



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**  
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA  
INGENIERÍA AMBIENTAL – AGUA

METODOLOGÍA PARA EVALUAR LA DISPONIBILIDAD DE AGUA Y  
SUS COSTOS BAJO LOS ESCENARIOS DE  
CAMBIO CLIMÁTICO

TESIS  
QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:  
MAESTRA EN INGENIERÍA

PRESENTA:

NIDYA OLIVIA APONTE HERNÁNDEZ

TUTORA PRINCIPAL  
DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS, II  
COMITÉ TUTORAL  
DRA. ANA CECILIA CONDE ÁLVAREZ, CCA  
DR. JESÚS EFRÉN OSPINA NOREÑA, CCA  
DR. GIAN CARLO DELGADO RAMOS, CEIICH  
M.C. VICENTE FUENTES GEA, FI

MÉXICO, D. F. MARZO DE 2013.

**JURADO ASIGNADO:**

Presidente	Dr. Jesús Efrén Ospina Noreña
Secretario	M. en C. Vicente Fuentes Gea
Vocal	Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez
1 <sup>er</sup> suplente	Dr. Gian Carlo Delgado Ramos
2 <sup>do</sup> suplente	Dra. Blanca E. Jiménez Cisneros

Lugar donde se realizó la tesis:

INSTITUTO DE INGENIERÍA

**TUTORA DE TESIS**



**DRA. BLANCA E. JIMÉNEZ CISNEROS.**

## **Dedicatoria**

A mi familia, por todo su apoyo y amor incondicional.

## **Agradecimientos**

A la **Universidad Nacional Autónoma de México** y al **Instituto de Ingeniería** por brindarme la oportunidad de formar parte de la comunidad universitaria y permitir desarrollarme como una profesionalista de calidad.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología** por la beca otorgada para la realización de mi maestría.

A la **Dra. Blanca Jiménez Cisneros** por aceptarme bajo su tutela y brindarme el apoyo para desarrollar mi tesis.

A los integrantes del jurado de examen, **Dra. Ana Cecilia Conde Álvarez, Dr. Jesús Efrén Ospina Noreña, Dr. Gian Carlo Delgado Ramos y M. en C. Vicente Fuentes Gea**, por sus observaciones, comentarios y sugerencias, los cuales enriquecieron este trabajo.

Al Grupo de Tratamiento y Reuso. En especial, a la **M en C. Inés Navarro González** por sus invaluable enseñanzas y apoyo durante el desarrollo de este trabajo. A la **Dra. América Rosales Plascencia** por sus sugerencias y contribuciones; a la **M.en I. María Eugenia Haro González** y a la **M. en C. Catalina Maya Rendón** por su apoyo durante mi estancia en el Instituto.

Al **Ing. Agustín Fernández Eguiarte**, Coordinador de la Unidad de Informática para las Ciencias Atmosféricas y Ambientales (UNIATMOS, UNAM) por proporcionar los datos necesarios para el análisis histórico de variables climatológicas.

A todos **mis amigos**, que han estado conmigo en los mejores momentos.

## Índice

1	Introducción.....	1
2	Antecedentes.....	3
3	Justificación.....	5
3.1	Hipótesis.....	6
3.2	Objetivo General.....	6
3.3	Objetivos específicos.....	6
3.4	Alcances.....	6
4	Fundamentación teórica.....	8
4.1	Ciclo hidrológico.....	8
4.2	Metodologías de disponibilidad de agua.....	12
4.3	Evaporación.....	14
4.4	Evapotranspiración.....	19
4.5	Escenarios de cambio climático.....	28
4.6	Valoración económica del ambiente.....	30
5	Metodología propuesta.....	38
5.1	Balance Hídrico.....	38
5.1.1	Recopilación de información.....	38
5.1.2	Cálculo del balance hídrico superficial.....	40
5.1.2.1	Precipitación.....	40
5.1.2.2	Evaporación en los cuerpos de agua.....	41
5.1.2.3	Evapotranspiración: método de Turc.....	41
5.2	Cálculo de la disponibilidad.....	41
5.3	Proyecciones con cambio climático.....	43
5.4	Valoración económica del agua.....	43
5.5	Diagrama de flujo.....	46
6	Caso de estudio: Sistema Cutzamala.....	48
6.1	Descripción del sitio.....	48
6.2	Aplicación de la metodología.....	57
6.2.1	Recopilación de la información.....	57
6.2.2	Balance hídrico superficial del Sistema Cutzamala.....	59
6.2.3	Disponibilidad de agua en el Sistema Cutzamala.....	63
6.2.4	Proyecciones de cambio climático para el Sistema Cutzamala.....	63
6.2.5	Valoración económica del agua para el Sistema Cutzamala.....	64
6.2.6	Resultados.....	68
7	Discusión.....	78
8	Conclusiones y recomendaciones.....	81
	Referencias.....	84
	Anexo.....	89

## 1 Introducción

Para el Panel Intergubernamental en Cambio Climático, el término cambio climático denota en el estado del clima un cambio identificable en relación con el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades y que persiste durante un período prolongado. Esto puede ser por causa natural o producto de la actividad humana. El uso de combustibles fósiles aumenta la concentración de gases de efecto invernadero alrededor de la tierra, lo que tiene como consecuencia un incremento en la temperatura global alterando los elementos que permiten la vida sobre la Tierra (IPCC, 2007).

Actualmente se cuenta con suficiente información para inferir las implicaciones del cambio climático. De mantener las condiciones que han propiciado hasta ahora el calentamiento global, se tendrán consecuencias graves e irreversibles; no obstante, el tomar medidas tan pronto como sea posible puede aportar beneficios económicos y, desde luego, será mucho menos costoso que afrontar los efectos de un cambio climático incontrolado (Stern, 2006). En este sentido, el análisis de los escenarios futuros del clima y de la vulnerabilidad de los diferentes sistemas y sectores, así como la preparación de medidas de adaptación son esenciales (Ospina *et al.*, 2009); esto deberá entenderse como una inversión, si ésta se realiza acertadamente, los costos relacionados con el cambio climático serán razonables.

La valuación de los costos potenciales del cambio climático es un tema de investigación vigente, con importantes carencias de información, desarrollo de metodologías y herramientas apropiadas (Ackerman, 2008). Los estimados hasta ahora son insuficientes e imprecisos, básicamente debido a que no existe una metodología estandarizada al respecto. Este vacío se hace más evidente cuando se incluyen los impactos en bienes sin mercado como son, por ejemplo, la biodiversidad o los servicios ambientales, cuya estimación de valor económico requiere de métodos más complejos (Galarza y Von Hesse, 2011). Los estudios de economía de la adaptación al cambio climático muestran que el suministro de agua

y el control de las inundaciones están dentro de los tres primeros niveles en costos de adaptación en escenarios tanto húmedos como secos (World Bank, 2010a).

En esta investigación se busca integrar en una metodología los aspectos de disponibilidad de agua y los costos asociados a los posibles efectos que generaría el cambio climático, debido a que se prevé un alto impacto en lo que concierne al agua con repercusiones importantes para la sociedad y los ecosistemas (Bates *et al.*, 2008), lo cual implica que la disponibilidad y calidad de las fuentes de agua se vean afectadas, se incrementen los costos del recurso y surjan conflictos entre los usuarios.

El incorporar los efectos del cambio climático representa un reto para la planeación y gestión de los recursos hídricos. Es necesario que el país invierta en investigación y desarrollo en materia de cambio climático, que se utilicen datos y modelos mexicanos en los procesos de planteamiento de escenarios (Domínguez *et al.*, 2012).

En el siguiente capítulo se plantea la situación del modelado económico de los recursos hídricos, así como los posibles impactos del cambio climático y sus costos asociados. En el capítulo tres se expone una justificación de la tesis y se establecen la hipótesis, el objetivo general y los objetivos específicos, así como los alcances de la investigación. En el cuarto capítulo se da la definición teórica de los elementos que se tomaron en cuenta para la metodología que se propone. En el quinto capítulo se presenta la metodología propuesta, misma que se aplica en el capítulo seis en un caso particular: el Sistema Cutzamala; en el séptimo capítulo se presentan la discusión de los resultados obtenidos y, por último, en el octavo capítulo se dan las conclusiones y recomendaciones derivadas de este trabajo.

## 2 Antecedentes

La disponibilidad de agua es un tema que ha sido ampliamente estudiado; sin embargo, el cambio climático representa nuevos retos en la gestión del recurso y, con el fin de evaluar sus consecuencias y restar incertidumbres, para la toma de decisiones en todos los ámbitos del sector hídrico, a nivel internacional se han propuesto modelos para evaluar la disponibilidad del recurso hídrico considerando los cambios de las variables climáticas. Algunos de estos modelos hidrológicos son de simulación, como el Water Evaluation and Planning System (WEAP) (Yates *et al.*, 2005) y el CalSim II (Draper y Lund, 2004), los cuales no incluyen valoraciones económicas; sin embargo, el modelado de los recursos hídricos ha evolucionado al asociar la disponibilidad y la demanda del recurso a nivel de cuenca (Booker *et al.*, 2012) por medio de los modelos hidroeconómicos. Éstos son una herramienta interdisciplinaria que busca representar la distribución espacial del recurso agua, la infraestructura, las opciones de administración y su valoración económica de una forma integrada (Harou *et al.*, 2009); ejemplos de estos modelos incluyen al Statewide Agricultural Production (SWAP) (Howitt *et al.*, 2001) así como los realizados por Mc Carl *et al.* (1999) y McKinney *et al.* (1999).

En lo que concierne al cambio climático, los estudios de estimación de los costos económicos asociados a éste son relativamente recientes. La mayoría de ellos parte de la construcción de un escenario base y escenarios climáticos futuros desarrollados por el Panel Intergubernamental de Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés). La comparación de los impactos económicos del escenario base con el escenario futuro, representa las consecuencias económicas del cambio climático. Adicionalmente, los costos podrían ser mayores a los estimados ya que se debería tener en cuenta si los sectores tienen un déficit de inversión: el déficit de adaptación (World Bank, 2010b).

Estos estudios presentan algunas limitaciones, como por ejemplo, que los costos se presentan de manera global; no han incorporado a sus estimaciones todos los sectores que pueden verse afectados y no existe una inclusión positiva de los



costos por actividades específicas de adaptación (Stern (2006), Agrawla y Fankhauser (2008), Galindo (2009), Samaniego y Bonilla (2010), World Bank (2009, 2010a, 2010b). Los impactos y las respuestas de adaptación se manifestarán a nivel local y es más fácil definir estas estrategias si los estudios se hacen por sector.

En México, Galindo (2009) estimó las implicaciones económicas del cambio climático para el país, entre sus resultados se encuentra que para el sector agua, calculó un incremento en su costo de 7.59% con una tasa de descuento de 0.5% para el año 2050, el doble del aumento en el costo del sector agrícola y el mayor con respecto de los demás sectores, de acuerdo con sus estimaciones. Ibararán (2007) propuso el método de costos inducidos para determinar cómo afectaría el cambio climático a la disponibilidad del recurso en una cuenca; sin embargo, no presenta estimaciones de trayectorias en precios futuros.

Escolero *et al.* (2009) establecieron indicadores mediante el análisis de factores infraestructurales así como socio-administrativos y los valoraron con un algoritmo simple de análisis multicriterio, con el fin de diagnosticar la vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua de la Ciudad de México y el posible impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso. Concluyeron que la capacidad actual de adaptación frente al cambio climático con respecto a infraestructura, ecosistemas e instituciones es sumamente baja, y que se deben tomar medidas para aumentarla.

Por todo lo anterior, en este trabajo se propone una metodología con el fin de modelar el impacto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico, para ello se requiere de un análisis cuantitativo de una amplia variedad de aspectos hidráulicos, ambientales, técnicos, económicos y sociales. En el siguiente capítulo se presenta la justificación de la propuesta metodológica y se establecen la hipótesis, los objetivos así como los alcances de la tesis.

### **3 Justificación**

En diversas regiones del mundo, y en varias de México, se registran ya condiciones de escasez de agua, que se espera se vean incrementadas aun sin cambio climático por efecto del crecimiento demográfico esperado, la creciente concentración de población urbana, la contaminación de cuerpos de agua y la sobreexplotación de los recursos hídricos, aunado a una pobre cultura en el cuidado y buen uso del recurso hídrico. A este escenario se le deben añadir los efectos del cambio climático, que en México serán, principalmente, de reducción de la disponibilidad natural de agua, lo que en conjunto plantea retos muy grandes para la gestión del agua y su uso sustentable (Martínez-Austria y Patiño-Gómez, 2012). Así mismo, se puede provocar un aumento en su costo con la consecuente afectación en el bienestar de la población.

Por lo anterior, es de suma importancia la realización de estudios que ayuden a la detección y cuantificación de la disponibilidad del agua para uso municipal y los costos asociados al impacto del cambio climático en el sector agua, así como de los beneficios económicos, técnicos, ecológicos y sociales que se deriven de establecer líneas y acciones de adaptación que garanticen la calidad de vida de la población.

El abastecimiento de agua se reconoce como uno de los principales retos que determinará la sustentabilidad de la Ciudad de México, ya que el sistema de abastecimiento muestra señales evidentes de degradación, falta de inversión y reducción de su capacidad. En este sentido, la presente investigación busca evaluar la disponibilidad futura de agua y los costos para el caso del uso municipal bajo diversos escenarios de cambio climático, dado que el 97% del abasto de agua en la ciudad de México es para dicho uso (CONAGUA, 2010b).

### **3.1 Hipótesis**

Es posible proporcionar una herramienta para la toma de decisiones en política pública a través de una metodología que integre la disponibilidad de agua y los costos asociados a los posibles efectos que tendría el cambio climático.

### **3.2 Objetivo General**

Desarrollar una herramienta metodológica para estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua para uso municipal.

### **3.3 Objetivos específicos**

- Seleccionar el modelo de balance hídrico para el análisis de disponibilidad de agua a nivel de cuenca.
- Estimar la demanda futura de agua para escenarios de cambio climático.
- Seleccionar el método para evaluar el costo del agua de acuerdo con la información disponible, el comportamiento nacional y los escenarios de cambio climático.
- Identificar medidas de adaptación para reducir el riesgo de escasez de agua.
- Aplicar la metodología a un caso particular: el Sistema Cutzamala.

### **3.4 Alcances**

- El abastecimiento de agua potable en una cuenca específica, considerando cantidad más no calidad o pérdidas por fugas en los sistemas de suministro.
- El modelo de disponibilidad considera las variables de temperatura y precipitación para el análisis del impacto del cambio climático en el volumen de agua disponible.

- La selección de escenarios de emisiones para los diferentes modelos de circulación general está en función de la respuesta de la herramienta de análisis regional del Pacific Climate Impacts Consortium.
- En la valuación del agua se considera la tarifa como aproximación al costo real del agua potable.
- Los horizontes de proyección son 2030 y 2050.

## **4 Fundamentación teórica**

En este apartado se dan a conocer los aspectos teóricos que se tomaron en cuenta para la realización de esta tesis. En primer lugar, se define la disponibilidad de agua y los componentes que la conforman; posteriormente, se describen brevemente los escenarios de cambio climático y se determina el modelo de valoración económica que se utilizará con el fin de integrar estos elementos en la metodología propuesta.

### **4.1 Ciclo hidrológico**

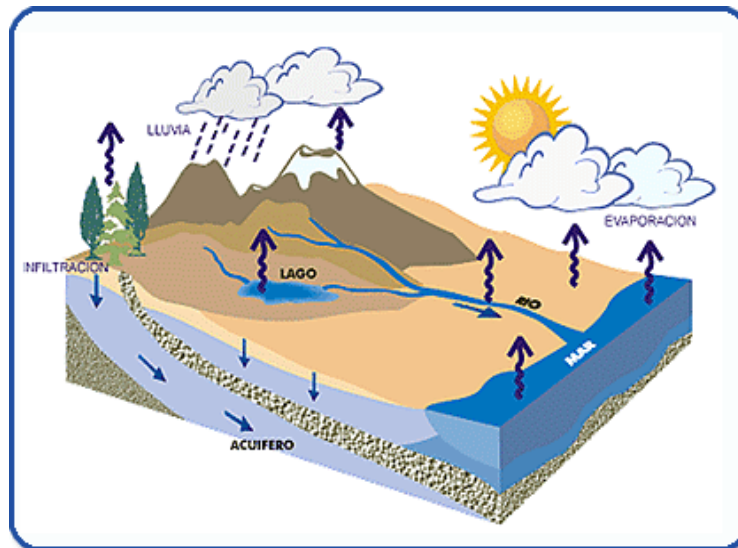
El ciclo del agua o ciclo hidrológico es el proceso mediante el cual se realiza el abastecimiento de agua para las plantas, los animales y el hombre. Su fundamento es que toda gota de agua, en cualquier momento en que se considere, recorre un circuito cerrado (Maderey, 2005).

La atmósfera contiene al agua en forma de vapor y de nube que proviene, casi en su totalidad, del agua evaporada en el mar. Esta humedad se transporta por los diversos sistemas de vientos hacia los continentes, en donde se precipita en forma líquida, sólida o de condensación. Del agua que cae (precipitación), una parte vuelve a la atmósfera bien por evaporación directa o por la transpiración de la vegetación (evapotranspiración); otra parte escurre por la superficie (escorrentía superficial); el resto se infiltra y forma los escurrimientos subsuperficiales, los cuales tienden a incorporarse al sistema de escurrimientos subterráneos, para alimentar a los acuíferos, o simplemente infiltrarse a los mantos freáticos. Finalmente, desde la superficie del mar o las demás superficies líquidas, se da otra etapa de evaporación que cierra el ciclo (véase figura 4.1).

El balance hidrológico de una cuenca proporciona una estimación del agua disponible en cualquier cuenca en donde se realice dicho balance. Puede expresarse de la siguiente manera:

$$\text{BH} = \text{precipitación} + \text{escurrimiento} + \text{infiltración de entrada} \\ - \text{evapotranspiración} - \text{infiltración de salida}$$

en donde las entradas son todas aquellas etapas del ciclo hidrológico que realizan aportaciones del recurso: precipitación, escurrimiento de cuencas ubicadas aguas arriba e infiltración de cuencas vecinas. Y las salidas son todas aquellas etapas del ciclo hidrológico que implican pérdidas de agua: evaporación + transpiración (evapotranspiración), infiltración.



**Figura 4.1** Ciclo hidrológico

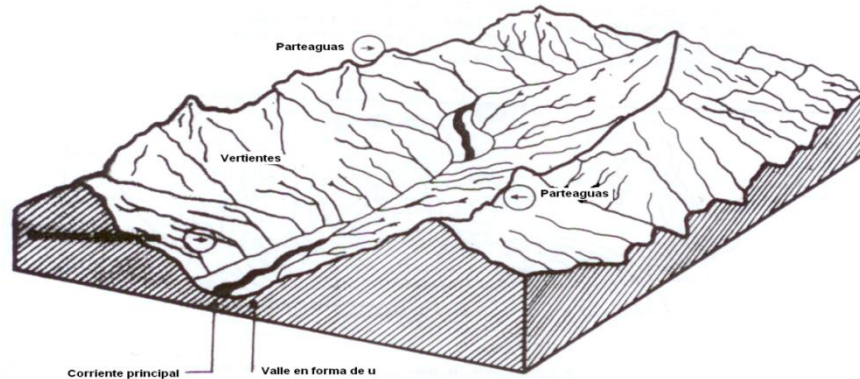
Fuente: Sánchez, A., 1987

Se entiende por cuenca hidrológica a una unidad de territorio delimitada por un parteaguas (línea poligonal formada por los puntos de mayor elevación en la cuenca), en donde el agua se almacena o fluye hasta un punto de salida, a través de una red hidrográfica de cauces que convergen en uno principal. La cuenca hidrológica ésta compuesta por subcuencas y estas últimas están integradas por microcuencas (Ley de Aguas Nacionales, 2009).

La cuenca hidrológica (véase figura 4.2), conjuntamente con los acuíferos, constituye la unidad de gestión de los recursos hídricos; está a su vez integrada por subcuencas y estas últimas, por microcuencas (CONAGUA, 2010a). Las partes físicas más importantes que constituyen a la cuenca son:

- parteaguas: línea poligonal imaginaria formada por los puntos de mayor elevación en una cuenca;
- vertientes: áreas de captación;

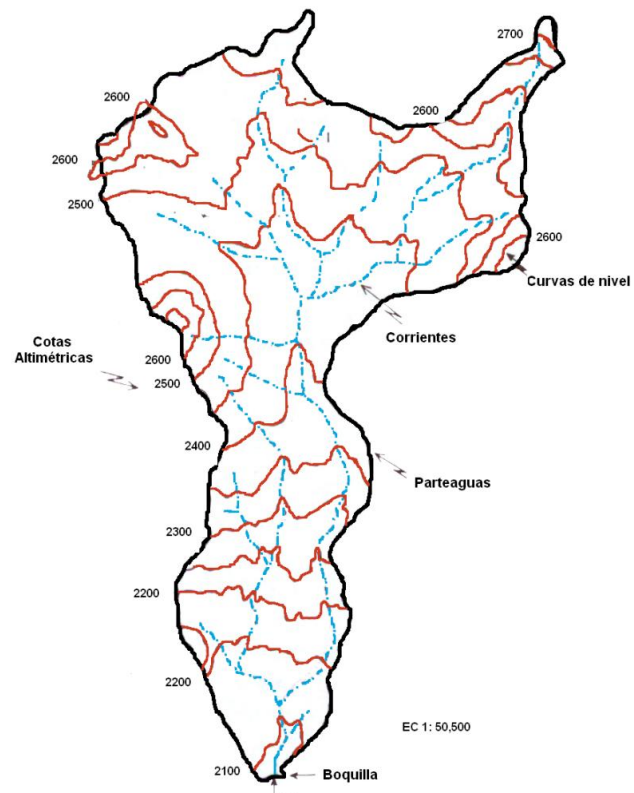
- valle o cuenca baja: zona de menor altitud y donde es común encontrar los cultivos agrícolas y los asentamientos humanos;
- red de avenamiento o drenaje: disposición de los cauces por donde corre el agua excedente de manera superficial.



**Figura 4.2 Cuenca hidrológicas**

Fuente: Sánchez, A., 1987

La figura 4.3 ilustra las partes que componen una cuenca hidrológica. En México existen 314 cuencas hidrológicas, las cuales han sido agrupadas por la Comisión Nacional del Agua en 37 regiones hidrológicas y a su vez, las reúne en 13 regiones de tipo administrativo para facilitar la creación de organismos de cuenca (véase figura 4.4). La agrupación de las cuencas se basa principalmente en rasgos orográficos e hidrográficos, de tal manera que cada región hidrológica se distingue por su tipo de relieve y escurrimientos (CONAGUA, 2000).



**Figura 4.3** Partes que componen una cuenca  
Fuente: Sánchez, A., 1987





Figura 4.4 Regiones hidrológicas administrativas de México

## 4.2 Metodologías de disponibilidad de agua

Para que exista un equilibrio natural en los ecosistemas y se prevenga un impacto ambiental negativo, el ser humano debe aprovechar sólo una fracción de los escurrimientos naturales de agua; sin embargo, en diversas regiones se ha detectado que los volúmenes de agua concesionados superan el escurrimiento y la recarga de acuíferos, situación que genera la escasez del recurso. Considerando lo anterior, en la NOM-011-CNA-2000 (CONAGUA, 2002) se establecen las especificaciones para determinar la disponibilidad de agua con el fin de regular el uso de las aguas nacionales de manera racional y equitativa.

La disponibilidad media anual de agua en una cuenca hidrológica se define como el valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca (o el volumen anual de agua subterránea que puede ser extraído, en su caso), y el volumen anual actual comprometido (ecuación 4.1),

sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas (CONAGUA, 2002); actualmente existe una propuesta de norma mexicana (PROY-NMX-AA-000-SCFI-2011) para establecer el caudal ecológico a nivel de cuenca.

$$Disp = V_{esc} - V_{comp} \dots \dots \dots (4.1)$$

donde

$Disp$  ( $m^3$ ) es la disponibilidad media anual de agua superficial en la cuenca hidrológica;

$V_{esc}$  ( $m^3$ ) es el volumen medio anual de escurrimiento en la salida de la cuenca; y

$V_{comp}$  ( $m^3$ ) es el volumen actual comprometido aguas abajo.

El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca aguas abajo  $V_{esc}$  se calcula mediante un balance hidráulico del sitio de interés. Dicho balance se basa en la aplicación del principio de conservación de masa, también conocido como ecuación de la continuidad, el cual establece que para cualquier volumen arbitrario y durante cualquier período, la diferencia entre las entradas y salidas estará condicionada por la variación del volumen de agua almacenada (UNESCO, 1981). La ecuación del balance hídrico, para cualquier zona, cuenca natural o masa de agua, indica los valores relativos de entrada y salida de flujo y la variación del volumen de agua almacenada. En general, las entradas comprenden la precipitación ( $P$ ) en forma de lluvia o nieve recibida en la superficie del suelo, así como las aguas superficiales y subterráneas recibidas dentro de la cuenca o masa de agua desde fuera ( $Q_{sl}$  y  $Q_{ul}$ ). Las salidas en la ecuación incluyen la evaporación desde la superficie de la masa de agua ( $E$ ) y la salida de corrientes de agua superficial y subterránea desde la cuenca o masa de agua considerada ( $Q_{so}$  y  $Q_{uo}$ ). Cuando las entradas superan a las salidas, el volumen de agua almacenada ( $\Delta V$ ) aumenta y, cuando ocurre lo contrario, disminuye. Todos los componentes del balance hídrico están sujetos a errores de medida o estimación y la ecuación del balance debe incluir, por tanto, un término residual o de diferencia ( $v$ ). El balance hídrico para cualquier masa de agua y cualquier intervalo de tiempo, en su forma más general, se representa con la siguiente ecuación:

$$P+Q_{sl}+Q_{ul}-E-Q_{s0}-Q_{u0}-\Delta V \pm v=0 \dots\dots\dots(4.2)$$

Esta ecuación (ec. 4.2) podrá simplificarse o hacerse más compleja en función de los datos disponibles y las características del sistema, tales como: el objeto del cálculo, el tipo de masa de agua, sus dimensiones, sus características hidrográficas e hidrológicas y la duración del balance.

Si bien es sencillo obtener datos históricos de precipitación, no es así el manejo de los mismos con el objetivo de estimar el volumen disponible asociado a esta fase del ciclo hidrológico. De igual forma, es posible recopilar la información de entradas y salidas de corrientes, son generalmente fáciles de obtener; sin embargo, también el cálculo de la evaporación y la evapotranspiración tiene ciertas dificultades.

### 4.3 Evaporación

La evaporación de agua a la atmósfera ocurre a partir de superficies de agua libre como lagos y ríos, zonas pantanosas, suelo y vegetación húmeda. La cantidad de evaporación depende fundamentalmente de la radiación solar y de la capacidad de la atmósfera para recibir humedad. Los principales factores que controlan la evaporación son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica, el viento, el tamaño de la masa de agua y la salinidad. La evaporación se puede calcular mediante fórmulas empíricas, con un balance energético de la masa de agua o bien aplicando la ecuación de Penman (1948), que es el método más preciso y se presenta a continuación:

$$Ep = \frac{\Delta}{\Delta+\gamma} \cdot \frac{ho-G}{HV} + \left\{ \frac{\gamma}{\Delta+\gamma} \cdot f(V) \cdot [e(a) - e(d)] \right\} \dots\dots\dots(4.3)$$

donde

- Ep* evaporación potencial diaria, mm;
- $\Delta$  pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, kPa/°C;
- $\gamma$  constante psicrométrica, kPa/°C;
- ho* radiación neta, MJ/m<sup>2</sup>;
- G* flujo de calor del suelo, MJ/m<sup>2</sup>;
- HV* calor latente de vaporización, MJ/kg;

- $f(V)$  función de la velocidad del viento, mm/día kPa;
- $e(a)$  presión de vapor de saturación a la temperatura media del aire, kPa;
- $e(d)$  presión de vapor a la temperatura media del aire, kPa.

El calor latente de evaporación y la presión de vapor de saturación se estiman como función de la temperatura:

$$HV = 2.5 - 0.0022T \dots\dots\dots(4.4)$$

$$e(a) = 0.1e^{[54.88-5.03\ln(T+273)-\frac{6791}{T+273}]} \dots\dots\dots(4.5)$$

donde

$T$  temperatura media diaria en °C.

La presión de vapor a la temperatura media del aire se estima como una función del valor de saturación y la humedad relativa  $RH$  expresada como una fracción:

$$e(d) = e(a)RH \dots\dots\dots(4.6)$$

Por otro lado, la pendiente de la curva de presión de vapor de saturación se estima con la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{e(a)}{T+273} \left[ \frac{6971}{(T+273)-5.03} \right] \dots\dots\dots(4.7)$$

La constante psicrométrica se calcula de la siguiente manera:

$$\gamma = 6.6e^{10^{-4}PB} \dots\dots\dots(4.8)$$

donde

$PB$  presión barométrica en kPa.

Esta presión se estima como una función de la elevación usando la siguiente ecuación:

$$PB = 101 - 0.0115Z + 5.44e^{10^{-7}\sqrt{Z}} \dots\dots\dots(4.9)$$

donde

$Z$  elevación del sitio, en m.s.n.m.

La radiación neta se calcula utilizando las relaciones propuestas por Campos (2002), las cuales se describen a continuación:

$$Rn = Ri(1 - r) - Rnl.....(4.10)$$

donde:

- $Rn$  radiación neta;
- $Ri$  radiación incidente;
- $r$  albedo ( $r=0.05$  para grandes masas de agua); y
- $Rnl$  radiación neta de onda larga.

Todas las variables son expresadas en  $\text{cal/cm}^2/\text{día}$ , excepto el albedo, que es adimensional.

La radiación incidente se determina como:

$$Ri = R_E \left( a + b \cdot \frac{n}{N} \right).....(4.11)$$

donde

- $R_E$  radiación en el tope de la atmósfera o extraterrestre,  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{día}$ ;
- $a$  y  $b$  constantes empíricas:  $a = 0.290 \cos \varphi$ ,  $b = 0.550$ ;
- $n$  insolación total promedio diaria, hr; y
- $N$  insolación máxima posible promedio diaria, hr.

$$N = A + B \{ \text{sen}(30nm + 83.5) \}.....(4.12)$$

donde

- $A$  y  $B$  constantes que son función de la latitud del lugar, grados:
- $A = 12.09086 + 0.00266\varphi$ ;  $B = 0.2194 - 0.06988\varphi$  ; y
- $nm$  número del mes (uno para enero y doce para diciembre).

La radiación en el tope de la atmósfera o extraterrestre se calcula como:

$$R_E = b_0 + b_1(\varphi - 10) + b_2(\varphi - 10)(\varphi - 20) + b_3(\varphi - 10)(\varphi - 20)(\varphi - 30)....(4.13)$$

Con la forma anterior se relacionan doce ecuaciones que dependen del mes en cuestión, a continuación se presentan los valores de  $b$  correspondientes a cada mes.

**Tabla 4.1** Valores de b para radiación extraterrestre

Mes	$b_0$	$b_1$	$b_2$	$b_3$
Enero	760	-12	-0.075	0.0016
Febrero	720	-0.10-90	-0.100	0.0008
Marzo	875	-0.125-5	-0.125	0.0000
Abril	895	-0.1250	-0.125	-0.0008
Mayo	890	-0.1004	-0.100	-0.0025
Junio	875	-0.1006	-0.100	-0.0016
Julio	880	-0.1005	-0.100	-0.0000
Agosto	890	-0.1252	-0.125	-0.0008
Septiembre	880	-0.150-2.5	-0.150	0.0008
Octubre	840	-0.075-8	-0.075	-0.0000
Noviembre	780	-0.025-11.5	-0.025	-0.0033
Diciembre	740	-0.075-12.5	-0.075	0.0033

Fuente: UNESCO, 2006

La radiación neta de onda larga se calcula como

$$Rnl = \sigma T_2^4 (0.56 - 0.08\sqrt{e_2}) \left( 0.1 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \dots\dots\dots(4.14)$$

donde

- $T_2$  temperatura del aire a 2 m de altura, K;
- $\sigma$  constante de Boltzmann, igual a  $5.6704 \times 10^{-8} \text{ J/s} \cdot \text{m}^2 \text{ K}^4$ ;
- $e_2$  presión del vapor del aire a 2 m de altura, milibares (mb) y
- $\frac{n}{N}$  insolación relativa.

Los resultados de la radiación neta se obtienen en  $\text{cal/cm}^2 \cdot \text{día}$ , por lo que se tienen que convertir a unidades  $\text{MJ/m}^2$  para sustituirse en la ecuación de Penman; para ello se utiliza la siguiente relación:

$$ho = 0.041868Rn \dots\dots\dots(4.15)$$

El valor de la variable flujo de calor de suelo  $G$  es despreciable, por lo tanto esta variable se considera igual a cero. Finalmente, la función de viento  $f(V)$  se estima con la siguiente relación, donde  $V$  es la velocidad del viento media diaria en m/s a una altura de 10m:

$$f(V) = 2.7 + 1.63V \dots\dots\dots(4.16)$$

Por otro lado, la evaporación de agua a través de las plantas es la transpiración. El agua que absorben las raíces cumple las siguientes funciones: incorporación a su estructura, transporte de alimentos, eliminación de sales y refrigeración. La transpiración está controlada por muchas variables entre las que están:

- los estomas, que son las aberturas de evaporación que tienen las hojas y en función de su tamaño, densidad y localización las diferentes especies vegetales transpiran cantidades distintas de agua;
- la estación del año, que determina si las plantas, según su especie, tienen hojas o no y por cuánto tiempo;
- la hora del día, que altera el balance de la radiación y los ritmos de fotosíntesis y crecimiento de la planta, así como la actividad de los estomas: por la noche la transpiración es del orden del cinco al diez por ciento de la tasa de transpiración diurna;
- el estado de crecimiento de la planta: las plantas consumen mucha más agua en estado de crecimiento activo o periodos de construcción de biomasa;
- los factores meteorológicos: con fuertes vientos, sobre todo si son cálidos, los estomas se cierran como mecanismo para no perder grandes cantidades de agua, por el contrario, en casos de gran humedad ambiental, las plantas pueden seguir eliminando agua incluso en forma líquida para permitir el movimiento de la savia; y
- las propiedades del suelo, que también condicionan la cantidad de agua disponible para la planta. En función de la litología, las plantas son capaces de extraer más o menos cantidad del agua retenida por el suelo.

La evaporación directa a partir el suelo y la transpiración tienen lugar de forma simultánea en la naturaleza y no es fácil distinguir cuánto vapor de agua es producido por cada uno de los dos procesos. Por ello, se usa el término evapotranspiración (*ET*), que engloba el proceso de transferencia de agua a la

atmósfera tanto por acción de las plantas como por evaporación directa a partir del suelo.

La evapotranspiración es una variable clave en el cálculo del balance hídrico superficial; no obstante, su medición directa o su estimación es muy difícil dada la diversidad y complejidad de los factores que intervienen en el proceso; debido a lo anterior existen numerosos métodos para realizar este cálculo.

#### **4.4 Evapotranspiración**

Una gran parte del agua que llega a la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor, ya sea directamente por evaporación, o a través de las plantas, por transpiración. La cantidad de agua que realmente vuelve a la atmósfera por evaporación y transpiración se conoce con el nombre de evapotranspiración real, la cual es la suma de las cantidades de agua evaporadas por el suelo y transpiradas por las plantas durante un período determinado, bajo las condiciones meteorológicas y de humedad de suelo existentes. El principal factor que determina la evapotranspiración real es la humedad del suelo, el cual puede retener agua conforme a la capacidad de retención específica de cada tipo de terreno. La humedad del suelo generalmente se alimenta por la infiltración y constituye una reserva de agua para consumirse por las plantas y la evaporación del suelo. La influencia de estos fenómenos sobre el ciclo hidrológico es muy importante, considerando que en promedio, más del 60% de la precipitación que llega a la tierra es devuelta a la atmósfera por evapotranspiración, alcanzando este porcentaje en algunos lugares hasta el 90%. Por ejemplo, en la siguiente figura se puede apreciar que del total de la precipitación media en la cuenca del Balsas, la evapotranspiración media corresponde al 81.4%.





**Figura 4.5** Ciclo hidrológico en la Región hidrológica administrativa IV Balsas  
Fuente: CONAGUA, 2010

Dado que la evapotranspiración depende, entre otros, de dos factores muy variables y difíciles de medir, tales como el contenido de humedad del suelo y el desarrollo vegetativo de las plantas, Thornthwaite (1948) introdujo el concepto de evapotranspiración potencial *ETP*, la cual se define como la cantidad máxima posible de agua que perdería el suelo suponiendo que el mismo se mantuviera con una capacidad de campo permanente completa (contenido de humedad de un suelo una vez que ha cesado el drenaje natural del mismo por gravedad) y con un desarrollo vegetal óptimo. Sólo en condiciones ideales la evapotranspiración real *ETR* coincide con la *ETP*, en otros casos la real será menor. Al admitir estas condiciones ideales, las investigaciones se han inclinado a correlacionar la evapotranspiración con diversos factores que influyen en ella. Cabe señalar que dicho fenómeno es microclimático y los métodos utilizados serán válidos cuanto más consideren esta cuestión.

Se han desarrollado y publicado una gran variedad de métodos, desde los más sencillos como el de Thornthwaite (1948), hasta otros más complejos como el de Blaney-Criddle (1950); lo que ha derivado en un cierto nivel de confusión, tanto desde el punto de vista hidrológico o agronómico, por la heterogeneidad de

conceptos y supuestos de partida, como por la desconexión entre disponibilidad de datos y la realidad física (Romero y Sánchez, 2005).

La necesidad de obtener al menos órdenes de magnitud aproximados hace aceptar en muchas ocasiones los valores deducidos de fórmulas empíricas que se apoyan en datos meteorológicos fáciles de obtener. Estas fórmulas se usan especialmente cuando se estiman proyecciones futuras, como es el caso de esta tesis.

La evaluación de la evapotranspiración puede ser abordada a través del concepto de la *ETP*; el concepto de la *ETR*, de las aproximaciones que recurren a información obtenida a partir de la tierra como del satélite; y con medidas directas, que adicionalmente sirven para la validación empírica de las estimaciones realizadas con los otros dos métodos.

Thornthwaite (1948) determinó que la *ETP* depende de la temperatura media mensual y halló empíricamente la siguiente expresión:

$$ETP=C \cdot T^a \dots\dots\dots(4.17)$$

donde

- ETP*    evapotranspiración potencial mensual, en mm/mes;
- T*        temperatura media mensual en °C;
- C* y *a*    constantes a determinar, dependen de cada lugar.

Para la determinación de estos últimos dos coeficientes, partió de un índice mensual de temperatura, cuyo valor es:

$$i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \dots\dots\dots(4.18)$$

lo cual permite calcular el índice anual:

$$I = \sum_1^{12} i = \sum_1^{12} \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514} \dots\dots\dots(4.19)$$

Las relaciones de *C* y *a* con este índice *I*, deducidas también empíricamente, son:

$$C = 16 \left(\frac{10T}{I}\right)^a \quad (4.20)$$

$$a = 675 \cdot 10^{-9} \cdot I^3 - 771 \cdot 10^{-7} \cdot I^2 + 179 \cdot 10^{-4} \cdot I + 0.4924 \dots \dots \dots(4.21)$$

La fórmula anterior está calculada para un mes de 30 días y 12 horas de luz diaria, cuando ello no ocurra, deben corregirse los valores calculados mediante el coeficiente:

$$k = \frac{N}{12} \cdot \frac{d}{30} \dots \dots \dots (4.22)$$

donde

*N* es el número máximo de horas de sol para el mes considerado, según la latitud;

*d* el número de días del mes;

sustituyendo,

$$ETP = k \cdot 16 \cdot \left(\frac{10T}{I}\right)^a = \frac{Nd}{12 \cdot 30} \cdot 16 \cdot \left(\frac{10T}{I}\right)^a = \frac{2 \cdot N \cdot d}{45} \left(\frac{10T}{I}\right)^a \dots \dots \dots (4.23)$$

Como resultado de numerosos ensayos efectuados en zonas áridas y semiáridas del oeste de los Estados Unidos, Blaney-Criddle (1950) propusieron una fórmula según la cual la *ETP* mensual, expresada en pulgadas de altura de lámina de agua, es proporcional al producto de la temperatura media mensual en grados Fahrenheit, por el porcentaje mensual de horas anuales de sol para la latitud del lugar (*p*):

$$ETP_{\left[\frac{\text{pulgadas}}{\text{mes}}\right]} = k \cdot \frac{T \cdot p}{100} \dots \dots \dots (4.24)$$

donde

*T* es la temperatura en °F y

*k* es un coeficiente empírico mediante el cual se considera el tipo de vegetación.

Hargreaves y Samani (1982) mejoraron la estimación de la evapotranspiración debido a que involucraron indirectamente:

$$E = 0.0023S_0 \sqrt{\delta_T(T + 17.8)} \dots \dots \dots (4.25)$$

$$S_0 = 15.392d_r (\omega_s \text{sen}\phi \text{sen}\delta + \text{cos}\phi \text{cos}\delta \text{sen}\omega_s) \dots \dots \dots (4.26)$$

$$d = 1 + 0.033 \cos\left(\frac{2\pi}{365} J\right) \dots \dots \dots (4.27)$$

$$\omega_s = \arccos(-\tan\phi \tan\delta) \dots \dots \dots (4.28)$$

donde  $S_0$  es la radiación global incidente al tope de la atmósfera en la ubicación geográfica dada, expresada como altura de agua equivalente en mm/día y calculada en función del ángulo de hora solar  $\omega_s$  (en radianes), la latitud  $\phi$ , la declinación  $\delta$  y la distancia relativa entre la tierra y el sol;  $T$  es la temperatura media en °C, y  $\delta_T$  es la diferencia entre la temperatura mensual máxima media y la temperatura mensual mínima media.

Para hacer una estimación de la *ETR* anual cuando sólo se dispone de datos de precipitación y temperatura se utilizan las fórmulas de Coutagne (1954) y Turc (1963), las cuales se obtuvieron de la correlación de datos de numerosas cuencas de todo el mundo.

Coutagne (1954) propuso la siguiente relación:

$$ET_{real} = P - \lambda P^2 \dots\dots\dots(4.32)$$

donde

$$\lambda = \frac{1}{0.8+0.14T} \dots\dots\dots(4.33)$$

la fórmula sólo es válida para valores de precipitación  $P$  (m/año) comprendidos entre  $1/8 \lambda$  y  $1/2 \lambda$ .

Turc (1963) propuso un método sencillo con base en la temperatura y la precipitación:

$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \dots\dots\dots (4.29)$$

donde

- $P$  precipitación media anual;
- $L$  es función de  $T_m$  que a su vez es función de la temperatura ( $T$ ) y la precipitación ( $P$ ):

$$L = 300 + 25T_m + 0.05T_m^3 \dots\dots\dots(4.30)$$

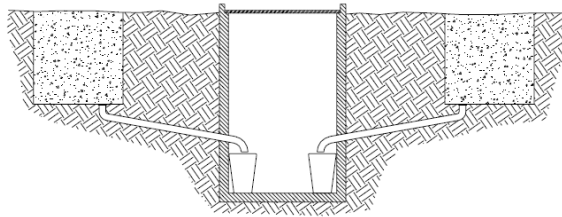
siendo

$$T_m = \frac{\sum_i^{12} T_i P_i}{\sum_i^{12} P_i} \dots\dots\dots(4.31)$$

Resulta fundamental el recurrir a fórmulas que han sido deducidas para condiciones microclimáticas similares a las del lugar al que se pretenden aplicar, por lo que se deben efectuar algunas determinaciones directas, con el fin de establecer

el grado de validez para la aplicación de las diversas fórmulas. Para realizar estas mediciones, se utiliza instrumental específico como el que se describe a continuación:

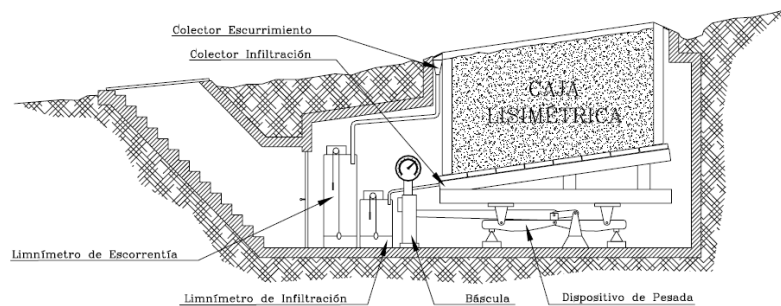
- el evapotranspirómetro (véase figura 4.6) consiste en uno o más depósitos que se excavan en el terreno con el perfil que se desea estudiar. En la superficie se planta el vegetal a considerar. El fondo tiene un tubo colector que recoge las salidas y las conduce a un depósito colector también enterrado y situado a nivel inferior para poder medirlas.



**Figura 4.6** Evapotranspirómetro

Fuente: Segerer y Villodas, 2006

- El lisímetro: es un depósito abierto en su parte superior y relleno del terreno que se quiere estudiar, la superficie del suelo se somete a los agentes atmosféricos y recibe las precipitaciones naturales (véase figura 4.7). El suelo contiene el lisímetro se drena a un nivel determinado y el agua de drenaje se recolecta y mide. Se puede calcular la evapotranspiración si se conocen las precipitaciones en ese periodo de tiempo, el drenaje correspondiente y la variación de la cantidad de agua acumulada en el lisímetro.



**Figura 4.7** Lisímetro

Fuente: Segerer y Villodas, 2006

En resumen, el balance hídrico se realiza de manera local y con base en la información disponible del sitio de estudio. Las pérdidas más importantes corresponden a la evaporación y la evapotranspiración. Es importante mencionar que para realizar las proyecciones futuras, las variables de temperatura y precipitación son fundamentales y, como se mencionó anteriormente, las fórmulas empíricas se emplean para este fin.

Con el objetivo de conocer la aplicación de la ecuación del balance hídrico en diferentes estudios nacionales, se analizaron las consideraciones que se realizaron para determinar de manera precisa cada uno de sus componentes.

En el estudio del Balance hídrico del Valle de México (Lafragua *et al.*, 2003) se toma como plano de referencia la superficie y la ecuación de balance es la siguiente:

$$\Delta V = (P + Ar + Im + Re + B) - (E + ET + Ab + Ex + Uc + f + In) \dots \dots \dots (4.34)$$

donde  $\Delta V$  es el cambio de almacenamiento en la superficie,  $P$  el volumen de lluvia,  $Ar$  el escurrimiento aguas arriba,  $Im$  las importaciones de cuencas externas,  $Re$  los retornos,  $B$  las extracciones por bombeo dentro del subsuelo de la cuenca,  $E$  la evaporación en cuerpos de agua y áreas sin vegetación,  $ET$  la evapotranspiración,  $Ab$  el escurrimiento aguas abajo,  $Ex$  las exportaciones a cuencas externas,  $Uc$  los usos de consumo (superficial y subterráneo),  $f$  la infiltración profunda de las pérdidas en redes de agua potable, e  $In$  la infiltración.

Lafragua *et al.* (2003) proponen como entrada el volumen de lluvia y no utilizan el concepto de escurrimiento virgen o escurrimiento por cuenca propia, asumen que el escurrimiento virgen es igual a la diferencia del volumen de lluvia menos el volumen de la evapotranspiración, de tal forma que se puede ligar mejor el resultado del balance superficial con el balance subterráneo. Los autores obtuvieron la evaporación  $E_v$  del registro de estaciones climatológicas cercanas a los cuerpos de agua y su área correspondiente, a este volumen le agregaron la evaporación en zonas sin vegetación y urbanas, estimada con el método de Turc (1963). En el cálculo de la evapotranspiración  $ET$  se separaron áreas agrícolas y vegetación arbórea, utilizando la fórmula de Blanney-Criddle (1950) para las primeras y la de Turc (1963)

para bosques u otras vegetaciones. Asimismo, para la estimación de la Infiltración por lluvia  $I_n$  tomaron en cuenta el tipo de suelo. Por otro lado, Maderey *et al.* (1995) analizaron las variaciones en la disponibilidad de agua que ocurrirían ante un cambio climático en tres de las cuencas hidrológicas más importantes de México, tanto por su extensión como por el número de habitantes que se asientan en ellas: la cuenca del sistema fluvial Lerma-Chapala-Santiago, la del río Pánuco y la del río Balsas, ubicadas en la parte central del país.

Los autores calcularon el balance hídrico de las cuencas de estudio mediante la aplicación del índice de aridez de la clasificación climática de Köppen (1936), bajo la consideración de que el valor límite entre los climas secos y húmedos determina la lámina de precipitación, e indica si existe déficit o exceso de agua, situación que se manifiesta por el tipo de vegetación existente en la cuenca (véase tabla 4.1).

**Tabla 4.1** Clasificación climática según las condiciones de temperatura y humedad

Grupo	Condiciones de temperatura	Condiciones de humedad
A Cálidos húmedos y subhúmedos	Temperatura media del mes más frío mayor a 18°C	Precipitación anual igual o superior al valor calculado por las siguientes fórmulas: $P=2T+28$ (Lluvias en verano) $P=2T+14$ (Lluvias todo el año) $P=2T$ (Lluvias en invierno)
C Templados húmedos y subhúmedos	Temperatura media del mes más frío entre -3°C y 18°C	Donde: P es la precipitación total anual en cm y T es la temperatura media anual en °C.
B Secos	Temperaturas diversas. Hay climas secos muy cálidos, hasta secos con temperaturas semifrías.	Precipitación anual inferior al valor calculado mediante las fórmulas arriba indicadas.
C Muy fríos	Temperatura media del mes más cálido menor a 6.5°C.	

Fuente: INEGI, 2005.

Esta metodología es aplicable en cuencas de clima húmedo, ya que en las de clima seco el volumen de agua aprovechable depende de sus características estructurales. Así mismo, se aplica bajo el supuesto de que el agua superficial y el agua subterránea generadas en la cuenca, provienen directamente de la precipitación. Para aplicar esta metodología se toman en cuenta las siguientes consideraciones: el volumen máximo ( $V_{max}$ ) de agua de la cuenca es el que entra a través de la precipitación menos el volumen evaporado ( $P-Ev$ ) y el volumen

disponible  $V_{disp}$  es volumen máximo de agua que recibe la cuenca, menos una parte que se evapora y otra que satisface sus necesidades de humedad, es decir, la cantidad de agua que la cuenca cede naturalmente, sin afectar su equilibrio.

$$V_{disp} = (P - Ev) - (r - Er) \dots \dots \dots (4.35)$$

En esta expresión se observa la intervención de dos términos, uno es el balance hídrico  $(P - Ev)$  y otro  $(r - Er)$  que, a la vez que delimita el volumen de agua aprovechable, constituye la reserva de humedad que la cuenca necesita para mantener su paisaje original, y también es equivalente a la diferencia entre el volumen de escurrimiento y el del agua aprovechable.

Maderey *et al.* (1995) calcularon la evaporación total o evapotranspiración ( $ET$ ) con la fórmula de Turc (1963); sin embargo, en virtud de que con el valor resultante no se cumplía el balance hídrico  $P = Q + ET$  (donde  $Q$  es el escurrimiento), aplicaron la relación  $Ep = P - Q$ , con el valor encontrado ( $Ep$ ) obtuvieron un coeficiente de ajuste de la relación entre la evaporación total y la evapotranspiración calculada anteriormente ( $Ep/ET$ ), mismo que emplearon para ajustar la evapotranspiración real del valor mínimo de precipitación ( $r$ ) que debe retener la cuenca como reserva para poder evaluar posteriormente el volumen de agua aprovechable ( $Vp$ ).

Escolero *et al.* (2009) analizaron los impactos de los cambios de temperatura y precipitación en el balance hídrico y la disponibilidad natural de agua para acuíferos y áreas de captación de tres grandes presas de almacenamiento del Sistema Cutzamala. Para ello, calcularon la diferencia en la precipitación entre los escenarios futuros con cambio climático y la base histórica acumulada para la temporada de lluvia (junio-septiembre) y para la temporada de estiaje (octubre-mayo). Adicionalmente, calcularon la diferencia en evapotranspiración real con base en la diferencia de la temperatura media anual usando la fórmula empírica de Coutagne (1954).



#### 4.5 Escenarios de cambio climático

Los escenarios de cambio climático se definen como una representación posible y simplificada del clima futuro, basada en un conjunto de relaciones climatológicas que ha sido construida expresamente para investigar las posibles consecuencias del cambio climático antropogénico (IPCC, 2007).

Para el estudio del clima, los Modelos de Circulación General de Atmósfera y Océano Acoplados representan el recurso más avanzado del que se dispone. Estos modelos son algoritmos matemáticos que intentan simular el sistema climático de la tierra a través de una gran variedad de los procesos que ocurren entre los diversos subsistemas climáticos (atmósfera-oceano y suelo), con base en las leyes fundamentales de la física, en un rango muy amplio de escalas espaciales y temporales. Las expresiones matemáticas que configuran un Modelo de Circulación General se pueden analizar por separado dentro de las tres principales partes de que constan estos modelos: la dinámica del sistema del clima que describe el movimiento a gran escala de las masas de aire y el transporte de la energía; la física del sistema climático tal como transmisión de la radiación a través de la atmósfera, la termodinámica, y la evaporación; y otros factores tales como la interacción océano-atmósfera, topografía, y parámetros de la vegetación; lo anterior, con base en las leyes físicas tales como la conservación de energía y masa así como las relaciones empíricas basadas en características y tendencias observadas.

Los escenarios de cambio climático se generan a partir de proyecciones de variables climáticas futuras resultantes de los Modelos de Circulación General, que se enlazan con las emisiones y concentraciones de los gases de efecto invernadero y de aerosoles (dependientes del desarrollo de las condiciones socioeconómicas). Dichas concentraciones se calculan a partir de escenarios socioeconómicos y ambientales, los cuales han sido documentados por el IPCC en el Reporte Especial de Escenarios de Emisiones (SRES, por sus siglas en inglés, Nakicenovic *et al.*, 2000) y consideran una gama de posibles condiciones del desarrollo global para los próximos cien años (las reservas petroleras y el carbono, permiten suponer en estos

escenarios de emisiones que éstas serán fuente de energía por lo menos para este periodo). Así, cada escenario de emisión representa una alternativa de cómo se podría comportar el clima futuro considerando diferentes suposiciones en cuanto a las variaciones en las emisiones de gases de efecto invernadero, cambio tecnológico y en la población, así como el tipo y grado de desarrollo económico, entre otros.

En el SRES se detallan cuatro líneas evolutivas y familias de escenarios de emisiones: A1, A2, B1 y B2. Los escenarios A describen un mundo futuro con alto crecimiento económico, mientras que en los B ese crecimiento es más moderado. Los escenarios A1 y B1 suponen que habrá una globalización tal que las economías convergerán en su desarrollo. En los A2 y B2, se considera que el desarrollo se dará más a nivel regional. En seguida se describen brevemente las características de cada familia de escenarios.

La línea evolutiva A1 describe un mundo futuro con rápido crecimiento económico, incremento poblacional moderado y una rápida introducción de tecnologías nuevas y más eficientes. Las características más importantes de esta línea son la convergencia entre las regiones y el aumento de las interacciones culturales y sociales, con una reducción substancial en las diferencias regionales del ingreso per cápita. Esta familia se subdivide en grupos que describen direcciones alternativas de cambio tecnológico en el sistema energético:

- A1FI – uso de combustibles fósiles;
- A1B – uso balanceado de todas las fuentes de energía;
- A1T – uso de fuentes de energía no fósil.

La familia A2 describe un mundo heterogéneo, con autosuficiencia y preservación de la identidad local. Los patrones de fertilidad convergen muy lentamente entre las regiones dando como resultado un alto incremento de la población. El desarrollo económico está orientado al crecimiento económico per cápita y el cambio tecnológico es más lento y fragmentado con respecto a otras líneas evolutivas.

El escenario B1 describe un mundo convergente con el mismo crecimiento de la población que en el A1, pero con rápidos cambios en la estructura económica en dirección a los servicios e información, con reducciones en la intensidad material y la introducción de tecnologías limpias y eficientes. Esta línea evolutiva hace hincapié en las soluciones globales para la sostenibilidad económica, social y ambiental.

La línea B2 describe un mundo con énfasis en las soluciones locales para la sostenibilidad económica, social y ambiental, el crecimiento de la población es moderado, tiene niveles intermedios de desarrollo económico y un cambio tecnológico diverso y más lento en comparación con los escenarios A1 y B1. El escenario B2 se orienta la protección ambiental y equidad social a niveles locales y regionales.

Los Modelos de Circulación General no siempre generan resultados para las cuatro familias de escenarios de emisiones, por lo que la selección de las salidas de los modelos se ve acotada por este hecho. Por otro lado, aun con el mismo escenario de emisiones, los distintos modelos simulan diferentes cambios climáticos globales y regionales, razón por la cual, es necesario realizar un análisis de los escenarios de cambio climático que resulten de la utilización de varios modelos con distintos escenarios de emisiones.

Los escenarios de cambio climático están en constante actualización y su uso empieza a generalizarse, ya que proveen un punto de partida para el análisis de un futuro incierto y ayudan a visualizar alternativas en términos concretos; razón por la cual, son una herramienta indispensable para llevar a cabo el análisis y permitir el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación ante el cambio climático.

#### **4.6 Valoración económica del ambiente**

En el entorno de la disciplina económica se ha producido una división conceptual importante entre la economía ambiental y la ecológica. La primera entiende que el ambiente puede regirse por los mismos criterios que el resto de los recursos, insistiendo en la perspectiva del mercado. Por su parte, la economía ecológica opta por un replanteamiento global de la disciplina desde una perspectiva ecosistémica,

en la que predomina la visión ecológica por sobre la propiedad privada y la consideración de múltiples formas de valoración más allá de la crematística.

Esta diferencia es de gran importancia a la hora de plantear el valor del ambiente. La primera de las opciones insiste en la necesidad de integrar los costos ambientales en el entorno del mercado para que, de esa manera, se tomen decisiones eficientes. En este sentido, se adoptan diversas metodologías que pretenden asignar valores económicos a los recursos naturales, a las externalidades negativas de la actividad económica, a las pesquerías, a los bosques, entre otros. No obstante, el abordaje que en general se hace de las externalidades es monocriterial. Cuando se busca incorporar estos costos, la economía ambiental plantea que se resuelvan a través de criterios exclusivamente monetarios (Pengue, 2011). Precisamente, la principal aportación de la economía ambiental es un conjunto de técnicas y procedimientos basados en la teoría económica, para valorar las externalidades en términos monetarios y de esta forma tenerlas en cuenta en la toma de decisiones.

La economía ambiental se fundamenta en una serie de principios e hipótesis que permiten la resolución de las cuestiones relativas a la valoración o evaluación de bienes ambientales. Su planteamiento teórico parte de la valoración de las cosas por parte del hombre en función de la contribución de las mismas a su utilidad o bienestar. Es decir, se parte de una visión antropocéntrica de la realidad.

Además, la economía ambiental se basa en los principios de conmensurabilidad y comparabilidad fuerte de los valores de las cosas. La reducción de todos los valores de cualquier acción, actividad o cosa a una misma unidad de medida, en este caso el dinero (principio de conmensurabilidad), permite comparar escalarmente unos valores con otros (principio de comparabilidad fuerte).

Otro principio de la economía ambiental es el de compensabilidad, según el cual unos valores se pueden compensar con otros. De esta forma, la economía ambiental admite que una actividad produzca una reducción de los recursos naturales si se genera capital artificial (creado por el hombre) de un valor igual o

superior al primero. Así, el concepto de sostenibilidad al que se referiría la economía ambiental sería el de sostenibilidad débil ya que la sostenibilidad fuerte impide la disminución de los recursos naturales.

Idealmente, si se consiguieran valorar monetariamente todas las externalidades de una actividad económica y se agregaran junto con los flujos económicos generados por la misma, se obtendría el Valor Económico Total (VET) de esta actividad. De esta manera, el VET de cualquier sistema, bien, acción o actividad se podría expresar como:

$$\text{VET} = \Sigma \text{ valores económicos o de mercado} + / - \Sigma \text{ valores de las externalidades o de no mercado}$$

El VET de un bien también se puede definir como la cantidad de dinero que los individuos involucrados en el uso o manejo de dicho bien estarían dispuestos a pagar. Se debe tener en cuenta que cualquier bien tiene otros valores para los individuos que directamente disfrutan de los beneficios del mismo además de un valor de uso directo. Así, el VET de un bien también puede ser expresado como la suma de todos estos valores. Los diferentes tipos de valores citados, así como su clasificación son diversos en la literatura; aquí se muestra la descomposición del VET de los bienes ambientales que realiza Pearce (1993):

$$\text{VET} = \text{valor de uso directo} + \text{valor de uso indirecto} \\ + \text{valor de opción} + \text{valor de existencia.}$$

algunos valores son evidentes, se reflejan directa o indirectamente en el mercado y son relativamente sencillos de cuantificar: son los valores de uso. Los de uso indirecto se refieren a los beneficios denominados funcionales, tales como la regulación del clima. En contraste, hay otros valores que no son evidentes o incluso se derivan del simple hecho de la existencia, por ejemplo: los valores de opción se refieren a valores de uso directo o indirecto en el futuro, por lo que en este punto existe la dificultad de predecir los niveles tecnológicos que influirán en el ambiente en los años venideros. El valor de existencia es un valor de no-uso y se refiere al valor intrínseco de las cosas independientemente de su uso actual o alternativo en

el futuro. Si se consiguiera valorar los diferentes componentes del VET en términos monetarios, sería posible comparar el valor que tiene el medio ambiente con el valor que se le asigna a otros aspectos asociados generalmente al desarrollo económico.

Existen diversos métodos y técnicas de valoración (EDIEN, 1995; OECD, 1994; Dixon, 1994; Reveret *et al.*, 1983; Dixon *et al.*, 1988; Hufschmidt *et al.*, 1983) que generalmente se clasifican según el concepto de valor adoptado, los algoritmos de solución usados y el grado de disponibilidad de la información requerida (véase tabla 4.2).

Aunque a nivel teórico está claro el concepto de VET, generalmente los agentes económicos no toman en cuenta el impacto que ocasionan sus decisiones sobre el ambiente; condición necesaria para alcanzar un desarrollo económico sostenible. Existe una dificultad para obtener información sobre las consecuencias ambientales de las elecciones de aquellos que toman las decisiones, así como la falta de señales económicas que indiquen dicho costo. De esta manera, el precio que se paga por bienes y servicios no incluye el costo o el daño ambiental asociado con su producción, uso o consumo.

Ante esta complejidad de los problemas a resolver y la cantidad de conflictos e intereses involucrados en una resolución racional de los mismos, la economía ambiental suele optar por simplificar la realidad, centrándose en algunas partes de ella y dejando de lado otras, y por reducir todos los valores de los bienes o actuaciones a términos monetarios, con lo cual es posible compararlos todos y comprobar si los valores positivos compensan a los negativos, con el fin de detectar desde dicha visión constreñida, la solución óptima.

La economía ecológica propone, en cambio, una forma distinta de abordar estos temas y, a veces, incluso contraria a la economía ambiental.

**Tabla 4.2 Métodos de valoración de los activos ambientales**

Métodos de valoración económica			
Valoración directa	Valores directos de mercado	Cambio en la productividad	Los cambios en la producción o en la productividad se valoran usando precios económicos normales o corregidos en caso de distorsiones.
		Pérdidas de ganancia	Se valoran los cambios en la productividad humana resultantes de efectos negativos en la salud por contaminación o degradación ambiental o cambios en la disponibilidad de los recursos naturales.
		Costo de oportunidad	Se basa en la idea de que los costos de usar un recurso para propósitos que no tienen precios en el mercado o no son comercializados pueden ser estimados usando el ingreso perdido por no usar el recurso en otros usos.
	Valores directos de gastos	Costo – efectividad	Intenta estimar el costo de la protección ambiental en términos del costo de formas alternativas de lograr un determinado objetivo, como estándares de calidad.
		Gastos defensivos o preventivos	Se estima el valor de un daño ambiental a través de los gastos efectivos realizados para prevenir o mitigar efectos ambientales indeseables.
	Valoración indirecta	Valores sustitutos de mercado	Precios hedónicos
Diferencial de salarios			Estimar el diferencial de salario requerido para aceptar un trabajo bajo condiciones ambientales distintas a las habituales.
Costo de viaje			Estimación de los costos involucrados en el uso de un bien sin precio en los mercados.
Valores de gasto potencial		Costo de reposición	Medición de los costos potenciales del daño de la contaminación medidos por estimadores ingenieriles o contables ante los costos de reposición de un activo físico natural.
		Costo de relocalización	Costos estimados necesarios para reubicar un recurso natural, comunidad o activo físico debido a daños ambientales.
		Proyectos o precios sombra	Costos de reponer servicios ambientales perdidos por un daño ambiental.
Valoración contingente	Mercados contruidos	Juegos de licitación	Aproximación para estimar la disposición a pagar por un bien ambiental. Creación hipotética de un mercado sustentada en los conceptos de variaciones compensada y equivalente.
		Tómalo o déjalo	Estimar la disponibilidad a pagar por un bien ambiental, con base en la teoría de preferencias reveladas y la demanda del todo o nada.
		Juegos de intercambio	Aproximación a las preferencias de los consumidores. Se presentan al consumidor potencial, paquetes de bienes en los que se incluyen sumas de dinero y niveles de recursos ambientales.
		Elección de menor costo	Se intenta medir la valoración implícita de los bienes ambientales.
		Técnica Delphi	Proceso iterativo de retroalimentación entre expertos, quienes responden con una óptica social respecto al valor de un bien o servicio de los recursos naturales.
Otros		Programación lineal	Programación matemática para integrar los diferentes componentes del valor en una función objetivo y poder incorporar los diferentes factores exógenos bajo un esquema de optimización.
		Coeficientes integrales	

Fuente: Elaboración propia con información de Dixon, 1988 y Reveted, 1990

Según Martínez-Alier (1999), la economía ecológica, tal y como se mencionó, no recurre a una escala de valores única expresada en un solo numerario; por el contrario, abarca la economía convencional neoclásica de los recursos y el medio ambiente y va más allá, al incorporar la evaluación física de los impactos ambientales de la economía humana, entendida esta última como la disciplina encargada del estudio de los flujos de energía y materiales entre ecosistemas en los que está presente el hombre.

Al contrario que en el caso de la economía ambiental, cuyo cuerpo teórico está bien definido, aunque puede ser discutible y más o menos factible de implementar en la realidad, la economía ecológica es una disciplina bajo la cual se conjuntan múltiples teorías y metodologías no necesariamente unificadas. Precisamente, justo una de las fortalezas de la economía ecológica es el enfoque pluralista de la realidad y de los problemas de los que se ocupa.

En teoría, para la economía ecológica, el valor de las cosas no tiene por qué ser únicamente antropocéntrico. Un principio ampliamente aceptado en la economía ecológica es el de inconmensurabilidad, que se refiere al hecho de que los valores de las cosas no siempre pueden reducirse a una unidad de medida común (en la economía ambiental esta unidad es el dinero), ya que las externalidades ecológicas no tienen ningún valor monetario ni deben, según este enfoque, ser reducidas a unidades monetarias ni a ninguna otra unidad común. Que dos valores no puedan reducirse a una unidad de medida común no significa que no puedan ser comparados. En el caso de la economía ecológica se puede hablar de un principio de comparabilidad débil, que consiste en la posibilidad de comparar dos valores mediante técnicas que no están basadas en relaciones numéricas de escala.

Otro principio fundamental de la economía ecológica es el de no compensabilidad, que se refiere a la imposibilidad de compensar los valores negativos de una actuación económica con otros positivos de la misma. En concreto, este principio, al aplicarlo a los bienes ambientales, la imposibilidad de compensar la pérdida de recursos naturales con capital artificial y, por tanto, a la necesidad de



mantener los recursos naturales. De este modo, se puede decir que la economía ecológica tiende a defender el principio de sostenibilidad fuerte.

En esta perspectiva, la interacción con otras disciplinas científicas es indispensable y, aparte de las cantidades en términos económicos, tienen cabida las variables físicas, ecológicas y sociales. La economía ecológica es claramente una opción para el futuro, que a corto plazo se enfrenta a los problemas de falta de sensibilidad de una gran parte de la sociedad, para ella, la alternativa no sería elegir entre crecimiento económico y el aumento de contaminación, sino entre crecimiento económico y la posible modificación del equilibrio climático que traería consigo una crisis ambiental, humana y, por extensión, económica. Esta complejidad impide la construcción de modelos simplificados de la realidad, si no se quiere perder información importante sobre la misma.

Según Munda (2000), cualquier problema de decisión social se caracteriza por conflictos entre valores e intereses que compiten y diferentes grupos y comunidades que los representan. Dentro de la economía ecológica, un enfoque que está adquiriendo un desarrollo importante es el inspirado en la Teoría de la Decisión Multicriterio (TDM). El enfoque multicriterio pretende buscar un equilibrio o compromiso entre un conjunto de objetivos en conflicto, o bien, satisfacer en la medida de lo posible una serie de metas asociadas a dichos objetivos.

Las técnicas para la TDM se suelen clasificar en función de la naturaleza continua o discreta de las alternativas que se pretende evaluar. Entre las técnicas de decisión multicriterio discretas, que son las más frecuentes en la resolución de problemas ambientales, las más utilizadas según Moreno, Aguarón y Escobar (2001) y Moreno Jiménez (1998), son la Teoría de la utilidad multiatributo (MultiAttribute Utility Theory, MAUT), de Keeney y Raiffa (1976); el Proceso analítico jerárquico de Saaty (1977 y 1980) y los Métodos de superación. Dentro de estos últimos destacan los métodos: ELimination Et Choix Traduisant la REalité (ELECTRE) de Roy (1968); Preference Ranking Organization Method for Enrichment Evaluation (PROMETHEE)

de Brans, Mareschal y Vincke (1986) y Novel Approach to Imprecise Assessment and Decision Environments (NAIADE) de Munda (1995).

En el presente trabajo se utiliza el método NAIADe para realizar la evaluación debido a sus requerimientos, facilidad de uso, número de parámetros para estimar, alternativas, criterios, tiempo y recursos necesarios (Heracles *et al.*, 2006). Idealmente, la información que se posea debe ser precisa, cierta, exhaustiva e inequívoca, pero existe incertidumbre en cuanto a la variedad de esta información y en la práctica, hay que utilizar con frecuencia información carente de tales condiciones.

El punto de partida es la creación de una matriz de alternativas/criterios (matriz de impacto). Para ello, primero hay que colocar los valores asociados a cada criterio de acuerdo a cada alternativa, este valor se puede asignar en forma de un número o dar una cantidad definida afectada por diferentes niveles y tipos de incertidumbre. En este caso las alternativas serán años de comparación, mientras que los criterios de evaluación serán categorías que se identifican a través de una investigación del estado del arte. El resultado esperado no se basa solamente en saber en qué escenario tendría mejor desempeño el agua en relación a la disponibilidad, sino en un análisis desagregado para identificar la evolución por separado de cada componente incluido en el estudio, dentro de un marco conceptual definido.

El NAIADe tiene la capacidad de comparar alternativas con base en un sistema de criterios de distinto origen (económicos, ecológicos, etc.) y expresión (discreta, difusa, lingüística) afectados por la incertidumbre, manteniendo una visión socio-ecológica para lograr un acuerdo respecto a la solución probable de problemas fundamentales del tipo tecnológico, social, político, ecológico o económico (Marozzi, 2004).

En este apartado se describieron los fundamentos teóricos para desarrollar la propuesta metodológica de este trabajo, la cual se describe en el siguiente capítulo.

## **5 Metodología propuesta**

En este capítulo se describe la metodología propuesta en este trabajo, considerando criterios que atienden necesidades de la proyección de resultados bajo escenarios de cambio climático, así como la accesibilidad de la información necesaria para su aplicación. Esto último, debido a que se reconocen las dificultades de obtener información de calidad en materia de agua en nuestro país (Aboites *et al.*, 2008).

La disponibilidad de agua, la valoración económica del recurso y los posibles impactos asociados del cambio climático se describieron a grandes rasgos en el capítulo anterior y convergen a continuación en la metodología propuesta.

### **5.1 Balance Hídrico**

Como se mencionó anteriormente, el balance hídrico se realiza de manera local y con base en los datos disponibles del sitio de estudio, por lo que el primer paso para llevar a cabo esta metodología es la recopilación de la información.

#### **5.1.1 Recopilación de información**

Uno de los principales problemas para realizar un balance hídrico es, sin duda, la escasa información de que se dispone, ya que sólo en importantes zonas de desarrollo, la red de estaciones climatológicas e hidrométricas es lo suficientemente densa para estimar confiablemente las variables básicas de la ecuación del balance. También se observa el mismo fenómeno en la medición del agua. Por lo anterior, la calidad de la información influye directamente en el resultado del balance. Es esencial identificar y delimitar la cuenca de estudio, en primer lugar, se requiere información básica como la localización geográfica de la zona de estudio, corrientes naturales, manantiales, principales cuerpos de agua, límites municipales, vías terrestres, poblaciones, entre otros, todo esto con el fin de elaborar un plano base en el cual se delimitan las cuencas de estudio. Posteriormente, se integra una base de datos de las estaciones climatológicas e hidrométricas cuyas mediciones tienen

influencia dentro de la zona de estudio, con sus respectivas variables climatológicas diarias, temperatura, precipitación, evaporación y gastos medios. Una vez obtenida la base de datos, se estiman los valores mensuales y anuales de precipitación y temperatura para un periodo mínimo de 25 años. En caso necesario se aplican técnicas para la extensión y complemento de registros.

Para la selección de estaciones climatológicas el procedimiento (UNESCO, 2006) es el siguiente:

- se ubican todas las estaciones climatológicas dentro y en el entorno cercano de la cuenca;
- se descartan las estaciones climatológicas que no tienen influencia en la cuenca, dicha influencia se determina con el método de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1992);
- se eliminan las estaciones climatológicas que no cumplen con un período de registro común de por lo menos 25 años. Sin embargo, el rango puede ser menor si existen pocas estaciones en la zona de estudio; y,
- finalmente, se discriminan las estaciones que presentan alguna inconsistencia en cuanto a su información.

Al analizar la información media mensual o anual de precipitación y temperatura; y comparar el valor de los datos de una estación con los de las estaciones adyacentes, se llegan a encontrar diferencias que hacen pensar en la posibilidad de una mala medición o de errores en la captura de los registros. Esos errores se pueden encontrar con análisis estadísticos. Por lo que se debe revisar la información que presenta discrepancias, con el fin de corregirla y evitar resultados erróneos. Incluso es posible eliminar estaciones.

Se solicita la información de batimetría de los principales cuerpos de agua superficiales a las instancias correspondientes, así como el volumen mensual de extracción de agua para cada tipo de uso.

### 5.1.2 Cálculo del balance hídrico superficial

En este apartado se hace una breve descripción de la estimación de los elementos principales del balance hídrico superficial (precipitación, evaporación y evapotranspiración), en función de su importancia y de la accesibilidad de la información necesaria para determinarlos.

#### 5.1.2.1 Precipitación

La precipitación es la fase del ciclo hidrológico que da origen a todas las corrientes superficiales y profundas, debido a lo cual su evaluación y el conocimiento de su distribución, tanto en el tiempo como en el espacio, son problemas básicos en hidrología (Maderey, 2005). Por ello, para cuantificar el volumen de lluvia en la cuenca, se utiliza el método de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1992). Este método consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas y consiste en lo siguiente:

- se unen las estaciones formando triángulos;
- se trazan las mediatrices de los lados de los triángulos formando polígonos, cada uno de ellos es el área de influencia de una estación;
- se calculan las áreas  $a_1, a_2, a_3, \dots, a_n$  de los polígonos;
- si  $p_1, p_2, \dots, p_n$  son las correspondientes precipitaciones mensuales, entonces

$$p = \frac{p_1 a_1 + p_2 a_2 + \dots + p_n a_n}{a_1 + a_2 + \dots + a_n} \quad (5.1)$$

donde  $p$  es la precipitación media mensual en la cuenca. Al dividir el área parcial del polígono entre el área total de la cuenca se obtiene el factor de ponderación que multiplicado por la lámina de lluvia registrada en la estación correspondiente, se obtiene el cálculo de aportación de cada estación climatológica.

### 5.1.2.2 Evaporación en los cuerpos de agua

La evaporación de los cuerpos de agua como embalses y lagos es uno de los componentes de la ecuación de balance. Para obtener los volúmenes evaporados durante cada mes del año en los cuerpos de agua, se identifican los más importantes, a cada uno se le asocia una estación climatológica cercana que cuente con registros de evaporación y se multiplican por su área.

Si se cuenta con registros climatológicos diarios de humedad relativa, velocidad del viento, radiación solar, así como temperatura media, se recomienda utilizar la fórmula de Penman (1948), descrita en apartado 4.2.

### 5.1.2.3 Evapotranspiración: método de Turc

En el resto del área de la cuenca se calcula la evapotranspiración con la fórmula de Turc (1963), ya que para fines de una evaluación de cambio climático es el método ideal, debido a que considera las variables de temperatura y precipitación, las cuales se proyectan en los modelos de cambio climático.

## 5.2 Cálculo de la disponibilidad

En primer lugar se determina el volumen de agua disponible  $V_{disp}$  con base en los datos históricos de precipitación, temperatura y evaporación de las estaciones climatológicas e hidrométricas ubicadas en la zona, con un intervalo de tiempo mensual, como lo hacen Escolero *et al.* (2009), lo cual permite calcular de una manera más precisa las variaciones temporales de los componentes de la ecuación.

El análisis del balance hídrico del volumen disponible se realiza por subcuenca, como proponen Lafragua *et al.* (2003) en su estudio; como entrada se considera el volumen de lluvia y en los componentes de salida se incluyen los volúmenes de evapotranspiración y evaporación.

El modelo a utilizar es el siguiente:

$$V_{disp} = A_s P - A_c Ev - (A_s - A_c) ET \dots \dots \dots (5.2)$$

donde  $A_s$  es el área de la subcuenca de estudio y  $A_c$  el área de los grandes cuerpos de agua en la subcuenca. Los datos de temperatura, precipitación y evaporación se obtendrán del registro histórico de las estaciones climatológicas correspondientes a las subcuencas de estudio y la evapotranspiración se calculará con la fórmula de Turc (1963).

La estimación de consumos unitarios se realiza en función de la población servida. El uso doméstico incluye no sólo el agua utilizada en los hogares, sino también el agua propia de la actividad municipal, la de los usos colectivos y la de comercios. Este uso se estima mediante dotaciones, lo que significa que el valor que se obtiene corresponde a una demanda de la cantidad de agua necesaria para una actividad. En la tabla siguiente se muestran las dotaciones para la estimación de los volúmenes del uso doméstico en función de la población y el clima.

**Tabla 5.1** Dotaciones de agua en función de la población y el clima

Número de habitantes	Dotaciones en litros /habitante·día		
	Clima cálido	Clima templado	Clima frío
2500 o menos	125	100	75
2500 a 15000	175	150	125
15000 a 30000	200	175	150

Fuente: UNESCO, 2006

Con el cálculo de la disponibilidad del agua asociado a una cuenca y la estimación de la demanda, es posible determinar los índices de disponibilidad per cápita y el índice de uso de agua.

Para la proyección del crecimiento de la población se utilizan las proyecciones elaboradas por CONAPO (2011) para el periodo 2005-2030, y para extenderlas al 2050 se realiza una interpolación.

Con base en lo anterior, se construye la línea base del modelo de disponibilidad, para después realizar las proyecciones bajo escenarios de cambio climático y la valoración económica.

### **5.3 Proyecciones con cambio climático**

El enfoque de las proyecciones, involucra la comparación de un mundo futuro sin cambio climático con un mundo futuro afectado por las variaciones implícitas al cambio climático. La diferencia entre el análisis de estos dos escenarios, representa las consecuencias del cambio climático. La disponibilidad y la valoración económica del agua, se estimarán bajo distintos escenarios reconociendo un escenario actual o reciente y uno base, el cual considera el comportamiento histórico de las variables en la zona de estudio y se analizará el impacto del cambio climático en el recurso, derivado de los cambios promedios probables en la temperatura y precipitación.

Como se mencionó en el capítulo anterior, los Modelos de Circulación General no siempre generan resultados para las cuatro familias de escenarios de emisiones y la selección de las salidas de los modelos se ve acotada por esta misma razón. Los modelos que se seleccionaron son el GFDL, del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory, el ECHAM, del European Center for Medium Range Weather Forecast y el HADGEM, del Met Office Hadley Center, por ser los que mejor han representado el clima en nuestro país. Así mismo, se sugiere el uso de la herramienta análisis regional del Pacific Climate Impacts Consortium (PCIC) para bajar la escala de los modelos (Conde y Gay, 2008). Dicha herramienta generará datos de variaciones, entre otras, de temperatura y precipitación, para diferentes horizontes y escenarios. Se seleccionarán los escenarios que arroje la herramienta del PCIC tales que proporcionen resultados que enriquezcan el análisis de las proyecciones futuras.

### **5.4 Valoración económica del agua**

El modelado económico de los recursos hídricos ha evolucionado del modelado individual del sector, al modelado integrado de disponibilidad y demanda del recurso a nivel de cuenca (Booker *et al.*, 2012), por medio de los modelos hidroeconómicos, los cuales son una herramienta interdisciplinaria que busca



representar la distribución espacial del recurso agua, su infraestructura, opciones de administración y valoración económica de una forma integrada (Harou *et al.*, 2009), con la cual se fundamenten las políticas públicas con el fin de lograr una mejor gestión del recurso; sin embargo, el conocimiento y los esfuerzos de investigación con los que se cuenta actualmente son insuficientes, en particular cuando se les compara con la dimensión del problema que representa el cambio climático (Tol, 2009).

Los estudios de valoración se utilizan para la toma de decisiones acerca de inversiones de obras para captación y distribución; incremento de la disponibilidad y calidad; evaluación de políticas relativas al sector; así como para el establecimiento de tarifas, asignación y reorganización del recurso. En este caso, se desea incorporar en la metodología propuesta una valoración del agua que se aproxime al valor económico total del recurso en mayor medida que las valuaciones tradicionales, es decir, se busca proponer un modelo hidroeconómico. Tradicionalmente, la ingeniería evalúa los costos de construcción, operación y mantenimiento del suministro del recurso hídrico; el transporte, almacenamiento, desalojo así como la infraestructura del tratamiento de agua; sin embargo, se necesita una visión más amplia para enfrentar los problemas de escasez. En este sentido, estimar el costo del agua puede servir como una aproximación, probablemente de orden inferior al valor del agua. Un uso sustentable del agua debe buscar equiparar el costo total con el valor total.

Para llegar al valor económico total, en esta propuesta se seleccionó el método de Costo de oportunidad, el cual toma en cuenta los costos en que se incurriría si se desea evitar el deterioro o restablecer las cualidades del recurso. En este trabajo se asumen tres tipos de valor (categorías) para la gestión del agua como recurso natural: el económico, el ambiental y el social. El primero es el flujo monetario que beneficia a los propietarios y equivale al llamado costo convencional (Cc); el segundo implica los costos en los que se incurre por el uso de las funciones y servicios que proporciona el ambiente y el hábitat, se reconoce como costo

ecológico ( $C_e$ ); el tercero conlleva beneficios de tipo colectivo y se identifica como costo social ( $C_s$ ). Al aplicar el método seleccionado en esta estimación y con el fin de relacionarlo con el sistema tarifario de consumo de agua, se tiene lo siguiente:

$$V_t = C_c + C_e + C_s \dots \dots \dots (4.36)$$

En este caso, el método NAIADE, antes descrito, permite evaluar el recurso agua de forma aplicada para identificar cuáles son los elementos que constituyen la realidad del recurso, evaluarlos y confrontarlos con escenarios futuros, con base en algunos aspectos del axioma de comparabilidad parcial, puede evaluar simultáneamente dos matrices (matriz multicriterio y matriz de equidad). La primera puede incluir medidas estocásticas, deterministas o difusas para la caracterización de una alternativa por medio de diferentes criterios; la segunda permite recoger la evaluación de cada alternativa por parte de todos los actores clave involucrados en el proceso de decisión (Munda, 1995).

Así, las alternativas serán escenarios de comparación, mientras que los criterios de evaluación serán componentes del valor total definido anteriormente (ecuación 4.36). Estas categorías se delimitan a través de una investigación del estado del arte con el fin de identificar las diferencias entre los escenarios y proyecciones estudiadas en relación a la disponibilidad.

A continuación se detallan los componentes propuestos del valor total y los criterios de selección para su integración a los indicadores.

- Categoría económica (costo convencional) - la información de los costos del sistema de abastecimiento y el tratamiento del agua residual. En esta categoría debería reflejarse la situación de acuerdo con los parámetros clásicos de evaluación del agua; es decir aquellos que presionan a favor del expansionismo de oferta.
- Categoría ambiental (costo ecológico) - se incluye información como la disponibilidad, nivel de caudales en las fuentes de agua y hasta variables cualitativas como la sectorización y la política de tratamiento de aguas servidas.

- Categoría social (costo social)- el bienestar integral de los usuarios del recurso es una visión que motiva a examinar en otra dimensión la situación en cuanto a la calidad de vida, la cobertura del agua y las diferencias de consumo por estrato social.

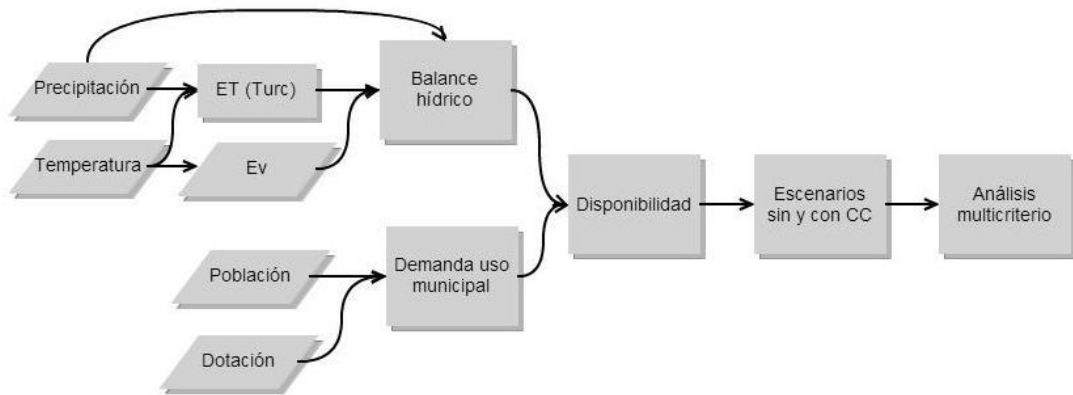
Bajo el contexto del análisis multicriterio, la inclusión de la mayoría de estos indicadores reflejará en gran parte la situación del agua tomando en cuenta las dimensiones de sustentabilidad. Los criterios para elegir los indicadores se basan en la sencillez de su construcción y comprensión, en su confiabilidad y comparabilidad. Su generación deviene de la revisión de información lo más actualizada posible y de datos bibliográficos. Desafortunadamente, no siempre se podrá incluir el total de los indicadores seleccionados, debido a barreras o a la no existencia de la información, sin lugar a dudas una debilidad sistémica de la evaluación.

Establecidas las alternativas y los criterios de evaluación se conforma una matriz multicriterio que determina la jerarquización inicial de las alternativas evaluadas. Para obtener los resultados, se cuenta con el software NIADE desarrollado por Giuseppe Munda (1995), en colaboración con la Universidad Autónoma de Barcelona y el Centro Común de Investigación de la Comisión Europea, el cual se puede descargar en la siguiente dirección electrónica: <http://weadapt.org/knowledge-base/adaptation-decision-making/NAIADE>.

## **5.5 Diagrama de flujo**

Con base en lo tratado a lo largo de este capítulo, en la siguiente figura se resume la metodología propuesta (véase figura 5.2). En primer lugar se realiza el balance hídrico superficial de la cuenca en estudio, uno de los insumos de mayor importancia en esta propuesta es el cálculo de la evapotranspiración con el método de Turc con datos históricos de temperatura y precipitación; posteriormente, se hace el cálculo de la disponibilidad del recurso en función de la población de la zona en estudio, con datos de dotación o suministro; enseguida, se realizan las proyecciones a futuro con los Modelos de Circulación General y proyecciones

oficiales de población, esto nos brindará diferentes escenarios a evaluar dentro del análisis multicriterio con la herramienta NAIADE de Munda (1996).



**Figura 5.2** Metodología propuesta

La evaluación de la disponibilidad futura de agua no sólo es un problema técnico o estadístico, sino que tiene profundas implicaciones políticas y sociales. Esta tesis pretende ser una herramienta de comprensión y análisis que permita identificar cuáles son los elementos que constituyen la realidad del recurso, evaluarlos y confrontarlos con escenarios futuros. La metodología descrita en este apartado se ejemplifica en el caso de estudio del capítulo siguiente.

## **6 Caso de estudio: Sistema Cutzamala**

El abastecimiento de agua para la Ciudad de México muestra señales evidentes de degradación, falta de inversión y reducción de su capacidad. Por otro lado, la capacidad actual de adaptación frente al cambio climático con respecto a infraestructura, ecosistemas e instituciones es sumamente baja (Escolero *et al.*, 2009) y se deben tomar medidas para aumentarla.

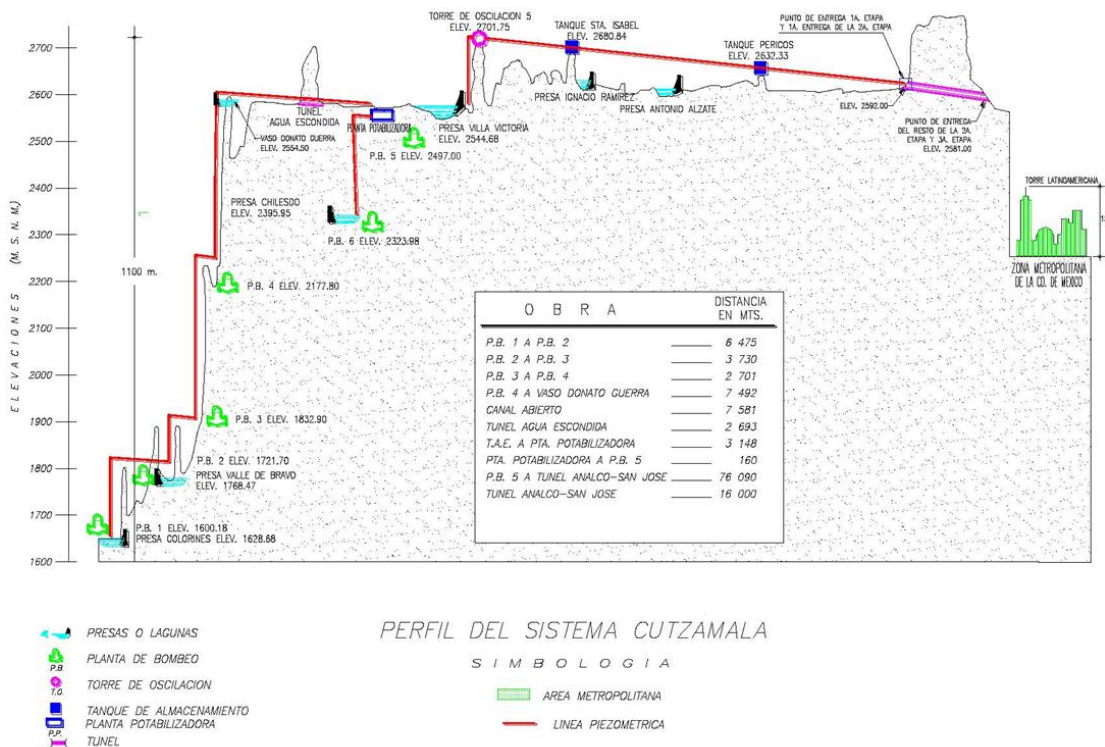
En este apartado se evaluará la disponibilidad futura de agua, para el caso del uso municipal bajo diversos escenarios de cambio climático y los costos asociados para el Sistema Cutzamala.

### **6.1 Descripción del sitio**

El Sistema Cutzamala es un conjunto de obras de infraestructura hidráulica que aporta el 18% del abastecimiento para todos los usos de la Cuenca del Valle de México; se complementa con el Sistema Lerma (6%), la extracción de agua subterránea (73%), así como con ríos y manantiales (3%). El sistema abastece a once delegaciones del Distrito Federal y once municipios del Estado de México y se compone por siete presas, seis estaciones de bombeo y una planta potabilizadora (véase figura 6.1).

Las presas del Sistema Cutzamala (tres de almacenamiento y cuatro derivadoras) almacenan agua del río del mismo nombre, excepto la presa Chilesdo, que aprovecha el agua del Río Malacatepec. La ubicación de las presas en orden ascendente de acuerdo a la trayectoria de los ríos es: a) Tuxpan y El Bosque, en Michoacán; b) Colorines, Ixtapan del Oro, Valle de Bravo, Villa Victoria y Chilesdo, en el estado de México. Las presas derivadoras son: Tuxpan con una capacidad de cinco hectómetros cúbicos, se encuentra a una elevación de 1751 msnm; la presa Ixtapan del Oro con capacidad de medio hectómetro cúbico, a una elevación de 1741 msnm; Colorines y Chilesdo con una capacidad de uno punto cinco millones de metros cúbicos cada una y a una elevación de 1629 y 2396 msnm, respectivamente. Las

presas de almacenamiento son: El Bosque, con una capacidad de 202 Mm<sup>3</sup> a una altura de 1741 msnm; Valle de Bravo, con 394.4 Mm<sup>3</sup> a una elevación de 1768 msnm; y Villa Victoria, con 186 Mm<sup>3</sup> a una elevación de 2545 msnm. Este Sistema está integrado por seis macroplantas de bombeo, que en conjunto vencen un desnivel que supera los 1100 m (ver figura 6.1). La planta de bombeo (PB) número 1 tiene una capacidad de 20 m<sup>3</sup>/s y se localiza a una elevación de 1600 msnm; las plantas de bombeo números 2, 3, 4 y 5 tienen una capacidad cada una de 24 m<sup>3</sup>/s y la número 6, de cinco metros cúbicos por segundo y se encuentra a una altura de 2323 msnm. En cuanto a las líneas de conducción, el Sistema Cutzamala tiene un acueducto de 205.70 km con tuberías de acero y concreto con diámetros entre 1.07 y 3.5 m; 43.99 kilómetros de túnel y 72.55 kilómetros de canal abierto.



**Figura 6.1** Perfil del Sistema Cutzamala

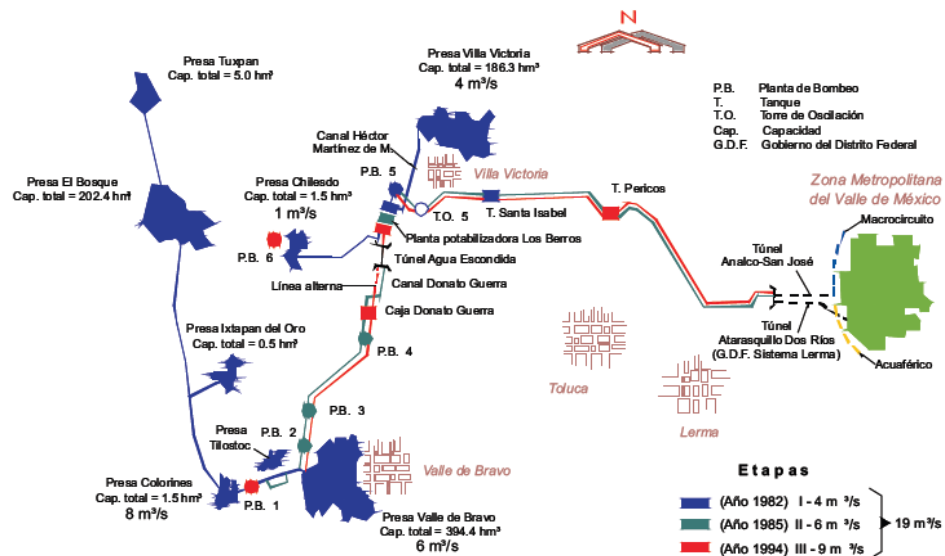
Fuente: CONAGUA, 2009

La planta potabilizadora Los Berros se constituye de cinco módulos con capacidad de cuatro mil litros por segundo cada uno. Durante la operación del

Sistema Cutzamala, los bombeos de agua juegan un papel fundamental, ya que la energía eléctrica que se requiere para esta actividad representa aproximadamente 80% de los costos de operación del sistema.

La primera derivación del Sistema Cutzamala es hacia la Ciudad de Toluca, en la cual se entrega un promedio de 800 litros por segundo y el resto se envía a la Zona Metropolitana del Valle de México.

Para suministrar los caudales del Sistema Cutzamala a la Ciudad de México y a los municipios conurbados del estado de México, se cuenta con un sistema de distribución a la salida del túnel Analco San José a través de una estructura de bifurcación hacia los ramales Norte y Sur que, a su vez, cuentan con subramales que llegan a los diversos tanques de regulación y almacenamiento. Estas conducciones conforman el denominado Acueducto del Macrocircuito Ramal Norte, en el estado de México y Ramal Sur-Acuaférico de Distribución en el Distrito Federal (véase figura 6.2).



**Figura 6.2** Diagrama del Sistema Cutzamala  
Fuente: CONAGUA, 2009

Las siete presas que conforman el sistema se encuentran agrupadas en seis subcuencas: Tuxpan, El Bosque, Ixtapan del Oro, Chilesdo-Colorines (dos presas), Villa Victoria y Valle de Bravo; enseguida se describe brevemente cada una de ellas.

Tuxpan es la subcuenca más grande del Sistema Cutzamala con una superficie total 1,195.2 km<sup>2</sup>; se encuentra en el estado de Michoacán y abarca seis municipios: Hidalgo, Irimbo, Tuxpan, Aporo, Angangueo y Ocampo. Los tres últimos entran completamente en la subcuenca mientras que los tres primeros tienen la mitad de su territorio y la cabecera municipal dentro de ella.

La población de esta subcuenca también es superior a las demás de este sistema. Alberga a un poco más de 164,000 habitantes (INEGI, 2005) y tiene asociada en el periodo 2000–2005, una tasa de crecimiento poblacional anual de 0.45%.

Las actividades más concurridas por la población ocupada de la zona son el comercio, la industria manufacturera y la producción agropecuaria. La actividad agrícola es la más importante de la región tanto por su extensión como por la cantidad de agua que consume. Asimismo, presenta un desarrollo industrial más fuerte, con lo que contribuye de manera sustancial a la contaminación de cuerpos de agua.

En la subcuenca existen 316 localidades de las cuales sólo nueve tienen más de 2,500 habitantes. Los grandes asentamientos como Ciudad Hidalgo y Tuxpan no tienen reportada la existencia de una planta de tratamiento (INE, 2009); sin embargo, la mitad de las viviendas de estas localidades están conectadas a una red de drenaje pública.

Con respecto al uso del suelo, en la parte alta de la subcuenca se observan dos grandes áreas de bosques bien conservados, cuya superficie corresponde al 75% de la superficie de la zona funcional alta. Esta cifra es bastante aceptable, aunque dichos ecosistemas se encuentran muy fragmentados por la actividad agrícola y pecuaria que corresponde al 23%. En las áreas agrícolas se observan procesos de declinación de la fertilidad mientras que en aquellas áreas con vegetación natural degradada se aprecian procesos de erosión laminar. Por lo tanto, a pesar de que la cabecera presenta una superficie considerable de vegetación primaria, ésta tiene un



alto grado de alteración debido a la presión de las actividades antrópicas y la presencia de áreas urbanas en la zona de cabecera.

En la parte media de la cuenca, la actividad agrícola es predominante, ocupa más del 60%; este hecho se asocia a procesos de declinación de la fertilidad y erosión hídrica laminar. También se observan áreas de bosques primarios y secundarios, muy fragmentados con procesos de erosión hídrica laminar y en cárcavas.

Adicionalmente, se observan dos asentamientos humanos de gran relevancia: Ciudad Hidalgo y Tuxpan, cuya ubicación se encuentra sobre los cauces principales del drenaje del sistema; también existen diez asentamientos humanos de menor importancia ubicados en las márgenes de corrientes permanentes.

El Bosque, con una superficie total de 437.1 km<sup>2</sup>, se encuentra en el estado de Michoacán y abarca un sólo municipio: Zitácuaro. Es la segunda subcuenca más poblada del sistema con 130,000 habitantes (INEGI, 2005), pero con una tasa de crecimiento anual negativa de -0.18%. La mayoría de la población ocupada trabaja en el sector terciario, principalmente en el comercio. Las otras dos actividades importantes en la zona son la agricultura y la industria manufacturera. A nivel del sistema Cutzamala, El Bosque es la segunda subcuenca con mayor superficie destinada a la agricultura de riego y ocupa el primer lugar en cuanto a extensión de parcelas irrigadas en terrenos ejidales. En El Bosque existen 127 localidades de las cuales, sólo dos tienen más de 2,500 habitantes. El mayor asentamiento es la cabecera municipal, Heroica Zitácuaro, con casi 80,000 habitantes. Cuenta con una planta de tratamiento que atiende al 60% de la población del municipio. Las aguas residuales derivadas de esta planta de tratamiento se descargan en el río San Juan.

En lo que al uso del suelo se refiere, la vegetación natural cubre el 80% de la parte alta de esta subcuenca, lo cual indica un alto grado de conservación. La actividad agrícola sólo ocupa el 18% del esta zona funcional; no obstante, en estas áreas se observa la presencia de cárcavas y procesos de erosión laminar.

En la parte media de la cuenca, la actividad agrícola abarca el 71% de su área total, mientras que la vegetación natural secundaria ocupa únicamente el 21%. En esta zona predominan los procesos de erosión hídrica laminar y cárcavas, principalmente en áreas agrícolas, mientras que la masa forestal degradada favorece los procesos de erosión hídrica laminar por el cambio de uso de suelo. Ambos escenarios probablemente están generando sedimentos que serán depositados en los embalses artificiales cuenca abajo.

Es importante mencionar que si bien la presencia de áreas urbanas no influye en el aporte de sedimentos en las presas, podrían influir en la calidad de agua que llega a éstas, en particular a la presa El Bosque.

Ixtapan del Oro, con una superficie total 154 km<sup>2</sup>, se encuentra en el estado de México y comprende casi la mitad del municipio de Ixtapan del Oro, cerca del 20% de Donato Guerra y un poco más del 10% de Villa de Allende. Unas 12,500 personas viven en esta región y la tasa de crecimiento anual de su población es de 0.56%.

La población ocupada se dedica en su mayoría a las actividades agropecuarias; el resto se emplea en la industria de la construcción y en actividades de comercio. Entre la actividad agrícola predomina la de temporal, que representa una superficie un poco más grande que la agricultura de riego. De todas formas, la irrigación de cultivos es lo que más agua consume en la subcuenca.

En esta subcuenca existen 23 localidades y sólo una tiene un poco más de 2,500 habitantes: San Juan Xoconusco con 2,662 habitantes (INEGI, 2005). En la zona no existe una planta de tratamiento y casi el 40% de las viviendas descargan sus aguas residuales en barrancas o ríos aledaños (INEGI, 2005).

En cuanto a la cobertura vegetal de esta subcuenca, se observa que alrededor del 90% de la parte alta se encuentra con vegetación natural; el 9% está ocupada por la actividad agrícola donde se reflejan procesos de erosión laminar. La presencia del alto porcentaje de superficie forestal en estado primario hace suponer

que toda el área de la parte alta se encuentra en buen estado de conservación y por ende el aporte de sedimentos cuenca abajo debe ser poco significativo.

Por otro lado, en la parte media de la cuenca, el área agrícola está ligeramente por encima de la cubierta vegetal natural abarcando el 54% del total. En las áreas donde se practica agricultura, se observan procesos de erosión laminar junto con aquellos de declinación de la fertilidad de estos suelos. En zonas en donde se mantiene la cubierta forestal en buenas condiciones estos procesos no son relevantes.

En términos generales, se puede deducir que esta subcuenca es la mejor conservada del sistema Cutzamala, ya que se observa la presencia de amplias zonas de bosque bien conservado (alrededor del 80% de toda la cuenca).

Chilesdo-Colorines, con una superficie total de 473.6 km<sup>2</sup>, se encuentra en el estado de México y abarca 4 municipios: 80% del municipio de Villa de Allende, 40% de Donato Guerra, 20% de Valle de Bravo y 12% de Villa Victoria. Su población es de 73,000 habitantes (INEGI, 2005) y en el periodo 2000–2005 tuvo una tasa de crecimiento poblacional anual de 0.09%: la tasa más pequeña del conjunto de subcuencas del Sistema Cutzamala.

Las principales actividades que se llevan a cabo en la subcuenca son la agricultura, tanto de riego como de temporal, y la construcción. Los cultivos de riego más importantes son la avena forrajera, el chícharo y el maíz. El principal cultivo de temporal es el maíz. A diferencia de la subcuenca anterior, en Chilesdo-Colorines más de la mitad del agua concesionada se destina a la agricultura. El resto es consumido por los asentamientos humanos.

En la subcuenca Chilesdo–Colorines existen 98 localidades de las cuales sólo cuatro tienen más de 2,500 habitantes. Como en otras subcuencas de este sistema, los asentamientos se encuentran dispersos y la infraestructura de abastecimiento de agua potable y drenaje es deficiente.

En lo que al uso del suelo respecta, la cobertura vegetal natural cubre el 44% de la parte alta de la cuenca, principalmente la zona oeste, sur y este de la misma. La

mayor parte de la zona norte, y que también corresponde a la zona de cabecera, está ocupada por uso agrícola cuya extensión representa el 55% del total de la zona alta. El manejo inadecuado de las tierras agrícolas ha originado procesos de degradación de los suelos como la erosión hídrica laminar y la declinación de la fertilidad.

En la parte media de la cuenca, la actividad agrícola vuelve a ser predominante con el 66% de extensión. Sólo el 30% de vegetación natural ocupa esta zona, caracterizada por una fuerte fragmentación de las áreas boscosas, por lo que existe una pérdida de la cubierta edáfica ocasionada por procesos de erosión laminar y potencialmente influyendo hacia la parte baja de la cuenca; esto es, que la mayoría de los cauces fluviales que escurren por superficies agrícolas favorecen el aporte de sedimentos hacia los cuerpos de agua ubicados en la parte baja de la cuenca.

Villa Victoria, con una superficie total de 602.1 km<sup>2</sup>, se encuentra en el Estado de México y abarca el 60% del municipio de Villa Victoria y casi el 40% de San José del Rincón. Alberga un poco más de 114,000 habitantes (INEGI, 2005) y tuvo en el periodo 2000–2005, una tasa de crecimiento poblacional anual de 1.14%. Esto la hace la subcuenca del sistema Cutzamala con mayor tasa de crecimiento.

Las principales actividades que se llevan a cabo son la agricultura de temporal (principalmente el cultivo de maíz), la construcción y el comercio. La ausencia de agricultura de riego y actividades industriales importantes hace que los principales consumidores de agua en esta zona sean los asentamientos humanos. Existen 163 localidades de las cuales sólo cuatro tienen más de 2,500 habitantes. Por lo mismo, se trata de una zona con asentamientos dispersos y pobre en infraestructura de abastecimiento de agua potable y drenaje.

En lo que respecta al uso del suelo, la subcuenca Villa Victoria destina más del 65% de su parte alta a la actividad agrícola; sólo el 28% de esta zona se encuentra cubierta por vegetación natural. Esta última corresponde al área de amortiguamiento y núcleo de la reserva de la Biosfera Mariposa Monarca decretada

como área natural; sin embargo, la presencia de dicha reserva no ha frenado el deterioro del bosque, pues cerca de la mitad de éste se encuentra degradado. Estas áreas boscosas se encuentran afectadas por procesos de erosión hídrica laminar y cárcavas. En la cabecera oriental de la cuenca, la agricultura es el uso dominante, siendo la declinación de la fertilidad y la erosión laminar y en cárcavas, los procesos de degradación predominantes. Su presencia indica que potencialmente se genera una gran cantidad de sedimentos que se depositan en la presa, favoreciendo así su azolvamiento.

Valle de Bravo, con una superficie total de 534.5km<sup>2</sup>, se encuentra en el Estado de México y comprende casi la totalidad del municipio de Amanalco y el 60% de Valle de Bravo. La población de la subcuenca es aproximadamente de 64,000 habitantes y, de acuerdo con información oficial de INEGI, en el periodo 2000 a 2005 tiende a decrecer a una tasa de -0.91% anual; sin embargo, la población flotante está creciendo y, con ello, el número de viviendas tanto en el núcleo urbano de la subcuenca como en las áreas rurales.

Las principales actividades que se llevan a cabo son la agricultura, la acuicultura, el turismo y la construcción. En la parte alta de la cuenca, que corresponde al municipio de Amanalco, las actividades predominantes son la agricultura y la acuicultura. La agricultura de temporal, la más extendida en la zona, cultiva de manera predominante el maíz. En cambio, la agricultura de riego siembra principalmente avena forrajera, chícharo y haba verde.

Si bien la superficie dedicada al riego no es tan grande, más del 80% del agua concesionada en la zona alta se destina para fines agrícolas. En cambio, en las zonas bajas que corresponden al municipio de Valle de Bravo, el agua se usa principalmente para el consumo doméstico. Las parcelas con riego del municipio de Valle de Bravo se encuentran en la subcuenca Chilesdo-Colorines. De las 85 localidades que contiene la subcuenca, sólo la cabecera municipal de Valle de Bravo tiene más de 2,500 habitantes. Las principales fuentes de contaminación de los afluentes que llegan a la presa principal de esta subcuenca, son los residuos de las

granjas acuícolas, los fertilizantes y pesticidas empleados en la agricultura, y las aguas negras que vierten las comunidades instaladas a lo largo de la cuenca.

El centro urbano de la cuenca, Valle de Bravo, genera gran cantidad de desechos sólidos y aguas residuales de los cuales gran parte van a dar a la presa. Estudios sobre la calidad de agua en la presa indican que en varios puntos de muestreo, la cantidad de coliformes fecales sobrepasa los límites de la norma (NOM-003–SEMARNAT–1997).

En cuanto al uso del suelo en la subcuenca Valle de Bravo, se observa una cobertura vegetal natural en el 60% de la cuenca alta; sin embargo, este bosque se encuentra muy fragmentado por la actividad agrícola y pecuaria. El manejo inadecuado en estos territorios causa la formación de cárcavas que propician la sedimentación de la presa cuenca abajo. Por otro lado, la pérdida de horizonte superficial de los suelos está provocando la declinación de la fertilidad debido a la compactación de los suelos y la pérdida de la materia orgánica. En la zona media de la cuenca, la cobertura vegetal primaria está fuertemente fragmentada por la agricultura de temporal. Bajo estos aprovechamientos también hay presencia de cárcavas, erosión hídrica laminar y declinación de la fertilidad.

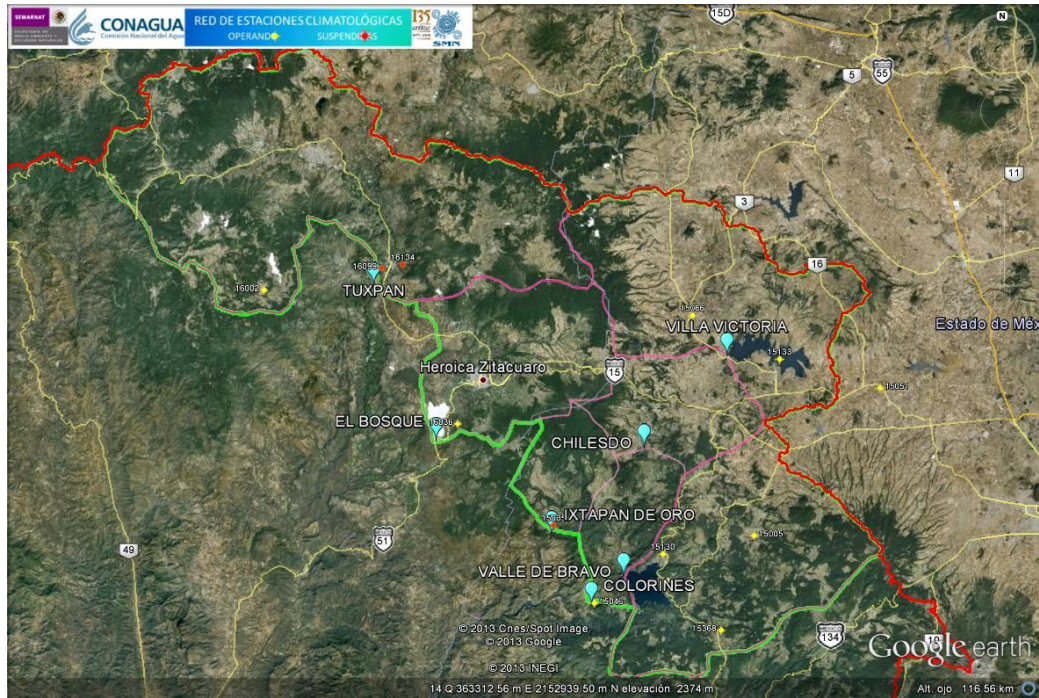
Una vez descrito el sitio de estudio, se procede a la aplicación de la metodología propuesta en este trabajo.

## **6.2 Aplicación de la metodología**

La metodología propone un análisis por cuenca para contar así con una mejor precisión en los resultados, atendiendo además a la infraestructura hidráulica con la que cuenta el sitio.

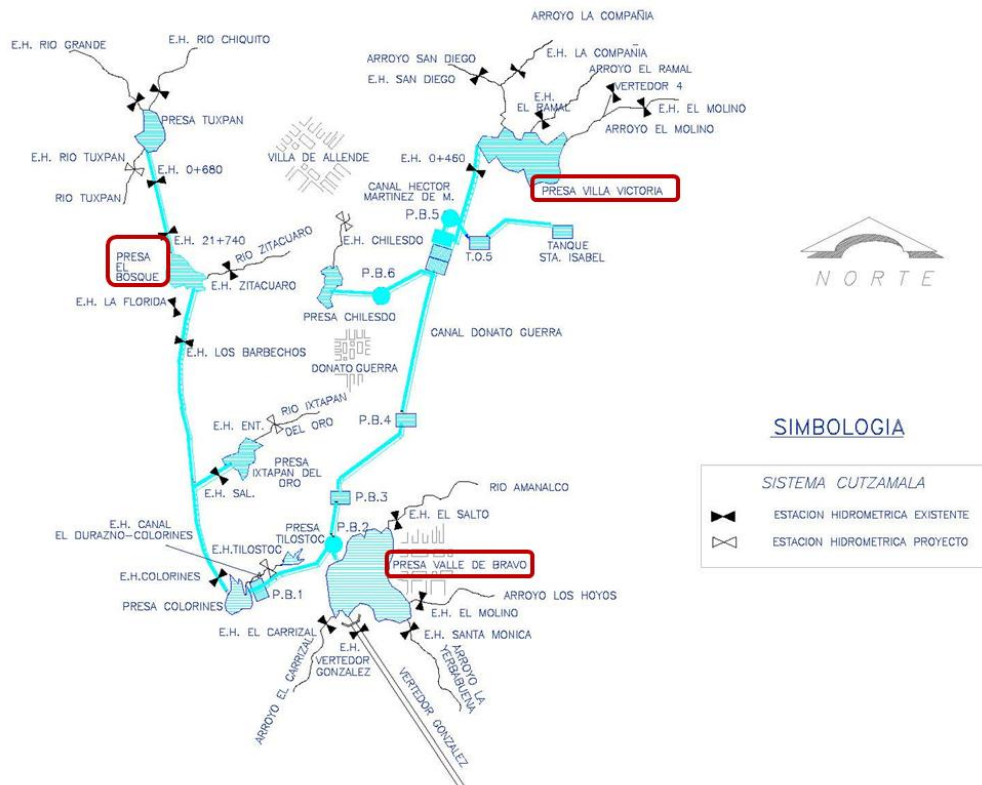
### **6.2.1 Recopilación de la información**

Se ubicaron geográficamente las subcuencas en estudio, las presas del Sistema, así como las estaciones climatológicas e hidrométricas dentro y en el entorno cercano de la zona (véanse figuras 6.3 y 6.4).



**Figura 6.3** Ubicación geográfica de las presas y estaciones climatológicas del Sistema Cutzamala

Fuente: Elaboración propia con base de datos CLICOM, 2008; CONAGUA, 2013; Google earth, 2013.



**Figura 6.4** Ubicación de estaciones hidrométricas del Sistema Cutzamala

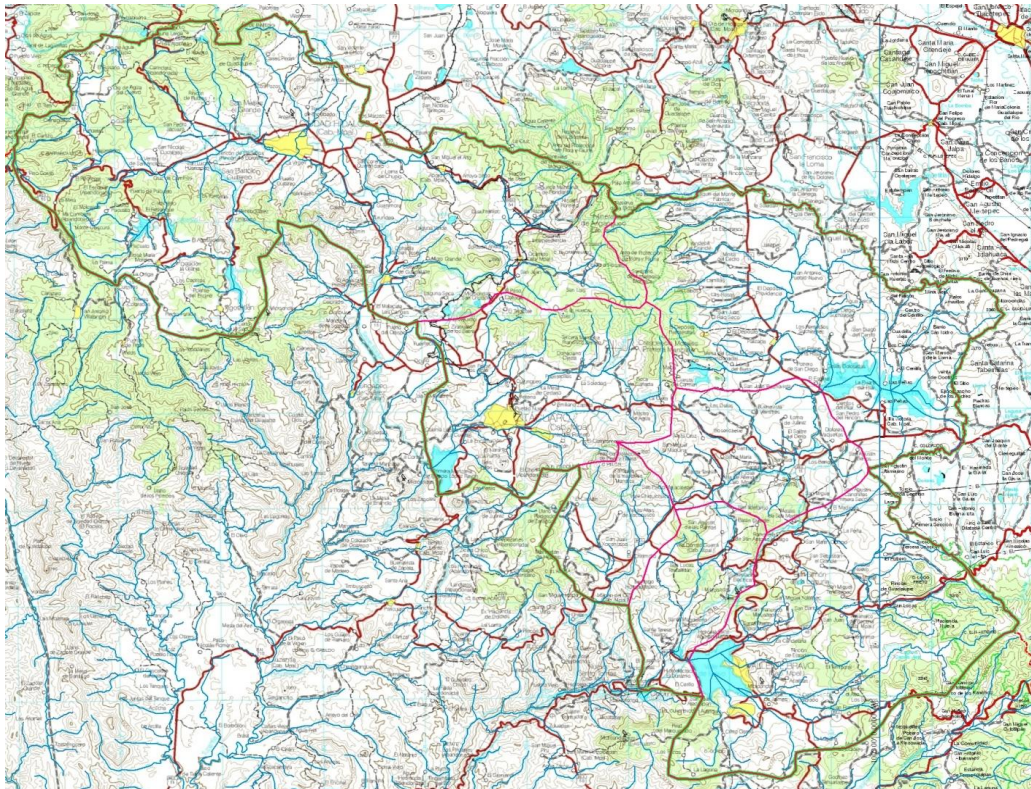
Fuente: CONAGUA, 2010a



La selección de las estaciones se hizo en función de la calidad y periodo de sus registros diarios de temperatura, precipitación, evaporación y gastos medios, mismos que se trabajaron de forma mensual (véase Tabla 6.1). De acuerdo con la información disponible y con la ayuda de técnicas para la extensión y complemento de registros, se obtuvo la base de datos, se estimaron los valores mensuales y anuales para el período de 1961 a 2005. Por otro lado, se estableció un periodo de 25 años (1961-1985) como línea de referencia.

### 6.2.2 Balance hídrico superficial del Sistema Cutzamala

El balance hídrico de esta cuenca, se inicia con la determinación del volumen de precipitación total, el cual fue estimado mediante el método aritmético de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1992), ya que éste considera variaciones espaciales y temporales en el proceso de precipitación. En primer lugar se delimitaron las subcuencas en estudio en un plano (véase figura 6.5).

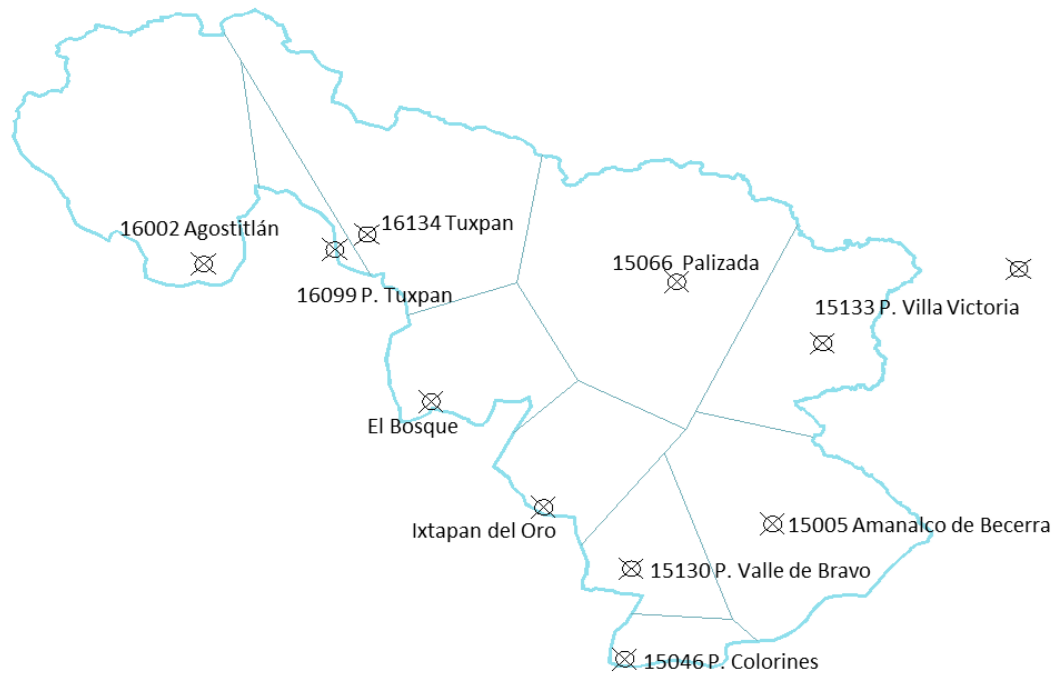


**Figura 6.5** Delimitación de la subcuenca del Sistema Cutzamala

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, INEGI y CLICOM.



Posteriormente, para continuar con el método de los polígonos de Thiessen, se ubicaron en el plano las estaciones climatológicas y se unieron mediante líneas rectas en el plano de la subcuenca, con ello se formaron triángulos en cuyos vértices están las estaciones climatológicas. Posteriormente se trazaron líneas rectas que bisectan los lados de los triángulos. Cada estación climatológica quedó rodeada por las líneas rectas bisectoras, que formaron los llamados polígonos de Thiessen. El área encerrada por los polígonos de Thiessen y el parteaguas es el área de influencia de la estación correspondiente (véase figura 6.6). La lluvia media se calcula como un promedio ponderado de las precipitaciones registradas en cada estación, usando como peso el área de influencia correspondiente (véase ecuación 5.1).



**Figura 6.6** Método de polígonos de Thiessen para la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, INEGI y CLICOM.

**Tabla 6.1** Áreas de influencia de acuerdo con el método de los Polígonos de Thiessen

Estación	Nombre	Estado	Organismo de cuenca	Organismo	Inicio	Fin	Situación	Latitud			Longitud			Altura [m]	Área de influencia [m <sup>2</sup> ]
								°	'	"	°	'	"		
15005	Amanalco de Becerra	México	Balsas	CONAGUA - DGE	01/03/1962	31/10/1992	S	19	15	18	100	1	22	2365	464,474,398
15035	Ixtapan del Oro	México	Balsas	CONAGUA - DGE	01/01/1961	30/11/1986	S	19	15	59	100	15	58	1745	214,398,050
15046	Presa Colorines	México	AVM	CFE	01/07/1949	30/09/2006	O	19	10	35	100	12	59	1645	74,486,508
15066	Palizada	México	LSP	CONAGUA - DGE	01/09/1958	30/11/2002	O	19	30	27	100	5	52	2635	655,574,951
15130	Presa Valle de Bravo	México	AVM	CFE	01/01/1969	31/12/2005	O	19	14		100	8		1869	179,157,894
15133	Presa Villa Victoria	México	AVM	CFE	01/01/1961	31/12/2005	O	19	27	26	99	50	31	2245	324,987,681
16002	Agostitlán	Michoacán	Balsas	CFE	01/07/1950	29/02/2004	O	19	32	13	100	37	6	2520	602,702,956
16036	El Bosque	Michoacán	Balsas	CFE	01/02/1952	31/12/2005	O	19	23		100	23		1750	238,323,104
16099	Presa Tuxpan	Michoacán	AVM	CFE	01/11/1952	30/09/2006	O	19	33	46	100	28	34	1720	70,553,998
16134	Tuxpan	Michoacán	Balsas	CONAGUA - SMN	01/04/1941	30/04/1985	S	19	34		100	27		1800	547,381,304

AVM\_Aguas del Valle de México, LSP\_Lerma Santiago Pacífico, O\_Operando, S\_Suspendida

Fuente: Elaboración propia con datos de CONAGUA, INEGI y CLICOM.

Tomando como referencia el área de influencia estimada y los datos de precipitación promedio mensual de cada estación, se determina el volumen mensual de precipitación ( $\bar{T}p_i A_i$ ) para cada estación climatológica (véase tabla 6.2).

- $\bar{T}p_i$  es la precipitación o lámina de lluvia del mes “i” de una estación, es decir, representa la cantidad de agua que llueve en un mes y se expresa en mm;
- $A_i$  es el área de influencia de una estación “i”, se expresa en km<sup>2</sup>;
- $\bar{T}p_i A_i$  es la lámina de lluvia del mes “i” en una estación “i” y se expresa en mm /km<sup>2</sup>.

Se trata de estimar el volumen total de lluvia en toda la cuenca, respetando las respectivas áreas de influencia durante cada mes del año, para así considerar las variaciones estacionales: época de lluvia y sequía.

**Tabla 6.2** Volumen de precipitación mensual de referencia (1961-1985) en la subcuenca del Sistema Cutzamala de acuerdo con el área de influencia

Estación	15005	15035	15046	15066	15130	15133	16002	16036	16099	16134	Sistema Cutzamala
Nombre	Amanalco de Becerra	Ixtapan del Oro	Presa Colorines	Palizada	Presa Valle de Bravo	Presa Villa Victoria	Agostitlán	El Bosque	Presa Tuxpan	Tuxpan	
Área de influencia [m <sup>2</sup> ]	464,474,398	214,398,050	74,486,508	655,574,951	179,157,894	324,987,681	602,702,956	238,323,104	70,553,998	547,381,304	3,372,040,846
Mes	Volumen de lluvia estimado $\bar{T}\pi_i A_i$ [m <sup>3</sup> ]										Suma
Enero	12,401,467	4,231,681	1,362,122	15,408,743	3,635,020	7,331,501	24,278,448	5,573,782	1,829,734	20,640,944	96,693,443
Febrero	4,908,650	1,660,692	384,091	6,920,591	1,455,236	4,762,181	9,905,292	1,584,849	1,027,125	13,565,553	46,174,260
Marzo	6,240,113	639,621	480,748	7,123,914	1,261,186	4,056,930	7,064,727	1,216,441	459,086	10,544,793	39,087,558
Abril	10,769,748	1,596,372	600,547	13,909,115	1,757,884	7,901,263	17,727,328	1,668,262	1,421,588	13,728,666	71,080,774
Mayo	35,120,598	10,848,541	4,209,419	43,795,138	9,961,560	22,888,612	48,921,902	15,303,322	4,085,231	31,663,806	226,798,129
Junio	91,596,371	34,436,793	13,753,313	95,743,989	29,180,983	52,224,165	136,190,779	44,267,522	11,203,346	79,529,542	588,126,804
Julio	120,467,240	37,586,658	14,004,022	128,405,281	32,058,603	61,975,116	178,658,734	39,199,187	13,521,947	86,497,492	712,374,280
Agosto	113,602,359	39,979,877	15,548,256	134,308,187	31,594,160	60,048,614	175,250,303	38,561,316	12,391,443	84,699,574	705,984,089
Septiembre	90,869,369	31,526,340	13,314,463	95,681,165	29,026,564	47,647,487	152,331,865	38,484,216	10,133,707	73,092,072	582,107,249
Octubre	50,064,281	21,494,298	7,466,652	51,864,173	15,394,428	25,415,391	71,817,078	18,993,359	6,026,593	42,188,849	310,725,102
Noviembre	12,154,451	4,092,323	1,119,998	9,109,760	2,906,227	5,395,216	22,192,571	4,336,129	1,117,245	12,859,824	75,283,744
Diciembre	9,742,351	1,348,921	432,951	8,071,767	1,759,485	4,380,900	9,037,924	2,203,496	742,487	11,078,672	48,798,951
Total	557,936,995	189,442,117	72,676,584	610,341,824	159,991,338	304,027,376	853,376,950	211,391,879	63,959,532	480,089,787	3,503,234,382

Fuente: Elaboración propia con datos del CLICOM e INEGI.

Finalmente, para obtener el volumen de precipitación mensual de toda la cuenca en metros cúbicos, se aplica la fórmula antes mencionada, en la que se divide uno entre la sumatoria de la precipitación mensual del área de influencia ( $\bar{T}\pi_i A_i$ ) y el resultado se multiplica por el área total de la cuenca y se hace la conversión a metros, dividiéndolo entre mil. El resultado se multiplica por el área de influencia total en metros cuadrados, lo que proporciona el volumen total de precipitación de la subcuenca.

La evaporación en los grandes cuerpos de agua se obtuvo de datos de estaciones climatológicas en las presas y el área de las mismas.

La evapotranspiración se calculó con el método de Turc (1963) y, dado que la fórmula es anual, se realizó una distribución mensual ponderada en función de la precipitación acumulada para cada mes.

### **6.2.3 Disponibilidad de agua en el Sistema Cutzamala**

El volumen disponible se calculó con la fórmula  $V_{disp} = A_s P - A_c E_v - (A_s - A_c) ET$  (ecuación 5.2) para el periodo de 1961-1985, que es el que conforma la línea de referencia, así mismo, se aplicó este procedimiento para todos los años con los que se cuenta con datos climatológicos (1961-2005).

### **6.2.4 Proyecciones de cambio climático para el Sistema Cutzamala**

Para la proyección de resultados con cambio climático se identificó la región de Douglas número 12 y como la correspondiente a la zona de estudio (CCA UNAM, 2008) con el objetivo de generar las proyecciones en las variables de temperatura y precipitación con la herramienta de análisis regional del Pacific Climate Impacts Consortium. Los modelos que se seleccionaron fueron GFDL CM20 (del Geophysical Fluids Dynamics Laboratory), ECHAM5 (del European Center for Medium Range Weather Forecast) y HADGEM1 (del Met Office Hadley Center) para la celda 100.27W 19.01N. Con estos modelos, se obtuvieron las anomalías mensuales proyectadas en las variables de temperatura y precipitación para los horizontes 2020 y 2050 con los escenarios A1B y A2, se seleccionó la corrida número uno de cada modelo. El análisis para este trabajo se realizó para los horizontes 2030 y 2050, por lo que las anomalías para el horizonte 2030 se obtuvieron por medio de una interpolación lineal de los datos de 2020 y 2050. En las tablas 6.3 y 6.4 se presentan las anomalías en la temperatura y la precipitación, respectivamente, que arrojaron los modelos y escenarios seleccionados.

**Tabla 6.3 Anomalías en la temperatura media (°C)**

Anomalías en la temperatura media (°C)													
Horizonte	2030						2050						
Modelo	GFDL		ECHAM		HADGEM		GFDL		ECHAM		HADGEM		
Escenario	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	
Enero	1.0	0.9	1.3	1.3	1.9	1.7	1.7	1.3	2.9	2.2	2.8	2.7	
Febrero	1.2	1.1	2.0	1.3	2.3	2.0	1.9	1.2	3.0	2.2	3.0	3.0	
Marzo	1.9	1.9	2.0	1.9	2.0	2.1	2.8	2.5	3.1	2.8	3.1	3.3	
Abril	2.1	2.1	1.6	1.6	1.7	1.3	3.0	3.0	2.7	2.3	2.4	2.2	
Mayo	1.9	1.5	1.5	1.6	1.5	1.1	2.9	1.8	2.5	2.4	1.8	1.6	
Junio	1.9	1.7	1.5	1.5	0.9	0.6	2.4	2.4	2.9	2.1	1.4	1.1	
Julio	1.6	1.5	1.3	1.4	1.4	1.2	2.1	1.9	2.6	2.1	1.9	1.9	
Agosto	1.5	1.5	1.7	1.7	1.5	1.4	2.2	2.2	2.7	2.4	2.1	2.1	
Septiembre	1.6	1.4	1.4	1.5	1.3	1.3	2.4	2.3	2.3	2.5	1.9	1.9	
Octubre	1.0	1.2	1.3	1.1	1.5	1.4	1.9	1.5	2.2	2.3	2.2	2.1	
Noviembre	1.1	1.0	1.6	1.4	2.1	2.1	1.5	1.7	2.3	2.1	2.9	3.0	
Diciembre	1.0	1.2	1.6	1.4	2.1	1.9	1.8	2.1	2.6	1.9	2.9	2.6	

Fuente: Elaboración propia con datos del PCIC, 2011

**Tabla 6.4 Anomalías porcentuales proyectadas en la precipitación**

Anomalías porcentuales proyectadas en la precipitación													
Horizonte	2030						2050						
Modelo	GFDL		ECHAM		HADGEM		GFDL		ECHAM		HADGEM		
Escenario	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	A1b	A2	
Enero	11	-33	-10	9	8	6	-48	-20	-6	-3	26	-7	
Febrero	-60	-29	-33	-22	2	-23	-58	-41	-42	-45	-15	-37	
Marzo	-33	-51	-29	-29	3	0	-47	-10	-44	-40	0	-17	
Abril	-48	-50	7	14	-4	14	-68	-38	-2	0	10	23	
Mayo	-14	-17	-7	-14	2	22	-11	-25	-12	-8	13	27	
Junio	-4	-8	8	-1	20	4	-1	-10	-15	3	12	7	
Julio	-12	0	0	-10	-27	-39	-17	-3	-15	-15	-50	-56	
Agosto	20	22	-8	-10	-2	-20	15	28	-5	-15	-17	-27	
Septiembre	37	27	17	8	19	2	80	59	21	19	0	-8	
Octubre	-6	8	-9	6	18	27	13	3	-6	3	40	45	
Noviembre	-24	-16	-16	-3	49	57	-33	-41	-23	-12	89	81	
Diciembre	-13	-28	9	0	78	11	-28	-24	-6	21	43	16	

Fuente: Elaboración propia con datos del PCIC, 2011

### 6.2.5 Valoración económica del agua para el Sistema Cutzamala

El valor económico del agua del Sistema, como se ha planteado, se determinó con el método de costo de oportunidad, mediante la suma del costo convencional, el costo ecológico y el costo social y el análisis se realizó utilizando el software NIAIDE (Munda, 1995) de Análisis multicriterio.

Los indicadores se seleccionaron en función de la información disponible para el caso de estudio en particular y se resumen en la tabla 6.5:

**Tabla 6.5** Indicadores en el análisis del Sistema Cutzamala

	Tipo	Medida	Objetivo
<b>Costo convencional</b>			
Costo de operación	cuantitativa	MDP	minimizar
Costo por fugas	cuantitativa	MDP	minimizar
Costo de tratamiento	cuantitativa	MDP	minimizar
Costo SC	cuantitativa	MDP	minimizar
<b>Costo ecológico</b>			
Disponibilidad	cuantitativa	Mm <sup>3</sup>	maximizar
Suministro	cuantitativa	Mm <sup>3</sup>	maximizar
Fugas	cuantitativa	Mm <sup>3</sup>	minimizar
Suministro neto	cuantitativa	Mm <sup>3</sup>	maximizar
Agua residual	cuantitativa	Mm <sup>3</sup>	minimizar
<b>Costo social</b>			
Dotación	cuantitativa	L/hab·día	maximizar
Demanda potencial satisfecha	cuantitativa	millones de habitantes	maximizar
Demanda potencial insatisfecha	cuantitativa	millones de habitantes	minimizar

Los indicadores del costo convencional son el costo de operación del Sistema, el costo que representa reparar las fugas en el abastecimiento y el costo del tratamiento del agua residual. La suma de ellos se consideró como el costo del abastecimiento por parte del Sistema Cutzamala.

El costo de operación está representado básicamente por el consumo de energía para el bombeo del agua, ya que el requerimiento anual de energía necesario es de aproximadamente 1787 millones kWh, lo cual representa un costo de 1348 MDP. El costo de operación se incrementa en 357 MDP con el costo de personal y del proceso de potabilización de agua. Si consideramos el costo total de operación del sistema (1705 MDP en 2006) para abastecer 16 m<sup>3</sup>/s, el costo promedio por metro cúbico de agua es de 3.4 pesos (Escolero *et al.* 2009). Del agua suministrada a la ciudad de México, se pierde el 30% por fugas en la red (Capella *et al.*, 2008). En cuanto a su costo, si se realizara la implementación de las medidas de control de fugas contempladas en el Programa de Manejo Sustentable de Agua de la Ciudad de México (PMSACM) publicado en SACM (2007) (sectorización de la red de distribución urbana, sustitución y rehabilitación de tuberías secundarias y de tomas

domiciliarias e implantación de un programa de detección y control de fugas), el valor presente de la inversión requerida asciende a 230 millones de dólares, a razón de US\$ 0.18/m<sup>3</sup> (López-Morales, 2012), esto es \$2.34/m<sup>3</sup> a un tipo de cambio de 13 pesos por dólar. Por otro lado, del volumen utilizado para uso doméstico, 34% resulta en aguas residuales, que es el agua que necesita tratamiento secundario. En una planta de tratamiento tradicional, el costo de operación varía de 1.40 a 3 pesos/m<sup>3</sup> de agua tratada (FEA, 2006; Mijaylova *et al.*, 2002)

En cuanto al costo ecológico, se seleccionaron los indicadores de disponibilidad de agua, suministro, fugas y suministro neto en millones de metros cúbicos. La disponibilidad es la cantidad biofísica de agua en las subcuencas que conforman el Sistema Cutzamala, el suministro es el volumen de agua que se puede suministrar en función de la capacidad del Sistema y la disponibilidad de agua en las subcuencas; el volumen de fugas se estableció como 30% del volumen suministrado; y el suministro neto es el resultado de restarlas del suministro. El volumen de agua residual es 34% del volumen de suministro neto debido a que éste es el volumen de agua que, finalmente, llega a la población.

Con respecto al costo social, se consideró la dotación de agua por habitante al día y con ésta y el suministro neto se estimaron las demandas potenciales satisfecha e insatisfecha en millones de habitantes. En la Zona Metropolitana del Valle de México la dotación promedio es de 334 L/h·día (Pineda *et al.*, 2010); sin embargo, 77% de la población consume menos de 150 L/hab día. Debido a la complejidad del sistema de suministro, no es posible conocer exactamente a cuántos habitantes beneficia el Sistema Cutzamala; sin embargo, considerando una dotación de 150 L/hab día, el sistema podría beneficiar a más de nueve millones de habitantes de las zonas metropolitanas de los valles de México y Toluca, esto representa un patrón de extracción promedio de 505 millones de metros cúbicos anuales sin fugas.

Para 2030, se espera que más de la mitad de la demanda mundial de energía se origine en países en vías de desarrollo, hoy en día dicha demanda representa el

40%. El sistema energético mundial seguirá dominado por los combustibles fósiles, los cuales representarán casi el 90% del suministro total de energía. El petróleo se mantendrá como principal fuente de energía (34%), seguido del carbón (28%). Los precios del petróleo y el gas experimentarán una fuerte tendencia a la alza en relación con los niveles actuales (EC, 2013). Se estima que el precio del barril aumentará de \$1301 en 2012 (World Bank, 2013) a \$1670 en 2030 (EIA, 2011), esto es 28% de incremento.

Con toda la información anterior, se estableció un escenario base de costos para el Sistema Cutzamala, suponiendo que no hay efectos del cambio climático en la disponibilidad futura de agua, es decir, que es igual al promedio histórico. Los costos se incrementaron de acuerdo con las proyecciones del precio de la energía fósil y se indicaron en millones de pesos de 2013. Las proyecciones de disponibilidad son el resultado de la parte anterior del ejercicio, la dotación se estableció en 150 L/hab-día y la demanda potencial satisfecha e insatisfecha resultaron de dividir el suministro neto entre la dotación y compararla con el suministro óptimo del sistema; dicha dotación permaneció constante con el propósito de apreciar el efecto de la variación de la disponibilidad en la población.

Si bien la noción de asignación en los indicadores es subjetiva, responde en su mayoría a elementos empíricos de evaluación, tratando de equilibrar entre la realidad socio ambiental y el contexto del estudio.

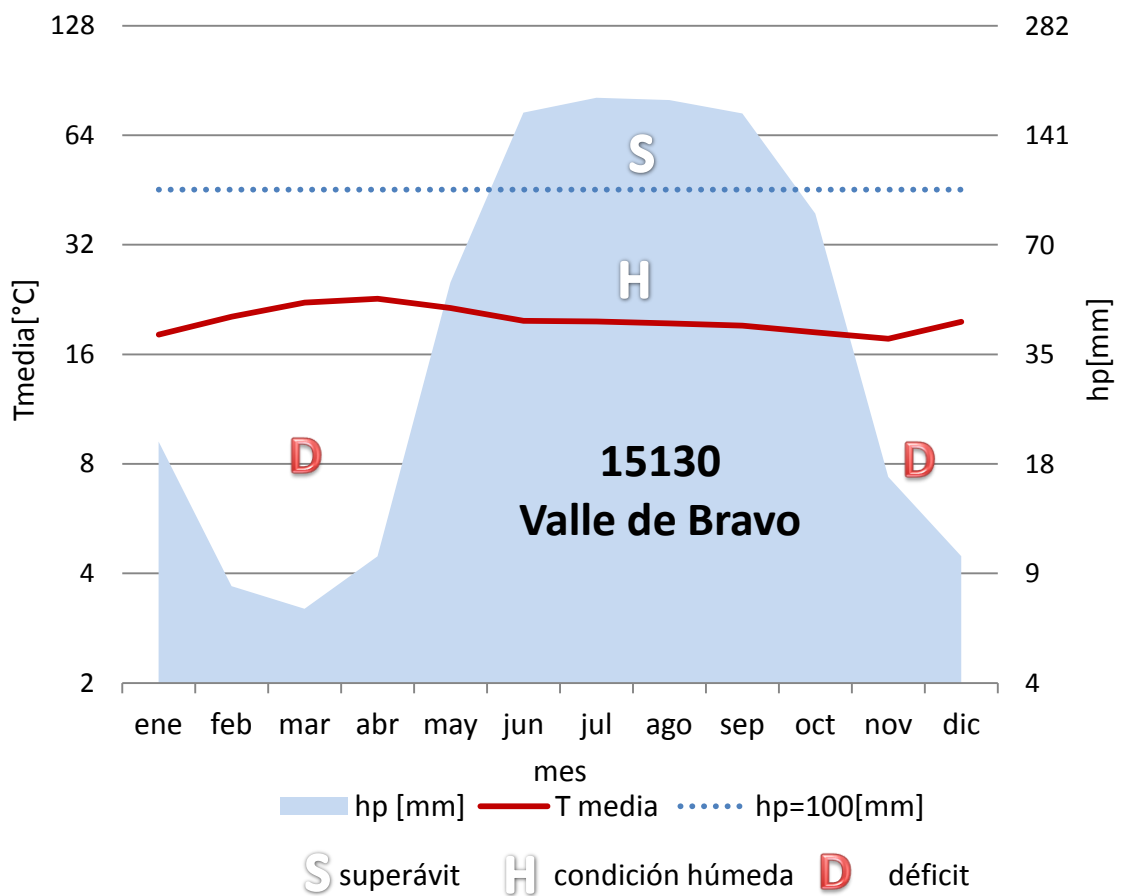
El ejercicio se realizó con las alternativas del año 2010 (actual), y las proyecciones 2030 y 2050, sin considerar efectos de cambio climático, y considerándolos, con los modelos de circulación general para los mismos horizontes. Al no tener información climatólogica más reciente, se utiliza la línea de referencia como el comportamiento típico para el año 2010 y se muestra también el 2005 por ser un año crítico y reciente.



### 6.2.6 Resultados

En este apartado se muestran los resultados obtenidos de la aplicación de la metodología en el caso de estudio, los cuales fueron estimados para los años 2010 (actual) y 2005 (crítico) y proyectados para los horizontes 2030 y 2050.

En primer lugar, se presenta la línea de referencia de las variables de temperatura y precipitación. Todas las estimaciones se realizaron de manera mensual (véase figura 6.7) y para cada una de las estaciones con las que se trabajó (véase Anexo A).

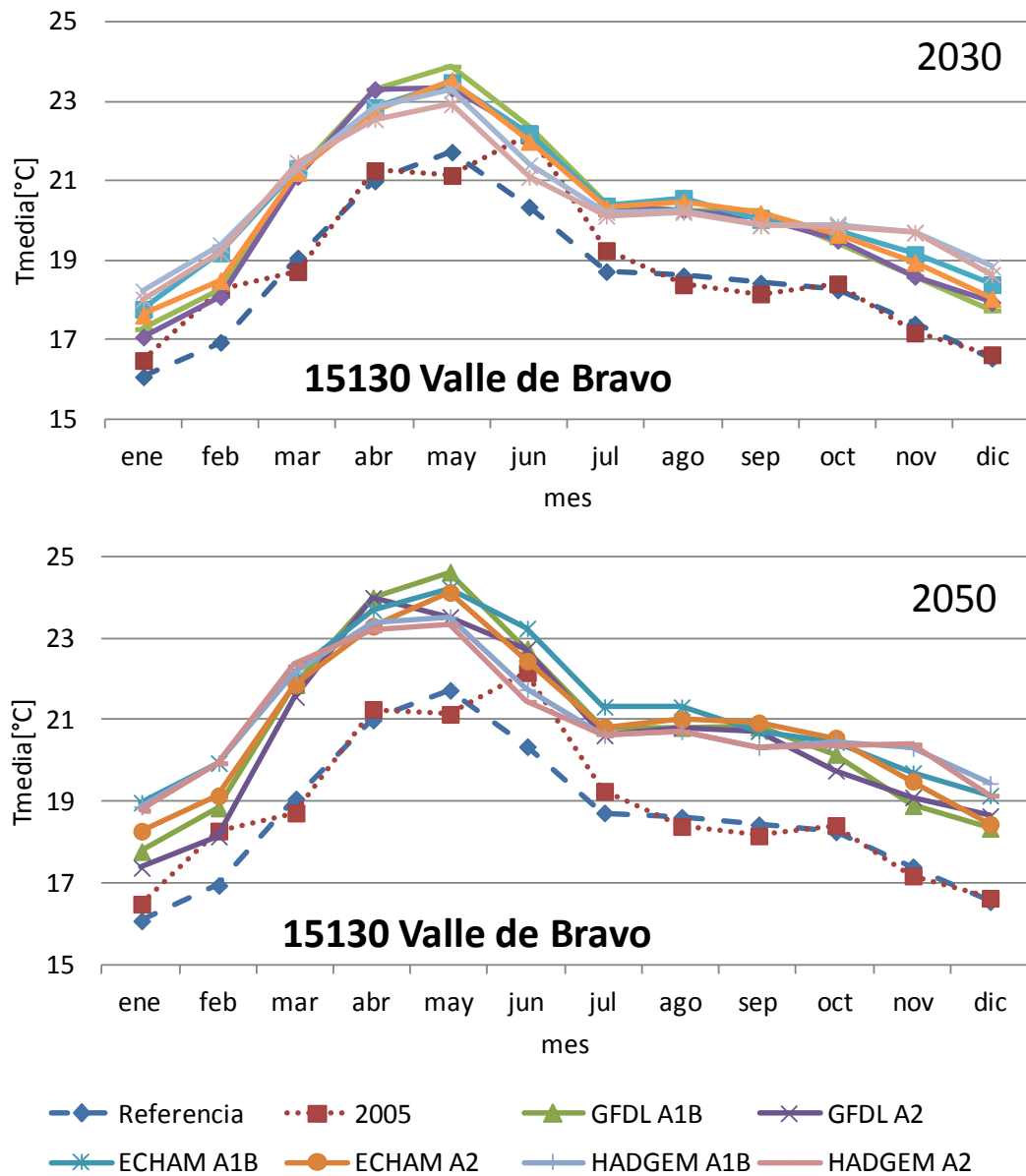


**Figura 6.7** Diagrama ombrotérmico para la línea de referencia (1961-1985), estación 15130 Valle de Bravo

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008

Posteriormente, se generaron escenarios de cambio climático con los modelos GFDL, ECHAM y HADGEM que permitieron obtener proyecciones de temperatura (véanse figuras 6.8, y Anexo A) y precipitación (figura 6.9) bajo los

escenarios socioeconómicos A1B y A2 para los horizontes 2030 y 2050. Así mismo, en las gráficas se muestra el comportamiento

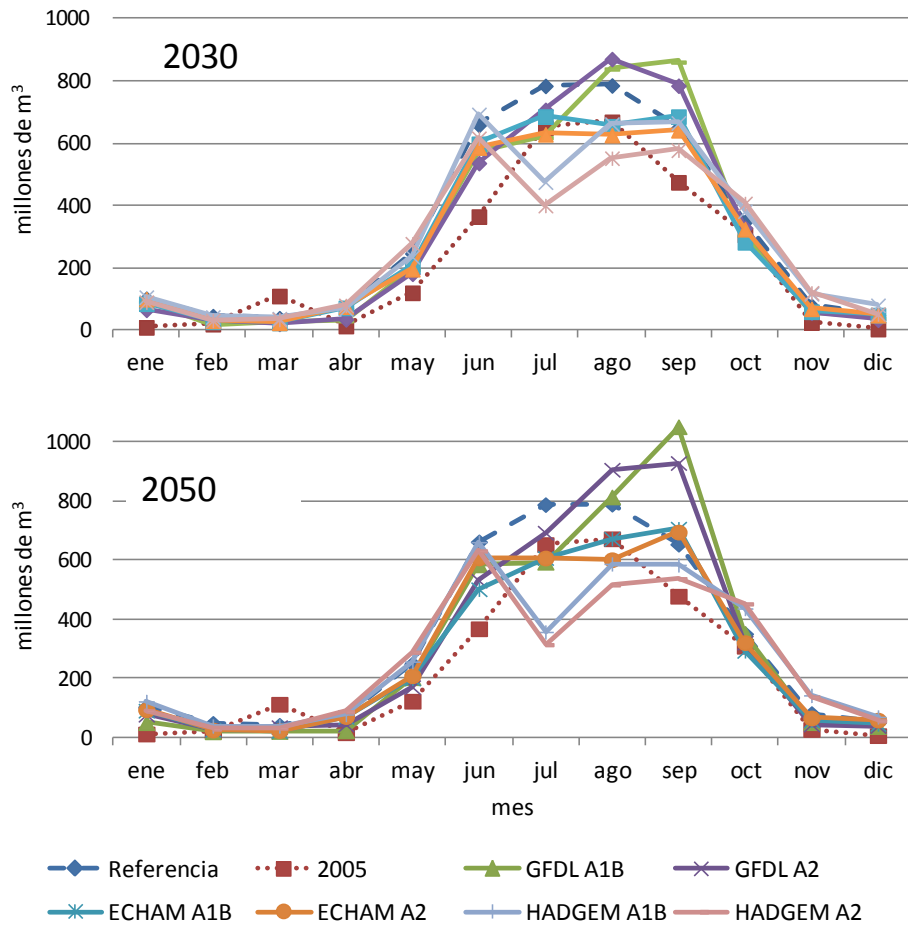


**Figura 6.8** Línea de referencia (1961-1985), año 2005 y proyecciones bajo escenarios de cambio climático para la variable de temperatura, horizontes 2030 y 2050  
Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.

De los rangos de temperatura obtenidos a través de las proyecciones, se encuentra que el modelo HADGEM proporciona el incremento mínimo extremo para el mes de junio. El máximo extremo le corresponde al HADGEM bajo el SRES A2 (3.3°C) para el mes de marzo y el horizonte 2050. Se obtuvieron incrementos de

temperatura promedio de 1.5°C para el horizonte 2030 y de 2°C para el horizonte 2050. De los posibles cambios en el comportamiento futuro de la precipitación en la región de estudio, se concluye que los modelos GFDL proyectan un aumento en la precipitación para todos los escenarios en ambos horizontes de evaluación.

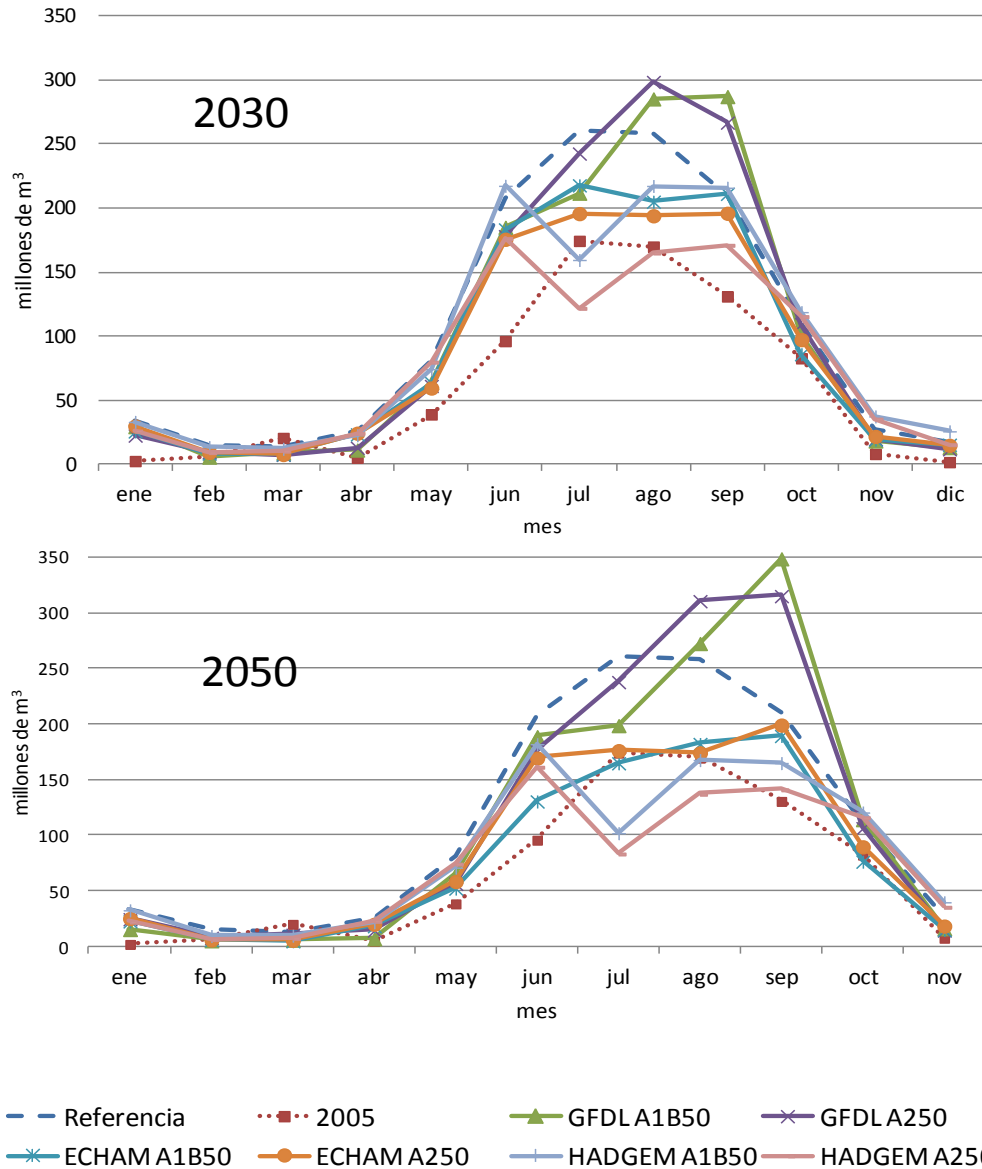
Los modelos ECHAM y HADGEM coinciden en proyectar una importante disminución de la precipitación en el mes de julio para el horizonte 2030 (véase figura 6.9); sin embargo, para el horizonte 2050, el modelo ECHAM proyecta un aumento en la precipitación de los meses julio a septiembre y el modelo HADGEM proyecta una disminución significativa en el mes de julio, es el que presenta las condiciones más adversas para esta variable.



**Figura 6.9** Línea de referencia (1961-1985), año 2005 y proyecciones bajo escenarios de cambio climático para el volumen de precipitación total en la subcuenca, horizontes 2030 y 2050

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.

En las figuras 6.10 y 6.11 se muestra la comparación de la disponibilidad de agua promedio histórica anual (línea de referencia, que se supone igual para el 2010), el año 2005 (crítico) y las proyecciones futuras a 2030 y 2050.

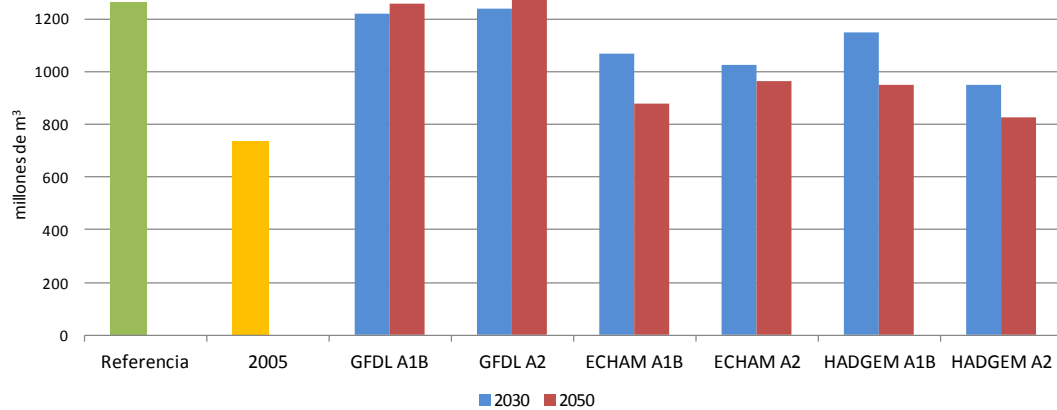


**Figura 6.10** Disponibilidad mensual de agua en la subcuenca del Sistema Cutzamala, línea de referencia, año 2005 y proyecciones 2030 y 2050 bajo escenarios de cambio climático

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.

El año 2005 se encuentra por debajo de la media histórica, el modelo GFDL presenta un incremento en el volumen disponible promedio histórico (referencia) para el escenario A2 horizonte 2030. La proyección para 2030 con el modelo

HADGEM presenta la mayor disminución en el volumen con respecto a la histórica, esto es de 27% bajo el escenario A2. El modelo ECHAM presenta para el horizonte 2050 una disminución de 40% en el volumen de agua disponible, con respecto a la línea de referencia.



**Figura 6.11** Comparación de la disponibilidad de agua promedio histórica anual (línea de referencia), año 2005 y proyecciones bajo escenarios de cambio climático para los horizontes 2030 y 2050

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.

Por otro lado, y con los datos de volúmenes de almacenamiento en las presas almacenadoras del Sistema Cutzamala y gastos provistos a la planta de tratamiento Los Berros, se observa que la demanda de agua del Sistema Cutzamala rebasa el agua disponible en la cuenca. Los caudales suministrados a la Zona Metropolitana del Valle de México se pueden proporcionar gracias al funcionamiento de las presas almacenadoras; sin embargo, no se puede continuar operando de esta manera ya que el volumen de recarga es mucho menor.

En cuanto a la evaluación de los costos para el sistema Cutzamala, se estableció un escenario base suponiendo que no hay efectos del cambio climático en la disponibilidad futura de agua, es decir, que es igual al promedio histórico. Para realizar la evaluación se supone un comportamiento semejante al promedio histórico (referencia) para el año 2010, el cual será el año base. Los costos se incrementaron de acuerdo con las proyecciones del precio de la energía fósil y se indicaron en millones de pesos de 2013. La dotación se estableció en 150 L/hab·día y la demanda potencial satisfecha e insatisfecha resultaron de dividir el suministro

neto entre la dotación y compararla con el suministro óptimo del sistema (véase tabla 6.6); dicha dotación permaneció constante con el propósito de apreciar el efecto de la variación de la disponibilidad en la población.

**Tabla 6.6** Escenario base de costos para el Sistema Cutzamala

Base	2010	2030	2050	unidad
Costo operación	4,736.48	8,002.75	9,923.42	MDP
Costo fugas	324.00	449.28	557.11	MDP
Costo tratamiento	1,477.00	690.01	855.61	MDP
Costo SC	6,537.48	9,142.04	11,336.13	MDP
Disponibilidad	1,260.67	1,260.67	1,260.67	Mm <sup>3</sup>
Suministro	500.00	500.00	500.00	Mm <sup>3</sup>
Fugas	150.00	150.00	150.00	Mm <sup>3</sup>
Suministro neto	350.00	350.00	350.00	Mm <sup>3</sup>
Agua residual	119.00	119.00	119.00	Mm <sup>3</sup>
Dotación	150.00	150.00	150.00	L/hab·día
Demanda potencial satisfecha	6.39	6.39	6.39	millones de habitantes
Demanda potencial insatisfecha	2.61	2.61	2.61	millones de habitantes

\*MDP Millones de pesos de 2013

De la misma forma, se realizaron las proyecciones del escenario base, considerando las mismas proyecciones en el precio de la energía fósil; para el escenario A2 se consideraron los efectos del cambio climático en la disponibilidad futura, sin embargo se supusieron las condiciones que existen actualmente en cuanto a las fugas y la eficiencia del sistema (suministro), por otra parte, para el escenario A1B se consideraron las variaciones en los efectos del cambio climático en la disponibilidad y mejoras en cuanto al suministro y disminución de las fugas (véase tabla 6.7).

**Tabla 6.7** Costos para el Sistema Cutzamala bajo escenarios de cambio climático

A2	GFDL			ECHAM			HADGEM			unidad
	2010	2030	2050	2010	2030	2050	2010	2030	2050	
Costo de operación	4,736.48	8,002.75	9,923.42	4,736.48	8,002.75	9,923.42	4,736.48	8,002.75	9,923.42	MDP
Costo fugas	324.00	449.28	557.11	324.00	365.97	426.77	324.00	338.57	365.77	MDP
Costo tratamiento	502.18	690.01	855.61	1,477.00	562.05	655.43	1,477.00	519.98	561.76	MDP
Costo SC	5,562.66	9,142.04	11,336.13	6,537.48	8,930.77	11,005.61	6,537.48	8,861.30	10,850.95	MDP
Disponibilidad	1,260.67	1,240.65	1,292.94	1,260.67	1,026.35	965.21	1,260.67	949.53	827.28	Mm <sup>3</sup>
Suministro	500.00	500.00	500.00	500.00	407.28	383.02	500.00	376.79	328.28	Mm <sup>3</sup>
Fugas	150.00	150.00	150.00	150.00	122.18	114.91	150.00	113.04	98.48	Mm <sup>3</sup>
Suministro neto	350.00	350.00	350.00	350.00	285.10	268.11	350.00	263.75	229.80	Mm <sup>3</sup>
Agua residual	119.00	119.00	119.00	119.00	96.93	91.16	119.00	89.68	78.13	Mm <sup>3</sup>
Dotación	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	L/hab-día
Demanda potencial satisfecha	6.39	6.39	6.39	6.39	5.21	4.90	6.39	4.82	4.20	millones de habitantes
Demanda potencial insatisfecha	2.61	2.61	2.61	2.61	3.79	4.10	2.61	4.18	4.80	millones de habitantes

A1B	GFDL			ECHAM			HADGEM			unidad
	2010	2030	2050	2010	2030	2050	2010	2030	2050	
Costo de operación	4,736.48	8,002.75	9,923.42	4,736.48	8,002.75	9,923.42	4,736.48	8,002.75	9,923.42	MDP
Costo fugas	324.00	290.26	185.07	324.00	253.60	129.77	324.00	272.89	139.65	MDP
Costo tratamiento	502.18	764.20	1,096.35	502.18	667.68	768.73	502.18	718.46	827.25	MDP
Costo SC	5,562.66	9,057.21	11,204.84	5,562.66	8,924.03	10,821.91	5,562.66	8,994.10	10,890.32	MDP
Disponibilidad	1,260.67	1,221.06	1,255.74	1,260.67	1,066.83	880.49	1,260.67	1,147.97	947.53	Mm <sup>3</sup>
Suministro	500.00	484.54	498.31	500.00	423.34	349.40	500.00	455.54	376.00	Mm <sup>3</sup>
Fugas	150.00	96.91	49.83	150.00	84.67	34.94	150.00	91.11	37.60	Mm <sup>3</sup>
Suministro neto	350.00	387.63	448.48	350.00	338.67	314.46	350.00	364.43	338.40	Mm <sup>3</sup>
Agua residual	119.00	131.79	152.48	119.00	115.15	106.92	119.00	123.91	115.06	Mm <sup>3</sup>
Dotación	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	150.00	L/hab-día
Demanda potencial satisfecha	6.39	7.08	8.19	6.39	6.19	5.74	6.39	6.66	6.18	millones de habitantes
Demanda potencial insatisfecha	2.61	1.92	0.81	2.61	2.81	3.26	2.61	2.34	2.82	millones de habitantes

\*MDP Millones de pesos de 2013

El análisis multicriterio NAIADÉ permitió la introducción de datos cuantitativos en diferentes unidades y se evaluó el costo del agua en términos de costo convencional, ecológico y social, con el objeto de realizar un análisis segmentado por indicador y por dimensión y sus debidas implicaciones.

Las alternativas fueron los años de evaluación 2010, 2030 y 2050, para el escenario base y los escenarios de cambio climático A1B y A2 bajo los modelos GFDL, ECHAM y HADGEM con el fin de identificar las variaciones entre ellos. Los resultados del análisis multicriterio se muestran en la siguiente figura (véase figura 6.13).



**Figura 6.12** Resultados de la evaluación de costos del Sistema Cutzamala con el método NIADE de análisis multicriterio

En la figura 6.13 se puede observar que el año 2050 presenta el peor panorama bajo todos los escenarios, excepto el escenario GFDL A1B, en donde las proyecciones indican un aumento en la disponibilidad de agua en las subcuencas del sistema y se estableció un decremento en el porcentaje de fugas, lo que representó un panorama positivo en este escenario de cambio climático, por otro lado, debido a la disponibilidad y suministro de agua, se incrementa el volumen de agua residual y, en consecuencia, el costo de tratamiento de agua, lo cual representa el valor más alto en costo del sistema con respecto a los demás escenarios, por lo que se puede observar que el análisis multicriterio es una herramienta que evalúa en conjunto las alternativas proporcionadas (escenarios).

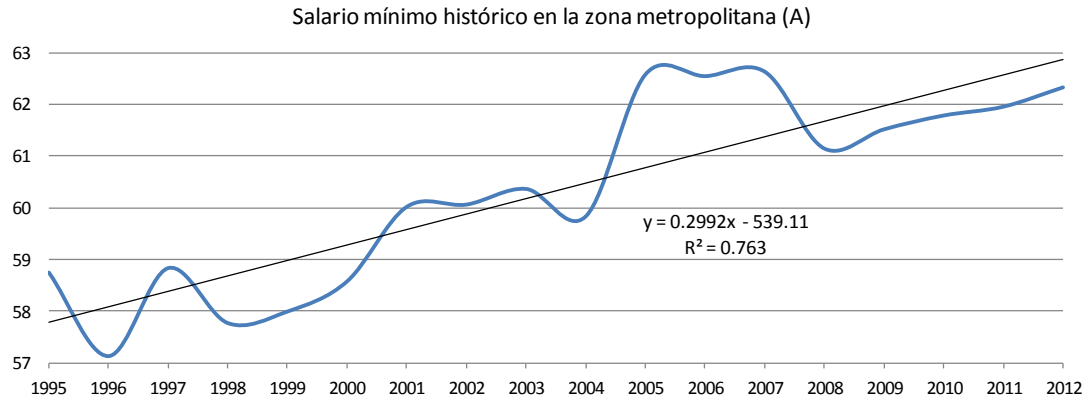
De acuerdo con la comparación entre pares, es posible diferenciar criterios que tienen un aumento (aquellos calificados como  $\ll$  y  $\lt$ ) entre los cuales resaltan



los costos económicos para todos los escenarios, la disponibilidad y el suministro neto para los escenarios ECHAM y HADGEM A2 así como HADGEM A1B horizonte 2050. Los criterios con disminuciones importantes ( $>>$  y  $>$ ) fueron las fugas para la mayoría de los escenarios futuros y en cuanto al costo social, se aprecia una mejora para los escenarios en cuanto a la demanda potencial satisfecha. La cantidad de criterios favorables para el año 2010, así como la intensidad de las variaciones, hacen que el modelo indique al año 2010 como mejor que los años 2030 ó 2050; sin embargo las señales que se emiten no tienen uniformidad en todos los criterios introducidos (véase Anexo B).

De este análisis se puede desprender que cuando se realiza la evaluación agregada se agudiza la situación entre el año más reciente (2010) y las proyecciones futuras especialmente para los escenarios GFDL A1B y HADGEM A2 y A1B, enfatizada en variables que se relacionan con los costos de operación y disponibilidad.

En este aspecto, cabe señalar que en el Distrito Federal, si el número promedio de habitantes en una vivienda es de cuatro personas (INEGI, 2011), entonces se tiene que en una vivienda se consumen  $36 \text{ m}^3/\text{bimestre}$ , por lo que se elige una tarifa sin subsidio de \$997.40 por los primeros  $30 \text{ m}^3$  y 226.44 por los seis metros cúbicos restantes (DOF, 2012), esto es  $33.99 \text{ \$/m}^3$ . Esta tarifa promedio a nivel municipal está subsidiada en la zona de estudio y tiene un porcentaje muy bajo de recaudación. A esto hay que sumarle el efecto del incremento del precio de la energía en el futuro y, realizando un análisis del comportamiento histórico del salario mínimo en la zona de estudio, se puede observar que la proyección para los años 2030 y 2050 nos dan un incremento en el salario de 19 y 29%, respectivamente con referencia al 2010, (véase figura 6.13) porcentaje que no se compara con las proyecciones del incremento en el precio de la energía fósil para los mismos años.



**Figura 6.13.** Salario mínimo histórico en la zona metropolitana (A) en pesos de 2013  
Fuente: Elaborado con datos del Banco de México (2013) y SAT

Por lo todo lo anterior, es de llamar la atención el impacto social de los efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua así como de las políticas que se establezcan para un uso eficiente del recurso.

## **7 Discusión**

En esta propuesta metodológica, a diferencia de los modelos que se utilizan para la evaluación de la disponibilidad, se le da un peso muy importante tanto a las variables de precipitación como a la temperatura, debido a que la evaporación depende de ésta última y es una variable crítica para evaluar la cantidad de agua disponible, ya que en nuestro país la evaporación llega a ser del orden de 72%.

El nivel de incertidumbre de los demás paquetes, modelos y ensambles también está presente en esta propuesta metodológica; sin embargo, en las proyecciones de escenarios climáticos en este modelo, el nivel de agregación parte de datos diarios a mensuales, lo que da una mayor precisión principalmente para la identificación de medidas de adaptación a situaciones donde hay variabilidad a lo largo del año, y los valores acumulados mensuales o anuales de precipitación no son suficientes para alertar la escasez de agua, como se puede observar en la figura 6.11, caso de estudio de esta tesis.

Los pronósticos de disponibilidad de agua a futuro están determinados principalmente por la precisión e incertidumbre de las proyecciones de cambio climático.

Respecto a las estimaciones de disponibilidad futura para los escenarios con cambio climático, cabe señalar que los procedimientos propuestos no se modifican aun cuando se presenten cambios en los modelos de circulación global para estimar las proyecciones de precipitación y temperatura, variables clave en esta investigación.

El procedimiento propuesto para estimar los costos se basa en la trayectoria histórica del cobro del agua en México, que se determina a partir de la tarifa, la cual no representa el costo real del agua y no es homogénea en el país. Por ejemplo, hay cargos fijos en varias ciudades, que muestran una dispersión muy grande, desde el no cobro (San Luis Potosí, SLP.; Guadalajara, Jal. y Oaxaca, Oax.) hasta los 10 pesos por metro cúbico, como es el caso del Aguascalientes (CONAGUA, 2011a). En el caso del cobro de agua potable, considerando un consumo de 30 m<sup>3</sup> en un mes para el

usuario doméstico, CONAGUA reporta que las tarifas más elevadas se presentan en las ciudades de Morelia, Tijuana y Aguascalientes. Cabe señalar que respecto a las tarifas de alcantarillado y saneamiento, en algunos casos es un porcentaje del cobro por consumo de agua potable; este porcentaje puede variar del 3 al 40%. Aunque hay casos en los que no se cobran estos servicios o que al menos no se cobran de forma explícita y quedan integrados en la tarifa de agua potable, como es el caso en las ciudades de Tijuana, Ensenada, Mexicali, Oaxaca y Campeche.

A la diversidad y variabilidad en el cobro del servicio de agua potable, se suma la existencia de diferentes usuarios domésticos y volúmenes de consumo, así como la insuficiente cobertura de la medición del consumo. En algunos casos se tienen diferentes tipos de usuarios domésticos: populares, medios, residenciales y en otros casos, existe una tarifa única. Asimismo, el tomar un volumen fijo de consumo como criterio de comparación, no permite ver el desarrollo de la tarifa a diferentes niveles de consumo, ya que existen casos en la que los primeros metros cúbicos son relativamente bajos, pero a partir de cierto grado de consumo se incrementan radicalmente, y en otros casos las tarifas son altas, pero permanecen dentro del mismo rango sin incrementos considerables al aumentar el consumo.

La estimación del costo del agua en esta tesis no consideró la tarifa, la razón fue la falta de información al respecto; por lo cual, este procedimiento podría perfeccionarse si se incorpora o se considera este rubro así como los porcentajes de subsidio y recaudación, de acuerdo a los fundamentos planteados en el capítulo 4.

La aplicación de la metodología propuesta se mostró cabalmente en las siete cuencas que integran el Sistema Cutzamala; sin embargo, los resultados de la disponibilidad futura presentan incertidumbres, en particular por la complejidad de las políticas de operación del sistema, que por su naturaleza varían y no es posible establecer tendencias. Esto se debe a que el volumen de agua que se bombea a la planta potabilizadora depende del nivel de agua específico que esté disponible en cada una de las presas del sistema. Para atender esta dificultad, se consideró la operación diaria del sistema de presas realizada durante el año 1995 como

representativa, debido a que para este año se observó que la disponibilidad de agua mensual fue similar a la histórica, de manera que se infiere que la política de operación en ese año es la que podría esperarse a futuro. Con ello se estimó el volumen de agua mensual que podría suministrarse a la ZMVM considerando una dotación diaria de 150 L/hab.

Se estima que a futuro aumentará la población de la Ciudad de México con demanda de agua potable insatisfecha; los valores podrán variar entre 2.61 y 4.18 millones de habitantes, bajo el escenarios A2; en cuanto al escenario A1B, a pesar de tener variaciones importantes en cuanto a la disponibilidad biofísica del agua, si se tuviera la política de prevención y reparación de fugas propuesta para este escenario, se disminuiría considerablemente la demanda potencial insatisfecha, pasando de 2.61 a 0.81 en el mejor escenario. Por lo cual, se advierte que el efecto negativo de la escasez de agua puede disminuir con prácticas de uso eficiente del agua, incluyendo el mejor aprovechamiento del recurso en los hogares. Cabe señalar que esta demanda potencial sólo corresponde a la población que pudiera ser abastecida por el Sistema Cutzamala en condiciones óptimas de disponibilidad de agua en las cuencas y operación; sin embargo, no considera las otras fuentes de abastecimiento a la Zona Metropolitana del Valle de México ni a la variación de la población en el futuro.

La complejidad del caso de estudio obligó a realizar algunas adecuaciones a la metodología. Por ejemplo, dado que el Sistema Cutzamala está diseñado para el suministro de agua potable a la ZMVM, no se consideró en las estimaciones de la demanda de agua a la población local asentada en cada una de las cuencas, a pesar de que las presas son fuentes de abastecimiento para estos asentamientos humanos. Otro aspecto a resaltar es que fue posible estimar la proporción de población total de la Ciudad de México que no podría ser atendida a futuro; sin embargo, es difícil establecer dónde se ubican los usuarios que sufrirán escasez de agua ya que el abastecimiento de agua en la ciudad combina el recurso de fuentes externas con el que se extrae del acuífero (65%).

## **8 Conclusiones y recomendaciones**

Se cumplió con los objetivos de este estudio en el sentido de que, con base en la fundamentación teórica, se desarrolló una metodología que permite estimar el impacto del cambio climático en la disponibilidad del agua futura bajo distintos escenarios, considerando los aspectos físicos, económicos, sociales, ambientales y las proyecciones futuras.

En el modelo de balance hídrico superficial seleccionado para el análisis a nivel de cuenca tienen un gran peso las variables de temperatura y precipitación, así como la evapotranspiración, ésta última estimada con método de Turc (1963), por estas características, el modelo permite ser proyectado, ya que dichas variables son variables de salida para los modelos de circulación general, herramienta que permite estimar los impactos del cambio climático en el futuro.

La demanda futura de agua en la metodología se estimó en función de la disponibilidad de agua, la dotación y el clima; sin embargo, es difícil establecer diferencias de consumo y cobertura por estrato.

Para evaluar el costo del agua se seleccionó el método de costo de oportunidad y, con el fin de realizar un estudio integral económico, social y ambiental, se utilizó la metodología NAIADE (Munda, 1995) de análisis multicriterio para distintos escenarios, considerando los impactos del cambio climático en el recurso y comparándolos con condiciones sin efectos del cambio climático. De esta forma se logró integrar diferentes dimensiones del costo del agua en un solo marco de análisis y se obtuvo una visión integral de la problemática, esto con base en los principios de la economía ecológica.

Las medidas de adaptación para reducir el riesgo a la escasez de agua se identificaron en función del análisis multicriterio. Entre estas medidas están el tratamiento de agua, ya que si bien en México el tratamiento de agua para consumo humano tiene un alto costo, es posible emplear un tratamiento secundario con el fin de emplearla para otras actividades tales como son el riego agrícola, lo que elevaría la disposición de agua potable en la región; por otro lado, es necesario sensibilizar a

la población en los precios del servicio de suministro de agua, los cuales deben estar apegados a la realidad para cubrir los costos reales que se tienen para proporcionar el servicio, arreglar las fugas existentes en la red de tuberías y para el tratamiento del recurso.

La metodología se aplicó en el Sistema Cutzamala; la complejidad del caso de estudio obligó a realizar algunas adecuaciones, como considerar a la población servida fuera de la cuenca. Esta metodología propuesta permitió evaluar la disponibilidad del recurso en las subcuencas que conforman al Sistema y evaluar los escenarios futuros. Es importante mencionar que las bases de datos asociadas a las estaciones climatológicas no aportan en su totalidad los registros necesarios, y esto puede originar imprecisión a los resultados obtenidos. La obtención de los datos que se realizó en este estudio se realizó de acuerdo con la metodología, sin embargo estuvo sujeto a varios supuestos; el caso específico de la revisión de la operación hidráulica del funcionamiento de las presas, escapa a los alcances de esta tesis, por lo que se generan datos aproximados, pero que proporcionan una visión general de la situación de los últimos años del sistema así como sus proyecciones bajo los escenarios A1B y A2 para los modelos GFDL ECHAM y HADGEM de cambio climático.

El desarrollo de este estudio muestra la necesidad de interactuar con distintas disciplinas que ayuden abordar los diferentes temas involucrados para la solución de un problema común, de tal forma que en conjunto permitan una propuesta para el desarrollo sustentable del recurso agua, revisando además las condiciones de cambio climático esperadas.

Dentro de las recomendaciones que podemos proporcionar con base en este trabajo se encuentran las siguientes:

- Proporcionar datos y tener un control de los consumos de agua, por parte de los organismos o instituciones encargadas de la administración del agua.

- Implementar la instalación de estaciones hidrométricas y climatológicas, que nos proporcionen datos, para realizar mediciones tanto de la disponibilidad del agua, como de su calidad para consumo humano.
- Implementar la instalación de plantas de tratamiento del agua en la región, lo que permitiría una reutilización del recurso.
- Fortalecer y desarrollar un enfoque integral del manejo de cuencas para el mejoramiento de la gestión de recursos hídricos y forestales.
- Realizar medición a nivel macro, que es la que se refiere a cuantificar los caudales captados, conducidos y distribuidos, para una mejor planeación, diseño, construcción, operación, mantenimiento y administración de los sistemas operadores de agua potable y alcantarillado; así como una medición a nivel micro es decir cuantificar periódicamente el consumo de cada usuario con la finalidad de que los consumos sean racionales, así como para facturación y un equilibrio entre la oferta y la demanda.
- Realizar estudios de: dotaciones reales en cada sector, determinación de volúmenes de agua y comparación de la demanda de ésta, evaluación de condiciones hidráulicas de funcionamiento del sistema, estadísticas que permitan evaluar la operación, mantenimiento y uso eficiente del agua.
- Detectar y reparar fugas en los municipios.
- Diseñar y establecer programas de uso eficiente del agua en el sector doméstico, agrícola e industrial, así como campañas de comunicación y educación de uso del agua y reglamentación que sustente el mejor manejo del agua, junto con una política tarifaria adecuada.



## Referencias

- Aboites, L.; Cifuentes, E.; Jiménez, B. y Torregrosa, M.L. (2008) Agenda Nacional del Agua, Academia Mexicana de Ciencias, México, D.F.
- Ackerman F. (2008). Critique of cost-benefit analysis, and alternative approaches to decision-making. A report to friends of the Earth England, Wales and Northern Ireland. Disponible en [http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/Ack\\_UK\\_CBACritique.pdf](http://www.ase.tufts.edu/gdae/Pubs/rp/Ack_UK_CBACritique.pdf)
- Agrawala, S. y Fankhauser, S. (eds.), (2008) Economic Aspects of Adaptation to Climate Change: Costs, Benefits and Policy Instruments. OECD, Paris 133pp ISBN 978-9-26404-603-0.
- Aparicio, F., (1992). Fundamentos de hidrología de superficie, 1ª edición, 1ª reimpresión, Ed. Limusa, México.
- Azqueta, D., (1994). Valoración económica de la calidad ambiental, 1ª edición, Mc Graw Hill, Madrid.
- Barzev, R. (ed.) (2002) Guía metodológica de valoración económica de bienes, servicios e impactos ambientales: un aporte para la gestión de ecosistemas y recursos naturales en el CBM, Serie técnica 04, Proyecto para la consolidación del Corredor Biológico Mesoamericano, Managua, Nicaragua. Disponible en línea en: [www.biomeso.net](http://www.biomeso.net).
- Bates, B.C.; Kundzewicz, Z.W.; Wu, S. y Palutikof, J.P. (eds.) (2008). Climate Change and Water. Technical Paper of the Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva.
- Blaney H. F. y Criddle, W.D. (1950). Determining water requirements in irrigated areas from climatological and irrigation data. USDA Soil conserve. Serv. SCS-TP96.
- Booker, J. F.; Howitt, R. E.; Michelsen, A. M. y Young, R. A. (2012). Economics and the modeling of water resources and policies. *Natural Resource Modeling*, 25(1), 168-218.  
doi: 10.1111/j.1939-7445.2011.00105.x
- Campos A. D. F., (2002). Estimación de la ETP en la República Mexicana con base en el método de Penman. (Primera parte: Teoría y datos utilizados). XVII Congreso Nacional de Hidráulica, Monterrey, N.L.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2002). NOM-011-CNA-2000: Conservación del recurso agua. Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, Diario Oficial de la Federación, 17 de abril de 2002, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2009). Estadísticas del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII, Aguas del Valle de México. Edición 2009. Primera Edición, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010a). Boletín hidrológico 62: Datos del Valle de México, cuenca del Río Tula y zona de influencia del Sistema Cutzamala correspondientes al año 2009. Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010b). Compendio del Agua de la Región Hidrológico-Administrativa XIII: Lo que se debe saber del Organismo de Cuenca Aguas del Valle de México, Secretaría del Medio ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010c). Estadísticas del agua de la cuenca del Río Balsas, 2010. Primera edición, Comisión Nacional del Agua, Organismo de Cuenca del Balsas, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010d). Estadísticas del agua en México, edición 2010. Edición digital, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2010e). Hacia una estrategia de gestión integrada de cuencas: microcuencas del Sistema Cutzamala, Segundo coloquio internacional cuencas sustentables, Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, México.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA), (2011a): Almacenamiento de Presas sistema Cutzamala 2011 disponible en: <http://www.conagua.gob.mx/CONAGUA07/Temas/CUTZAMALA.pdf>
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (2011b) Situación del Subsector Agua Potable, Alcantarillado y Saneamiento. Edición 2011, pp 96

- Conde, A. y Gay, C. (2008). Guía para la generación de escenarios de cambio climático a escala regional, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Conde, C., Estrada, F. Martínez, B. Sánchez O. y Gay C. (2011). Regional climate change scenarios for México, *Atmósfera* 24(1), 125-140
- Consejo Nacional de Población (CONAPO), (2011). De la población de México 2005-2050, disponible en [http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com\\_content&view=article&id=36&Itemid=234](http://www.conapo.gob.mx/index.php?option=com_content&view=article&id=36&Itemid=234)
- Coutagne, A., (1954). Étude de quelques correlations hydrométéorologiques regionales et leur interpretation algebrique: La Houille blanche, *3 journées de l'Hydraulique de la Societé Hydrotech de France*, Paris, p 220-226.
- Davidson M.D. (2006). A social discount rate for climate damage to future generations based on regulatory law. *Climatic Change* 76(1-2): 55-72.
- Diario Oficial de la Federación (DOF) (2003). Determinación de zonas críticas para la recarga de acuíferos, 31 de enero de 2003, Comisión Nacional del Agua, México.
- Domínguez, R.; Jiménez B.; Kauffer E.; Martínez-Austria P.; Montesillo J.; Palerm J.; Román A.; Ruelas L.; y Zapata, E. (2012) en "Los recursos hídricos en México", Cap. 11 en *Diagnóstico del agua en las Américas*, Jiménez B. y J. Galizia (coords.), Foro consultivo científico y tecnológico, A.C., México, pp. 309-257.
- Draper A.J. y Lund J.R. (2004), *Optimal Hedging and Carryover Storage Value*, J. Water Resources. Plann. Manage. **130**(1), 83–87.
- Escolero, O., Martínez S., Kralisch S. y Perevochtchikova M., (2009). Vulnerabilidad de las fuentes de abastecimiento de agua potable de la Ciudad de México en el contexto de cambio climático, Informe final, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Estrada, F., (2011). Revisión de metodologías de reducción de escala utilizadas en los documentos nacionales de México, Coloquio de Modelación del Clima, Retos y Oportunidades, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Estrada, F. y Martínez, B. (2011). La economía del cambio climático en la Ciudad de México, Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, Universidad Nacional autónoma de México, México.
- European Commission (2013) Perspectivas de la evolución mundial hasta 2030 en los ámbitos de la energía, la tecnología y la política climática. Research & Innovation Energy. Consultado el 28/01/2013. Disponible en: [http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key\\_messages\\_es.pdf](http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/key_messages_es.pdf)
- Fankhauser S. y Tol R.S.J. (2005). On climate change and economic growth. *Resource and Energy Economics* 27(1): 1-17
- Galarza E. y Von Hesse M. (2011) Costos y beneficios de adaptación al cambio climático en América Latina. Cooperación Alemana al Desarrollo (GIZ). Lima.
- Galindo, L., (2009). La economía del cambio climático en México, síntesis. SHCP, SEMARNAT, México.
- González-Reynoso, A. (coord.)(2010) Evaluación externa del diseño e implementación de la política de acceso al agua potable del Gobierno del Distrito Federal Informe final. Universidad Nacional Autónoma de México Coordinación de Humanidades Programa Universitario de Estudios sobre la Ciudad.
- Hadjer, K, Klein, T. y Schopp, M. (2005). Water consumption embeddein its social context. Northwestein Benin, *Phys. Chem Earth special issue*, **30**(6-7), 357-364.
- Hamon, W. R., (1963). Computation of direct runoff amounts from storm rainfall. *Int. Assoc. Sci. Hydrol. Pub.* **63**, 52-62.
- Hargreaves, G.H y Samani, Z.A. (1982). Estimating potential evapotranspiration, *J. Irrigation and drain Engr.*, ASCE, **108** (IR3), 223-230.

- Harou J.L., Pulido-Velazquez, M. Rosenberg, D.E. Medllin-Azura, J. Lund, J.R. y Howitt R.E. (2009), *Hydro-Economic Models: Concepts, Design, Applications and Future Prospects*, J. Hydrol. **375**, 627–643.
- Polatidis H.; Haralambopoulos, D.; Munda, G. y Vreeker, R. (2006): Selecting an Appropriate Multi-Criteria Decision Analysis Technique for Renewable Energy Planning, Energy Sources, Part B: Economics, Planning, and Policy, 1:2, 181-193
- Howitt, R.E., Ward, K.B. y Msangi, S. (2001), *'Statewide Agricultural Production Model (SWAP)'*, Department of Agricultural and Resource Economics. Davis, California. University of California.
- Ibarrarán M., (2007). Estudio sobre economía del cambio climático en México INE/ADE-008/2007, Instituto Nacional de Ecología y Universidad Iberoamericana Puebla, México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), (2007). *Tercera Comunicación nacional ante la convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático*. Instituto Nacional de Ecología, SEMARNAT, México.
- Instituto Nacional de Ecología (INE), (2009). Priorización y recomendaciones de acciones de conservación en las subcuencas del Sistema Cutzamala, Dirección de manejo integral de cuencas, Dirección general de investigación de ordenamiento ecológico y conservación de ecosistemas, México.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (2005). Guía para la interpretación de cartografía climatológica, México, disponible en:  
[http://www.inegi.gob.mx/prod\\_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/clima/CLIMATI.pdf](http://www.inegi.gob.mx/prod_serv/contenidos/espanol/bvinegi/productos/geografia/publicaciones/guias-carto/clima/CLIMATI.pdf)
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, (2011). Censo de población y vivienda 2010, México, disponible en:  
<http://www.inegi.org.mx/sistemas/mexicocifras/default.aspx?src=487&e=15>
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007). Cambio climático 2007. Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Equipo de redacción principal: Pachauri, R.K. y Reisinger, A. (directores de la publicación)]. IPCC, Ginebra, Suiza.
- Jiménez B., M.L. Torregrosa, A. Aboites (eds.), (2010), El agua en México: cauces y encauces, Academia Mexicana de Ciencias, México.
- Köppen, W., (1936). Das geographische system der Klimate, in Handbuch der Klimatologie, Köppen, W. and Geiger, G., 1. C. Gebr, Borntraeger, 144, 1936.
- Lafragua, J., Gutiérrez, A. Aguilar, E. Aparicio, J. Mejía, R. Santillán, O. Suárez M.A. y Preciado, M (2003), Balance Hídrico del Valle de México, Anuario IMTA 2003, México.
- Maderey R., L. E., A. Jiménez R., M. E. Cea H. y C. Torres R., (1995), Aplicación de un modelo climatológico para conocer la disponibilidad de agua en cuencas de clima húmedo en la República Mexicana, en México ante el Cambio Climático. Segundo Taller de Estudio de País: México, pp. 159-164.
- Maderey R., L. E. y A. Jiménez R., (2009). Los Recursos hidrológicos del centro de México ante un cambio climático global, Instituto de Geografía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Maderey, R. (2005) Principios de Hidrogeografía, Estudio del Ciclo Hidrológico, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geografía, México, ISBN 970-32-2965-4.
- Martínez-Alier, J., Munda G. y O'Neill J. (1998). Weak comparability as a foundation for ecological economics, *Ecological Economics* 26 (1998) 277-286.
- Martínez-Alier J. y Roca J. (2001). *Economía Ecológica y Política Ambiental*. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica.
- Martínez-Alier, J., (ed.) (1995): Los principios de la economía ecológica (Textos de Podolinsky, Geddes y Soddy), ArgenteriaVisor, Madrid.
- Martínez-Alier, J. (2002): The environmentalism of the poor. A study of ecological conflicts and valuation, Edward Elgar, Cheltenham UK, Northampton MA.

- Martínez-Austria, P. y Patiño-Gómez, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México. *Tecnología y Ciencias del Agua* 3(1), Jiutepec, Mor., Instituto Mexicano de Tecnología del Agua.
- McCarl, B.A., Dillon, C.R. Keplinger, K.O. y Williams R.L. (1999), *Limiting Pumping from the Edwards Aquifer: An Economic Investigation of Proposals, Water Markets, and Spring Flow Guarantees*, *Water Resour. Res.* **35**(4), 1257–1268.
- McKinney, D. Cai, X., Rosegrant, M.W Ringler, C. y Scott C.A. (1999), *Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future Directions*, *SWIM Paper 6*, International Water Management Institute, Colombo.
- Mijaylova, P., Sandoval, L., González, A., Garzón, M., Moeller, G., Fuentes, M., Gómez A. y García J. (2003), Tratamiento avanzado de aguas residuales y su reutilización como fuente para uso primario, Anuario IMTA 2002, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Munasinghe, M. (1993) Environmental Issues and Economic Decisions in Developing Countries. *World Development*, Vol.21, No.11, pp. 1729-1748
- Munda, G. (1995) NAIADE software <<http://weadapt.org/knowledge-base/adaptation-decision-making/NAIADE>>
- Munda, G. (1997) Environmental Economics, Ecological Economics, and the Concept of Sustainable Development, *Environmental Economics*, *Enviromental Values* 6, 213-233.
- Munda G. (2002), Métodos y Procesos Multicriterio para la Evaluación Económico-Ambiental de las Políticas Públicas, Universidad Autónoma de Barcelona. Barcelona. 132
- Nakicenovic N. y Swart R. (eds.) (2000). *Special Report on Emissions Scenarios. A Special Report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge: Cambridge University Press.
- Nieswiadomy, M.L. (1992): Estimating urban residential water demand: effects of price structure, conservation, and education. *Water Resources Research* **28**(3), 609-615.
- Ospina, J.E, Gay C., Conde, A.C. Magaña, V. (2009). Vulnerability of water resources in the face of potential climate change: generation of hydroelectric power in Colombia, *Atmósfera* **22**(3), 229-252.
- Pearce, D.W., Groom, B., Hepburn, C. y Koundouril, P. (2003) Valuing the future. Recent advances in social discounting. *World Economics*, 4(2), 121-141.
- Penman, H. L., (1948). Natural evaporation from open water, bare soil and grass. *Proc. Royal Society London* **A**(194), S 120-145.
- Pengue, W.A. (2011). En “La economía ecológica y el desarrollo en América Latina”, capítulo 6 en *Vertientes del pensamiento agroecológico: fundamentos y aplicaciones* León Sicard, Tomás Enrique y Altieri, Miguel Angel. (eds.) Universidad Nacional de Colombia, Instituto de Investigaciones Ambientales-IDEA: Sociedad Científica Latinoamericana de Agroecología. Colombia.
- Perló M y González-Reynoso A (2005) Guerra por el agua en el valle de México? Estudio sobre las relaciones hidráulicas entre el Distrito Federal y Estado de México, Coordinación de Humanidades PUEC UNAM y Fundación Friedrich Ebert México, 144 pp. ISBN 970-32-2968-9
- Priestley, C. H. B. y Taylor, R. J., (1972). On the assessment of surface heat flux and evaporation using large scale parameters. *Mon. Weath. Rev.* **100**, 82–92.
- Romero, A. y Sánchez, M. (2005) *Estado actual de los métodos de estimación de la evapotranspiración. Aplicación a la cuenca del río Quipar*, *Nimbus*, No- **15-16**, ISSN 1139-7136, 2005, 189-202.
- Saldívar, A., (2007) Las Aguas De La Ira: Economía Y Cultura Del Agua En México. ¿Sustentabilidad O Gratuidad? Facultad de Economía, Universidad Nacional Autónoma de México, México.
- Sánchez, A. (1987) Conceptos elementales de hidrología forestal. Agua, cuenca y vegetación Vol. I. Universidad Autónoma de Chapingo, México.
- Samaniego J.L y Bonilla J.P. (coords.) (2010), Cambio climático una perspectiva regional: Cumbre de la Unidad de América Latina y el Caribe, Naciones Unidas, Santiago de Chile. <http://www.eclac.cl/cgi->

- bin/getProd.asp?xml=/publicaciones/xml/9/38539/P38539.xml&xsl=/dmaah/tpl/p9f.xsl&base=/tpl/top-bottom.xsl
- Segeer, C. y Villodas, R. (2006). Hidrología I, Universidad Nacional de Cuyo, Argentina.
- Soto, G. y Herrera, M. (2009). *Estudio sobre el impacto del cambio climático en el servicio de abasto de agua de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México*, Centro Virtual de Cambio Climático de la Ciudad de México, Universidad Nacional autónoma de México, Gobierno del Distrito Federal, México.
- Stern, N., (2006). *Stern Review: La economía del cambio climático.*, UK Treasury, Reino Unido.
- Thiessen, A.H., (1911). Precipitation averages for large areas. *Monthly Weather Review*, **39**(7), 1082-1084.
- Thornwaite, C.W., (1948). An approach toward a rational classification of climate, *Geographical Review*, **38**(1), 55-94.
- Tol R.S.J. (2009). The economic effects of climate change. *Journal of Economic Perspectives* 23(2): 29-51.
- Turc, L., (1963). Evaluation des besoins en eau d'irrigation, évapotranspiration potentielle, formulation simplifiée et mise à jour. *Ann. Agron.* **12**, 13-49.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (1981). Métodos de cálculo del balance hídrico: Guía internacional de investigación y métodos, editada por: Sgkolov, A. y Chapman T., Instituto de Hidrología de España, UNESCO, España.
- United Nations Educational Scientific and Cultural Organization (UNESCO) (2006). Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas. Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4, Uruguay.
- Van den Bergh J. (2009). Safe climate policy is affordable: twelve reasons. *Climatic Change* 101(3-4): 339-385.
- Ward Philip J., Pauw Pieter, Brander Luke M., Aerts Jeroen, C.J.H.(2010) Costs of Adaptation Related to Industrial and Municipal Water Supply and Riverine Flood Protection Development and Climate Change, The World Bank, Washington D. C. <http://water.worldbank.org/publications/costs-adaptation-related-industrial-and-municipal-water-supply-and-riverine-flood-prote>
- World Bank (2009), The Costs to Developing Countries of Adapting to Climate Change: New Methods and Estimates *The Global Report of the Economics of Adaptation to Climate Change Study - Consultation Draft* disponible en internet: <http://siteresources.worldbank.org/INTCC/Resources/Executivesummary.pdf>
- World Bank (2010a), Adaptation to Climate Change, Vulnerability Assessment and Economic Aspects Plurinational State of Bolivia
- World Bank (2010b), Economics of Adaptation to Climate Change, Synthesis Report <http://climatechange.worldbank.org/sites/default/files/documents/EACCSynthesisReport.pdf>
- Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., Huber-Lee, A., (2005). WEAP21 – A demand-, priority-, and preference-driven water planning model part 1: model characteristics. *Water International* 30 (4), 487-500.

Anexo A

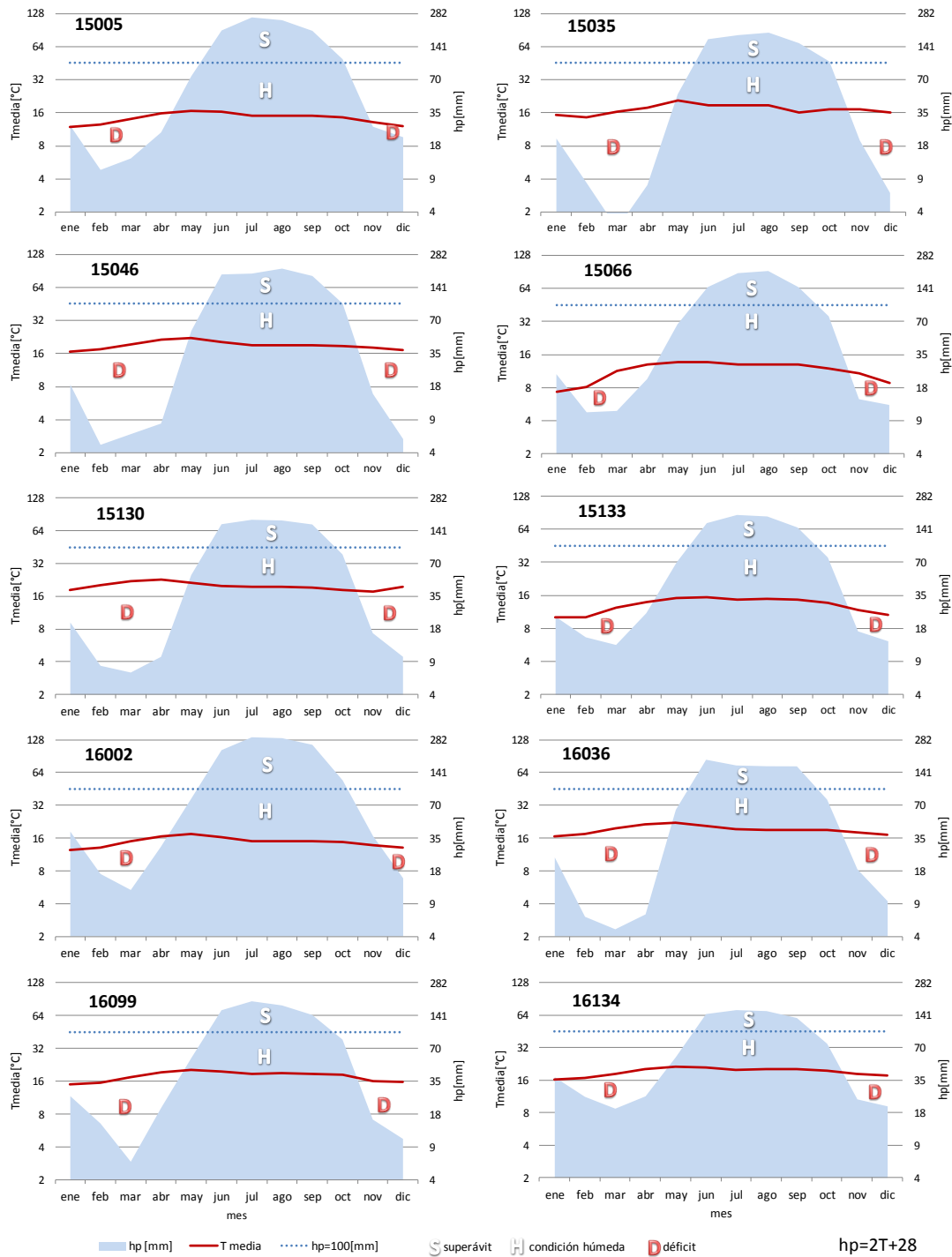
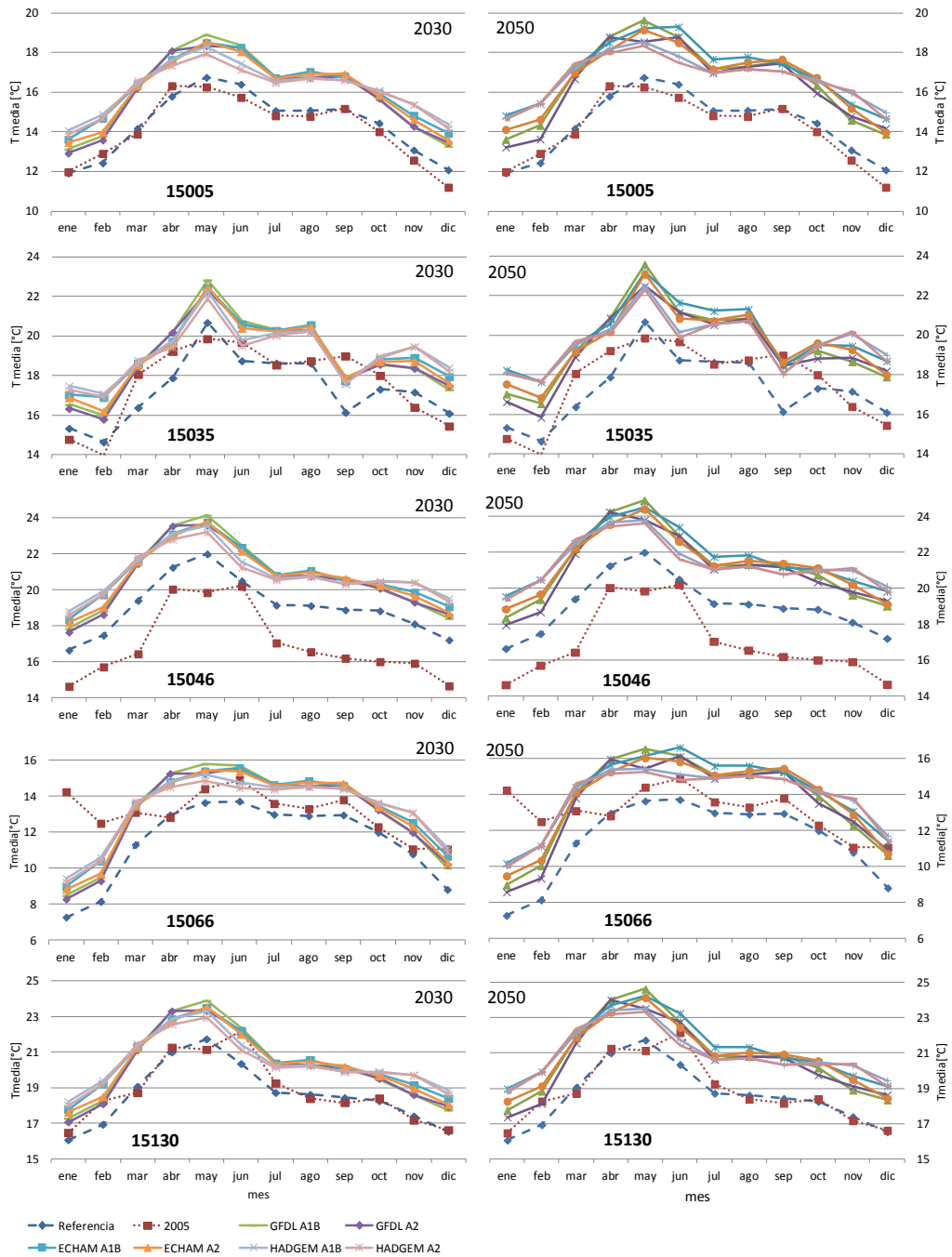


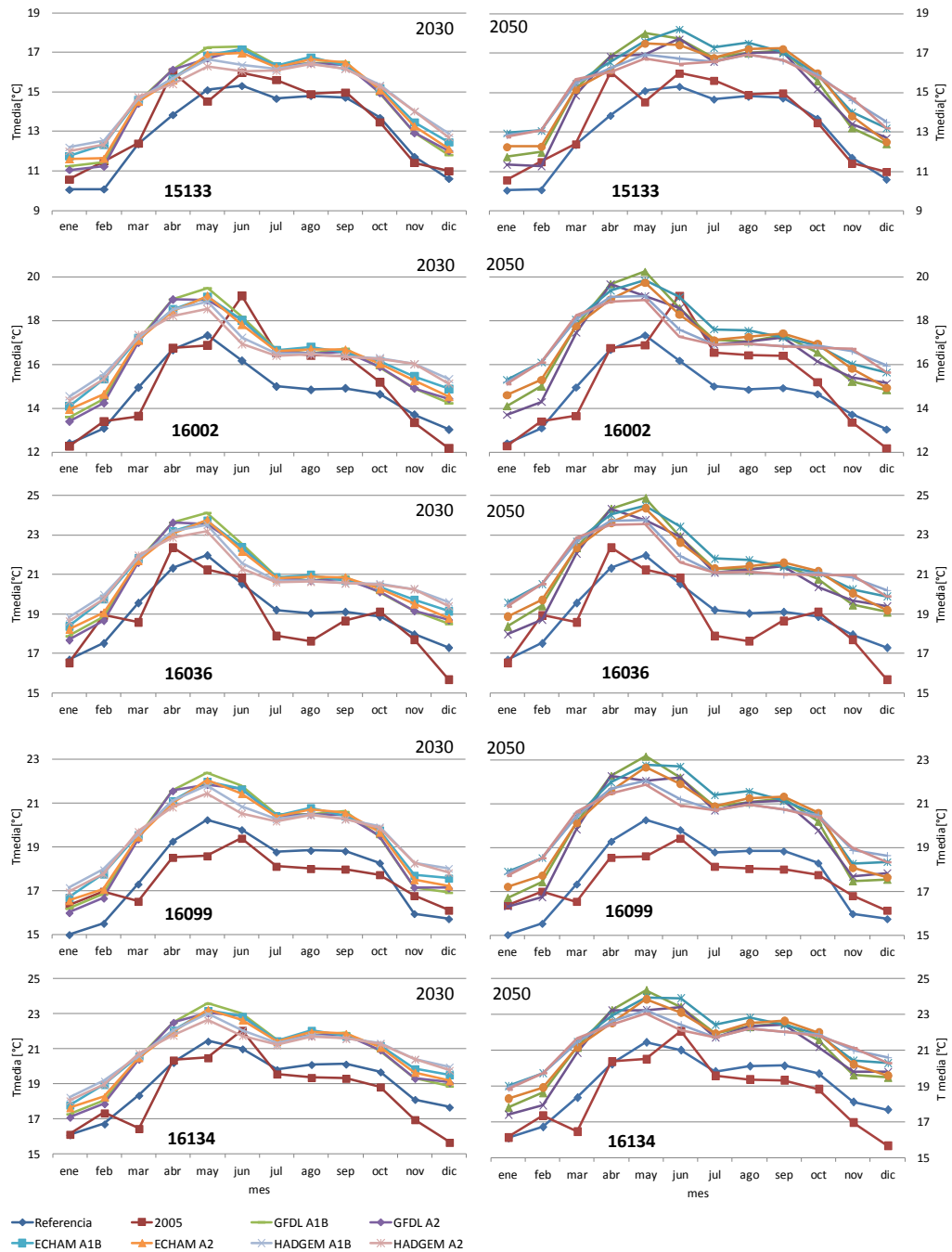
Figura A.1 Diagrama ombrotérmico para la línea de referencia (1961-1985)



**Figura A.2a** Línea de referencia (1961-1985), año 2005 y proyecciones bajo escenarios de cambio climático para la variable de temperatura, horizontes 2030 y 2050

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.





**Figura A.2b** Línea de referencia (1961-1985), año 2005 y proyecciones bajo escenarios de cambio climático para la variable de temperatura, horizontes 2030 y 2050

Fuente: Elaboración propia con datos de CLICOM, 2008 y PCIC, 2011.



Anexo B



Figura B1. Comparación de pares mediante NAIAD para el escenario base



Figura B2. Comparación de pares mediante NAIAD para el escenario GFDL A2

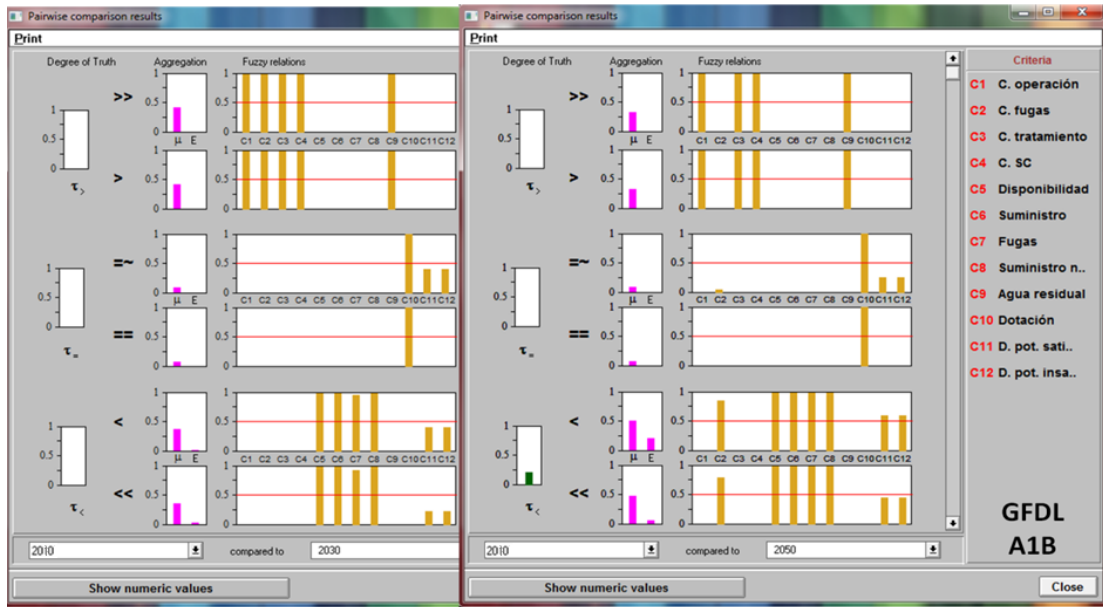


Figura B3. Comparación de pares mediante NIADE para el escenario GFDL A1B

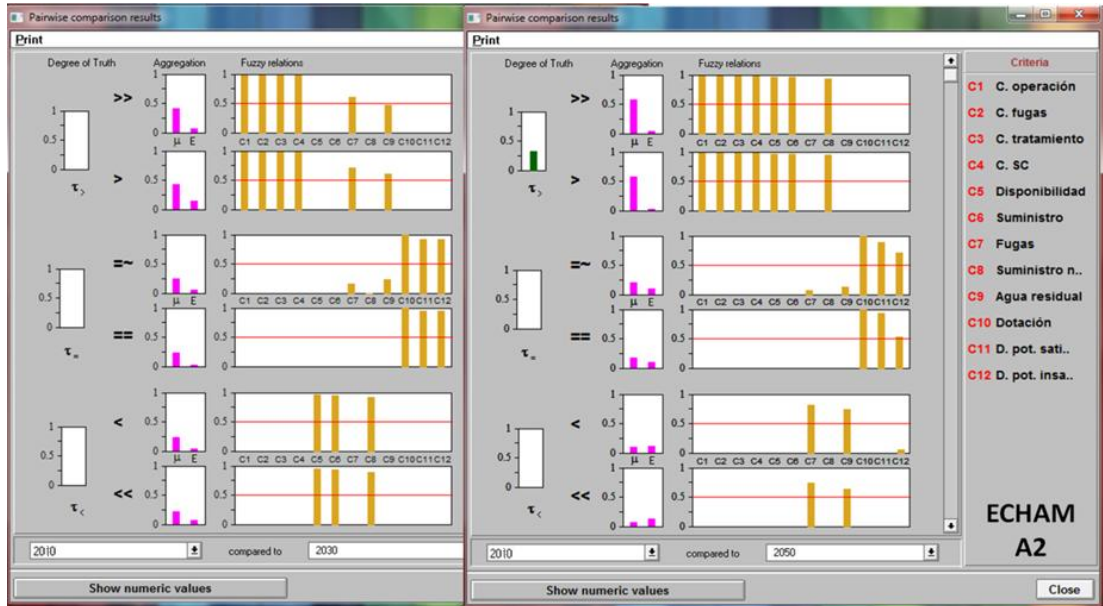


Figura B4. Comparación de pares mediante NIADE para el escenario ECHAM A2



Figura B5. Comparación de pares mediante NAIAD para el escenario ECHAM A1B



Figura B6. Comparación de pares mediante NAIAD para el escenario HADGEM A2

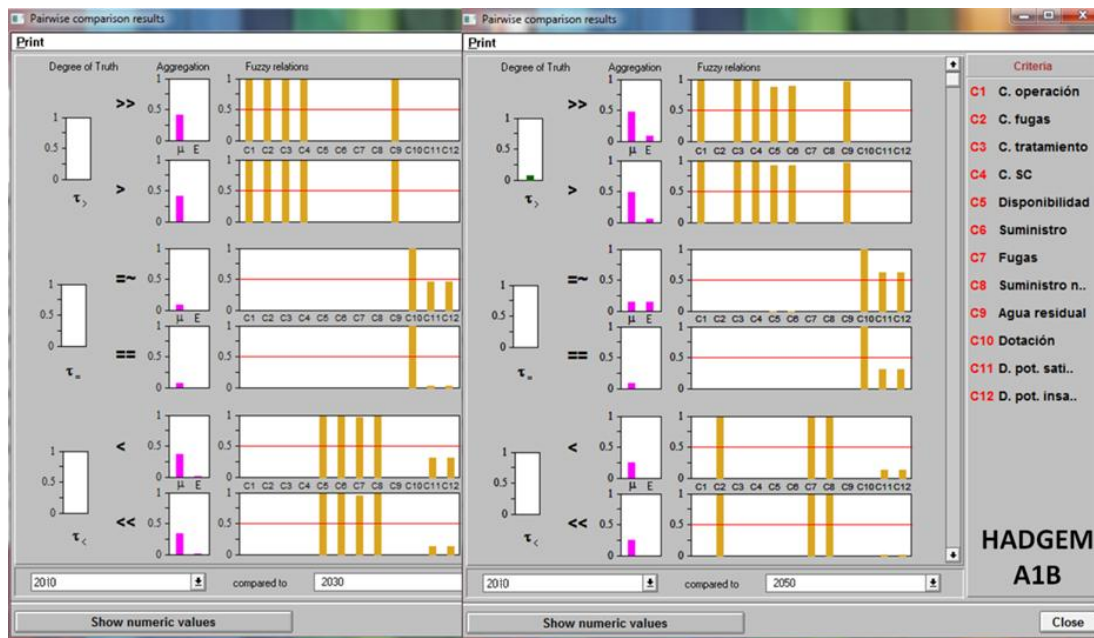


Figura B7. Comparación de pares mediante NAIAD para el escenario HADGEM A1B