



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional



Evaluación de los recursos hídricos

Elaboración del balance hídrico integrado por
cuencas hidrográficas

phi-LAC

Programa Hidrológico Internacional de la UNESCO
para América Latina y el Caribe

PHI-VI / Documento Técnico N° 4



Autores:

Javier Aparicio Mijares
Jaqueline Lafragua Contreras
Alfonso Gutiérrez López
Roberto Mejía Zermeño
Ernesto Aguilar Garduño





Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional

Evaluación de los recursos hídricos

Elaboración del balance hídrico integrado por cuencas hidrográficas

..... Documento Técnico del PHI - LAC N° 4



Publicado en el 2006 por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Oficina Regional de Ciencia para América Latina y el Caribe de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO).

Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso, 11200 Montevideo, Uruguay

Documento Técnico del PHI-LAC, N° 4
ISBN 92-9089-090-8

© UNESCO 2006

Las denominaciones que se emplean en esta publicación y la presentación de los datos que en ella figura no suponen por parte de la UNESCO la adopción de postura alguna en lo que se refiere al estatuto jurídico de los países, territorios, ciudades o zonas, o de sus autoridades, no en cuanto a sus fronteras o límites. Las ideas y opiniones expresadas en esta publicación son las de los autores y no representan, necesariamente, el punto de vista de la UNESCO.

Se autoriza la reproducción, a condición de que la fuente se mencione en forma apropiada, y se envíe copia a la dirección abajo citada. Este documento debe citarse como:

UNESCO, 2006. Evaluación de los Recursos Hídricos. Elaboración del balance hídrico integral por cuencas hidrográficas.
Documentos Técnicos del PHI-LAC, N°4.

Dentro del límite de la disponibilidad, copias gratuitas de esta publicación pueden ser solicitadas a:

Programa Hidrológico Internacional
para América Latina y el Caribe (PHI-LAC)
Oficina Regional de Ciencia para América
Latina y el Caribe
UNESCO
Dr. Luis P. Piera 1992, 2º piso
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: + 598 2 413 20 75
Fax: + 598 2 413 20 94
E-mail: phi@unesco.org.uy
<http://www.unesco.org.uy/phi>

Diseño y Armado:
Rocío Sampognaro

Montevideo, Uruguay

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	5
1. OBJETIVOS	9
2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN	9
2.1 Cartas topográficas digitales escala 1:50,000	9
2.2 Cartas edafológicas y de uso de suelo digitales escala 1:250,000	9
2.3 Información climatológica	9
2.4 Información hidrométrica	9
2.5 Volumen anual de extracción de agua, superficial y subterránea	9
2.6 Información de acuíferos existentes en la zona de estudio	10
2.7 Información de los principales cuerpos de agua	10
3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO	11
3.1 Cálculo del balance de agua superficial	11
3.1.1 Selección de estaciones climatológicas	11
3.1.2 Cálculo de la precipitación	14
3.1.3 Cálculo de la evaporación en los cuerpos de agua	14
3.1.4 Cálculo de la evapotranspiración	18
3.1.4.1 Recopilación de información	18
3.1.4.2 Fórmulas	19
3.1.4.3 Procesamiento de la información	20
3.1.4.4 Cálculo de la evapotranspiración	20
3.1.5 Cálculo de los volúmenes de consumo	26
3.1.5.1 Recopilación de la información básica	27
3.1.5.2 Estimación de los consumos unitarios	28
3.1.5.3 Validación de los consumos	31
3.1.5.4 Regionalización	32
3.1.5.5 Análisis de resultados	33
3.1.6 Retornos de agua	33
3.1.7 Importaciones y exportaciones	34
3.1.8 Pérdidas en redes de agua potable	34
3.1.9 Cálculo del volumen de escurrimiento virgen o por cuenca propia	34
3.1.9.1 Coeficiente de escurrimiento	35
3.1.10 Volumen medio de escurrimiento a la salida de la cuenca	36
3.2 Cálculo del balance de agua subterránea	36
3.2.1 Entradas	38

3.2.1.1	Infiltración y recarga de lluvia	38
3.2.1.2	Recarga inducida y artificial	40
3.2.1.3	Flujo lateral subterráneo	42
3.2.2	Salidas	44
3.2.2.1	Evaporación y evapotranspiración de las aguas subterráneas	44
3.2.2.2	Descarga por manantiales	45
3.2.2.3	Extracción por bombeo	45
3.2.3	Cambio de almacenamiento	46
3.3	Balance integrado	47
4.	VARIABILIDAD E INCERTIDUMBRE DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO	49
4.1	Variabilidad de los componentes	49
4.2	Incertidumbre de los componentes	54
	REFERENCIAS	59
	ANEXOS	
	Anexo 1. Resultados de los balances efectuados en la cuenca del Valle de México y Patzcuaro	63
	Anexo 2. Disponibilidad de agua superficial en México	67
	Anexo 3. Norma Oficial Mexicana 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"	71

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, en casi todos los países de América Latina y el Caribe se han sucedido reformas en las legislaciones y organizaciones orientadas a la gestión y el aprovechamiento del recurso agua. La diversidad de culturas, climas, así como las actividades políticas y financieras en cada uno de estos países ha ocasionado que cada día se busquen nuevos y mejores procedimientos para llevar a cabo una correcta gestión integrada de los recursos hídricos. Asimismo, los procesos de globalización y regionalización hidrológica permiten cada día afinar el detalle de los estudios hasta lograr una correcta administración a nivel de cuencas; con la consecuente reducción del papel del Estado. La responsabilidad del Estado se traduce de esta forma, en asumir la supervisión, fomento y regulación de las actividades de terceros y la descentralización de responsabilidades hacia los gobiernos locales (Jouravlev, 2001). Bajo la premisa de que una búsqueda constante de instrumentos de planeación permite un mayor acercamiento entre el sector privado y los usuarios comprometidos con la gestión y el aprovechamiento del agua; se puede afirmar que en los próximos años el manejo de los recursos hídricos será cada día más complejo. Se debe aceptar que los problemas hidráulicos del mañana no pueden ser resueltos con base en el análisis de los problemas del ayer y mucho menos si se utilizan los mismos enfoques del pasado. Además, cada día un mayor número de soluciones para el sector hidráulico provendrá de áreas diferentes al sector y de otras profesiones; lo cual trae como consecuencia que las soluciones deben ser específicas. Soluciones que funcionan en Francia, Alemania, Inglaterra o Estados Unidos, pueden no ser útiles en China, India, Egipto o México, debido a las diferencias climáticas, físicas, económicas, sociales, ambientales, legales y/o institucionales. Un sólo paradigma puede no ser válido o aplicable para todos los países debido a sus diferentes grados de desarrollo socioeconómico, sin importar que tan atractivo pueda ser el concepto (Del Castillo, 2005). Para llegar a soluciones regionales y locales, sin duda el marco normativo es fundamental para llevar a cabo esta tarea.

La situación actual del marco jurídico en el sector agua para Latinoamérica se encuentra en proceso de desarrollo, ya que diversos países de América Latina y el Caribe se encuentran en la fase de impulsar cambios en las legislaciones y organizaciones orientadas a la gestión y el aprovechamiento del agua. Por ejemplo, en Guatemala la Ley General de Aguas se presentó al Congreso de la República en agosto del 2004. En República Dominicana existe la Ley de Agua y la Ley General de Medio Ambiente y Recursos Naturales (2000). En México la nueva Ley de Aguas Nacionales (2004) representa una normativa pionera en el sector. En otros países sin embargo, se cuenta con leyes promulgadas hace una veintena de años, pero que sin embargo están en procesos de consulta y cambio. Por ejemplo, dentro del marco legal existente en El Salvador se tiene la Ley sobre Gestión Integrada de los Recursos Hídricos N° 886 (1981) y el Reglamento de la Ley sobre gestión integrada de los Recursos Hídricos (1982). Por lo que respecta a Honduras, el marco legal lo constituye la Ley de Aprovechamiento de Aguas Nacionales por decreto (1927). Dentro de las leyes relacionadas con el agua en Nicaragua, se tiene la Ley de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Sanitario y La Ley General del Medio Ambiente y de los Recursos Naturales (1996). En Costa Rica está por aprobarse la renovación de la Ley de Aguas en Costa Rica, promulgada en 1942. Para Panamá el recurso agua y su uso tiene rango constitucional, existe entre otros el Decreto Ley 35 del 22 de septiembre de 1965 (regula el marco legal básico del agua). Dentro del marco jurídico de Cuba, existe el Decreto de Ley N° 138 Ley de Aguas Terrestres (1993) y la Ley del Medio Ambiente N° 81 (1997). El marco jurídico en el

sector agua en Colombia presenta dos decretos: uno, el No. 1541 de 1978 por el cual se reglamenta la parte III del libro II del Decreto Ley 2811 de 1974; "De las aguas no marítimas" y parcialmente la Ley 23 de 1973. El segundo el Decreto 2811 de 1974 por el cual se dicta el Código Nacional de Recursos Naturales Renovables y de Protección al Medio Ambiente. En Venezuela existe la Ley Forestal de Suelos y Aguas (1966). Pioneros en la legislación ambiental, en Ecuador la actual ley de aguas requiere que *honorarios sean cobrados* por el agua utilizada en irrigación y propósitos industriales. Cada provincia tiene su propia agencia para la cobranza de estos *honorarios* y la nueva ley permitirá financiar proyectos a través de este sistema de *honorarios*. Esto incluirá hidroenergía, abastecimiento de agua y control de inundaciones; asimismo, permitirá que un "retorno mínimo" sea establecido e incluye algunos aspectos de regulación ambiental.

En Perú la gestión hídrica está normada por la Ley General de Aguas que se promulgó el 24 de Julio de 1969, estableciendo que la administración del sector agua recae en el Sector Agricultura y la distribución de la misma en las organizaciones de los usuarios. En Bolivia, con la aprobación de la Ley de Ordenamiento del Poder Ejecutivo, son las instituciones públicas quienes tienen a su cargo la administración del agua. En Chile, el sector hídrico está normado por el Código de Aguas, que en su artículo 5 se declara que las aguas son bienes nacionales de uso público. De 1994 a 2001 se llevó a cabo en Uruguay, el Programa de Manejo y Conservación de Recursos Naturales y Desarrollo del Riego (PRENADER) para el manejo integrado de cuencas hidrográficas. Este mismo proceso de aprobar leyes y regulaciones ambientales relacionadas con el sector agua se desarrolla actualmente en Paraguay. En Argentina aunque no se cuenta con una Ley Nacional de Aguas que comprenda todo el país. Actualmente se delega a las provincias la gestión de los recursos naturales en su territorio, incluyendo obviamente los recursos hídricos.

Toda esta normativa ha permitido sin duda reunir esfuerzos hacia la correcta gestión del recurso. Sin embargo el estudio de la disponibilidad en cantidad y calidad se vuelve prioritario en el marco del desarrollo sustentable de un país. Es por esto que la Ley de Aguas Nacionales en México exige estimar la disponibilidad media anual de las aguas superficiales para efectos de concesión o asignación del recurso. En este aspecto, los balances hídricos son la clave para conocer la disponibilidad de agua en Latinoamérica. A la fecha se han realizado estudios y proyectos en diversos países de Latinoamérica para determinar el balance y disponibilidad hídrica para cada país. En Guatemala, por ejemplo, la variable a utilizar para estimar un cierto *capital hídrico* es el caudal medio anual que en este caso corresponde a 3,207 m³/s para una población total de 11,986,558 habitantes, lo que da por resultado un capital hídrico de 8,436 m³/hab/año (López, 2002). Por su parte en El Salvador se cuenta con un estudio amplio para un modelo de balance hídrico. El modelo del balance hídrico del SNET (Servicio Nacional de Estudios Territoriales), como en la mayoría de los casos, considera los siguientes componentes de entradas: precipitación, importaciones superficiales de otra cuenca, retornos de la demanda. Las salidas consideradas son las siguientes: evapotranspiración real, evaporación de cuerpos de agua, evaporación en áreas urbanas, escurrimiento superficial, demanda interna en la cuenca, demanda externa de la cuenca. Como cambio de almacenamiento se considera: la recarga de acuíferos y la variación de nivel en cuerpos de agua como lagos, lagunas o embalses (SNET, 2005).

En Honduras, como un indicador del recurso se utiliza la precipitación media anual por superficie territorial y un cierto caudal promedio, todo bajo un esquema de balance hídrico que arroja una oferta de 14,776.6 m³/persona/año (Alonso, 2002). Para Nicaragua el balance hídrico y

disponibilidad de agua tienen el *Potencial de Agua* que son las aguas superficiales y aguas subterráneas para satisfacer la demanda de distintos usuarios (doméstico, riego, ganadería, industria, generación de energía y ecología). El total de la demanda asciende a 20,886 hm³ y la disponibilidad es del orden de 98,085 hm³ (Silvac, 2002). La situación en Costa Rica para calcular el balance hídrico se consideran entre otros factores el escurrimiento superficial y la recarga de acuíferos, la precipitación y la evapotranspiración. Existe una oferta potencial dispuesta en este país de 112 km³/año. Esta información es reconocida y dispuesta como referencia en diferentes documentos de diagnósticos nacionales, como en el Panorama Nacional de 1997 denominado: Balance Anual Social, Económico y Ambiental realizado por el Ministerio de Planificación. Como resultado se tiene un capital hídrico de 29,580 m³/hab (CNHM, 2002). El balance hídrico en Panamá incluye los sectores en los cuales se ha dividido el uso del agua, como son el uso doméstico (familiar habitacional, uso municipal, comercial y gubernamental), el agrícola (agua para irrigación y ganadería) e el industrial (del agua para el enfriamiento de las plantas y la producción industrial). La metodología de este país arroja un capital hídrico per capita de 51,750 m³/hab/año. El aporte de la metodología presentada en Panamá radica en que el balance propone incluir una interconexión entre el agua superficial y el agua subterránea. (Donoso, 2002).

La lluvia como única fuente de alimentación de los procesos hidrológicos en una cuenca hidrológica es sin duda, uno de los componentes más importantes dentro de la ecuación de balance. En este aspecto, los países con un régimen de lluvia netamente estacionario o con amplias zonas desérticas, son propensos a presentar largos períodos de escasez o de exceso. Por ejemplo, en Cuba la lámina media anual de precipitación ha sido estimada en 1,375 mm, pero este componente hidrológico está influenciado por la presencia de tormentas tropicales de notable capacidad pluvial. El balance hídrico del territorio cubano, sin embargo, ha evaluado los recursos de agua en 32.2 hm³, de los cuales 23.2 millones corresponden al escurrimiento superficial (Planos, 1997). En República Dominicana los recursos hídricos potenciales (superficial y subterráneo) tienen valores de 20,995 hm³ y 1,510 hm³ al año respectivamente. El volumen potencial de agua per cápita aprovechable anualmente se estima en 2,711 m³/hab, sin considerar la contribución directa de la lluvia (Planos, 2001). Para Colombia, las entradas para el balance hídrico representan sobre todo variables naturales, más que variables fisiográficas. Por ejemplo la humedad del suelo y la humedad de la vegetación (IDEAM, 2001). En Ecuador se tiene un promedio anual de lluvia de 1,200 mm, pero no está distribuida en forma uniforme y el país puede ser dividido entre cinco principales regiones climáticas de acuerdo a las precipitaciones, sin embargo, en conjunto Ecuador tiene un capital hídrico de 40,000 m³/hab/año (USCE, 1998). En Perú el volumen de agua explotable tanto superficial como subterránea asciende a 2,046,000 hm³ y 2,740 Mm³, respectivamente (Emmanuel y Escurra, 2000). Aunque en Bolivia, no se tiene un informe nacional para cuantificar el aporte de agua subterránea, sus caudalosos ríos aportan un gasto promedio de 17,000 m³/s (río Madera en la Amazonia), de 61 m³/s (río Desaguadero) y de 181 m³/s y 197 m³/s en los ríos Bermejo y Pilcomayo respectivamente (Mattos y Crespo, 2000). En Chile, el escurrimiento superficial produce anualmente 29,411 m³/s debido a una precipitación media anual estimada en 1,522 mm y a una evaporación y evapotranspiración de 311 mm/año (Salazar, 2003). Dentro de las distribuciones espaciales del recurso más irregulares, sin duda es la de Argentina en donde se estima que la oferta hídrica media anual es de 22,500 m³/hab/año (Calcano *et al.*, 2000). En contraste, en Uruguay se extraen solamente 241m³/hab/año, teniendo una disponibilidad máxima de 18,900 m³/hab/año, por lo que puede decirse que Uruguay dispone de abundantes recursos hídricos (Achkar, 2004). A este respecto, El potencial hídrico en Paraguay

es el tercero mayor en Latinoamérica (sólo después de Guayana y Surinam) y se estima en aproximadamente 63,000 m³/hab/año. En México se cuenta con una disponibilidad natural media per cápita de 4,547 m³/hab/año de la cual 693 corresponden a extracciones de agua subterránea (Conagua, 2004). Todos estos estudios sin duda deben contemplar cierta normativa para poder llevar a cabo balances y estudios de disponibilidad que en un futuro puedan compararse y aprovecharse para la toma de decisiones. A continuación se presenta la metodología empleada en México para este propósito.

1. OBJETIVOS

El objetivo general de este documento es presentar una metodología para obtener balances hídricos por cuencas hidrográficas. Dentro de éste objetivo se plantea como una actividad fundamental la recopilación de información, básica para el cálculo de balances hídricos.

2. RECOPIACIÓN DE INFORMACIÓN

2.1 Cartas topográficas digitales escala 1:50,000

Se requiere información básica como la localización geográfica (latitud, longitud) de la zona de estudio, curvas de nivel, corrientes naturales (perennes e intermitentes), manantiales, límites municipales, vías terrestres, poblaciones, etc. Con ésta información se elabora un plano base, el cuál se utiliza para delimitar las cuencas de estudio, se muestran los principales ríos que aportan escurrimiento natural; así como, los principales cuerpos de agua (presas y lagos).

2.2 Cartas edafológicas y de uso de suelo digitales escala 1:250,000

Esta información será utilizada para el cálculo del escurrimiento medio anual mediante métodos indirectos (apartado 3.1.9) en las cuencas donde no se cuente con información hidrométrica.

2.3 Información climatológica

Se integrará una base de datos por estación con sus respectivas variables climatológicas diarias, como precipitación, evaporación, temperatura, radiación solar, humedad relativa, velocidad y dirección del viento. Con esta base de datos, se estimarán los valores mensuales y anuales para un periodo mínimo de 25 años. En caso necesario se aplicarán técnicas regionales (método de la avenida índice y estaciones-año) para la extensión y complemento de registros.

2.4 Información hidrométrica

Se recopilarán los gastos medios diarios de las estaciones hidrométricas ubicadas dentro de la zona de estudio, para calcular el volumen de escurrimiento aguas abajo de un punto de control, para un periodo mínimo de 25 años. En caso necesario se aplicarán técnicas regionales (método de la avenida índice y estaciones-año) para la extensión y complemento de registros.

2.5 Volumen mensual de extracción de agua, superficial y subterránea

Un componente fundamental, en la ecuación de balance de agua, es el volumen anual de extracción de agua (superficial y subterránea). Para poder determinar esta variable de manera directa se requieren estadísticas de volúmenes de agua por sectores (urbano, agrícola, industrial, etc.).

También se debe recolectar información relacionada con las concesiones de agua ubicadas dentro de la región en estudio, los datos mínimos que se requieren de éstas son los siguientes:

- a) Número de identificación: Este campo permitirá identificar cada una de las concesiones de agua.
- b) Coordenadas geográficas, en grados, minutos y segundos: Esta información permitirá la localización espacial de cada uno de los aprovechamientos.
- c) Cuenca: Indicará a qué cuenca hidrográfica pertenece cada aprovechamiento.
- d) Fuente: Este parámetro debe señalar si el volumen de agua concesionado proviene de una fuente superficial o subterránea.
- e) Uso: Las concesiones deben estar agrupadas de acuerdo a los principales usos de agua en la zona de estudio, por ejemplo: agrícola, público-urbano, pecuario, industrial, acuicultura, generación de energía eléctrica, etc
- f) Volumen de extracción mensual: Se debe especificar el volumen de agua aprovechado por cada tipo de uso.

g) Localización geográfica (Estado o provincia, Municipio o Canton y Localidad).

En caso de no contar con información, los volúmenes de extracción de agua se pueden estimar de manera indirecta (ver apartado 3.1.5).

2.6 Información de acuíferos existentes en la zona de estudio

La información mínima que se requiere comprende los límites oficiales (georeferenciados), área del acuífero, evolución de los niveles piezométricos, así como la conductividad hidráulica y la capacidad de almacenamiento, entre otras características hidrogeológicas (ver apartado 3.2).

De no contar con la información señalada anteriormente, se requiere contar con información geológica, específicamente, el marco geológico regional, censo de fuentes de abastecimiento subterránea, la litoestratigrafía y la geología; hidrogeología del subsuelo, así como la hidrogeoquímica (componentes químicos analizados conjuntamente con la hidrogeología), los volúmenes de extracción de bombeo y la evolución de los niveles piezométricos.

2.7 Información de los principales cuerpos de agua

Se solicitará a las instancias correspondientes la información de curvas elevación-área-volumen (batimetría) de los principales cuerpos de agua (presas, lagos, etc.). En el caso de los vasos de almacenamiento, también es necesario su funcionamiento mensual y para los lagos o lagunas se requiere información de niveles diarios.

3. ESTIMACIÓN DEL BALANCE SUPERFICIAL Y SUBTERRÁNEO

Se hará el balance superficial y subterráneo por separado. El intervalo de tiempo para el balance superficial será un mes, y para el subterráneo un año, sin embargo para este último se hará una desagregación mensual tomando en cuenta la distribución en el tiempo de algunas de las variables hidrológicas.

3.1 Cálculo del balance de agua superficial

La ecuación básica para realizar un balance hídrico es $\frac{dV}{dt} = E - S$, la cuál expresa que la variación

del volumen V es igual a las entradas (E) menos las salidas (S) de agua para un intervalo de tiempo t específico.

La ecuación de balance, tomando como plano de referencia la superficie, se plantea como:

$$\Delta V = (Cp + Ar + Re + Im) - (Ab + U + Ev + Ex) \quad (3.1.1)$$

donde:

ΔV	Variación de volumen,
Cp	Escorrentamiento natural por cuenca propia,
Ar	Escorrentamiento aguas arriba,
Re	Retornos de agua,
Im	Importaciones desde cuencas vecinas,
Ab	Escorrentamiento a la salida de la cuenca (aguas abajo),
U	Usos del agua,
Ev	Evaporación en cuerpos de agua, y
Ex	Exportaciones hacia cuencas vecinas.

Todas las variables son volúmenes de agua, expresadas en hectómetros cúbicos (hm^3) y el intervalo de tiempo es de un mes. Para obtener cada una de las variables anteriores se recomienda lo siguiente:

3.1.1 Selección de estaciones climatológicas

La selección de estaciones se utilizará para obtener una descripción espacial de las variables climatológicas que inciden en la producción o consumo de agua en la zona de estudio. La mayoría de las estaciones generan información pluvial, temperatura y evaporación; sin embargo, es común encontrar varias estaciones que solo registran una de estas variables climatológicas. Los registros utilizados para la selección de las estaciones son los de precipitación, los cuáles se utilizan posteriormente para cuantificar el volumen de lluvia en la cuenca.

El procedimiento es el siguiente:

1. Se ubican todas las estaciones climatológicas dentro y en el entorno cercano de la cuenca. En la figura 3.1.1, se muestran todas las estaciones climatológicas que han sido seleccionadas por un cuadrante (latitud y longitud).
2. Se descartan las estaciones climatológicas que no tienen influencia en la cuenca, apoyándose con los polígonos de Thiessen, figura 3.1.1. Cuando un polígono no tiene influencia en la zona de estudio (polígono con rayado), la estación correspondiente se descarta al igual que las demás estaciones que están fuera de la cuenca. En la figura 3.1.2 se muestran las estaciones seleccionadas.

Cabe aclarar que para esta etapa no es necesario un trazo preciso de los polígonos, ya que hasta aquí sólo se trata de discriminar las estaciones que no tienen área de influencia en la cuenca. Por

esta misma razón tampoco es necesario trazar todos los polígonos (como se observa en figura 3.1.1), ya que se tiene la certeza de que las estaciones climatológicas ubicadas dentro de la zona de estudio serán seleccionadas.

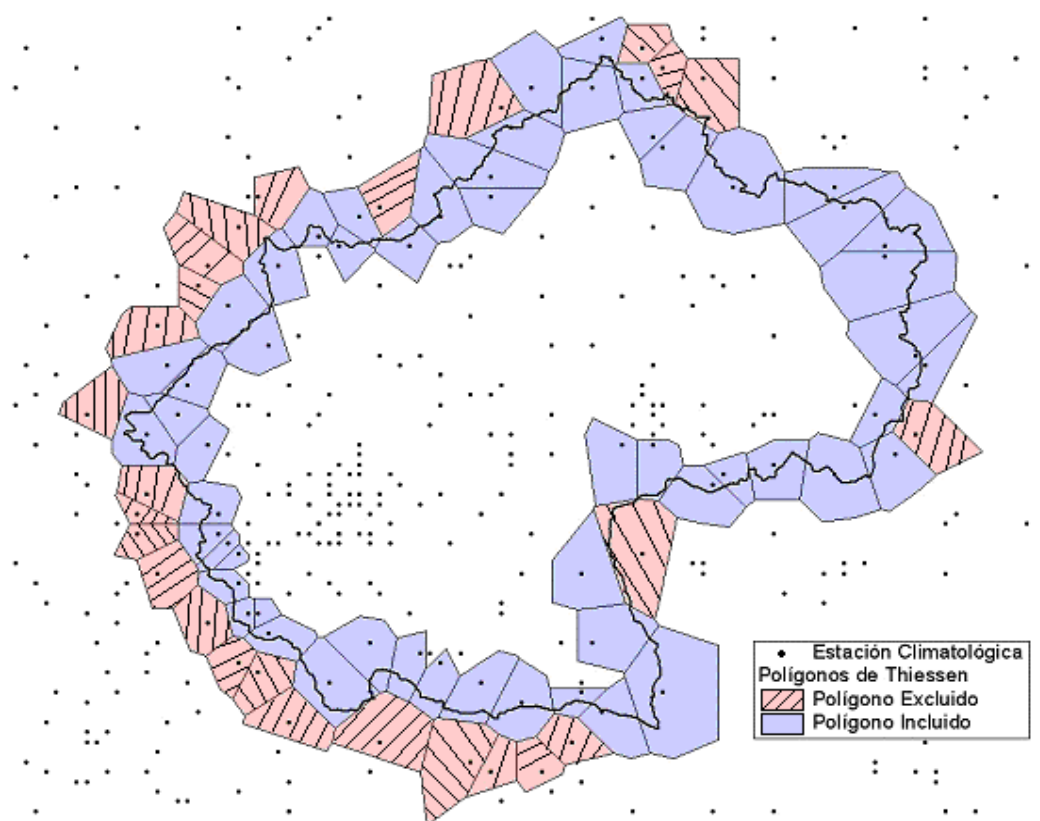


Figura 3.1.1 Ubicación de las estaciones climatológicas

3. Se eliminan las estaciones climatológicas que no cumplen con un período de registro común. El Manual para la estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas (CNA, 1998) recomienda un registro de por lo menos 25 años. Sin embargo, el rango puede ser menor (por ej. 10 años) si existen pocas estaciones en la zona de estudio.

4. Finalmente, se discriminan las estaciones que presentan alguna inconsistencia en cuanto a su información como se describe a continuación.

Al analizar la información media mensual o anual 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 o con interpolación espacial. La distribución de la precipitación promedio mensual o anual con registros erróneos produce en el mapa una distribución inconsistente con el resto de la información, como se observa en la distribución media anual mostrada en la figura 3.1.3, en círculos.

Por ejemplo, en la figura 3.1.3 se observa que en el rango de 600 a 700 mm, existen zonas menores a 500 mm e incluso mayores a 700 mm, por lo que se debe revisar la información que presenta discrepancias, con el fin de corregirla o para eliminar estaciones.

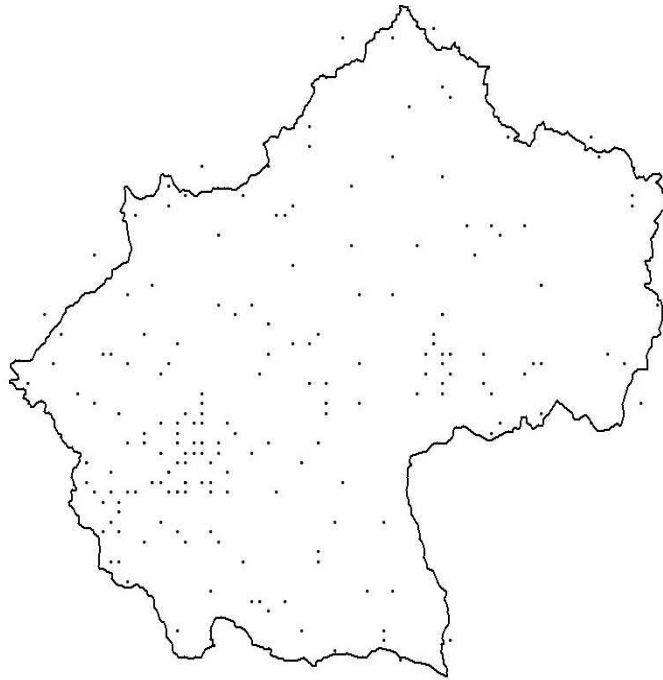


Figura 3.1.2 Estaciones climatológicas seleccionadas, con influencia en la cuenca, mediante polígonos de Thiessen

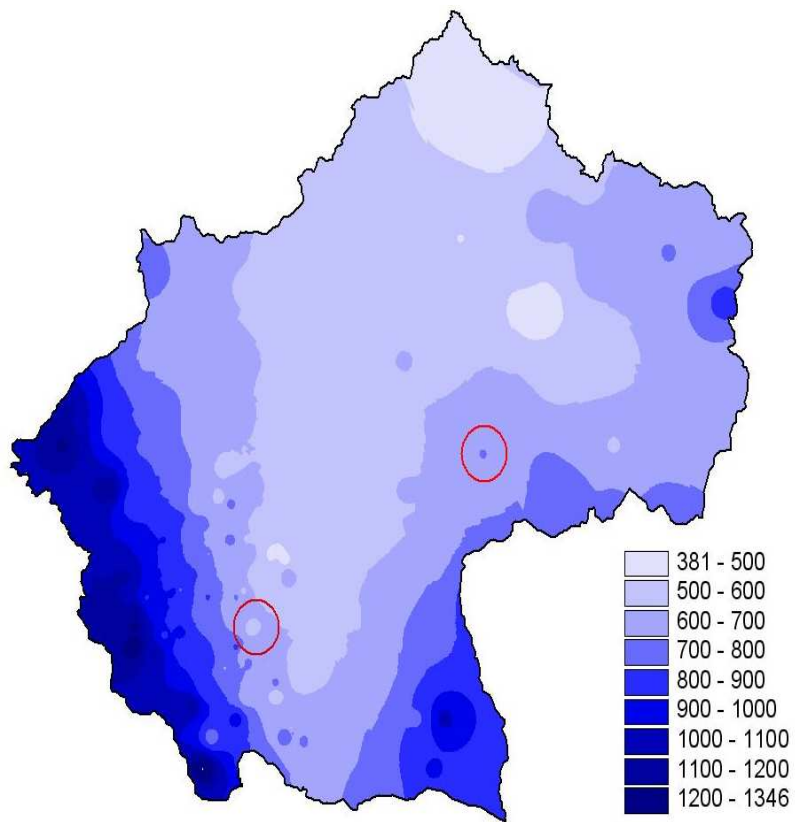


Figura 3.1.3 Precipitación media anual inconsistente (mm)

3.1.2 Cálculo de la precipitación

De los métodos que existen para estimar la precipitación media mensual o anual, dos de los más conocidos son: el de las isoyetas y el de los polígonos de Thiessen (Aparicio, 1997).

El *método de las isoyetas* es más preciso, pero tiene la desventaja de que se tienen que calcular las isoyetas para cada evento o para la precipitación acumulada de acuerdo con el intervalo de tiempo de interés. El método consiste básicamente en obtener curvas con igual lámina de precipitación, calcular el área entre dos curvas y multiplicarla por la lámina de precipitación media.

El *método de los polígonos de Thiessen* es más sencillo de aplicar, pues consiste en obtener el área de influencia de cada una de las estaciones climatológicas. 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.

En el cálculo del volumen por cuenca propia (ver apartado 3.1.9) el componente básico es el volumen de lluvia, el cuál se estima con la siguiente expresión

$$VII = P A \quad (3.1.2)$$

donde

VII	Volumen de lluvia, hm ³
P	Precipitación media mensual, m
A	Área de la cuenca, m ²

Actualmente con la existencia de software como el ArcView, con el módulo análisis espacial, se puede cuantificar el volumen de precipitación, como se describe a continuación.

Se grafican los puntos que representan las estaciones climatológicas, cada uno de esos puntos tiene un registro con los datos de precipitación mensual y anual; a partir de esos registros se hace una interpolación espacial obteniéndose un archivo parecido a una malla o retícula rectangular (también conocido como archivo tipo grid). Una vez generado este archivo se puede obtener el valor en cada una de las celdas de la malla. El usuario define las características de la malla, que generalmente están descritas por el tamaño de la celda rectangular y la extensión se hace coincidir, en este caso, con los límites de la cuenca.

Como la malla necesariamente es rectangular, a las celdas que están fuera de la cuenca, el Arcview les asigna el valor "No data" (sin dato) y a las celdas que integran la cuenca se les asigna un valor interpolado a partir de los registros de las estaciones climatológicas.

Las ventajas al utilizar estos sistemas son: una mejor descripción espacial de la distribución de la lluvia, al tener en cada celda un valor de precipitación; el cálculo del volumen de lluvia se hace de manera sencilla a partir de la lámina de precipitación sobre una área conocida equivalente al tamaño de la retícula; y el cálculo del volumen de precipitación es más rápido que con los polígonos de Thiessen.

3.1.3 Cálculo de la 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, ésta variable se evalúa en forma independiente, tanto de manera espacial como temporal, utilizando métodos directos a través de mediciones con evaporímetros (también conocidos como evaporímetros o tanques de evaporación) y de las características de los cuerpos de agua, o bien mediante métodos indirectos, con datos del clima.

Para obtener los volúmenes evaporados durante cada mes del año en los cuerpos de agua, utilizando datos de evaporímetros, se recomienda el siguiente procedimiento:

1. Se identifican los cuerpos de agua importantes. Para lo cual, se utilizan cartas topográficas, planos cartográficos, imágenes de satélite, etc.
2. A cada cuerpo de agua se le asocia una estación climatológica cercana, que cuente con registros en el periodo del balance. La selección de cada estación climatológica estará relacionada con la cantidad y consistencia de los registros históricos. Si existe más de una estación cercana se utilizan los polígonos de Thiessen para obtener valores medios mensuales.
3. Para el cálculo de la evaporación en el cuerpo de agua, se utilizan los valores medios mensuales obtenidos en el punto 2, corregidos por un coeficiente de reducción. Este coeficiente varía en un rango de 0.6 a 0.8 (Aparicio, 1997).
4. Por último, el valor obtenido en el punto 3 se multiplica por el área del cuerpo de agua, obtenida de la información recopilada o inferida en función del nivel de la superficie libre del agua. 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.

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{h_o - G}{HV} + \left\{ \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} f(V) (e(a) - e(d)) \right\} \quad (3.1.3)$$

donde

E_p	Evaporación potencial diaria, mm
Δ	Pendiente de la curva de presión de vapor de saturación, kPa/°C
γ	Constante psicrométrica, kPa/°C
h_o	Radiación neta, MJ/m ²
G	Flujo de calor del suelo, MJ/m ²
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 vaporización es estimada como una función de la temperatura.

$$HV = 2.5 - 0.0022 T \quad (3.1.4)$$

donde

T	Temperatura media diaria en °C
-----	--------------------------------

La presión de vapor de saturación, también es estimada como una función de la temperatura usando la siguiente ecuación:

$$e(a) = 0.1 e^{\left(54.88 - 5.03 \ln(T+273) - \frac{6791}{T+273} \right)} \quad (3.1.5)$$

La presión de vapor es estimada como una función del valor de saturación y la humedad relativa RH expresada como una fracción.

$$e(d) = e(a) RH \quad (3.1.6)$$

donde

RH Presión de vapor en kPa

La pendiente de la curva de presión de vapor de saturación se estima con la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{e(a)}{T + 273} \left\{ \frac{6791}{(T + 273) - 5.03} \right\} \quad (3.1.7)$$

La constante psicrométrica es calculada con la siguiente ecuación:

$$\gamma = 6.6 e^{10^{-4} PB} \quad (3.1.8)$$

donde

PB Presión barométrica en kPa

La presión barométrica es estimada como una función de la elevación usando la siguiente ecuación:

$$PB = 101 - 0.0115 Z + 5.44 e^{10^{-7} \sqrt{Z}} \quad (3.1.9)$$

donde

Z Elevación del sitio, en m

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

$$R_n = R_i(1-r) - R_{nl} \quad (3.1.10)$$

donde

R_n Radiación neta

R_i Radiación incidente

r Albedo ($r=0.05$ para grandes masas de agua)

R_{nl} Radiación neta de onda larga

Todas las variables expresadas en cal/cm²/día, excepto el albedo que es adimensional.

La radiación incidente se determina como:

$$R_i = R_E \left(a + b \frac{n}{N} \right) \quad (3.1.11)$$

donde

R_E Radiación en el tope de la atmósfera o extraterrestre, cal/cm²/día

a y b Constantes empíricas

n Insolación total promedio diaria, hr

N Insolación máxima posible promedio diaria, hr

$$a = 0.290 \cos \varphi; \quad b = 0.550 \quad (3.1.12)$$

$$N = A + B\{\text{sen}(30 \text{ nm} + 83.5)\} \quad (3.1.13)$$

donde

A y B Constantes que son función de la latitud del lugar φ , grados
 nm Número del mes (uno para enero y doce para diciembre) y se estiman con las siguientes expresiones:

$$A = 12.09086 + 0.00266 \varphi; \quad B = 0.2194 - 0.06988 \varphi \quad (3.1.14)$$

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

$$R_E = b_0 \varphi + b_1(\varphi - 10) + b_2(\varphi - 10)(\varphi - 20) + b_3(\varphi - 10)(\varphi - 20)(\varphi - 30) \quad (3.1.15)$$

Existen 12 ecuaciones con la forma anterior dependiendo del mes en cuestión, en la tabla 3.1.1 se presentan los valores de b correspondientes a cada mes.

La radiación neta de onda larga se calcula como

$$R_{nl} = \sigma T_2^4 (0.56 - 0.08 \sqrt{e_2}) \left(0.10 + 0.9 \frac{n}{N} \right) \quad (3.1.16)$$

donde

T_2 Temperatura del aire a 2 m de altura, °K (°K=°C+273)

σ Constante de Stefan-Boltzmann, igual a

e_2 Presión del vapor del aire a 2 m de altura, milibares (mb)

$\frac{n}{N}$ Insolación relativa, la cual se obtiene de la ecuación 3.1.11.

Los resultados de la radiación neta se obtienen en cal/cm²/día por lo que se tienen que convertir a unidades MJ/m² para sustituirse en la ecuación de Penman (ec. 3.1.3), para ello se utiliza la siguiente relación:

$$h_o = 0.041868 R_n \quad (3.1.17)$$

El valor de la variable flujo de calor de suelo G es muy pequeño, por lo tanto ésta variable se considera igual a cero. Finalmente, la función de viento $f(V)$ de la ecuación 3.1.3 se estima con la siguiente relación, donde V es la velocidad del viento media diaria (a una altura de 10 m) en m/s

$$f(V) = 2.7 + 1.63 V \quad (3.1.18)$$

Tabla 3.1.1. Valores b de requeridos en la radiación extraterrestre

Mes	b_0	b_1	b_2	b_3
Ene	760	-12	-0.075	0.0016666670
Feb	820	-9	-0.100	0.0008333333
Mar	875	-5	-0.125	0.0008333333
Abr	895	0	-0.125	-0.0008333336
May	890	4	-0.100	-0.0025000000
Jun	875	6	-0.100	-0.0016666670
Jul	880	5	-0.100	-0.0008333333
Ago	890	2	-0.125	-0.0008333336
Sep	880	-2.5	-0.150	0.0008333336
Oct	840	-8	-0.075	-0.0008333333
Nov	780	-11.5	-0.025	-0.0033333340
Dic	740	-12.5	-0.075	0.0033333340

Fuente: Campos, (2002).

3.1.4 Cálculo de la evapotranspiración

La evapotranspiración es la conjunción de dos procesos: la evaporación y la transpiración. La transpiración es el fenómeno biológico por el que las plantas transfieren agua a la atmósfera. Toman agua del suelo a través de sus raíces, una pequeña parte es para su nutrición y el resto lo transpiran. Como es difícil medir ambos procesos por separado, y además en la mayor parte de los casos lo que interesa es la cantidad total de agua que se pierde a la atmósfera, se calculan conjuntamente bajo el concepto mixto de evapotranspiración, exceptuando la evaporación en cuerpos de agua, que en este manual se estima por separado. Existen numerosas fórmulas, teóricas o semiempíricas, y procedimientos de cálculo para estimar la evapotranspiración considerando parámetros climatológicos, agrícolas e hidrológicos.

3.1.4.1 Recopilación de información

En la siguiente tabla se presenta la información requerida en el cálculo de la ET .

Tabla 3.1.2 Información necesaria en la estimación de la evapotranspiración

Datos	Fuente
Precipitación, mm, y temperatura media mensual, °C	- Servicio Meteorológico Nacional - Boletines climatológicos
Municipio/localidades existentes en la zona de estudio y coordenadas geográficas	- Anuario de estadísticas por entidad federativa
Uso de suelo (cobertura vegetal)	- Cartas digitales de uso de suelo
Tipos de cultivo y superficie de siembra	- Anuario estadístico de cultivos - Censo agropecuario - Informes de distritos de riego
Ciclo del cultivo o ciclo vegetativo	- CropWat (FAO, 1998). Es un programa desarrollado por la FAO para calcular la evapotranspiración de un cultivo de referencia utilizando la fórmula de Penman-Monteith
Fechas de siembra	- Informes de distritos de riego - Anuario estadístico de cultivos
Fechas de cosecha	- CropWat
Kc mensual para cada cultivo	- CropWat para obtener los relacionados a cultivos. - Tablas en libros de agronomía
p porcentaje de horas sol	- Tablas en libros de hidrología

3.1.4.2 Fórmulas

Formula de Blaney-Criddle (Aparicio, 1997)

Este método toma en cuenta la temperatura, horas sol diarias, tipo de cultivo, duración del ciclo vegetativo, temporada de siembra y región. La fórmula es la siguiente:

$$ET = K_c F \quad (3.1.19)$$

donde

- ET Evapotranspiración durante el ciclo vegetativo, cm
K_c Coeficiente de desarrollo vegetativo. Este valor depende del tipo de cultivo
F Factor de temperatura y luminosidad

$$F = \sum_{i=1}^n f_i$$

- n Número de meses que dura el ciclo vegetativo

$$f_i = p_i \left(\frac{T_i + 17.8}{21.8} \right)$$

- p_i Horas sol del i-ésimo mes con respecto al año, porcentaje
T_i Temperatura media del i-ésimo mes, °C

Si la zona de estudio es árida y con precipitaciones en verano, se debe introducir a la fórmula de Blaney-Criddle un factor de corrección; y además, como el ciclo vegetativo de los cultivos en algunas ocasiones no abarca meses completos, se debe considerar solamente la proporción de los días; esto es, número de días considerados entre número total de días del mes correspondiente.

Fórmula de Turc (Sánchez, 2001)

$$ET = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \left(\frac{P}{L}\right)^2}} \quad \text{Válida para } P > 0.31 L \quad (3.1.20)$$

donde

- ET Evapotranspiración real, mm/año
P Precipitación media anual, mm/año

$$L = 300 + 25T + 0.05T^3$$

donde

- T Temperatura media anual, en °C

Esta fórmula se aplica con valores anuales y posteriormente se distribuye mensualmente considerando el porcentaje de lluvia mensual.

3.1.4.3 Procesamiento de la información

Temperatura y precipitación

1. Se seleccionan las estaciones climatológicas que serán utilizadas en el cálculo de la evapotranspiración (inciso 3.1.1).
2. Con las estaciones climatológicas seleccionadas, se determina la temperatura media mensual para todo el período de registro por estación y se obtiene la temperatura media mensual por unidad administrativa, departamento o municipio/localidad¹. El mismo procedimiento se lleva a cabo para la estimación de la precipitación media mensual.

Vegetación

1. Con las cartas de uso de suelo se obtiene el tipo y las características de la vegetación existente en la zona de estudio.
2. Con esta información se agrupa la vegetación por tipo; por ejemplo, agrícola, bosque, matorral, etc., que será considerada para el cálculo de la evapotranspiración.

Cultivos

1. Se analiza cada cultivo existente en los municipios/localidades, con la finalidad de obtener:
 - a) Tipos de cultivos anuales y perennes.
 - b) Área de cultivo por municipio/localidad, en función de los ciclos primavera-verano (P-V) y otoño-invierno (O-I).
2. Para obtener K_c de cada uno de los cultivos a lo largo de su ciclo vegetativo se puede recurrir al programa CropWat (FAO, 1998) u otra fuente de información que proporcione los coeficientes de desarrollo (K_c) mensuales para cada cultivo. En la tabla 3.1.3 se presentan algunos valores utilizados en México.

p (porcentaje de horas sol)

La variable P se obtiene de valores de tablas en libros de agricultura o hidrología, conocida la latitud del municipio/localidad, tabla 3.1.4.

3.1.4.4 Cálculo de la evapotranspiración

Se aplica la fórmula de Blaney-Criddle para el cálculo en cultivos y la fórmula de Turc para estratos, tales como bosque, matorrales, pastizales u otro tipo de vegetación y se obtiene una lámina evapotranspirada. Finalmente, se estima el volumen correspondiente tomando en cuenta el área respectiva tanto de cultivos como de estratos arbóreos.

¹ El requerimiento del cálculo por municipio/localidad se debe a que la presentación de la información en los censos nacionales de un país frecuentemente utilizan esta unidad administrativa de gestión. Recomendable para una mejor integración y desagregación de las variables.

Tabla 3.1.3 Valores de K_c utilizados en el Valle de México

Ciclo O – I

Cíclicos	Fecha Siembra	Fecha Cosecha	Ciclo vegetativo, días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Periodo, meses
Acelga	01-Oct	01-Ene	120	0.90									0.37	0.68	1.00	4
Arvejón	01-Oct	27-Feb	150	1.02	0.90								0.40	0.77	1.15	5
Avena de grano																
Avena forrajera (2)	01-Oct	07-Feb	130	0.91	0.41								0.30	0.93	1.10	5
Betabel o remolacha	01-Oct	01-Feb	150	1.00	0.95								0.39	0.69	1.05	5
Brocoli (valle)	01-Oct	27-Feb	150	0.97	0.90								0.47	0.76	1.05	5
Calabaza (2)	01-Nov	04-Feb	95	1.04	0.96									0.72	0.98	4
Cebada de grano (2)																
Cebada forrajera (2)	01-Oct	29-Mar	180	0.87	0.73	0.60							0.33	0.74	1.15	6
Cebolla (valle)	01-Oct	27-Feb	150	1.16	0.94								1.15	1.16	1.38	5
Cilantro (hortalizas)	01-Ene	01-Mar	90	0.36	1.00	0.90										3
Coliflor	01-Oct	27-Feb	150	0.97	0.90								0.47	0.76	1.05	5
Chicharo	01-Nov	28-Ene	90										0.53	0.93	1.02	3
Ebo (leguminosa)	01-Oct	27-Feb	150	0.70	0.25								0.41	0.78	1.15	5
Ejote																
Elote (2)																
Espinacas	01-Nov	28-Ene	90	0.90										0.38	1.00	3
Frijol (2)	01-Nov	28-Ene	90	1.02										0.53	0.93	3
Haba seca (2)	01-Oct	27-Feb	150	1.03	0.80								0.43	0.79	1.14	5
Haba verde (2)	01-Oct	28-Ene	120	1.03									0.43	0.79	1.14	4
Hortalizas menores	01-Nov	28-Ene	90	0.90										0.38	1.00	3
Jitomate (1)	01-Nov	29-Feb	120	0.70	0.70									0.70	0.70	4
Lechuga (Hortalizas menores FAO)	01-Nov	28-Ene	90	0.90										0.38	1.00	3

Tabla 3.1.3 Valores de K_c utilizados en el Valle de México (continuación)

Cíclicos	Fecha Siembra	Fecha Cosecha	Ciclo vegetativo, días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Periodo, meses
Lenteja (leguminosa)	01-Oct	27-Feb	150	0.70	0.25								0.41	0.78	1.15	5
Maiz forrajero (2)																
Maíz grano (FAO) (2)	01-Oct	29-Mar	180	1.08	1.03	0.80							0.24	0.41	0.80	6
Papa (2)	01-Oct	11-Feb	130	1.06	0.81								0.51	0.93	1.15	5
Rabano (valle)	01-Nov	10-Dic	40											0.38	0.85	2
emolacha forrajera (valle)	01-Oct	29-Mar	180	1.00	0.95	0.80							0.36	0.70	1.05	6
Repollo (col, valle)	01-Oct	27-Feb	150	0.97	0.90								0.47	0.76	1.05	5
Romero (hortalizas menores)	01-Nov	28-Ene	90	0.90										0.38	1.00	3
Tomate verde (valle)																
Trigo grano (2)	01-Oct	29-Mar	180	1.15	0.87	0.60							0.38	0.76	0.95	6
Zanahoria	01-Oct	27-Feb	150	0.97	0.69								0.41	0.68	0.82	5

Tabla 3.1.3 Valores de K_c utilizados en el Valle de México (continuación)

Ciclo P – V

Cíclicos	Fecha Siembra	Fecha Cosecha	Ciclo vegetativo, días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Periodo, meses
Acelga	01-Abr	01-Jul	120				0.37	0.68	1.00	0.90						4
Arvejón	01-Abr	29-Ago	150				0.40	0.77	1.15	1.02	0.90					5
Avena de grano	03-Abr	30-Sep	180				0.43	0.75	0.85	1.15	0.80	0.60				6
Avena forrajera (2)	03-Abr	11-Sep	130				0.30	0.93	1.10	0.91	0.41					5
Betabel o remolacha	15-May	13-Sep	150					0.39	0.69	1.05	1.00	0.95				5
Brocoli (valle)	01-Abr	29-Ago	150				0.47	0.76	1.05	0.97	0.90					5
Calabaza (2)	01-Jun	04-Sep	95						0.72	0.98	1.04	0.96				4
Cebada de grano (2)	03-Abr	30-Sep	180				0.33	0.74	1.15	0.87	0.73	0.60				6
Cebada forrajera (2)	03-Abr	30-Sep	180				0.33	0.74	1.15	0.87	0.73	0.60				6
Cebolla valle	01-Abr	29-Ago	150				1.15	1.16	1.38	1.16	0.94					5
Coliflor	01-Abr	29-Ago	150				0.47	0.76	1.05	0.97	0.90					5
Chicharo	01-Jul	29-Sep	90							0.53	0.93	1.02				3
Ebo(leguminosa)	01-Abr	29-Ago	150				0.41	0.78	1.15	0.70	0.25					5
Ejote	01-Jul	29-Sep	90							0.38	1.00	0.90				3
Elote (2)	01-Jun	28-Oct	150						0.36	0.75	1.15	1.10	1.05			5
Espinacas	01-May	28-Jul	90					0.38	1.00	0.90						3
Frijol (2)	01-Jul	29-Sep	90							0.53	0.93	1.02				3
Haba seca (valle) (2)	01-Abr	29-Ago	150				0.43	0.79	1.14	1.03	0.80					5
Haba verde (2)	01-Mar	28-Jun	120			0.43	0.79	1.14	1.03							4
Hortalizas menores	01-May	28-Jul	90					0.38	1.00	0.90						3
Jitomate (1)	01-May	29-Ago	120					0.70	0.70	0.70	0.70					4
Lechuga (Hortalizas menores FAO)	01-May	28-Jul	90					0.38	1.00	0.90						3
Maiz forrajero (2)	01-Jun	28-Sep	120						0.02	0.41	0.80	1.08				5
Maíz grano (valle) (2)	03-Abr	30-Sep	180				0.24	0.41	0.80	1.08	1.03	0.80				6

Tabla 3.1.3 Valores de K_c utilizados en el Valle de México (continuación)

Cíclicos	Fecha Siembra	Fecha Cosecha	Ciclo vegetativo, días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Periodo, meses
Papa (2)	08-May	30-Sep	130					0.51	0.93	1.15	1.06	0.81				5
Rabano (valle)	01-Mar	09-Abr	40			0.38	0.85									2
Remolacha forrajera (valle)	03-Abr	30-Sep	180				0.36	0.70	1.05	1.00	0.95	0.80				6
Repollo (col, valle)	01-Abr	29-Ago	150				0.47	0.76	1.05	0.97	0.90					5
Romero (hortalizas menores)	01-May	28-Jul	90					0.38	1.00	0.90						3
Sorgo	01-Jun	01-Sep	120						0.32	0.71	1.10	0.55				4
Tomate verde (valle)	01-Mar	28-Jun	120			0.42	0.81	1.20	0.92							4
Trigo grano (2)	03-Abr	30-Sep	180				0.38	0.76	0.95	1.15	0.87	0.60				6
Zanahoria (valle)	01-Abr	29-Ago	150				0.41	0.68	0.82	0.97	0.69					5

Perenne

Cíclicos	Fecha Siembra	Fecha Cosecha	Ciclo vegetativo, días	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Periodo, meses
Aguacate	01-Ene	31-Dic	365	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	0.65	12
Alfalfa verde (2)	01-Ene	31-Dic	365	0.71	0.43	0.40	0.40	0.40	0.40	0.68	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	12
Capulín	01-Ene	27-Sep	270	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85				9
Ciruelo	01-Ene	27-Sep	270	0.50	0.75	0.95	1.00	1.00	0.95	0.90	0.85	0.70				9
Durazno	01-Mar	25-Nov	270			0.55	0.95	1.05	1.15	1.15	1.15	1.00	0.90	0.85		9
Membrillo(Prunus pérsica)	01-Ene	27-Sep	270	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85				9
Manzana	01-Ene	27-Sep	270	0.85	1.00	1.15	1.25	1.25	1.25	1.20	0.95	0.85				9
Pastos y praderas	01-Ene	27-Dic	365	0.95	0.95	0.95	0.89	0.85	0.85	0.85	0.85	0.85	0.89	0.94	0.95	12
Pera	01-Ene	27-Sep	270	0.05	0.70	0.85	0.90	0.90	0.80	0.80	0.75	0.65				9

Fuente: Lafragua et al 2003.

Tabla 3.1.4 Valores de P

Porcentaje de horas de sol mensual												
LATITUD NORTE	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0°	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.32	7.57	8.47	8.29	8.65	8.41	8.67	8.60	8.23	8.42	8.07	8.30
10	8.13	7.47	8.45	8.37	8.81	8.60	8.86	8.71	8.25	8.34	7.91	8.10
15	7.94	7.36	8.43	8.44	8.98	8.80	9.05	8.83	8.28	8.20	7.75	7.88
16	7.93	7.35	8.44	8.46	9.07	8.83	9.07	8.85	8.27	8.24	7.72	7.83
17	7.86	7.32	8.43	8.48	9.04	8.87	9.11	8.87	8.27	8.22	7.69	7.80
18	7.83	7.30	8.42	8.50	9.09	8.92	9.16	8.90	8.27	8.21	7.66	7.74
19	7.79	7.28	8.41	8.51	9.11	8.97	9.20	8.92	8.28	8.19	7.63	7.71
20	7.74	7.25	8.41	8.52	9.15	9.00	9.25	8.96	8.30	8.18	7.58	7.66
21	7.71	7.24	8.40	8.54	9.18	9.05	9.29	8.98	8.29	8.15	7.54	7.62
22	7.66	7.21	8.40	8.56	9.22	9.09	9.33	9.00	8.30	8.13	7.50	7.55
23	7.62	7.19	8.40	8.57	9.24	9.12	9.35	9.02	8.30	8.11	7.47	7.50
24	7.58	7.17	8.40	8.60	9.30	9.20	9.41	9.05	8.31	8.09	7.43	7.46
25	7.53	7.14	8.39	8.61	9.33	9.23	9.45	9.09	8.32	8.09	7.40	7.42
26	7.49	7.12	8.40	8.64	9.38	9.30	9.49	9.10	8.31	8.06	7.36	7.31
27	7.43	7.09	8.38	8.65	9.40	9.32	9.52	9.13	8.32	8.03	7.36	7.31
28	7.40	7.07	8.39	8.68	9.46	9.38	9.58	9.16	8.32	8.02	7.27	7.27
29	7.35	7.04	8.37	8.70	9.49	9.43	9.61	9.19	8.32	8.00	7.24	7.20
30	7.30	7.03	8.38	8.72	9.53	9.49	9.67	9.22	8.33	7.99	7.19	7.15
31	7.25	7.00	8.36	8.73	9.57	9.54	9.72	9.24	8.33	7.95	7.15	7.09
32	7.20	6.97	8.37	8.76	9.62	9.59	9.77	9.27	8.34	7.95	7.11	7.05
33	7.15	6.94	8.36	8.78	9.68	9.65	9.82	9.31	8.35	7.94	7.07	6.98
34	7.10	6.91	8.36	8.80	9.72	9.70	9.88	9.33	8.36	7.90	7.02	6.92
35	7.05	6.88	8.35	8.83	9.77	9.76	9.94	9.37	8.37	7.88	6.97	6.85
36	6.99	6.85	8.35	8.85	9.82	9.82	9.99	9.40	8.37	7.85	6.92	6.79
38	6.87	6.79	8.34	8.90	9.92	9.95	10.10	9.47	8.38	7.80	6.82	6.66
40	6.76	6.72	8.33	8.95	10.02	10.08	10.22	9.54	8.39	7.75	6.72	6.52
42	6.63	6.65	8.31	9.00	10.14	10.22	10.35	9.62	8.40	7.69	6.62	6.37
44	6.49	6.58	8.30	9.06	10.26	10.38	10.49	9.70	8.41	7.63	6.49	6.21
46	6.34	6.50	8.29	9.12	10.39	10.54	10.64	9.79	8.42	7.57	6.36	6.04
48	6.17	6.41	8.27	9.18	10.53	10.71	10.80	9.89	8.44	7.51	6.23	5.86
50	5.98	6.30	8.24	9.24	10.68	10.91	10.90	10.00	8.46	7.45	6.10	5.65
52	5.77	6.19	8.21	9.29	10.85	11.13	11.20	10.12	8.49	7.39	5.93	5.43
54	5.55	6.08	8.18	9.36	11.03	11.38	11.43	10.26	8.51	7.30	5.74	5.18
56	5.30	5.95	8.15	9.45	11.22	11.67	11.69	10.40	8.52	7.21	5.54	4.89
58	5.01	5.81	8.12	9.55	11.46	12.00	11.98	10.55	8.51	7.10	4.31	4.56
60	4.67	5.65	8.08	9.65	11.74	12.39	12.31	10.70	8.51	6.98	5.04	4.22

Tabla 3.1.4 Valores de P

Porciento de horas de sol mensual (<i>continuación</i>)												
LATITUD SUR	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic
0°	8.50	7.66	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50	8.49	8.21	8.50	8.22	8.50
5	8.68	7.76	8.51	8.15	8.34	8.05	8.33	8.38	8.19	8.56	8.37	8.68
10	8.86	7.87	8.53	8.09	7.18	7.86	8.14	8.27	8.17	8.62	8.53	8.88
15	9.05	7.98	8.55	8.02	8.02	7.65	7.95	8.15	8.15	8.68	8.70	9.10
20	9.24	8.09	8.57	7.94	7.85	7.43	7.76	8.03	7.13	8.76	8.87	9.33
25	9.46	8.21	8.60	7.94	7.66	7.20	7.54	7.90	7.11	8.86	9.04	9.58
30	9.70	8.33	8.62	7.73	7.45	6.96	7.31	7.76	8.07	8.97	9.24	9.85
32	9.81	8.39	8.63	7.69	7.36	6.85	7.21	7.70	8.96	9.01	9.33	9.96
34	9.92	8.45	8.64	7.64	7.27	6.74	7.10	7.63	8.05	9.06	9.42	10.08
36	10.03	8.51	8.65	7.59	7.18	6.62	6.99	7.56	8.04	9.11	9.51	10.21
38	10.15	8.57	8.66	7.54	7.08	6.50	6.87	7.49	8.03	9.16	9.61	10.34
40	10.27	8.63	8.67	7.49	6.97	6.37	6.76	7.41	8.02	9.21	9.71	10.49
42	10.40	8.70	8.68	7.44	6.85	6.23	6.64	7.33	8.01	9.26	9.82	10.64
44	10.54	8.70	8.69	7.38	6.73	6.08	6.51	7.25	7.99	9.31	9.94	10.80
46	10.69	8.86	8.70	7.32	6.61	5.02	6.37	7.16	7.96	9.37	10.07	10.97

Fuente: Aparicio, 1992.

3.1.5 Cálculo de los volúmenes de consumo

El objetivo de este apartado es presentar una metodología para estimar los volúmenes de consumo para los diferentes usos que puedan presentarse dentro de una cuenca o región.

En general la autoridad federal/nacional de un país autoriza la explotación, uso o aprovechamiento de sus aguas nacionales a través de lo que se denomina *concesión o asignación*. En algunos países de América Latina ya se han formado *organismos de cuenca*, los cuales también pueden ser el vínculo para otorgar dichas concesiones. Asimismo, en la mayoría de los países se promueve el otorgamiento de volúmenes para consumo, una vez que se han considerado a las partes involucradas, el costo económico y el costo ambiental de la asignación dichos volúmenes.

En México la Ley de Aguas Nacionales (LAN) autoriza la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales a través de una concesión o asignación.

LAN-ARTICULO 20.– De conformidad con el carácter público del recurso hídrico, la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales por parte de personas físicas o morales se realizará mediante concesión o asignación otorgada por el Ejecutivo Federal a través de “la Comisión” o de los “Organismos de Cuenca”, de acuerdo con las reglas y condiciones que establece la Ley y sus reglamentos. Las concesiones y asignaciones se otorgarán después de considerar a las partes involucradas, y el costo económico y ambiental de las obras proyectadas....

Con el fin de tener un panorama general sobre los diversos usos que agua que existen, se pueden distinguir 13 tipos de usos del agua²: doméstico; público urbano; abrevadero de ganado, uso para la conservación ecológica o uso ambiental; riego de terrenos; generación de energía eléctrica para servicio público; industrial; acuacultura; generación de energía eléctrica para servicio privado; lavado y entarquinamiento de terrenos; para turismo, recreación y fines terapéuticos; uso múltiple;

² La LAN de México reconoce estos 13 tipos de usos del agua

y otros. Asimismo, es importante señalar que esta explotación se lleva a cabo a través de una extracción superficial o de una extracción subterránea.

Metodología

A continuación se presenta la metodología propuesta para estimar los volúmenes de consumo para los diferentes usos dentro de una cuenca hidrológica. Es importante considerar que la estimación exacta de un volumen consumido, clasificado por uso, es un valor difícil de estimar y sobre todo difícil de verificar a través de mediciones; en todo caso, si se tiene la información, utilícela. Por esta razón se propone emplear el consumo unitario para caracterizar cada uno de los usos y posteriormente compararlos y validarlos. Es decir, se utilizarán dotaciones para estimar, por ejemplo, el consumo doméstico (litros / habitante / día). Esta caracterización permitirá generar un valor unitario por consumo y este valor a su vez, permitirá hacer una extrapolación cuando las cifras de población aumenten, por ejemplo para el caso del consumo doméstico. De esta forma, se podrá llevar al cabo una actualización periódica de los diferentes consumos. La metodología propuesta comprende cinco etapas principales: recopilación de la información, estimación de los consumos unitarios, validación de los consumos, regionalización de la cuenca y análisis de resultados.

3.1.5.1 Recopilación de la información básica

Se deberá contar con un mapa de localización de la zona, con su correspondiente división municipal, temperaturas y precipitaciones medias mensuales y anuales. De preferencia consultar esta información en la dependencia federal/estatal o local encargada de la administración de las aguas en cada país/localidad.

Para facilitar la recopilación de información y considerando que los usos del agua son muy diversos y varían según el país y la latitud, se propone agrupar los 13 usos anteriormente mencionados en consumos generales. Esta agrupación permitirá tener un panorama general de los consumos; considerando que el detalle en estos usos permitirá una estimación más precisa de los volúmenes de consumo. A continuación se presenta una tabla en donde se propone la información mínima que debe recopilarse para los principales usos, doméstico, industrial, agrícola y pecuario.

De esta forma, la estimación de los volúmenes de consumo para cada uso estará inicialmente determinada por datos históricos. Posteriormente se calibrará esta estimación según los datos actuales que puedan recopilarse. A continuación se deberá extraer de cada una de las fuentes básicas la información general para cada uno de los usos.

Tabla 3.1.5 Información mínima a recopilar por usos

Doméstico	Industrial	Agrícola	Pecuario
Base de datos del registro de usuarios de agua	Base de datos del registro de usuarios de agua	Base de datos del registro de usuarios de agua	Base de datos del registro de usuarios de agua
Sistema municipal de base de datos	Sistema municipal de base de datos	Sistema municipal de base de datos	Sistema municipal de base de datos
Censo general de población y vivienda	Censo económico nacional	Información histórica agrícola del país / censos pecuarios	Estadísticas de producción estatal, municipal o nacional / censos pecuarios
Padrón / Registro de usuarios de organismos operadores de agua potable / Facturación del agua	Padrón / Registro de usuarios de organismos operadores de agua potable / Facturación del agua	Reportes de siembras y cosechas por estado / Anuario estadístico agrícola	Inventarios ganaderos a nivel estatal, municipal o nacional

3.1.5.2 Estimación de los consumos unitarios

Con el análisis y estudio de la información citada en el punto anterior, se calculan los consumos unitarios por tipo de uso. Por ejemplo, para el caso del consumo doméstico, estos consumos unitarios estarían en función de la población servida, índice de hacinamiento. Para el caso de la industria, el consumo estará en función de la producción anual (millones de pesos) por tipo de industria y por cada subsector industrial. Los detalles de cómo calcular cada uno de los consumos se describen a continuación. Cabe mencionar que para cada uso se proponen diversos procedimientos y corresponde al usuario seleccionar el más conveniente. Asimismo, el procedimiento empleado dependerá en mucho, de la cantidad y la calidad de la información recopilada.

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. En este uso se incluyen los usos: doméstico, público urbano, servicios y múltiples. 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; mientras que el “consumo” significa el agua que se emplea realmente como materia prima que se transforma o bien, se evapora o se contamina en tal medida que inhibe su reutilización para el mismo fin sin tratamiento. Para obtener un volumen de “consumo” se recomienda consultar directamente los registros de los organismos operadores correspondientes. Sin embargo, esta información no siempre está disponible y frecuentemente es poco confiable. Otra opción consiste en afectar el valor de la “demanda” por un cierto porcentaje para transformar este volumen en un volumen real de consumo. Ciertamente, es difícil dar una cifra exacta del porcentaje de agua consumida en cada uso, en la tabla 3.1.6 se sugieren algunos órdenes de magnitud.

Tabla 3.1.6 Consumos en relación con la demanda

Uso	Consumo en porcentaje de la demanda
Urbano	10 a 20
Industrial	10 a 20
Agrícola	60 a 80

Fuente: Custodio y Llamas, 1983.

Para la estimación final de los volúmenes de consumo se sugiere aplicar los requerimientos o dotaciones a los datos censales de población. Las dotaciones respectivas se presentan en la tabla 3.1.7. Cabe recordar que para seleccionar la dotación respectiva, es necesario verificar el clima y temperatura promedio de cada localidad o sitio específico.

Otro concepto que debe tomarse en cuenta, en el caso que no se cuente con información detallada por municipios/localidades, consiste en estimar el consumo “usual” de agua en una población. Este concepto es muy útil en el sentido de que existen pequeños núcleos de población que no siempre cuentan con un padrón/registro de usuarios y que por lo tanto su consumo o demanda no se conoce con exactitud. Es decir, si no se tienen mediciones del consumo, se debe considerar que éste presenta una variación tanto estacional como diaria (Ahumada y Hernández, 2003). Típicamente se da una curva diaria con máximos a media mañana y en las primeras horas de la noche.

Estudios realizados en México (DGCOH, 1994-a y b) sugieren que el consumo racional de una familia compuesta por cuatro habitantes deberá ser distribuido como se indica en la tabla 3.1.8. A continuación se presenta la información complementaria que podría ayudar a definir el consumo de una familia. Es importante contar con la siguiente información:

- Número total de habitantes.
- Número de habitantes con servicio de agua entubada, dentro o fuera de la vivienda.

- Número de habitantes con servicio hidrante público.
- Número de habitantes con otro tipo de servicio de abastecimiento.
- Número de habitantes con servicio de drenaje.
- Número de casas.
- Número de casas con drenaje.

Tabla 3.1.7 Dotaciones para la estimación de los volúmenes del uso doméstico

Dotaciones en litros / habitante / día			
Población con agua entubada número de habitantes	Clima cálido	Clima templado	Clima frío
De 2,500 o menos	125	100	75
De 2,500 a 15,000	175	150	125
De 5,000 a 30,000	200	175	150
De 30,000 a 70,000	225	200	175
De 70,000 a 150,000	275	250	225
De 150,000 a 500,000	350	300	250
De 500,000 o más	400	350	300
Habitantes con servicio de hidrante público		60 litros / habitante / día	
Habitantes con otro tipo de servicios (pipas, acarreo manual, etc)		40 litros / habitante / día	

Fuente: Valdez, 1991 y Custodio y Llamas, 1983

Tabla 3.1.8 Consumo racional del agua en una familia de cuatro miembros

Actividad	litros / día
Cinco regaderazos (5 minutos c/u)	250
Lavar 50 platos	60
Lavar auto (c/cubeta)	40
Uso del inodoro (25 veces)	150
Cocinar 3 comidas	15
Regar 20 plantas	25
Lavar 2 cargas de ropa	160
Preparar 5 jarras de bebida	20
Total – familia	720
Total – persona	180

Fuente: DGCOH, 14 oct 2003.

Uso industrial

El volumen de consumo industrial puede estimarse de dos formas. Para la primera se requiere conocer los volúmenes extraídos y descargados por cada tipo de industria. El volumen de consumo será entonces la diferencia del volumen extraído menos el volumen descargado. El segundo procedimiento consiste en estimar el consumo de agua en función del tipo de industria³. Cabe recordar que el uso del agua en las industrias es un uso consuntivo, ya que o bien la incorporan al producto fabricado o bien la transforman por la adición de residuos, impidiendo su uso posterior para el mismo fin sin tratamiento. Como números indicativos se presenta en la tabla 3.1.9 algunos valores de la demanda de agua para los diferentes sectores.

Tabla 3.1.9 Demanda de agua en diferentes sectores industriales

Industria	m ³ /ton
Fabricación de papel	100 a 400
Químicas de base	30 a 100
Colorantes y pinturas	20 a 40
Productos aromáticos y jabones	10 a 40
Productos farmacéuticos	50 a 125
Aceites y grasas	20 a 100
Fibras	500 a 1000
Textil blanqueo y tintes	50 a 100
Textil (aprestos)	200 a 300
Textil (lavado de lana)	150 a 250
Curtidos	50 a 100
Productos alimenticios	5 a 30
Cervezas	5 a 10
Alcoholes	1 a 5

Fuente: Custodio y Llamas, 1983

Uso agrícola

El agrícola es uno de los sectores más relevantes en cuanto a consumo de agua. El uso de agua en este sector suele ser consuntivo. El volumen anual extraído para los cultivos regados se estima como la diferencia del agua requerida por la planta, uso consuntivo, menos la lluvia efectiva, considerada ésta como un porcentaje de la lluvia media anual. De la información mencionada en la tabla 3.1.5 se propone obtener la siguiente información:

- Nombre del cultivo o frutal.
- Hectáreas sembradas por cultivo.
- Valor de la producción por cultivo.
- Hectáreas sembradas totales.
- Valor de la producción total.

Como números indicativos se presenta en forma general los consumos en los principales cultivos.

³ En México, se estima el consumo de agua en función del valor de la producción. Este índice está calculado por cada cien dólares de producción y tiene su fundamento en la Ley Federal de Derechos en Materia de Agua de México. Esta ley establece las tarifas por extracción aplicables a la industria. Dicha cuota de explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales, se presenta para las diferentes zonas de disponibilidad del país (López, 2003). De una forma similar cada país puede estimar la relación entre las extracciones anuales de diversas industrias y las cuotas pagadas anualmente. En 1975 la entonces Secretaría de Recursos Hidráulicos (SRH) en México utilizó los índices de precios globales de la industria de la transformación para crear el marco de referencia de los usos del agua a nivel municipal (SRH, 1975). Este índice de extracción varía entre 0.75 y 1.56. El índice considerado para el análisis de 1975 fue de 0.82. (SRH, 1975). Sin embargo, en todos los casos se deberá hacer una estimación de este valor en función del número de industrias o de la población de la localidad en estudio. En ambos procedimientos es necesario conocer los subgrupos industriales de cada ramo industrial. La información básica que se requiere a nivel municipal para cada uso es la que puede encontrarse en los Censos Económicos e Industriales. Para cada subgrupo industrial se requiere: La clave de la industria, el número de establecimientos y el valor de la producción en miles de dólares.

Uso pecuario

En general, el uso pecuario en una cuenca es poco importante, ya que normalmente representa el 2% de la extracción total y menos del 1% del consumo total anual. Para la estimación de los volúmenes de consumo para este uso se utilizan dotaciones de una forma similar al consumo doméstico. Estas dotaciones estarán en función del número de cabezas de ganado. A continuación se presentan las dotaciones para uso pecuario en la tabla 3.1.11.

Tabla 3.1.10 Consumo de agua neto en diferentes cultivos

Cultivo	m ³ / ha / año
Cereales (1)	3600
Leguminosas (2)	5400
Huerta	13700
Frutales	4900
Otros cultivos	5700

Fuente: Custodio y Llamas, 1983

(1) Cereales: maíz, sorgo, mijo, arroz, trigo, cebada, avena y centeno

(2) Leguminosas: cacahuete, frijoles y chicharos

Otro punto importante a mencionar es que la ingesta depende de la edad, temperatura ambiental, cantidad y calidad del agua y tipos de alimentación a la que esté sometido el animal. Por ejemplo en vacas lecheras, se debe tener en cuenta que el consumo de agua se calcula de 40 a 50 litros diarios por unidad ganadera (vaca de 380 kg en producción) y que este consumo aumenta exponencialmente en aquellos animales en producción lechera y en condiciones de calor. Por ejemplo, se puede afirmar que una vaca productora de 27 litros de leche / día, a 21° C de temperatura ambiente, puede consumir hasta 165 litros diarios de agua.

Tabla 3.1.11 Dotaciones para la estimación de los volúmenes del uso pecuario

Dotaciones en litros / cabeza de ganado / día	
Ganado mayor a 80kg	40
Ganado menor	30
Por cada 100 aves	15 o un tercio del consumo de ganado mayor

SRH, 1975

3.1.5.3 Validación de los consumos

Una vez que se han estimado los consumos para los diferentes usos, se recomienda llevar a cabo una validación de los resultados. Generalmente se recomienda comparar los volúmenes estimados con alguna fuente de medición. Por ejemplo, con mediciones de pozos, con el volumen entregado al sistema, las descargas de aguas residuales, etc. Principalmente deben ser fuentes que representen valores medidos. Cabe aclarar que si bien se espera que la comparación no sea exacta deben ser indicativas, existen otros medios indirectos para comparar los volúmenes estimados. Entre los métodos indirectos se pueden mencionar por ejemplo, los padrones/registros de usuarios de los organismos operadores. En este sentido se observa que el padrón/registro de usuarios de la comisión/agencia de electricidad nacional representa casi siempre una base confiable y precisa del número de viviendas. Se sugiere agrupar los usos de la siguiente forma:

- Uso doméstico: doméstico, múltiples, público urbano y servicios.
- Uso industrial: industrial.
- Uso agropecuario: acuicultura, agrícola y pecuario.

Finalmente, es necesario mencionar que una actividad muy importante en la etapa de validación de los volúmenes estimados de consumo, consiste en cuantificar de forma aproximada las fugas que pueden presentarse dentro de los sistemas de distribución. La estimación de un volumen de pérdidas por fugas permitirá cuantificar la eficiencia de los sistemas así como un consumo más real de los usuarios; es decir, cuando se estima un consumo utilizando una dotación, por ejemplo para el caso del consumo doméstico, éste será más real si se conocen las pérdidas que se producen en el sistema. Para estimar este volumen de fugas, es necesario tomar en cuenta diversos componentes que pudieran intervenir, por ejemplo: el tipo de material, la posible corrosión, los hundimientos diferenciales, el tipo de suelo, las presiones e incluso aspectos geológicos de la zona.

3.1.5.4 Regionalización

Como se comentó anteriormente, uno de los principales problemas para realizar un balance hídrico es sin duda la escasa información de que se dispone. Con relación a los consumos de agua, es difícil encontrar mediciones o estimaciones confiables para los diferentes usos. Además, sólo en zonas importantes de desarrollo, la red de estaciones climatológicas e hidrométricas es lo suficientemente densa para estimar confiablemente, por ejemplo, la precipitación media. Es común que en zonas poco pobladas o en vías de desarrollo urbano, la red de medición sea escasa, lo que dificulta la estimación de las variables básicas de la ecuación del balance. También se observa el mismo fenómeno en la macro y micro-medición del agua; actualmente los organismos operadores hacen esfuerzos para medir sistemáticamente los volúmenes entregados a los usuarios y desde hace algunos años se han realizado grandes mejoras e innovaciones en el sistema de recopilación de información. De esta forma, es claro que la calidad de la información influye directamente en la estimación de las variables de la ecuación de balance. Así, el resultado final del balance será tan bueno como tan buena sea la calidad de la información utilizada.

Esta calidad se encuentra asociada con circunstancias como el proceso de recolección de mediciones, la longitud de los registros, la consistencia y la representatividad de la información en el sitio; en este sentido, el calculista se enfrenta a dos problemas complejos. El primero consiste en tener las herramientas adecuadas para llevar a cabo una crítica aceptable de los datos a utilizar. El segundo, es la necesidad de estimar, en este caso, dotaciones o consumos unitarios en sitios donde no se dispone de ninguna clase de información o si ésta existe, no es del todo confiable. Incluso si se carece de información, como infiltración o evaporación, una metodología que permitiera extender las mediciones a zonas aledañas garantizando un mismo comportamiento, sería muy útil como herramienta de estimación y de planeación. A este proceso de agrupar zonas con comportamientos similares, de acuerdo no sólo con una variable sino con un conjunto de variables ligadas entre sí, se le conoce con el nombre de regionalización (Gutiérrez-López, 1996-b).

Analizando el caso específico del consumo doméstico, se recuerda que la dotación propuesta en la tabla 3.1.7 está en función de la población y del clima. Sin embargo, se puede cuestionar si alguna otra variable pudiera influir en el consumo. A este respecto, pudieran citarse el número de ocupantes por vivienda o si las viviendas cuentan o no con agua entubada, e incluso el índice de marginación de la población es un componente determinante en el consumo de agua. Debido a que la estimación final de los volúmenes de consumo está influenciada por este tipo de variables sociales que cambian en el espacio y en el tiempo; se recomienda conocer el comportamiento regional de los componentes que pudieran influir en la estimación de un volumen de consumo. El índice de marginación de una población representa una importante herramienta para calibrar, verificar o modificar en su caso, un volumen de consumo previamente estimado utilizando una dotación teórica. Por ejemplo, podría darse el caso de que la población y la temperatura en dos localidades fuera similar, por lo tanto la dotación asignada sería la misma según la tabla 3.1.7; sin embargo sería el grado de marginación de los habitantes lo que determinaría la selección final de la dotación; este es el objetivo principal de realizar una regionalización; tener las herramientas necesarias para afinar o en su caso extrapolar valores de consumo. En la tabla 3.1.12 se

presentan algunos de los componentes que se sugiere tomar en cuenta para regionalizar cada uno de los diferentes usos del agua.

En resumen, la idea básica de llevar a cabo la regionalización de una cuenca radica en calcular consumos, dotaciones o índices que permitan estimar el volumen de consumo en una región o municipio/localidad que carezca de información. Este procedimiento puede ser muy sencillo o complicado, según el grado de precisión que se busque. También depende del número de variables que se desee regionalizar. El procedimiento más simple consiste en definir rangos, por ejemplo para regionalizar el consumo industrial puede emplearse el número de establecimientos industriales por km², lo que daría una idea de la densidad industrial en la región. Los rangos podrían quedar definidos con cuatro grandes grupos: menos de un establecimiento, entre uno y diez, entre diez y cincuenta y más de cincuenta establecimientos industriales. Es claro que para utilizar de manera óptima esta regionalización, será necesario asociar estos rangos a otra variable, por ejemplo la población municipal. De esta forma, si se conoce la población del municipio/localidad éste podrá quedar asociado a la densidad industrial de la región. Los resultados de este procedimiento servirían para definir de forma aproximada el número de industrias que existe en un municipio/localidad en donde se sabe que existen industrias pero no se tiene información al respecto. Las variables que se proponen para ser utilizadas en este tipo de análisis se muestran en la tabla 3.1.12. Finalmente conviene señalar que el concepto de regionalización no significa que se generen grupos "idénticos" sino más bien se obtienen zonas "similares" respecto al comportamiento de dos o más características significativas de la región (Gutiérrez-López, 1996-a; Paris y Zucarelli, 2004; Gutiérrez-López *et al.*, 2004-b).

Tabla 3.1.12 Características a tomar en cuenta en una regionalización

Doméstico	Industrial	Agrícola	Fugas
<ul style="list-style-type: none"> - Población según el censo nacional más reciente - Número de ocupantes por vivienda - Viviendas que disponen de agua entubada - Viviendas que disponen de drenaje - Índice o grado de marginación 	<ul style="list-style-type: none"> - Número de industrias por subsector - Número de industrias por km² - Volumen anual descargado 	<ul style="list-style-type: none"> - Temperatura media anual - Eficiencia en el sistema de riego 	<ul style="list-style-type: none"> - Población según el censo nacional más reciente - Pendiente media del terreno - Viviendas que disponen de agua entubada - Índice o grado de marginación

3.1.5.5 Análisis de resultados

Los resultados deben mostrarse de manera sencilla y de fácil comprensión. Se propone presentar tablas en *Excel* divididas en los diferentes usos en donde aparezca el nombre y población del municipio/localidad como mínimo. También se recomienda generar gráficas de barras para comparar los resultados obtenidos con algunas otras fuentes (inciso 3.1.5.1). Además, generar planos de la región, donde se muestre la división municipal y los resultados, divididos por rangos y colores, de los diferentes volúmenes de consumo. Esta información presentada de la manera anteriormente descrita, permitirá analizar de forma objetiva los valores obtenidos. En todos los casos se debe tomar en cuenta que un balance hídrico es dinámico y que los valores obtenidos sólo representan un período.

3.1.6 Retornos de agua

Se consideraran los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua. En la tabla 3.1.13 se presentan los porcentajes que se han utilizado en México.

Tabla 3.1.13. Porcentajes de retornos

Uso del agua	Rango %
Urbano	70-80
Agrícola	5-15
Industrial	50-60
Pecuario	5-15
Acuícola	80-90

3.1.7 Importaciones y exportaciones

Se toman en cuenta importaciones y exportaciones entre cuencas hidrológicas. Se requiere Información mensual para un período mínimo de 10 años.

3.1.8 Pérdidas en redes de agua potable

Estimaciones realizadas en México consideran que las fugas a través de los sistemas hidráulicos de las principales ciudades es de alrededor del 30 % del volumen abastecido. Sí el volumen de agua que se pierde en las redes de agua potable; es decir, la cantidad de agua que no es visible y que se pierde por infiltración profunda es considerable, se debe tomar en cuenta en la ecuación 3.1.1 como una variable de salida.

3.1.9 Cálculo del volumen de escurrimiento virgen por cuenca propia

Este es el parámetro que caracteriza al potencial de los recursos hídricos superficiales de una cuenca hidrológica. Puede estimarse de dos formas. La primera es considerando que existen registros hidrométricos confiables en la cuenca de estudio. El segundo, es utilizar información de lluvia cuando no se tiene información hidrométrica, en este caso debe incluirse un coeficiente de escurrimiento que estará en función del tipo y uso del suelo. Generalmente las unidades en que se cuantifica este componente de la ecuación de balance son hm^3 .

Con información hidrométrica

$$C_p = (A_b + U + E_v + E_x) - (A_r + I_m + R_e) + \Delta V \quad (3.1.21)$$

donde

C_p	Cuenca propia
A_b	Escurrecimiento aforado aguas abajo
U	Usos del agua
E_x	Exportaciones
E_v	Evaporación en cuerpos de agua
A_r	Escurrecimiento aforado aguas arriba
I_m	Importaciones
R_e	Retornos
ΔV	Variación de volumen

Sin información hidrométrica

$$\text{Explícitamente pérdidas} \quad C_p = V_{II} - \text{Inter} - ET - I_n \quad (3.1.22)$$

$$\text{Implicítamente pérdidas} \quad C_p = C_e \text{ VII} \quad (3.1.23)$$

donde

C_p	Cuenca propia
VII	Volumen de lluvia
Inter	Intercepción. Esta variable se tomará en cuenta, sí el bosque primario y secundario (follaje cerrado) abarca un área mayor al 50% del área total de la cuenca. Viessman y Lewis (1996) señalan que del 10 al 20% de la precipitación total se pierde por intercepción.
ET	Evapotranspiración
In	Infiltración
C_e	Coefficiente de escurrimiento

Cabe señalar que estas dos formas de calcular el volumen de escurrimiento virgen, pueden llevarse a cabo en dos tipos de cuencas. En las cuencas llamadas de *cabecera* situadas en las zonas altas y que contribuyen únicamente con el escurrimiento que se genera en ellas. Y las cuencas *intermedias* que contribuyen con el escurrimiento propio y además con el escurrimiento que proviene de las cuencas situadas aguas arriba de ellas.

Si se cuenta con el volumen de agua aforado aguas abajo de una cuenca de cabecera C_p se calcula como:

$$C_p = A_b + U + E_v + E_x - I_m - R_e + \Delta V \quad (3.1.24)$$

Si se conocen los volúmenes aforados aguas arriba (A_r) y aguas abajo (A_b), en el caso de una subcuenca intermedia, C_p se puede determinar con la siguiente expresión:

$$C_p = A_b + U - A_r + E_v + E_x - I_m - R_e + \Delta V \quad (3.1.25)$$

3.1.9.1 Coeficiente de escurrimiento

Se recomienda calcular éste coeficiente utilizando la metodología presentada en el Apéndice Normativo A (A.1.2.1.2) de la NOM-011-CNA-2000 (SEMARNAT, 2002) incluida como Anexo en este manual. La ecuación es la siguiente

$$C_e = \frac{K (P - 250)}{2000} \quad \text{si} \quad K \leq 0.15 \quad (3.1.26)$$

$$C_e = \frac{K (P - 250)}{2000} - \frac{K - 0.15}{1.5} \quad \text{si} \quad K > 0.15 \quad (3.1.27)$$

donde

K	Parámetro que depende del tipo y uso del suelo. Ver tabla 1 de la NOM-011-CNA-2000 (Apéndice A.1.2.1.2). Para cada cuenca hidrológica se obtiene un valor ponderado.
P	Precipitación anual o mensual, mm

En la tabla 3.1.14 se presentan valores de K que son utilizados en México.

3.1.10 Volumen medio de escurrimiento a la salida de la cuenca

Para determinar los volúmenes mensuales de escurrimiento aguas abajo de las cuencas en estudio, se recurre a los registros hidrométricos de las estaciones que aforan a la salida de ellas. En caso de que no existan registros, esta variable se estima con la expresión presentada en el inciso 3.1.9.

Con información hidrométrica

$$A_b = \text{volumen aforado} \quad (3.1.26)$$

Sin información hidrométrica

$$A_b = (C_p + A_r + I_m + R_e) - (U + E_v + E_x) - \Delta V \quad (3.1.27)$$

Si es una cuenca de cabecera A_r es igual a cero.

3.2 Cálculo del balance de agua subterránea

Un balance hidrogeológico tiene como fundamento la ecuación de continuidad, en la que se establece que la diferencia entre las salidas y las entradas de masa en un tiempo determinado son iguales al cambio de almacenamiento del volumen de control. Así, la ecuación empleada para ello se presenta a continuación:

$$I + R_i + E_s - E_{Tz} - S_m - B = \Delta V \quad (3.2.1)$$

donde

- I Infiltración-recarga de agua de lluvia
- R_i Recarga inducida: retornos de riego, fugas en los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas y aporte de agua por las arcillas
- E_s Entradas de agua al sistema por flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras de la zona de balance y por otros acuíferos
- E_{Tz} Evapotranspiración de la zona saturada
- S_m Salida de agua por manantiales
- B Extracción de agua subterránea por bombeo
- ΔV Cambio en el volumen almacenado en el área y en el tiempo estipulado de balance

Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en hm^3 .

Tabla 3.1.14 Parámetro K utilizado en las regiones hidrológicas 12 y 15, México.

Uso de suelo	Tipo de suelo			Observaciones
	A	B	C	
Agricultura de humedad	0.24	0.27	0.30	Cultivos
Agricultura de riego (incluye riego eventual)	0.24	0.27	0.30	Cultivos
Agricultura de temporal con cultivos anuales	0.24	0.27	0.30	Cultivos
Agricultura de temporal con cultivos permanentes y semipermanentes	0.24	0.27	0.30	Cultivos
Área sin vegetación aparente	0.26	0.28	0.30	Barbecho, áreas incultas y desnudas
Asentamiento humano	0.26	0.29	0.32	Zonas urbanas

Uso de suelo	Tipo de suelo			Observaciones
	A	B	C	
Bosque de encino	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de encino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de oyamel (incluye cedro)	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de oyamel (incluye cedro) con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de pino	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de pino con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de pino-encino (incluye encino-pino)	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque de pino-encino (incluye encino-pino) con vegetación secundaria	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque mesófilo de montaña	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Bosque mesófilo de montaña con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.07	0.16	0.24	Bosque cubierto más del 75%
Matorral crasicaule	0.22	0.28	0.30	Bosque cubierto menos del 25%
Matorral subtropical	0.22	0.28	0.30	Bosque cubierto menos del 25%
Matorral subtropical con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.22	0.28	0.30	Bosque cubierto menos del 25%
Mezquital (incluye huizache)	0.22	0.28	0.30	Bosque cubierto menos del 25%
Pastizal cultivado	0.14	0.20	0.28	Pastizal: más del 75% del suelo cubierto o pastoreo
Pastizal inducido	0.14	0.20	0.28	Pastizal: más del 75% del suelo cubierto o pastoreo
Pradera de alta montaña	0.14	0.20	0.28	Pastizal: más del 75% del suelo cubierto o pastoreo
Riego suspendido	0.24	0.28	0.30	Pastizal: menos del 25% del suelo cubierto o pastoreo
Selva baja caducifolia y subcaducifolia	0.17	0.26	0.28	Bosque: Cubierto del 25 al 50%
Selva baja caducifolia y subcaducifolia	0.17	0.26	0.28	Bosque: Cubierto del 25 al 50%
Selva baja caducifolia y subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.17	0.26	0.28	Bosque: Cubierto del 25 al 50%
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia	0.17	0.26	0.28	Bosque: Cubierto del 25 al 50%
Selva mediana caducifolia y subcaducifolia con vegetación secundaria arbustiva y herbácea	0.17	0.26	0.28	Bosque: Cubierto del 25 al 50%
Vegetación halofila y gipsófila	0.05	0.05	0.05	De estudios anteriores

Fuente: Solís *et al.*, 2005.

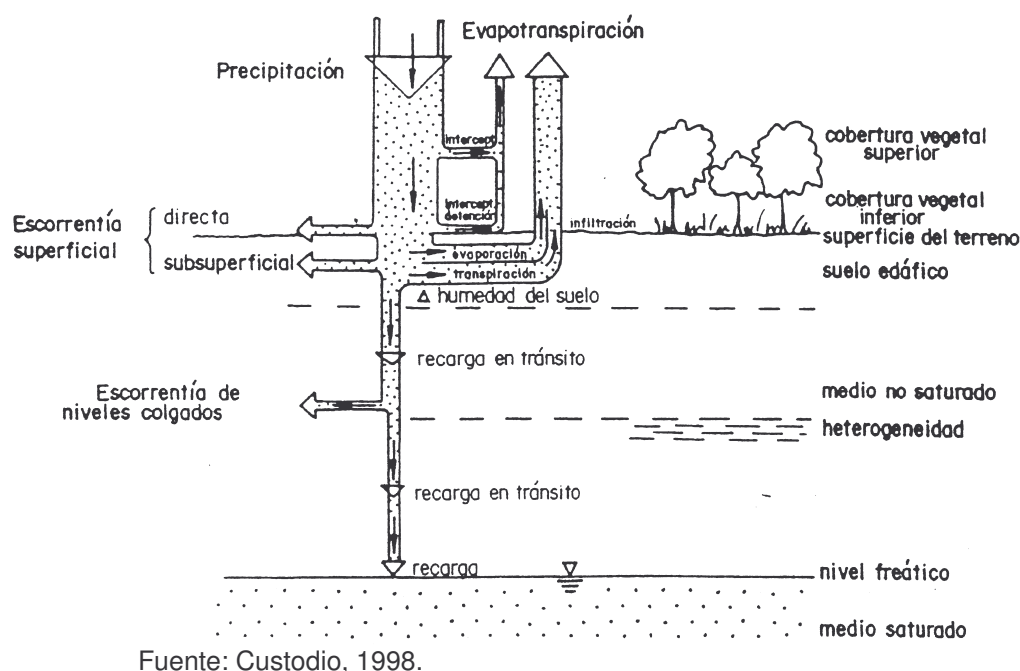
3.2.1 Entradas

3.2.1.1 Infiltración y recarga de lluvia

La infiltración es el proceso por el cual el agua penetra en el suelo a través de la superficie de la tierra. Parte del recurso hídrico suele quedar retenido por el suelo y la otra parte, alcanza la zona saturada del sistema acuífero. Esta última se le conoce como agua gravífica, percolación profunda, infiltración eficaz o infiltración profunda. No obstante, cuando el nivel freático está a cierta profundidad, la parte de la infiltración que se convierte en recarga tarda un determinado tiempo, en función de la permeabilidad intrínseca⁴ del medio (figura 3.2.1); por lo que el agua en tránsito descendente se denomina “recarga en tránsito” (Custodio, 1998). Por otra parte, es menester señalar que la capacidad de infiltración de un suelo (Ci) es la cantidad de lluvia que puede absorber en unidad de tiempo, por lo que ésta dependerá de la intensidad de lluvia (I) y además, tenderá a decrecer en función del tiempo, mientras $I > Ci$.

El agua infiltrada que no escurre subsuperficialmente ocupa todos o parte de los poros del terreno y tiende a descender vertical y lentamente si supera la llamada capacidad de campo⁵. Esta parte del agua está disponible para ser transpirada por las plantas en la franja de penetración de las raíces (franja radicular) o para ser evaporada por la acción de la energía solar sobre la superficie del terreno.

Puesto que en la estimación de la recarga total es difícil encontrar los porcentajes de agua que pueden provenir de la recarga natural vertical, la inducida (retornos agrícolas) y la artificial; se propone el procedimiento que se describe a continuación.



Fuente: Custodio, 1998.

Figura 3.2.1 Distribución de la aportación pluviométrica en sus diferentes componentes.

⁴ Permeabilidad intrínseca o específica: es la propiedad de un cuerpo a ser atravesado por el agua u otro fluido; es una característica del material geológico que depende exclusivamente de su textura (Custodio y Llamas, 1983).

⁵ Capacidad de campo es el mayor contenido de humedad que queda retenido contra las fuerzas de gravedad. Un terreno saturado se drena hasta la capacidad de campo, para seguir extrayendo agua hace falta un esfuerzo adicional, como es la aplicación de la energía solar para secar o la succión que producen las raíces de las plantas (Custodio y Llamas, 1983).

Los factores que influyen en el proceso de infiltración se especifican a continuación:

Características del terreno o del medio permeable.	Condiciones de superficie	Tipo y densidad de vegetación que cubre al suelo, Compactación del suelo. Pendiente del terreno.
	Características del terreno	Textura y estructura del suelo. Cantidad de arcilla. Calor específico
	Condiciones ambientales.	Humedad del suelo. Temperatura del medio y del suelo.
Características del fluido que se infiltra.	<p>El espesor de lámina de agua (H) y el espesor de la zona saturada (I) son del mismo orden de magnitud. H disminuye al aumentar I.</p> <p>La turbidez del agua afecta al suelo por los materiales en suspensión que contiene.</p> <p>El contenido de sales del agua puede aumentar o inhibir la infiltración, por floculación o desfloculación.</p> <p>La temperatura del agua afecta su viscosidad y en consecuencia, la facilidad con que escurrirá por el suelo.</p>	

Infiltración

Para la determinación de esta variable, el procedimiento a aplicar consiste en considerar el valor de la precipitación promedio anual para cada municipio/localidad que conforma a cada acuífero, establecido para el balance del agua superficial. Mediante forma manual o con sistema digital, para cada municipio/localidad, se determinan, en área y porcentaje, los tipos de suelo, de preferencia en cartas digitalizadas a escala 1:250,000.

En el tema de la infiltración de la lluvia a través del suelo, diversos autores (Ortiz-Ortiz, 1990; Fernández-Sanjurjo, 1999; Salgado, 2001) definen que, si bien los valores absolutos de la porosidad no bastan para estimar la permeabilidad del suelo, ya que se requiere identificar la textura, la estructura y el contenido en materia orgánica, a través de la capacidad, como lámina de agua que se infiltra por unidad de tiempo; es posible estimar un porcentaje del agua de lluvia que se infiltra en un suelo (tabla 3.2.1). Así, tomando en cuenta el tipo de suelo en cada municipio/localidad y el porcentaje de lluvia susceptible de infiltrarse de acuerdo al tipo del suelo, se calcula la infiltración.

Tabla 3.2.1 Capacidad de infiltración y porcentaje de lluvia infiltrada según el tipo de suelo

Tipo de Suelo	Infiltración		
	Capacidad (lámina de agua / hora) ^A		(% de lluvia) ^B
Andosol (T)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Cambisol (B)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Feozem (H)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Fluvisol (J)	Rápida	> 2.5 cm	15
Gleysol (G)	Muy lenta	< 0.25 cm	4
Histosol (O)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Litosol (Y)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Luvisol (L)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Planosol (W)	Lenta	0.25 a 1.75 cm	8
Regosol (R)	Media	1.75 a 2.5 cm	12
Solonchak (Z)	Muy lenta	< 0.25 cm	4
Vertisol (V)	Muy lenta	< 0.25 cm	4

A) Ortiz y Ortiz (1990).

B) Osuna y Padilla, 1998; Fernández-Sanjurjo, 1999; Salgado, 2001.

Recarga natural

Para la determinación de esta variable se elabora un mapa geológico a escala 1:250,000, de acuerdo con las fuentes disponibles. Posteriormente, mediante el uso de un sistema digital, para cada municipio/localidad se determina, en área y porcentaje, el tipo de roca. A cada tipo de roca se le asigna un valor de porosidad eficaz, con base en la literatura inherente al tema (Davis y De Wiest, 1971; Ingebritsen y Sanford, 1998). Un resumen de algunos de estos valores se presenta en la tabla 3.2.2

Tabla 3.2.2 Valores de porosidad eficaz de algunas rocas

Roca		Porosidad Eficaz (%)
Tipo	Clave	
Cuaternario aluvión	Qal	35
Cuaternario lacustre	Ql	03
Cuaternario inferior volcánico	Qiv	30
Cuaternario inferior cono volcánico	Qivc	30
Cuaternario- Plioceno andesita	QPA	15
Cuaternario volcánico	Qv	35
Cuaternario cono volcánico	Qvc	35
Formación Tarango	T	18
Terciario medio volcánico	Tmv	10
Terciario - Oligoceno volcánico	Tov	10
Terciario - Plioceno domo cinerítico	Tpdc	07
Terciario – Plioceno lacustre	Tpl	03
Terciario - Plioceno volcánico	Tpv	08
Terciario – Cuaternario tobas.	TQt	12

Fuente: Davis y De Wiest, 1971; Ingebritsen y Sanford, 1998.

Tomando en cuenta los valores de porosidad eficaz de las rocas y el volumen de infiltración definido en cada municipio/localidad, se determina el volumen de recarga para cada uno de ellos. Posteriormente, y considerando el área de cada municipio/localidad ubicado en la superficie de control piezométrico de los acuíferos en estudio, se define el volumen de recarga. Este proceso se denomina recarga vertical al acuífero; en tanto, la recarga a través del tiempo, fuera de la zona de control piezométrico, se incorpora a éste como flujo lateral subterráneo.

3.2.1.2 Recarga inducida y artificial

Retornos agrícolas

El cultivo y manejo agrícola del suelo puede ejercer una gran influencia en la calidad de las aguas subterráneas y tiene un control muy importante en las tasas de recarga del acuífero. Algunas prácticas de uso de suelo son capaces de causar una seria contaminación difusa de las aguas subterráneas, especialmente en suelos de poco espesor, de buen drenado o textura arenosa (Ortiz y Ortíz, 1990; Foster e Hiriata, 1991). Para cuantificar los retornos de riego a través de la lixiviación de un contaminante, se requiere definir: permeabilidad y espesor del suelo, lluvia en exceso, eficiencia de riego, continuidad del cultivo, frecuencia de arado, intensidad de pastoreo, control en la aplicación de fertilizantes o pesticidas y calidad de las aguas subterráneas. No siempre será posible obtener éstas variables.

Metodología

Los retornos agrícolas originan una distribución de contaminantes de tipo difuso en las aguas subterráneas, siendo los principales según Foster e Hiriata, (1991): nutrientes (nitrógeno y fósforo), microorganismos (coliformes totales y fecales) y salinidad, así como elevadas

concentraciones de NH_4 , NO_2 , NO_3 , HPO_4 , Cl y K . En la práctica, el incremento de dos o más de los contaminantes arriba señalados, en combinación con el ión cloruro, permitirá utilizar a este último como trazador ideal, para que a través de éste generar un balance e identificar el porcentaje de mezcla entre aguas. En este sentido, si se tiene un agua con un contenido de cloruro C (representado por las muestras de agua M) que es mezcla de otros dos contenidos C_1 (muestra de agua N) y C_2 (muestra de agua Ñ). Se tendrá que: $C_1 < C < C_2$ y, por tanto, que existe una proporción volumétrica $(1-x)$ del agua 1 y x del agua 2, por lo que se debe de cumplir, según Custodio y Llamas (1983), que:

$$C = C_1(1-x) + C_2x \quad (3.2.2)$$

donde

C Concentración del agua contenida en la zona anómala, mg/l

C_1 Concentración promedio del agua subterránea, mg/l

C_2 Concentración del flujo lixiviado (dren agrícola), mg/l

Otro método adicional para establecer los retornos de riego es considerar la diferencia entre el volumen abastecido y los requerimientos ideales de agua la eficiencia de utilización para los diferentes cultivos que se tengan en la zona.

Del volumen determinado por esa diferencia, se estimará el porcentaje de agua que se puede infiltrar en cada tipo de suelo, de acuerdo con los valores de la tabla 3.2.1.

Del volumen infiltrado en el suelo, se determinará un porcentaje de esa agua que puede recargar al acuífero, en función de los valores de porosidad eficaz de la roca, como los establecidos en la tabla 3.2.2.

Fugas en los sistemas hidráulicos

Estimaciones realizadas en México consideran que las fugas a través de los sistemas hidráulicos de las principales ciudades es de alrededor del 30 % del volumen abastecido. Asimismo, se estima que el caudal a considerar dentro del tópico de "fugas", como una posible recarga inducida al sistema acuífero, sería del orden de 40 % provenientes de las redes de abastecimiento.

Metodología

Identificadas las zonas cuyas redes de abastecimiento presentan las mayores fugas, éstas serán relacionadas con el tipo de material geológico en las que se hallan emplazadas, con la finalidad de establecer si las condiciones hidráulicas de la secuencia litológica permiten el flujo de agua de estas fugas hacia el acuífero. De ser positiva esta conexión hidráulica, para estimar el volumen de agua que está llegando a la zona saturada, será posible realizar un balance de cloruros para determinar el porcentaje de mezcla entre aguas.

Al respecto, se parte del hecho de que al agua potable se le proporciona una desinfección para asegurar el bienestar de la población, y que gran parte de los procesos empleados para ello, es a través de la adición de cloro en estado elemental, en forma de cloraminas, como ácido hipocloroso, hipoclorito de sosa o como dióxido de cloro. Así, se tendrá que, desde un punto de vista químico, cuando el cloro se le añade al agua se llevan a cabo varias reacciones, dependiendo las mismas, de las sustancias presentes en el agua; una de éstas, son las reacciones de oxidación, en donde el cloro oxida los cationes y aniones minerales, transformándose el cloro en ión cloruro.

Así, los cloruros presentes en el agua subterránea de algunas zonas pueden mostrar concentraciones por arriba del promedio, debido al proceso químico arriba comentado. De igual

manera en que fue establecido en el balance de cloruros para los retornos de riego, éste se podrá utilizar para estimar el volumen de la mezcla proveniente de las fugas. Siendo la concentración que se modifica en la ecuación 3.5, la C_2 , relativa al contenido de cloruros en el agua de la red de distribución.

Cabe señalar que la metodología aquí establecida, para estimar la recarga del acuífero a través de las fugas, resulta ser sólo indicativa, ya que para evaluarla es necesario definir las características del medio poroso, condiciones hidráulicas, profundidad del nivel estático, procesos de disolución, tiempo de residencia, etcétera.

Aportación por “goteo” de las arcillas lacustres

Para el caso particular de tener zonas con una gran cantidad de arcillas lacustres, se considera que éstas tienen una importante influencia en el comportamiento del flujo subterráneo es muy importante. Por tanto se incluye este apartado para su análisis y contribución al balance. En todo caso deberán considerarse las situaciones particulares que se encuentran al realizar el análisis geohidrológico.

El aporte de agua del acuitardo (arcillas lacustres) al acuífero, a través de un proceso de “goteo”, puede ser considerada como una recarga inducida, ya que ésta ha sido provocada por la explotación intensiva del acuífero que lo infrayace. Sin embargo, también debe ser concebida como un cambio de almacenamiento en el acuitardo, en vista de que las “entradas” de agua al acuitardo se verán limitadas por la presión de agua de la formación y la baja transmisividad, entre otros aspectos. Mientras que las “salidas” se verán favorecidas por el gradiente hidráulico y la baja presión de agua de la formación en la zona de la frontera acuitardo–acuífero, entre otras cosas.

Metodología

Los cloruros presentes en el agua subterránea de algunas zonas pueden mostrar concentraciones por arriba del promedio, debido al aporte de agua proveniente de las arcillas. Este incremento de cloruro, según Rudolph *et al.*, (1991), está relacionado con concentraciones anómalas de sólidos totales disueltos, residuo seco, sodio y potasio. De la misma manera en que fue establecido en el balance de cloruros para los retornos de riego, éste se podrá utilizar para estimar el volumen de la mezcla proveniente de las arcillas lacustres. Siendo la concentración C_2 , la relativa al contenido de cloruros en el agua aportada por las arcillas.

Recarga artificial

La recarga artificial puede ser definida como el proceso mediante el cual se vuelve a llenar de agua el subsuelo mediante estructuras diseñadas específicamente para dicho fin (ONU, 1977; Custodio, 1986; Payne, 1995).

Metodología

Se deberán de identificar los proyectos de recarga artificial en la zona en estudio. Durante este proceso se establecerá el tipo de obra de recarga (lagunas artificiales o pozos de absorción), material geológico en donde se halla emplazada la obra de recarga, tiempo de operación del proyecto, tipo y calidad del agua de recarga (agua residual tratada, agua de lluvia, etc.), así como el volumen aportado por los mismos. Con base en la información recabada, se podrá establecer si el agua recargada de manera artificial está alimentando o no al acuífero en cuestión, durante el periodo de balance.

3.2.1.3 Flujo lateral subterráneo

Darcy (1856; en Custodio y Llamas, 1983) al trabajar con medios porosos homogéneos y un solo fluido, a través de un aparato similar a un permeámetro de carga constante, encontró que el

caudal que atravesaba el permeámetro era linealmente proporcional a la sección y al gradiente hidráulico. Este último, se define como la variación de una variable entre dos puntos del espacio, en relación con la distancia entre esos dos puntos. Si la variable considerada fuera la altitud de cada punto, el gradiente sería la pendiente entre los dos puntos considerados. Así, la Ley de Darcy se expresa de la siguiente manera:

$$q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right) \quad (3.2.3)$$

donde

q Caudal que circula por m^2 de la superficie, (Q/sección)

K Conductividad hidráulica. El signo negativo se debe a que el caudal es una magnitud vectorial, cuya dirección es hacia las cargas "h" decrecientes

$\left(\frac{\partial h}{\partial l} \right)$ Gradiente hidráulico

La Ley de Darcy adolece de ciertas limitaciones, por las siguientes dos razones:

Primera. La constante de proporcionalidad K no es propia y característica del medio poroso, sino que también depende del fluido. El factor K , según Custodio y Llamas (1983) puede descomponerse, como:

$$K = k \left(\frac{\gamma}{\mu} \right) \quad (3.2.4)$$

donde

k Permeabilidad intrínseca del medio poroso

K Permeabilidad de Darcy o conductividad hidráulica

γ Peso específico del fluido

μ Viscosidad del fluido

Esta cuestión es fundamental en geología del petróleo, donde se estudian fluidos de diferentes características. En el caso del agua, la salinidad apenas hace variar el peso específico y la viscosidad. Solamente habría que considerar la variación de la viscosidad con la temperatura, que se duplica entre 5 y 35°C, incrementando al doble la permeabilidad de Darcy, así como el caudal circulante por la sección considerada del medio poroso. Afortunadamente, las aguas subterráneas presentan mínimas diferencias de temperatura a lo largo del año en un mismo acuífero. Por tanto, aunque se sabe que K depende tanto del medio como del propio fluido, como la parte que depende del fluido normalmente es despreciable, para efectos prácticos se acepta que la K de Darcy o conductividad hidráulica, es una característica del medio poroso.

Segunda. En algunas circunstancias, la relación entre el caudal y el gradiente hidráulico no es lineal. Esto puede suceder cuando el valor de K es muy bajo o cuando las velocidades del flujo son muy altas. Por ejemplo, si se calcula el flujo a través de una formación arcillosa, el caudal que se obtiene aplicando la Ley de Darcy sería bajísimo. En el segundo caso, si el agua circulara a gran velocidad, según la Ley de Darcy, el caudal sería directamente proporcional a la sección y al gradiente; sin embargo, como no existe tal proporcionalidad, la función sería no lineal.

$$q = -K \left(\frac{\partial h}{\partial l} \right)^n \quad (3.2.5)$$

donde el exponente n es distinto de 1

En el flujo subterráneo las velocidades son muy lentas y prácticamente siempre la relación es lineal, salvo en las proximidades de las captaciones bombeando en ciertas condiciones.

Metodología

Para el flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras de cada acuífero, se empleará la Ley de Darcy, aceptando para efectos prácticos que la conductividad hidráulica es una característica del medio poroso y que el caudal es directamente proporcional a la sección y al gradiente. La fórmula empleada será:

$$Q = L i T \quad (3.2.6)$$

donde

- L Ancho de la celda por donde fluye el agua, m. Establecida por dos curvas potenciales y dos líneas de flujo
- i Gradiente hidráulico, adimensional. Definido por la diferencia entre dos cargas potenciométricas (δh) y la distancia entre ellas (δl), en una celda
- T Transmisividad, m²/s. Producto de la conductividad hidráulica K por el espesor b de la sección de una celda

En este sentido, para el acuífero se considerarán las isolíneas de elevación del nivel estático para el periodo de análisis. En ellas, se establecen una serie de celdas delimitadas entre las dos curvas potenciales limítrofes de la zona de balance y dos líneas de flujo. Ello permite obtener el ancho para cada celda y el gradiente hidráulico. En cuanto a la transmisividad, se tomarán en cuenta los valores obtenidos por pruebas de bombeo. Por lo que respecta a la posible interconexión entre acuíferos, ésta será determinada a través del examen de las isolíneas de elevación del nivel estático obtenidas en el periodo de análisis. De contar con una continuidad piezométrica entre dos o más acuíferos, el flujo lateral subterráneo será estimado de acuerdo con la Ley de Darcy.

3.2.2 Salidas

3.2.2.1 Evaporación y evapotranspiración de las aguas subterráneas

Una gran parte del agua que se precipita sobre la superficie de la tierra vuelve a la atmósfera en forma de vapor a través de la acción combinada de la evaporación, la transpiración y la sublimación, las cuales son, en esencia, tres variantes de un único proceso debido a la acción de la energía solar. En el ámbito de la evaporación de las aguas subterráneas, se sabe que el recurso no alcanza nunca la atmósfera mediante un proceso de evaporación directa, a no ser que el nivel freático de las formaciones acuíferas esté situado a muy pocos decímetros de la superficie del suelo. No obstante, el consumo de agua por parte de las plantas constituye un medio de descarga del agua subterránea mucho más importante que la evaporación directa desde los acuíferos.

Metodología

Se considera que la descarga de agua subterránea por evaporación directa, se estima multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en las estaciones climatológicas. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores que la altura de la faja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático; a falta de información, se supondrá que el valor de la fracción varía entre los valores extremos linealmente según la profundidad de dicho nivel. Un método de análisis adicional es considerar que la evaporación directa ejerce una fuerza tensional sobre las moléculas de agua hasta de setenta veces superior a la que ejercen las plantas sobre el agua del suelo (Davis y De Wiest, 1971); sin embargo, la evaporación directa, a pesar de estar facilitada por la presencia de grietas en el suelo y por la ascensión capilar, tiene solamente lugar en una zona de profundidad inferior a un metro, en el caso de suelos arenosos, e inferior a tres

metros en el caso de suelos arcillosos. Por el contrario, las raíces de algunas las plantas, como las *freatofitas*⁶, alcanzan profundidades superiores a diez metros.

La profundidad efectiva a la cual las raíces de diversos cultivos pueden extraer humedad del suelo, según Davis y De Wiest (1971) y Ortiz y Ortiz (1990), se indica en la tabla 3.2.3. Asimismo, en la tabla 3.2.4 se muestran algunos valores representativos de la transpiración por diversas plantas.

Tabla 3.2.3 Profundidad efectiva para las raíces de las plantas

Cultivos	Profundidad efectiva (cm)
Cebolla y lechuga.	30
Pasto, papa, frijol, col, espinaca y fresa.	60
Maíz dulce, betabel, chícharo, calabaza, zanahoria y chile.	90
Remolacha azucarera, camote, algodón. cítricos, frijol, lima y alcachofa.	120
Melón, lino, maíz y granos pequeños.	150
Alfalfa, espárragos, frutales, vid, lúpulo, zacate, sudán, sorgo y jitomate.	180

Fuentes: Davis y De Wiest (1971); Ortiz y Ortiz (1990).

Tabla 3.2.4 Consumo de agua subterránea por algunas plantas en función de la profundidad del nivel freático

Planta	Clima	Prof. Nivel Freático (m)	Consumo de agua anual (mm)
Tamarisco	Frío – seco	1.23	2 700
Sauce	Cálido – seco	0.61	1 340
Chopo	Cálido – seco	2.20	2 380
Alfalfa	Frío – seco	0.91	800
	Cálido – seco	1.38	1300
Aliso	Cálido – seco	--	1 620

Fuentes: Davis y De Wiest (1971); Custodio y Llamas (1983).

En este sentido, tomando en cuenta el espesor efectivo de las raíces de cada cultivo señalado y el consumo de agua subterránea por algunas plantas, así como la profundidad del nivel estático en cada acuífero en estudio, se determina si se esta llevando a cabo o no un proceso de evapotranspiración del agua subterránea.

3.2.2.2 Descarga por manantiales

Considerada como una salida natural del agua subterránea, de acuerdo con la información existente (aforos, calidad y relación hidrogeológica con el acuífero), se deberá de cuantificar el volumen aportado por esta fuente a fin de ser tomada en cuenta durante el balance.

3.2.2.3 Extracción por bombeo

El bombeo en un pozo representa normalmente el mayor volumen de las descargas de un acuífero para satisfacer las demandas de los diversos sectores de usuarios establecidos en la zona. Para conocer el volumen extraído del acuífero por este concepto, regularmente se realiza un inventario

⁶ Las freatofitas poseen raíces muy profundas que llegan a alcanzar habitualmente el nivel freático. Siendo estas plantas propias de zonas desérticas y húmedas, poseen un bajo nivel de tolerancia frente a la salinidad del agua.

de los pozos y norias existentes en la zona; en éste preferentemente deben consignarse tanto los datos constructivos, como los de uso y operación. Sin embargo, en la práctica, ello no siempre es posible, como en la zona de estudio.

Metodología

La carencia de información de los gastos aportados por cada pozo, regularmente motiva que se realicen una serie de estimaciones, considerando:

- Para el uso de agua potable, el número de habitantes y su dotación.
- Para el uso agrícola, la lámina de riego por tipo de cultivo y el número de hectáreas regadas.
- Para los usos industriales, el tipo y clase, así como la cantidad de productos fabricados incluyendo dotaciones adicionales por diversos servicios.

Los valores así obtenidos indicarán la demanda de agua subterránea para diferentes usos; sin embargo, en la práctica el volumen ofertado resulta ser menor. Para la determinación del volumen extraído por cada acuífero se establecerá: como límite máximo, el volumen establecido a través de la demanda; en tanto, el límite inferior será estimado a partir del análisis e integración de valores provenientes de otras fuentes (por ejemplo organismos operadores).

Establecidos los límites en los que deberá de variar el volumen extraído por cada acuífero, éste será calculado a través de la siguiente expresión:

$$I + R_i + E_s - E_{Tz} - S_m - \Delta V = B \quad (3.2.7)$$

donde

I	Infiltración-recarga de agua de lluvia
R _i	Recarga inducida: retornos de riego, fugas en los sistemas de abastecimiento de agua de las zonas urbanas y aporte de agua por las arcillas
E _s	Entradas de agua al sistema por flujo lateral subterráneo proveniente de las fronteras de la zona de balance y por aporte de otros acuíferos
E _{Tz}	Evapotranspiración de la zona saturada
S _m	Salida de agua por manantiales
B	Extracción de agua subterránea por bombeo y por manantiales
ΔV	Cambio de almacenamiento en el acuífero y en el tiempo estipulado del balance

Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en hm³.

3.2.3 Cambio de almacenamiento

Como se hizo mención al inicio de este subcapítulo, el balance hidrológico de un acuífero puede ser expresado de manera semejante al principio de conservación de la masa o ecuación de continuidad. Para un intervalo de tiempo determinado la ecuación de continuidad se expresa en la forma:

$$E - S = \Delta V \quad (3.2.8)$$

donde

E	Entradas de agua al acuífero
S	Salidas de agua del acuífero
ΔV	Cambio de almacenamiento en el acuífero

Todas las variables son volúmenes de agua expresadas en hm³.

Si las entradas son mayores que las salidas se almacena agua en el acuífero y por lo tanto ΔV tiene su signo positivo. Si las salidas son de mayor magnitud que las entradas, se mina el acuífero y ΔV toma el signo negativo. El cambio en el almacenamiento en un acuífero para un intervalo de tiempo Δt determinado se calcula, mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta V = S A \Delta h \quad (3.2.9)$$

donde

- S Coeficiente de almacenamiento, adimensional
- A Área del acuífero, m²
- Δh Variación de la carga hidráulica, m

La variación de la carga hidráulica para el periodo de análisis será estimada a través de la evolución del nivel estático en ese periodo. En tanto, el área del acuífero, será definida por la superficie de control piezométrico establecida en el mismo periodo.

Por lo que toca al coeficiente de almacenamiento (S), cabe señalar que éste se define como el volumen de agua cedida o tomada del almacenamiento del acuífero, por unidad de área superficial cuando se produce un cambio unitario de carga. Se tendrá que en un acuífero confinado S dependerá de dos efectos elásticos: la compresión del acuífero y la expansión del agua contenida en éste, cuando la carga o presión es reducida por el bombeo. Los valores van de 1×10^{-3} a 1×10^{-5} (Freeze y Cherry, 1979). En tanto, en un acuífero libre, S equivale al rendimiento específico del material desecado durante el bombeo. Los valores van de 0.01 a 0.35 (Custodio y Llamas, 1983).

La determinación de los valores del coeficiente de almacenamiento, se hará a partir de pruebas de bombeo y con base en consideraciones relativas al tipo y litología del acuífero en estudio.

Una vez que han sido estimadas todas las variables subterráneas, utilizando un intervalo de tiempo anual, se propone una desagregación mensual considerando la distribución de la lluvia mensual para la salida de agua de manantiales y las entradas de agua al sistema por flujo lateral; la distribución de la evapotranspiración superficial para la evapotranspiración de la zona saturada; y la distribución de los usos para la distribución de la extracción por bombeo.

3.3 Balance integrado

Finalmente, se hace una integración de variables superficiales y subterráneas, con el fin de obtener la variación de volumen en toda la cuenca de estudio y se elabora un esquema que muestra la distribución y movimiento cuantitativo del recurso hídrico, como los mostrados en el Anexo 1 de este manual. La ecuación de integración es la siguiente

$$\Delta V = (VII + Ar + Im + Re + Sm + B) - (Ev + ET + Ab + Ex + U + f + In) \quad (3.3.1)$$

donde

- ΔV Variación de volumen en la cuenca,
- VII Volumen de lluvia,
- Ar Escurrimiento aguas arriba,
- Im Importaciones de cuencas vecinas,
- Re Retornos de agua,

Sm	Salida de agua por manantiales,
B	Extracciones por bombeo dentro de la cuenca,
Ev	Evaporación en cuerpos de agua,
ET	Evapotranspiración,
Ab	Escurrimiento aguas abajo,
Ex	Exportaciones hacía cuencas vecinas,
U	Usos del agua (superficial y subterráneo),
f	Pérdidas en redes de agua potable (fugas),
In	Infiltración de lluvia.

Todas las variables son volúmenes de agua y expresadas en hm^3 .

4. VARIABILIDAD E INCERTIDUMBRE DE LOS COMPONENTES DEL BALANCE HÍDRICO

Uno de los objetivos principales de un balance hídrico es sin duda, contar con una herramienta adecuada para la toma de decisiones en el campo de la disponibilidad y el manejo del recurso. Asimismo, los componentes de la ecuación de balance están sujetos a cierta variabilidad e incertidumbre. La variabilidad debe entenderse como la diversidad o el cambio de los parámetros estadísticos de una muestra o serie de datos respecto a su población. La incertidumbre está en función del origen y la medición de los valores de las variables. Este último concepto tiene que ver mucho con la definición de “error”; sin embargo, en ciencias e ingeniería, el concepto de error tiene un significado diferente del uso habitual de este término. Coloquialmente, se usa el término “error” como análogo o equivalente a equivocación. En este trabajo, la incertidumbre, como veremos a continuación, se asocia a un error tipo (Φ_t), también conocido como error aleatorio (Voelker y Orton, 1993), debido al carácter aleatorio del fenómeno y a un error en la medición, el error estándar (Φ_s). Respecto a la variabilidad de los componentes se mide cuantitativamente empleando la media y la desviación estándar principalmente; es decir, se emplean conceptos básicos y tradicionales para estimar esta variabilidad e incertidumbre. A continuación se mencionan algunas hipótesis básicas que ayudarán a conocer la variabilidad e incertidumbre de los componentes de la ecuación de balance (Gutiérrez-López y Mejía, 2005).

- i. Los valores que forman las series mensuales de los componentes de la ecuación de balance, son valores aleatorios distribuidos temporalmente dentro del espacio de la cuenca.
- ii. Los valores mensuales de cada uno de los componentes de la ecuación de balance son valores medios que representan una situación promedio a través del año analizado.
- iii. Las medidas de tendencia central, conjuntamente con las medidas de dispersión, permiten explicar el concepto de variabilidad; ésta se presenta en forma de intervalos de confianza.
- iv. La incertidumbre de la ecuación de balance (Φ) se estima como la suma algebraica de un error aleatorio más un error debido a las mediciones (error tipo + error estándar).

4.1 Variabilidad de los componentes

Para llevar a cabo un análisis de variabilidad de los componentes de la ecuación de balance, éstos deben considerarse como variables aleatorias en el tiempo y en el espacio. Esto quiere decir, que por ejemplo, los valores que forman la serie del volumen de evaporación, son valores aleatorios distribuidos temporalmente dentro del espacio de una cuenca. Esta hipótesis es importante, en el sentido que permitirá emplear procedimientos estadísticos, para representar su variabilidad, ya que en estadística, los valores observados se consideran como muestras aleatorias de una población infinita. Así, cada componente del balance tendrá su propia distribución de probabilidad y de esta forma se puede afirmar que las medidas de dispersión de una muestra de valores (varianza, desviación estándar, el rango y el coeficiente de variación⁷) serán prácticamente las mismas que la dispersión que presente la población de dichos eventos. Por lo anterior se garantiza que, de la misma forma, las medidas de tendencia central tradicionales como son: la moda, la mediana, la media, los cuartiles y los deciles permitirán expresar la variabilidad de una muestra de datos. Para evidenciar lo anterior se recomienda crear diagramas de caja con la variabilidad de cada componente de la ecuación de balance, respecto a sus cuartiles y a su mediana. Como ejemplo, la figura 4.1.1 muestra la variabilidad de los componentes de la ecuación de balance para la cuenca del Valle de México. Se observa cómo la mayor variabilidad corresponde a tres componentes: la lluvia (VII), la evapotranspiración (ET) y a la infiltración (In). Esto quiere decir que son variables muy dispersas en el tiempo; mientras que las pérdidas (f) y el bombeo (Bo) son componentes que no varían en forma importante en el tiempo. Esto se verifica si se lleva a cabo un análisis de componentes principales (ACP) (Saporta, 1990). Los resultados de este análisis demuestran que los componentes que más contribuyen a explicar la ecuación de balance son: la

⁷ Este último estadístico tiene la ventaja que permite comparar poblaciones aunque estén en distintas unidades

evapotranspiración (ET) con el 96%, el volumen llovido (VII) con el 95%, el aporte de agua al subsuelo (In) en 95% y los diversos usos (Uc) en un 92% (Gutiérrez-López *et al.*, 2004-a). A su vez, se ha demostrado que dichos componentes principales pueden asociarse con una varianza efectiva y finalmente con una dependencia efectiva (Peña y Rodríguez, 2003). Analizando cuidadosamente estos resultados, se intuye que debido a su magnitud; la variación anual de los tres componentes mencionados (VII, ET y In) pudiera no estar explicada correctamente sólo por su desviación estándar (σ). Esto quiere decir que deben buscarse otros estadísticos para describir correctamente su variabilidad, por ejemplo el coeficiente de asimetría.

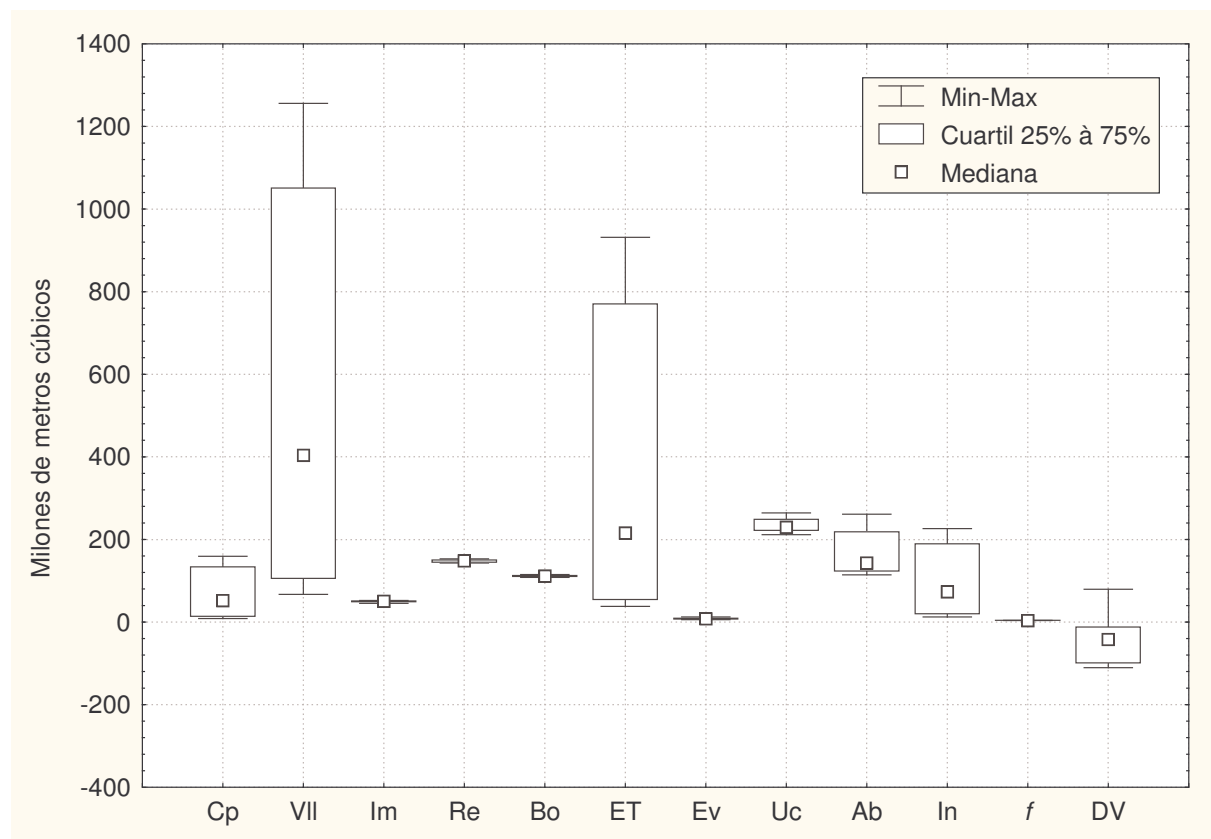


Figura 4.1.1 Diagramas de caja según la variabilidad de los componentes de la ecuación de balance para la cuenca del Valle de México

Al construir estos diagramas se comprueba que efectivamente en el intervalo de los cuartiles 25 y 75 se agrupan el 50% de los valores mensuales (mediana) de cada uno de los componentes de la ecuación de balance; lo que permite afirmar que los valores mensuales se distribuyen centralmente sobre la media anual y corresponden aproximadamente al intervalo $\bar{x} \pm \sigma$; esto es muy importante pues a continuación se podrán definir límites de confianza para cada uno de los componentes.

En el caso de los balances hídricos se manejan unidades de millones de metros cúbicos al año, pero las magnitudes de los eventos mensuales pueden ser muy diferentes entre sí. Por ejemplo, el volumen llovido en julio es un valor grande comparado con el volumen de infiltración en el mes de marzo. Sin embargo, los coeficientes de variación de ambas series mensuales permitirán conocer su dispersión respecto al valor medio anual del evento. De esta forma, *se busca que la variabilidad de la serie mensual de cada componente del balance quede dentro de una concentración mínima*

de datos. Este intervalo se expresa generalmente utilizando límites de confianza (Kendall y Stuart, 1999). Para poder definir estos intervalos se recurre al Teorema de Chebyshev que como una regla empírica permite comparar conjuntos de datos con igual intervalo y media pero con variabilidades distintas. De esta forma, utilizando los estadísticos tradicionales como la media (\bar{x}) y la desviación estándar se pueden formar intervalos. Considerando una distribución normal, el 95% de la población estará contenida en un intervalo del tipo $\bar{x} = \pm 2\sigma$ y si se requiere que el 99% de la población se incluya en el intervalo, la expresión a considerar será: $\bar{x} = \pm 3\sigma$.

Para estimar ahora un porcentaje de variabilidad (de una distribución normal) es necesario asignar una probabilidad de ocurrencia al intervalo seleccionado. Tradicionalmente, la probabilidad de aceptación que se utiliza en los balances hídricos es al 95% (Burt, 1999), esto quiere decir que se escoge una probabilidad de 0.95 de proporcionar un intervalo que contenga el porcentaje verdadero de datos dentro del intervalo; éste estará dado por $\bar{x} = \pm 2\sigma$. Estos límites pretenden ser una guía para conocer de antemano el "orden" o magnitud de los componentes involucrados en la ecuación de balance. Incluso se propone utilizar los límites máximos como un escenario de planeación, si se requiere establecer programas de gestión del recurso a largo plazo. De esta forma, se propone que los límites de confianza (Gutiérrez-López y Mejía, 2005) para cada uno de los componentes de la ecuación de balance tengan su límite de confianza calculado mensualmente, según las expresiones siguientes:

$$\text{Límite inferior (95\%)} \quad I_i = (X_i - 2\sigma_i)\lambda \quad (4.1.1)$$

$$\text{Límite superior (95\%)} \quad S_i = (X_i + 2\sigma_i)\lambda \quad (4.1.2)$$

donde

I_i Límite inferior para el i-ésimo mes

S_i Límite superior para el i-ésimo mes

X_i Valor de la variable en análisis de i-ésimo mes

σ_i Desviación estándar del i-ésimo mes

λ Coeficiente de corrección. $\lambda = 1$ para los componentes de poca variabilidad.

Para los componentes detectados como de máxima variabilidad se tiene que:

$$\lambda = \left(\frac{X_i}{\sigma_i} \right) \varphi_i \quad (4.1.3)$$

donde

φ_i Coeficiente de asimetría *considerado sólo en los meses lluviosos*, en meses de secas $\varphi = 1$

La tabla 4.1.1 muestra, a manera de ejemplo, algunos de los estadísticos básicos de los componentes de la ecuación del balance para la cuenca del Valle de México. Utilizando estos estadísticos se pueden obtener los límites de confianza. Por ejemplo para el componente de la evaporación (Ev) en el mes de mayo se tiene un valor 10.38 hm³, utilizando las ecuaciones 4.1 y 4.2 se obtienen sus límites de confianza, en donde $\lambda = 1$ por ser un componente de poca variabilidad (ver figura 4.1.1).

De esta forma se tiene que:

$$(I_{\text{mayo}})_{\text{Ev}} = 10.38 - (2 * 2.04) = 6.3 \quad \text{y} \quad (S_{\text{mayo}})_{\text{Ev}} = 10.38 + (2 * 2.04) = 14.46$$

Para el caso de un componente de mucha variabilidad como por ejemplo el volumen llovido se tiene para el mes de julio un valor de 1,255.92 hm³ de esta forma el valor de λ estará dado por:

$$\lambda = \frac{1255.92}{474.86} (0.512) = 1.354$$

$$(I_{\text{julio}})_{\text{VII}} = [1255.92 - (2 * 474.86)]1.354 = 414.59$$

$$(S_{\text{julio}})_{\text{VII}} = [1255.92 + (2 * 474.86)]1.354 = 2986.44$$

Para el caso de esta variable pero de un mes seco como noviembre (115.06 hm³) en donde la lluvia es mínima (pero nunca con valores negativos), se tiene:

$$\lambda = \frac{115.06}{474.86} (1) = 0.242$$

$$(I_{\text{julio}})_{\text{VII}} = [115.06 - (2 * 474.86)]0.242 = -201.98 \quad \therefore \quad (I_{\text{julio}})_{\text{VII}} = 0$$

$$(S_{\text{julio}})_{\text{VII}} = [115.06 + (2 * 474.86)]0.242 = 257.68$$

Las figuras 4.1.2 y 4.1.3 muestran los resultados gráficos de los procedimientos anteriores.

Tabla 4.1.1 Estadísticos básicos de los componentes de la ecuación del balance
Valores tomados de la ecuación de balance del Valle de México (millones de metros cúbicos)

	Anual	Mínimo	Máximo	Media mensual	Desv. Estándar	Coef. variación	Coef. asimetría
VII	6448.9	67.0	1255.9	537.4	474.86	0.884	0.512
Im	600.9	45.1	52.1	50.1	1.9	0.037	-1.71
Re	1892.0	152.6	163.2	157.7	3.5	0.022	0.08
Bo	1639.1	132.4	141.0	136.6	2.5	0.018	0.05
ET	4654.6	39.0	959.5	387.9	376.5	0.971	0.55
Ev	102.6	5.9	12.2	8.5	2.04	0.238	0.77
Uc	2809.2	211.5	264.5	234.1	17.3	0.074	0.52
Ab	1861.3	114.3	220.2	155.1	39.7	0.256	0.73
In	630.3	6.6	122.3	52.5	46.2	0.879	0.51
f	162.0	13.1	13.9	13.5	0.2	0.018	0.05
Δv	-283.4	-99.5	126.7	-23.6	55.9	-2.366	1.81

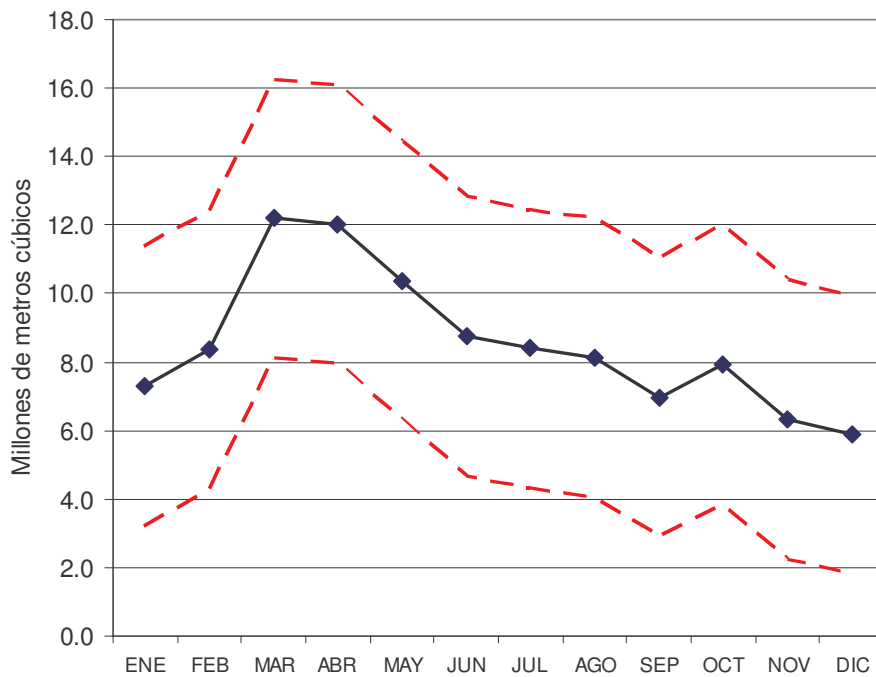


Figura 4.1.2 Intervalos de confianza para el componente de evaporación (Ev) de la ecuación de balance para la cuenca del Valle de México

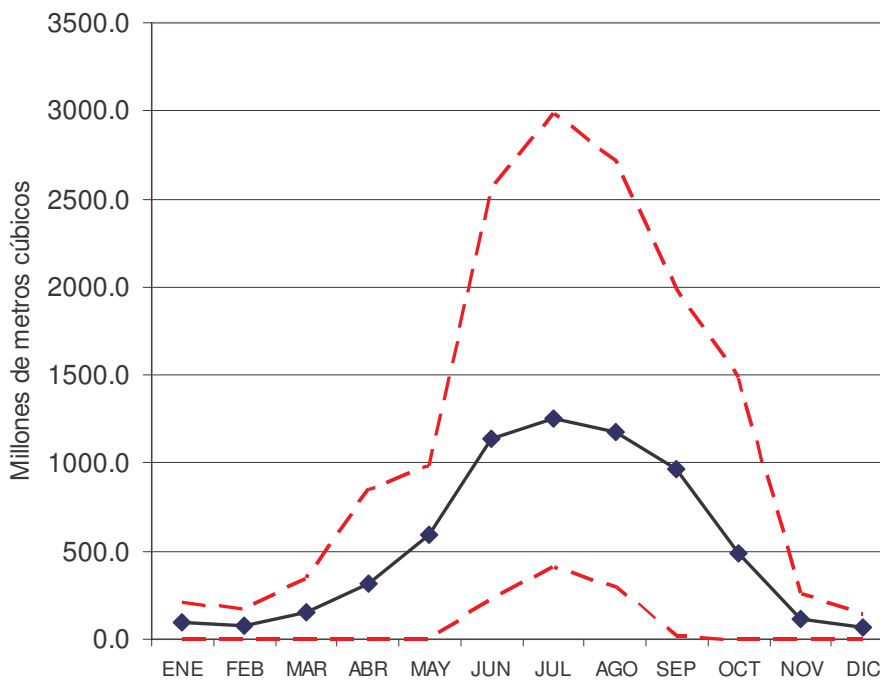


Figura 4.1.3 Intervalos de confianza para el componente de volumen llovido (VII) de la ecuación de balance para la cuenca del Valle de México

A continuación se resume la metodología para estimar la variabilidad de los componentes de la ecuación de balance.

1ª Etapa Verificar que los valores se distribuyen centralmente

Utilizar los cuartiles de las muestras mensuales para verificar que los valores se distribuyen centralmente sobre la media anual (ver tabla 4.2.2 y figura 4.1.1).

2ª Etapa Identificar componentes de mayor variación

Posteriormente, con ayuda de los diagramas de cajón y de la mediana, se identifican los componentes que varían notablemente a lo largo del año y aquellos que presentan una variación más uniforme.

3ª Etapa Estimar límites de confianza

Una vez que se han identificado los componentes de mayor y menor variación, así como los meses en donde ocurre mayor precipitación, para cada componente se estiman sus intervalos de confianza al 95%. Es claro que la variabilidad de los componentes no es suficiente para tener una *certeza* sobre los resultados finales de un balance; será necesario introducir el concepto de incertidumbre, que como ya se mencionó incluye un cierto error asociado a la variabilidad y tamaño de la muestra (desviación estándar) y a un parámetro que se propone incluir, como es el número de variables (p), que intervienen en el cálculo del valor medio de cada componente de la ecuación

4.2 Incertidumbre de los componentes

Se propone asociar la incertidumbre a un error debido a la variación histórica de la serie (carácter aleatorio Φ_t), así como al error en las mediciones y al número de componentes que interviene en su estimación (Φ_s). Esto quiere decir que entre mayor sea el número de variables p involucradas en la estimación de uno de los componentes; mayor será su incertidumbre. Conviene aclarar que rigurosamente un error absoluto es el valor de la diferencia entre el valor observado y el verdadero valor. Este concepto de error es difícil utilizarlo en una ecuación de balance ya que el valor verdadero no se conoce en ningún momento, además de estar trabajando siempre con valores medios. Una forma de minimizar la incidencia de los errores estadísticos, sería realizar varias mediciones de la variable analizada, hasta *acercarse* al valor poblacional. Debido a que se carece de estas mediciones, podría recurrirse a una simulación utilizando, por ejemplo, algún modelo autorregresivo; pero esto está fuera del alcance del presente estudio. Sin embargo, considerando el carácter aleatorio de los componentes de la ecuación de balance, al promediar las estimaciones anuales y mensuales, este valor promedio estará menos afectado por las desviaciones estadísticas, que los valores o mediciones puntuales de cada uno de los componentes. Por esta razón se propone emplear el error tipo, esto es; si suponemos que realizamos varias series de mediciones de cierto componente de la ecuación y para cada una de estas series calculamos su promedio mensual es de esperar que estos valores tengan una distribución. Recordemos que σ es la dispersión de cada medición y que no depende del tamaño de la muestra (n) sino de la calidad de las mismas, mientras que el error tipo del promedio sí depende de n y es menor cuanto más grande es n . De esta forma se puede probar que a medida que aumenta el tamaño de la muestra, disminuirán los posibles errores (Gutiérrez-López y Mejía, 2005). Entonces, el error tipo sobre el promedio estará dado por:

$$(\Phi_t)_i = \sqrt{\frac{\sigma_i^2}{n}} \quad ; \quad (\Phi_t)_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}} \quad (4.2.1)$$

Debido a que este estudio pretende aportar una mejora en la estimación clásica de los balances hídricos, se propone utilizar el concepto de *error estándar de ajuste* (Kite, 1988) empleado tradicionalmente en hidrología (interviene el número de parámetros a estimar en una distribución de probabilidad). De esta forma, se propone que el error estándar asociado a la medición de cada componente incluya el número de variables involucradas en la estimación de cada componente

(p^*) dentro del intervalo de tiempo seleccionado. Esto quiere decir que el error estándar puede estimarse de la siguiente forma:

$$(\Phi_s)_i = \frac{\sigma_i}{\sqrt{365 - p_i^*}} \quad (4.2.2)$$

donde

$(\Phi_s)_i$ Error estándar del componente i

σ_i Desviación estándar del componente i

p_i^* Número de variables que intervienen en la estimación del componente i, dentro del intervalo de tiempo de desagregación. $p_i^* = p n$

Finalmente la incertidumbre en la ecuación de balance estará dada por:

$$\Phi = \sum_i (\Phi_t)_i + \sum_i (\Phi_s)_i \quad (4.2.3)$$

Por ejemplo, para el volumen llovido, se tendría un error tipo igual a:

$$\Phi = \sum_i (\Phi_t)_i + \sum_i (\Phi_s)_i$$

y un error estándar estimado de: $(\Phi_s)_{VII} = \frac{474.86}{\sqrt{365 - 24}} = 25.72$

De lo anterior se concluye que la incertidumbre de esta variable tiene un valor de $\Phi = 162.8$

Tabla 4.2.1 Variabilidad e incertidumbre de los componentes de la ecuación de balance para la cuenca del Valle de México (millones de metros cúbicos)

	Media mensual	1er. Cuartil	Mediana	3er. Cuartil	Rango intercuartil	Error tipo Φ_t	Error estándar Φ_s
VII	537.4	110.33	404.1	1008.16	897.8	137.08	25.72
Im	50.1	49.37	50.3	51.18	1.8	0.5	0.10
Re	157.7	154.64	157.8	160.25	5.6	1.0	0.19
Bo	136.6	134.61	136.4	138.54	3.9	0.7	0.14
Et	387.9	57.02	222.1	745.69	688.7	108.7	22.00
Ev	8.5	7.22	8.2	9.16	1.9	0.6	0.11
Uc	234.1	222.38	230.1	247.89	25.5	5.0	1.16
Ab	155.1	126.70	136.3	184.68	58.0	11.5	2.11
In	52.5	10.94	39.7	98.13	87.2	13.3	2.59
f	13.5	13.30	13.5	13.69	0.4	0.1	0.02
Δv	-23.6	-51.30	-29.7	-20.15	31.1	16.1	3.57
					$\Sigma =$	294.6	57.71

Incertidumbre total del balance = 352.31

Tabla 4.2.2. Valores de p^* a partir de las variables de cálculo que intervienen en cada uno de los componentes de la ecuación de balance

	Componente	Variables de cálculo por componente	ρ	p^* ($n=12$)
VII	Volumen de lluvia,	Área de la cuenca, precipitación	2	24
Im	Importaciones de cuencas externas,	Lluvia, hidrometría	2	24
Re	Retornos	Usos totales de consumo, coeficiente de retorno	2	24
B	Extracciones por bombeo dentro de la cuenca	Cambio de almacenamiento subterráneo, mediciones piezométricas, flujo lateral subterráneo, recarga, aporte de manantiales	5	60
ET	Evapotranspiración	Precipitación, temperatura, coeficiente del cultivo, vegetación, superficie, constante de horas sol	6	72
Ev	Evaporación en cuerpos de agua	Mediciones, superficie, coeficiente de evaporación, profundidad del almacenamiento	4	48
U	Usos totales de consumo (superficial y subterráneo)	Dotación, población, temperatura	3 x 4 usos	144
Ab	Escurrimiento aguas abajo,	Luvia, hidrometría	2	24
In	Infiltración	Superficie, vegetación, geología, lluvia	4	48
f	Pérdidas en redes de agua potable	Población municipal según Censo reciente, índice o grado de marginación del municipio/localidad, Latitud geográfica de la cabecera municipal, Longitud geográfica de la cabecera municipal, Pendiente media del municipio/localidad, Número total de viviendas del municipio/localidad, Índice de hacinamiento del municipio/localidad, Número de viviendas con servicio de agua potable, Número de viviendas con servicio de drenaje, Área del municipio/localidad, Volumen anual suministrado	10	120
ΔV	Es el cambio de almacenamiento en la superficie	Volumen de lluvia, escurrimiento aguas abajo, importaciones de cuencas externas, retornos, extracciones por bombeo dentro de la cuenca, evaporación en cuerpos de agua, evapotranspiración, usos totales de consumo, pérdidas en redes de agua potable, infiltración	10	120

Se concluye que la incertidumbre del balance está dada por la suma de un error tipo y un error interno o estándar. Por ejemplo, el componente del volumen llovido (VII) tiene un error de 137

millones de metros cúbicos, debido al carácter aleatorio del fenómeno. Mientras que casi 26 millones provienen de un error debido a las mediciones. Esto quiere decir que la incertidumbre en este componente del balance es de 162 millones de metros cúbicos al año. Estrictamente este valor no debería interpretarse como un intervalo, sino como la diferencia entre el valor real (incertidumbre 0%) y el valor estimado por la metodología aquí presentada. En este sentido, este resultado adquiere un valor agregado cuando se consideran todos los componentes que intervienen en la ecuación. Así, al sumar todas las incertidumbres se obtiene la incertidumbre total del balance igual a 352. Esto quiere decir, que el balance pudiera tener un error (discrepancia residual) menor o igual a 352 millones de metros cúbicos y sin embargo; el resultado de la estimación de la ecuación de balance sería considerado correcto y válido.

La tabla 4.2.2 muestra las variables de cálculo que intervienen en cada uno de los componentes de la ecuación de balance. Cabe señalar que no es exhaustiva y que aun dentro de cada variable de cálculo existen otras variables sujetas a incertidumbre. Por ejemplo, para el caso del bombeo la información proveniente de los piezómetros, como la variación de los niveles piezométricos y/o freáticos a través del tiempo, es una variable con un alto grado de incertidumbre. Sin embargo, el conocimiento de esta información nos permite estimar el flujo lateral subterráneo, así como, la diferencia de la carga potenciométrica en un tiempo dado, lo cual nos dará la posibilidad de definir confiablemente la variación del almacenamiento en el acuífero. Por tanto se deben seleccionar pozos representativos para llevar a cabo la configuración de la elevación y evolución del nivel estático. Los criterios utilizados para ello son:

a) La ubicación y radio de influencia. Se considera la localización de cada pozo y su posible relación con otros, considerando un radio de influencia. Algunos de los valores establecidos por Villanueva e Iglesias (1984) son los que se indican en la tabla 4.2.3.

Tabla 4.2.3. Valores de radio de influencia

Tipo de material	Tipo de acuífero	valor de R (m)
Volcánico fracturado	Libre	700 a 1 000
	Semiconfinado	1 000 a 1 500
	Confinado	1 500 a 2 000
Poroso intergranular	Libre	400 a 700
	Semiconfinado	700 a 900
	Confinado	900 a 1 200

Fuente: Villanueva e Iglesias, (1984)

b) Condiciones hidrogeológicas de la región. Se debe tomar en cuenta las zonas de recarga y descarga en cada acuífero y su relación con los pozos establecidos en ellas.

c) Consistencia de la historia piezométrica. Se debe realizar un análisis del comportamiento piezométrico a través del tiempo, considerando grupos de pozos en cada uno de los siete acuíferos en estudio.

La incertidumbre debe entenderse como la diferencia entre el valor real (incertidumbre 0%) y el valor estimado por la metodología aquí presentada. En este sentido, este resultado adquiere un valor agregado cuando se consideran todos los componentes que intervienen en la ecuación de balance. Es decir, al sumar todas las incertidumbres, se obtiene la incertidumbre total del balance. Este valor deberá ser comparado con el componente de *pérdidas no identificadas*, utilizado en todos los balances para efectuar el cierre. Si la incertidumbre resulta ser mayor o igual al valor de las *pérdidas no identificadas*, estaremos hablando de un balance correcto; sino es así, se deberán revisar los cálculos o verificar la información de origen, para lograr un cierre adecuado.

En conclusión se puede decir que al obtener la incertidumbre del balance, se obtiene el posible error que se comete. Cabe recordar que la estimación de los volúmenes para cada uno de los componentes de la ecuación de balance, está limitada por la cantidad y la calidad de la información recolectada. De esta forma se sabe que existe una variabilidad y una incertidumbre

asociada al valor final de cada componente. Esta variabilidad e incertidumbre, comprende desde la cantidad del registro de datos, hasta la obtención del volumen que será empleado en la ecuación de balance. De esta forma, se propone realizar un análisis estadístico de las variables para conocer su variabilidad e incertidumbre y proporcionar una medida de confianza de su estimación.

Finalmente, para resumir este procedimiento, se puede decir que la incertidumbre toma en cuenta la aleatoriedad de los fenómenos a través de un *error aleatorio* y el error de medición (*error interno*). Respecto a la variabilidad de los componentes ésta se mide cuantitativamente empleando el rango, la media y desviación estándar, principalmente. Este análisis de variabilidad e incertidumbre permite obtener *límites de confianza* en cada uno de los componentes de la ecuación de balance y lograr de esta una correcta parametrización de cada uno de ellos.

REFERENCIAS

- Achkar, M., Cayssials, R., Domínguez A. y Pesce F., (2004). *Hacia un Uruguay Sustentable: Gestión Integrada de Cuencas Hidrográficas*, Programa Uruguay Sustentable
- Ahumada T. G. y Hernández R. J., (2003). *Estimación de coeficientes de demanda de sistemas de agua potable*. Revista Agua Latinoamérica, AIDIS, julio/agosto, pp.1-4
- Alonso D., (2002). *Capital Hídrico y usos del agua en Honduras*. Comité Regional de Recursos Hidráulicos (CRRH).
- Aparicio M. F. J., (1997). *Fundamentos de Hidrología de Superficie*. Limusa.
- Burt Ch., (1999). *Irrigation water balance fundamentals*. Conference on Benchmarking Irrigation System Performance Using Water Measurement and Water Balances. San Luis Obispo, C.A., pp.1-13.
- Calcano, A., Mendiburo N. y Gaviño M., (2000). *Informe sobre la Gestión del Agua en la República Argentina*.
- 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, CNA (1998). *Manual para la estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas*.
- Comisión Nacional del Agua, Conagua (2004). *Estadísticas del Agua en México*, 141 p.
- Comité Nacional de Hidrología y Meteorología, CNHM (2002). *Capital Hídrico y Usos del Agua en Costa Rica*.
- Custodio J. E. y Llamas, M. R., (1983). *Hidrología Subterránea*. España, Ed. Omega, 2350. pp.(Tomo I de 1-1157 / Tomo II de 1164-2350).
- Custodio J. E., (1986). *Recarga Artificial de Acuíferos*. España, Servicio Geológico y Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo, Boletín Núm.45, 134 p.
- Custodio J. E., (1998). *Recarga a los acuíferos. Aspectos generales, sobre el proceso, la evaluación y la incertidumbre*. España, Boletín Geológico y Minero, Vol. 109, No. 4, pp.329-346
- Davis N. S. y De Wiest, R., (1971). *Hidrogeología*. España, Ed. Ariel. 563 p.
- Del Castillo De L. L., (2005). *Marco Legal e Institucional Para la Gestión de la Calidad de Agua en Argentina*. Reporte de Investigación, Centro del Tercer Mundo Para Manejo del Agua A.C.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DGCOH (1994-a). *Plan Maestro de Agua potable del Distrito Federal, 1997-2010*, 400 p.
- Dirección General de Construcción y Operación Hidráulica, DGCOH (1994-b). *Plan Maestro de Drenaje de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México, 1994-2010*, 300 p.
- Donoso Ma. C., (2002). *Capital Hídrico y usos del agua en Panamá*. PHI, Panamá.
- Emmanuel C. y Ecurra J., (2000). *Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Perú*. Informe Nacional del Perú sobre gestión de recursos hídricos.
- FAO, (1998). *Programa CropWat para windows*. <http://www.fao.org/lanandwater/aglw/cropwat.stm>
- Fernández-Sanjurio, M. J., (1999). *Influencia de los fragmentos gruesos en algunas propiedades físicas y químicas del suelo: antecedentes y estado actual del tema*. Sociedad Española de la Ciencia del Suelo, Vol. 6, pp.95-107

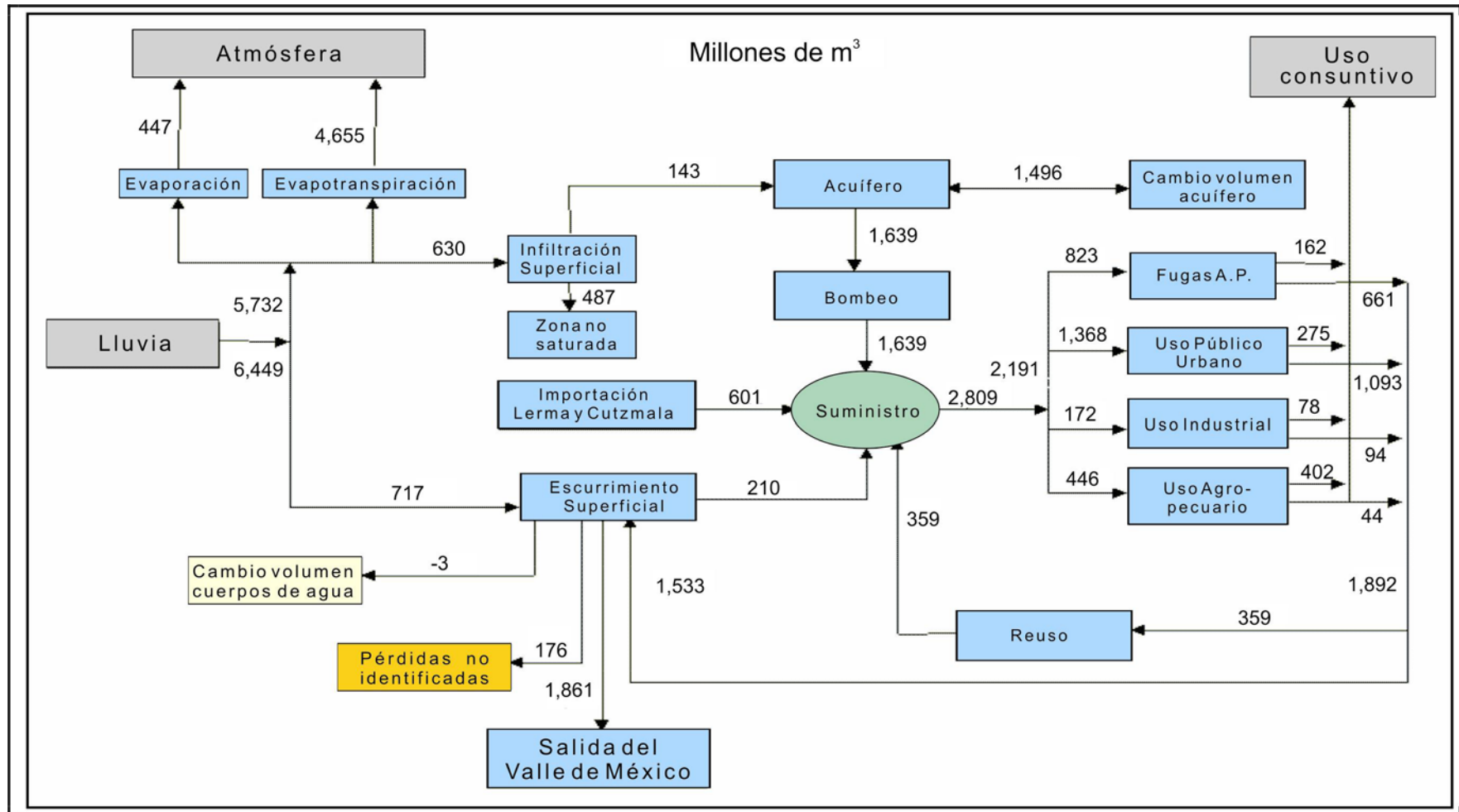
- Foster S. e Hiriata R., (1991). *Determinación del riesgo de contaminación de aguas subterráneas*. Centro Panamericano de Ingeniería Sanitaria y Ciencias del Ambiente (CEPIS), Perú. 2ª Ed., 81 p.
- Freeze R. A. y Cherry J. A., (1979). *Groundwater*. US Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, N.J., 604 p.
- Gutiérrez-López A., (1996-a). *Identificación de regiones hidrológicamente homogéneas con base en las curvas de Andrews*. International Association for Hydraulic Research (IAHR). XVII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Guayaquil, Ecuador.
- Gutiérrez-López A., (1996-b). *Selección de las características fisiográficas significativas de una cuenca, para efectos de regionalización*. XIV Congreso Nacional de Hidráulica, Asociación Mexicana de Hidráulica, Acapulco, México.
- Gutiérrez-López A., Lafragua J., y Aparicio J. (2004-a) *Variabilidad e Incertidumbre en los Componentes de un Balance Hídrico*. International Association for Hydraulic Research (IAHR) XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Brasil
- Gutiérrez-López A., Lebel, T., y Descroix, L., (2004-b) *Reflexiones sobre el concepto de cuencas hidrológicamente homogéneas*. International Association for Hydraulic Research (IAHR) XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Brasil
- Gutiérrez-López A. y Mejía, Z. R., (2005). *Guía Metodológica para Estimar la Variabilidad e Incertidumbre de los Componentes de un Balance Hídrico*, Coordinación de Tecnología Hidrológica, Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA), México.
- Ingebritsen E. S. y Sanford, E. W., (1998). *Groundwater in Geologic*. Process. Cambridge University Press, 341 p.
- Jouravlev A., (2001). *Administración del agua en América Latina y el Caribe en el umbral del siglo XXI*. División de Recursos Naturales e Infraestructura, Comisión Económica para América Latina.
- Kendall S. M., y Stuart A., (1943, 1999). *The advanced theory of statistics*. Charles Griffin Londres. 2 vol. 690 pp. 3 vol., 585 pp. En la edición de 1999.
- Kite G. W., (1988). *Frequency and risk analyses in hydrology*. Water Resources Public. USA, pp.257.
- Lafragua C. y Gutiérrez-López, A., (2005). *Balance Hídrico en la Cuenca del lago de Pátzcuaro*. Coordinación de Tecnología Hidrológica, IMTA y Fundación Gonzalo Río Arronte, FGRA, México.
- Lafragua, C. J., Gutiérrez-López, A., Aguilar, G. E., Aparicio, M. J., Mejía Z. R. y Sánchez D. L. F., (2003) *Balance Hídrico de la Cuenca de México*. Coordinación de Tecnología Hidrológica, IMTA, México.
- López C. F., (2002). *Capital hídrico y usos del agua en Guatemala. "Dialogo Regional de Agua y Clima-CASE STUDY"*.
- López H., R., (2003) *Uso del agua en la industria, subregión hidrológica Valle de México*. IMTA, pp.12; informe interno sin publicar
- Mattos R. y Crespo A., (2000). *Informe Nacional sobre la Gestión del Agua en Bolivia*. <http://www.aguabolivia.org/situacionaguaX/>
- Ministerio del Medio Ambiente. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, IDEAM, (2001). *Estudio Nacional del Agua*.
- Organización de Naciones Unidas, ONU (1977). *Almacenamiento y recarga artificial de aguas subterráneas*. US, New York, 306 p.
- Ortiz V. B. y Ortiz S. C. A., (1990). *Edafología*. Universidad Autónoma de Chapingo, 7º ed., 394 p.

- Osuna C. E. y Padilla R. J., (1998). *Estimación de la sorbilidad e infiltración usando datos de simulación de lluvia para tres tipos de suelos de la zona semiárida de México*. Chapingo, Revista Terra, Vol. 16, No. 4, pp.293-302
- Paris M. y Zucarelli G. (2004) *Delimitación de regiones hidrológicamente homogéneas. Consideraciones metodológicas y ejemplos de aplicación*. International Association for Hydraulic Research (IAHR) XXI Congreso Latinoamericano de Hidráulica. São Pedro, Brasil
- Payne G. R. D., (1995). *Groundwater Recharge and Wells. A Guide to Aquifer Storage Recovery*. US, Lewis Publishers, 376 p.
- Peña, D., y Rodriguez, J., (2003) *Descriptive measures of multivariate scatter and linear dependence*. Journal of multivariate analysis vol. 85 pp. 361-374
- Planos G. E., (1997). *La Hidrología Operativa: Base para el desarrollo de la hidrología aplicada y de los aprovechamientos hidráulicos, experiencia cubana*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Planos G. E., (2001). *Vulnerabilidad y Adaptación de la República Dominicana al Cambio Climático*. Instituto Nacional de Recursos Hidráulicos (INDRHI).
- Rudolph, D. L.; Cherry, J. A. y Farvolden, R. N. (1991). *Groundwater flow and solute transport in fractured lacustrine clay near Mexico city*. US, Water Resources Research, Vol. 27, No. 9, pp. 2187-2201
- Salazar C., (2003). *Situación de los Recursos Hídricos en Chile*. Third World Centre for Water Management.
- Salgado V. E. (2001). *Curso relación suelo-agua-planta*. Chile. Ediciones Universitarias de Valparaíso, 105 p.
- Sánchez S. R. (2001). *Evapotranspiración*. Departamento de Geología, UNAM.
- Saporta, G., (1990) *Probabilités, analyse des données et statistique*. Editions Technip. 193 p.
- Secretaría de Recursos Hidráulicos, SRH (1975). *Usos del agua en la cuenca del Valle de México*. Marco de referencia de los usos del agua a nivel municipal. 37 p.
- Secretaría del Medio Ambiente y Recursos Naturales, SEMARNAT (2002). *Norma Oficial Mexicana NOM-011-CNA-2000*. Conservación del recurso agua. Se establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales. DO, Miércoles 17 de abril de 2002, pp. 1-17
- Servicio Nacional de Estudios Territoriales, SNET (2005). *Balance Hídrico Integrado y Dinámico en El Salvador. Componente Evaluación de Recursos Hídricos*.
- Silvac M., (2002). *Capital Hídrico y Usos del Agua en Nicaragua*.
- Solís, A.Y., González, R.D., Lafragua, C.J., Gutiérrez-López, L.A., Bahena, H.A., Santos, S.J.F., Alfaro, M., Brindis P.J.G., (2005). *Estudio de Actualización de la Disponibilidad y Balance Hidráulico de Aguas Superficiales de la Región Hidrológica No. 12, Cuencas Cerradas de Sayula y Región Hidrológica No. 15, Costa de Jalisco, Considerando las Concesiones del REPDA*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua y Comisión Nacional del Agua (IMTA- CONAGUA), México.
- United Status Corp of Engineers, USCE (1998). *Evaluación de los Recursos de Agua en el Ecuador*. Distrito de Mobile y Centro de Ingeniería Topográfica.
- Valdez E. C., (1991). *Abastecimiento de agua potable*. Facultad de Ingeniería, UNAM, 275 p.
- Viessman, W., Lewis G., (1996). *Introduction to Hydrology*. HarperCollins Colleague Publishers.
- Villanueva M. e Iglesias, L.A., (1984). *Pozos y acuíferos*. Técnicas de evaluación mediante ensayos de bombeo. Madrid, IBERGESA, pp. 426
- Voelker D. y Orton P., (1993). *Statistics Cliffs Quick Review*, USA pp. 164

ANEXO 1

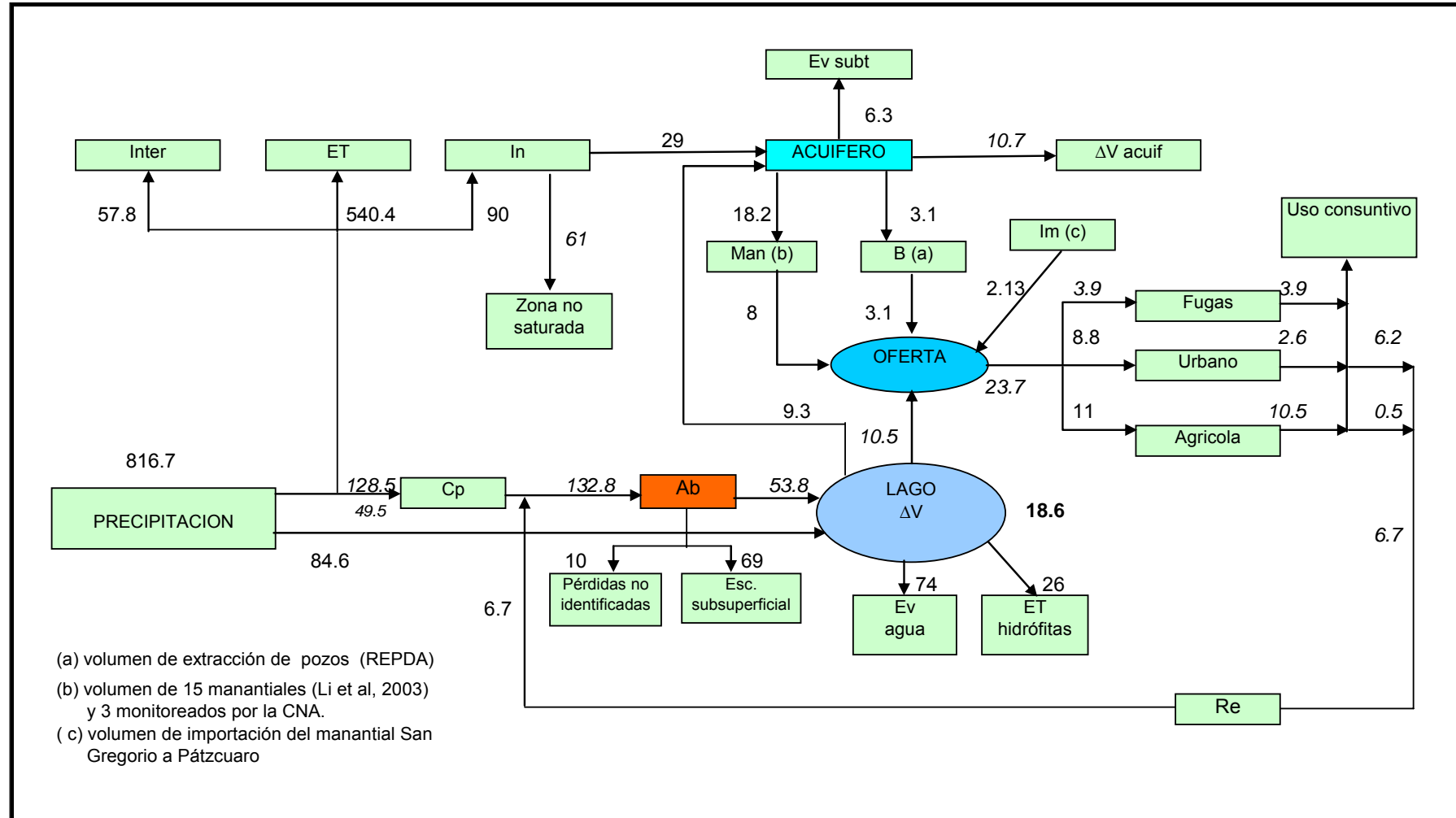
**RESULTADOS DE LOS BALANCES EFECTUADOS
EN LA CUENCA DEL VALLE DE MÉXICO Y EN EL LAGO DE PATZCUARO**

BALANCE HÍDRICO EN EL VALLE DE MÉXICO



Fuente: Lafragua et al., 2003

BALANCE HÍDRICO EN LA CUENCA DEL LAGO DE PÁTZCUARO



Fuente: Lafragua y Gutiérrez-López, 2005.

ANEXO 2

DISPONIBILIDAD DE AGUA SUPERFICIAL EN MÉXICO

A.2.1 Disponibilidad de agua superficial

En algunos países de Latinoamérica e inclusive del mundo, la disponibilidad de agua superficial es considerada como el volumen anual de escurrimiento superficial producido en las cuencas, entre la cantidad de habitantes o entre la superficie total del país, obteniéndose de ésta manera una disponibilidad en m^3 por habitante, o m^3 por unidad de área.

En México, la disponibilidad de agua superficial también toma en cuenta el volumen anual de escurrimiento superficial, pero le resta los volúmenes de agua que son requeridos en los diversos sectores (público-urbano, agrícola, industrial, pecuario, etc.) considerados dentro del Registro Público de Derechos de Agua (REPD). De ésta manera el volumen restante que aún puede utilizarse corresponde a la disponibilidad de agua superficial.

A.2.2 Estimación de la disponibilidad de agua superficial

La metodología utilizada para el cálculo de la disponibilidad de escurrimiento superficial, se aplica después de que se han calculado las diferentes variables de la ecuación de balance, y consiste principalmente en tres pasos:

- I.- Estimación del escurrimiento aguas abajo.
- II.- Distribución de las demandas aguas arriba.
- III.- Estimación de la disponibilidad superficial.

I.- Estimación del escurrimiento aguas abajo.

De acuerdo con la NOM-011-CNA-2000 (adjunta a este Anexo), se deben obtener condiciones promedio de algunas de las variables que intervienen en la ecuación de balance (ecuación 3.1.27) con un registro de por lo menos 25 años; estas variables son precipitación, evaporación, y escurrimiento aforado en estaciones hidrométricas. Para otras variables, como los usos de agua se debe considerar el último padrón/registo de concesiones, y para la variación de volumen, el último año de valores mensuales del volumen almacenado en presas o lagos.

Una variable fundamental es el volumen de escurrimiento hacia aguas abajo, en donde es importante considerar la interconexión entre las subcuencas que integran el sistema completo (cuenca principal). El cálculo empieza por las subcuencas altas o de cabecera, debido a que no tienen aportación desde aguas arriba, y por lo tanto la variable Ar es igual a cero. El cálculo se realiza en el sentido del escurrimiento por gravedad, y se van obteniendo valores de escurrimiento aguas abajo (Ab) hasta encontrar el valor del volumen de agua que escurre hacia las partes más bajas, que pueden ser cuerpos de aguas, como lagos, lagunas o el mar.

El manual para la "*Estimación de la disponibilidad de agua superficial en cuencas*", CNA(1998) indica un intervalo de tiempo anual para este análisis, sin embargo el volumen de escurrimiento superficial en la época de avenidas es muy grande, y oculta periodos de escasez al integrar todas las entradas en un año. Recientemente se han obtenido balances de agua utilizando un intervalo de tiempo mensual y se observa una variación importante en las variables durante todo el año.

II.- Distribución de las demandas aguas arriba.

El siguiente paso consiste en determinar la distribución de las demandas hacia aguas arriba. El procedimiento se hace en sentido inverso al escurrimiento por gravedad, desde las cuencas más bajas hasta las cuencas altas, de esta manera se va reservando el volumen que demandan los usuarios de las cuencas bajas, y se va comprometiendo la entrega de un volumen demandado y concesionado que será aprovechado en las zonas bajas, pero que es posible que provenga desde las cuencas altas, a este volumen se le denomina volumen *comprometido hacia aguas abajo*.

El criterio para reservar esos volúmenes que utilizan los usuarios en las cuencas bajas se basa en un sentido de proporcionalidad, de tal manera que en la misma proporción que aportan agua varias cuencas a una cuenca en análisis, incluyendo la aportación de la cuenca misma, con esa misma proporción se reserva el volumen de agua que debe satisfacer las demandas de la cuenca en estudio y los volúmenes reservados hacia aguas abajo.

De esto último surgen dos tipos de volúmenes reservados, uno que se destina para los usuarios de la misma cuenca, denominado volumen reservado por cuenca propia, y otro que esta destinado a los usuarios de las cuencas subyacentes hacia aguas abajo, denominado volumen reservado hacia aguas abajo.

III.- Estimación de la disponibilidad superficial.

El último paso en la estimación de la disponibilidad superficial, es evaluar la cantidad de agua que se puede utilizar después de haber reservado los volúmenes que ya han sido concesionados.

Así como, existen dos tipos de volúmenes reservados, también hay dos tipos de disponibilidad: la disponibilidad por cuenca propia y la disponibilidad hacia aguas abajo; la primera se calcula con la diferencia del escurrimiento por cuenca propia (escurrimiento virgen) menos el volumen reservado por cuenca propia; la segunda es igual a la diferencia del escurrimiento hacia aguas abajo, menos el volumen reservado hacia aguas abajo.

El significado físico de la disponibilidad por cuenca propia corresponde al volumen que se genera en la misma cuenca y que no ha sido utilizado. La disponibilidad total en el punto aguas debajo de análisis, corresponde a la suma de las disponibilidades por cuenca propia, desde las cuencas que están ubicadas aguas arriba hasta la cuenca más baja.

ANEXO 3

NORMA OFICIAL MEXICANA: 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”



CRISTÓBAL JAIME JÁQUEZ, Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, con fundamento en lo dispuesto por los artículos 3º fracción VI, 4º, 9º fracción XII, 12, 20, 22, 100 y 119 fracción VI de la Ley de Aguas Nacionales; 1º, 3º fracciones IV y XI, 40, 41, 43, 44, 45, 47 y demás relativos y aplicables de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 28, 31, 32, 33 y demás relativos y aplicables del Reglamento de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización; 10 segundo párrafo, 14 fracción XI, 23, 31, 36 y 37 del Reglamento de la Ley de Aguas Nacionales; 39 fracciones V y VI, 41 y 42 párrafo segundo del Reglamento Interior de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y

Que habiéndose cumplido el procedimiento establecido por la Ley Federal sobre Metrología y Normalización para la elaboración de Proyectos de Normas Oficiales Mexicanas, el C. Presidente de Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, ordenó la publicación del Proyecto de Norma Oficial Mexicana PROY-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, publicado en el **Diario Oficial de la Federación** el día 02 de agosto de 2001, a efecto de que los interesados presentaran sus comentarios al citado Comité Consultivo;

Que durante el plazo de sesenta días naturales, contados a partir de la fecha de publicación de dicho Proyecto de Norma Oficial Mexicana, los análisis a los que se refiere el citado ordenamiento legal, estuvieron a disposición del público para su consulta;

Que dentro del plazo referido, los interesados presentaron los comentarios al Proyecto de Norma, los cuales fueron analizados en el citado Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, realizándose las modificaciones pertinentes, mismas que fueron publicadas en el **Diario Oficial de la Federación** el día 18 de febrero de 2002 por la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, y

Que previa aprobación del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, en sesión de fecha 14 de noviembre de 2001, he tenido a bien expedir la siguiente:

NORMA OFICIAL MEXICANA 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”.

CONTENIDO

0. INTRODUCCIÓN
1. OBJETIVO
2. CAMPO DE APLICACIÓN
3. DEFINICIONES
4. ESPECIFICACIONES
5. GRADO DE CONCORDANCIA CON NORMAS Y RECOMENDACIONES INTERNACIONALES
6. BIBLIOGRAFÍA
7. OBSERVANCIA DE ESTA NORMA
8. VIGENCIA

APÉNDICE NORMATIVO “A”

MÉTODOS PARA DETERMINAR EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

APÉNDICE NORMATIVO “B”

MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RECARGA TOTAL DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA

APÉNDICE INFORMATIVO “C”

EJEMPLO PARA DETERMINAR MEDIANTE EL MÉTODO DIRECTO EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

APÉNDICE INFORMATIVO “D”

EJEMPLO PARA DETERMINAR MEDIANTE EL MÉTODO INDIRECTO EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL



0. INTRODUCCIÓN

Los recursos hídricos accesibles para su aprovechamiento por el hombre tienen su origen en la precipitación pluvial (*), que al ocurrir sobre “tierra firme”, se divide en dos fracciones:

- Cerca del 70% del volumen de agua precipitado retorna a la atmósfera por evaporación.
- La fracción complementaria escurre superficialmente por las redes de drenaje natural -arroyos y ríos- hasta desembocar al mar o a cuerpos interiores de agua, o se infiltra y circula a través de acuíferos, que a su vez descargan a cuerpos y cursos superficiales, a través de manantiales o subterráneamente al mar.

Donde el agua no es desviada de manera artificial desde las fuentes hasta sus salidas al mar, a la parte baja de una cuenca interna o a la frontera interior de una unidad hidrogeológica, se desarrolla un sistema natural o “virgen”.

Antes de que el hombre alterara el equilibrio hidrológico para satisfacer sus necesidades, el escurrimiento virgen sustentaba a ecosistemas. Por ello, la naturaleza puede ser visualizada como el primer y natural usuario del agua.

El equilibrio natural fue, gradualmente afectado conforme el hombre fue aumentando la derivación artificial de agua para satisfacer sus necesidades personales (uso doméstico), para la producción de alimentos (uso agropecuario) y para el desarrollo de procesos económicos (uso industrial).

Hasta el siglo XIX el aprovechamiento creciente del agua por el hombre con la consecuente reducción gradual de los escurrimientos naturales, en general, no causó daños graves al ambiente. Sin embargo, en el transcurso del siglo XX la derivación del agua para diversos usos creció de modo acelerado, especialmente durante su segunda mitad, al grado que ahora existen porciones importantes de la superficie continental del planeta, en las cuales el ambiente ha sufrido daños graves; en casos extremos, irreparables.

En vista de lo anterior, es de suma importancia tomar conciencia de que sólo una fracción de los escurrimientos naturales, superficiales o subterráneos, debe ser aprovechada por el hombre. Además de los requerimientos del ambiente, existen limitaciones de índole técnica que reducen aún más la proporción de los escurrimientos naturales aprovechables.

La porción accesible de los escurrimientos naturales de una cuenca, cuya infraestructura de regulación ha sido plenamente desarrollada, en la mayoría de los casos no supera el 70%, a la que hay que deducir los requerimientos del ambiente para determinar la cantidad de agua que puede destinarse a los diversos usos humanos.

Por otra parte, con base en los estudios que ha realizado la Comisión Nacional del Agua, se ha detectado que en diversas regiones, entidades federativas y localidades del país, los volúmenes de agua concesionados superan el escurrimiento y la recarga de los acuíferos, situación que genera escasez del recurso, conflictos entre los usuarios y diversos efectos perjudiciales.

Considerando todo lo anterior y que la Ley de Aguas Nacionales y su Reglamento dispone que para el otorgamiento de asignaciones y concesiones se tomará en cuenta la disponibilidad media anual de agua, es necesario establecer en la presente Norma Oficial Mexicana, las especificaciones para determinar con una metodología consistente, a nivel nacional, la disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales y subterráneas, como base técnica para regular su uso, de manera racional y equitativa.

(*) Excepciones: 1. Obtención de agua dulce por desalación del agua de mar; y
2. Enfriamiento con agua de mar de unidades generadoras de electricidad ubicadas en las costas.



1. OBJETIVO

La presente Norma Oficial Mexicana tiene como objetivo establecer el método base para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales superficiales y subterráneas, para su explotación, uso o aprovechamiento.

2. CAMPO DE APLICACIÓN

Las especificaciones establecidas en la presente Norma Oficial Mexicana son de observancia obligatoria para la Comisión Nacional del Agua y para los usuarios que realicen estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales.

3. DEFINICIONES

Para efectos de la presente Norma Oficial Mexicana, se establecen las siguientes definiciones:

3.1 Acuífero: cualquier formación geológica por la que circulan o se almacenan aguas subterráneas que puedan ser extraídas para su explotación, uso o aprovechamiento.

3.2 Aforo: mediciones realizadas en un cauce con el objetivo de obtener datos básicos para calcular el caudal que pasa por una sección transversal del mismo.

3.3 Cambio de almacenamiento: incremento o decremento del volumen de agua almacenada en la unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo cualquiera.

3.4 Cauce de una corriente: el canal natural o artificial que tiene la capacidad necesaria para que las aguas de la creciente máxima ordinaria escurran sin derramarse. Cuando las corrientes estén sujetas a desbordamiento, se considera como cauce el canal natural, mientras no se construyan obras de encauzamiento.

3.5 Cauce principal: el canal principal que capta y conduce el agua hasta la descarga de una cuenca.

3.6 Caudal base: gasto o caudal que proviene del agua subterránea.

3.7 Comisión: Comisión Nacional del Agua, órgano desconcentrado de la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales.

3.8 Creciente máxima ordinaria: es la que ocurre dentro de un cauce sin que en éste se produzca desbordamiento, en un periodo de retorno de cinco años.

3.9 Cuenca hidrológica: el territorio donde las aguas fluyen al mar a través de una red de cauces que convergen en uno principal, o bien el territorio en donde las aguas forman una unidad autónoma o diferenciada de otras, aún sin que desemboquen en el mar. La cuenca, conjuntamente con los acuíferos, constituyen la unidad de gestión del recurso hidráulico.

3.10 Cuencas homogéneas: son las cuencas hidrológicas en que, por tener características geomorfológicas, climatológicas, geológicas e hidrológicas similares, es válido transferir información hidrológica de una a otra.

3.11 Derrame de un embalse: es aquel que descarga a través de una obra de excedencias.

3.12 Descarga natural: volumen de agua que descarga una unidad hidrogeológica a través de manantiales, vegetación, ríos y humedales, o subterráneamente a cuerpos de agua (mares, lagos y lagunas).



3.13 Descarga natural comprometida: fracción de la descarga natural de una unidad hidrogeológica, que está comprometida como agua superficial para diversos usos o que debe conservarse para prevenir un impacto ambiental negativo a los ecosistemas o la migración de agua de mala calidad a una unidad hidrogeológica.

3.14 Diversos usos: se refiere a todos los usos definidos en la Ley de Aguas Nacionales, como doméstico, agrícola, acuícola, servicios, industrial, conservación ecológica, pecuario, público urbano, recreativo y otros.

3.15 Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica: volumen medio anual de agua subterránea que puede ser extraído de una unidad hidrogeológica para diversos usos, adicional a la extracción ya concesionada y a la descarga natural comprometida, sin poner en peligro el equilibrio de los ecosistemas.

3.16 Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica: valor que resulta de la diferencia entre el volumen medio anual de escurrimiento de una cuenca hacia aguas abajo y el volumen anual actual comprometido aguas abajo.

3.17 Escurrimiento desde aguas arriba: es el volumen medio anual de agua que en forma natural proviene de una cuenca hidrológica ubicada aguas arriba de la cuenca o subcuenca en análisis.

3.18 Escurrimiento natural: es el volumen medio anual de agua superficial que se capta por la red de drenaje natural de la propia cuenca hidrológica.

3.19 Evaporación: es el proceso por el cual el agua, en la superficie de un cuerpo de agua natural o artificial o en la tierra húmeda, adquiere la suficiente energía cinética de la radiación solar, y pasa del estado líquido al gaseoso.

3.20 Evapotranspiración: es la cantidad total de agua que retorna a la atmósfera en una determinada zona por evaporación del agua superficial y del suelo, y por transpiración de la vegetación.

3.21 Extracción de agua subterránea: volumen de agua que se extrae artificialmente de una unidad hidrogeológica para los diversos usos.

3.22 Extracción de agua superficial: volumen de agua que se extrae artificialmente de los cauces y embalses superficiales para los diversos usos.

3.23 Exportación: es el volumen de agua superficial o subterránea que se transfiere de una cuenca hidrológica o unidad hidrogeológica a otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

3.24 Hidrograma: representación gráfica de la variación del gasto o caudal con respecto al tiempo.

3.25 Importación: es el volumen de agua que se recibe en una cuenca hidrológica o unidad hidrogeológica desde otra u otras, hacia las que no drena en forma natural.

3.26 Parteaguas: límite físico de una cuenca o subcuenca hidrológica, representado por la línea imaginaria formada por los puntos de mayor elevación topográfica, que las separa de las vecinas.

3.27 Programación hidráulica: conjunto de programas y estrategias, mediante los cuales se precisan los objetivos nacionales, regionales, estatales y locales de la política en la materia; las prioridades para la explotación, uso o aprovechamiento de las aguas nacionales; la conservación de su cantidad y calidad; los instrumentos para la implantación de acciones programadas; los responsables de su ejecución; y el origen y destino de los recursos requeridos.

3.28 Recarga total: volumen de agua que recibe una unidad hidrogeológica, en un intervalo de tiempo específico.

3.29 Retornos: son los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de la cuenca hidrológica, como remanentes de los volúmenes aprovechados en los diferentes usos del agua.



3.30 Subcuenca: fracción de una cuenca hidrológica, que corresponde a la superficie tributaria de un afluente o de un sitio seleccionado.

3.31 Transpiración: es el proceso por el cual la vegetación extrae humedad del suelo y la libera al aire circundante como vapor.

3.32 Unidad de gestión: territorio de la cuenca o subcuenca hidrológica superficial, o del acuífero o las unidades hidrogeológicas contenidas en ella, que se definen como una unidad para la evaluación, manejo y administración de los recursos hídricos.

3.33 Unidad hidrogeológica: conjunto de estratos geológicos hidráulicamente conectados entre sí, cuyos límites laterales y verticales se definen convencionalmente para fines de evaluación, manejo y administración de las aguas nacionales subterráneas.

3.34 Volumen anual de extracción de agua superficial: cantidad de agua que se debe preservar para satisfacer los derechos de explotación, uso o aprovechamiento de agua asignada o concesionada, y para satisfacer las reservas establecidas conforme a la Programación Hidráulica.

4. ESPECIFICACIONES

4.1 Generales

4.1.1 Las especificaciones establecidas en la presente Norma Oficial Mexicana, se deben aplicar en los estudios para determinar la disponibilidad media anual de aguas nacionales en cuencas hidrológicas y en unidades hidrogeológicas. El método se considerará como el requerimiento técnico mínimo obligatorio y no excluye la aplicación adicional de métodos complementarios o alternos más complicados y precisos, cuando la información disponible así lo permita, en cuyo caso la Comisión revisará conjuntamente con los usuarios y determinará cuales son los resultados que prevalecen.

En caso de que existan discrepancias entre los resultados obtenidos por la Comisión y los usuarios, los estudios realizados se someterán a dictamen dentro del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua, que determinará entonces los valores definitivos.

4.1.2 La disponibilidad media anual de aguas nacionales superficiales en cuencas hidrológicas clasificadas como grandes (área mayor de 3000 km²), deberán subdividirse en función de la problemática regional que enfrente el uso del recurso, de la importancia de sus afluentes, localización de los diferentes usuarios e información hidroclimatológica disponible.

4.1.3 Los elementos considerados en el balance se deben de ajustar a un periodo común y actual.

4.2 Disponibilidad media anual de agua superficial en una cuenca hidrológica

4.2.1 Se determina en el cauce principal en la salida de la cuenca hidrológica, mediante la siguiente expresión:

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} \\ \text{AGUA SUPERFICIAL EN} \\ \text{LA CUENCA} \\ \text{HIDROLÓGICA} \end{array} = \begin{array}{l} \text{VOLUMEN MEDIO} \\ \text{ANUAL DE} \\ \text{ESCURRIMIENTO} \\ \text{DE LA CUENCA HACIA} \\ \text{AGUAS ABAJO} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN ANUAL} \\ \text{ACTUAL COMPROMETIDO} \\ \text{AGUAS ABAJO} \end{array}$$



4.2.2 El volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo del sitio de interés, se determina al aplicar la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO} &= \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA} + \text{VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL} + \text{VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS} \\ &+ \text{VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES} - \text{VOLUMEN ANUAL DE EXTRACCIÓN DE AGUA SUPERFICIAL} \end{aligned}$$

4.2.3 El volumen medio anual de escurrimiento desde la cuenca aguas arriba, se determina con la expresión utilizada para calcular el volumen medio anual de escurrimiento de la cuenca hacia aguas abajo que corresponde al de la subcuenca en estudio ubicada aguas arriba.

4.2.4 El volumen medio anual de escurrimiento natural, se determina aplicando alguno de los métodos descritos en el Apéndice Normativo A de esta Norma Oficial Mexicana.

4.2.5 El volumen anual de retornos, se determina mediante aforo o estimación de las salidas de los volúmenes que se reincorporan a la red de drenaje de una cuenca.

4.2.6 El volumen anual de importaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se reciben en la cuenca hidrológica en estudio, de otra u otras cuencas hidrológicas o unidades hidrogeológicas.

4.2.7 El volumen anual de exportaciones, se determina sumando los volúmenes de agua superficial que se transfieren de la cuenca hidrológica en estudio, a otra u otras a las que no drena en forma natural.

4.2.8 El volumen anual concesionado de agua superficial se determina sumando los volúmenes anuales asignados y concesionados por la Comisión, mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en la cuenca hidrológica, limitaciones que se establezcan en las vedas y si es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, conservación ecológica y reglamentos conforme a la Programación Hidráulica.

4.2.9 El volumen anual de evapotranspiración, está considerado de manera implícita, en el volumen medio anual de escurrimiento natural, al restarle a los volúmenes aforados en la estación aguas abajo los volúmenes aforados en la estación aguas arriba.

4.2.10 El volumen anual actual comprometido aguas abajo, se determina como la parte de los escurrimientos de la cuenca hacia aguas abajo, necesaria para cumplir con los volúmenes asignados y concesionados por la Comisión, limitaciones que se establezcan en las vedas y, si es el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, conservación ecológica, reglamentos y programación hidráulica.

4.2.11 La disponibilidad media anual de agua superficial en una subcuenca o en un punto específico de la red de drenaje de la cuenca hidrológica, se determina aplicando las expresiones y términos que aparecen en los puntos 4.2.1 a 4.2.10 de este inciso.



4.3. Disponibilidad media anual de agua subterránea en una unidad hidrogeológica

4.3.1 Se determina por medio de la siguiente expresión:

$$\begin{array}{l} \text{DISPONIBILIDAD} \\ \text{MEDIA ANUAL DE} \\ \text{AGUA SUBTERRÁNEA} \\ \text{EN UNA UNIDAD} \\ \text{HIDROGEOLÓGICA} \end{array} = \begin{array}{l} \text{RECARGA} \\ \text{TOTAL} \\ \text{MEDIA} \\ \text{ANUAL} \end{array} - \begin{array}{l} \text{DESCARGA} \\ \text{NATURAL} \\ \text{COMPROMETIDA} \end{array} - \begin{array}{l} \text{VOLUMEN} \\ \text{CONCESIONADO DE} \\ \text{AGUA SUBTERRÁNEA} \end{array}$$

4.3.2 La recarga total media anual, se determina mediante la metodología descrita en el Apéndice Normativo B de esta Norma Oficial Mexicana.

4.3.3 La descarga natural comprometida, se determina sumando los volúmenes de agua concesionados de los manantiales y del caudal base de los ríos que están comprometidos como agua superficial, alimentados por una unidad hidrogeológica, más las descargas que se deben conservar para: no afectar a las unidades hidrogeológicas adyacentes; sostener el gasto ecológico; y prevenir la migración de agua de mala calidad a la unidad hidrogeológica considerada.

4.3.4 Volumen concesionado de agua subterránea, se determina sumando los volúmenes anuales de agua, asignados y concesionados por la Comisión mediante títulos inscritos en el Registro Público de Derechos de Agua para la explotación, uso o aprovechamiento de agua en una unidad hidrogeológica, adicionando, de ser el caso, los volúmenes correspondientes a reservas, reglamentos y Programación Hidráulica.

4.4 Disponibilidad media anual de aguas nacionales

4.4.1 La disponibilidad media anual de aguas nacionales, se determina sumando las disponibilidades medias anuales de aguas superficiales y subterráneas.

4.4.2 Al aplicar la metodología expuesta en los apartados anteriores, deberá prestarse especial atención a la conexión hidráulica que puede existir entre las fuentes subterráneas y las superficiales, para evitar que la omisión o la doble cuenta de uno o más términos de los balances, resulte en la mayor o menor estimación de la Disponibilidad de Aguas Subterráneas o de la Disponibilidad de Aguas Superficiales.

4.4.3 El otorgamiento de nuevas concesiones de aguas superficiales o subterráneas estará supeditado a que haya Disponibilidad de Aguas Superficiales o de Aguas Subterráneas, respectivamente, y no a la disponibilidad total obtenida como la suma de ambas.

4.4.4 Los volúmenes de agua accesibles en un lugar y tiempo determinado, dependen regional y localmente, de la climatología, de la variación de la precipitación atmosférica y de la estación del año, de las características geomorfológicas, topográficas, hidrográficas y geológicas, así como de la infraestructura hidráulica existente, por lo cual no siempre son suficientes para que los concesionarios puedan captar la totalidad de los volúmenes medios anuales asignados y concesionados por la Comisión.

4.4.5 En el caso de que la disponibilidad media anual de agua en las cuencas hidrológicas o en las unidades hidrogeológicas, resulte negativa, su valor será representativo de un déficit.



4.4.6 En el caso de que en la cuenca hidrológica en estudio existan presas de almacenamiento y regulación, los volúmenes aprovechables de aguas superficiales, su distribución y usos por cada sistema o subsistema de usuarios de la cuenca, serán establecidos en los reglamentos y disposiciones de la Comisión y, serán determinados con base en los volúmenes de agua almacenados en los embalses naturales y artificiales al inicio del ciclo de interés y considerando, con base en datos históricos, el escurrimiento probable del mismo ciclo, así como el estudio hidrológico y de funcionamiento de embalses correspondiente.

4.4.7 En el caso de cuencas y unidades hidrogeológicas compartidas por dos o más entidades federativas y de cuencas o unidades hidrogeológicas transfronterizas internacionales, la disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas se fijará considerando, además de lo consignado en los incisos anteriores, las disposiciones establecidas en los respectivos reglamentos, tratados internacionales o en otros ordenamientos análogos.

4.4.8 Para el caso de las unidades hidrogeológicas en estudio, los volúmenes máximos autorizables para cada sistema o subsistema de usuarios de las aguas subterráneas, serán establecidos en los reglamentos y disposiciones de la Comisión.

4.4.9 La Disponibilidad de Agua Superficial aguas abajo de un embalse natural o artificial, se determina sumando los derrames del mismo y el volumen medio anual de escurrimiento natural generado entre el embalse y el sitio de interés, y restando al resultado el volumen anual actual comprometido aguas abajo del mismo sitio.

4.4.10 La información requerida para aplicar los métodos descritos en los Apéndices Normativos A y B de esta Norma Oficial Mexicana, que obre en poder de la CNA, podrá ser consultada por los interesados en las oficinas de las Gerencias Regionales y Estatales de la entidad de que se trate.

5. GRADO DE CONCORDANCIA CON NORMAS Y RECOMENDACIONES INTERNACIONALES

No se encontró norma internacional similar en la presente Norma Oficial Mexicana.

6. BIBLIOGRAFÍA

- ASCE, Groundwater Management, Third Edition, Manuals and Reports on Engineering Practice No. 40, American Society of Civil Engineers, New York, 1987.
- Aparicio Mijares, F. J., Fundamentos de Hidrología de Superficie. Editorial Limusa, México, 1994.
- Balek, J., Groundwater Resources Assessment, Developments in Water Sciences, No. 38, Elsevier, Amsterdam, 1989.
- Boletines Hidrológicos publicados por la Secretaría de Recursos Hidráulicos, Comisión Federal de Electricidad y Comisión Internacional de Límites y Aguas.
- Bouwer, H., Groundwater Hydrology, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. Tokio, 1978.
- Bureau of Reclamation, U.S. Department of Interior, Design of Small Dams, 1987
- Campos Aranda, Daniel, Procesos del Ciclo Hidrológico, Universidad de San Luis Potosí, México, 1992.
- Comisión Nacional del Agua e Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, Manual de Ingeniería de Ríos, Capítulos 1 al 25, México 1990.
- Custodio, E. y Llamas, M. Hidrología Subterránea, Tomo 1. Omega, Barcelona, 1983.
- Fetter, C. W., Applied Hydrogeology, Third Edition. Prentice-Hall Inc. New Jersey, 1994.
- Freeze, R.A., Cherry, J. A., Groundwater, Prentice Hall. USA, 1979.
- Gutiérrez-Ojeda, C., Metodologías para Estimar la Recarga de Acuíferos (1a. Etapa), Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, México.
- Lerner, D. N., Issar, A. S. and Simmers, I. Groundwater Recharge. A Guide to Understanding and Estimating Natural Recharge. International Contributions to Hydrogeology. International Association of Hydrogeologists. Volume 8. Verlag Heinz Heise. Hannover, 1990.



COMISION NACIONAL
DEL AGUA

- Linsley Ray K. Kohler Max A. Hydrology for Engineers, McGraw Hill, 1986.
- Luna N. H., y Rentería, G. S., Balances Hidráulicos del Programa Nacional Hidráulico, XIII Congreso Nacional de Hidráulica, Puebla, Pue., 1994.
- Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1975.
- Plan Nacional Hidráulico, Secretaría de Agricultura y Recursos Hidráulicos, 1981.
- Planos de Isoyetas Normales Anuales editados por la Comisión Nacional del Agua.
- Pequeños Almacenamientos, del Plan Nacional de Obras de Riego para el Desarrollo Rural de la Secretaría de Recursos Hidráulicos, 1965
- Walton, W. C., Groundwater Resources Evaluation. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., Tokio, 1970.

7. OBSERVANCIA DE ESTA NORMA

La Comisión Nacional del Agua es la responsable de coordinar la participación de los gobiernos estatales y municipales y de las demás entidades e instituciones involucradas en la aplicación de la presente Norma Oficial Mexicana.

La vigilancia del cumplimiento de la presente Norma Oficial Mexicana corresponde a la Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, por conducto de la Comisión Nacional del Agua. Las violaciones a la misma se sancionarán en los términos de la Ley Federal sobre Metrología y Normalización, su Reglamento, la Ley de Aguas Nacionales, su Reglamento y demás disposiciones legales aplicables.

8. VIGENCIA

La presente Norma Oficial Mexicana entrará en vigor a los 60 días naturales posteriores a su publicación en el Diario Oficial de la Federación.

TRANSITORIOS

PRIMERO.- Provéase la publicación de esta Norma Oficial Mexicana en el **Diario Oficial de la Federación**.

SEGUNDO.- Para efectos de la entrada en vigor de la presente Norma Oficial Mexicana, el gasto ecológico se determinará de acuerdo a la norma correspondiente, o el valor que se determine en un estudio particular.

Dada en la Ciudad de México, Distrito Federal, el _____ de _____ de dos mil dos.

El Presidente del Comité Consultivo Nacional de Normalización del Sector Agua

Cristóbal Jaime Jáquez



APÉNDICE NORMATIVO "A"

MÉTODOS PARA DETERMINAR EL VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

En este Apéndice se describen los métodos para determinar, el volumen medio anual de escurrimiento natural. La descripción de los métodos se limita a los conceptos y expresiones básicas.

Las expresiones permiten determinar el escurrimiento natural en los métodos aquí descritos, para cada año del periodo analizado, hidrométrico o climatológico, según sea el caso, y posteriormente se obtiene su promedio.

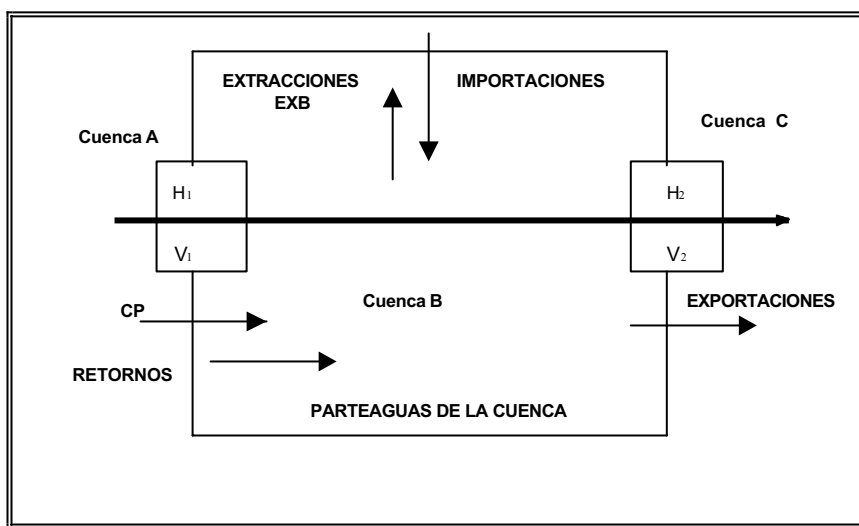
A.1 El volumen medio anual de escurrimiento natural, se determina aplicando alguno de los siguientes métodos:

A.1.1 Método Directo

A.1.1.1 Registros hidrométricos

Este método se aplica, si en la cuenca en estudio se cuenta con suficiente información hidrométrica para un período mínimo de 20 años, en el caso común de tener un sistema de cuencas interconectadas, se debe elaborar un esquema de interconexión de la cuenca hidrológica en estudio con las cuencas vecinas, indicando los nombres de los cauces, dirección del flujo y, en su caso, la ubicación de los embalses naturales y artificiales.

ESQUEMA DE INTERCONEXIÓN DE LA CUENCA "B" EN ESTUDIO



Donde:

- | | |
|---------------------------------|--|
| H ₁ | Estación hidrométrica ubicada aguas arriba en el cauce principal. |
| H ₂ | Estación hidrométrica ubicada aguas abajo en el cauce principal. |
| EXB | Extracciones para los diferentes usos en la cuenca B. |
| V ₁ , V ₂ | Volúmenes aforados en las estaciones hidrométricas H1 y H2, respectivamente. |
| CP | Escurrecimiento natural por cuenca propia. |



El volumen anual de escurrimiento natural de la cuenca se determina con la siguiente expresión:

$$\begin{aligned} \text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA (CP)} &= \text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO AFORADO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO (V}_2\text{)} \\ &+ \text{VOLUMEN ANUAL CONCESIONADO DE AGUA SUPERFICIAL (EXB)} \\ &- \text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO AFORADO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA (V}_1\text{)} \\ &+ \text{VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES} \\ &- \text{VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES} \\ &- \text{VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS} \end{aligned}$$

Información requerida:

- Nombre y área de la cuenca hidrológica o subcuenca en estudio.
- Ubicación de la cuenca hidrológica en cartas hidrográficas, indicando su localización con respecto a la región o subregión hidrológica y entidad(es) federativa(s) a la(s) que pertenece.
- Nombre de las estaciones hidrométricas y su ubicación sobre el cauce principal.
- Volúmenes de extracción de la cuenca hidrológica en estudio y sus diversos usos.
- Notas aclaratorias necesarias.
- Anexo con la información utilizada.

En el apéndice informativo “C” se muestra cómo determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural, con el método directo.

A.1.2 Métodos Indirectos

En caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información de registros hidrométricos o ésta sea escasa, para determinar el volumen medio anual de escurrimiento natural se aplica el método indirecto denominado: precipitación-escurrimiento.

A.1.2.1 Precipitación-escurrimiento

El volumen medio anual de escurrimiento natural se determina indirectamente, mediante la siguiente expresión:

$$\text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA} = \text{PRECIPITACIÓN ANUAL DE LA CUENCA} * \text{ÁREA DE LA CUENCA} * \text{COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO}$$



A.1.2.1.1 Precipitación anual en la cuenca

A) Si en la cuenca en estudio se cuenta con suficiente información pluviométrica de cuando menos 20 años, la precipitación anual se determina a partir del análisis de los registros de las estaciones ubicadas dentro y vecinas a la cuenca, mediante el método de Polígonos de Thiessen o Isoyetas.

B) Cuando en la cuenca en estudio no se cuenta con información pluviométrica o ésta sea escasa, la precipitación anual, se podrá obtener con apoyo de los planos de Isoyetas Normales Anuales editados por la Comisión.

A.1.2.1.2 Coeficiente de escurrimiento

El coeficiente de escurrimiento se determina a partir de los siguientes procedimientos:

A) Transferencia de información hidrométrica y climatológica de cuencas vecinas, hidrológicamente homogéneas.

- En la cuenca vecina, se determinan los coeficientes anuales de escurrimiento (C_e), mediante la relación del volumen de escurrimiento anual (V_e), entre el volumen de precipitación anual (V_p) correspondiente.

$$C_e = V_e / V_p$$

- Con los valores del volumen de precipitación anual y el coeficiente de escurrimiento anual obtenidos en la cuenca vecina, se establece una correlación gráfica o su ecuación matemática.
- Con apoyo de la ecuación matemática o en la gráfica; y al utilizar los valores del volumen de precipitación anual de la cuenca en estudio, se estiman los correspondientes coeficientes anuales de escurrimiento.

B) En función del tipo y uso de suelo y del volumen de precipitación anual, de la cuenca en estudio.

- A falta de información específica, con apoyo en los servicios del Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática (INEGI) y de visitas de campo, se clasifican los suelos de la cuenca en estudio, en tres diferentes tipos: A (suelos permeables); B (suelos medianamente permeables); y C (suelos casi impermeables), que se especifican en la tabla 1 y al tomar en cuenta el uso actual del suelo, se obtiene el valor del parámetro K, (véase Plan Nacional de Obras de Riego para el Desarrollo Rural “Pequeños Almacenamientos”. Secretaría de Recursos Hidráulicos, adaptación del Libro: Small Dams).



TABLA 1 VALORES DE K, EN FUNCIÓN DEL TIPO Y USO DE SUELO

TIPO DE SUELO	CARACTERÍSTICAS
A	Suelos permeables, tales como arenas profundas y loess poco compactos
B	Suelos medianamente permeables, tales como arenas de mediana profundidad: loess algo más compactos que los correspondientes a los suelos A; terrenos migajosos
C	Suelos casi impermeables, tales como arenas o loess muy delgados sobre una capa impermeable, o bien arcillas

USO DEL SUELO	TIPO DE SUELO		
	A	B	C
Barbecho, áreas incultas y desnudas	0,26	0,28	0,30
Cultivos:			
En Hileras	0,24	0,27	0,30
Legumbres o rotación de pradera	0,24	0,27	0,30
Granos pequeños	0,24	0,27	0,30
Pastizal:			
% del suelo cubierto o pastoreo			
Más del 75% - Poco -	0,14	0,20	0,28
Del 50 al 75% - Regular -	0,20	0,24	0,30
Menos del 50% - Excesivo -	0,24	0,28	0,30
Bosque:			
Cubierto más del 75%	0,07	0,16	0,24
Cubierto del 50 al 75%	0,12	0,22	0,26
Cubierto del 25 al 50%	0,17	0,26	0,28
Cubierto menos del 25%	0,22	0,28	0,30
Zonas urbanas	0,26	0,29	0,32
Caminos	0,27	0,30	0,33
Pradera permanente	0,18	0,24	0,30

- Si en la cuenca en estudio, existen diferentes tipos y usos de suelo, el valor de K se calcula como la resultante de subdividir la cuenca en zonas homogéneas y obtener el promedio ponderado de todas ellas.
- Una vez obtenido el valor de K, el coeficiente de escurrimiento anual (Ce), se calcula mediante las fórmulas siguientes:

K: PARÁMETRO QUE DEPENDE DEL TIPO Y USO DE SUELO	COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO ANUAL (Ce)
Si K resulta menor o igual que 0,15	$Ce = K (P-250) / 2000$
Si K es mayor que 0,15	$Ce = K (P-250) / 2000 + (K - 0,15) / 1,5$

P= Precipitación anual, en mm.

Rango de validez.- Las fórmulas se considerarán válidas para valores de precipitación anual entre 350 y 2150 mm.

La evapotranspiración está incluida en el coeficiente de escurrimiento.



- C) En aquellos casos en que se cuente con estudios hidrológicos y se conozcan los coeficientes de escurrimiento, éstos se podrán usar para el cálculo del escurrimiento.

Información requerida:

- Procedimiento de cálculo y metodología utilizados para determinar la precipitación media anual en la cuenca.
- Procedimiento de estimación y consideraciones para determinar el coeficiente de escurrimiento.
- Relación de las estaciones climatológicas utilizadas para determinar los escurrimientos, indicando sus coordenadas geográficas, así como las entidades federativas a las que pertenecen, poblaciones próximas importantes y cualquier otra información de utilidad que permita hacer más claro el cálculo del volumen anual de escurrimiento natural.

En el caso de que en la cuenca en estudio no se cuente con suficiente información hidrométrica, ni pluviométrica o ambas sean escasas, el volumen medio anual de escurrimiento natural, se determina indirectamente transfiriendo la información de otras cuencas vecinas de la región, mismas que se consideran homogéneas y que cuentan con suficiente información hidrométrica o pluviométrica.

Además de la información requerida en los puntos A.1.1.1 y A.1.2.1 es necesaria, la siguiente:

- Descripción del método aplicado, así como la justificación de su empleo en esa cuenca, subcuenca o punto específico.
- Relación de las variables significativas de la cuenca, empleadas en el cálculo del coeficiente de escurrimiento.
- Resultados de las pruebas de homogeneidad hidrológica, climatológica y fisiográfica de las cuencas vecinas y/o registros empleados en la transferencia de información.



APÉNDICE NORMATIVO “B”

MÉTODO PARA DETERMINAR LA RECARGA TOTAL MEDIA ANUAL DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA

En este Apéndice se describen los métodos que deberán aplicarse para determinar la recarga total media anual de la unidad hidrogeológica. La descripción de los métodos se limita a los conceptos y expresiones básicas; su detalle puede consultarse en las referencias bibliográficas de esta Norma Oficial Mexicana.

B.1 Balance de aguas subterráneas

La recarga total que recibe un acuífero o unidad hidrogeológica en un intervalo de tiempo dado, se determina por medio del balance de agua subterránea, que en su forma más simple está representado por la siguiente expresión:

$$\left. \begin{array}{l} \text{RECARGA TOTAL} \\ \text{(SUMA DE ENTRADAS)} \end{array} \right| = \left| \begin{array}{l} \text{CAMBIO DE} \\ \text{ALMACENAMIENTO DE LA} \\ \text{UNIDAD HIDROGEOLÓGICA} \end{array} \right| + \left| \begin{array}{l} \text{DESCARGA} \\ \text{TOTAL} \\ \text{(SUMA DE SALIDAS)} \end{array} \right|$$

Para deducir una recarga media representativa, se planteará el balance a un intervalo de tiempo de varios años en que se disponga de los datos básicos para cuantificar sus términos y que incluya tanto años secos como años lluviosos. En su defecto, el balance se planteará para un intervalo mínimo de un año.

B.2 Cambio de almacenamiento de una unidad hidrogeológica

El cambio de almacenamiento en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se determina a partir de la evolución de los niveles del agua subterránea correspondientes al mismo intervalo y de valores representativos del coeficiente de almacenamiento del acuífero. El valor de este coeficiente se determina a partir de pruebas de bombeo y/o con base en consideraciones relativas al tipo y litología del acuífero en estudio.

B.3 Descarga total

La descarga total de una unidad hidrogeológica en el intervalo de tiempo considerado en el balance, se calcula como la suma de los volúmenes descargados en forma natural y de los extraídos de la misma por medio de captaciones, durante el mismo intervalo.

B.3.1 Descarga natural

Para determinar la descarga natural a través de los vertedores más comunes de un acuífero, se utilizará dependiendo del caso, alguno de los métodos indicados a continuación:

B.3.1.1. Caudal base

La descarga de una unidad hidrogeológica a una corriente superficial, por convención denominada “Caudal Base”, se determina a partir de los datos registrados en estaciones hidrométricas instaladas sobre el cauce de la corriente, mediante el análisis de hidrogramas para diferenciar el caudal base. Si se dispone de varias estaciones hidrométricas, el método mencionado se aplicará a los tramos comprendidos entre ellas, para conocer la distribución de esta descarga a lo largo del cauce. Las mediciones para determinar el caudal, deberán realizarse a lo largo de los periodos de estiaje.



B.3.1.2 Manantiales

La descarga de una unidad hidrogeológica a través de un manantial se determina integrando el área bajo el hidrograma, esto es, multiplicando el intervalo de balance por el gasto medio correspondiente. El hidrograma se trazará con base en aforos realizados con frecuencia suficiente para conocer las variaciones estacionales y anuales del gasto. En todo caso, mediante consideraciones topográficas, hidrogeológicas, hidrodinámicas e hidrogeoquímicas, deberá verificarse que el manantial en cuestión es alimentado por una unidad hidrogeológica que se está evaluando.

B.3.1.3 Evapotranspiración

La descarga de una unidad hidrogeológica a la atmósfera puede tener lugar por evaporación directa de agua freática somera y por la transpiración de la flora.

La descarga de agua subterránea por evaporación directa se estima multiplicando el área donde tiene lugar el fenómeno por una lámina de agua equivalente a una fracción de la evaporación potencial medida en las estaciones climatológicas. El valor de esa fracción varía entre un máximo de uno, cuando el nivel freático aflora, y cero cuando éste se halla a profundidades mayores que la altura de la faja capilar de los materiales predominantes entre la superficie del terreno y el nivel freático; a falta de información, se supondrá que el valor de la fracción varía entre valores extremos linealmente según la profundidad de dicho nivel.

La descarga de agua subterránea por evapotranspiración depende de varios factores climáticos, hidrogeológicos y fisiológicos (tipo y densidad de vegetación), que por su amplia variación en el espacio y en el tiempo no son controlables a la escala de una cuenca o de un acuífero. Ante esta dificultad, la magnitud de este componente de descarga no se estimará por separado y su valor quedará implícito en el resultado del balance, lo cual se traducirá en una estimación conservadora de la recarga y de la disponibilidad de agua subterránea.

B.3.1.4 Flujo subterráneo

La descarga subterránea del acuífero se determina aplicando la Ley de Darcy a las secciones de salida definidas en la configuración de los niveles del agua subterránea, considerando las variaciones de ésta a lo largo del intervalo de tiempo usado en el balance.

B.3.2 Extracción

La extracción de agua subterránea en los intervalos de tiempo considerados en el balance se determina a partir de las lecturas registradas en los medidores instalados en las descargas de los pozos o, a falta de ellos, con base en los métodos indirectos – caudal y tiempo de bombeo, consumo de energía eléctrica, población servida y dotación, índices de consumo, superficies y láminas de riego – que sean aplicables según el uso del agua.

B.4. Recarga total media anual

La recarga total media anual se obtendrá dividiendo la recarga total deducida del balance, entre el número de años del intervalo de tiempo utilizado para plantearlo.



B.5 Información requerida

- Plano base de la unidad hidrogeológica (planta y cortes)
- Descripción geológica, hidrológica e hidrogeológica
- Datos climatológicos
- Censo de captaciones de agua subterránea
- Cortes litológicos de pozos
- Investigación geofísica
- Cotas de brocal de los pozos de observación
- Datos del comportamiento de los niveles del agua subterránea a través del tiempo
- Características hidráulicas de las unidades hidrogeológicas
- Registro hidrométrico de extracciones y descargas naturales de agua subterránea
- Información de la infraestructura hidráulica urbana, agrícola o industrial y datos de los volúmenes de agua manejados por medio de ella
- Cálculo de redes de flujo subterráneo (entradas y salidas para diferentes periodos)

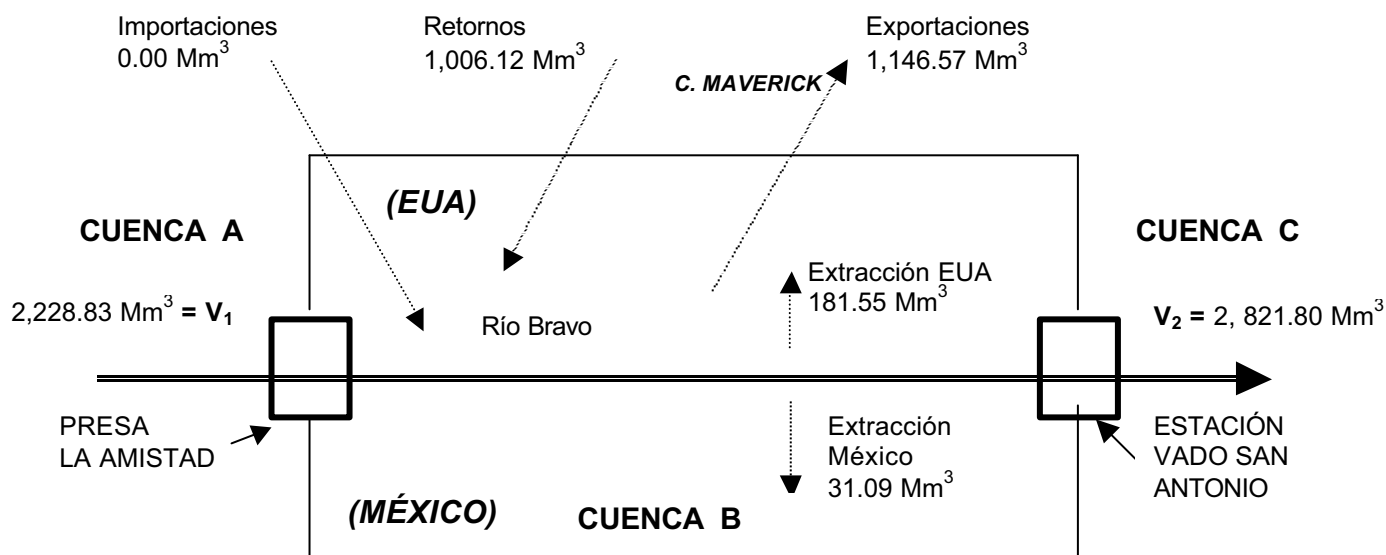


APENDICE INFORMATIVO "C"

EJEMPLO PARA DETERMINAR MEDIANTE EL MÉTODO DIRECTO EL VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL

Utilizando la información hidrométrica, correspondiente al período 1960-1992, se calcula el volumen anual de escurrimiento natural en la cuenca del Río Bravo, en el tramo comprendido entre la presa la Amistad y la estación Vado San Antonio.

ESQUEMA DE LA CUENCA DEL RÍO BRAVO EN EL TRAMO
COMPRENDIDO ENTRE LA PRESA LA AMISTAD Y LA ESTACIÓN VADO
SAN ANTONIO



Donde:

- H₁; V₁ Estación y Volumen aforado aguas abajo de la Presa la Amistad, en millones de metros cúbicos (Mm³).
- H₂; V₂ Estación y Volumen aforado en el Vado San Antonio, en Mm³.
- CP Volumen medio anual de escurrimiento natural, en Mm³.



INFORMACIÓN HIDROMÉTRICA (PERIODO 1960 – 1992)

AÑO	V ₂	V ₁	EXTRACCIÓN		EXPORTACIÓN C. MAVERICK	IMPORTA- CIONES	RETORNOS C. MAVERICK	ESC. NATURAL
			MEXICO	USA				
1960	2765,38	2506,23	24,59	154,62	1173,31	0,00	1068,79	542,88
1961	3054,15	2217,59	13,62	154,97	1267,30	0,00	1146,71	1125,73
1962	1813,35	1748,80	20,92	156,89	1203,12	0,00	1041,24	404,23
1963	1572,84	1543,65	16,87	157,24	1189,53	0,00	1036,34	356,49
1964	4025,36	2894,45	18,90	154,36	1131,22	0,00	966,42	1468,99
1965	2156,13	1886,88	16,59	178,40	1210,05	0,00	1081,32	592,96
1966	3023,69	2863,42	10,88	174,53	1200,41	0,00	1090,57	455,53
1967	1939,86	1822,68	23,57	173,69	1178,53	0,00	1012,30	480,68
1968	1451,09	1280,21	17,87	203,06	1170,45	0,00	1054,28	507,98
1969	1282,94	901,44	19,31	203,03	992,38	0,00	839,64	756,57
1970	1591,99	1317,28	9,62	178,07	871,64	0,00	715,88	618,16
1971	2487,15	1478,35	15,98	189,09	851,17	0,00	657,34	1407,71
1972	1105,73	514,10	17,62	190,18	565,72	0,00	405,83	959,32
1973	1990,41	1359,44	15,18	188,16	936,54	0,00	791,06	979,78
1974	4731,40	4390,92	24,62	188,89	1136,24	0,00	953,26	736,97
1975	3459,80	2315,25	23,61	188,87	1185,91	0,00	1021,45	1522,49
1976	4259,15	2345,97	27,55	188,19	1099,54	0,00	972,38	2256,08
1977	2671,32	2019,21	19,95	186,77	974,69	0,00	795,66	1037,86
1978	3291,25	2744,79	22,55	183,00	1251,67	0,00	1076,78	926,90
1979	3317,79	2631,83	19,27	189,89	1251,61	0,00	1081,31	1065,42
1980	3032,83	2435,96	24,28	184,01	1337,17	0,00	1135,74	1006,59
1981	3275,51	2303,47	42,04	191,59	1328,62	0,00	1180,89	1353,40
1982	2704,21	2399,79	36,31	193,92	1308,36	0,00	1120,30	722,71
1983	2027,33	1659,84	34,51	185,71	1240,86	0,00	1073,03	755,54
1984	2294,23	2086,91	44,92	188,61	1075,50	0,00	940,13	576,21
1985	1885,62	1505,49	59,83	183,83	1205,78	0,00	1109,10	720,48
1986	3659,09	2944,38	37,52	183,98	1156,80	0,00	1093,51	999,50
1987	4015,22	2383,62	37,37	175,67	1238,92	0,00	1120,47	1963,08
1988	2779,26	2236,36	37,37	175,67	1207,68	0,00	1043,08	920,54
1989	2425,77	2225,95	57,83	186,24	1237,40	0,00	1055,86	625,45
1990	4435,22	3579,38	56,17	186,82	1316,49	0,00	1219,70	1195,63
1991	4235,55	3759,04	58,07	187,24	1133,28	0,00	1202,88	652,23
1992	4358,91	3248,82	120,73	185,95	1208,88	0,00	1098,66	1526,99
MEDIA	2821,80	2228,83	31,09	181,55	1146,57	0,00	1006,12	946,09

Nota.- Volúmenes en millones de metros cúbicos

Cálculo del volumen anual de escurrimiento natural para el año de 1960:

Sustituyendo los volúmenes en la fórmula:

$CP = V_2 + \text{Extracciones} - V_1 + \text{Exportaciones} - \text{Importaciones} - \text{Retornos}$

$$\begin{array}{r}
 \text{VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL DE LA CUENCA (Cp)} \\
 + \text{ VOLUMEN ANUAL DE EXPORTACIONES} \\
 = \text{ VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO AFORADO DE LA CUENCA HACIA AGUAS ABAJO (V}_2\text{)} \\
 + \text{ VOLUMEN ANUAL DE CONCESIONADO DE AGUA SUPERFICIAL (EXB)} \\
 - \text{ VOLUMEN ANUAL DE IMPORTACIONES} \\
 - \text{ VOLUMEN ANUAL DE RETORNOS} \\
 - \text{ VOLUMEN ANUAL DE ESCURRIMIENTO AFORADO DESDE LA CUENCA AGUAS ARRIBA (V}_1\text{)}
 \end{array}$$

$$CP = 2,765.38 + 179.21 - 2,506.23 + 1,173.31 - 0 - 1,068.79 = 542.88 \text{ Mm}^3$$



COMISION NACIONAL
DEL AGUA

VOLUMEN MEDIO ANUAL DE ESCURRIMIENTO NATURAL:

El cálculo del Volumen Medio Anual de Esgurrimiento Natural, se obtiene con el promedio de los Volúmenes Anuales de Esgurrimiento Natural:

$$CP = (542.88 + 1,125.73 + 404.23 + + 1,195.63 + 652.23 + 1,526.99) / 33 = 31,221.08 / 33 =$$

$$\text{Volumen Medio Anual de Esgurrimiento Natural (CP)} = 946.09 \text{ Mm}^3$$



APENDICE INFORMATIVO "D"

EJEMPLO PARA DETERMINAR EL ESCURRIMIENTO MEDIO ANUAL NATURAL POR EL
MÉTODO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO.

Estaciones con influencia en la cuenca del río Tequisistlán, Oax. (mm)

Año	San Carlos Yautepec	Ecatepec	Boquilla No 1	Tequisistlán
1971	924.1	1155.7	452.3	697.9
1972	329.2	890.5	161.2	615.0
1973	726.7	1447.5	486.6	772.7
1974	425.6	978.5	500.0	746.9
1975	590.5	988.3	374.4	463.8
1976	243.7	833.0	242.3	334.7
1977	343.4	565.5	348.6	368.5
1978	728.5	995.2	592.3	643.0
1979	504.3	1400.4	717.6	735.4
1980	467.5	818.5	538.8	365.5
1981	820.7	1380.5	836.2	923.6
1982	466.0	873.0	499.2	361.4
1983	526.3	872.0	472.3	540.7
1984	621.0	1325.5	588.0	678.2
1985	533.9	792.1	662.3	376.0
1986	425.7	1192.7	665.4	440.7
1987	421.5	798.3	441.8	373.6
1988	570.5	1150.5	816.7	679.2
1989	817.5	1094.5	615.5	616.8
1990	471.9	350.0	650.1	407.7
1991	321.0	1121.5	506.0	630.0
1992	584.5	1022.5	709.2	492.9
Promedio	539.3	1002.1	539.9	557.5



Cálculo de la precipitación anual (P) en la cuenca del río Tequisistlán, Oax. (mm)

Año	San Carlos Yautepec PA 10.3%	Ecatepec PA 61%	Boquilla No 1 PA 5.7%	Tequisistlán PA 23%	Precipitación anual en la cuenca (P)
1971	95.2	705.0	25.8	160.5	986.5
1972	33.9	543.2	9.2	141.5	727.8
1973	74.9	883.0	27.7	177.7	1163.3
1974	43.8	596.9	28.5	171.8	841.0
1975	60.8	602.9	21.3	106.7	791.7
1976	25.1	508.1	13.8	77.0	624.0
1977	35.4	345.0	19.9	84.8	485.0
1978	75.0	607.1	33.8	147.9	863.8
1979	51.9	854.2	40.9	169.1	1116.2
1980	48.2	499.3	30.7	84.1	662.2
1981	84.5	842.1	47.7	212.4	1186.7
1982	48.0	532.5	28.5	83.1	692.1
1983	54.2	531.9	26.9	124.4	737.4
1984	64.0	808.6	33.5	156.0	1062.0
1985	55.0	483.2	37.8	86.5	662.4
1986	43.8	727.5	37.9	101.4	910.7
1987	43.4	487.0	25.2	85.9	641.5
1988	58.8	701.8	46.6	156.2	963.3
1989	84.2	667.6	35.1	141.9	928.8
1990	48.6	213.5	37.1	93.8	392.9
1991	33.1	684.1	28.8	144.9	890.9
1992	60.2	623.7	40.4	113.4	837.7
Promedio	55.5	611.3	30.8	128.2	825.8

PA = Porcentaje de área de influencia (THIESSEN)



**METODO DEL COEFICIENTE DE ESCURRIMIENTO
VOLUMENES ANUALES CUENCA RÍO TEQUISISTLAN, OAX.**

Año	P (mm)	Ce anual	Volumen Anual de Esgurrimento Natural (Mm³)
1971	986.5	0.159	346.53
1972	727.8	0.126	203.57
1973	1163.3	0.181	465.52
1974	841.0	0.141	261.57
1975	791.7	0.134	235.44
1976	624.0	0.113	156.62
1977	485.0	0.096	103.08
1978	863.8	0.143	274.11
1979	1116.2	0.175	432.13
1980	662.2	0.118	173.20
1981	1186.7	0.184	482.57
1982	692.1	0.122	186.75
1983	737.4	0.128	208.21
1984	1062.0	0.168	395.23
1985	662.4	0.118	173.29
1986	910.7	0.149	300.80
1987	641.5	0.116	164.12
1988	963.3	0.156	332.19
1989	928.8	0.152	311.43
1990	392.9	0.085	73.50
1991	890.9	0.147	289.38
1992	837.7	0.140	259.78
PROM	825.8	0.139	264.96

$$K = 0.25$$

Como $K > 0.15$, se emplea la ecuación:

$$Ce = K \frac{(P - 250)}{2000} + \frac{(K - 0.15)}{1.5}$$

Volumen Medio Anual de Esgurrimento Natural = $P * At * Ce = 0.8258 \times 2213 \times 0.139$

Por lo tanto el volumen medio anual natural = 264.96 Mm^3

P = Precipitación anual

Ce = Coeficiente de esgurrimento anual

At = Área total de la subcuenca = 2213 km^2

K = Parámetro que depende del tipo, uso y cubierta del suelo

IMPRESO Y ENCUADERNADO EN
MASTERGRAF SRL
GRAL. PAGOLA 1727 - CP 11800 - TEL.: 203 4760*
MONTEVIDEO - URUGUAY
E-MAIL: MASTERGRAF@NETGATE.COM.UY

DEPÓSITO LEGAL 339.020 / 06 - COMISIÓN DEL PAPEL
EDICIÓN AMPARADA AL DECRETO 218/96

Evaluación de los recursos hídricos

Elaboración del balance hídrico integrado por
cuencas hidrográficas



Organización
de las Naciones Unidas
para la Educación,
la Ciencia y la Cultura



Programa Hidrológico Internacional



UNESCO

Programa Hidrológico Internacional
Oficina Regional de Ciencia
para América Latina y el Caribe
Edificio Mercosur - Dr. Luis Piera 1992, 2° piso
Casilla de Correo 859
11200 Montevideo, Uruguay
Tel.: (598-2) 413 20 75, Fax: (598-2) 413 20 94
phi@unesco.org.uy
<http://www.unesco.org.uy/phi>

Instituto Mexicano de Tecnología del Agua (IMTA)
Paseo Cuauhnáhuac 8532; C.P. 62550
Jiutepec, Morelos, México.
Tel./fax: +52 (777) 329 3600
<http://www.imta.mx/>

