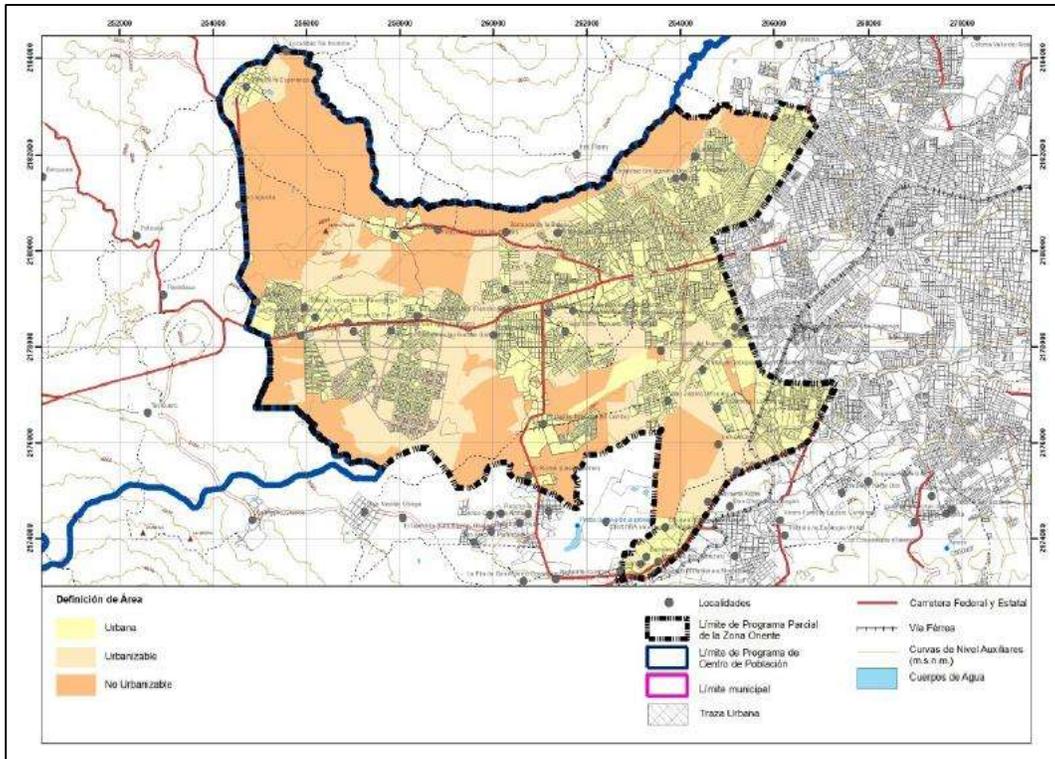


Figura 90. Urbanización futura de la Zona Poniente de la ciudad de Morelia (PPDUZPM, 2012)

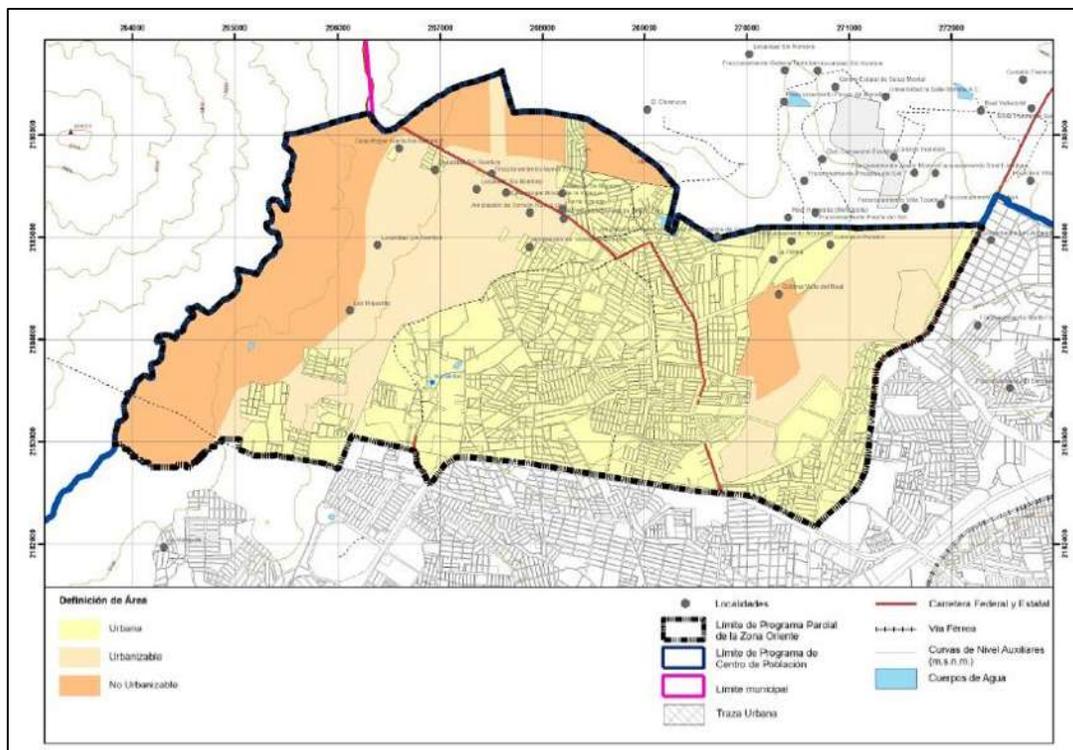


Figura 91. Urbanización futura de la Zona Norte de la ciudad de Morelia (PPDUZNM, 2012).



En las figuras 90 a 92 se presentan las ubicaciones geográficas de las zonas a urbanizar, el color naranja indica la zona no urbanizable, el amarillo la zona urbana y el beige la zona a urbanizar. La zona poniente (figura 90) tiene un área urbanizable de 1130.6 has, de las cuales el 68.42% están destinadas a uso habitacional mixto con servicios y comercio; este uso habitacional tiene la capacidad de albergar hasta 72 viviendas por hectárea y hasta 300 personas por hectárea (PPDUZPM, 2012). La zona norte (figura 91) es la más pequeña de las 3 y la que ya tiene una población importante 63 hab/ha, el área urbanizable para esta zona es de 598 has, de las cuales los usos predominantes permitidos son el uso habitacional mixto con servicios y comercio 63.87% y el uso habitacional densidad media, este uso es capaz de albergar 151-300 hab/ha, o de 36-72 viv/ha (PPDUZNM, 2012). La zona oriente (figura 92), es la mayor reserva que se planea urbanizar, esta tiene un área urbanizable de 1714.4 has y representa la menor densidad actual de población (24.84 hab/ha), el uso predominante es el uso habitacional mixto con servicios y comercio representa el 59.70%, seguido del uso habitacional densidad media con un 17.94% (PPDUZOM, 2012). En la tabla 21 se presenta un resumen completo de las reservas que se tienen planeadas urbanizar, así como las densidades y la población máxima que pueden habitar dichas zonas.

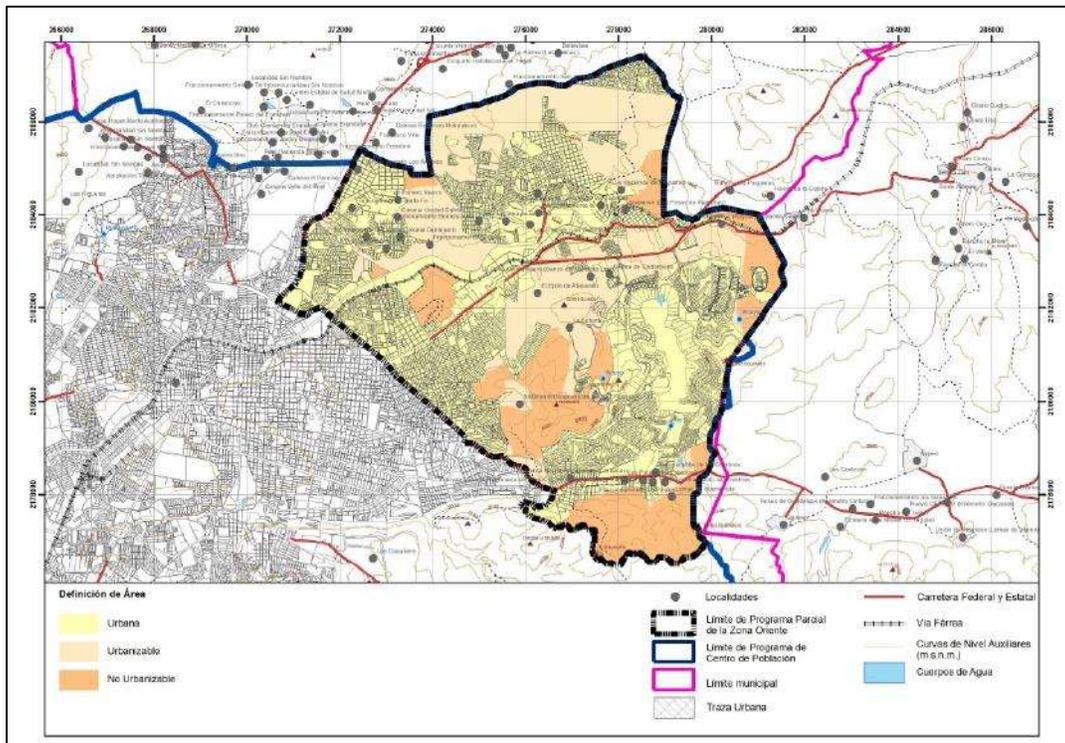


Figura 92. Urbanización futura de la Zona Oriente de la ciudad de Morelia (PPDUZOM, 2012)



Tabla 21. Reservas urbanizables de las diferentes zonas de Morelia (PPDUZPM, PPDUZOM, PPDUZNM, 2012).

Zona Poniente	Densidad (hab/ha)	Viviendas/ha	Superficie (ha)	Población máxima
Centro Metropolitano	<=300	<=72	90.5	27150
Centro Urbano	<=500	<=120	157.5	78750
Habitacional densidad alta	301-500	73-120	8	4000
Habitacional densidad media	151-300	36-72	79.6	23880
Habitacional mixto con industria y servicios	<=300	<=72	12.4	3720
Habitacional mixto con servicios y comercio	<=300	<=72	773.5	232050
Subcentro Urbano	<=500	<=120	9.1	4550
Σ			1130.6	374100
Zona Oriente				
Centro Metropolitano	<=300	<=72	194.4	58320
Habitacional densidad baja	21-150	5 a 35	15	2250
Habitacional densidad media	151-300	36-72	307.6	92280
Habitacional mixto con industria y servicios	<=300	<=72	45.4	13620
Habitacional mixto con servicios y comercio	<=300	<=72	1023.5	307050
Subcentro Urbano	<=500	<=120	125.4	62700
Vialidad y derecho de paso	0	0	3.1	0
Σ			1714.4	536220
Zona Norte				
Habitacional densidad baja	21-150	5 a 36	6.3	945
Habitacional densidad media	151-300	36-72	209.7	62910
Habitacional mixto con servicios y comercio	<=300	<=72	381.9	114570
Σ			597.9	178425
			Total	1,088,745
			Crecimiento Estimado	986,000

En estas zonas se planteara el crecimiento de las demandas así como los retornos urbanos al río grande de Morelia, más sin embargo se plantearan dos escenarios, el primero en el cual se entrega el agua demandada y en el segundo se mantienen las reglas de operación actuales, es decir debido al déficit actual y el descenso de los niveles piezómetros del acuífero no se entrega mayor volumen agua, de la que se entrega actualmente. Los retornos afectaran principalmente el retorno urbano los itzicuaros, retorno urbano Atapaneo y retorno urbano oriente.



Morelia-Queréndaro, modificaciones en los escurrimientos naturales y retornos urbanos. En cuanto a las reglas de operación del sistema se mantuvieron constantes, debido a que cada cambio en las reglas de operación significaría un incremento en la cantidad de escenarios para modelación.

Para analizar y comparar todos los escenarios modelados se utilizó la presa Cointzio, ya que esta presenta la disponibilidad media de la cuenca y se observan los impactos en el volumen debido al cambio climático. Se utilizaron 3 colores de referencia, el azul para el periodo histórico, el verde para los escenarios de la climatología 1 (2010-2039 o 2015-2039), amarillo para los de climatología 2 (2040-2069) y rojo para la climatología 3 (2070-2099 o 2075-2099). Las diferencias principales entre las modelaciones son las siguientes los escenarios RCP resolución 50 km tienen una serie temporal, es decir datos mes a mes de los cambios de las precipitaciones y las temperaturas, los escenarios con resolución de 1 km tienen mayor resolución espacial más sin embargo no cuentan con una serie mes a mes. Los escenarios SRES también cuentan con una serie y con resolución de 50 km más sin embargo estos escenarios solo son antiguos y se recomienda utilizar los nuevos escenarios.

En orden de importancia de la información primeramente se tiene la temporalidad ya que esta afecta directamente la forma de la serie y por lo tanto una forma, más realista de los resultados obtenidos, en segundo lugar se tiene la espacialidad ya que a tener mayor resolución de la información se puede visualizar más claramente, pero esto puede conllevar a errores en los escenarios, ya que la información de entrada debe ser de una resolución similar para poder interpolar y extrapolar los datos y los resultados.

Una vez dicho lo anterior, y haciendo un análisis de comparación del escenario RCP 4.5 CL1 y CL3 difieren 6.34 y 6.64% con respecto al volumen histórico, en el caso del escenario RCP 6.0 CL1 los cambios en la resolución infieren solamente un 0.1%, 4.02% para el escenario RCP 6.0 CL3. El escenario RCP 8.5 CL1 difiere en un 5.92% y el escenario RCP 8.5 CL3 difiere en 2.06%. Esto indica que al reducir la escala, los escenarios en todos los casos son <7%, por lo tanto muy similares en promedio anual, más sin embargo en promedio mensual y como se vio en los escurrimientos y demandas, los cambios son importantes a nivel interanual y por lo tanto, para una simulación más realista es preferible trabajar con los escenarios RCP con resolución de 50 km (figura 94).



En cuanto a los resultados de simulación se observa que los escenarios a finales de siglo presentaran serios problemas de abastecimiento, así como de disponibilidad del agua hasta en 50 hm³ para las condiciones más críticas analizadas (RCP 8.5 CL3 resolución 50 Km).

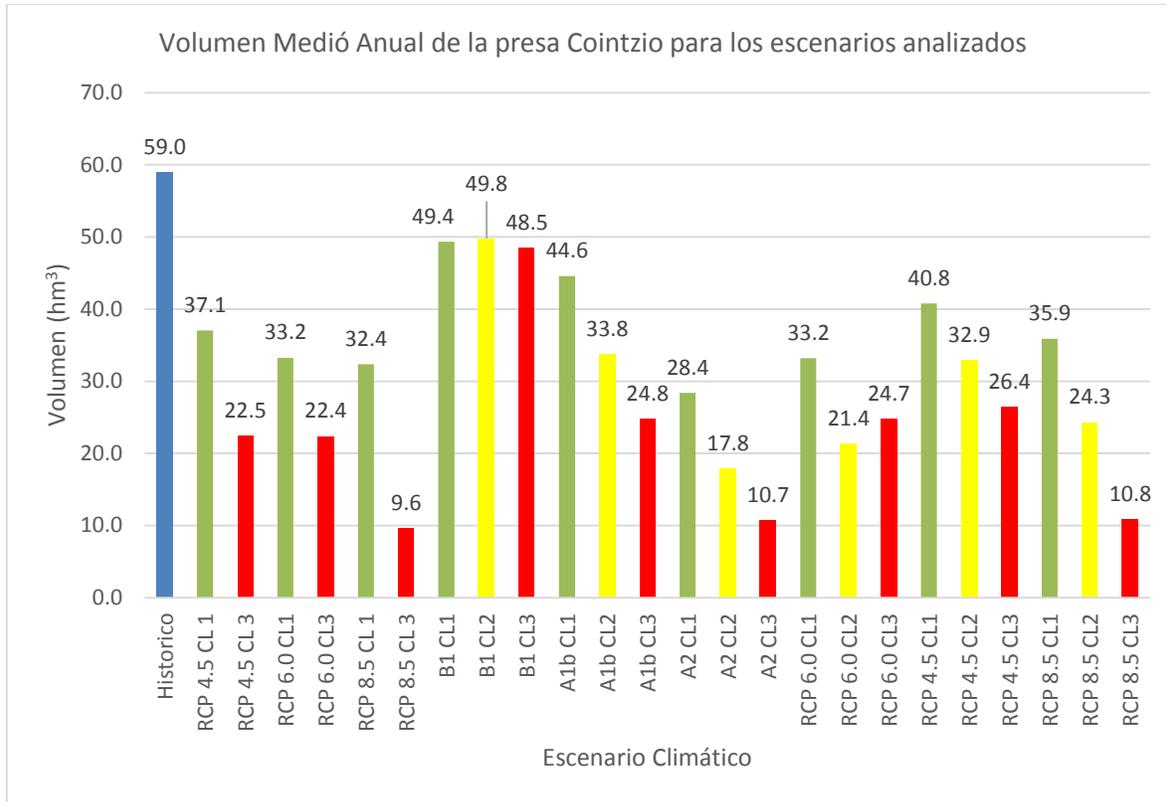


Figura 94. Volumen medio mensual de la presa Cointzio para los diferentes escenarios analizados en la presente tesis.

El volumen interanual se muestra en la figura 95 donde se observan que a finales de siglo el volumen interanual de la presa desciende llegando al mínimo en los meses de mayo a julio que son los meses de mayor demanda en la presa y también es temporada de estiaje. En temporada de lluvias el embalse se recupera hasta los 20 hm³ todo esto para el escenario más crítico (RCP 8.5 CL 3). En nivel anual el volumen en la presa Cointzio desciende de acuerdo a lo esperado el escenario RCP 4.5 CL 1 presenta los menores cambios en el embalse, seguido del RCP 6.0 CL 1 y finalmente el escenario RCP 8.5 CL 1 la disminución es del 37.18%, 43.63% y 45.10% respectivamente. Para finales de siglo los escenarios por su concepción presentan una evolución muy rápida, lo cual ocasiona que el volumen de la presa descienda en un 61.89% para el escenario RCP 4.5 2075-2099, 62.09% para el escenario RCP 6.0 2075-2099 y 83.7% para el escenario RCP 2075-2099.

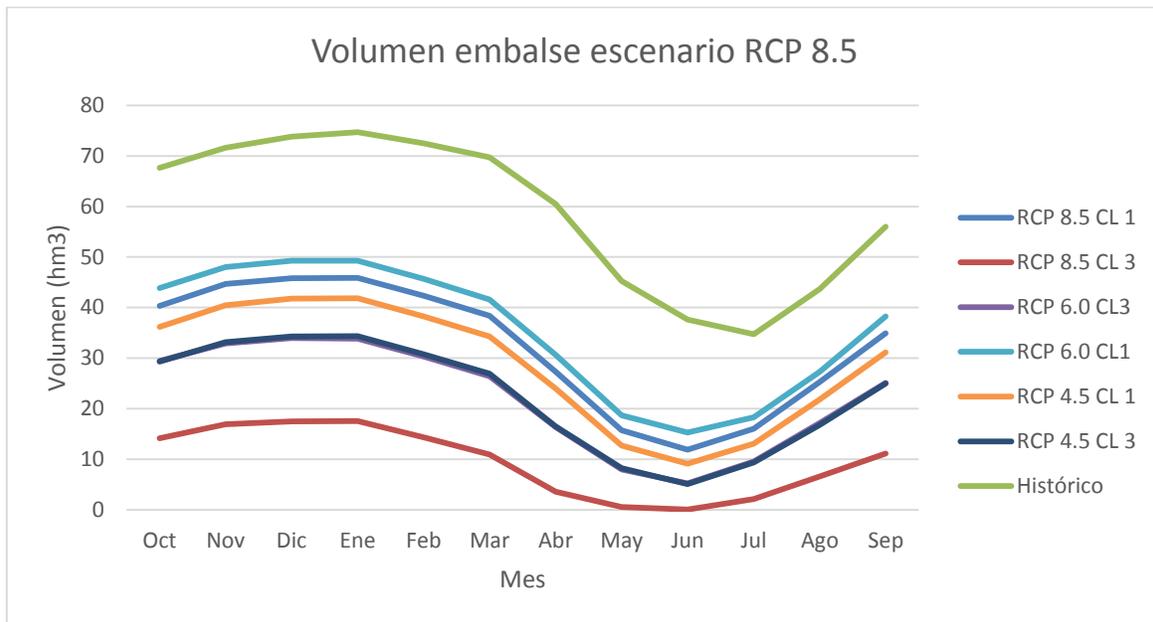


Figura 95. Volumen interanual de la Presa Cointzio para los diferentes escenarios RCP de cambio climático (resolución 50 km).

8.19.1 Análisis de resultados de garantías mediante diferentes criterios de Evaluación para las demandas agrícolas

Criterio UTAH-DWR: Este criterio es utilizado para el análisis de las garantías a las demandas agrícolas en la IPH2008. Este criterio es el más exigente respecto al déficit que se puede presentar en una demanda agrícola, esto se debe principalmente a que se trata de evitar el estrés hídrico y la disminución del rendimiento por hectárea. Este criterio se cumple si las tres condiciones siguientes cumplen:

- El déficit en un año no puede exceder el 50% de la demanda actual.
- El déficit de dos años consecutivos no puede exceder el 75% de la demanda anual.
- El déficit de 10 años consecutivos no puede exceder el 100% de la demanda anual.

Criterio de Garantías Volumétricas: Este criterio nos representa el porcentaje del volumen que se está entregando respecto al demandado considerando crítico menor del 70%.

Criterio de Garantía Mensual: Este criterio nos representa la garantía mes con mes donde se entrega la totalidad del agua demandada. No menor de 70%.

Criterio de Garantía Anual: Este criterio nos representa el porcentaje garantía año con año donde se entrega la totalidad del agua demandada. No menor de 70%.



En las tablas 22 a 27 se presentan los criterios para las 4 demandas agrícolas y para los diferentes escenarios RCP en estudio, de los cuales se concluye que el criterio IPH08 se cumple 4 casos de en los años 2015-2039 para los diferentes escenarios RCP, y en el caso de los escenarios RCP CL3 no cumple en ningún caso, es decir que el déficit ocasionara problemas en los cultivos como la disminución del área del siembra, cambio de cultivo y estrés hídrico.

Con respecto a las garantías mensuales y anuales solamente el Módulo 3 cumple para los diferentes escenarios, es decir se entrega al menos el 70% de veces el agua solicitada por el Módulo, para los demás Módulos en estudio no cumple en garantía mensual. Con respecto a la garantía anual en todos los escenarios analizados se presenta al menos un fallo, siendo los Módulos más afectados el 2, 3 y 4 para los años 2015-2039 y todos los Módulos para los escenarios de final de siglo.

En cuanto a volumen se observa que en todos los casos se entregó al menos el 70% del volumen de agua solicitada en los escenarios RCP CL1. Y en los escenarios RCP CL3 se entregó menos del 70% en al menos un Módulo. Esta garantía volumétrica es la más clara y la que indica el agua entregada con respecto a la demandada, y que esta ocasionara problemas para todos los cultivos en del Distrito de Riego 020-Morelia-Queréndaro.

Tabla 22. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 4.5 2015-2039 (CL1)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	25	87.5	94.7	10.6	21	63	SI
Módulo 2	60.1	0	78.8	49.5	95.1	281.1	NO
Módulo 3	78.8	29.2	87.3	27.4	52.8	164.4	NO
Módulo 4	58.3	29.2	82.6	34.6	65.4	217.5	NO

Tabla 23. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 6.0 2015-2039 (CL1)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	33.3	100	93.5	6.5	12.9	64.7	SI
Módulo 2	52.8	0	78.9	47.1	74.5	265.8	NO
Módulo 3	80.2	41.7	88.9	25.6	40.9	144.1	NO
Módulo 4	73.6	41.7	87.7	30.4	49.1	168	NO



Tabla 24. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 8.5 2015-2039 (CL1)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	25	0	93.9	32.7	37.5	79.8	SI
Módulo 2	60.4	0	79.9	54.7	81.7	275.9	NO
Módulo 3	80.6	0	88.4	35.7	29.4	45.7	SI
Módulo 4	58.3	37.5	86.6	35.5	55.9	188	NO

Tabla 25. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 4.5 2075-2099 (CL3)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	25	83.3	88.6	36.3	44.7	130.1	NO
Módulo 2	49	0	69.4	58.1	82	344.9	NO
Módulo 3	75	0	82.2	31.9	45.7	197.9	NO
Módulo 4	49	4.2	76.9	31.9	45.7	197.9	NO

Tabla 26. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 6.0 2075-2099 (CL3)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	25	0	82.7	37	58.9	200.9	NO
Módulo 2	42	0	69.2	58	107.3	381.3	NO
Módulo 3	75	0	80.4	33.1	62.3	234.1	NO
Módulo 4	49.7	0	75.9	40	75.4	287.2	NO

Tabla 27. Criterios para el análisis del déficit en la demanda agrícola para el Escenario RCP 8.5 2075-2099 (CL3)

Demanda	GARANTIA			CRITERIO IPH08(AGRICOLAS)			
	MENSUAL (%)	ANUAL (%)	VOLUMETRICA (%)	1 AÑO	2 AÑOS	10 AÑOS	CUMPLE
Módulo 1	25	0	68.6	57.6	93.9	358.4	NO
Módulo 2	47.2	0	52	65.7	120.4	498.5	NO
Módulo 3	75	0	73.2	38	67.8	277.8	NO
Módulo 4	49	0	64.2	47.4	85.7	371.7	NO



8.19.2 Análisis de resultados para la demanda urbana por medio del criterio IPH 2008

La demanda urbana por su parte presenta incrementos importantes en el déficit y debido a que se tienen la mayor prioridad en esta demanda, si no optimizamos, rehusamos, y reducimos el consumo del agua, los otros usos del agua pueden verse muy reducidos o incluso que no sea factible satisfacer estas necesidades.

El criterio fijado para demandas urbanas en la IPH2008 cumple si el déficit no supera en un mes el 8% de la demanda ni en 10 años el 10% de la demanda anual. En garantía volumétrica el volumen que se considera crítico para el análisis de la demanda urbana es del 90%.

Para ninguno de los casos se cumple este criterio ya que no se abasteció ninguna demanda con mayor volumen de agua y debido a que la demanda de agua si se incrementó por incremento de población esta no fue posible abastecerse.

En volumen de la totalidad del agua se entregó solamente el 79.8%, 82.3% y 71.8% para los escenarios RCP 4.5, 6.0 y 8.5 todos en los años 2015-2039 respectivamente. En el caso de finales de siglo el escenario RCP 4.5 abasteció el 74.9%, el RCP 6.0 75% y el RCP 8.5 62.3% del volumen de agua demandada.

8.20 Efecto del cambio climático en el agua subterránea

El nivel estático desciende de manera importante para el siglo XXI, en el acuífero Morelia-Queréndaro por el déficit del suministro a la demanda, que se incrementa. Los descensos se presentan a continuación son manteniendo las condiciones actuales, esto se debe a que el acuífero se encuentra vedado y por lo tanto no se puede incrementar el suministro en el mismo.

Los descensos más importantes se dan en la zona de Morelia, por la sobreexplotación que se da principalmente para la demanda urbana, estos abatimientos se incrementarán a lo largo del tiempo, debido a que en la actualidad se tiene déficit en este acuífero y donde se espera que la dirección de flujo subterráneo se vea afectada en las zonas cercanas a Morelia convergiendo la dirección del flujo hacia Morelia.



Los descensos en los niveles estáticos del Módulo 3 y 4 del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se ven menos afectados que la zona de Morelia, esto se debe a que la dirección de flujo subterráneo es hacia esta zona, de las diferentes partes altas del acuífero.

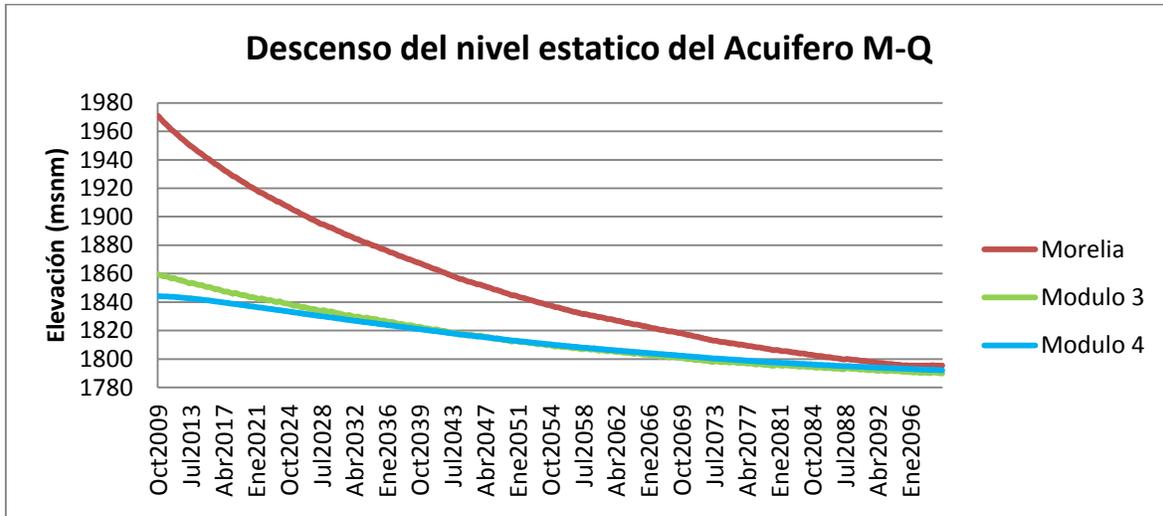


Figura 96. Descenso del nivel estático para diferentes zonas del acuífero Morelia-Queréndaro. En promedio mensual la disminución de los niveles estáticos del acuífero Morelia-Queréndaro se reducen de manera importante donde los descensos para la demanda Morelia son de hasta 167 m para finales de siglo, para el Módulo 3 los descensos son alrededor de 60 m y para el Módulo 4 que es el menos afectado los descensos son de 50 m.

8.21 Déficit en el sistema de la cuenca del río Grande de Morelia

El un conjunto todas las demandas, el suministro a las mismas, las reglas de operación la falta de agua, ocasionan un déficit del recurso tanto superficial como subterráneo, las demandas analizadas son la ciudad de Morelia de origen superficial y subterráneo, la demanda industrial CEPAMISA, el distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro y todos los bombeos en el acuífero Morelia-Queréndaro.

De manera general en la tabla 28 se presentan los déficits de suministro a la demanda para el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (4 Módulos), estos déficits de suministro a la demanda que presentan principalmente los meses de marzo, abril y mayo que son los meses donde hay mayor necesidad de agua, es decir entre el 85.5 % y 94.15% de la demanda anual.



Por otro lado el déficit a la demanda urbana de Morelia se encuentra en un rango de 19.5 hm³/año (RCP 4.5 2015-2039) a 117.154 hm³/año (RCP 8.5 2075-2099). Estos incrementos se dan principalmente en la demanda subterránea de Morelia ya que el incremento de población ocasionara una gran presión sobre el recurso hídrico y porque el acuífero se encuentra en zona de veda no se incrementaron los bombeos, solamente las demandas al mismo; esto ocasionara un incremento en la concentración de DBO₅ en el río Grande.

El déficit del suministro la demanda del sistema de la cuenca del río Grande debido al cambio climático se estima mediante la línea evolutiva RCP 8.5 incrementos de 64 hm³ para finales de 2039, y de hasta 279 hm³. La línea evolutiva RCP 6.0 presenta incrementos en los déficits de 54.142 hm³ a 259 hm³ y la línea evolutiva RCP 4.5 presenta incrementos en los déficits de 47.446 hm³ incrementándose hasta 257.747 hm³ (tabla 28).

Tabla 28. Déficit de suministro al sistema de la cuenca del río Grande y al acuífero Morelia-Queréndaro

Escenario	Morelia Superficial	Morelia pozos profundos	Dr 020 Morelia Queréndaro	Otros Bombeos Acuífero	Industrial CEPAMISA	Sistema
1980 - 2009	1.053	0	1.678	0.523	0	3.254
RCP 4.5 2015-2039	11.229	8.268	6.577	20.717	0.655	47.446
RCP 6.0 2015-2039	13.604	8.268	10.932	20.717	0.621	54.142
RCP 8.5 2015-2039	18.491	8.268	11.414	20.717	5.076	63.966
RCP 4.5 2075-2099	17.429	90.948	19.573	129.797	0	257.747
RCP 6.0 2075-2099	17.335	90.948	21.884	129.797	0	259.964
RCP 8.5 2075-2099	26.206	90.948	32.202	129.797	0	279.153

8.22 Efecto del cambio climático en la Gestión de la Calidad del Agua

Con respecto a la gestión de la calidad del agua, manteniendo las mismas reglas de operación en el sistema, se presentaron cambios importantes en la calidad del agua, el oxígeno disuelto disminuyo de manera general en el río y la concentración de DBO₅ se incrementó después de la ciudad de Morelia, la concentración de DBO₅, donde se observa un importante incremento en la concentración debido principalmente a la disminución en el escurrimiento en el río grande y al incremento de las descargas urbanas.



En las siguientes figuras se muestra espacial y temporalmente el efecto del cambio climático en la DBO₅ y en el O₂ para los 30 tramos del río grande de Morelia. Además de los escurrimientos y un mapa de ubicación de cada tramo de río.

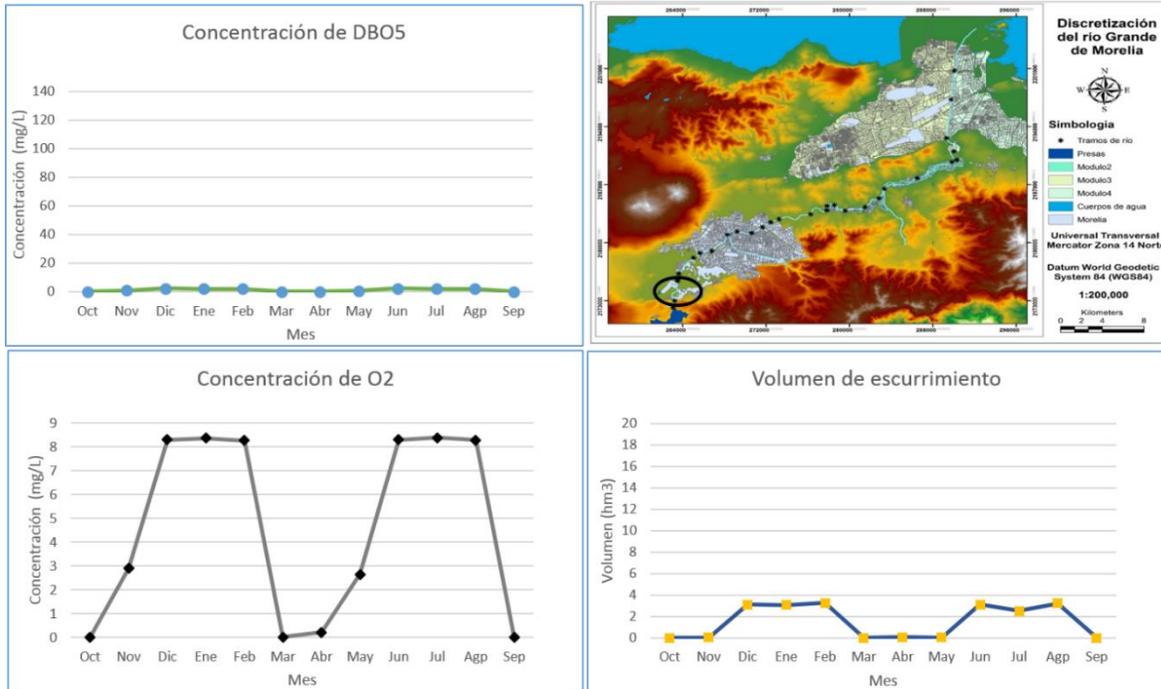


Figura 97. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 1.

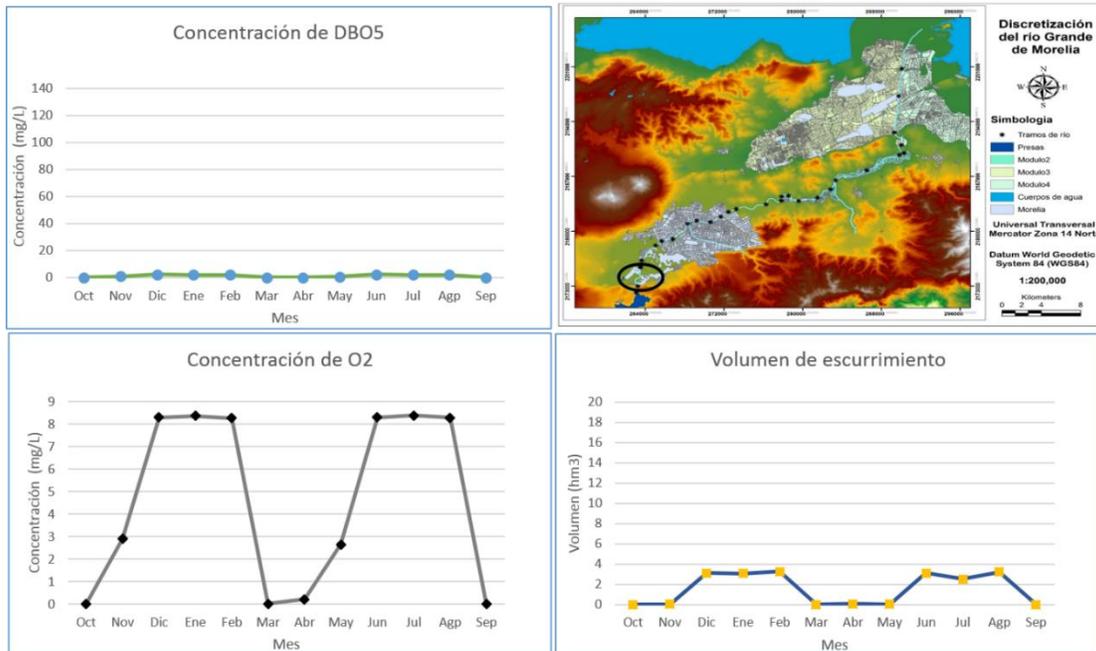


Figura 98. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 2.

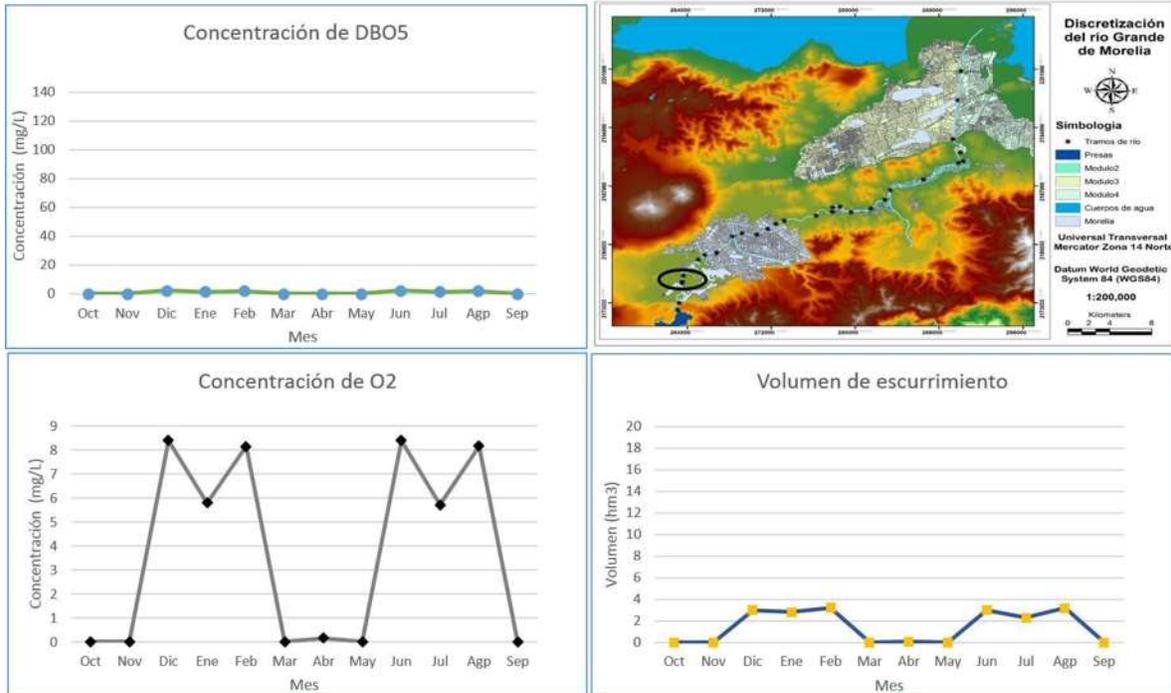


Figura 99. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 3

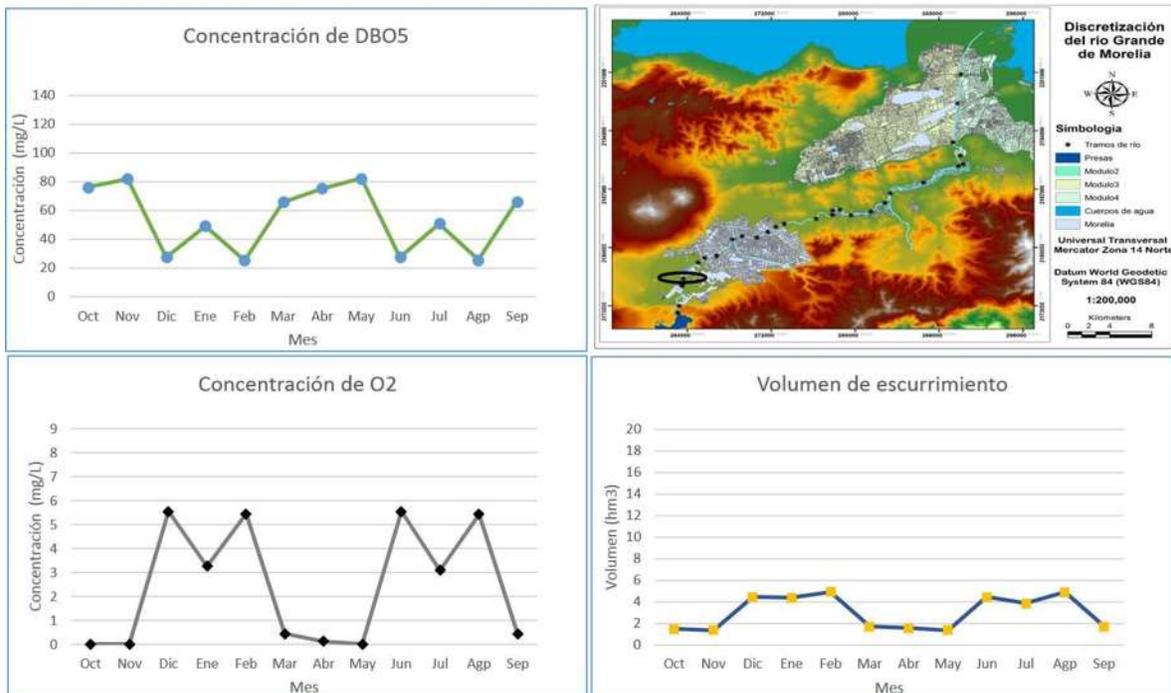


Figura 100. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 4

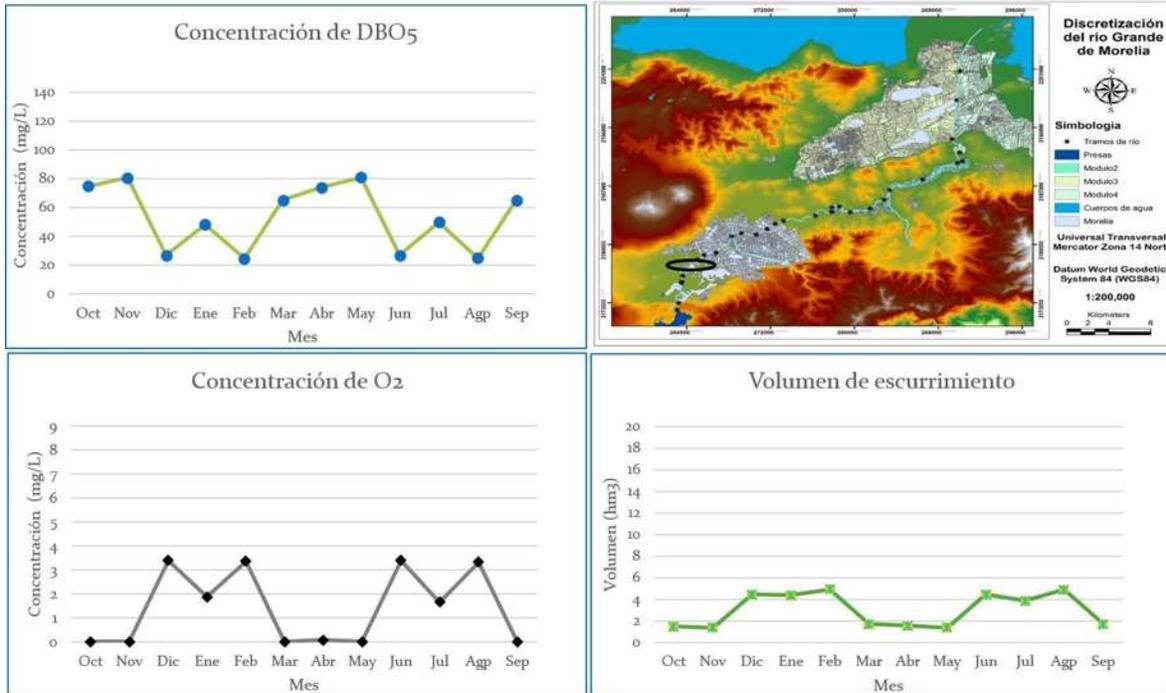


Figura 101. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 5

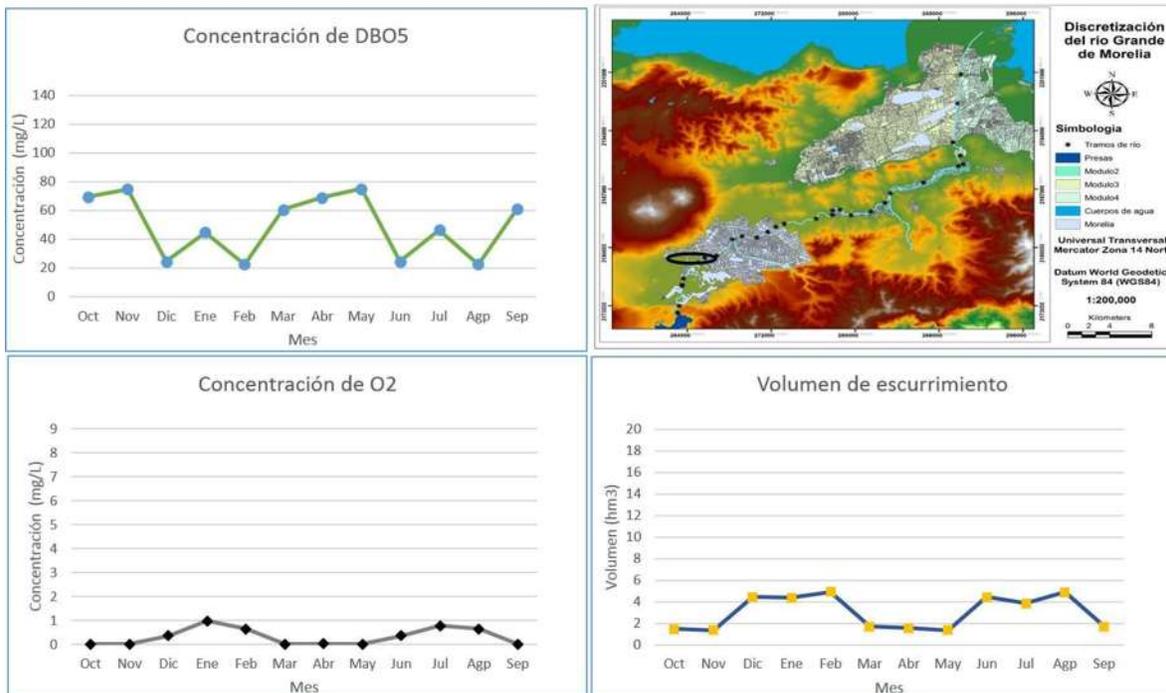


Figura 102. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 6

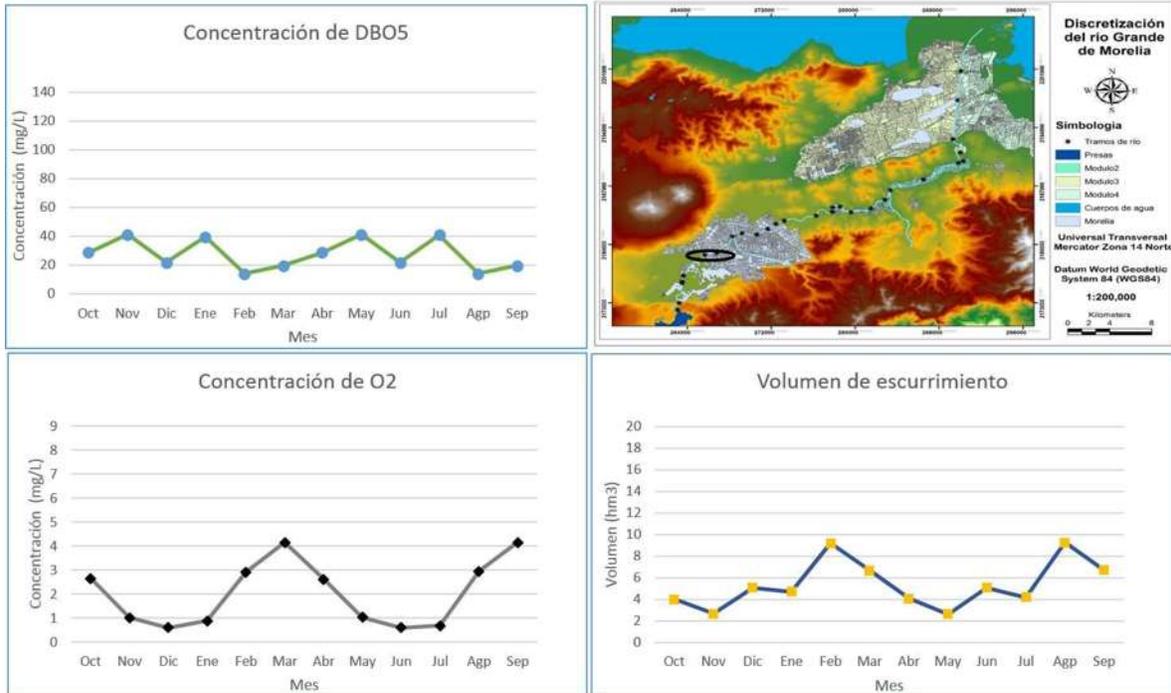


Figura 103. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 7.

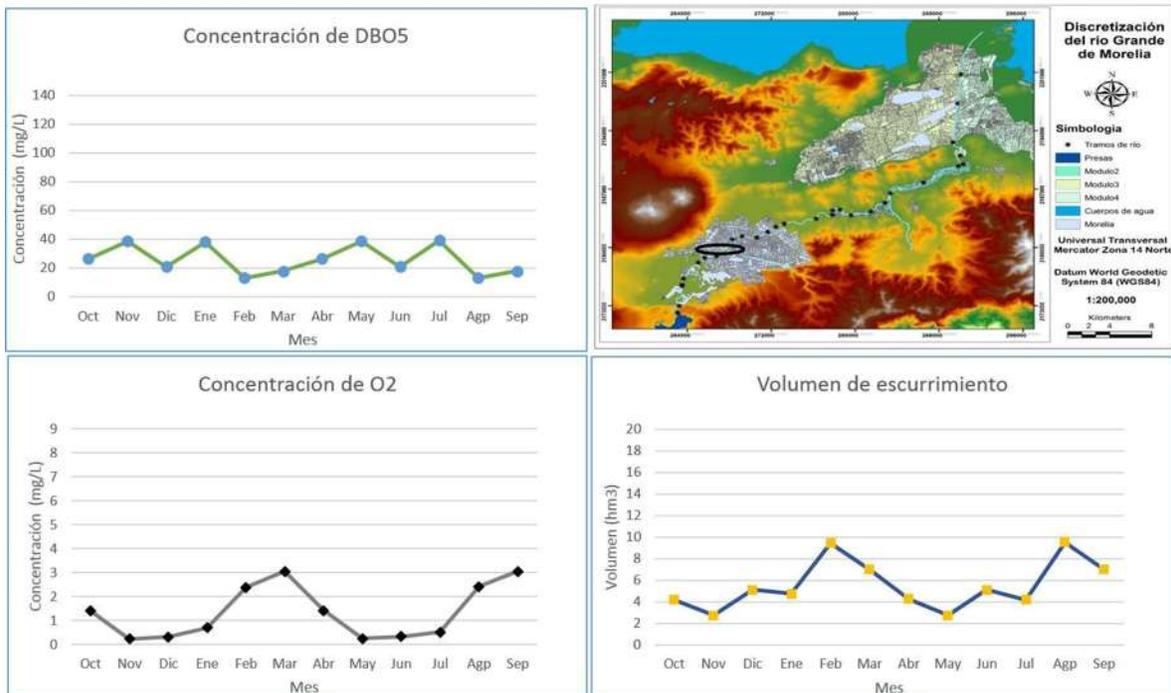


Figura 104. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 8

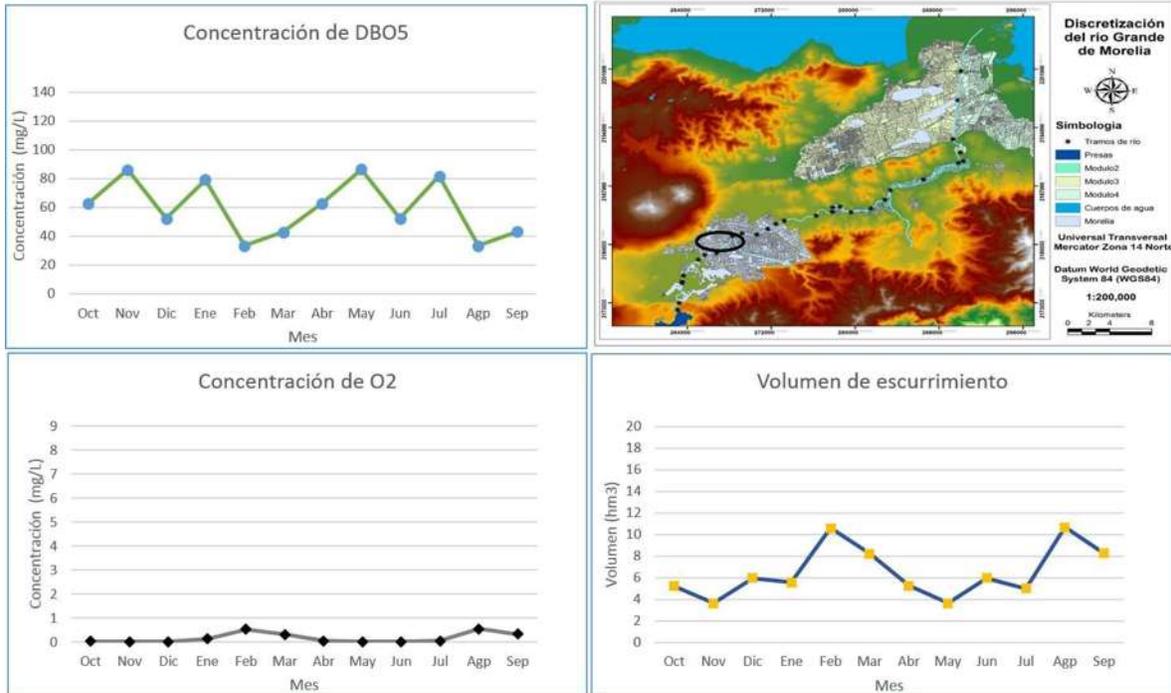


Figura 105. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 9.

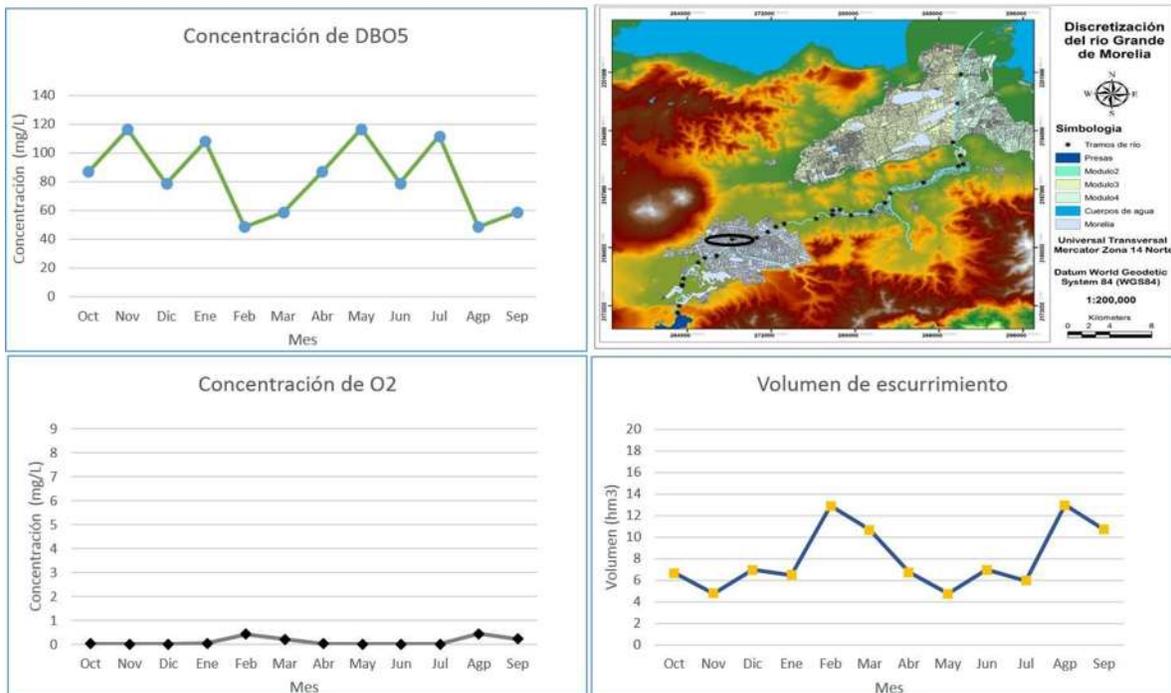


Figura 106. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 10.

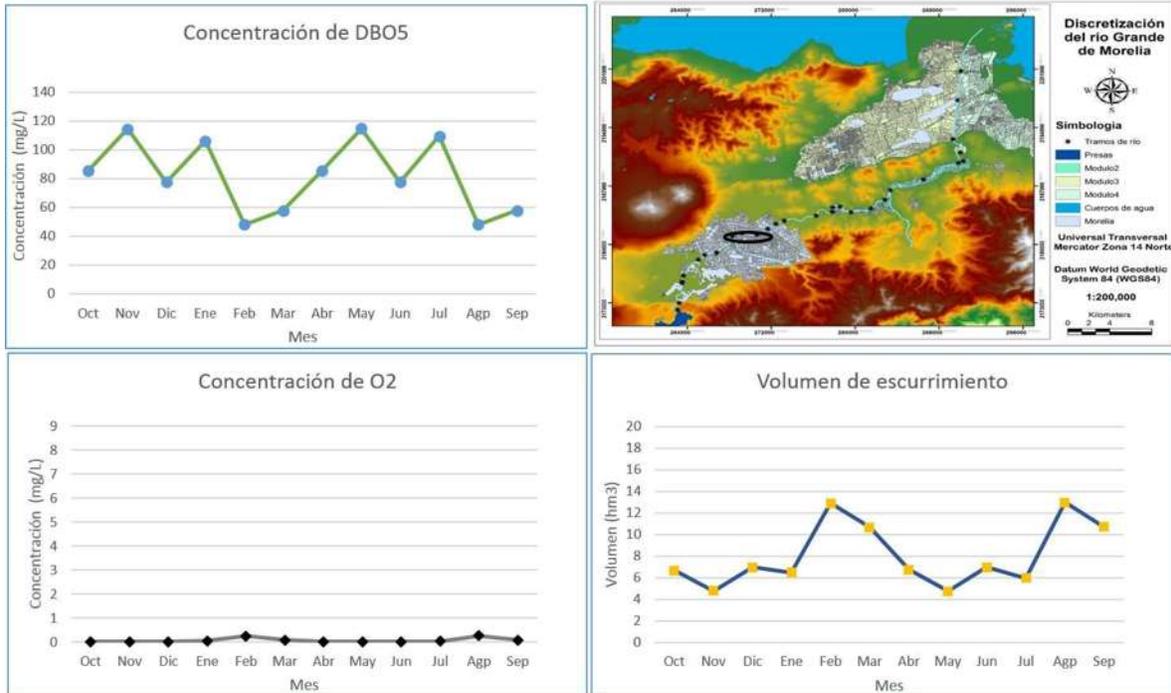


Figura 107. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 11.

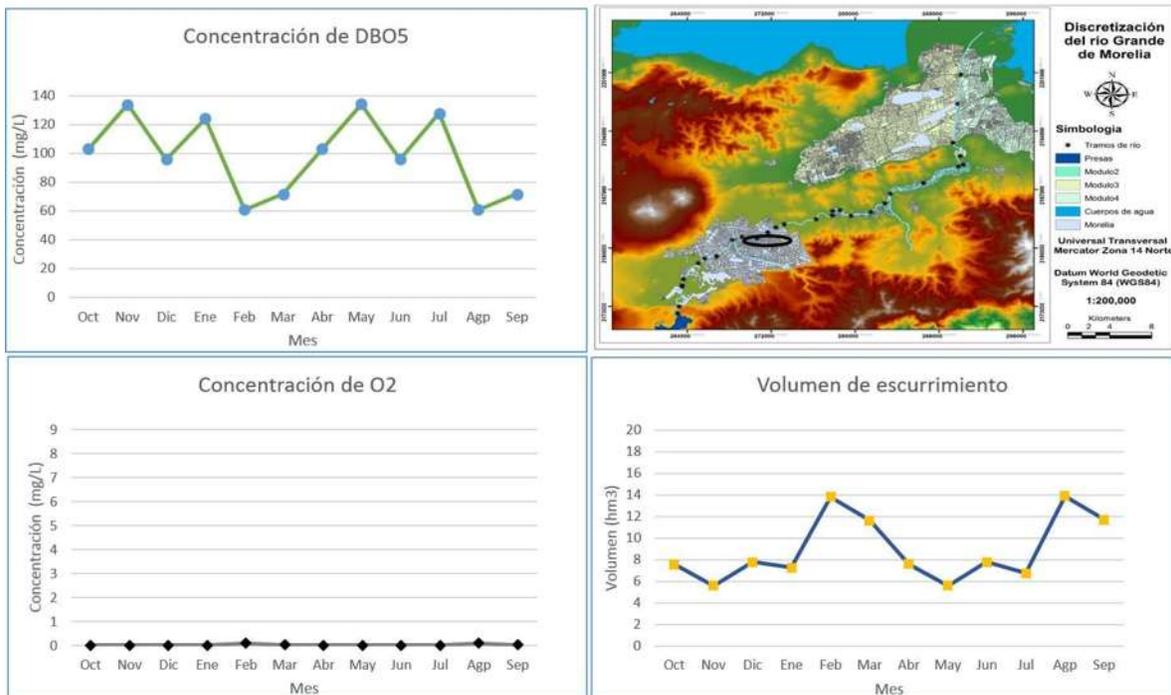


Figura 108. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 12.

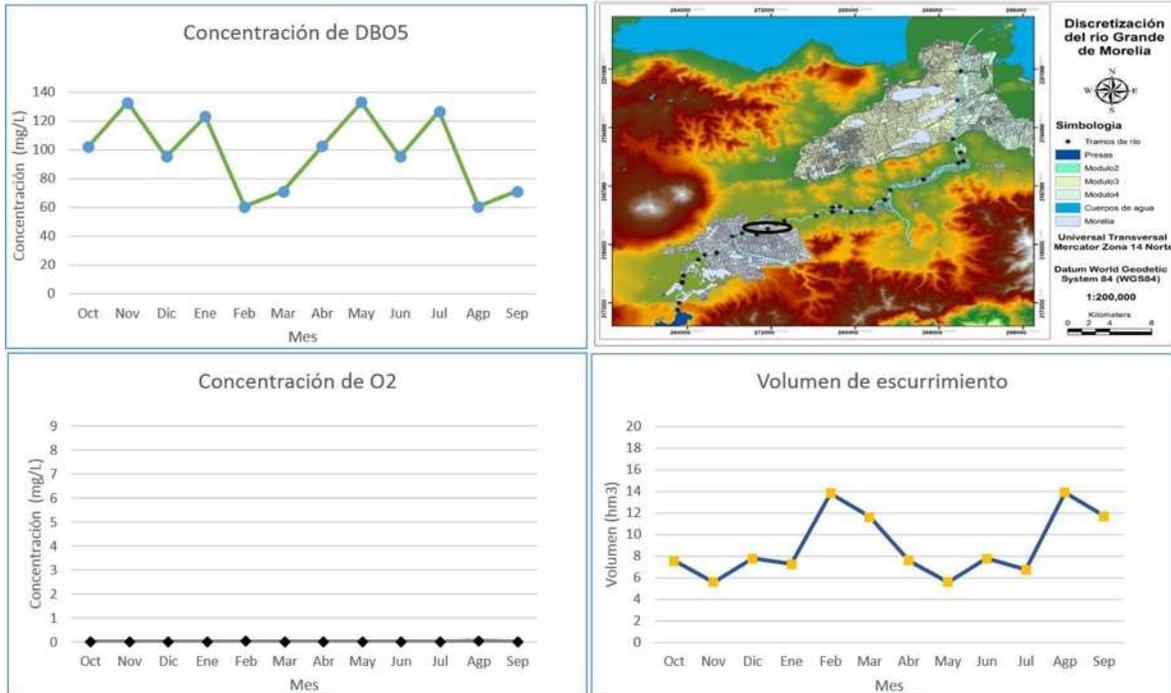


Figura 109. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 13.

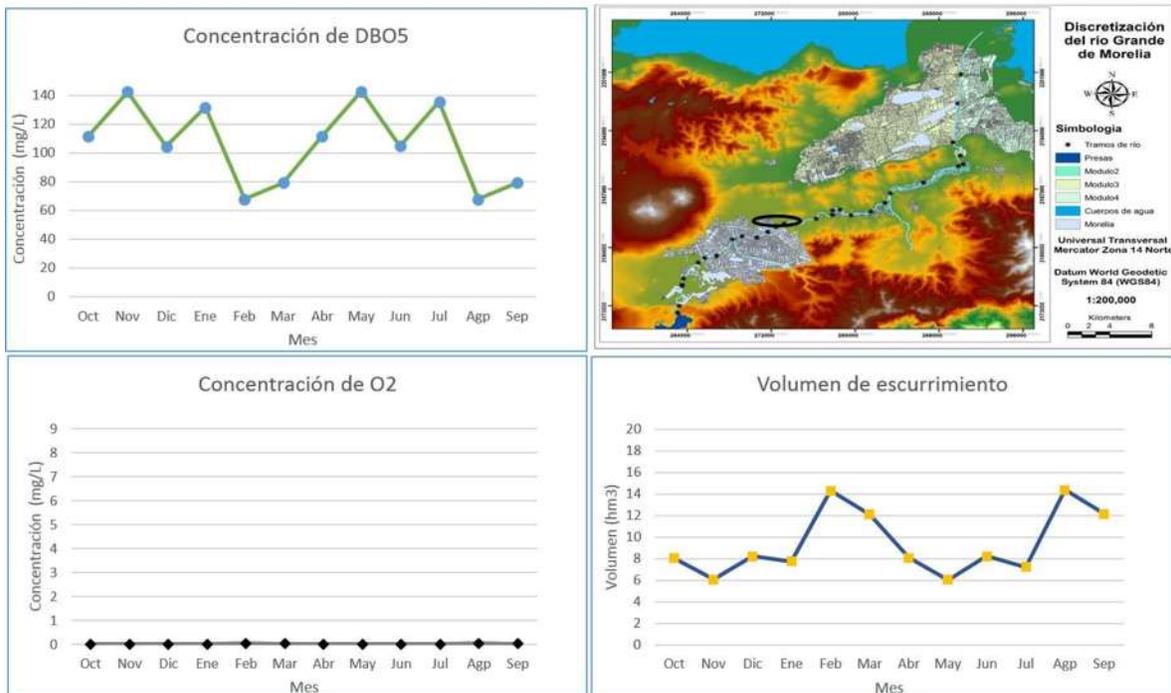


Figura 110. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 14

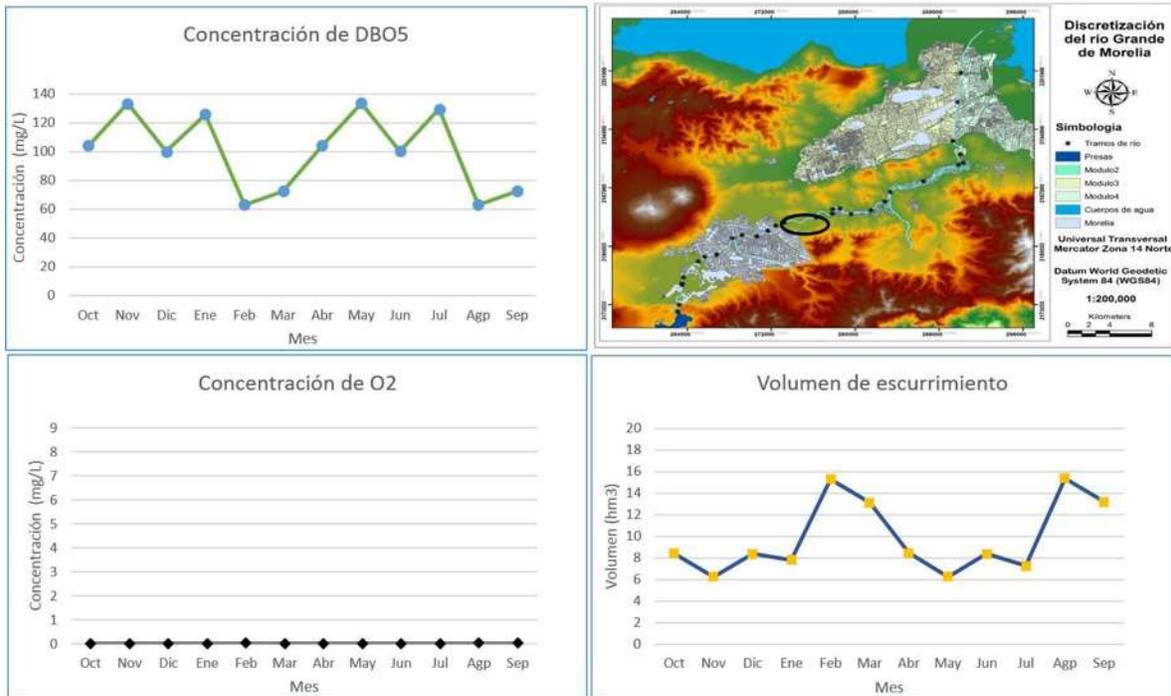


Figura 111. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 15

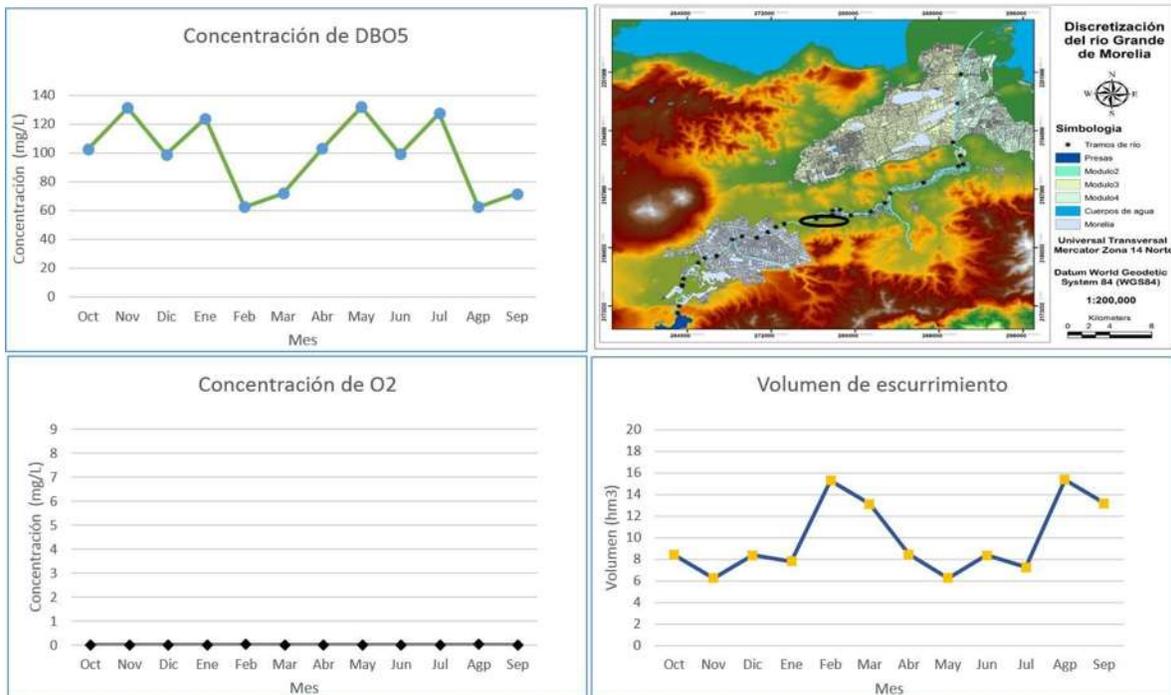


Figura 112. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 16

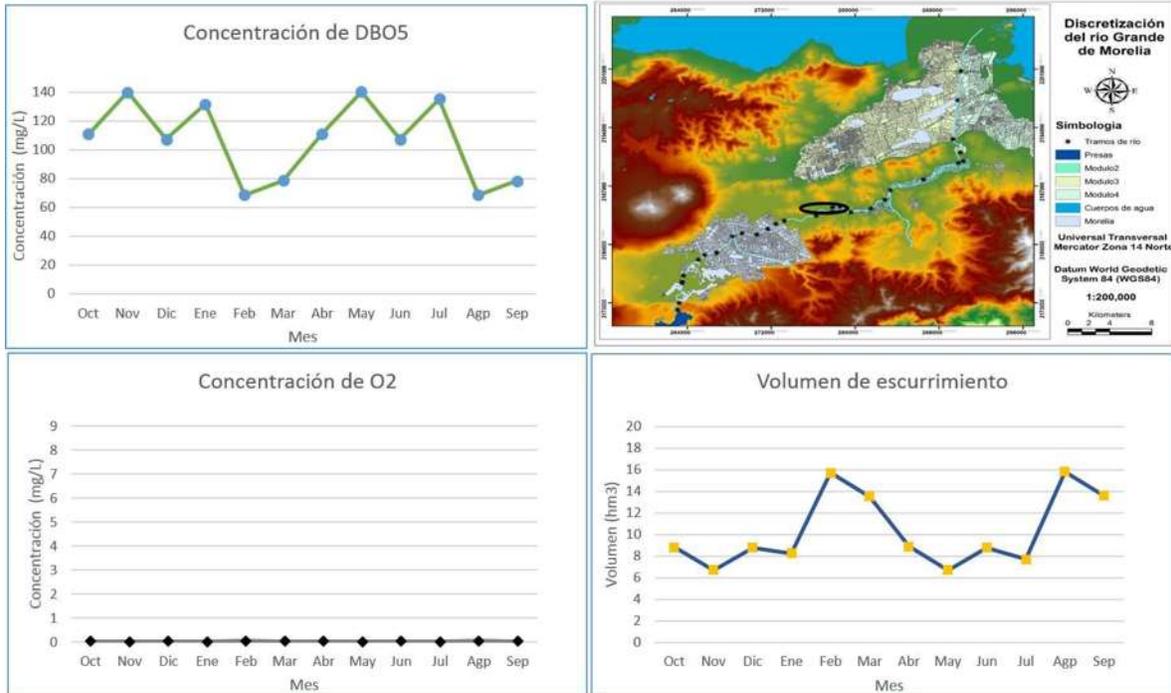


Figura 113. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 17.

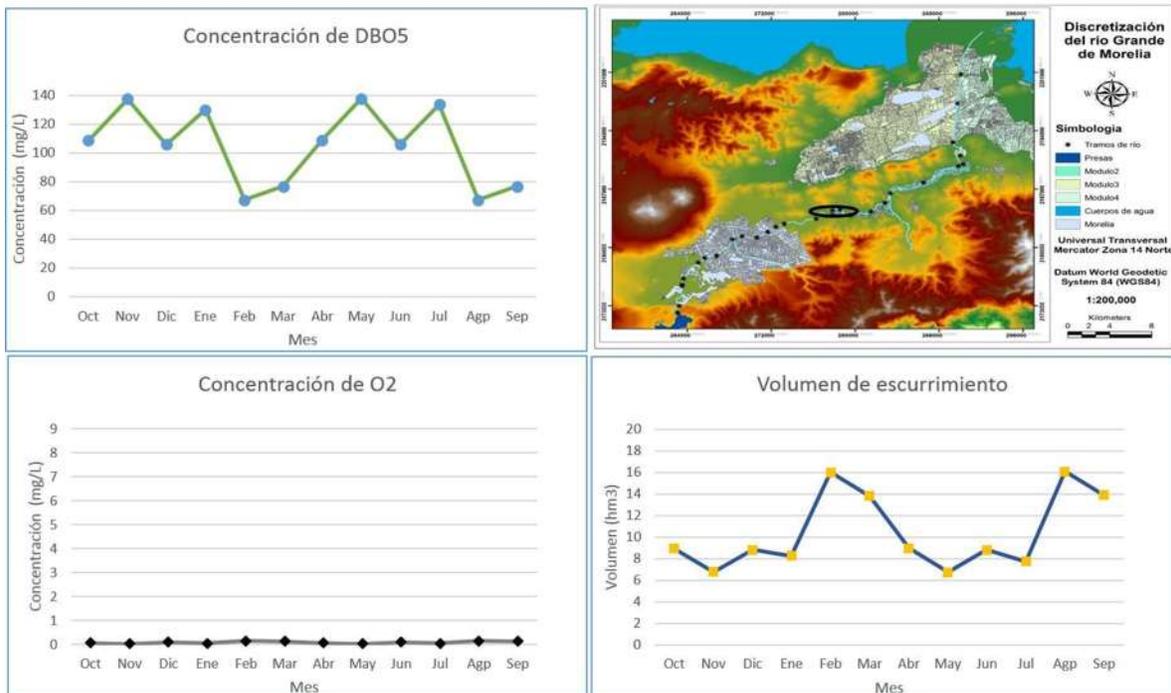


Figura 114. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 18.

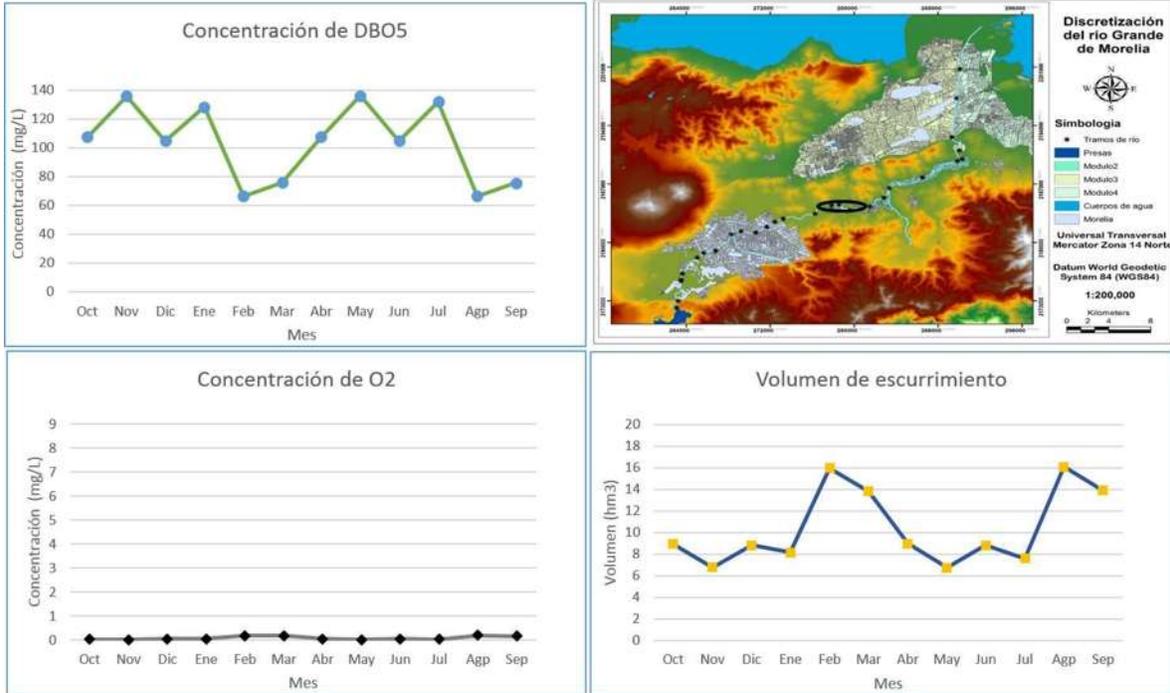


Figura 115. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 19.

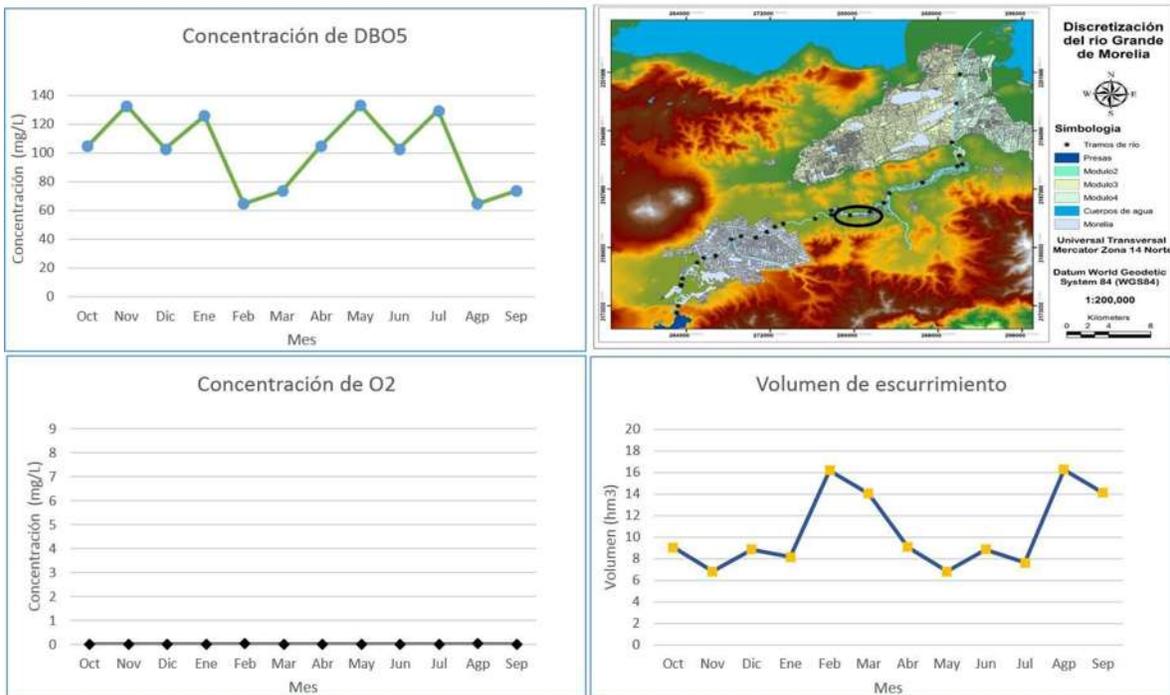


Figura 116. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 20.

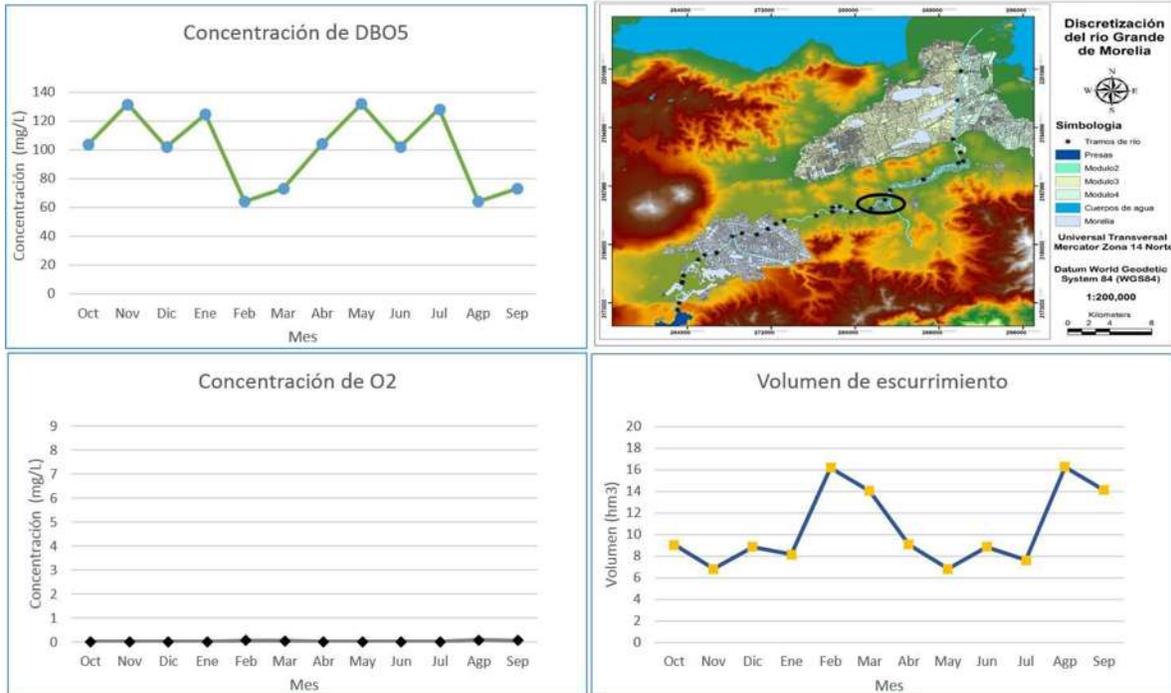


Figura 117. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 21.

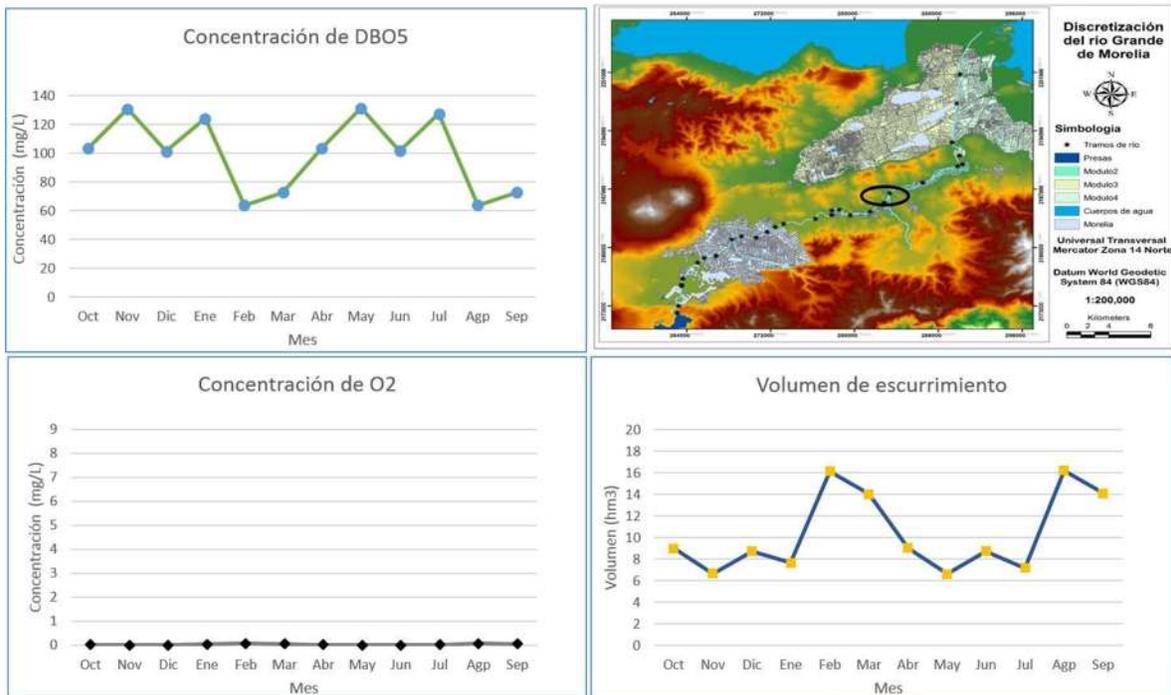


Figura 118. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 22.

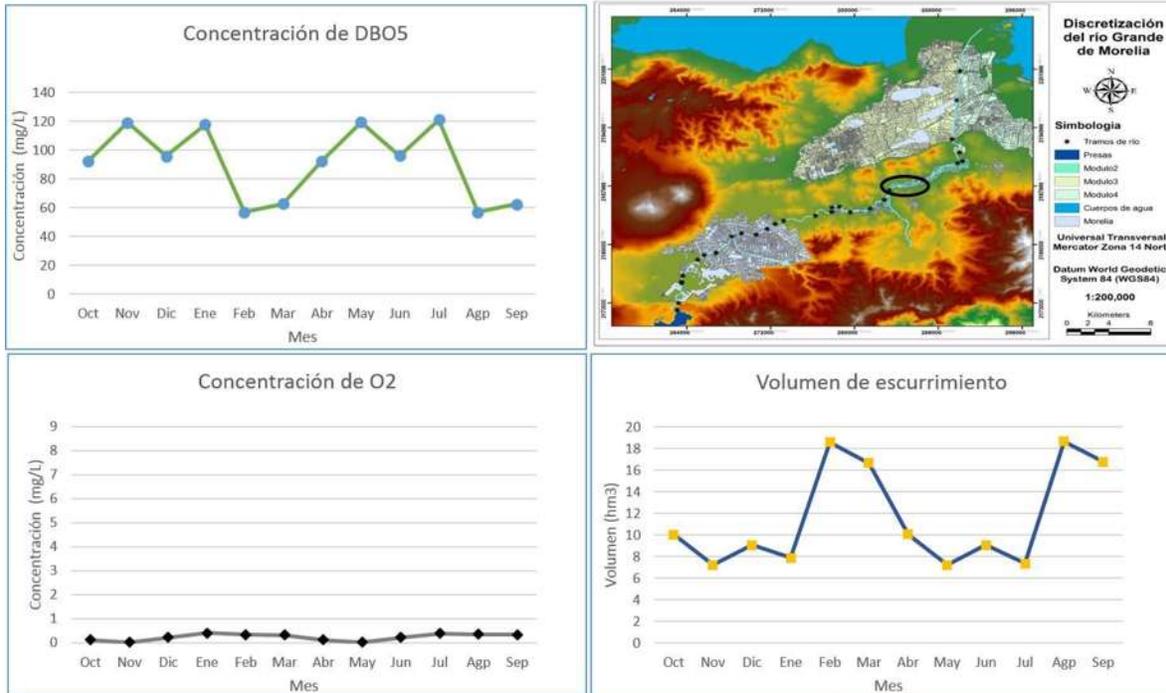


Figura 119. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 23.

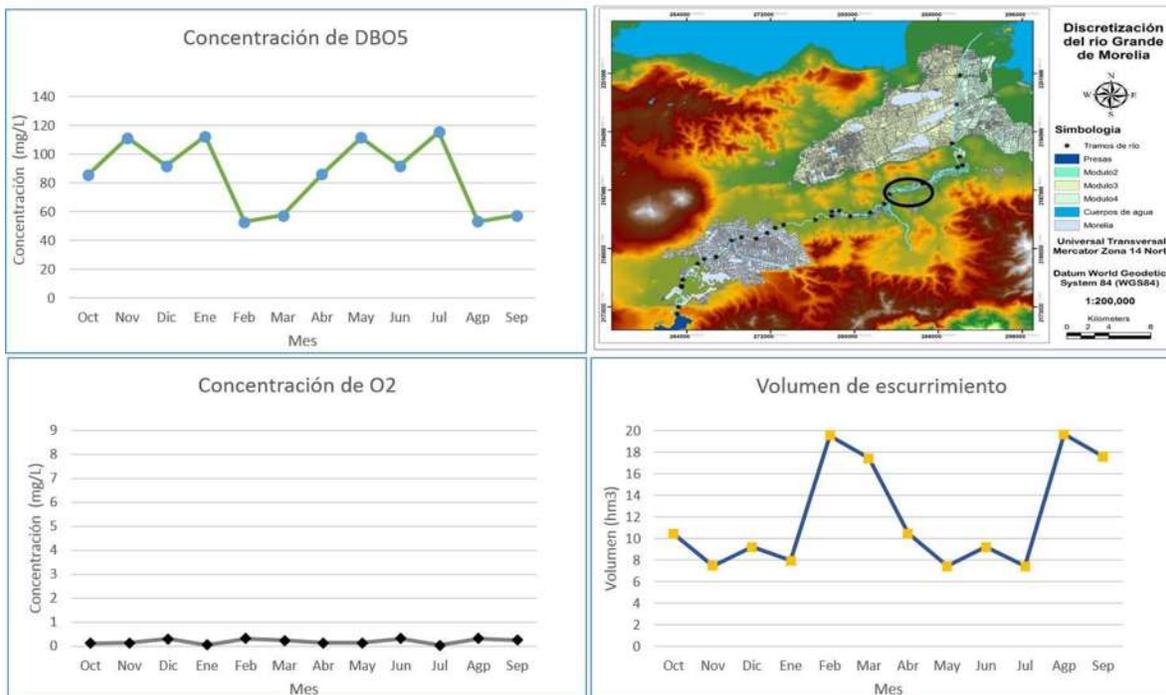


Figura 120. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 24.

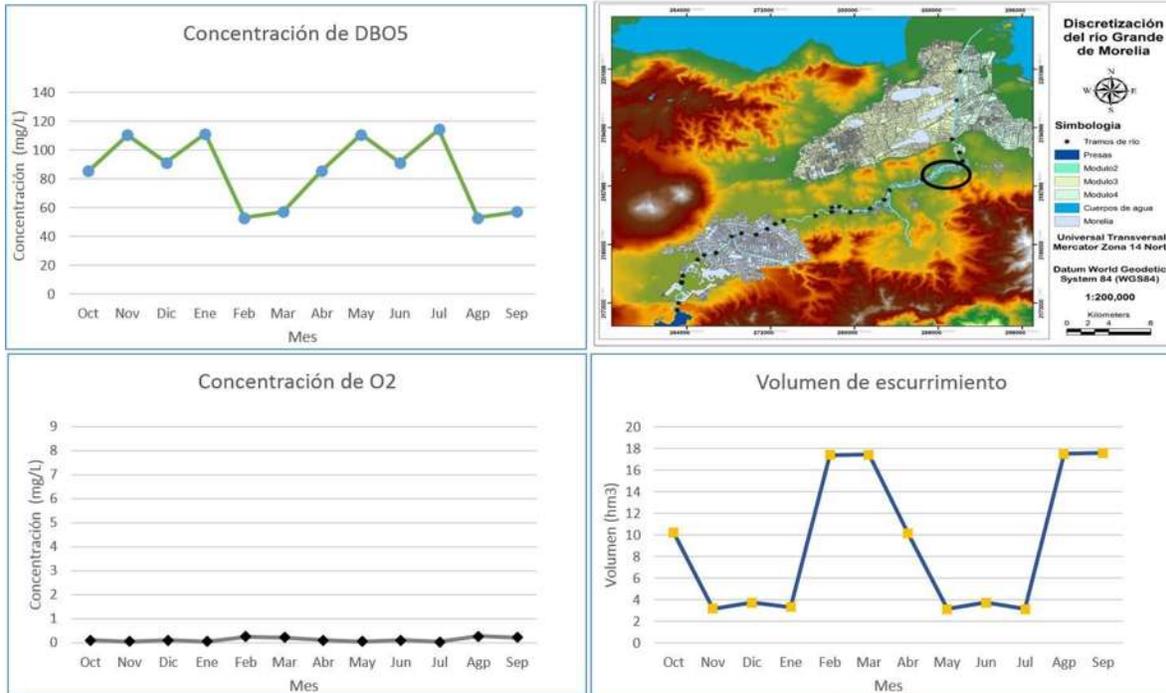


Figura 121. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 25.

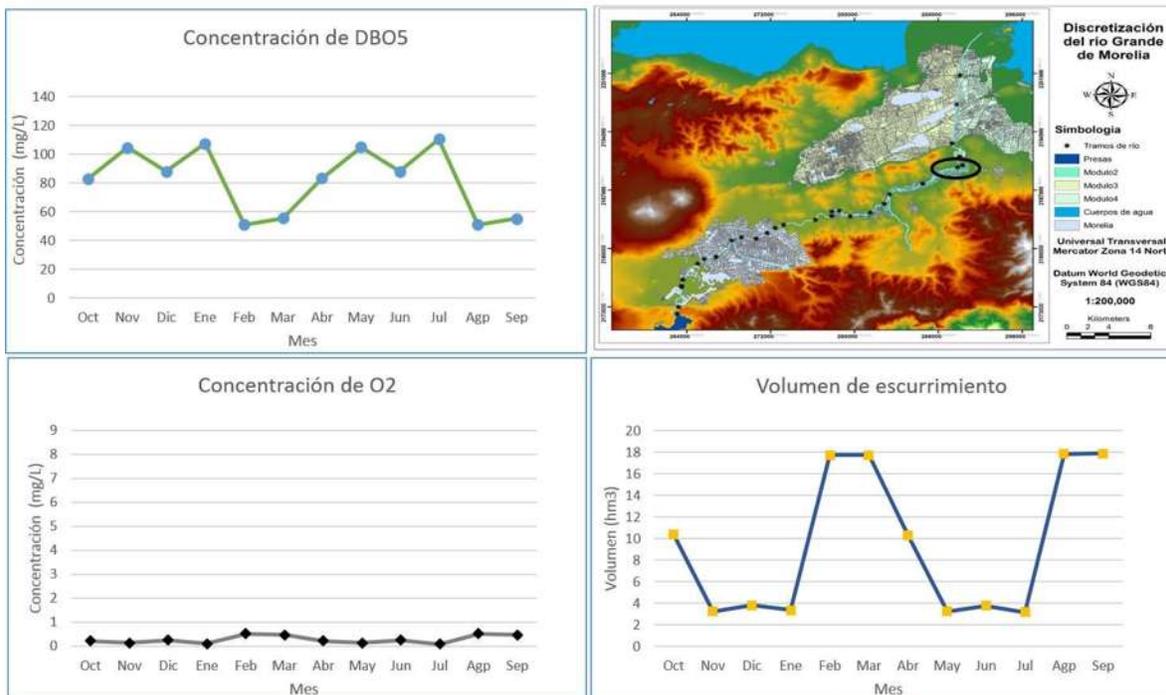


Figura 122. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 26.

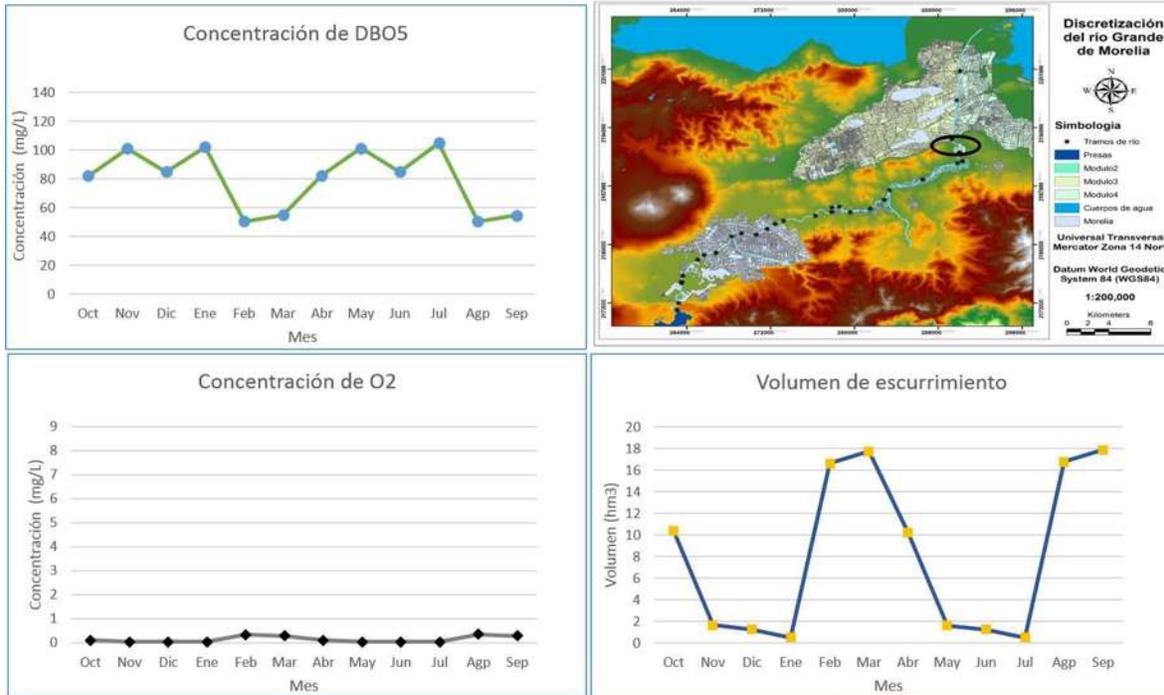


Figura 123. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 27.

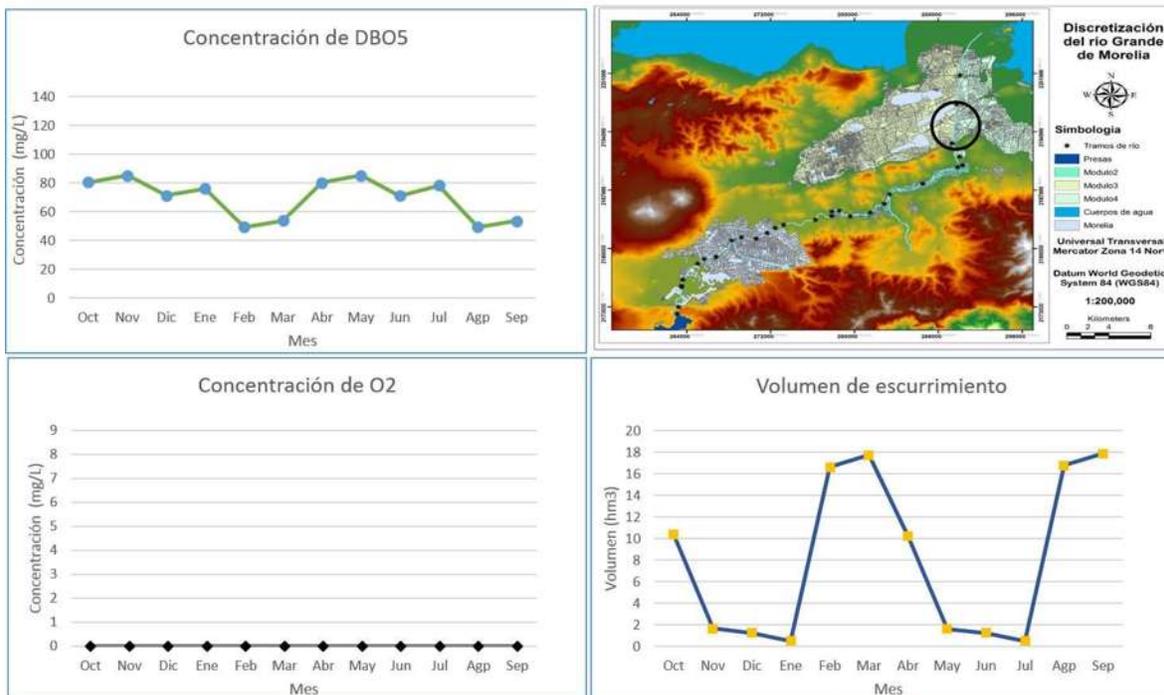


Figura 124. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 28.

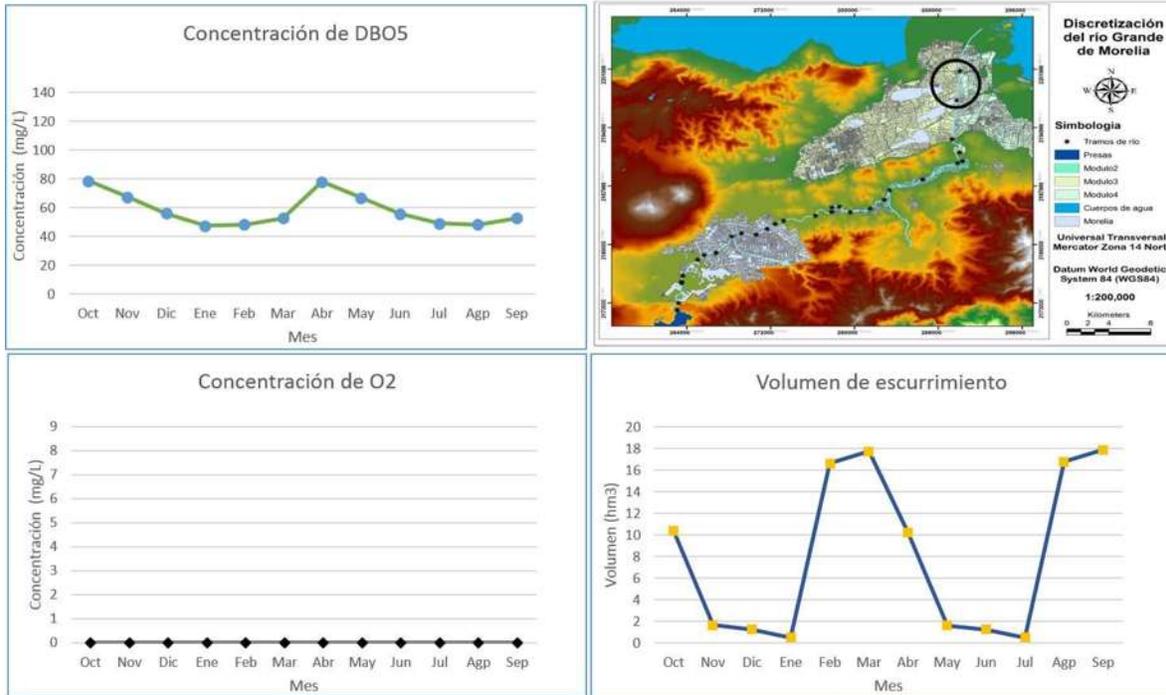


Figura 125. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 29.

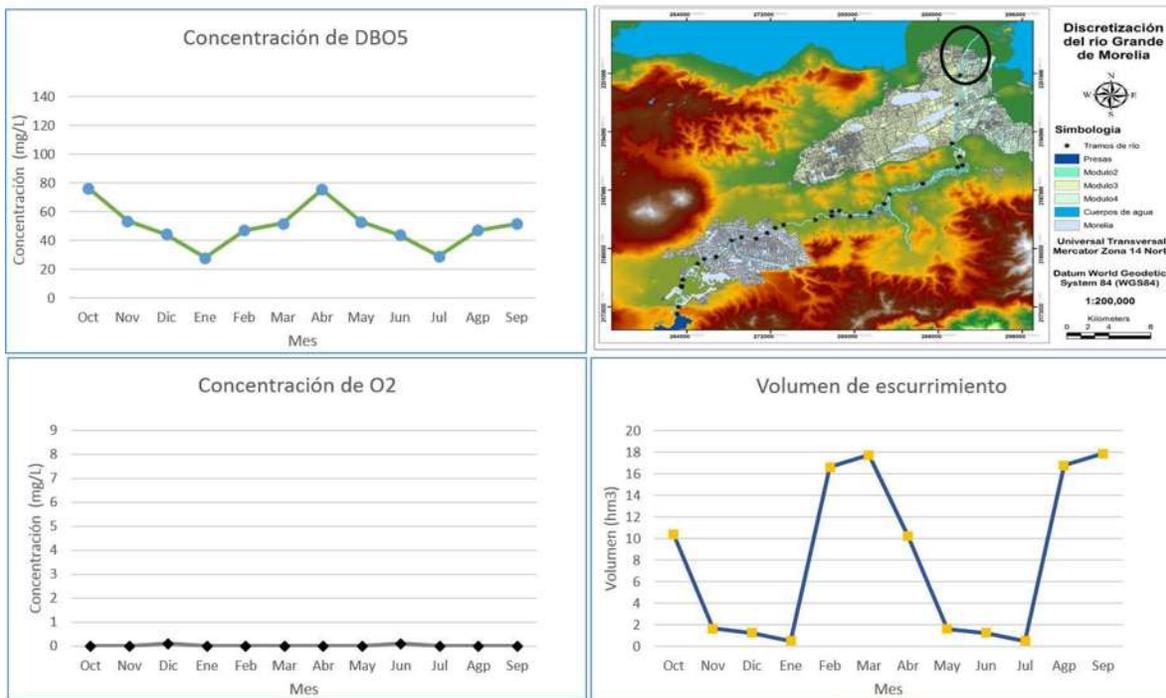


Figura 126. Evolución de las concentraciones de DBO₅, O₂ y el escurrimiento en el río Grande de Morelia Tramo 30.



En las figuras 111 a 113 se presentan los resúmenes anuales de los escurrimientos para el escenario RCP 8.5 CL3 (2075-2099) donde es importante señalar incremento de DBO₅ y disminución de O₂ cercano a cero.



Figura 127. Evolución espacial de DBO₅ en el río grande de Morelia escenario RCP 8.5 CL3.

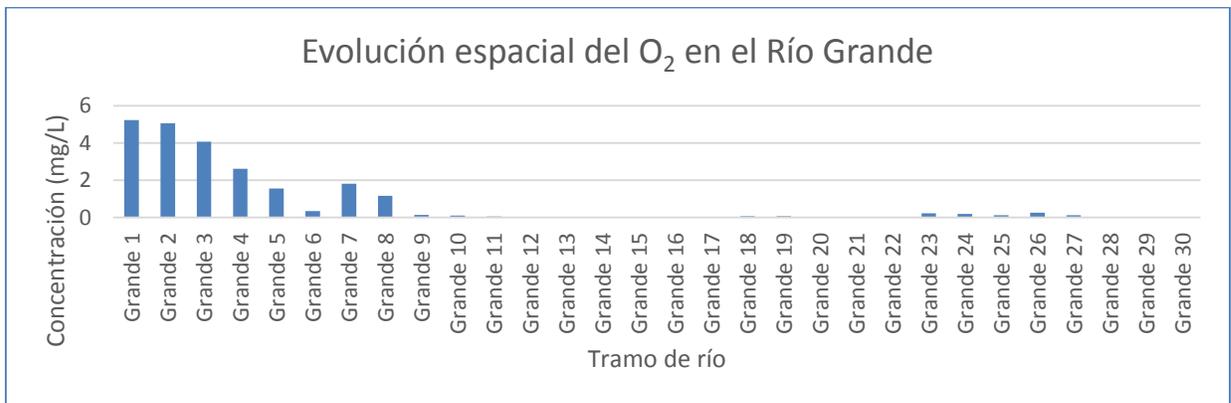


Figura 128. Evolución espacial del O₂ en el río Grande de Morelia escenario RCP 8.5 CL3

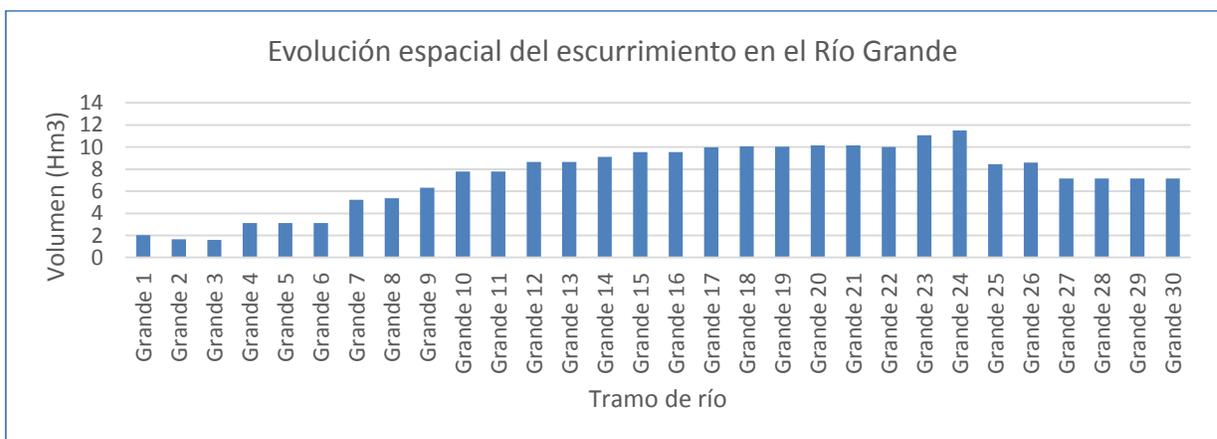


Figura 129. Evolución espacial del escurrimiento en el río Grande de Morelia escenario RCP 8.5 CL3



Todos los escenarios, además del periodo histórico se muestran en la Figura 114 para el caso de la DBO₅ donde es importante señalar que los incrementos de concentración se encuentran en el orden de 20 a 30 mg/L, ocasionado al incremento en los retornos urbanos y al cambio climático en la cantidad y calidad del río, esta imagen muestra en colores la calidad del agua que se obtuvo de acuerdo a la CONAGUA 2012 (tabla 29).

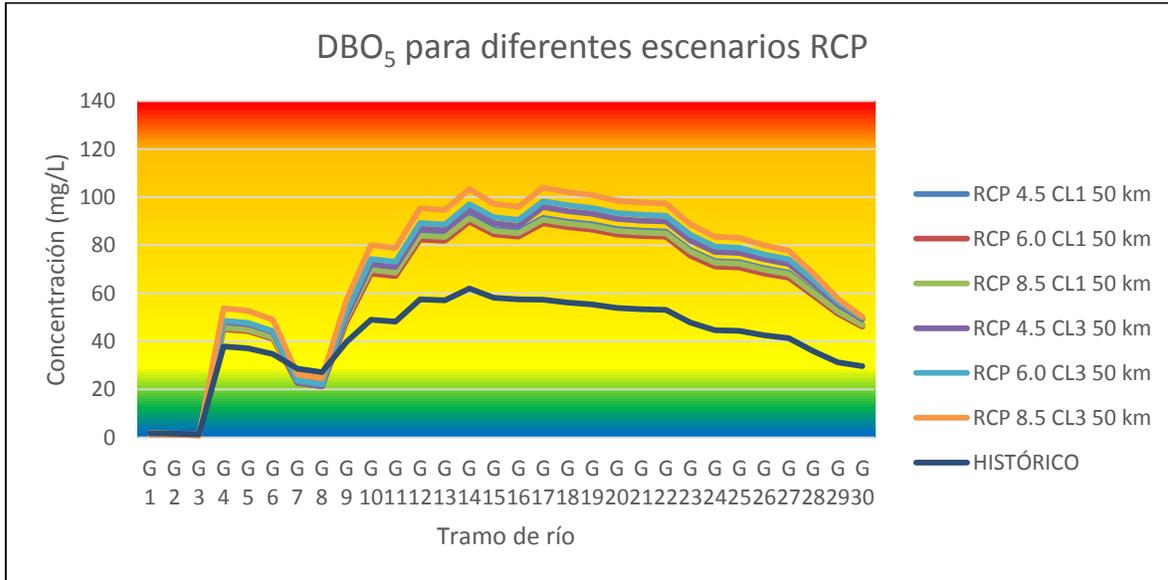


Figura 130. Evolución temporal de la DBO₅ para diferentes escenarios de cambio climático

Tabla 29. Calidad del agua de acuerdo al parámetro DBO₅

Calidad del agua de Acuerdo a la DBO ₅	
DBO ₅ ≤ 3 mg/L	Excelente
3 mg/L < DBO ₅ ≤ 6 mg/L	Buena Calidad
6 mg/L < DBO ₅ ≤ 30 mg/L	Aceptable
30 mg/L < DBO ₅ ≤ 120 mg/L	Contaminada
DBO ₅ > 120 mg/L	Fuertemente Contaminada

En el caso del oxígeno disuelto se muestra se tomaron los datos de calidad de acuerdo a la EPA (tabla 27) y los resultados indican un consumo de oxígeno casi en su totalidad después del tramo 10 (figura 115).por lo tanto no es posible tener vida en el río, y que es uno de los objetivos de los planes hídricos en 2030. Por lo que estos resultados servirán para hacer una recuperación del río y saber con mayor precisión los lugares donde es importante realizar el saneamiento del río.

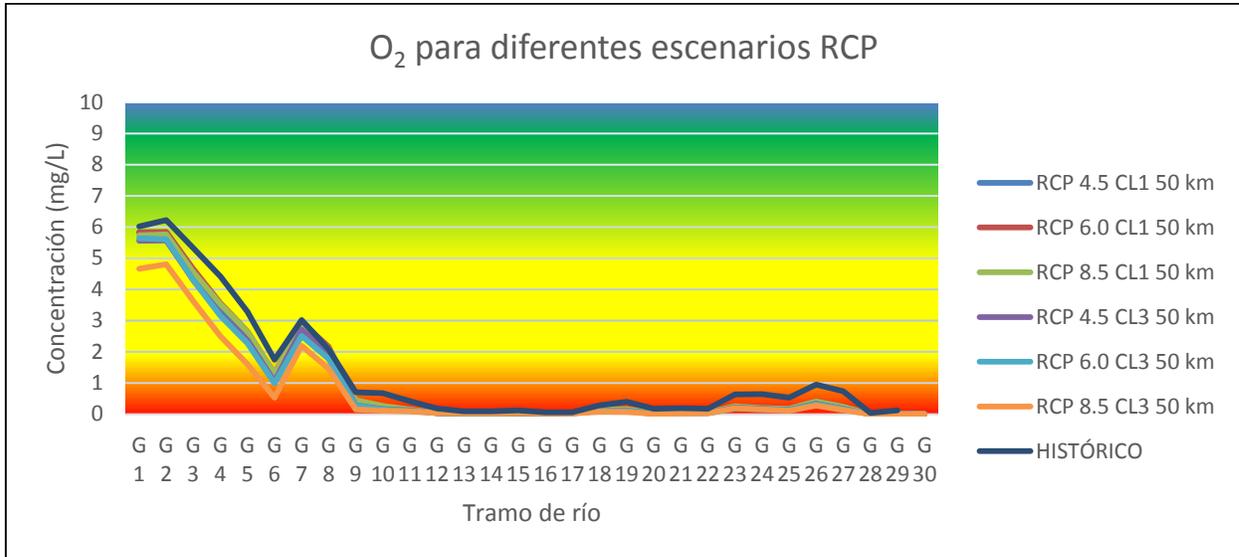


Figura 131. Evolución temporal de la O₂ para diferentes escenarios de cambio climático

Tabla 30. Calidad del agua de acuerdo al O₂. Clasificación de la (EPA)

Calidad del agua de Acuerdo al O ₂	
O ₂ > 9mg/L	Excelente
5 mg/L < O ₂ <= 9 mg/L	Bueno
2 mg/L < O ₂ <= 5 mg/L	Aceptable
O ₂ < 2 mg/L	Pobre

8.23 Discusión de los Modelos Elaborados

El diseño de la infraestructura hidráulica ha sido en función de las condiciones climáticas actuales e históricas, más sin embargo para el futuro y debido a que el clima se encuentra en constante cambio esta infraestructura puede ser insuficiente o inadecuada.

Debido al cambio climático, las diferentes variables climáticas se verán afectadas de manera importante como el incremento de la temperatura y a la disminución de la precipitación y por lo tanto es importante desarrollar estudios de manera integral que nos permitan planificar los recursos para el futuro.

La gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) es muy importante ya que a través de ella podemos conocer el estado actual de las cuencas desarrolladas y ver la problemática que se presenta en la actualidad, así como ver la opción de plantear soluciones que nos permitan un mejor aprovechamiento del agua. En base a la gestión integrada podemos hacer la planificación de los recursos hídricos, el diseño de nueva infraestructura, el tipo de cultivo,



el área de cultivo, la operación de embalses y el suministro a la demanda. La gestión integrada requiere de la utilización secuencial de diversos modelos de simulación climáticos, hidrológicos y de gestión de los recursos hídricos, los cuales han sido validados en los últimos años debido a su uso cotidiano.

La modelación climática más confiable en la actualidad se realiza a partir los MGC donde podemos conocer sus anomalías y dispersiones. Los modelos climáticos tratan de representar la evolución del clima a lo largo del tiempo mediante ecuaciones que expresan las leyes físicas que gobiernan el sistema climático.

Debido a que se requiere conocer el cambio climático de manera regional es necesario contar además de los modelos globales con modelos regionales que nos permitan conocer de manera espacial y temporal un gran número de variables como la temperatura mínima, temperatura máxima, humedad del suelo, precipitación, escurrimiento, entre otros. En la actualidad se dispone de resultados de modelos regionales a partir de los resultados de los modelos generales de circulación océano atmósfera.

Los modelos regionales de clima (RCM, por sus siglas en inglés) son considerados como la mejor técnica para realizar proyecciones reales de cambio climático a escala regional. Los modelos regionales son esencialmente similares al módulo atmosférico de cualquier Modelo de Circulación General, pero se aplican a un área limitada de la tierra con mayor resolución, es decir discretizando espacialmente con celdas de menor tamaño y anidándolos en la malla del modelo global.

Estas diferentes resoluciones afectan la calidad de los resultados, espacial y temporalmente, y es preferiblemente tener un escenario con una serie temporal a pesar de que la resolución sea menor, a diferencia de tener escenarios regionalizados de mayor resolución pero que no demuestre la temporalidad de la información climática.

El Modelo de simulación hidrológica Témez nos permite conocer el ciclo hidrológico superficial y recarga al acuífero, donde a partir de él podemos conocer los escurrimientos superficiales y las recargas al acuífero. A pesar de ser un modelo agregado nos ha permitido obtener muy buenos resultados para la representación del clima actual. De acuerdo a la información disponible se

A partir del modelo de Témez se han desarrollado modelos distribuidos para la representación del ciclo hidrológico que es un simulador mensual del ciclo hidrológico con calidad del agua



que se apoya en un sistema de información geográfica (SIG), lo que permite conocer la evolución del ciclo hidrológico de manera espacial y conocer el cualquier punto de la cuenca el escurrimiento que se efectúa.

El modelo de simulación del acuífero se llevó a cabo mediante el programa AQUIVAL fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia desarrollado principalmente para la modelación distribuida del acuífero. Este modelo nos permite realizar la simulación a escala mensual y donde se puede observar la evolución del acuífero y de los niveles piezómetros, es de gran utilidad para conocer las evolución de un sistema subterráneo.

El modelo de simulación del sistema de recursos hídricos de la cuenca del río Grande de Morelia fue desarrollado mediante el programa SIMGES perteneciente al Sistema Soporte de Decisión AQUATOOL (Andreu et al. 1996) y su nueva versión AquaToolDMA (Solera et. al 2007) y fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia. Este es un modelo general para la Simulación de la Gestión de Cuencas, o sistemas de recursos hidráulicos complejos, la simulación se efectúa a nivel mensual y reproduce a la escala de detalle espacial que el usuario desee el flujo del agua a través del sistema. Además puede simular las pérdidas por evaporación y filtración en embalses y cauces, así como las relaciones entre aguas superficiales y aguas subterráneas.

El modelo de Simulación de Gestión de la Calidad del Agua GESCAL al igual que SIMGES fue desarrollado por fue desarrollado por el Departamento de Hidráulica y Medio Ambiente de la Universidad Politécnica de Valencia y se encuentra como otro módulo de AquaToolDMA. Este módulo permite la analizar la evolución espacio temporal calidad del agua en los sistemas modelados, fruto de las diferentes alternativas de gestión, depuración, contaminación y uso del recurso hídrico (Paredes *et al.*, 2009). Las principales ventajas de este SSD es que puede integrar los resultados de la simulación de la cantidad del agua con los resultados de la calidad del agua, sean (DBO₅, O₂, Nitrogeno, Fosforo y toxicos entre otros)

8.24 Discusión de los resultados obtenidos

En la presente sección se analizaran los resultados obtenidos de las diferentes demandas, aportaciones así como los resultados de la Gestión Integrada de los Recursos hídricos (GIRH) en cantidad y calidad del agua.



La temperatura del planeta se está incrementando por los efectos de los gases de efecto invernadero (GEI) y la precipitación a futuro se está reduciendo con lo cual se analizan diferentes familias de escenarios o líneas evolutivas que nos permitan conocer la evolución del clima para los años 2010-2099. Las líneas evolutivas analizadas fueron 6, con dos y tres escenarios a diferentes resoluciones, en total se analizaron 24 escenarios de cambio climático y un escenario base que presenta las condiciones actuales de la zona de estudio.

Dentro de los escenarios RCP se concluyó que los escenarios con una resolución espacial de 50 km y con serie temporal mensual presentan de una manera adecuada la temporalidad de acuerdo a los resultados de escurrimientos, generados en base a las precipitaciones y temperaturas. Los escenarios RCP con resolución espacial de 1 km presentan una desventajada debido a la falta de temporalidad, lo que ocasiona que los escurrimientos sean modificados pero en función de valores medios, con lo que los valores máximos y mínimos que se pueden presentar mensualmente se encuentran excluidos del cálculo del escurrimiento y el análisis conjunto de recursos hídricos.

Por otro lado se analizaron los escenarios por su grado de afectación al sistema de la cuenca del río grande de Morelia y como era de esperarse el escenario más crítico es el RCP 8.5, seguido del RCP 6.0 y finalmente el RCP 4.5, esto de acuerdo a todos los resultados obtenidos desde los escurrimientos, gestión de cantidad y gestión de calidad.

La línea evolutiva que presentó los mayores cambios fue la A2, seguida de la línea evolutiva A1B que presentaba la mayor dispersión mensual, es decir las condiciones extremas para esta línea evolutiva son mayores, la línea evolutiva B1 por su parte evoluciona de manera más importante en los años 2010-2039 siendo incluso mayores los cambios que las otras dos líneas evolutivas, más sin embargo para los siguientes años los cambios climáticos disminuyen incluso para los años 2070-2099 donde se incrementa la precipitación y la temperatura no se incrementa de manera importante.

La evapotranspiración que depende de la temperatura se incrementó en la cuenca de manera importante y fue un factor para la disminución del escurrimiento superficial y la recarga al acuífero todas las líneas evolutivas analizadas. La evaporación en el embalse que depende de la temperatura, esta se incrementó de manera importante lo cual indica pérdidas de volumen en el embalse Cointzio.



Los escurrimientos superficiales y la recarga al acuífero se ven afectados por la disminución de la precipitación y el incremento de la evapotranspiración siendo mayormente afectados en la cabecera de la cuenca en la aportación Cointzio. El agua renovable *per cápita* (habitante) disminuye con el incremento de la población y con el efecto del cambio climático, para el núcleo de la ciudad de Morelia la disponibilidad *per cápita* es de 129.2 m³/hab/año de acuerdo a las aportaciones superficiales de la presa Cointzio y el manantial la Mintzita y el abastecimiento de pozos profundos, los manantiales San Miguel, el Salto y la Higuierilla. Debido a que se encuentra en zona de veda tanto superficial como subterráneo (CONAGUAA 2014) no es posible incrementar el abastecimiento superficial ni incrementar los bombeos al acuífero Morelia-Queréndaro. En condiciones futuras la población se incrementara ocasionando una mayor presión sobre el recurso hídrico esto es 98.7 m³/hab/año para el 2040, 75.5 m³/hab/año y para finales del siglo 57.7 m³/hab/año 2100, esto sin considerar el efecto de cambio climático en la disponibilidad del recurso Hídrico. Considerando el efecto más crítico el escenario 8.5 RCP 2075-2099 la disponibilidad disminuye hasta 43 m³/hab/año para la ciudad de Morelia específicamente.

La demanda agrícola en el Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro se incrementó debido a los aumentos en la evapotranspiración y la disminución de la precipitación, con lo cual podemos concluir que los cultivos en el futuro se verán afectados por el estrés hídrico y térmico, disminuyendo su producción de manera significativa. Para conocer los efectos del estrés hídrico se recomienda hacer un estudio de efectos de cambio climático con un estrés hídrico similar al que se presentó en los escenarios de cambio climático, reduciendo la aportación a los cultivos entre un 26% y un 48% de la demanda del cultivo (escenario RCP 8.5 2075-2099). El resto de los escenarios son menos críticos como el escenario RCP 4.5 (2015-2039) con déficits del 5% y hasta del 20% o el RCP 6.0 (2075-2099) con déficits del 12% a 24%. También es necesario plantear diferentes periodos de estrés hídricos en duración e intensidad, así como el incremento en las variables climáticas. Se recomienda de la misma manera analizar parámetros como la pérdida de altura, tallos, raíces, área foliar, peso foliar específico, biomasa de la planta, así como monitorear constantemente la eficiencia del uso del agua y la evapotranspiración.

Las demandas en el sistema de gestión se incrementan de manera importante, por lo tanto podemos concluir que el efecto del cambio climático en los recursos hídricos puede ser no



tan significativo si analizamos las demandas aisladas, pero para el sistema de gestión como todas las variables cambian se pueden tener serios problemas en el futuro ocasionando conflictos en el manejo y el uso del agua, ocasionando cambios como por ejemplo:

Cambio político.-En las normas para regular y planificar los suministros urbano, agrícola e Industrial.

Cambio Económico.- En el encarecimiento de los productos que se cultivan en el Distrito de Riego, la disminución del rendimiento de los cultivos lo que implica una mayor necesidad de importar alimentos de otros estados o países.

Social.- Los problemas de abastecimiento urbano afectan a la población perteneciente al área de estudio

8.25 Vulnerabilidad Riesgo y adaptación al cambio climático

8.26.1 Vulnerabilidad y Riesgo

Con el cambio climático, el peligro debido a cambios en temperaturas, precipitaciones, escurrimientos, recarga, volumen en embalses, entre otros está aumentando y dado el incremento en la vulnerabilidad, la condición de riesgo alcanza niveles críticos con mayor frecuencia. Establecer cuánto es mucho o poco riesgo requiere cuantificar los peligros y la vulnerabilidad. A través de la construcción de escenarios de riesgo cuantitativos, los tomadores de decisiones podrán priorizar las acciones de adaptación necesarias para prepararse a un clima diferente al actual.

La exposición es un factor que genera vulnerabilidad, de tal forma que si no hay exposición a un fenómeno específico no existe riesgo. En la presente tesis se trabaja con el concepto de riesgo, como la combinación del peligro y la vulnerabilidad y en este sentido, un sistema es vulnerable en la medida en que esté expuesto a un peligro (figura 132)

De acuerdo al IPCC (2012) la vulnerabilidad es el conjunto de condiciones físicas, sociales y económicas que inciden en la posibilidad de afectación de las personas, de un sistema social y/o natural, debido a la ocurrencia de fenómenos naturales, y que están en relación con su exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa. El peligro es una condición de tiempo o clima; generalmente, se representa por la probabilidad de que ocurra un fenómeno meteorológico particular (Magaña 2013). El riesgo es la combinación del peligro y la

vulnerabilidad. Probabilidad de que se produzca un daño en las personas, en uno o varios ecosistemas, originado por un fenómeno natural o antropógeno (LGCC, 2012).



Figura 132. Diagrama de estructura del riesgo bajo cambio climático (Magaña 2013).

Hasta ahora no ha sido fácil establecer las características de la vulnerabilidad y más complicado aún, establecer metas de reducción de ésta, pues gran parte de los estudios desarrollados hasta ahora son de tipo cualitativo (Magaña 2013), mas sin embargo en esta tesis será posible establecer acciones encaminadas la reducción de la vulnerabilidad.

Los indicadores sirven la cuantificación de la vulnerabilidad, ordenando y sistematizando información para la planificación, evaluación y toma de decisiones, y permiten constituir sistemas de información que dan cuenta de las características cuantitativas de un ámbito físico, económico y social. CONAGUA (2012) desarrollo una serie de índices con el objetivo de analizar el riesgo a sequias en base a la disponibilidad del agua, el agua concesionada, el tratamiento de aguas residuales, entre otros.

El Índice Estandarizado de Precipitación (SPI, por sus siglas en inglés) es un índice de normalización de la precipitación histórica que permite identificar condiciones de déficit y exceso de precipitación a corto y largo plazo. El índice es calculado en base a la suposición de que la distribución probabilística de la precipitación es Gamma, por lo que al utilizar estos índices para ajustarlos a una distribución de probabilidad normal se le nombra como estandarización o normalización de la precipitación. Los valores son representativos de la



variabilidad de la precipitación con respecto a su historial, en donde los valores negativos indican déficit y los positivos superávit (McKee *et. al.*, 1993).

El índice de grado de presión (IGP) del agua indica el porcentaje del agua empleada en usos consuntivos con respecto al agua disponible y se calcula mediante la siguiente expresión

$$IGP (\%) = \frac{\text{Volumen total de agua concesionada}}{\text{volumen agua disponible}} * 100$$

Este índice teóricamente varía entre cero y uno pero debido a la creciente demanda de agua el IGP se reducirá de 1 a 0 para los diferentes escenarios de cambio climático, ocasionando una mayor vulnerabilidad al sistema climático

Otro índice es del porcentaje de acuíferos sobreexplotados y con intrusión salina (ASIS), que se define como la sobreexplotación de acuíferos en función de la relación extracción/recarga y salinización de suelos por intrusión salina costera.

$$ASIS = \frac{\text{Acuíferos sobreexplotados} + \text{Acuíferos con intrusión salina}}{\text{Total de acuíferos}} * 100$$

El índice de agua tratada agua consumida es la proporción de agua pública residual tratada con respecto al agua urbana consumida es otro índice importante ya que este determina tanto el volumen de agua que se encuentra contaminada, así como el agua que se está depurando. Es importante también el tipo de tratamiento que utilice para ver la remoción de contaminantes y cuales se incorporan a los ríos y lagos siguientes.

$$AtAc = 1 - \frac{\text{volumen de agua residual tratada}}{\text{volumen de agua concesionada para abastecimiento urbano}}$$

La tarifa de consumo en ciudades (TC) es un parámetro económico del consumo directo y de acuerdo a la CONAGUA (2012) se utiliza un supuesto de producción de 25 pesos/m³. Se determina con la siguiente expresión:

$$TC = \frac{\text{tarifa de cobro}}{\text{precio de producción}}$$



El índice de falta de agua para cultivos, indica el volumen de agua demandado respecto al concesionado en los diferentes módulos del distrito de riego, así como a la demanda urbana, por lo tanto la vulnerabilidad del mismo a reducir el rendimiento y la seguridad alimentaria, así como al abastecimiento público.

$$IC = \frac{\text{Volumen de Agua entregada}}{\text{Volumen Agua demandada}} * 100$$

Se analizaron las diferentes estaciones a nivel mensual y anual para las estaciones dentro de la cuenca del río Grande de Morelia, estas son la estación 16001, 16022, 16080, 16081, 16028 y 16254. De estas los se analizó el SPI para un periodo histórico de 35 años, donde como se puede apreciar en la figura 133. De acuerdo a la clasificación de la tabla XX. Se encuentra en los rangos correspondientes a moderadamente seco y muy seco, y algunos meses de moderadamente húmedo a muy húmedo (figura 133).

Tabla 31. Índice estandarizado de precipitación (Guttman 1998 y 1999)

SPI	Probabilidad de ocurrencia	Interpretación	Ocurrencia
-3	0.0014	extremadamente seco	1 en 50 años
-3	0.0062	extremadamente seco	1 en 50 años
-2	0.0228	extremadamente seco (SPI < -2.0)	1 en 50 años
-2	0.0668	severamente seco (-2.0 < SPI < -1.5)	1 en 20 años
-1	0.1587	moderadamente seco (-1.5 < SPI < -1.0)	1 en 10 años
-1	0.3085	ligeramente seco	
0	0.5	ligeramente normal	
0.5	0.6915	ligeramente humedo	
1	0.8413	moderadamente humedo (1.0 < SPI < 1.5)	1 en 10 años
1.5	0.9332	muy humedo (1.5 < SPI < 2.0)	1 en 20 años
2	0.9772	extremadamente humedo (2.0 < SPI)	1 en 50 años
2.5	0.9938	extremadamente humedo	1 en 50 años
3	0.9986	extremadamente humedo	1 en 50 años

En el caso de los escenarios de cambio climático se analizaron los diferentes escenarios RCP resolución de 50 km como se han evaluado anteriormente, se espera por lo tanto una disminución en el SPI. Se consideró el periodo histórico con un promedio de 35 años resultando 0 el SPI para el periodo histórico, posteriormente se analizaron los promedios de los escenarios, resultando para todos los casos disminución de la precipitación.

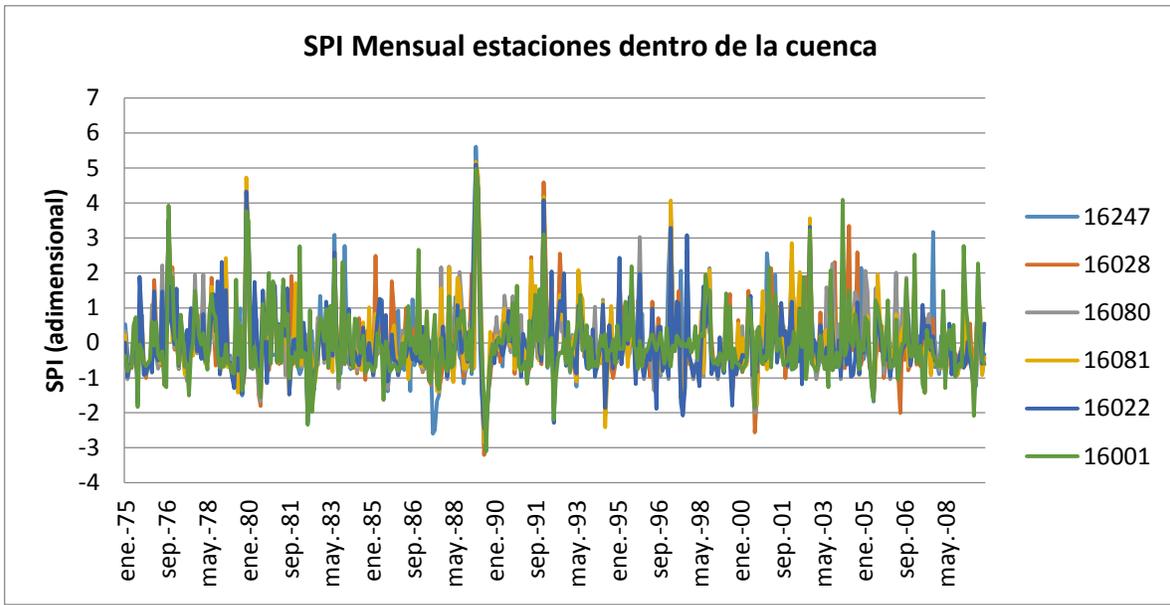


Figura 133. SPI mensual para las estaciones dentro de la cuenca del río grande de Morelia para el periodo histórico.

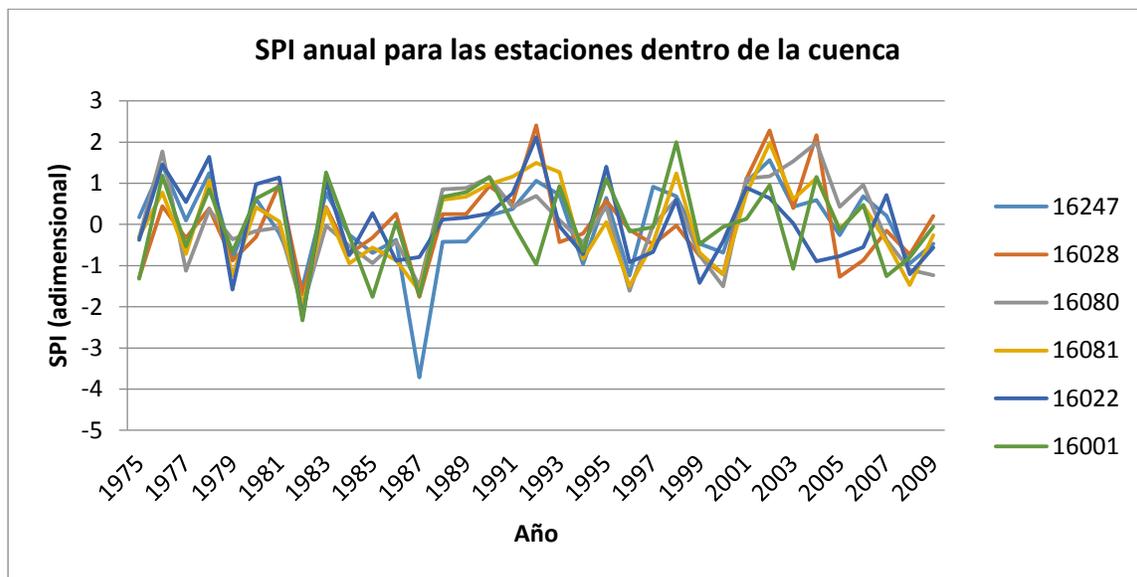


Figura 134. SPI mensual para las estaciones dentro de la cuenca del río grande de Morelia para el periodo histórico.

En la tabla 32 y de acuerdo a la clasificación del SPI se presentaran condiciones de clima normal a ligeramente seco para todos los escenarios en el periodo 2015-2039. Mas sin embargo para los años 2075-2099 se presentan climas de ligeramente seco, moderadamente seco, y severamente seco, con años extremadamente secos. La mayor afectación se dará en



la parte alta de la cuenca, aguas arriba de la presa Cointzio lo que ocasionara disminución en los escurrimientos y por lo tanto en la disponibilidad.

Tabla 32. Índice de SPI para los diferentes escenarios de cambio climático

Estación	1975-2009	2015-2039			2075 2099		
	Histórico	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5	RCP 8.5	RCP 6.0	RCP 4.5
16001	0	-0.605	-0.634	-0.702	-1.629	-0.836	-0.850
16022	0	-0.719	-0.822	-0.797	-1.423	-1.014	-0.842
16081	0	-0.375	-0.504	-0.428	-0.971	-0.635	-0.469
16080	0	-0.547	-0.663	-0.612	-1.197	-0.824	-0.656
16028	0	-0.371	-0.388	-0.401	-0.510	-0.511	-0.401
16247	0	-0.474	-0.506	-0.528	-1.140	-0.497	-0.497

El índice de grado de presión (IGP) para las condiciones actuales se determinó por separado de las aguas superficiales y subterráneas, ya que como se vio en apartados anteriores el agua superficial se encuentra totalmente concesionada, así como la subterránea, por lo tanto el acuífero y los escurrimientos superficiales se encuentran dentro del límite de gestión, manteniendo un cierto volumen en la presa Cointzio, y abatiendo los niveles estáticos en el acuífero.

Para el sistema de gestión se generan por la cabecera de la cuenca se genera 80.763 hm³/año en promedio y que se embalsan en la presa Cointzio, además tiene aportaciones intermedias y retornos que abastecen demandas de los diferentes Módulos del distrito de riego, además presenta aportaciones intermedias naturales y por retornos urbanos y agrícolas, en el orden de 150 hm³, mas sin embargo estos son muy poco aprovechables (Módulos 3 y 4) debido que no se encuentra regulado el escurrimiento aguas debajo de la presa, además que abastece el Lago de Cuitzeo y es un regulador natural del mismo. La demanda de escurrimiento superficial es de 104 hm³/año y de los 231 hm³/año que escurren en la subcuenca, al lago se incorporan 124 hm³/año, por lo tanto se abastecen las demandas alrededor de 107 hm³/año. Para el sistema subterráneo se presentan los volúmenes para el acuífero en la tabla 16, esto con un volumen de demanda media anual de 290 hm³/año y una recarga de 288 hm³/año. Por lo tanto el IGP es de 99.74%, el sistema subterráneo presenta un déficit y el superficial se encuentra en el límite. Para los diferentes escenarios este volumen disminuye ya que la demanda se incrementa y el volumen disponible medio anual superficial y subterráneo



disminuye. Este índice disminuye de 0.891 hasta 0.563, es decir la vulnerabilidad hídrica se incrementara considerablemente en la cuenca en estudio.

Tabla 33. Índice de grado de presión sobre el recurso hídrico para el sistema de la cuenca del río grande de Morelia

Escenario	Demanda (hm ³ /año)	Suministro (hm ³ /año)	IGP
RCP 4.5 2015-2039	435.574	388.128	0.891
RCP 6.0 2015-2039	435.564	381.422	0.876
RCP 8.5 2015-2039	436.583	372.617	0.853
RCP 4.5 2075-2099	634.780	377.033	0.594
RCP 6.0 2075-2099	637.015	377.051	0.592
RCP 8.5 2075-2099	639.015	359.862	0.563

Por otro lado el índice ASIS solo indica si el acuífero se encuentra sobre explotado y como en el caso de estudio si lo está, es vulnerable ante el cambio climático.

El agua residual tratada con respecto al volumen total y como no se consideraron incrementos en las aportaciones del 2040 y se tiene pensado tratar el volumen generado en la demanda, es el mismo para todos los escenarios y el índice se calculó en un el 83.45%, lo cual indica que el agua tratada teóricamente debe tener la calidad suficiente.

El parámetro de las tarifas para consumo de agua potable se establecen los costos de acuerdo a la zona de disponibilidad del acuífero y que se determinan en función del volumen disponible, hay 4 tipos de zonas diferentes y La cuenca del río Grande de Morelia y el acuífero Morelia-Queréndaro se encuentran en una zona de disponibilidad uno, es decir la de menor disponibilidad publicada en el “acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2014”.

En la ley federal de derechos en su artículo 223, se establecen los costos por uso del agua para uso agrícola e industrial se consideran de \$13.8162/m³ para el caso del agua superficial y para agua proveniente de uso subterráneo de \$18.6169/m³, en el caso de agua potable se establece en \$410.62/m³ de origen superficial y \$428.63/m³ de origen subterráneo. Los ingresos que se obtengan por la recaudación de los derechos por la explotación, uso o aprovechamiento de aguas nacionales a que se refiere esta fracción, que paguen los



municipios, se destinarán a la Comisión Nacional del Agua para obras de infraestructura hidráulica.

El costo del agua potable de la relación, tarifa/costo de producción es muy superior a la relación para usos agrícolas e industriales. En el caso de agua superficial para usos agrícolas e industriales es de 0.5526 y en el caso de la subterránea 0.7747, mientras que para el caso del agua potable la relación es de 16.4248 (superficial) y 17.1452 (subterráneo); por lo tanto el volumen que se utiliza en el distrito de riego es más económico pero de menor calidad que en el caso del agua usada para el consumo humano.

8.26.2 Adaptación al cambio climático.

Para revertir el daño potencial en la cuenca es necesario plantear escenarios en los que se incrementen los suministros a las demandas o que se reduzcan las demandas, se puede trabajar en diferentes líneas.

En este trabajo se plantea la disminución del riesgo mediante acciones específicas como:

1. Incrementar la eficiencia del Distrito de Riego 020 Morelia-Queréndaro (0.56 a 0.75)
2. Utilizar materiales como la lluvia sólida que incrementan la eficiencia del agua y el rendimiento del cultivo (50% ahorro)
3. Incrementar la eficiencia de la red de abastecimiento de agua potable de la ciudad de Morelia (0.5 a 0.75)
4. Reforestar la cabecera de la cuenca.
5. Evitar la tala de las diferentes zonas de la cuenca
6. Modificar los costos en el cobro de agua con el objetivo de minimizar su uso.
7. Incrementar el tratamiento de la infraestructura para la captación de aguas servidas
8. Racionalizar el agua

9 Líneas de investigación futuras

De acuerdo a las conclusiones de la presente tesis es necesario seguir la investigación en proyectos que enriquezcan el presente trabajo y que puedan desarrollarse en un futuro, y de



ahí resolver cuestiones que debido a la complejidad del problema o a la falta del presupuesto no se alcanzó a realizar en el presente estudio

Hacer un monitoreo en las estaciones climáticas en el río grande más detallado en cuanto a nitrógeno y fosforo en todas sus formas, con el objetivo calibración y validación de un modelo matemático y así poder analizar la evolución en el río grande de Morelia y su afectación en el lago de Cuitzeo.

Hacer un monitoreo de los retornos agrícolas procedentes del distrito de riego 020 Morelia-Queréndaro con el objetivo de saber la cantidad de nitrógeno y fosforo se incorpora al río grande de Morelia y al lago de Cuitzeo.

Hacer un monitoreo de otros contaminantes tóxicos de las diferentes industrias y que descargan diversos contaminantes que son perjudiciales para los diversos ecosistemas de la cuenca del río grande de Morelia y el lago de Cuitzeo.

Realizar una base de monitoreo de las aguas subterráneas con el objetivo de analizar la evolución espacio-temporal de los niveles estáticos en el acuífero Morelia-Queréndaro.

Realizar un diseño de experimento en base a los resultados de los efectos de cambio climático en las demandas agrícolas con el objetivo de analizar el estrés hídrico en los diferentes cultivos más representativos del distrito de riego 020-Morelia-Queréndaro.

Realizar un análisis a nivel de cuenca del Lago de Cuitzeo para conocer los efectos del cambio climático en la cantidad y la calidad del agua ya que presenta problemas de eutrofización debido a la gran carga de nutrientes y por su condición de cuenca endorreica, la concentración de los contaminantes se puede acentuar en los próximos años.

Realizar un estudio con respecto al cambio de uso de suelo presente en la subcuenca lo que puede condicionar cambios drásticos en escurrimientos, disponibilidad, ecosistemas, calidad del agua, entre otros.

Hacer un análisis de los suelos del distrito de Riego 020-Morelia-Queréndaro para conocer cuales cultivos son los más apropiados para cultivar dentro de la subcuenca y cuales son sensibles a los diferentes contaminantes presentes en la zona, además este estudio se puede



analizar la cantidad de químicos que se agregan año con año al suelo y sus implicaciones a corto, mediano y largo plazo como formadores de un sistema de recursos hídricos.

Analizar la evolución espacio temporal del embalse Cuitzeo para observar los efectos de la contaminación por descargas urbanas, retornos agrícolas y retornos industriales, además del cambio climático.

Plantear diferentes metodologías y analizar casos de estudio con respecto a la Gestión de Sistemas de Recursos Hídricos para poder establecer soluciones tempranas en cuanto a adaptación y reducción de la vulnerabilidad al cambio climático. Análisis de lluvia sólida para los cultivos en el estado de Michoacán con el objetivo de incrementar el rendimiento de los cultivos y el ahorro de agua de hasta el 80%, además de la captación de agua pluvial, la cual tiene beneficios directos para las grandes ciudades disminuyendo el escurrimiento superficial y almacenando agua para la reutilización en el hogar.

El índice ASIS solo indica que el acuífero se encuentra en una zona de veda y que para el caso de estudio lo está, debido a que se encuentra sobreexplotado y lo seguirá estando en un futuro cercano.

10 Bibliografía

IPCC, 2013. “Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático” [Stocker, T. F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S. K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.

INE, 2012. Portafolio de medidas de adaptación al cambio climático por efectos en la calidad climática por efectos en la calidad del agua por región hidrológica a partir de definir peligros, estimar la vulnerabilidad y determinar riesgos en los escenarios base y de cambio climático. Estudio elaborado por Instituto de Ingeniería de la Universidad Nacional Autónoma de México. Coordinado por Jiménez Cisneros B.



Barros V., Menéndez Á., Nagy G. 2005. El cambio climático en el río de la plata. Proyecto "Assessments of Impacts and Adaptations to Climate Change (AIACC)" START-TWAS-UNEP.

Martínez J., Fernández A. 2004. Cambio climático: una visión desde México. Primera Edición. . Mexico D.F. México, pp. 525.

IPCC, 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza, pp.104.

Cárdenas M. J., Sánchez T. G. 2010. México ante el cambio climático. Evidencias, impactos, vulnerabilidad y adaptación, pp 26-29.

Comisión Intersecretarial de Cambio Climático (CICC) 2012. México Quinta comunicación nacional ante la convención marco de las naciones unidas sobre el cambio climático. Primera edición.

Hernández, B. L. 2007. Efectos del cambio climático en los sistemas complejos de recursos hídricos. Aplicación a la cuenca del Júcar. Tesis doctoral. Valencia (España), pp. 7 - 20 y 42 - 60.

Martínez J. y Fernández B. A., 2004. Cambio climático una visión desde México. Secretaria del medio ambiente y recursos naturales e instituto nacional de ecología. México D.F. (México). pp. 15 - 20.

Magaña, V. Y Caetano, E., 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector. UNAM. México D.F. (México). pp. 2 - 8.

Orlando, M. R., 2010. Guía para generar y aplicar escenarios probabilísticos regionales de cambio climático en la toma de decisiones". México D.F. (México). pp 20 - 40.

IPCC. 2001. Tercer informe de evaluación. La base científica. Grupo I del Tercer Grupo Intergubernamental sobre el Cambio Climático. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido). pp. 25 - 35.



IPCC. 2007. “Informe de síntesis Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático”. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido). pp. 5 - 9.

Paredes A. J., Alvarez A. J., Martin M. M. 2004. Tesis Doctoral. Integración de la modelación de la calidad del agua en un sistema de ayuda a la decisión para la gestión de recursos hídricos. Pp.264.

Paredes A. J., Solera S. A., Álvarez A. J. 2009. Modelo GESCAL para la simulación de la calidad del agua en sistemas de recursos hídricos. Valencia España. Pp.100

Morrenis M. M., Marzal D. P., 2002. Modelación de la calidad del agua. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia España. Pp 205

Ambrose, R.B., Barnwell, T.O. McCutcheon, S.C. and Williams, J.R., 1996. Computer models for water quality analysis. Chapter 14 In Water resources handbook (ed. L.W. Mays), McGraw-Hill, New York.

Reichert P., Borchardt, D., Henze, M., Rauch, W., Shanahan, P., Somlyódy, L., and Vanrolleghem, P.A. 2001. River Water Quality No.1. Scientific and Technical Report No. 12. IWA Task Group on River Water Quality Modeling.

IWA Publishing Deas, M.L., and Lowney C.L. 2000. Water Temperatura Modeling Review. Central Valley. California Water Modeling Forum.

Solera A. 2004. Herramientas y métodos para la ayuda a la decisión en la gestión de los recursos hídricos. Aplicación a los ríos Tajo y Júcar. Tesis Doctoral. Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos, Canales y Puertos. Universidad Politecnica de Valencia. Valencia. España.

Andreu J. Solera A. Capilla J. Ferrer J., 2007. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. *Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España). pp. 1 - 106.*

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA). 2010. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio Climático. Pp. 162.

Patiño G. C., Martínez A. P., 2010. Atlas de vulnerabilidad hídrica de México ante el cambio climático. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.



López P. D. C., Cavazos G. R. A., Ferriño F. A. L., Vera H. J. A., 2012. Indicadores hidrológicos en el cambio climático en la cuenca del río pilón (México). XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Bello M. J. V., Aparicio M. F. J., 2012. Efectos del cambio climático en los parámetros de diseño hidrológico. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

García P. D. L., Sánchez Q. S. T., Hernández B. J., 2012. Obtención de escurrimientos con efecto del cambio climático en la cuenca del río grande de Morelia. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Mundo M. M., López H. I., Lobato S. R., Montero M. M., Ramírez O. A., Patiño G. C., 2012. Simulación del proceso lluvia-escurrimiento ante cambios de cobertura vegetal y uso de suelo, considerando escenarios de cambio climático en la cuenca del río Huixtla, Chiapas. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Rivas A. I., Montero M. J. M., 2012. Vulnerabilidad hídrica global ante el cambio climático de la cuenca Lerma-Chapala. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Hernández B. J., Sánchez Q. S. T., Hernández H. M., 2012. El cambio climático en la gestión hidrológica subterránea. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Andreu J. Solera A. Capilla J. Ferrer J., 2007. Modelo SIMGES de Simulación de la Gestión de Recursos Hídricos, incluyendo Utilización Conjunta. *Versión 3.00. Manual del Usuario. Ed. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia (España). pp. 1 - 106.*

González C. R., Hernández B. J., Domínguez S. C., 2012. Metodología para la determinación de la demanda agrícola futura con efecto de cambio climático. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Páez B. R., Burgos T. A., Carmona J. E., Hilda Rivas S. H., 2011. Monitoreo comunitario de la calidad del agua en cuencas rurales del bajo balsas. Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental.

Jiménez C. L. A., Lopez B. W., Magdaleno G. R., Salinas C. E., Reynoso S. R., 2011. Evaluación de la calidad del agua de los ríos pijijiapan, coapa y margarita, en el estado de Chiapas, México. Campo Experimental Centro de Chiapas del INIFAP.



Lima M. A.J., Mazari H. M., 2007. Evaluación bacteriológica de la calidad del agua en el río Lerma. Universidad Nacional Autónoma de México, pp 6.

Jiménez C. B., (2007). Información y calidad del agua en México Trayectorias, vol. IX, núm. 24, mayo-agosto, 2007, pp. 45-56. Universidad Autónoma de Nuevo León. México.

Mazarí H. M., Pérez O. G., Espinoza G. A. C., 2007. Impacto de la interrupción del caudal ecológico sobre la calidad del agua. Instituto de Ecología

Domínguez C. J., Borroto P. J., Hernández G. A., 2005. Calibración de modelos matemáticos de calidad de agua para valorar el impacto de estrategias de saneamiento del río "Almendares" Revista CENIC. Ciencias Químicas, vol. 36, núm. 2, 2005, pp. 98-105 Centro Nacional de Investigaciones Científicas de Cuba. La Habana, Cuba.

Samboni R. N. E., Carbajal E. Y., Escobar J. C., 2007. Revisión de parámetros fisicoquímicos como indicadores de calidad y contaminación del agua. Ingeniería e Investigación, diciembre, año/vol. 27, número 003 Bogotá Colombia. Pp 172-181.

Carabias L. J. Provencio E., 2000. Reporte del estado ambiental y de los recursos naturales en la frontera norte de México Pp. 349.

González V. R., Sánchez C. J. J., Bravo I. L. A., Tomasini O. A. C., Sánchez C. L., Córdova R. M. A., García V. N. H., 2012. Cambio climático en la calidad del agua del lago de Pátzcuaro. Congreso Nacional. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Sánchez, Juny, H. P. Sánchez, D. Niñerola, M. Gómez 2009. Modelación numérica en ríos régimen permanente y variable; E. Bladé, M.; Edicions UPC.

Arcos E. G., Jiménez H. S. B., Zavala G. L. A., 2012. Modelación hidráulica y de calidad del agua de la laguna del carpintero. Congreso Nacional. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Marín C. A. E., Gavi R. F., Flores M. H., Ramírez A. C., Mejía S. E., Peña O. B., 2012. Calidad del agua en el distrito de riego 066 santo domingo Baja California Sur. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.

Izurieta D. J. L., Hernández L. R. D., 2012. Modelación de la calidad de agua en el río Santiago, México. XXII Congreso Nacional de Hidráulica Acapulco, Guerrero, México.



Leal A.M.T., Millan G.D.V., Méndez J. C. G., Servin J.C.A., 2008. Evaluación de la afectación de la calidad del agua en cuerpos de agua superficiales y subterráneos por efecto de la variabilidad y el cambio climático y su impacto en la biodiversidad, agricultura, salud, turismo e industria. INE. 103 pp. México.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1997. Resumen para Responsables de Políticas, Impactos Regionales de Cambio Climático, Evaluación de la Vulnerabilidad. Eds. Watson, R, Zinyowera, M. C., Moss R.H., y Dokken D.J. OMM, WMO, PNUMA y UNEP. 27pp.

Mannina, G. y Viviani, G. 2010. *A hydrodynamic water quality model for propagation of pollutants in rivers*. Water Science & Technology, Vol. 62, No. 2, pp. 288-299.

Camacho, L.A. y Gonzalez R.A., 2008. Calibration and predictive ability analysis of longitudinal solute transport models in mountain streams. Journal of Environmental Fluid Mechanics, 8, 5, pp. 597-603.

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

Lopolito, M. F., A. Menéndez, E. Lecertúa, P. García, N. Badano y M. Re., 2011. *Modelación Matemática como Herramienta en la Definición de una Estrategia para la Recuperación de la Cuenca Matanza –Riachuelo*. XXIII Congreso Nacional del Agua, Junio 22-25, 2011, Chaco, Argentina, pp. 1-11.

Robles, E. y Camacho L. A. 2005. *Estimación experimental de tasas de nitrificación en ríos de montaña*. Universidad de los Andes, Bogotá, Colombia, pp.15.

Breuer L., R. Kiese y K. Butterbach-Bahl., 2002. Temperature and moisture effects on nitrification rates in tropical rain-forest soils. J Soil Science, 66, 834-844.

Justić D, N Rabalais y E. Turner. 1997. Impacts of climate change on net productivity of coastal waters: implications for carbon budgets and hypoxia. Climate Research 8: 225-237

Lewis M.E., 2006. Dissolved oxygen. En: US Geological Survey Techniques of Water-Resources Investigations. Book 9. Cap. 6. National Field Manual for the collection of water-quality data. Consultado en: <http://pubs.water.usgs.gov/twri9A6/>



Zhu T., M.W. Jenkins y Lund. J.R., 2006. Estimated impacts of climate warming on California water availability under twelve future-climate scenarios. PIER Project Report Number 2006-003. California Energy Commission. 60 pp.

CLICOM (2010) climating Computing Program. Base de datos Meteorológicos, Servicio Meteorológico Nacional, México.

Magaña, V. y Caetano, E., 2007. Pronóstico climático estacional regionalizado para la República Mexicana como elemento para la reducción de riesgo, para la identificación de opciones de adaptación al cambio climático y para la alimentación del sistema: cambio climático por estado y por sector” UNAM. México D.F. (México). pp. 2 - 8.

Walpole R.E., Myers H. R. and Myers S.L., 1999. Probabilidad y estadística para ingenieros. Sexta edición. Prentice-Hall Hispanoamericana; S.A. México. ISBN 970-17-0264-6.

Kuehl R.O. 2000. Diseño de experimentos. Segunda Edición.

Burt W.V., 1958. Heat budget terms for Middle Snake River Reservoir. In Water temperature studies on the Sanke river, Tech. Rep. 6, U.S. Fish and Wildlife Serv, Washington, D.C.

Delay W.H., and Seaders J., 1966. Predicting temperature in rivers and reservoirs. J. Sanit. Eng. Div. Am. Soc. Civ. Eng. 92: 115-134.

Raphael J.M., 1962. Prediction of temperature in rivers and reservoirs. J. Power Div. ASCE, (PO 2): 157-181.

Whitehead P.G., Wilby R.L., Batarbee R.W., Kerman M., and Wade A.J., 2009 A review of the potential impacts of the climate change on surface water quality. Hydrological Sciences Journal 54; 101- 123.

Ley General de Cambio Climático. Diario Oficial de la Federación. Junio, 2012. México. 25 pp.

Ley General de Equilibrio Ecológico y la Protección al Ambiente (LGEEPA). Junio, 2012. México. 114 pp.

CONAGUA 2011. Manual para el control de inundaciones Acuerdo de Cooperación Técnica SEMARNAT / CNA – OMM 2005 Proyecto de Fortalecimiento del Manejo Integrado del Agua (PREMIA).



Campos Aranda, Daniel Francisco. Procesos del Ciclo Hidrológico. Editorial Universitaria Potosina. San Luis Potosí, San Luis Potosí. 1992.

Aparicio Mijares, Francisco Javier. Nociones de Hidrología de Superficie. Limusa Wiley. México, D.F. 1992.

Moss, R. H., Edmonds, J. A., Hibbard, K. A., Manning, M. R., Rose, S. K., van Vuuren, D. P., ... & Wilbanks, T. J. (2010). The next generation of scenarios for climate change research and assessment. *Nature*, 463(7282), 747-756.

López, B. M., Campos C. V. M., Sánchez D. (2013). Balance de Resultados COP-18 – MOP 81. Convención Marco de las Naciones Unidas Sobre Cambio Climático. Managua. Nicaragua, pp 36.

http://www.suswatchla.org/index.php?option=com_docman&task=doc_download&gid=66&Itemid=18.

Témez, J. R. 1977. Modelo Matemático de transformación “precipitación-escorrentía”. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica. ASINEL. Madrid. 39 pp.

Loya, J.E. 2013. Medidas de mitigación al efecto de cambio climático en la demanda urbana de la cuenca del rio grande de Morelia. Tesis de Licenciatura, Facultad de Ingeniería Civil, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo. 160pp.

Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (1 de Agosto de 2012). Decima Sección, Tomo CLIV No. 87. Visto para resolver programas parciales de desarrollo urbano de la zona norte, oriente y poniente pertenecientes a la ciudad de Morelia.

Periódico Oficial del Gobierno Constitucional del Estado de Michoacán de Ocampo (14 de Julio de 2010). Segunda Sección, Tomo CXLIX No. 52. Programa de desarrollo urbano del centro de la población de Morelia 2010.

Godínez R. 2007. Evaluación Socioeconómica del Saneamiento de Aguas Residuales de Morelia, Michoacan. Estudio Técnico del Organismo Operador de Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento de Morelia.

Pedro M, 2013. Ejemplo de desarrollo de un modelo de Precipitación-Escorrentía con la herramienta EvalHid (AquaTool).



Del Valle 2014, El cambio climático: Reflexiones tras la cumbre de Varsovia. 22 pp.
http://www.ieee.es/Galerias/fichero/docs_opinion/2014/DIEEEEO072014_CambioClimatico_JavierdelValle.pdf

ENCC 2013. Estrategia Nacional de Cambio Climático visión 10-20-40 Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Subsecretaría de Planeación y Política Ambiental y la Dirección General de Políticas para el Cambio Climático. Gobierno de la republica.

<http://www.encc.gob.mx/documentos/estrategia-nacional-cambio-climatico.pdf>

ADP 2014. Nota sobre los principales resultados de las negociaciones internacionales sobre cambio climático tras la celebración de la 19ª conferencia de las partes de la convención marco de naciones unidas sobre cambio climático, la novena sesión de la conferencia de las partes en calidad de reunión de las partes del protocolo de kioto, el trigésimo noveno periodo de sesiones de los órganos subsidiarios y la segunda sesión del grupo ad hoc de la plataforma de Durban. http://www.magrama.gob.es/es/cambio-climatico/temas/el-proceso-internacional-de-lucha-contra-el-cambio-climatico/nota_resultados_cop19_tcm7-309035.pdf

SEMARNAT. (2012). Quinta Comunicación Nacional ante la CMNUCC. México: Gobierno Federal. Recuperado de: www2.ine.gob.mx/publicaciones/download/685.pdf

Mckee T.B., Doesken N.J., y Kleist L., 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Eighth Conference on applied Climatology . American Meteorological Society. Boston.

Binbin G., Jing Z., Huili G., Xiaoguang C., 2014. Future climate change impacts on the ecohydrology of Guishui River Basin, China *Ecohydrology & Hydrobiology* 14 (2014) 55–67

Fiona D., Sondoss E., Barry C., Rachael G., Evan H., Paloma L., Anthony J., 2013. The effects of climate change on ecologically-relevant flow regime and water quality attributes *Stoch Environ Res Risk Assess* (2014) 28:67–82

Fai F., Glenn W., Ana L., Harriet G., Orr., Mark N., Chris E., 2013 Using Large Climate Ensembles to Plan for the Hydrological Impact of Climate Change in the Freshwater Environment *Water Resour Manage* (2013) 27:1063–1084



Fiseha B. M., Setegn G., Melesse A. M., Volpi E., 2014. Impact of Climate Change on the Hydrology of Upper Tiber River Basin Using Bias Corrected Regional Climate Model Water Resour Manage (2014) 28:1327–1343

Kapil K., Gosain. A. K., 26 February 2013 Modeling hydrology, groundwater recharge and non-point nitrate loadings in the Himalayan Upper Yamuna basin Science of the Total Environment 468–469 (2013) S102–S116 .

Huicheng C., Pat J.,F., Yeh., Jason H., K., 2013. Modeling the potential impacts of climate change on streamflow in agricultural watersheds of the Midwestern United States Journal of Hydrology 491 (2013) 73–88.

Yuzhou L., Darren L., F., Xiaomang L., Minghua Z., 2013. Assessment of climate change impacts on hydrology and water quality with a watershed modeling approach Science of the Total Environment 450–451 (2013) 72–82.

Yue-Ping X., Xujie Z., Qihua R., Ye T., 21. 2013 Impact of climate change on hydrology of upper reaches of Qiantang River Basin, East China Journal of Hydrology 483 (2013) 51–60

Mukand S., Babel S., P., Bhusal. Shahriar M., W., Anshul A., 2013. Climate change and water resources in the Bagmati River Basin, Nepal Theor Appl Climatol (2014) 115:639–654.

Mimikou M.A., Baltas E., Varanou E., Pantazis K., 2000 Regional impacts of climate change on water resources quantity and quality indicators Journal of Hydrology 234 (2000) 9

Perez A M. A., Sara J., Teodoro E., Andreu Joaquín., 2012 GIS-based models for water quantity and quality assessment in the Júcar River Basin, Spain, including climate change effects Science of the Total Environment 440 (2012) 42–595–109

Junxu C., Jun X., Changsen Z., Shifeng Z., Guobin F., Like N., 2014 The mechanism and scenarios of how mean annual runoff varies with climate change in Asian monsoon areas Journal of Hydrology 517 (2014) 595–606

Guttman, N. B., 1998: Comparing the Palmer Drought Index and the Standardized Precipitation Index. J. Amer. Water Resources Assoc., 34(1), 113-121

Guttman, N. B., 1999: Accepting the Standardized Precipitation Index: A calculation algorithm. J. Amer. Water Resources Assoc., 35(2), 311-32

