



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTÓNOMA DE
MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN
INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA

EFFECTOS DEL CAMBIO CLIMATICO EN EL
ESCURRIMIENTO NATURAL SUPERFICIAL DE LA
CUENCA DEL SISTEMA HIDROELECTRICO DEL RIO
GRIJALVA

T E S I S

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:

MAESTRO EN INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL - HIDRÁULICA

P R E S E N T A :

HÉCTOR ALONSO BALLINAS GONZÁLEZ



TUTOR:

DR. POLIOPTRO F. MARTÍNEZ AUSTRIA

2011

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Gabriel Echávez Aldape
Secretario: Dr. Francisco Javier Aparicio Mijares
Vocal: Dr. Polioptro F. Martínez Austria
1^{er}. Suplente: Dr. Heber Eleazar Saucedo Rojas
2^{do}. Suplente: Dr. Iván Rivas Acosta

Lugar en donde se realizó la tesis:

Cuernavaca, Morelos, UNAM, Campus Morelos

TUTOR DE TESIS:

Dr. Polioptro F. Martínez Austria

FIRMA

A mis padres:

*M. en I. Romeo Ballinas Avendaño
Ser. Julia del Carmen González Espinosa*

Porque gracias a su apoyo, dedicación y consejos he logrado alcanzar esta meta, para ellos mi agradecimiento eterno con todo mi corazón.

A mis hermanos:

*Hilda Dolores
Romeo
Julio Adrián
Eduardo*

Porque gracias a su cariño y ejemplo, logra motivarme para seguir adelante siempre.

Agradecimientos

Son muchas las personas, entrañables los recuerdos en estos años de un caminar arduo de crecimiento profesional y personal al alcanzar una meta más en la vida, por lo que agradezco a Dios por haberme dado la vida, salud, capacidad y deseos de superación constante.

Mi eterno agradecimiento a mis sinodales: Dr. Polioptro Martínez, mi director de tesis, Dr. Iván Rivas, Dr. Heber Saucedo, Dr. Javier Aparicio y Dr. Gabriel Echávez, por todas sus enseñanzas, comentarios, paciencia y manifiesto deseo de que este trabajo fuera concluido.

Mi gratitud para el personal de la SPIFI-UNAM, Campus Morelos y la Coord. de Hidrología y Subcoordinación de Hidráulica Urbana del IMTA, por todas las atenciones recibidas.

Agradezco al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por darme la oportunidad de realizar un importante logro en mi carrera profesional.

Por su apoyo incondicional y paciencia como compañeros y amigos, mi más sincero y profundo agradecimiento para Vladimir Castanedo, Natalia Valencia, Pedro Albornoz, Claudia E. Cervantes y Roel Simuta cuyas palabras siempre me motivaron para seguir adelante. Así mismo doy las gracias a Víctor Nava, Felipe Reyes, José Manuel, Antonio, Javier, Joice, Mirce, Rosa, Alma, Rubén Jesús, Juan Gabriel y Juan C. Pérez que han hecho más agradable y especial esta estancia, en Morelos.

INDICE**Índice de Figuras****Índice de Tablas****Índice de Graficas**

1	Introducción	1
1.1	El clima.....	1
1.2	Cambio climático global	3
1.3	Modelos de cambio global	5
1.4	El Panel Intergubernamental de Cambio climático (IPCC).....	7
1.4.1	Escenarios del IPCC.....	8
1.5	Escalamiento (Downscaling)	11
2	Efectos del cambio climático en México	14
2.1	Efectos del cambio climático en los recursos hídricos	14
2.2	Efectos del cambio climático en la temperatura	15
2.3	Efectos del cambio climático global en el ciclo hidrológico	17
2.3.1	Efectos del cambio climático en la precipitación.....	18
2.3.2	Efectos del cambio climático en el escurrimiento	19
2.3.3	Efectos del cambio climático en la relación lluvia - escurrimiento.....	20
2.4	Efectos del cambio climático en los sistemas energéticos	20
2.4.1	Efectos del cambio climático en la generación hidroeléctrica	22

3 Selección del modelo hidrológico y escenarios de cambio climático previstos en la disponibilidad.....	25
3.1 Modelos hidrológicos de relación lluvia - escurrimiento	25
3.2 Selección del modelo hidrológico.....	29
3.3 Selección de escenario de cambio climático.....	29
3.3.1 Método REA	30
3.3.2 Regionalización para México por el método REA.....	31
4 Zona de estudio y problemática. Sistema hidroeléctrico del Río Grijalva	33
4.1 Justificación y objetivo.....	33
4.1.1 Justificación	33
4.1.2 Objetivo.....	34
4.2 Zona de estudio. Sistema hidroeléctrico del Río Grijalva	34
4.3 Información para el modelo.....	35
4.3.1 SIG utilizados en la investigación	35
4.3.2 Imágenes de uso de suelo.....	36
4.3.3 Generación de archivos de precipitación, SEDEPECC v.1.0	37
4.4 Metodología para obtención de escurrimientos.....	37
5 Resultados	40
5.1 Simulación de escurrimientos.....	40
5.1.1 Horizonte 2030	41
5.1.2 Horizonte 2050	43
5.1.3 Horizonte 2100	46
5.2 Índices de precipitación y escurrimiento.....	48

6	Conclusiones y recomendaciones	52
7	Bibliografía	54

Índice de Figuras

1	Circulación atmosférica.....	6
2	Elaboración de modelos climáticos en los últimos 25 años	7
3	Emisiones futuras de gases invernadero según escenarios IE-EE del IPCC ...	9
4	Cambios de temperatura previstos 1900-2100	10
5	Sobreelevación prevista del nivel medio del mar 1990-2100.....	11
6	Cambios de temperatura conforme a los escenarios A2, A1B y B1.....	16
7	Cambios de la precipitación conforme al escenario A1B. Periodo 2090-2099 comparado con el periodo 1980-1999	18
8	Cambios en el escurrimiento conforme al escenario A1B. Periodo 2090 - 2099.....	20
9	Presas que representan 60% de la capacidad de almacenamiento del país..	23
10	Escalamiento temporal de los problemas hidrológicos	25
11	Modelación de sistema hidrológico.....	26
12	Representación de modelos lluvia-escurrimiento de discretización espacial..	28
13	Distribución de la precipitación media mensual histórica en México	33
14	Interfaz SEDEPEC v.1.0	37
15	. Metodología General	38
16	Precipitación histórica de la cuenca del sistema hidroeléctrico del Río Grijalva.....	40
17	Mapas de índices de precipitación, escenarios A2 y A1B.....	50
18	Mapas de índices de escurrimiento, escenarios A2 y A1B	51

Índice de Tablas

1	Factores del cambio climático.....	4
2	Relación de GCM utilizados por el IPCC	13
3	Anomalías de temperatura de Hulme y Sheard	16
4	Subcuencas del Sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva	40
5	Coeficientes de escurrimiento para el año 2030, escenario A1B y A2	42
6	Coeficientes de escurrimiento para el año 2050, escenario A1B y A2	44
7	Coeficientes de escurrimiento para el año 2100, escenario A1B y A2.....	47
8	Índices de precipitación para cada horizonte de tiempo	48
9	Índices de escurrimiento para cada horizonte de tiempo.....	49

Índice de Graficas

1	Precipitación anual del año 2030, escenario A1B.....	41
2	Precipitación anual del año 2030, escenario A2	41
3	Escorrentamiento anual del año 2030, escenario A1B	42
4	Escorrentamiento anual del año 2030, escenario A2.....	43
5	Precipitación anual del año 2050, escenario A1B.....	43
6	Precipitación anual del año 2050, escenario A2	44
7	Escorrentamiento anual del año 2050, escenario A1B	45
8	Escorrentamiento anual del año 2050, escenario A2.....	45
9	Precipitación anual del año 2100, escenario A1B.....	46
10	Precipitación anual del año 2100, escenario A2.....	46
11	Escorrentamiento anual del año 2100, escenario A1B.	47
12	Escorrentamiento anual del año 2100, escenario A2.....	48

RESUMEN

Desde la década de los noventa se han venido utilizando frecuentemente expresiones como Calentamiento Atmosférico, Cambio Climático y Cambio Global, todas ellas utilizadas en ámbitos científicos, socioeconómicos y políticos. Estudios para México indican que los impactos posibles del cambio climático se verán reflejados en la agricultura de temporal; el agua disponible será más competida entre las ciudades, los cultivos y las industrias; los bosques podrían ser reducidos al no tener las condiciones climáticas adecuadas para su desarrollo.

En Chiapas una de las consecuencias directas del cambio climático es que muy probablemente se eleve aún más la temperatura media lo que puede provocar que disminuyan las lluvias y por ende el escurrimiento en los cauces, afectando así la disponibilidad de agua para las ciudades, las industrias, el riego y la generación de energía eléctrica.

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo está basado en fórmulas matemáticas que relacionan las variables de entra y salida. Por lo que la estimación del escurrimiento se realizó en base a la Norma NOM-011-CNA-2000.

Los resultados presentados en este estudio marcan una tendencia hacia la disminución del escurrimiento medio anual debido a que la precipitación tiende a decrecer con el tiempo. La precipitación para los escenarios A1B y A2 presenta una disminución del 2 – 17% hasta el año 2100. En cuanto al escurrimiento para dichos escenarios, la disminución esperada será del 4 – 19% hasta el año 2100.

ABSTRACT

Since the nineties have often been used expressions such as Global Warming, Climate Change and Global Change, all used in scientific, economic and political areas. Studies in Mexico show that the potential impact of climate change will be reflected in seasonal agriculture, water availability, crops and industries; forests could be reduced by not having suitable climatic conditions for development.

In Chiapas one direct effect of climate change is the increases in global average temperature, and therefore a decline in runoff and available water resources, thus affecting the availability of water for cities, industries, irrigation and power generation.

The hydrological model used in this work is based on mathematical bases that related input and output variables. So runoff was calculated based on the Standard NOM-011-CNA-2000.

The results presented in this study mark a downward trend of average annual runoff these because rainfall tends to decrease with time. A1B and A2 scenarios show a decrease in precipitation about 2 to 17% by the year 2100. For the same scenarios the expected decrease in runoff will be from 4 to 19% by the year 2100.

1 Introducción

A lo largo de la historia de la Tierra se han registrado calentamientos y enfriamientos a diferentes escalas temporales, debido a la amplificación mutua de los factores ambientales. Desde la década de los noventa se han venido utilizando frecuentemente expresiones como calentamiento atmosférico, cambio climático y cambio global, todas ellas utilizadas en ámbitos científicos, socioeconómicos y políticos.

Se sabe que el calentamiento reciente de la tierra ha sido provocado de manera antropogénica como consecuencia del uso de combustibles fósiles y deforestación, entre otras causas, a partir de la revolución industrial. Este calentamiento desencadena el cambio climático que se refleja en una serie de alteraciones planetarias. Dichas alteraciones amenazan la gestión sostenible de los recursos y el desarrollo.

El Cambio Climático es uno de los tres grandes problemas ambientales del siglo XX y XXI, junto con la pérdida de biodiversidad y la desertificación, correspondiente a procesos biofísicos y antrópicos relacionados por razones y principios ambientales, económicos, jurídicos y políticos.

Las evidencias del cambio climático y sus señales, son buscadas en los comportamientos globales y variables integradoras de efectos como la temperatura, precipitación, entre otros, en las respuestas espaciales o regionales.

México, al igual que diversos países, necesita revisar el estado de conocimiento en cuanto al cambio climático para enfocar nuevos proyectos de investigación y para diseñar y aplicar políticas de mitigación y adaptación.

1.1 El clima

Podríamos definir el clima de un lugar como el conjunto de manifestaciones atmosféricas y meteorológicas que en él suceden. El clima define numerosos elementos y factores condicionantes del medio ambiente, por lo que ambos están íntimamente ligados (Seoánez, 2002).

Para la determinación de los climas se emplean los valores medios de los elementos meteorológicos medidos durante un periodo de tiempo de 30 años por lo menos, según lo acordado en la Conferencia Internacional de Directores de Servicios Meteorológico celebrada en Varsovia en 1935. De esta manera, si los valores medios hallados para dos treintenos distintos resultan diferentes, se habla de la aparición de una oscilación climática.

Los componentes en los que se disgrega el clima para su estudio se denominan elementos climatológicos. Estos elementos son la radiación solar e irradiación terrestre, la temperatura, la humedad del aire, el viento, las nubes, las precipitaciones, tanto verticales como horizontales, la temperatura y humedad del suelo, la composición química del aire y de las precipitaciones, los fenómenos luminosos de la atmosfera, la electricidad del aire y las radiaciones cósmicas, que llegan hasta la superficie de nuestro planeta.

Las observaciones se centran básicamente en la temperatura del aire y en las precipitaciones, que son los elementos aparentemente más influyentes en la biosfera, aunque últimamente se están tomando datos muchos más completos referentes a humedad relativa, vientos, entre otros, ampliándose la lista con los factores climáticos.

Los elementos climatológicos son las variables que componen el clima, y es preciso diferenciarlos de los factores climatológicos, que son características fijas y determinantes del clima de un lugar. Los factores climatológicos son los responsables de los valores tomados por los elementos climatológicos, tanto puntuales como promedio, y en definitiva serán el principio causal del clima del lugar. Ejemplo de factores climatológicos son: latitud, composición geológica, entre otros.

Dentro de estos factores climatológicos, tal vez el de mayor importancia sea la latitud geográfica. Conviene recordar que la causa fundamental del tiempo atmosférico es la posición relativa de la Tierra respecto al Sol. La Tierra describe dos tipos de movimiento de giro: en torno al Sol, la Tierra se mueve siguiendo una órbita elíptica, que sufre variaciones cíclicas, lo que puede explicar fenómenos climáticos de gran envergadura, como las glaciaciones; pero la rotación del globo terráqueo en esta orbita es la que más determinante resulta para los climas, al originar las variaciones estacionales.

La latitud, en definitiva, al determinar el ángulo de incidencia de la radiación solar hace que el calentamiento de la superficie de la tierra sea mayor o menor.

Otro factor climático significativo es la altitud, tanto referida al nivel del mar como a los lugares circundantes al punto de observación. Con la altitud van variando la temperatura y la humedad, así como la turbulencia de la atmosfera.

También las características del suelo constituyen un factor climatológico importante. La composición geológica, la cubierta vegetal o las capas de nieve pueden, por ejemplo, modificar el albedo, o las condiciones de la humedad.

Un factor a considerar es la orientación del suelo y su grado de exposición. La colocación del suelo frente al Sol modifica la incidencia de la radiación solar y puede dar lugar a un calentamiento mayor o menor.

1.2 Cambio climático global

El cambio climático es sin duda una consecuencia de la cultura que actualmente domina en el planeta Tierra, en la cual hay un esfuerzo de los pueblos para alcanzar el desarrollo, en todos los sentidos. En el modelo económico actual, el consumo inmoderado de energía es su base fundamental, y desafortunadamente está basado en la quema de combustibles fósiles, que producen grandes cantidades de gases de invernadero, especialmente de CO₂.

En los últimos 200 mil millones de años se han presentado aproximadamente 20 indicios de cambio climático; sin embargo estos han tenido lugar en escalas de tiempo de 4000 años. El cambio actual es comparable en magnitud a los anteriores, pero se ha dado lugar en un periodo de 200 años, este causado por el intercambio acelerado de energía en la Tierra, en promedio de 100 w/m² a 1000 w/m², debido a que se está quemando a tasas aceleradas el carbono que tardó en formarse en millones de años.

En la actualidad se puede enumerar una infinidad de indicios de cambio climático. Por ejemplo, en 1893 el explorador noruego Fridtjof Nansen navegó en un barco anclado al hielo y arrastrado por las corrientes de hielo, en el Ártico de Siberia hacia Groenlandia, durando este viaje 2 años. Hoy en día se puede navegar en verano hasta la latitud del Polo Norte por agua sin hielo (Ruiz de Elvira, 2007).

Hace un millón doscientos mil años la concentración de CO₂ era de 280 ppm (partes por millón), cantidad que nunca fue superada en este periodo de tiempo, hoy en día, a partir de la revolución industrial iniciada a mediados del siglo XIX, la concentración de CO₂ es de 370 ppm. La principal acción del CO₂ es retener durante un cierto tiempo el calor que emite la Tierra entre la superficie de ésta y la estratosfera, aumentando así la temperatura de la superficie del planeta. Con lo cual si aumentan las concentraciones de CO₂ aumentaría la temperatura en la Tierra. Como el proceso es muy complejo, se requieren de escenarios y modelos matemáticos (como los de circulación general que reproducen el clima a escala planetaria), que implican una distribución en el tiempo y en el espacio de las emisiones de CO₂ y el resto de los gases traza de la atmósfera.

En nuestros días la población mundial crece aceleradamente, entre otros factores, debido a la inyección gigantesca de energía en los cultivos; energía que el planeta almacenó durante millones de años en forma de carbón y petróleo. Estas fuentes producen energía a través de la emisión acelerada de CO₂, cantidad que crece de manera exponencial, lo cual muestra una clara influencia humana sobre el clima mundial.

A lo largo de la historia el clima de la Tierra ha cambiado múltiples veces, ocurriendo cambios a escala global y regional, siendo varios los factores naturales y humanos que los han producido (Tabla 1).

Factores del cambio climático		
Factores naturales	Cambios en la radiación solar	La cantidad de energía emitida por el sol no es constante, la luminosidad del sol varía con una periodicidad aproximada de 11 años, y en ciclos de 100 años.
	Cambios en la órbita terrestre	Las variaciones en la geometría de la órbita de la Tierra (variaciones de Millankovich), determina donde y cuando la Tierra recibe la mayor cantidad de energía solar, además de tener periodicidades que van de los miles a los cientos de miles de años causantes de las eras de hielo o eras glaciares.
	Efecto invernadero	Proceso donde parte de la energía de onda larga emitida por la superficie terrestre es retenida por las nubes y los gases de invernadero. Los gases de invernadero encargados de mantener la temperatura de la Tierra en un rango habitable.
	Aerosoles	Son partículas y gotas pequeñas que se mantienen en suspensión en la atmosfera. Los aerosoles reflejan y/o absorben la radiación solar que recibe la Tierra.
Factores humanos	Incremento en la concentración de gases de invernadero	Muchas actividades humanas (ganadería, agricultura, industria y otros) liberan gases de invernadero, dióxido de carbono y metano principalmente. El aumento en la concentración de dichos gases provoca un balance energético positivo responsable del incremento de la temperatura. Este efecto se conoce como <i>forzamiento antropogénico</i> .
	Cambios en el uso de suelo	La transformación de terrenos boscosos en áreas de cultivo o la sustitución de cobertura vegetal por asfalto o concreto han alterado la manera en que la Tierra refleja la luz solar e irradia el calor afectando patrones regionales como la evaporación, la lluvia e infiltración del agua al subsuelo, a si como la distribución de la energía en el planeta.
	Aerosoles	La industria y agricultura agregan una cantidad de aerosoles a la atmosfera que afectan al balance energético negativamente, ya que con el incremento de la concentración de aerosoles aumenta la cantidad de energía solar que es reflejada al espacio.

Tabla 1. Factores del cambio climático

El cambio climático deriva principalmente de una quema indiscriminada por parte de la sociedad de carbón y petróleo. Como el resto de los animales los seres humanos necesitamos energía para vivir y al disponer de una energía que encontramos sin esfuerzo, se ha dado vía libre al crecimiento de la población y a una destrucción acelerada del medio ambiente que necesitamos para vivir. La deforestación contribuye al proceso de calentamiento global por la liberación de gases de invernadero así como por la disminución de áreas naturales de captura de carbono.

Debido a su dependencia de factores sociales, todavía existe incertidumbre que no permite cuantificar con la suficiente precisión los cambios de clima previstos, sin embargo, la información validada hasta ahora es suficiente para tomar medidas de forma inmediata. Como señala Duarte (2006) el calentamiento global “es una realidad en la que ya estamos inmersos y su consideración como especulación o como proceso futuro aun por llegar solo puede retrasar la adopción de medidas de adaptación y mitigación y, con ello, agravar los impactos de este importante problema”. Es necesario interrumpir esta agresión a los equilibrios del planeta para hacer posible un futuro sostenible.

1.3 Modelos de Cambio Global

Los modelos climáticos globales se basan en leyes de la física representadas por ecuaciones matemáticas que se resuelven utilizando una rejilla de cálculo tridimensional sobre el globo terráqueo. A fin de simular el clima, los principales componentes del sistema climático deben representarse en submodelos (la atmósfera, los océanos, la superficie terrestre, la criosfera y la biosfera), junto con los procesos que ocurren entre ellos y dentro de cada uno de ellos.

Los modelos climáticos mundiales en los que se han acoplado los componentes atmosféricos y oceánicos se conocen también con el nombre de Modelos de la Circulación General Atmósfera–Océano (MCGAO), ver Figura 1.

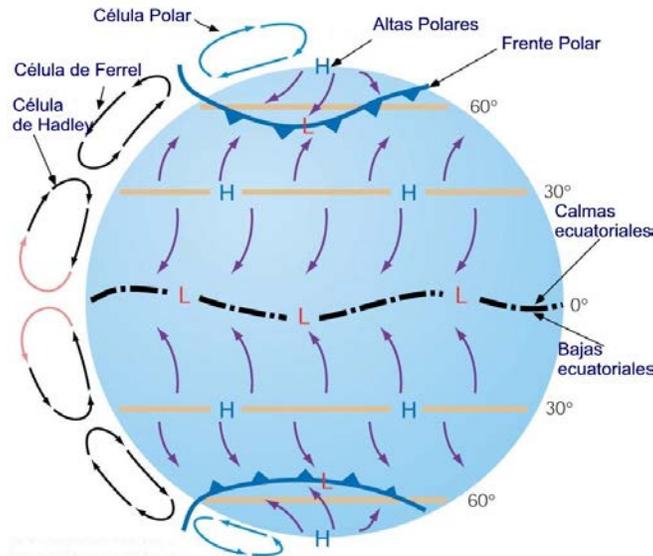


Figura 1. Circulación atmosférica

Muchos procesos físicos, como los que están relacionados con las nubes o la convección oceánica, ocurren en escalas espaciales mucho más pequeñas que la rejilla de los modelos y en consecuencia no pueden modelarse y resolverse en forma explícita. Sus efectos medios se incluyen en forma aproximada con un método simple, aprovechando sus relaciones basadas en la física con las variables a mayor escala. Esta técnica se conoce con el nombre de parametrización.

Para poder hacer proyecciones cuantitativas del cambio climático futuro, es necesario utilizar modelos climáticos que simulen todos los procesos importantes que rigen la evolución futura del clima. Los modelos climáticos se han perfeccionado en los últimos decenios gracias al desarrollo de las computadoras, las técnicas numéricas, un mejor conocimiento de la dinámica atmosférica y mayor cantidad de datos disponibles. Durante ese período se crearon modelos separados de cada uno de los componentes principales, la atmósfera, la superficie terrestre, los océanos y el hielo marino, que luego se fueron integrando gradualmente. El acoplamiento de los distintos componentes es un proceso difícil. Recientemente se han incorporado componentes del ciclo del azufre para representar las emisiones de esta sustancia y la forma en que éstas se oxidan para formar partículas de aerosoles. Actualmente se está tratando de acoplar, en unos pocos modelos, el ciclo del carbono terrestre con el del carbono oceánico. El componente de química atmosférica se está incorporando en un modelo separado del modelo climático principal. En la Figura 2 que aparece en este recuadro puede verse la evolución de los modelos climáticos en el pasado y el presente, y su posible evolución en el futuro (IPCC, 2001).

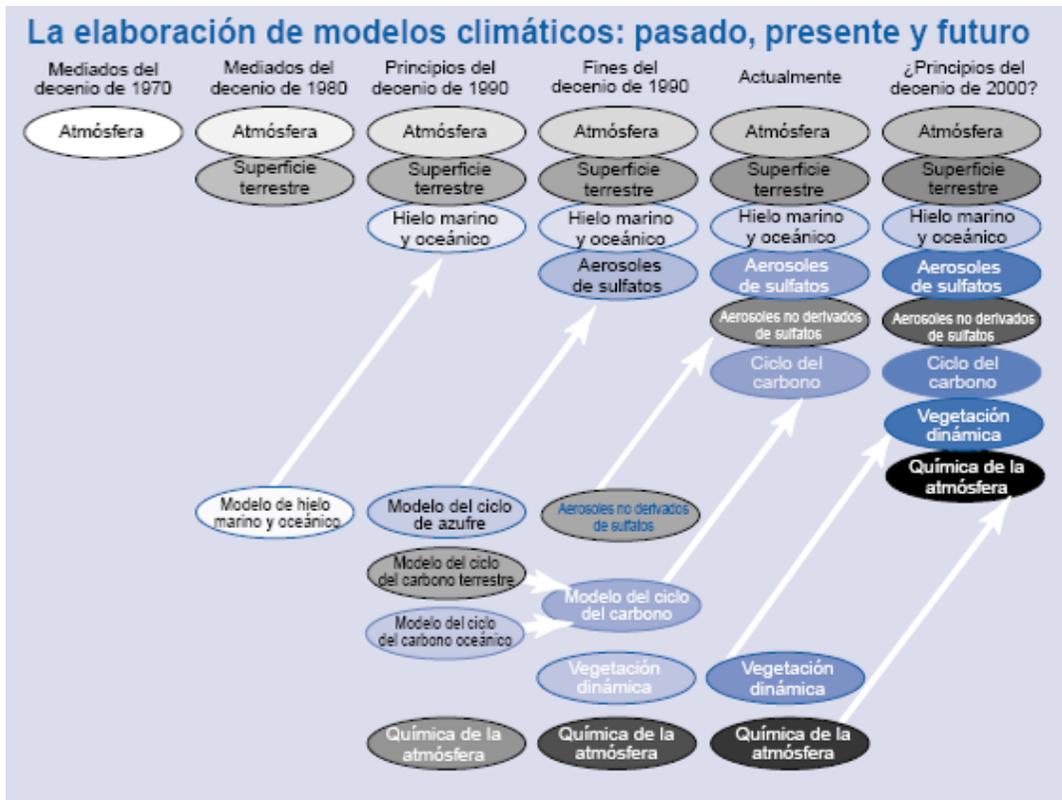


Figura 2. La elaboración de modelos climáticos en los últimos 25 años.

1.4 El Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC)

Es un grupo intergubernamental de expertos en cambio climático creado en 1988 por la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y el Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA). Se trata de un grupo abierto a todos los miembros de las Naciones Unidas y de la Organización Meteorológica Mundial.

La función del IPCC consiste en analizar, de forma exhaustiva, objetiva, abierta y transparente, la información científica, técnica y socioeconómica relevante para entender los elementos científicos del riesgo que supone el cambio climático provocado por las actividades humanas, sus repercusiones factibles y las posibilidades de adaptación y atenuación del mismo. El IPCC no realiza investigaciones ni controla datos relativos al clima u otros parámetros pertinentes, si no que basa su evaluación principalmente en la literatura científica y técnica revisada por homólogos y publicada. (IPCC, 2007)

Una de las principales actividades del IPCC es hacer una evaluación periódica de los conocimientos sobre el cambio climático. El IPCC elabora, asimismo, informes especiales y documentos técnicos sobre temas en los que se consideran necesarios la información y el asesoramiento de científicos e independientes, y respalda la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático

(CMCC) mediante su labor sobre las metodologías relativas a los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero.

1.4.1 Escenarios del IPCC

Es necesario entender el riesgo que se presenta con calentamiento global acelerado, por lo que se requiere evaluar los impactos, las opciones de adaptación, mitigación y las relaciones entre el cambio climático, las emisiones y las concentraciones de los gases de efecto invernadero (GEI), desarrollo socioeconómico y el impacto en la naturaleza.

En 1996 el IPCC inició el desarrollo escenarios de emisiones de GEI. Se construyeron cuatro familias de escenarios, cada una de ellas fundamentadas en una descripción de las condiciones en las que posiblemente se encuentre el mundo en un futuro. A continuación se muestran las cuatro familias de escenarios (IPCC, 2007):

- La familia A1 de escenarios describe un mundo caracterizado por un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su máximo a mediados del presente siglo, empieza a declinar a partir de entonces y adopta tecnologías más eficientes. Esta familia de escenarios se subdivide conforme a las tecnologías a usar: (A1FI), con fuentes alternas de energía (A1T), y con un balance entre diferentes fuentes de energía (A1B). Este último escenario es uno de los más utilizados en las simulaciones, pues se le considera entre los más probables.
- La familia A2 de escenarios se refiere a un mundo venidero caracterizado por incremento continuo de la población, aunque con un crecimiento económico mucho menor que en los escenarios A1. Los escenarios A2 son pesimistas en cuanto a que se mantiene un elevado aumento de las emisiones de gases invernadero, en particular de bióxido de carbono.
- La familia B1 de escenarios describe un mañana en el que la población, como en los escenarios A1, alcanza su máximo a mediados dl siglo XXI, con un crecimiento económico acelerado, pero orientado a los servicios y las tecnologías de la información, con un uso menor de materia primas y un aprovechamiento sustentable de los recursos, pero aun sin tomar medidas específicas respecto al clima. No parece ser un escenario muy probable.
- La familia B2 de escenarios describe un porvenir en el que se asumieron previsiones locales y regionales, para la protección del medio ambiente, con un crecimiento de la población menor que en los escenarios A1 y B1, este escenario se percibe muy optimista, tal como se han observado las tendencias hasta ahora.

En la Figura 3 se presentan las emisiones previsible de gases de invernadero, conforme a estos escenarios de cambio climático.

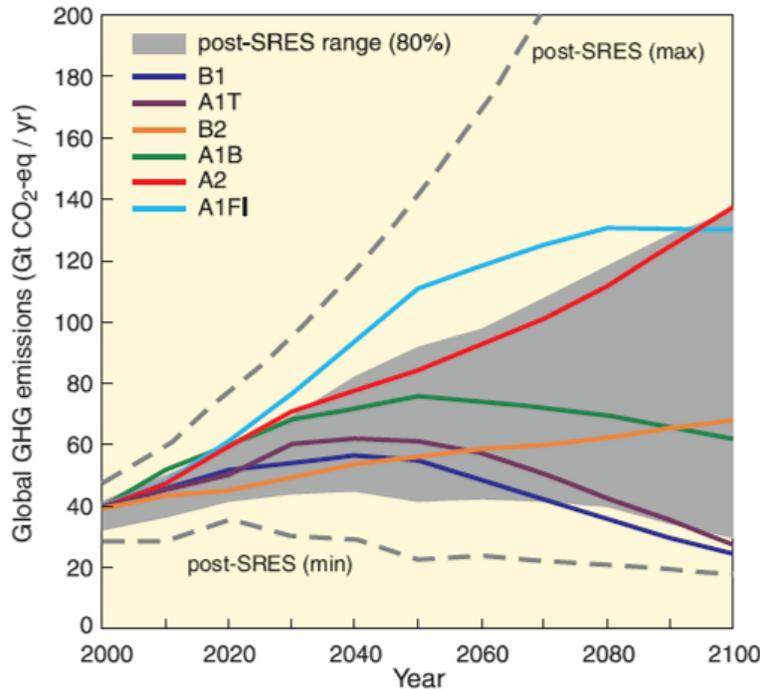


Figura 3. Emisiones futuras de gases invernadero según escenarios IE-EE del IPCC, (IPCC, 2007).

Como puede observarse, las variaciones posibles de emisiones de gases de invernadero son muy amplias, desde situaciones en que se disminuirán respecto a los valores actuales hasta otras que irán a la alza de manera importante. Los expertos piensan que la variación probable de temperatura media del planeta hacia el año 2100 será de entre 1.5 y 4.0 °C, correspondiente a un incremento del 100% en la concentración atmosférica de CO₂. La diferencia entre ambos extremos de temperatura se debe a la incertidumbre en los modelos de simulación cuya principal causa es el efecto que tendrá el aumento de vapor de agua en la atmosfera ocasionado por el calentamiento global y que, a su vez, lo retroalimenta en una magnitud difícil de calcular.

Conforme al reporte 2007 del IPCC, la temperatura global crecerá, en el escenario A1B, entre 1.7 y 4.4 °C al final del siglo XXI; y entre 2.0 y 5.4 °C en el escenario A2 (IPCC 2007b).

Naturalmente, el cambio en la temperatura no será uniforme, sino que afectara más severamente a las regiones que se encuentran en latitudes altas, produciendo en algunos sitios situaciones de calor muy superiores al promedio esperado. En la Figura 4 se muestran los resultados de temperatura obtenidos de la simulación con un modelo de circulación general para los diversos escenarios.

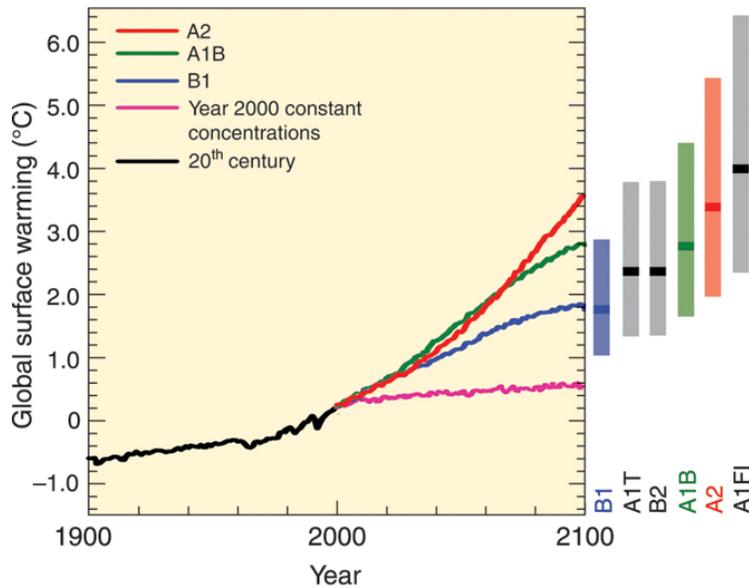


Figura 4. Cambios de temperatura previstos 1900-2100, (IPCC, 2007)

Con los resultados de los modelos de temperatura, se calculan los posibles cambios en la precipitación. En general es previsible un aumento en la precipitación y en la cantidad de vapor de agua en la atmosfera en latitudes altas y una disminución en latitudes medias. Es decir, en el ámbito regional habrán de registrarse alzas en algunos sitios, y disminuciones en otros, por lo que, en este aspecto es necesario proceder a estudios más detallados a escala regional.

Otro de los efectos previsible del cambio climático que afectará a los recursos hídricos y a los ecosistemas acuáticos en las zonas costeras, será la sobreelevación del nivel del mar. De acuerdo con las estimaciones del IPCC, que se presentan en la Figura 5, el mar incrementará su nivel entre 0.4 y 0.8 m sobre el valor de 1990, debido principalmente a la expansión térmica.

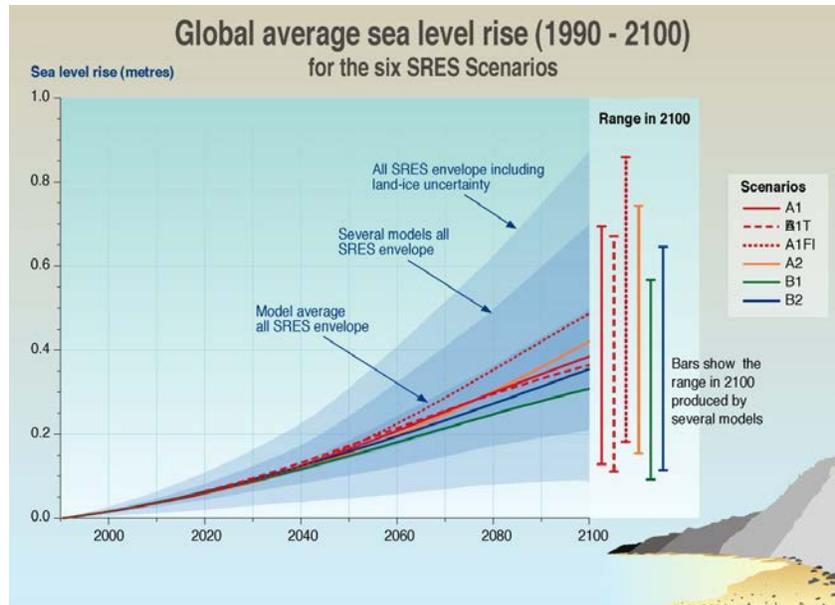


Figura 5. Sobreelevación prevista del nivel medio del mar 1990-2100 (IPCC, 2007)

1.5 Escalamiento (Downscaling)

La metodología para hacer estimaciones de proyecciones regionalizadas de cambio climático utiliza la idea del descenso de las escalas grandes a las escalas pequeñas. Las escalas grandes se estiman con los modelos globales acoplados océano-atmósfera y posteriormente se desciende a las escalas más pequeñas con diferentes técnicas de regionalización. En este enfoque la tarea predictiva la realizan los modelos globales y las técnicas de regionalización, escalamiento o *downscaling*, bien basadas en algoritmos empíricos o en modelos regionales, se limitan a introducir el detalle local. La información fluye desde las escalas grandes (modelos globales) a las escalas regionales (modelos regionales).

En las otras escalas temporales (por ejemplo, la predicción del tiempo) cuando se realiza experimentación con modelos, se utilizan modelos regionales anidados en modelos globales en los que la información puede fluir en los dos sentidos (*two-way nesting*, en inglés). En modelización climática apenas se ha utilizado este concepto y la aproximación estándar a las proyecciones regionalizadas consta normalmente de dos pasos. Primero, la integración del modelo global, y después la adaptación regional.

Al proceso predictivo basado en el descenso de escalas, hay que añadir las incertidumbres, que contaminan todos los pasos del proceso de generación de escenarios regionalizados de cambio climático.

Frecuentemente, se consideran cuatro tipos de incertidumbres: a) las incertidumbres ligadas a las emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero); b) las incertidumbres ligadas a los diferentes modelos globales; c) las incertidumbres

ligadas a la variabilidad interna del modelo; y, finalmente, d) las incertidumbres ligadas a las técnicas de regionalización. Con estas incertidumbres, se intenta acotar el rango de variación de las proyecciones climáticas.

El marco natural para evaluar las incertidumbres asociadas a las proyecciones de cambio climático es la aproximación probabilística en la que se explora un conjunto representativo de métodos de regionalización, modelos globales, emisiones de GEI, etc. Este conjunto de métodos, modelos y emisiones define un conjunto de miembros o *ensemble* que permiten realizar una exploración de las distintas incertidumbres.

El IPCC cuenta con una lista de los Modelos de MGCM mas importantes, para estimar los posibles cambios del clima global en los años por venir. Para los estudios sobre impacto de cambio climáticos es común ver el promedio de un conjunto de modelos de este tipo o ensemble, en la Tabla 2. se muestran dichos modelos.

Modelo	Siglas y Resolución de Malla (Global)	País
1. Bjerknes Centre for Climate Research, Bergen Climate Model Version 2	BCCR-BCM2.0, 128 lons x 124 lats	NORUEGA
2. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3	CCCMA-CGCM3, 96 lons x 48 lats	CANADA
3. Centre National de Recherches Meteorologiques, Coupled Model 3	CNRM-CM3, 128 lons x 124 lats	FRANCIA
4. CSIRO Atmospheric Research, Mk3.5	CSIRO-Mk3.5, 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
5. CSIRO Atmospheric Research, Mk3	CSIRO-Mk3, 192 lons x 96 lats	AUSTRALIA
6. Max Planck Institute for Meteorology ECHAM5	MPI_ECHAM5, 192 lons x 96 lats	ALEMANIA
7. Meteorological Institute of the University of Bonn, ECHO-G	MIUB_ECHO_G, 96 lons x 48 lats	ALEMANIA/KOREA
8. National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.0	GFDL-CM2.0, 144 lons x 90 lats	EUA
9. National Oceanic Atmospheric Administration Geophysical Fluid Dynamics Laboratory, CM2.1	GFDL-CM2.1, 144 lons x 90 lats	EUA
10. National Institute of Geophysics and Volcanology, ECHAM 4.6	INGV-ECHAM-SXG, 320 lons x 160 lats	ITALIA
11. Institute for Numerical Mathematics, CM3	INMCM3.0, 72 lons x 45 lats	RUSIA
12. Institut Pierre-Simon Laplace	IPSL-CM4, 96 lons x 72 lats	FRANCIA
13. Model for Interdisciplinary Research on Climate Medium Resolution	MIROC3_2_MEDRES, 128 lons x 64 lats	JAPON
14. Meteorological Research Institute, Coupled Global Climate Model 3	MRI-CGCM2_3_2A, 128 lons x 64 lats	JAPON
15. National Center for Atmospheric Research Community Climate System Model	NCAR_CCSM3_0, 256 lons x 128 lats	EUA
16. National Center for Atmospheric Research Parallel Climate Model	NCAR_PCM1, 128 lons x 64 lats	EUA
17. Hadley Centre for Climate Prediction, Met Office	UKMO_HADCM3, 96 lons x 73 lats	REINO UNIDO
18. Hadley Centre Global Environmental Model Met Office	UKMO_HADGEM1, 192 lons x 145 lats	REINO UNIDO
19. Canadian Centre for Climate Modelling and Analysis, Coupled Global Climate Model 3 T63	CCCMA-CGCM3, 128 lons x 64 lats	CANADÁ
20. Laboratory Atmospheric Sciences and Geophysical Institute of Atmospheric Physics, FGOALS1.0_g	IAP-FGOALS, 128 lons x 64 lats	CHINA
21. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, Atmosphere-Ocean Model	GISS-AOM, 90 lons x 60 lats	EUA
22. National Aeronautics and Space Administration Goddard Institute for Space Studies, ModelE20/HYCOM	GISS-EH, 72 lons x 46 lats	EUA
23. Model for Interdisciplinary Research on Climate High resolution	MIROC3_2_HIRES, 320 lons x 160 lats	JAPÓN

Tabla 2. Relación de GCM utilizados por el IPCC, (IPCC, 2007).

2 Efectos del cambio climático en México

En México, los recursos naturales y el medio ambiente están sometidos a tendencias de deterioro crónicas que se expresan en elevadas tasas de pérdida de biodiversidad, deforestación, erosión de suelos, desertificación, contaminación de las principales cuencas hidrológicas y contaminación atmosférica en las grandes zonas metropolitanas. Estas tendencias se agravan por una distribución territorial de asentamientos humanos y actividades económicas totalmente inadecuada respecto a la distribución espacial de los recursos hídricos, ya que la mayor densidad de población se presenta en las zonas centro, norte y noroeste, donde el agua es escasa, mientras que las regiones menos habitadas del sureste concentran la mayor parte del recurso hídrico.

México es un país muy vulnerable al cambio climático, que debe adaptarse a futuros cambios en el clima, profundizando en estudios y acciones que permitan reducir nuestras emisiones, preservando y aumentando nuestras zonas verdes y limitando la quema innecesaria de combustibles, y reducir nuestra vulnerabilidad a las variaciones negativas del clima, esto a través del aumento de la capacidad de prevención y acción ante los desastres climáticos.

Estudios para México indican que los impactos posibles del cambio climático pueden ser considerables. Estos impactos se verán reflejados en la agricultura de temporal (que depende de las lluvias de verano) que sería fuertemente afectada; el agua disponible será más competida entre las ciudades, los cultivos y las industrias; los bosques podrían ser reducidos al no tener las condiciones climáticas adecuadas para su desarrollo.

México requiere enfrentar de manera planificada los posibles cambios en el clima y sus efectos a través de políticas de Estado para cada uno de los sectores afectados: salud, agricultura, recursos hídricos, bosques, asentamientos humanos, zonas costeras y energía.

2.1 Efectos del cambio climático en los recursos hídricos

Una primera aproximación al análisis de los efectos del calentamiento global en los recursos hídricos de México, es la observación de los resultados de los modelos de cambio global (MCG), publicados por el IPCC.

Conforme a los resultados de esos modelos, mencionados en el apartado 1.4.1, en México se prevén incrementos significativos en la temperatura que ocurrirán en el presente siglo. Así, en el escenario A2 (alto), se verían incrementos de entre 4 y 6°C y en el escenario B2 (medio), de entre 2 y 4°C. En ambos escenarios estos incrementos en la temperatura son lo suficientemente elevados como para ocasionar efectos severos en el escurrimiento y en el consumo de agua de cultivos y ecosistemas. Se observa que las mayores alteraciones ocurrirán en la región norte, donde existen grandes zonas agrícolas. Se puede anticipar la gravedad de los efectos del calentamiento global en México; pero un defecto de estos modelos globales es la baja resolución de los resultados, que impiden un análisis regional más detallado.

2.2 Efectos del cambio climático en la temperatura

El IPCC en su publicación del 2007, reproduce las actuales estimaciones para Norteamérica. Para México en el escenario A1B, las temperaturas anuales promedio se incrementarían entre 3.5 y 4°C en la región norte hacia el final del siglo XXI, es importante observar que los valores extremos registrados para el verano serán mayores, ver Figura 6.

Existen otras estimaciones como la del Met Office (Met Office, 1999), donde en un escenario sin mitigación, el incremento esperado de temperatura en México sería de entre 5 y 6°C. En el año 2080, adoptándose algunas medidas de mitigación donde se establezca el contenido de CO₂ atmosférico en 750 ppm, la temperatura de México se incrementaría en alrededor de 4°C. si se estabilizara el CO₂ atmosférico en 550 ppm la temperatura en México incrementaría entre 2 y 3°C en la región norte, y entre 1 y 2°C en la región centro sur.

Morales *et al* (2001), en sus escalamientos utilizados prevé temperaturas elevadas llegando a valores de entre 4 y 6°C en la región noreste y en la zona de Chiapas-Tabasco y de entre 2 y 4°C en la región central de México, norte de Sonora y sur de la península de Yucatán. Con los incrementos previstos en las regiones áridas del norte, se alcanzarían en verano temperaturas máximas diarias muy elevadas, con graves efectos en la salud humana y los recursos hídricos.

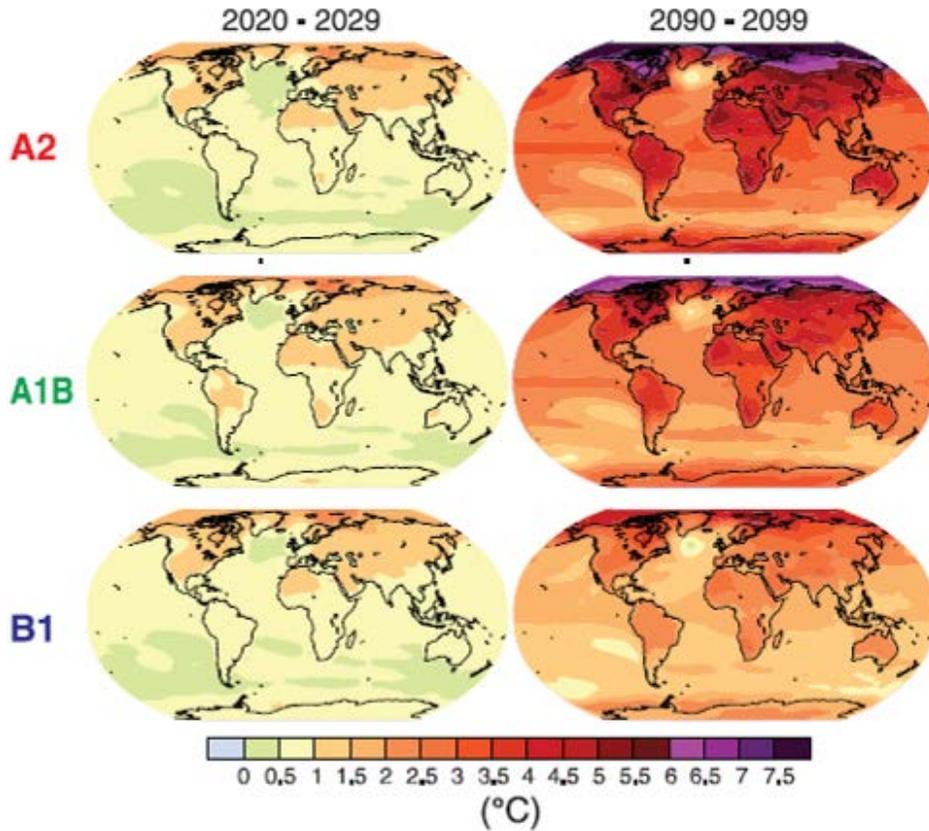


Figura 6. Cambios de temperatura conforme a los escenarios A2, A1B y B1. (IPCC, 2007)

Hulme y Sheard (1999) presentan en sus estudios las anomalías esperadas en la temperatura utilizando cuatro escenarios climáticos, consistentes con los propuestos en el IPCC (2001), escogiéndose las familias A y B: B1, B2, A1 y A2. El resumen se presenta en la Tabla 3.

1980	1990		2020			2050			2080		
T, °C	T, °C		CO ₂ , ppm	T, °C	N. del mar, cm	CO ₂ , ppm	T, °C	N. del mar, cm	CO ₂ , ppm	T, °C	N. del mar, cm
0.13	0.28	B1 Bajo	421	0.6	7	479	0.9	13	532	1.2	19
0.13	0.28	B2 Medio	429	0.9	20	492	1.5	36	561	2.0	53
0.13	0.28	A1 Medio	448	1.0	21	555	1.8	39	646	2.3	58
0.13	0.28	A2 Alto	440	1.4	38	559	2.6	68	721	3.9	104

Tabla 3. Anomalías de temperatura de Hulme y Sheard (Hulme y Sheard, 1999)

2.3 Efectos del cambio climático global en el ciclo hidrológico

En México los cambios climáticos esperados en la precipitación y temperatura afectarán los componentes y los procesos asociados al ciclo hidrológico. Los cambios esperados dependen de la magnitud y de la dirección de las variables ambientales.

La precipitación es la principal variable en el balance hidrológico. Cualquier cambio en la precipitación tiene implicaciones en el ciclo hidrológico y en la disponibilidad de los recursos hídricos. La variabilidad hidrológica en una cuenca es influenciada por la variación temporal y espacial de la precipitación.

La cantidad de agua almacenada en el suelo (humedad del suelo) tiene influencia directa en el incremento de evapotranspiración y la recarga de agua subterránea y en la generación de escurrimientos.

Las proyecciones de aumento de evapotranspiración, por el incremento de la temperatura, la reducción de precipitación en México, y la intensificación de sequías provocarán la acumulación de sales en la zona radical del suelo en zonas áridas y semiáridas. Además que los cambios en las intensidades y periodos de precipitación modificarán los patrones de drenaje en el suelo.

Las decisiones sobre la planificación de los recursos hídricos, el diseño, la construcción de nueva estructura hidráulica, el plan de cultivos y riegos, así como la operación de presas y el suministro de agua dependen tanto de las condiciones climáticas como de un adecuado manejo por parte de los operadores y administradores de los sistemas hidráulicos.

La planeación de los sistemas hidráulicos actuales considera que la tendencia y variabilidad climática futura será similar a la histórica. Con este supuesto se ha pensado la infraestructura hidráulica en México y del mundo. Las presas son diseñadas de acuerdo con la información histórica de escurrimientos en los ríos, el tipo y frecuencia de las inundaciones esperadas y sequías observadas. Las presas también son operadas utilizando el pasado hidrológico como referencia para establecer sus reglas de operación.

Con la intensificación de las variables ambientales por efecto del cambio climático, el uso de la información climática histórica puede ser ahora cuestionable (peligrosa e incierta) en el diseño y operación de los sistemas hidráulicos. El cambio climático es un proceso paulatino real, por lo que es necesario analizar sus posibles repercusiones en la planeación, operación y gestión de los recursos hidráulicos.

2.3.1 Efectos del cambio climático en la precipitación

Existen varias estimaciones sobre la precipitación en México, una de ellas es la publicada por el IPCC para Norteamérica en un escenario A1B. En este escenario se observó que la precipitación en México disminuirá 10% en el norte y 15% en el noroeste, siendo las regiones donde se encuentran los principales y más extensos distritos de riego en el país. Los cambios en la precipitación serán muy diferentes en el sureste mexicano, donde la disponibilidad natural es más elevada que en el norte, región árida y sin disponibilidad. Ver figura 7.

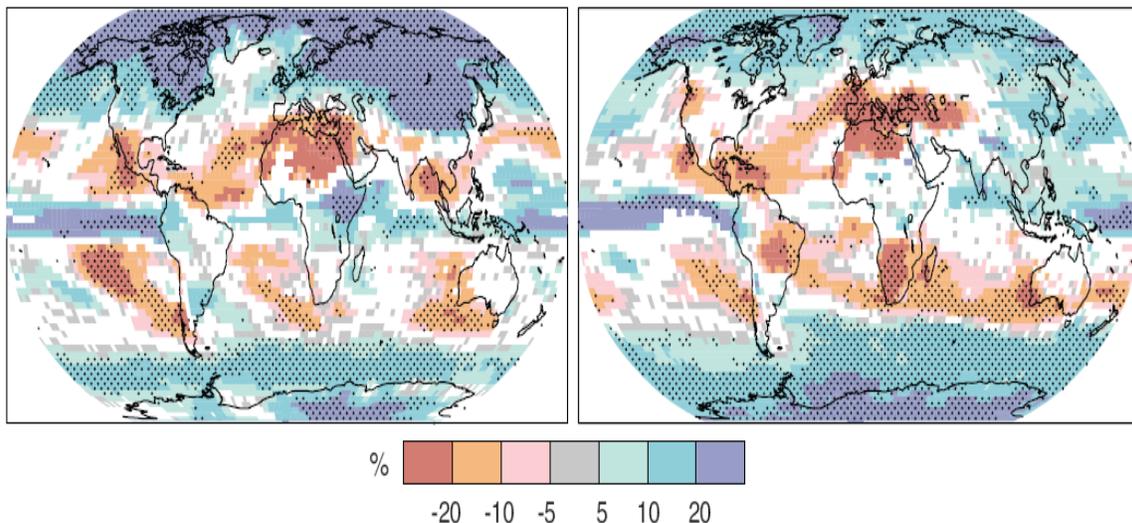


Figura 7. Cambios de la precipitación conforme al escenario A1B. Periodo 2090-2099 comparado con el periodo 1980-1999, (IPCC, 2007)

Un enfoque alternativo es el presentado por Hulme y Sheard (1999) los cuales modelaron una subregión llamada Mesoamérica, que incluye México, obteniendo en este estudio las anomalías en la precipitación promedio de 1215 mm anuales. Para la precipitación se predice una disminución en toda la región que sería marcada con más énfasis en el sur de México. Considerando los resultados del escenario A1 medio (tabla 3), para el año 2050, se estiman disminuciones en la precipitación del 7 al 12% en el sur de las cuencas del Grijalva y Usumacinta, del orden del 3% en la vertiente del golfo de México y de hasta 11% en la costa centro occidental, sin cambios en las cuencas del norte.

Para el 2080, en el mismo escenario, se esperarían disminuciones en la precipitación en las cuencas del sur de los ríos Usumacinta y Grijalva de entre 12 y 17%. Este decremento tendría efectos sobre todo en la capacidad nacional de generación de energía eléctrica, que en su mayor parte se produce en estas cuencas. Se registran precipitaciones menos abundantes en la zona centro occidental de México de entre el 11 y 15%, lo cual causaría problemas en los sistemas ecológicos de la región y en la disponibilidad del agua para la agricultura.

Es importante observar que el norte de México se encuentra en lo que se puede llamar zona de transición: entre las latitudes en que se espera una disminución en la precipitación, como América Central y Sudamérica y en las que se vaticinan incrementos en la precipitación, en Norteamérica. Esto hace más difícil el pronóstico de los cambios calculados para esta zona.

2.3.2 Efectos del cambio climático en el escurrimiento

El escurrimiento se define como el agua proveniente de la precipitación, que circula sobre o bajo la superficie terrestre, y que llega a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca.

De acuerdo con la definición anterior el escurrimiento depende directamente de la precipitación; con los efectos del cambio climático en la precipitación de México, el escurrimiento se verá afectado de manera no lineal, es decir, que un cambio en la precipitación se magnifica en el escurrimiento. Por ejemplo, para unas cuencas áridas, una baja precipitación del 10% puede ocasionar decrementos hasta del 30% en el escurrimiento. Ver Figura 8.

Hulme y Sheard (1999) prevén que el escurrimiento sería aún menor, debido al aumento en la evapotranspiración y la menor humedad del suelo, lo que en conjunto disminuiría la cantidad de agua disponible en el flujo superficial y en la recarga de acuíferos.

La Met Office (Met Office, 1999) estima cambios en el escurrimiento en el año 2080, para tres escenarios de estabilización del CO₂ atmosférico. En la mayor parte de México se esperarían disminuciones en el escurrimiento de entre 5 y 25%, con excepción de algunas cuencas en la región centro-occidental, en donde se estiman incrementos en el escurrimiento de alrededor del 10%. Desde luego una disminución del 20% no tiene efectos de la misma gravedad en las cuencas del sur, salvo en la generación de energía eléctrica, que en las cuencas áridas del norte de México, en las que ya se viven en condiciones de escasez. Estos cambios impondrían restricciones a diversos usos del agua, en especial a la agricultura.

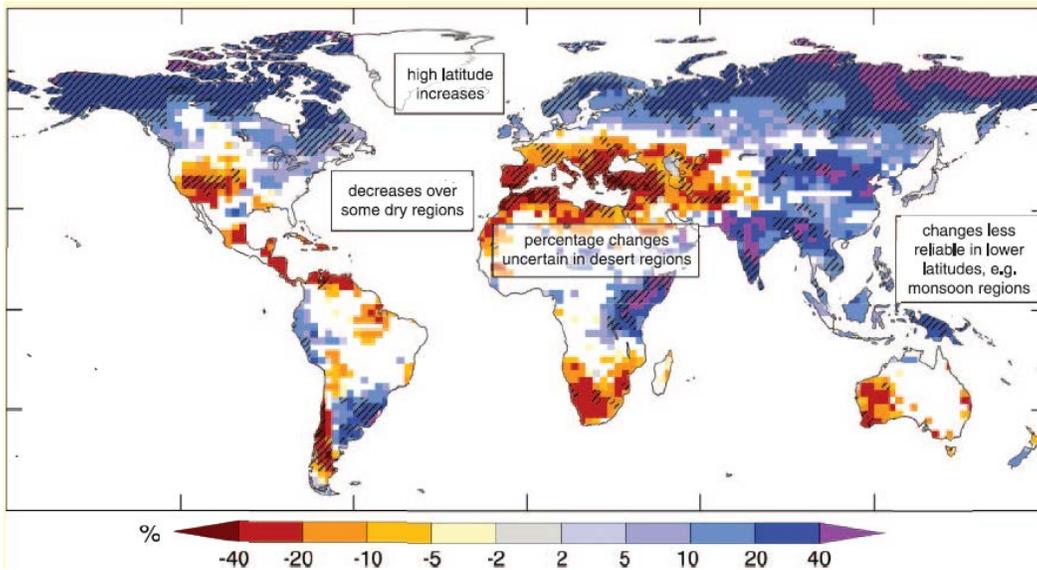


Figura 8. Cambios en el escurrimiento conforme al escenario A1B. Periodo 2090-2099, (IPCC, 2007).

2.3.3 Efectos del cambio climático en la relación lluvia - escurrimiento

La modelación de la relación lluvia escurrimiento depende de características geomorfológicas, topográficas, edafológicas y de cobertura vegetal, entre otras, propias de cada cuenca. Muchas de estas características hacen más difícil el pronóstico de los efectos del cambio climático en diversas regiones del país. Por esta razón no existen muchos estudios en cuanto a esta relación en nuestro país.

Haciendo referencia al tema, se han publicado trabajos de autores de Noruega, Gran Bretaña, Estados Unidos (California y el Mississippi), Alemania, China, Líbano y el Medio Oriente, Taiwán, Australia, Italia y cuencas del Mediterráneo, entre otros.

En todos ellos se aplica un modelo de transformación lluvia – escurrimiento (en algunos casos general del tipo balance) y se simulan los escenarios climáticos generados por modelos globales de circulación general (IPCC) y se obtienen algunas medidas de cambio con referencia a un escenario base de escurrimiento.

2.4 Efectos del cambio climático en los sistemas energéticos

Las diversas ramas industriales y los sistemas energéticos tienen diferente sensibilidad climática, lo cual influye en su vulnerabilidad ante el cambio climático global; esto se debe a factores como la dependencia de los recursos naturales, procesos industriales, mercados o ubicación geográfica sensibles al clima, entre otros (Sánchez Salazar, 1995).

Un factor que incide en la vulnerabilidad está relacionado con la importancia que tienen en la economía del país, es decir, su participación en el producto interno bruto, ya que es posible inferir cómo afectaría a la economía del país la vulnerabilidad al cambio climático.

Los sectores energético e industrial guardan una relación biunívoca con el cambio climático global, porque ambos sectores son los que más contribuyen a la acumulación de gases de invernadero en la atmósfera, por lo que, en las áreas en donde se concentra la infraestructura de dichos sectores económicos serán también las más afectadas por las acciones de mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero.

La capacidad de adaptación de las empresas al cambio climático global dependerá de la economía para contar con sistemas tecnológicos modernos que se ajusten en forma dinámica a sus necesidades, dependiendo en primera instancia de la envergadura de las operaciones de las empresas y de su estructura empresarial.

A continuación se presentan algunos factores que influirán en la vulnerabilidad de estos sectores.

El ascenso del nivel del mar. Las instalaciones industriales o de generación eléctrica, localizadas en las costas, serán más vulnerables, al igual que las terminales de abastecimiento y distribución de hidrocarburos y sus derivados, y la infraestructura de interconexión con la misma ubicación.

El ascenso de la temperatura. En primera instancia se reflejará en un aumento de la evaporación y evapotranspiración, una reducción en la precipitación y en los escurrimientos, lo que conllevará a la aceleración de los procesos de desertificación y de redistribución de los recursos hídricos. En consecuencia los efectos sobre el sector energético estarán en función de sus necesidades de abastecimiento de determinados volúmenes de agua, de la regularidad con que se requieren dichos abastos y del clima donde se ubica la empresa. Así, a mayor volumen requerido, el abasto será más constante, el clima más seco y por ello, ante el cambio climático, la empresa será más vulnerable, básicamente por una mayor competencia sobre los recursos hídricos.

Las centrales hidroeléctricas tienen una demanda variable de agua, el consumo es elevado, pero se trata solo de agua turbinada, por lo tanto, no tiene una utilización única, sino que se comparte con otros usos. En cambio las termoeléctricas suelen requerir de un menor consumo de agua en cuanto a volumen, pero su uso es más directo y es para dos fines; uno como materia prima del proceso de generación de energía en las centrales de vapor, y otro como agua de enfriamiento. En ambos casos, bajo condiciones de rigidez, en que el agua utilizada no siga procesos de reciclaje, la vulnerabilidad será alta.

Las modificaciones en la precipitación implican variaciones en el costo de obtención del agua; en aquellos lugares en el que el agua comience a escasear habrá que incrementar las inversiones para obtenerla y asegurarse un abasto continuo, de tal manera que su precio tendrá un incremento, y ello se reflejará en el costo de obtención de la energía eléctrica y en el de extracción y refinación de los combustibles fósiles.

Por lo tanto, existen diferencias entre las diversas ramas de la industria, en cuanto a su sensibilidad hacia el clima. Por lo que las industrias se pueden clasificar en los siguientes grupos:

- A) Industrias que dependen de recursos naturales sensibles al clima.
- B) Industrias cuyo proceso industrial es directamente sensible al clima.
 - 1) Sector productor de energía eléctrica.
 - a) Centrales termoeléctricas
 - b) Centrales hidroeléctricas
 - 2) Sector productor de petróleo y gas.
 - 3) Industria de fundición y refinación de metales.
 - 4) Industria alimentaria.
 - 5) Industria textil.
- C) Industrias cuya localización es vulnerable ante cambio climático global.
- D) Industrias cuyos mercados son sensibles al cambio climático global.

El sector energético e industrial coincide en una serie de factores que los hacen sensibles al clima. Tanto la industria petrolera como la generación de energía eléctrica son altamente sensibles, debido a diversos factores en los que destacan, la ubicación geográfica, el que sus procesos industriales y mercados son influidos por las variaciones climáticas y por la influencia que tienen de la emisión de gases de invernadero; de los dos tipos de centrales eléctricas las más vulnerables, por sus insumos de agua, son las termoeléctricas y las hidroeléctricas.

2.4.1 Efectos del cambio climático en la generación hidroeléctrica

Las centrales hidroeléctricas tienen una sensibilidad alta al cambio climático por manejar un insumo sensible a dicho cambio, de por sí vulnerable en las zonas áridas, en las que los embalses tienen usos múltiples. En las zonas templadas, la vulnerabilidad no radica en la falta de recurso hídrico, sino en el alto costo del agua, debido a que ésta se utiliza para las grandes zonas urbanas. En el resto del país la vulnerabilidad de las plantas hidroeléctricas sería baja o media, en virtud de que se trata de centrales de gran capacidad, con bajos costos del agua, con grandes ventajas climatológicas, además de tener poca competencia en cuanto a otros usos del agua (Sánchez Salazar, 1995). Ver Figura 9.



Figura 9. Presas que representan 60% de la capacidad de almacenamiento del país. (CNA, 2005)

De acuerdo con modelos como el Canadian Climate Center las centrales hidroeléctricas con *sensibilidad muy alta* al cambio climático son las que se ubican en la parte norte y noreste del país, particularmente las del norte de Sinaloa, Sonora, Chihuahua, Coahuila y Tamaulipas, por ubicarse en zonas donde se combinan incrementos de temperatura superiores a 3°C y la disminución de la precipitación es del 10 al 20%.

La vulnerabilidad alta se presenta en las centrales hidroeléctricas ubicadas en el centro, centro-occidente y centro-orientado del país, en donde la temperatura media anual aumentara solo de 2 a 2.5°C, se produce un descenso de la precipitación anual de 10%, además de tratarse de la zona más problemática del país en cuanto a demanda de recurso hídrico.

La vulnerabilidad media-alta se presentará en las zonas del país con centrales hidroeléctricas en las que los incrementos de temperatura media anual son de 1.5 a 2.5°C, y estos se combina con disminuciones en la precipitación de 10%, tal como sucede en Chiapas, Guerrero, Puebla, Hidalgo y el centro de Sinaloa.

La vulnerabilidad media ocurre en las centrales hidroeléctricas que se ubican en aquellos lugares con los incrementos más bajos en la temperatura media anual y

un aumento en la precipitación de 10 a 30%, como las costas de Guerrero, Quintana Roo, Ciudad del Carmen.

La vulnerabilidad baja corresponde a zonas en las que los incrementos de temperatura son muy ligeros y los mayores aumentos de precipitación, como el centro-occidente y península de Yucatán.

Otros resultados provenientes del modelo GFDL-30, referente a la producción de electricidad, indican que en virtud de que todas las plantas hidroeléctricas se ubican en una zona en que, cuando hay incrementos de temperatura estos coinciden con aumentos de precipitación superiores al 30%, de acuerdo con este modelo la vulnerabilidad climática será muy baja, para las centrales localizadas en Oaxaca y Sinaloa; baja para la mayor parte de las centrales hidroeléctricas del país, ubicadas en Sonora, el oriente y parte del occidente; y media en aquellas zonas del centro y centro-occidente en las cuales la presión por el agua es mucho mayor. Así mismo, habrá una sensibilidad media en las centrales hidroeléctricas de Chiapas, por el notable incremento en la precipitación anual.

3 Selección del modelo hidrológico y escenarios de cambio climático previstos en la disponibilidad

Para la realización de esta investigación es necesario seleccionar de la mejor manera el modelo hidrológico y los escenarios de cambio climático a utilizar por lo que en este capítulo mencionaremos de la manera más breve los modelos hidrológicos más utilizados en el país, así como los criterios de selección y el elegido para elaborar las estimaciones de escurrimiento bajo diversos escenarios de cambio climático. Asimismo, se mencionan los escenario de cambio climático seleccionados, como se llevó a cabo dicha elección y los resultados obtenidos.

3.1 Modelos hidrológicos de relación lluvia - escurrimiento

Es sumamente común, al menos en nuestro país, que no se cuente con registros adecuados de escurrimiento en el sitio de interés para determinar los parámetros necesarios para el diseño, modelación y operación de obras hidráulicas. En general, los registros de precipitación son más abundantes que los de escurrimiento, además de que estos no son afectados por cambios en el funcionamiento hidrológico de la cuenca. Por lo tanto, es conveniente contar con métodos que permitan determinar el escurrimiento en una cuenca a partir de la información sus características y los datos de precipitación. Debido a que los procesos hidrológicos abarcan varios órdenes de magnitud en espacio y tiempo, en la Figura 10 se muestra el escalamiento temporal de los problemas hidrológicos, es decir los periodos de simulación para diferentes propósitos, bien sea de usos del agua, de prevención de crecientes o de planeación de los recursos hídricos.

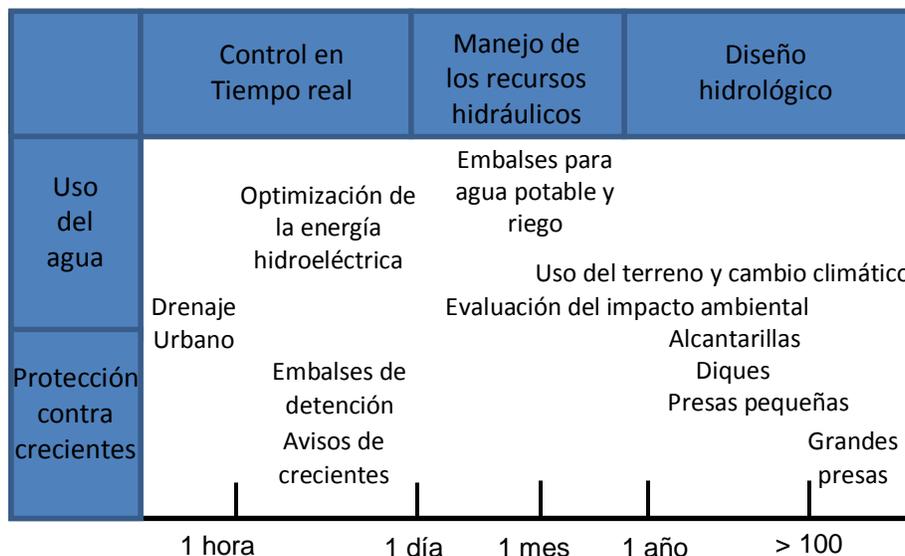


Figura 10. Escalamiento temporal de los problemas hidrológicos. (Campos, 2007)

Las características principales de una cuenca se conocen por medio de planos o información fotogramétrica o de satélite que definan la topografía y de uso de suelo, y la precipitación a través de mediciones. De esta manera los principales parámetros que intervienen en el proceso de conversión de lluvia a escurrimiento son los siguientes:

1. Área de la cuenca
2. Altura total de precipitación
3. Características generales de la cuenca
4. Distribución de la lluvia en el tiempo
5. Distribución en el espacio de la lluvia y de las características de la cuenca

Se han desarrollado diversos modelos para analizar la relación lluvia – escurrimiento. Desde luego la complejidad de los modelos aumenta en la medida de la elección de los parámetros que se toman en cuenta, en este sentido también aumenta su precisión, pero los datos que se requieren son más y de mejor calidad. En la Figura 11 se muestra el esquema típico de un modelo hidrológico lluvia-escurrimiento.

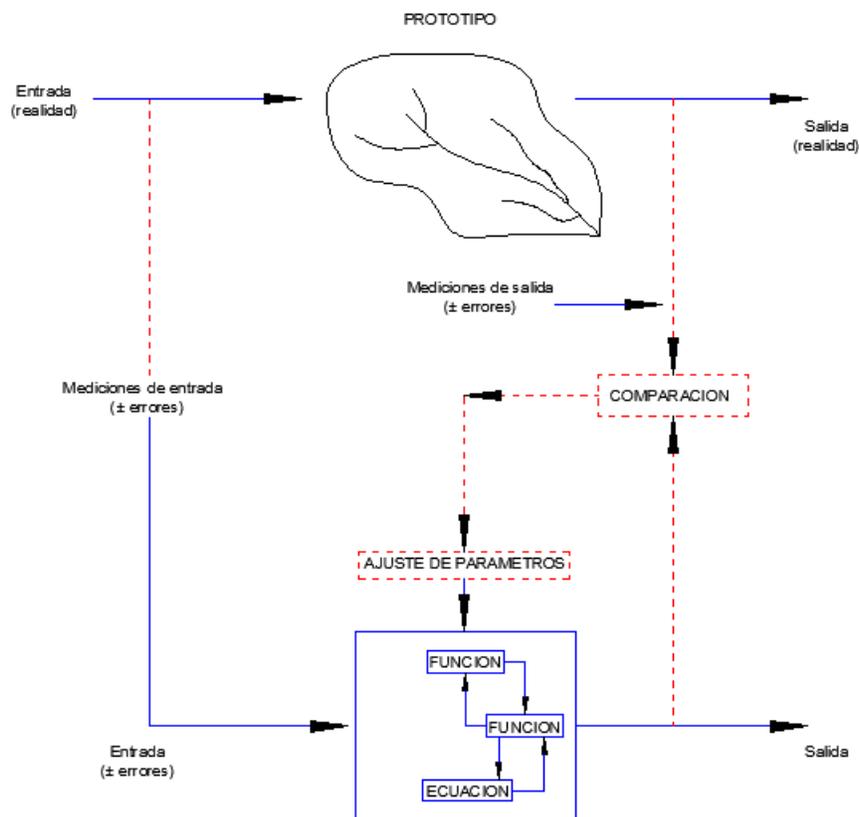


Figura 11. Modelación de sistema hidrológico. (Campos, 2007)

Una clasificación de estos modelos es la siguiente:

- Modelos determinísticos. No consideran la aleatoriedad de las variables hidrológicas, de manera que la entrada siempre produce la misma respuesta, lo cual permite hacer pronósticos (hidrología determinística).
- Modelos estocásticos. Involucran variables en el espacio y en el tiempo, son parcialmente predecibles, o deterministas, son parcialmente aleatorios (hidrología estocástica). Este tipo de modelos se aplica a diseño y operación de embalses y para la estimación de volúmenes de escurrimiento.
- Modelos probabilísticos. Proceso permanentemente aleatorio con propiedades estadísticas iguales en el tiempo. Este tipo de modelos se aplican a eventos extremos y sequías.

Dentro de los modelos determinísticos hay tres tipos de representación de un modelo hidrológico, que son: físicos, matemáticos y analógicos. En el modelo matemático el comportamiento del sistema está representado por ecuaciones y declaraciones lógicas que expresan relaciones entre variables y parámetros.

Un modelo hidrológico conceptual es la representación matemática simplificada de alguno o todos los procesos del ciclo hidrológico, expresados en forma matemática y conectados entre sí en tiempo y espacio, correspondiendo de forma natural. El modelo ideal es aquel que especifica (en parámetros físicos) completamente los procesos hidrológicos y sus propiedades, que ocurren en todos los componentes relevantes de la cuenca.

Otra clasificación está basada en la naturaleza del objetivo a modelar, definido en dos grupos. El primero incluye modelos que simulan el comportamiento de una cuenca. El segundo los relativos al comportamiento hidráulico y económico de los sistemas de recursos hidráulicos complejos. En la Figura 12 se muestra una representación de modelos en estos dos grupos.

Grupo 1. Modelan el comportamiento de una cuenca:

- Modelos de caja negra
- Modelos de regresión
- Modelos basados en las ecuaciones de la mecánica
- Modelos lineales y no lineales
- Modelos invariantes y variantes en el tiempo
- Modelos globales y distribuidos
- Modelos de memoria corta o memoria larga

Grupo 2. Modelan el comportamiento hidráulico y económico.

- Modelos de un solo embalse
- Modelos de varios embalses
- Modelos de sistemas complejos (embalses, bombeos y trasvases)
- Modelos basados en datos determinísticos
- Modelos basados en datos estocásticos
- Modelos basados en datos de múltiples sitios
- Optimización por simulación
- Optimización por programación lineal
- Optimización por programación dinámica
- Optimización por algoritmos numéricos de búsqueda

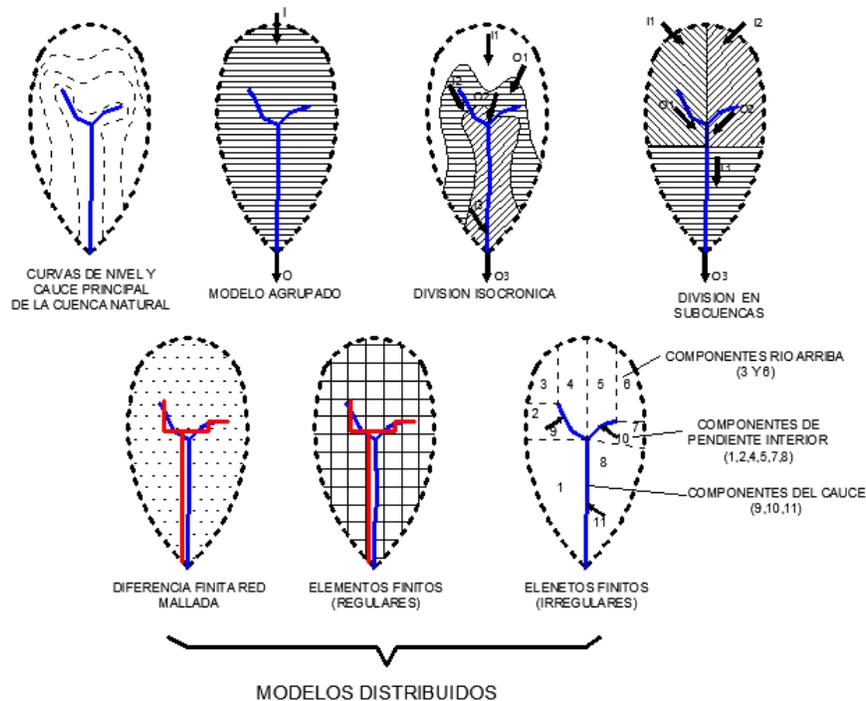


Figura 12. Representación de modelos lluvia-escorrimento de discretización espacial.

Algunos métodos que utilizan los parámetros citados anteriormente, y que son los mejores para México de acuerdo con la información disponible, son los siguientes (Aparicio, 2003):

1. Método de envolventes
2. Formula racional
3. Hidrograma unitario
4. Método de Chow

Para cuencas medianas y grandes cuyas características pueden considerarse homogéneas, así como su comportamiento, e hidrometeorológico el procedimiento convencional consiste en hacer uso de la técnica del Hidrograma Unitario, en sus versiones conocidas.

3.2 Selección del modelo hidrológico

En México la disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales y subterráneas, se calcula en base a la Norma Oficial Mexicana: NOM-011-CNA-2000; esta regula la explotación, uso y aprovechamiento del agua, de manera racional y equitativa.

La NOM-011-CNA-2000 en su “Apéndice Normativo A” describe el método para determinar del volumen medio anual de escurrimiento natural, el cual se limita a conceptos y expresiones básicas. La norma menciona que en caso de que la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se aplica el método indirecto denominado: precipitación-escurrimiento.

$$V = P \cdot A \cdot C_e \quad (1)$$

V: volumen anual de escurrimiento natural (m³).

P: Precipitación anual de la cuenca (mm).

C_e: Coeficiente de escurrimiento (adimensional)

Para cuencas con un área mayor de 3000 km², la norma establece que la cuenca deberá subdividirse en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, localización de los diferentes usuarios e información hidroclimatológica disponible.

A efecto de comparar los resultados de esta investigación con la información oficial, se estima conveniente utilizar lo establecido en la citada norma.

El modelo hidrológico utilizado en este trabajo dará una simplificación de la realidad basado en fórmulas matemáticas que relacionan las variables de entrada y salida. La metodología a utilizar se clasifica dentro de los modelos hidrológicos matemáticos – determinístico - distribuido con el cual se tendrá un valor fijo para cada una de las variables en el tiempo y espacio. La metodología se describe en el capítulo cuatro de este trabajo.

3.3 Selección de escenario de cambio climático

A lo largo de este trabajo se ha hablado de la necesidad e importancia de conocer los escenarios futuros de cambio climático global, así como la regionalización de dichos escenarios para tener una estimación más aproximada de los cambios climáticos de acuerdo con las características de cada región (país, estado, municipio).

En México se han realizado diversos estudios en lo referente al cambio climático, basados principalmente en estimaciones de los modelos climáticos globales que han participado en los reportes de evaluación del IPCC, donde se destacan un aumento en la aridez de la zona norte del país. (Martínez Austria, 2008)

En el presente trabajo se utilizarán los resultados de regionalización obtenidos en el Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), y que contienen una mejor información de la precipitación y temperatura bajo diversos escenarios de Cambio Climático, a través del método “Reliability Ensemble Averaging” (REA).

Este método tomó en cuenta dos criterios de credibilidad: el desempeño del modelo en reproducir el clima actual (criterio de desempeño) y la convergencia en los datos simulados entre modelos (criterio de convergencia). Se tomaron para México las simulaciones de los modelos de circulación general acoplados que participaron en el 4° Reporte de Evaluación del IPCC; lo que dio resultados de precipitación y temperatura correspondiente al escenario SRES-A1B y SRES-A2 con una resolución de la escala para México de 0.5° x 0.5°.

3.3.1 Método REA

El método REA, como se mencionó con anterioridad, toma en cuenta los criterios de desempeño y de convergencia (Martínez Austria, 2008). El desarrollo de estimaciones de cambio climático y su rango de incertidumbre asociado es una aproximación sencilla, donde se toma en cuenta la temperatura T , dado por el promedio del ensamble de todas las simulaciones de los modelos, esto es,

$$\overline{\Delta T} = \frac{1}{N} \sum_{i=1, N} \Delta T_i \quad (2)$$

Donde N es el número total de modelos, la sobrebarra indica el promedio del ensamble y Δ el cambio simulado por el modelo.

El cambio promedio $\tilde{A}\tilde{T}$ esta dado por el promedio pesado de los miembros del ensamble, esto es,

$$\tilde{A}\tilde{T} = \tilde{A}(\Delta T) = \frac{\sum_i R_i \Delta T_i}{\sum_i R_i} \quad (3)$$

Donde el operador \tilde{A} denota el promedio REA y R_i es un factor de fiabilidad del modelo dado como,

$$R_i = \left[(R_{B,i})^m \times (R_{D,i})^n \right]^{1/(m \times n)} = \left[\left[\frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(B_{T,i})} \right]^m \times \left[\frac{\varepsilon_T}{\text{abs}(D_{T,i})} \right]^n \right]^{1/(m \times n)} \quad (4)$$

Donde, $R_{B,i}$ es un factor que mide la fiabilidad del modelo con una del sesgo del modelo ($B_{T,i}$) en simular la temperatura actual, es decir, entre mayor sesgo menor es la fiabilidad del modelo. El sesgo es simplemente la diferencia entre la temperatura media simulada y la observada. Por otro lado $R_{D,i}$ es un factor que mide la fiabilidad del modelo en términos de distancia ($D_{T,i}$) entre el cambio calculado por un modelo dado y el cambio del promedio REA, entre mayor es la distancia menor es la fiabilidad del modelo.

Cabe mencionar que un sesgo grande para un modelo no implica una distancia grande correspondiente o viceversa, es decir, los modelos que se encuentran en la parte más alejada del promedio del ensamble para el clima futuro, no necesariamente son los modelos que representen un desempeño pobre en cuanto a reproducir las condiciones del clima presente.

Los parámetros m y n se pueden usar para pesar cada criterio, en este caso m y n son iguales a 1, con lo cual se les da el mismo peso a ambos criterios. También R_B y R_D se toman como 1 cuando B y D son menores que ε .

El parámetro ε es una medida de la variabilidad natural en treinta años de promedio de la temperatura y precipitación regional. Para calcular ε , se calculan las series de tiempo de temperatura y precipitación promedio regional observadas para el siglo XX. Luego se calculan los promedios móviles de treinta años de las series después de desfazar linealmente los datos y se estima ε como la diferencia entre los valores máximo y mínimo de esos promedios móviles de treinta años.

3.3.2 Regionalización para México por el método REA

En el IMTA se realizó la regionalización para precipitación y temperatura en superficie en México para el periodo de 1961 – 1990. Con este periodo se calcularon los parámetros para usar el método REA. (Martínez Austria, 2008)

El sesgo que es uno de los factores claves se calculó con la diferencia entre la precipitación media simulada y la observada en dicho periodo usando programas en el lenguaje NCL. El sesgo de precipitación media mensual esta dado en mm/día. En el caso de México, se observa para la mayor parte del país una tendencia de los modelos a sobreestimar la precipitación observada en la franja central.

Los factores de fiabilidad R_B , R_D y R_i calculados fueron consistentes, esto es que R_i resulta ser el producto de los factores R_B y R_D ($m=n=1$). Con lo cual se puede apreciar que las zonas de mayor confianza en México para la década de los 80's resultan ser la península de Baja California y la región noreste.

El cálculo de las anomalías de precipitación está determinada mes a mes del periodo completo 2010 al 2098 en cooperación con la climatología mensual simulada del periodo 1961-1990. Los resultados pasan de tener una malla típica de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ a una malla mucho más fina de $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, la adecuada para el análisis de impactos del cambio climático en diferentes sectores, por ejemplo, el hídrico, el agrícola o el de salud. En general en la mayoría de los resultados de las anomalías para diferentes años dentro del periodo mencionado, se puede observar una correspondencia adecuada entre los resultados de gran escala y los de escala regionalizada.

Algunos de los resultados de regionalización de la precipitación y la temperatura se superficie para el escenario SRES-A2 en México a través del REA para la segunda mitad del siglo XXI, muestran en general que la precipitación total irá decreciendo paulatinamente en las décadas por venir para prácticamente todo México, en comparación con la climatología 1961-1990. En invierno esto se observa especialmente para las zonas norte y occidente del país, y en el verano para el centro y sureste del país. Es notable apreciar también que a mitad del siglo XXI se esperan anomalías positivas en verano en pequeñas regiones del centro norte y noroeste del país, pero a medida que se avanza en el siglo las anomalías tienden a cambiar de signo.

Para la temperatura en todos los caso se tienen anomalías positivas para el país en su conjunto, lo que implica temperaturas más altas con respecto al periodo 1961-1990. Se nota un incremento paulatino de las temperaturas conforme se avanza en el tiempo, en especial para los meses de verano, en el norte y sureste del país, en donde se estiman anomalías mayores a los 5°C para la última década del siglo.

4 Zona de estudio y problemática. Cuenca del Sistema hidroeléctrico del Río Grijalva

4.1 Justificación y objetivo

4.1.1 Justificación

La abundancia de agua (Figura 13), vegetación, la variedad de fauna y altas temperaturas medias, propias del trópico húmedo son las características más conocidas del sureste del país, particularmente el estado de Chiapas.

Sin embargo en los últimos años, los bosques han sido talados y la pérdida de suelo es muy importante, elementos que son el sustento de todos los ecosistemas terrestres. Los ríos las lagunas y los esteros enfrentan la amenaza de la disminución del volumen de agua disponible. Si bien el agua en la región es abundante, la marcada estacionalidad de las lluvias y los escurrimientos, lo abrupto de la topografía en las partes altas y sus extensas planicies convierten su gestión sustentable en un problema difícil de regular y controlar para su uso razonable y eliminar los efectos nocivos de su exceso, causa frecuente de los desastres naturales.

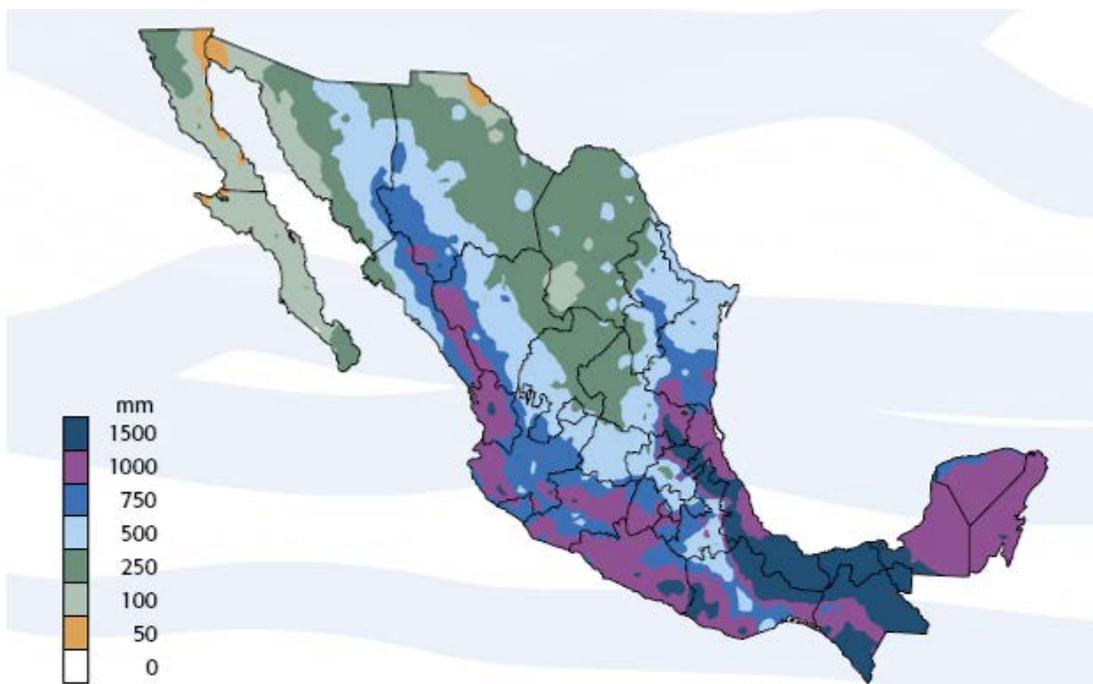


Figura 13. Distribución de la precipitación media mensual histórica en México, (CONAGUA, 2007)

Uno de los desafíos que enfrenta actualmente la humanidad es el relativo al cambio climático. En Chiapas una de las consecuencias directas del cambio climático es que muy probablemente se eleve aun más la temperatura media lo que puede provocar que disminuyan las lluvias y por ende el escurrimiento en los cauces, los almacenamientos de las presas y la recarga de los acuíferos, afectando así la disponibilidad de agua para las ciudades, las industrias, el riego y la generación de energía eléctrica.

La integración de los datos (temperatura y precipitación) obtenidos del REA, la utilización de información (geográfica e hidrometeorológica) recabada de instituciones del país servirán para analizar el posible impacto del cambio climático en el escurrimiento, el grado de vulnerabilidad y posibles impactos en la generación de energía eléctrica en la cuenca del río Grijalva.

4.1.2 Objetivo

Evaluar el comportamiento hidrológico de la cuenca del río Grijalva para estimar el impacto del calentamiento global en los recursos hídricos (escurrimiento superficial en la cuenca), teniendo en cuenta los escenarios del cambio climático.

Para alcanzar el objetivo principal se deben cumplir los siguientes objetivos particulares:

- Aplicar los resultados de estimación precipitación para el siglo XXI, calculados por el REA.
- Realizar la modelación hidrológica (escurrimiento) de la cuenca de río Grijalva, en particular el sistema hidroeléctrico del Grijalva, con el modelo descrito en la NOM-011-CNA-2000.

4.2 Zona de estudio. Sistema hidroeléctrico del Río Grijalva

El sistema hidroeléctrico del Grijalva, se encuentra situado en la Región Hidrológico-administrativa XI Frontera Sur constituida por el estado de Chiapas y Tabasco, un municipio de Campeche y tres de Oaxaca. Esta Región tiene una extensión territorial superior a los 100 000 km², que es el 5.18% de territorio nacional.

El clima predominante en la región es el cálido – húmedo, con una temperatura media de 24°C y precipitación media anual de 2300 - 4000 mm. De los datos recabados se estima una disponibilidad natural de agua cercana a 165 500 hectómetros cúbicos (hm³) de los cuales, 90% provienen de fuentes superficiales (la principal el río Grijalva) y el 10% restante de fuentes subterráneas.

Del agua disponible de la Región, 49 342 hm³, es utilizada prácticamente en su totalidad para la generación de energía eléctrica, solo el 0.02% es aprovechado en la actividad acuícola. La generación de energía se realiza en las 7 presas hidroeléctricas del estado de Chiapas mediante el aprovechamiento de 49330hm³, destacando el sistema hidroeléctrico del río Grijalva (Chicoasén, Netzahualcóyotl, la Angostura y Peñitas). La capacidad instalada de generación es de 3 928MW, representando el 39% de la capacidad de generación en plantas hidroeléctricas del país y el 11% de la capacidad instalada nacional.

La Región XI está dividida en 8 subregiones, de las cuales 4 pertenecen al Río Grijalva:

Alto Grijalva: está formada por la cuenca del Grijalva – La Concordia, y está conectada directamente con los escurrimientos que provienen de la porción guatemalteca del río Grijalva. Esta zona se caracteriza por encontrarse alejada del desarrollo, con poca población y con menor potencial hidrológico (la precipitación media es de 1455mm).

Bajo Grijalva planicie: integrada por municipio de los estados de Tabasco y Chiapas en las planicies del río Grijalva y Usumacinta. Esta región vierte al Golfo de México un volumen de agua que equivale a la tercera parte de los escurrimientos del país.

Bajo Grijalva sierra: la subregión se compone por los municipios de la sierra chiapaneca que separan el Valle del Grijalva de la planicie tabasqueña del Golfo de México. Se caracteriza por ser la segunda más pequeña en extensión pero la segunda con mayor número de municipios

Medio Grijalva: en esta región se concentran los principales centros urbanos del estado de Chiapas, Tuxtla Gutiérrez y San Cristóbal de las Casa, es la más grande territorialmente, con mayor número de municipios y habitantes. La generación eléctrica se concentra en este Valle Central del Grijalva, en las presas La Angostura, Chicoasén y Malpaso.

4.3 Información para el modelo

4.3.1 SIG utilizados en la investigación

En La modelación hidrológica el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) es de gran ayuda para el manejo de información georeferenciada., con la que se pueden obtener características físicas de las cuencas y su distribución espacial. Otra Utilidad de los SIG es que permite la creación de módulos hidrogeomáticos, que son empleados en la extracción requerida de información por los modelos hidrológicos, especialmente en los distribuidos. En la actualidad se cuenta con bases de datos que permiten la aplicación y tratamiento de los SIG.

Ejemplo de lo anterior es la información de la ocupación del suelo disponible en la Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad (CONABIO), las cartas topográficas digitales editadas por el Instituto Nacional de Geografía Estadística e Informática (INEGI), entre otras fuentes.

En esta investigación se utilizaron principalmente los SIG de la CONABIO, CONAPO, INEGI y CONAGUA, para llevar a cabo procesos de generación y manejo de las bases de geodatos, así como para el desarrollo de un nuevo módulo hidrogeomático, con el que se extrajo parte de la información necesaria para el modelo hidrológico *NOM-011-CNA-2000*.

4.3.2 Imágenes de uso de suelo

Para llevar a cabo la modelación hidrológica con el modelo *NOM-011-CNA-2000*, se requirió de datos de la cuenca en estudio con respecto a la ocupación del suelo. Estos consistieron en los porcentajes de bosques, lagos y ciénegas de cada cuadro que discretiza la cuenca. Para generar las bases de geodatos, con la ocupación del suelo de las cuencas en estudio, se utilizó un mapa edafológico de México en formato *SHAPEFILE* de ArcView, el cual se obtuvo de la *Comisión Nacional para el Uso y Conocimiento de la Biodiversidad* (CONABIO, 2005).

El procedimiento seguido para generar una imagen en formato matricial, con los datos de ocupación del suelo que se requieren en el modelo hidrológico, consistió básicamente en los siguientes pasos:

- a) Se obtuvo un mapa edafológico de México en formato *SHAPEFILE* de la página de Internet de la CONABIO.
- b) Se reclasificó en el SIG ArcView la ocupación de 244 usos de suelo y vegetación reduciéndose a 54 clases.
- c) Con la información reclasificada de la ocupación del suelo de cada una de las cuencas en estudio, se generó mapas rasters con una resolución espacial de 100m.
- d) Considerando los mapas rasters del tipo de suelo y cobertura vegetal, se obtiene un valor ponderado del parámetro de infiltración K y el respectivo coeficiente de escurrimiento.

4.3.3 Generación de archivos de precipitación, SEDEPECC v.1.0

La generación de datos a través de SEDEPECC v.1.0, sistema desarrollado en el IMTA y que contiene los resultados de la regionalización RAE descrita en el capítulo anterior, se hace por medio del ingreso de coordenadas geográficas en la interfaz, la selección del escenario correspondiente, así como del tipo de dato a generar de precipitación o temperatura (normal, absoluta y anomalía), esto para cada 0.5 x 0.5° de resolución la malla (Ver Figura 14).

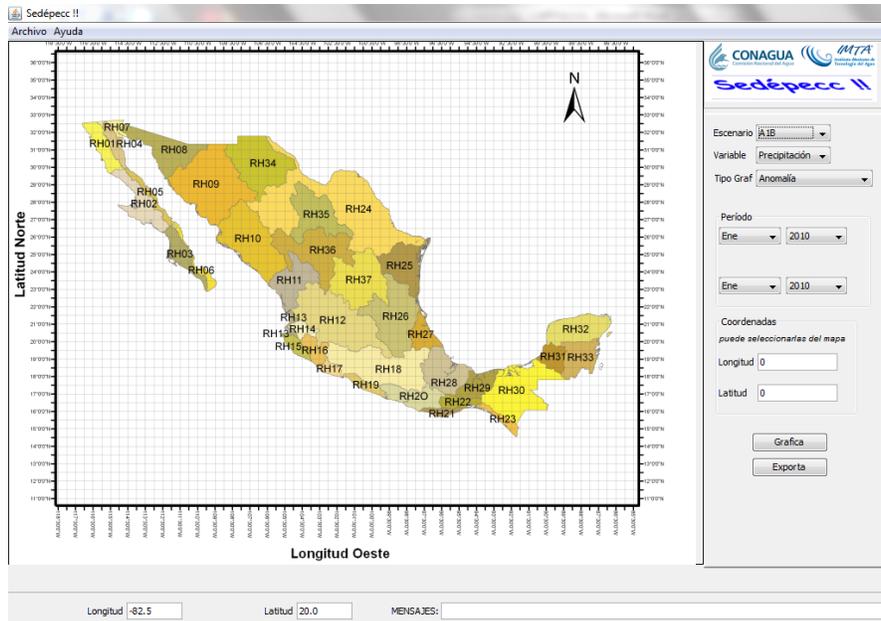


Figura 14. Interfaz SEDEPECC v.1.0

Cada archivo contiene los datos de precipitación media anual para cada periodo seleccionado (2010-2030, 2031-2050 y 2051-20100), para las diferentes coordenadas de la cuenca y para los dos escenarios seleccionados el A1B y A2.

4.4 Metodología para obtención de escurrimientos.

La estimación del escurrimiento para este trabajo se realiza en base a la Norma NOM-011-CNA-2000 (CNA, 2000). Dicha Norma calcula el escurrimiento a partir de la precipitación, área de drenaje y un coeficiente de escurrimiento, ecuación 1.

El input para la precipitación será el programa SEDEPECC v.1.0 (IMTA, 2009), el cual pondera modelos atmosféricos de circulación general. En efecto, el Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México (SEDEPECC v.1.0) incorpora dos escenarios de cambio climático, A1B y A2, correspondientes a varias décadas futuras para la región de México, a partir de un conjunto de modelos de circulación general.

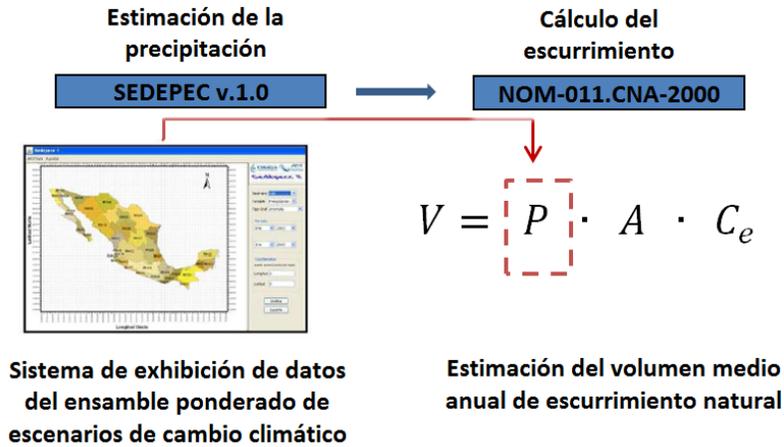


Figura 15. Metodología General, (IMTA, 2010).

El coeficiente de escurrimiento se determina en función al tipo y uso de suelo y volumen de precipitación anual, de la cuenca de estudio. Cabe mencionar que el parámetro K se supuso constante en todos los horizontes de tiempo, sin embargo el coeficiente de escurrimiento cambia en los escenarios de cambio climático, dado que está en función de la precipitación media anual.

$$C_e = K (P - 250)/2000, \quad K \leq 0.15 \quad (5)$$

$$C_e = K (P - 250)/2000 + (K - 0.15)/0.15, \quad K > 0.15 \quad (6)$$

Donde K, es el parámetro que depende del tipo y uso de suelo, y P la precipitación anual (mm).

Como paso intermedio en el cálculo del escurrimiento y con el propósito de identificar las regiones en donde el cambio en precipitación será de mayor magnitud, se propone utilizar un parámetro adimensional definido como *Índice de Precipitación ante el Cambio Climático* (Rivas et al., 2010):

$$IPCC = 1 - \frac{P_{CC}}{P_H} \quad (7)$$

Dónde:

IP_{CC}: Índice de precipitación ante el cambio climático (adimensional)

P_{CC}: Precipitación anual estimada en un periodo del futuro (mm)

P_H: Precipitación anual histórica (mm)

Un valor de 0 en el IP_{CC} representaría un cambio nulo en la precipitación, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en la precipitación del 10%. El índice propuesto se evalúa para los seis escenarios de cambio climático mostrados en la Tabla (4.2).

En forma homóloga, se propone también utilizar un parámetro adimensional definido como *Índice de Escurrimiento Superficial ante el Cambio Climático* (Rivas et al., 2010):

$$IES = 1 - \frac{VES_{CC}}{VES_H} \quad (8)$$

Dónde:

IES_{CC} : Índice de Escurrimiento Superficial ante el cambio climático (adimensional)

VES_H : Volumen de Escurrimiento Superficial histórico ($Mm^3/año$)

VES_{CC} : Volumen de Escurrimiento Superficial ante el cambio climático ($Mm^3/año$)

Para fines prácticos, el Índice de Escurrimiento representa la fracción en la cual disminuye o aumenta el escurrimiento medio anual en relación al volumen histórico de escurrimiento. En forma similar al IPCC, un valor de 0 en el IES_{CC} representaría un cambio nulo en el volumen de escurrimiento, mientras que un valor de 0.10 indicaría una reducción en el volumen de escurrimiento del 10%. Los registros históricos (hasta el 2009) permiten evaluar una condición base o inicial, la evaluación de diferentes escenarios de tiempo futuro (Horizontes 2030, 2050 y 2100) permiten evaluar las nuevas condiciones y la diferencia entre ambas significa el cambio que se pronostica en el futuro. (IMTA, 2010)

5 Resultados

5.1 Simulación de escurrimientos

El análisis del escurrimiento se determinó de acuerdo con la metodología citada en el capítulo anterior. En la imagen se muestra la precipitación histórica para la cuenca del sistema hidroeléctrico del Grijalva, la cual ha sido dividida para su análisis en cuatro subcuencas: cuenca de la presa la Angostura, cuenca de la presa Chicoasén, cuenca de la presa Malpaso y cuenca de la presa Peñitas.

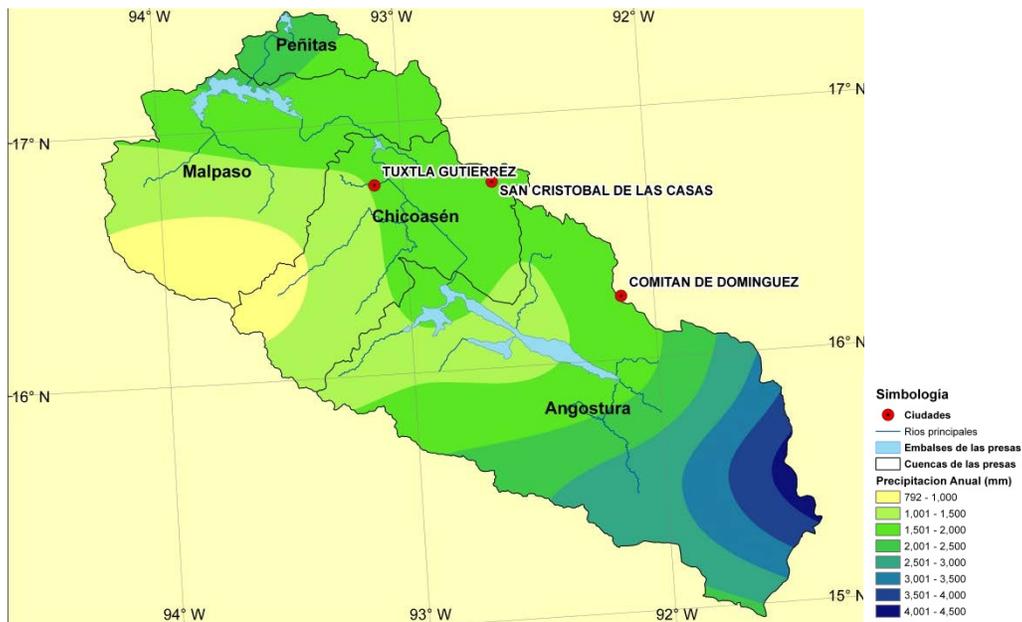


Figura 16. Precipitación histórica de la cuenca del sistema hidroeléctrico del Río Grijalva, (Rivas et al., 2010).

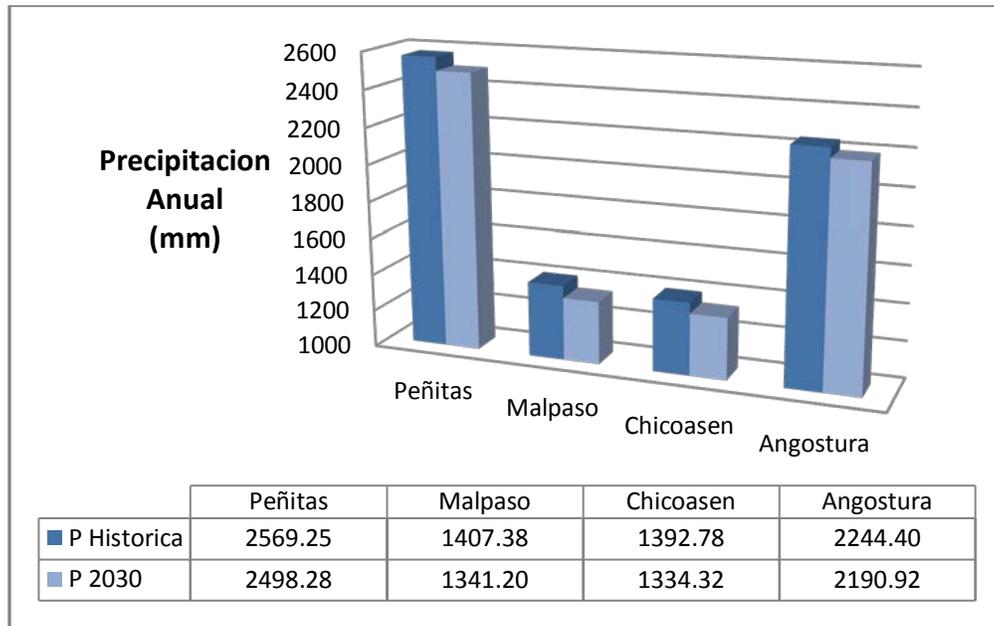
En la Tabla 4 se muestra la subdivisión de cada cuenca, el área y precipitación media correspondiente a cada una de ellas.

Cuenca		Área (Km ²)	P. Histórica (mm)
Total		36772.50	
Subcuencas	Peñitas	1258.38	2569.25
	Malpaso	9210.63	1407.38
	Chicoasén	7597.01	1392.78
	Angostura	18706.47	2244.40

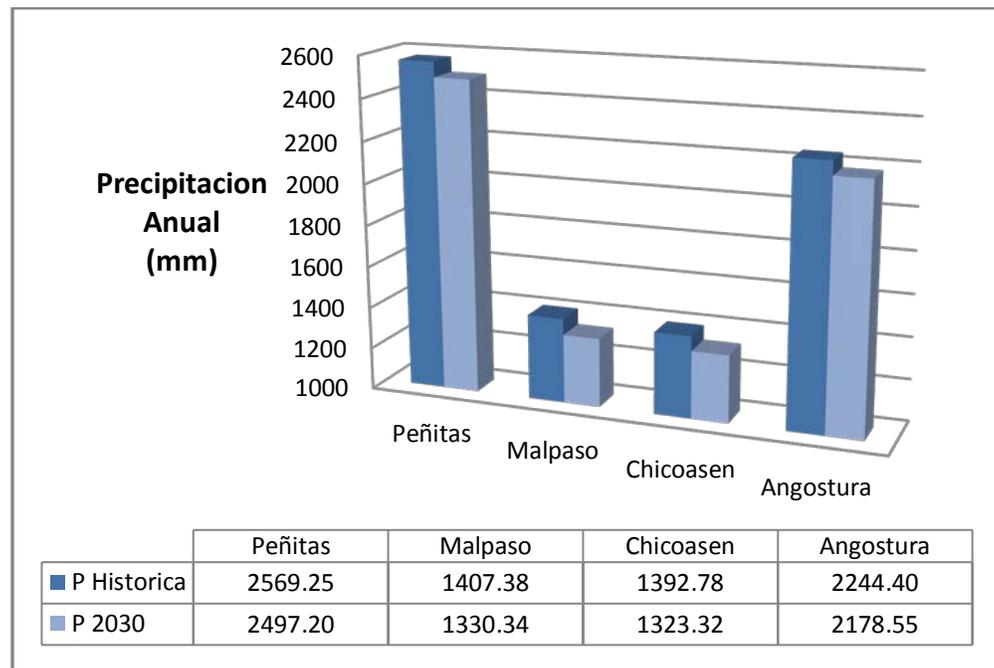
Tabla 4. Subcuencas del Sistema Hidroeléctrico del Río Grijalva

5.1.1 Horizonte 2030

Las láminas anuales de precipitación en cada subcuenca presentan variaciones importantes con respecto a la precipitación histórica. El análisis por cambio climático muestra que la precipitación anual tenderá a disminuir en las cuatro cuencas, como se muestra en las Grafica 1 y 2, correspondientes a los escenarios A1B y A2.



Grafica 1. Precipitación anual del año 2030, escenario A1B.



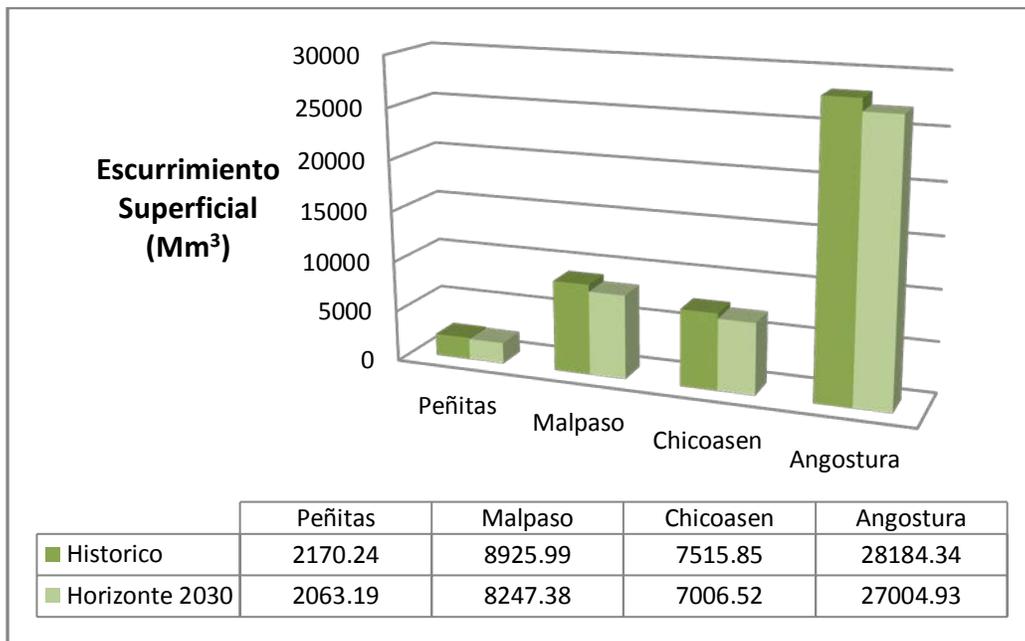
Grafica 2. Precipitación anual del año 2030, escenario A2.

En la tabla 5 se muestran los coeficientes de escurrimiento correspondientes al horizonte de tiempo analizado (escenarios A1B y A2), los cuales se generaron a través de resultados obtenidos de la precipitación.

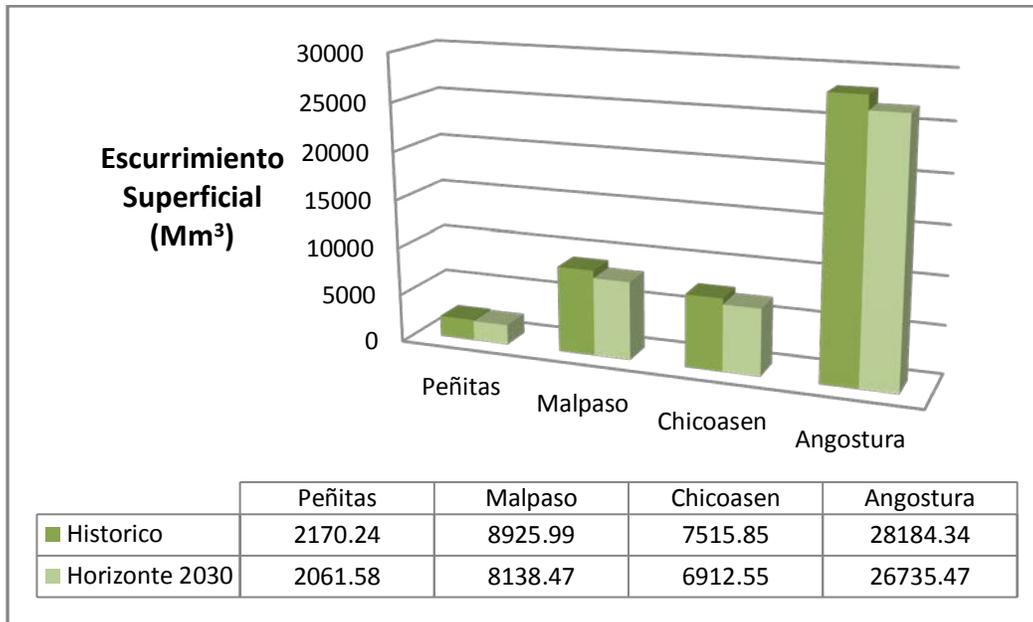
Cuenca	Ce Histórico	Escenario A1B	Escenario A2
		Ce 2030	Ce 2030
Total	0.68	0.67	0.66
Sub-cuencas	Peñitas	0.67	0.66
	Malpaso	0.69	0.66
	Chicoasén	0.71	0.69
	Angostura	0.67	0.66

Tabla 5. Coeficientes de escurrimiento para el año 2030, escenario A1B y A2.

El cálculo de los escurrimientos se determinó con el método planteado en capítulos anteriores, los resultados permiten observar que las cuencas de las centrales hidroeléctricas de Malpaso y Chicoasén presentan los valores más bajos en el escurrimiento. Los escurrimientos en la Cuenca del Rio Grijalva tenderían a una disminución con el trascurso de los años.



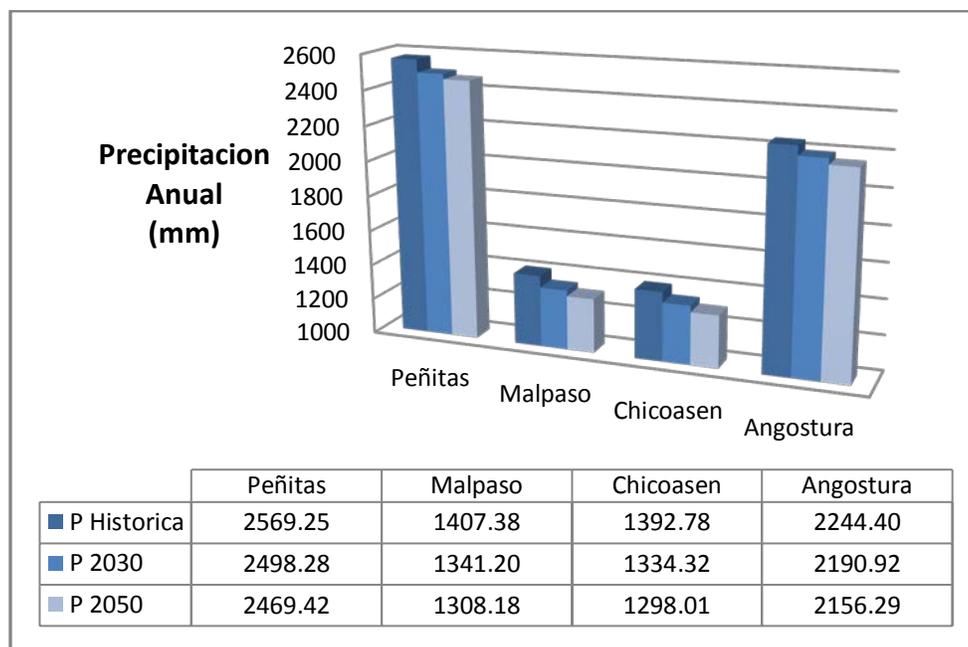
Grafica 3. Escurrimiento anual del año 2030, escenario A1B.



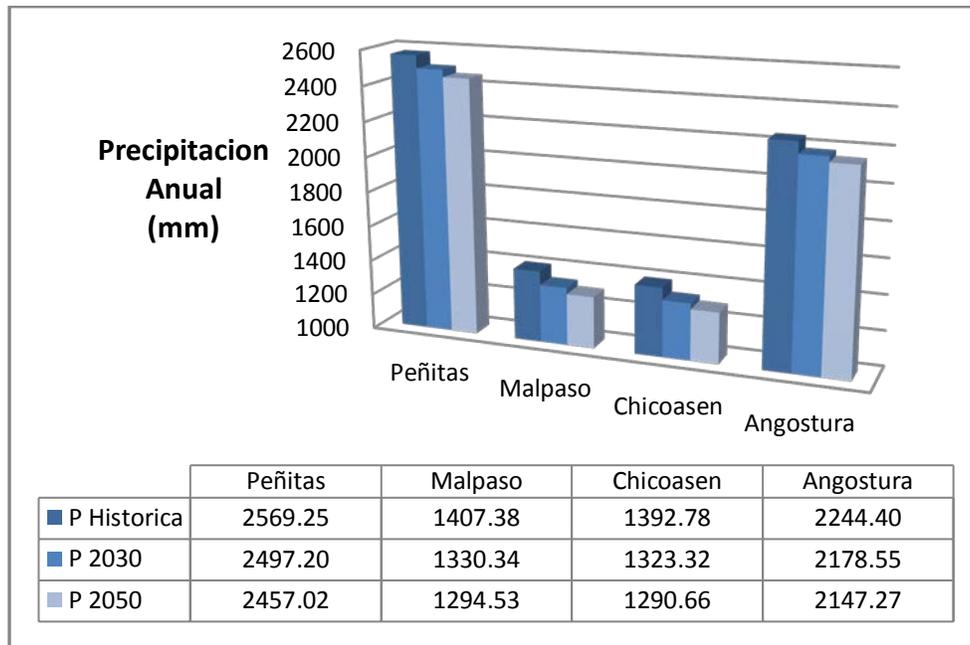
Grafica 4. Ecurrimiento anual del año 2030, escenario A2.

5.1.2 Horizonte 2050

Las láminas anuales de precipitación en cada subcuenca continúan con una variación importante con respecto a la precipitación histórica y al horizonte del año 2030. El análisis por cambio climático muestra que la precipitación anual tenderá a disminuir en las cuatro cuencas, como se muestra en las Grafica 5 y 6, correspondientes a los escenarios A1B y A2.



Grafica 5. Precipitación anual del año 2050, escenario A1B.



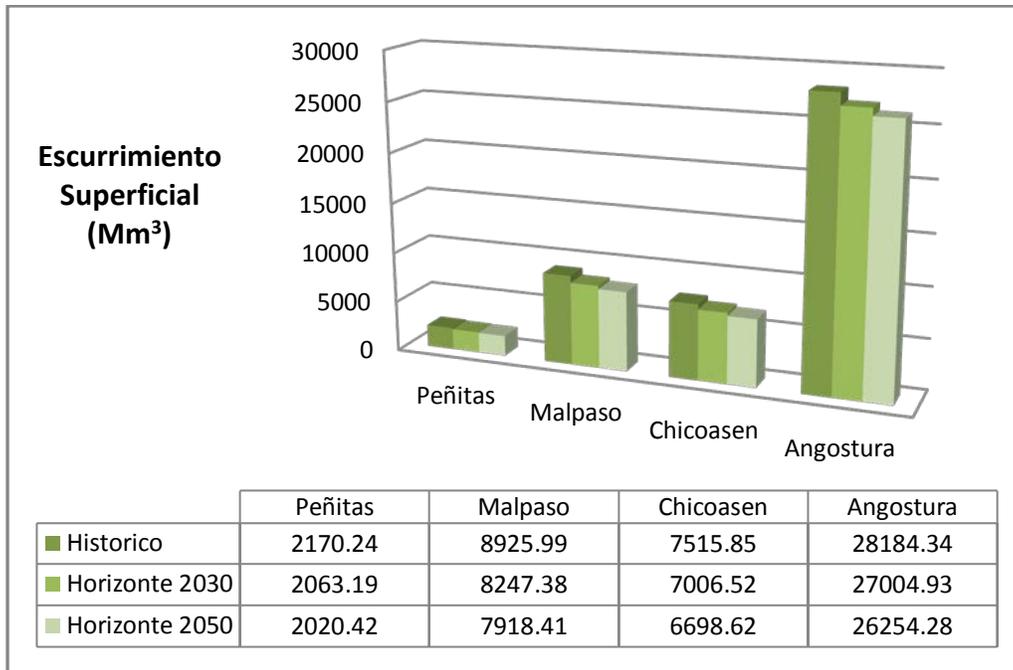
Grafica 6. Precipitación anual del año 2050, escenario A2.

En la tabla 6 se muestran los coeficientes de escurrimiento correspondientes al horizonte de tiempo analizado (escenarios A1B y A2), los cuales se generaron a través de resultados obtenidos de la precipitación.

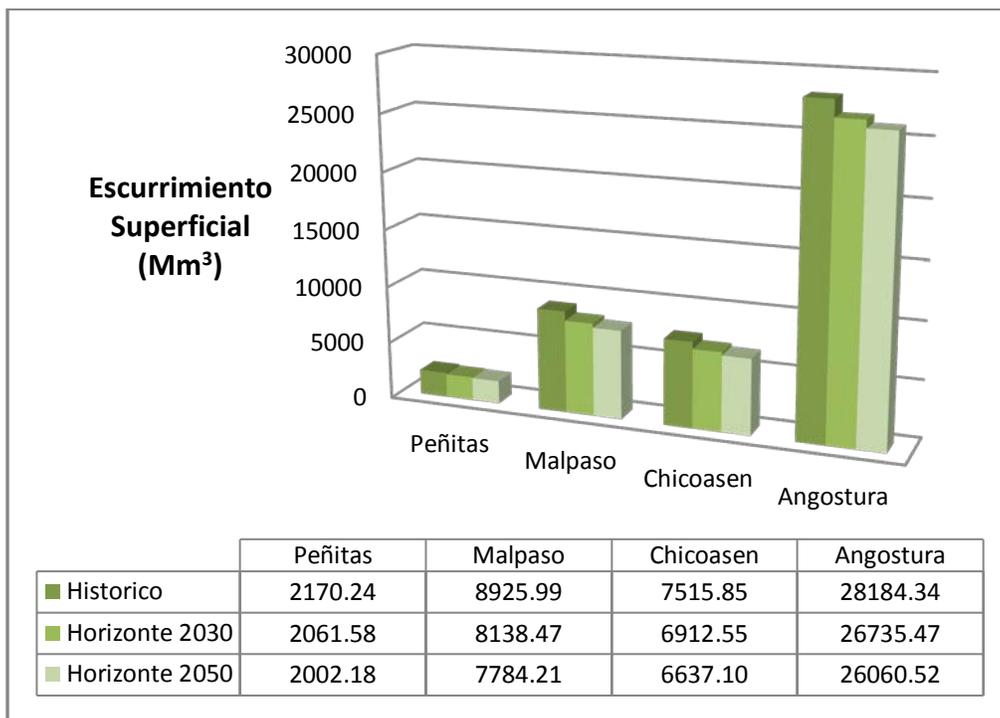
Cuenca	Ce Histórico	Escenario A1B	Escenario A2
		Ce 2050	Ce 2050
Total	0.68	0.66	0.66
Sub-cuencas	Peñitas	0.67	0.65
	Malpaso	0.69	0.66
	Chicoasén	0.71	0.68
	Angostura	0.67	0.65

Tabla 6. Coeficientes de escurrimiento para el año 2050, escenario A1B y A2.

Los escurrimientos que se determinaron con el método planteado en capítulos anteriores, muestran una clara tendencia a la disminución de escurrimientos lo que es más acentuado en la cuencas de las centrales hidroeléctricas de Malpaso y Chicoasén, esto para los escenarios A1B y A2.



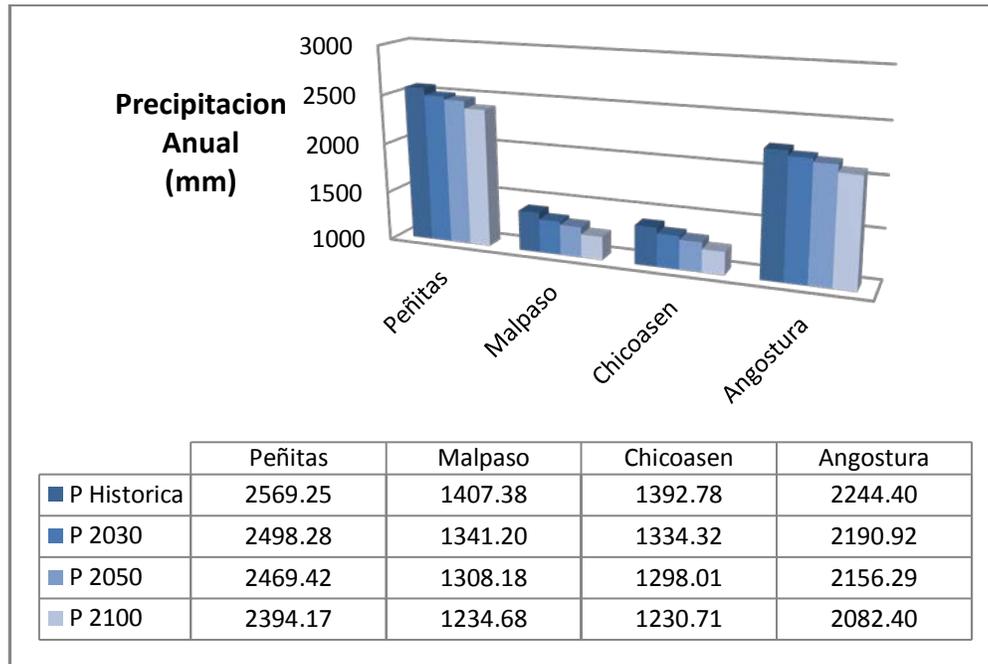
Grafica 7. Ecurrimiento anual del año 2050, escenario A1B.



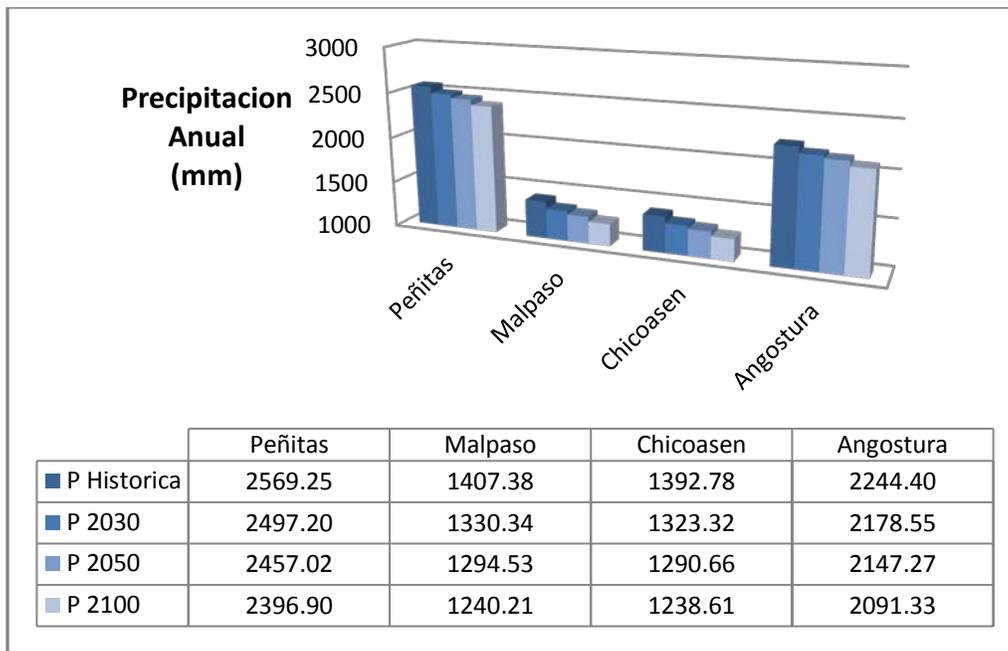
Grafica 8. Ecurrimiento anual del año 2050, escenario A2.

5.1.3 Horizonte 2100

Para este horizonte de tiempo se muestra un decremento aún mayor en la precipitación para todas las subcuencas, en las siguientes graficas se observa dicha disminución en los dos escenarios planteados, pudiendo observarse los tres horizontes de tiempo.



Grafica 9. Precipitación anual del año 2100, escenario A1B.



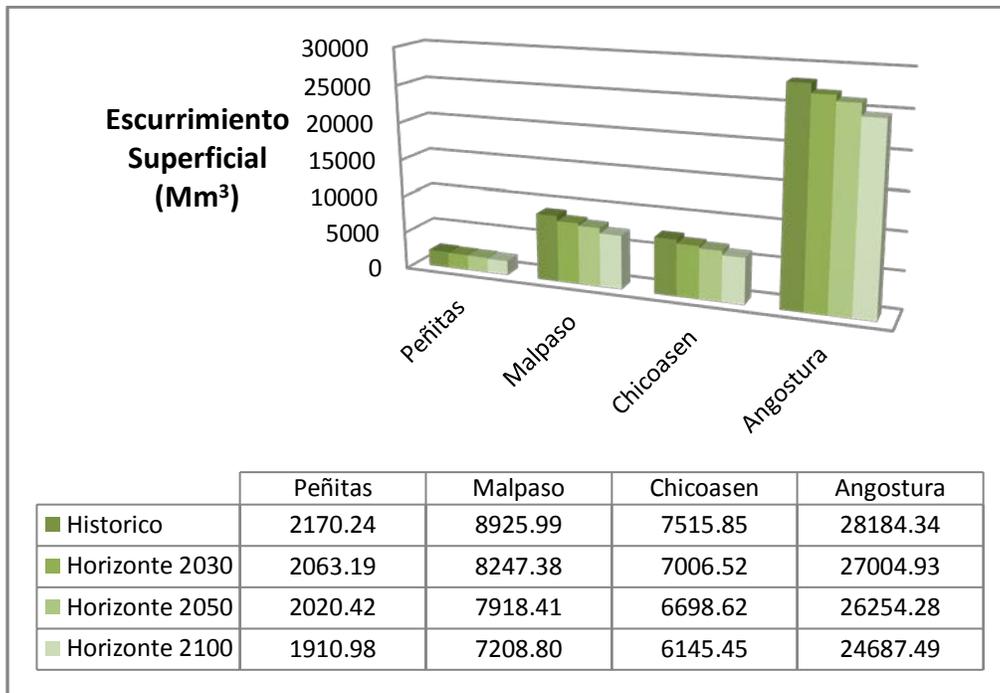
Grafica 10. Precipitación anual del año 2100, escenario A2.

En la tabla 7 se muestran los coeficientes de escurrimiento correspondientes al horizonte de tiempo analizado (escenarios A1B y A2), los cuales se generaron a través de resultados obtenidos de la precipitación.

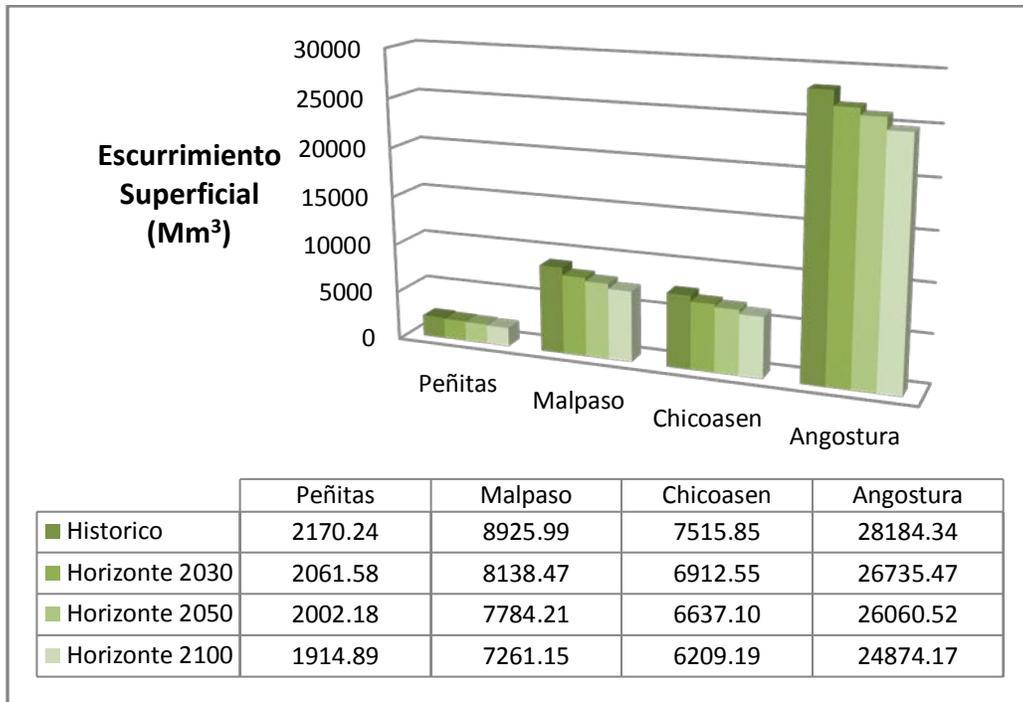
Cuenca		Ce Histórico	Escenario A1B	Escenario A2
			Ce 2100	Ce 2100
Total		0.68	0.64	0.64
Sub-cuencas	Peñitas	0.67	0.63	0.63
	Malpaso	0.69	0.63	0.64
	Chicoasén	0.71	0.66	0.66
	Angostura	0.67	0.63	0.64

Tabla 7. Coeficientes de escurrimiento para el año 2100, escenario A1B y A2.

El cálculo de los escurrimientos muestran que para el horizonte de tiempo del año 2010 al 2100 se tendrá una disminución considerable del escurrimiento en las cuatro cuencas planteadas, como se observa en las Grafica 11 y 12.



Grafica 11. Ecurrimiento anual del año 2100, escenario A1B.



Grafica 12. Ecurrimiento anual del año 2100, escenario A2.

5.2 Índices de Precipitación y escurrimiento.

Los correspondientes Índices de Precipitación se calcularon con la ecuación mostrada en la metodología y se presentan en la Figura 17. Los valores calculados aumentan a medida que se avanza hacia finales del siglo. Sin embargo, los decrementos en precipitación son menores. No existe una diferencia significativa entre los escenarios A1B y A2, sin embargo el Escenario A1B presenta en general valores ligeramente mayores. Para el final de siglo, en ambos modelos, la precipitación en las cuencas de las presas Malpaso y Chicoasén disminuirá entre 11 y 12%.

Cuenca	Escenario A1B			Escenario A2			
	Horizonte 2030	Horizonte 2050	Horizonte 2100	Horizonte 2030	Horizonte 2050	Horizonte 2100	
Total	0.03	0.05	0.09	0.04	0.05	0.08	
Sub-cuencas	Peñitas	0.03	0.04	0.07	0.03	0.04	0.07
	Malpaso	0.05	0.07	0.12	0.05	0.08	0.12
	Chicoasén	0.04	0.07	0.12	0.05	0.07	0.11
	Angostura	0.02	0.04	0.07	0.03	0.04	0.07

Tabla 8. Índices de precipitación para cada horizonte de tiempo.

El cálculo de los IES se hizo con la ecuación mostrada en la metodología, los resultados permiten observar que las centrales hidroeléctricas de Malpaso y Chicoasén presentan los valores más altos. La Figura 18 despliega los IES para los escenarios los escenarios de cambio climático, A1B y A2 respectivamente.

Es de observar que, si bien la precipitación en las cuencas de Malpaso y Chicoasén disminuiría en 11 o 12%, la disminución en el escurrimiento sería mayor, del orden de 19 y 17%, respectivamente, lo que sin duda representaría importantes pérdidas económicas por menor generación de energía.

Cuenca	Escenario A1B			Escenario A2			
	Horizonte 2030	Horizonte 2050	Horizonte 2100	Horizonte 2030	Horizonte 2050	Horizonte 2100	
Total	0.05	0.08	0.15	0.06	0.09	0.14	
Sub-cuencas	Peñitas	0.05	0.07	0.12	0.05	0.08	0.12
	Malpaso	0.08	0.11	0.19	0.09	0.13	0.19
	Chicoasén	0.07	0.11	0.18	0.08	0.12	0.17
	Angostura	0.04	0.07	0.12	0.05	0.08	0.12

Tabla 9. Índices de escurrimiento para cada horizonte de tiempo.

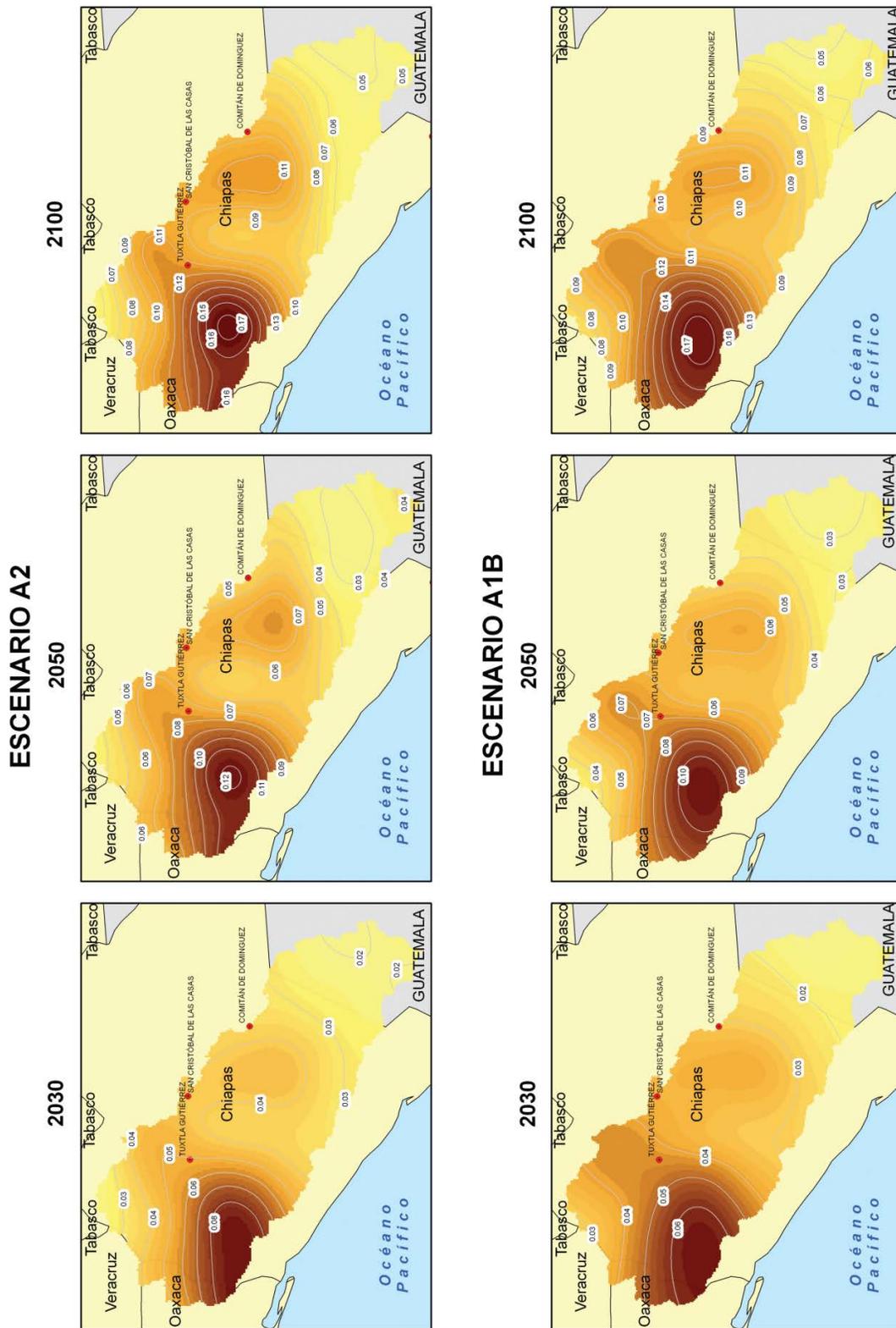


Figura 17. Mapas de índices de precipitación, escenarios A2 y A1B, (Rivas et al., 2010).

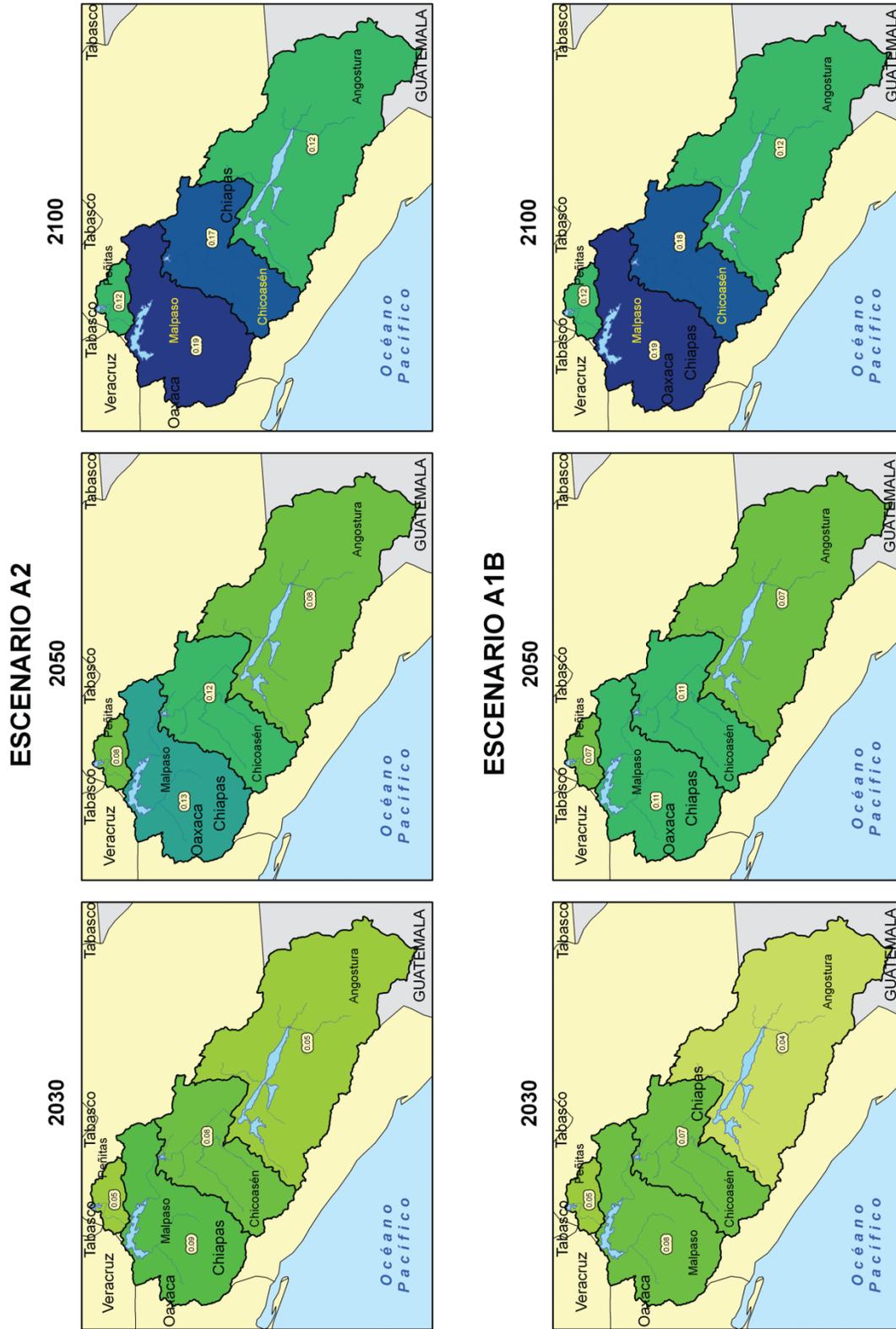


Figura 18. Mapas de índices de escurrimiento, escenarios A2 y A1B, (Rivas et al., 2010).

6 Conclusiones y recomendaciones

La utilización de modelos de circulación general evaluados en el SEDEPECC v.1.0 (desarrollado por el IMTA) estima la precipitación pluvial debida a los efectos del cambio climático, lo que permite cuantificar indirectamente los cambios en el escurrimiento superficial.

El cálculo del escurrimiento se llevó a cabo con la NOM-011-CNA-2000, la cual representa un método práctico para el cálculo de escurrimientos. Con este método se pueden elaborar estudios completos obteniendo la disponibilidad hídrica en la República Mexicana, por lo cual este método se convierte en una herramienta invaluable para la planeación en cuanto el uso del recurso hídrico hacia el futuro.

Los resultados presentados en este estudio marcan una tendencia hacia la disminución del escurrimiento medio anual debido a que la precipitación tiende a decrecer con el tiempo. La precipitación para los escenarios A1B y A2 presenta una disminución del 2 – 17% hasta el año 2100. En cuanto al escurrimiento para dichos escenarios, la disminución esperada será del 4 – 19% hasta el año 2100.

Los resultados hasta el horizonte de tiempo 2100 deben ser tomados con cierta reserva, debido a la resolución de las mallas de los modelos de circulación general de donde fueron obtenidos los valores de la precipitación, sin embargo, la tendencia será muy probablemente la aquí estimada. Cabe mencionar que con los avances de los modelos de circulación general a través de los años se aumentará la resolución y la confiabilidad de las mallas, así como la modelación de los procesos físicos del sistema climático, con lo que se tendrían resultados más exactos para dichos horizontes. Así mismo con el apoyo computacional se podrán incluir factores adicionales en la modelación numérica y hacer una representación más exacta de los efectos del cambio climático en las aguas superficiales y subterráneas de las cuencas de México en los años venideros.

De acuerdo con los resultados mostrados se sabe que a medida que el tiempo trascorra la precipitación y el escurrimiento disminuirán, mientras que la población podría seguir aumentando, lo que incrementaría la demanda del consumo de agua haciendo más vulnerables a diversas zonas del país ante los efectos del cambio climático. La cuenca del Río Grijalva, conforme al panorama en la precipitación y el escurrimiento, será una zona menos vulnerable debido a la abundancia del recurso en la cuenca, sin embargo, son previsibles efectos de importancia en la generación de energía hidroeléctrica.

En el Atlas de vulnerabilidad hídrica de México (IMTA, 2010) se ha impulsado el estudio del fenómeno del cambio climático. En esta publicación se pueden observar investigaciones sobre vulnerabilidad: social, hídrica global (aguas superficiales), agricultura de riego y calidad del agua. Estos temas toman relevancia al darnos una visión hacia las medidas que se pueden adoptar para disminuir la vulnerabilidad en nuestro país de la manera mas adecuada.

Para estudios posteriores en cuanto a los efectos del cambio climático será necesario evaluar no solo la precipitación y el escurrimiento medio anual, si no también eventos extremos de precipitación, caudales de gran magnitud en las principales corrientes del país y con esto poder elaborar mapas de riesgo donde ubiquemos las principales planicies de inundación y plantear diversas estrategias para mitigar los daños debido a inundaciones.

7 Bibliografía

- Aparicio M, F. Javier (2003). Fundamentos de hidrología de superficie. Editorial Limusa. México D. F.
- Campos Aranda, Francisco D. (1998). Procesos del ciclo hidrológico. Universidad de san Luis Potosí. México.
- Comisión Nacional del Agua, CNA (2000). Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000. México, D.F.
- Comisión Nacional del Agua, CNA (2001). Programa Nacional Hidráulico 2001-2006. México.
- Comisión Nacional del Agua, CONAGUA (2010). Geo localizador de las Principales Presas de México. <http://siga.cna.gob.mx/>
- Comité intersecretarial sobre cambio climático (2001). México segunda comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. México.
- Comité intersecretarial sobre cambio climático (1997). México primera comunicación nacional ante la convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático. México.
- Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO) (1988). "Uso de suelo y vegetación de INEGI agrupado por CONABIO". Escala 1:1'000,000. Modificado de: Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) - Instituto Nacional de Ecología (INE), (1996). Uso del suelo y vegetación, escala 1:1'000,000. México.
- Conde, Cecilia (2006). México y el cambio climático global. Dirección general de divulgación de la ciencia, UNAM.
- Gill, Richardson B. (2008) Las grandes sequias mayas. Fondo Cultural de Economía. México D. F.
- Hulme M. y Sheard, N. (1999), Escenarios de Cambio Climático para Mesoamérica, Unidad de Investigación Climática, Universidad de Norwich, Reino Unido, 6pp.

- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2010). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. / coordinadores generales Polioptro F. Martínez Austria y Carlos Patiño Gómez. -- Jiutepec, Morelos.
- Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, IMTA (2009). Subcoordinación de Hidrometeorológica. Sistema para la Exhibición de Datos del Ensamble Ponderado de Escenarios de Cambio Climático para México (SEDEPECC, v 1.0).
- Instituto Nacional de Ecología. México una visión hacia el siglo XXI (2000). el cambio climático en México. UNAM.
- Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, INEGI (2005). II Censo de Población y Vivienda 2005. México y sus municipios.
- IPCC Technical Paper VI (2008). Climate change and water. Intergovernmental Panel on Climate Change. WMO y UNEP. Junio, 2008.
- Martínez A, Polioptro F., et al (2008). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México, volumen II. Editores Polioptro F. Martínez Austria y Ariosto Aguilar Chávez. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Martínez A, Polioptro F. (2007). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Editores Polioptro F. Martínez Austria. Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- Met Office (1999). Climate Change and its impacts. Stabilization of CO2 in the atmosphere. Hadley Center for Climate Prediction and Research. The Met Office. United Kingdom. 27 pp.
- Morales P. R., Magaña V., Barrera C. M., Pérez J. L. (2001). Efectos del calentamiento global en la disponibilidad de los recursos hidráulicos de México. Proyecto HC 0112. IMTA-CNA. México. 151pp.
- Mundo M. Martin D. (1994). El cambio climático y sus efectos potenciales en los recursos hídricos y la agricultura del valle del Yaqui, Sonora, México. Tesis para obtener el grado de maestro en Ingeniería Hidráulica, UNAM.

- Rivas Acosta, I., Güitrón de los Reyes A., Ballinas González H. A (2010). Efectos del cambio climático en los recursos hídricos de México. Volumen III. Atlas de vulnerabilidad hídrica en México ante el cambio climático. Capítulo 4: Vulnerabilidad hídrica global: aguas superficiales. Jiutepec, Morelos.
- Robinson, Peter J. et al. (1999). Contemporary Climatology. Pearson segunda edición. Inglaterra.
- Ruiz de Elvira, A. Cambio climático. Quórum, Revista del pensamiento iberoamericano. Universidad de Alcalá, ISSN 1575-4227, pp. 87-96, España 2007.
- SEMARNAT (2010). Cambio Climático en México http://cambio_climatico.ine.gob.mx/comprendercc/porquydondesomosvul/dondesomosmasvul.html (Junio 21, 2010)
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2009). Programa Especial de Cambio Climático 2009-2012. Diario Oficial de la Federación. Viernes 28 de agosto de 2009.
- SEMARNAT, Subsecretaría de Recursos Naturales (1998). "Mapa de suelos dominantes de la República Mexicana". (Primera aproximación 1996). Escala 1:4'000,000. México.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2009). Atlas del Agua en México, Comisión Nacional del Agua. México, D.F.
- Seoáñez Calvo, Mariano (2002). Tratado de climatología aplicada a la ingeniería ambiental. Análisis climático, uso del análisis climático en los estudios medioambientales. Ediciones Mundi-Prensa. México.
- Vide, Martin (1999). Fundamentos de Climatología Analítica. Editorial Síntesis. Madrid.
- Ven Te Chow, et al. (1999). Hidrología aplicada. Mc Graw Hill. Colombia.