

Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala

Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo

Guatemala, julio de 2015

iarna

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR



Universidad
Rafael Landívar

Tradición Jesuita en Guatemala

Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala

Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo

UNIVERSIDAD RAFAEL LANDÍVAR

Autoridades institucionales

Rector

Eduadro Valdes, S.J.

Vicerrectora académica

Lucrecia Méndez de Penedo

Vicerrector de investigación y proyección

Juventino Gálvez

Vicerrector de integración universitaria

Julio Moreira, S.J.

Vicerrector administrativo

Ariel Rivera

Secretaria general

Fabiola Padilla de Lorenzana

Director Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)

Héctor Tuy

Créditos de la publicación

Coordinación

Juventino Gálvez

Investigador principal

Nils Saubes

Bases de datos y SIG

Gerónimo Pérez y Alejandro Gándara

Edición

Juventino Gálvez y Cecilia Cleaves

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. (2015). *Balance hidrológico de las subcuencas de la República de Guatemala. Bases fundamentales para la gestión del agua con visión a largo plazo*. Guatemala: Autor.

Serie para la educación y el cuidado de la vida 6.

Descriptores: recursos hídricos, agua, balance hidrológico, subcuencas, cuencas-Guatemala, gestión del agua.

Publicado por: Este documento ha sido publicado por el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA/URL). El presente trabajo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la República de Guatemala a nivel de subcuencas del país. Con una visión de largo plazo, tan necesaria en la gestión de un bien tan estratégico para la vida, este trabajo pretende motivar el surgimiento de estrategias concretas, territorialmente diferenciadas para dar un salto cualitativo en la gestión del agua en el país y de la institucionalidad que debe hacer operativas tales estrategias.

Copyright 2015, IARNA/URL
Está autorizada la reproducción total o parcial y de cualquier otra forma de esta publicación para fines educativos o sin fines de lucro, sin ningún otro permiso especial del titular de los derechos, bajo la condición de que se indique la fuente de la que proviene. El IARNA agradecerá que se le remita un ejemplar de cualquier texto cuya fuente haya sido la presente publicación.

Disponible en: Universidad Rafael Landívar
Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente (IARNA)
Campus Central, Vista Hermosa III, zona 16
Edificio Q, oficina 101
Ciudad de Guatemala, Guatemala
Tels.: (502) 2426-2559 ó 2426-2626, extensión 2657
Fax: extensión 2649
E mail: iarna@url.edu.gt
<http://www.url.edu.gt/iarna>
<http://www.infoiarna.org.gt>



/iarna.url



@iarna_url

Siglas y acrónimos

FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
GEI	gases de efecto invernadero
GIRH	Gestión Integrada de Recursos Hídricos
GWP	Global Water Partnership
IARNA	Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar
INE	Instituto Nacional de Estadística
IPCC	Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático
MAGA	Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación
MNT	modelo numérico de terreno
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo
SIG	sistema de información geográfica
URL	Universidad Rafael Landívar
WEAP	Sistema de Evaluación y Planificación del Agua

Símbolos

CO_2	dióxido de carbono
cp	calor específico del aire
Et	evapotranspiración
ETc	evapotranspiración de los cultivos o plantas bajo condiciones estándares
ETc_{adj}	evapotranspiración real
ETo	evapotranspiración potencial
f	dirección preferencial de flujo
G	flujo de calor del suelo
hab	habitantes
j	área fraccional
k	conductividad hidráulica saturada
K_c	Coefficiente de cultivo/planta
km	kilómetro
km^2	kilómetro cuadrado
K_s	coeficiente de estrés
m^3	metro cúbico
mm	milímetros
Pa	densidad del aire a presión constante
Pe	precipitación
PET	evapotranspiración potencial
ra	resistencia aerodinámica
Rn	radiación neta
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía

r_s	resistencia de la superficie
S_w	capacidad de campo
t	tiempo
γ	constante psycrométrica
zI	almacenamiento relativo de agua en el suelo
Δ	pendiente de la relación entre presión del vapor a saturación y temperatura
λET	evapotranspiración potencial

Contenido

Siglas y acrónimos.....	vii
Presentación.....	xiii
1. Introducción.....	1
2. Objetivos	5
3. Marco teórico.....	7
3.1. Marco referencial.....	8
3.1.1 La problemática del agua en Guatemala.....	8
3.2. Marco conceptual.....	9
3.2.1 Noción de balance hidrológico.....	9
3.2.2 El modelo hidrológico de la plataforma WEAP.....	11
3.2.3 La relación entre agua y bosque.....	15
4. Material y métodos.....	19
4.1. Definición de la escala de trabajo.....	20
4.2. Construcción del modelo.....	20
4.2.1 La plataforma WEAP.....	20
4.3. Datos de entrada.....	20
4.3.1 Datos climáticos.....	21
4.3.2 Datos de uso de la tierra.....	22
4.3.3 Características del agua en el suelo.....	24
4.4. Calibración.....	25
4.4.1 El modelo Cropwat.....	25
4.5. Escenarios modelados.....	26
4.6. Estimación del consumo y del balance hídrico.....	28
5. Resultados.....	29
5.1. Resultados por cuenca	30
5.1.1 Balance hidrológico.....	30
5.1.2 Disponibilidad hídrica.....	30
5.1.3 Balance hídrico.....	39
5.2. Resultados por vertiente.....	43
5.2.1 Oferta anual total de agua.....	43
5.2.2 Balance hidrológico.....	46
5.2.3 Disponibilidad hídrica.....	51
5.3. Resultados a nivel nacional.....	52
6. Conclusiones.....	55
7. Recomendaciones.....	59
Referencias.....	63

Índice de figuras

Figura 1. Forma simple del balance hidrológico.....	9
Figura 2. Elementos del balance hidrológico modelados con WEAP.....	11
Figura 3. Cálculo de la evapotranspiración.....	14
Figura 4. Disponibilidad hídrica en las subcuencas de Guatemala.....	35
Figura 5. Disponibilidad hídrica per cápita en las subcuencas de Guatemala.....	37
Figura 6. Evolución de la disponibilidad hídrica al 2020 en las subcuencas de Guatemala.....	38
Figura 7. Excedente bruto de agua en las subcuencas de Guatemala.....	40
Figura 8. Excedente bruto de agua por unidad de superficie en las subcuencas de Guatemala.....	41
Figura 9. Excedente bruto de agua por unidad de superficie en las subcuencas de Guatemala, al año 2020.....	42
Figura 10. Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Pacífico (millones de metros cúbicos).....	44
Figura 11. Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Golfo de México (millones de metros cúbicos).....	45
Figura 12. Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Caribe (millones de metros cúbicos).....	46
Figura 13. Balance hidrológico de la vertiente del Pacífico (millones de metros cúbicos).....	47
Figura 14. Balance hidrológico de la vertiente del Golfo de México (millones de metros cúbicos).....	49
Figura 15. Balance hidrológico de la vertiente del Caribe (millones de metros cúbicos).....	50
Figura 16. Balance hidrológico de Guatemala (millones de metros cúbicos).....	53

Índice de cuadros

Cuadro 1. Datos de entrada del modelo.....	21
Cuadro 2. Valores de coeficientes de cultivos.....	22
Cuadro 3. Clases y puntajes de pendiente.....	23
Cuadro 4. Balance hidrológico de las subcuencas de Guatemala (millones de m ³).....	30
Cuadro 5. Precipitaciones en la vertiente del Pacífico (millones de metros cúbicos).....	43
Cuadro 6. Precipitaciones en la vertiente del Golfo de México (millones de metros cúbicos).....	44
Cuadro 7. Precipitaciones en la vertiente del Caribe (millones de metros cúbicos).....	45
Cuadro 8. Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Pacífico, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	47
Cuadro 9. Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Golfo de México, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	48
Cuadro 10. Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Caribe, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	50
Cuadro 11. Disponibilidad hídrica en la vertiente del Pacífico, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	51
Cuadro 12. Disponibilidad hídrica en la vertiente del Golfo de México, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	52
Cuadro 13. Disponibilidad hídrica en la vertiente del Caribe, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje).....	52

Continuación de índice de cuadros

Cuadro 14. Disponibilidad hídrica en Guatemala, y tendencias de evolución al 2020
(millones de metros cúbicos y porcentaje).....53

Cuadro 15. Balance hídrico de las vertientes de Guatemala.....54

Índice de recuadros

Recuadro 1. Cálculo de la evapotranspiración.....13

Recuadro 2. Modelo Soil Water Characteristics.....24

Recuadro 3. El modelo Cropwat.....26

Recuadro 4. Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y
su modelación.....26

Presentación

En términos prácticos, la abundancia de agua en Guatemala es relativa, pues a pesar de la alta disponibilidad total de este recurso en el país, las capacidades para su gestión son bajas o casi nulas.

Los territorios, variados como son, también presentan diferentes escenarios de relación entre la disponibilidad y las diferentes clases de demanda de agua. En muchos lugares altamente poblados, el acceso al agua para diferentes usos es crítico. Por lo tanto, el desafío de proveer agua en cantidades suficientes y calidades pertinentes para todos los tipos de demanda de la sociedad, se vuelve más complejo; y es por ello que debe asumirse con la seriedad de todo asunto que compromete directamente el bienestar humano, cuestión que está directamente ligada a la estabilidad de los ecosistemas.

Hasta hoy, existe un enfoque eminentemente extractivo de este recurso y, ante el desafío de su gestión, ha prevalecido una actitud miope, carente de visión sistémica y de sentido de largo plazo, haciendo caso omiso del sentido del bien común, pues se ha administrado bajo una lógica individualista y segmentada.

El presente trabajo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la República de Guatemala a nivel de subcuencas para las tres vertientes hídricas del país. Con una visión de largo plazo, tan necesaria en la gestión de un bien tan estratégico para la vida, este trabajo pretende motivar el surgimiento de estrategias concretas, territorialmente diferenciadas para dar un salto cualitativo en la gestión del agua en el país y de la institucionalidad que debe hacer operativas tales estrategias.

Este trabajo es parte de la serie “Textos para la educación y el cuidado de la vida” del Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA-URL), con la cual pretendemos apoyar, con información a los gestores del desarrollo en este ámbito de actividad en el país.

Héctor Tuy

Director

Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente
Universidad Rafael Landívar

I

Introducción

Introducción

La Gestión Integrada de los Recursos Hídricos (GIRH), planteada desde la conferencia de Río en 1992, ha sido aceptada por los gobiernos y agencias de desarrollo como el paradigma más adecuado en el tema de la gestión del agua (Muller, 2010). Tiene como principal fundamento que el agua es un recurso limitado y vulnerable, y debe ser manejado de manera concertada y participativa, ya que sus usos se encuentran interrelacionados (uso doméstico, industrial, agrícola y ambiental).

Uno de los instrumentos más importantes para la puesta en marcha de la GIRH es la evaluación de los recursos hídricos, principalmente en sus aspectos de oferta y demanda (Global Water Partnership [GWP], 2000). Es primordial conocer de cuánta agua se dispone, es decir, cuánta agua provee el subsistema natural, para poder desarrollar actividades de planificación y políticas adecuadas para su gestión. Además, se debe contar con una idea de las tendencias a las cuales está sujeta dicha oferta hidrológica, especialmente en un contexto de cambio climático global.

Hoy en día, muchos países del mundo se encuentran frente a enormes retos en el campo de la gestión del agua, y aquellos retos están exacerbados para los países en vía de desarrollo. La expansión urbana, el desarrollo industrial, así como la modernización e intensificación de la agricultura generan una creciente demanda de este recurso para los diversos usos. Esta situación provoca la extracción intensiva de los recursos hídricos, y el aumento de su contaminación, debido al vertido de aguas negras (Bahri, 2012).

Por lo tanto, la puesta en marcha de la GIRH en el contexto de un país como Guatemala se hace todavía más urgente y difícil. La principal conclusión que ha surgido últimamente con respecto al tema de los recursos hídricos en el país, es que hay suficiente agua, pero está mal gestionada. En efecto, se ha estimado que los usos consuntivos y no consuntivos representan menos de la cuarta parte de la oferta total disponible (Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar [IARNA-URL], 2012). Por lo tanto, se vuelve cada vez más urgente que los sectores públicos y privados, así como la sociedad civil, generen iniciativas orientadas hacia una mejor gestión, preferiblemente según los fundamentos de la GIRH.

Con el objetivo de apoyar iniciativas orientadas hacia una mejor gestión, el presente estudio aporta algunos elementos para la estimación de la oferta hidrológica en el país. Esto se logró gracias a un ejercicio de modelación hidrológica y al cálculo del balance hidrológico, realizado a nivel de las subcuencas del país.

En la primera parte del documento, se presentan el contexto y las bases conceptuales necesarias para comprender este trabajo. Se describe la situación de los recursos hídricos en Guatemala, para después introducir las bases conceptuales del modelo hidrológico utilizado.

En la segunda parte se describe la metodología para la construcción del modelo hidrológico y los datos utilizados. También se presentan las herramientas empleadas para construir el modelo. La tercera parte presenta los resultados del estudio, los cuales permiten apreciar la evolución de la oferta hidrológica en el contexto del cambio climático global, pues el modelo se construyó con los parámetros propios de la situación actual, pero también considera un escenario de cambio climático al 2020.

Por último, se presentan las conclusiones más relevantes del estudio, así como las recomendaciones esenciales para una gestión integrada de los recursos hídricos en Guatemala.

II

Objetivos del estudio

Objetivos del estudio

Generales

- Analizar la situación de la disponibilidad de agua a nivel de subcuencas en las tres vertientes del país.
- Proveer elementos técnicos para apoyar el diseño de soluciones que tiendan a satisfacer las demandas nacionales de manera informada y confiable.

Específicos

- Determinar la distribución de la oferta total de agua entre los diferentes elementos del ciclo hidrológico. Es decir, estimar la disminución de la oferta total debida a los procesos biofísicos que operan en las subcuencas.
- Estimar la disponibilidad neta de agua. Es decir, la cantidad de agua que queda disponible para las comunidades humanas, sea de fuentes superficiales o subterráneas.
- Proveer un soporte esencial para adoptar medidas encaminadas a asegurar la disponibilidad de los bienes hídricos en el largo plazo.

III

Marco teórico

3.1. Marco referencial

3.1.1 La problemática del agua en Guatemala

El territorio guatemalteco se caracteriza por un clima tropical y cuenta con dos estaciones: la estación lluviosa de mayo a septiembre, y la estación seca de octubre a abril. La precipitación promedio anual es aproximadamente de 2,000 milímetros, con variaciones desde 700 milímetros en las regiones más secas (oriente del país) hasta 5,000 milímetros en las más húmedas (norte y occidente del país).

El país se divide en tres vertientes: la del Pacífico, la del Caribe y la del Golfo de México. Los estudios más recientes muestran que la oferta de agua por parte del subsistema natural es suficiente para satisfacer la demanda, ya que dicha demanda representaría menos de la cuarta parte de la disponibilidad total. No obstante, está comprobado que el principal problema reside en las débiles capacidades de gestión.

Al día de hoy, los recursos hídricos del país están sometidos a varios tipos de presiones. Del lado de la oferta, el ciclo hidrológico está fuertemente alterado por los cambios de uso de la tierra. Con relación a este tema, uno de los indicadores más representativos que ha sido destacado en un estudio reciente, es la tasa de cobertura boscosa en las tierras de mayor importancia hidrológica. En efecto, IARNA-URL (2012) señala que apenas el 38.77% de las tierras de muy alto, alto y medio potencial de captación y regulación hidrológica cuenta con cobertura forestal. Además, el 24% de las tierras de mayor importancia hidrológica se encuentra en situación de sobreuso. En términos de calidad, ha sido evidenciado que 14 de los 38 ríos principales del país están altamente contaminados, así como los 4 lagos más importantes.

Del lado de la demanda, se estimó que la demanda anual total alcanza los 20 mil millones de metros cúbicos. A nivel nacional, son los sectores industrial y agrícola los que consumen la mayor parte del agua. Sigue el sector de producción de energía hidroeléctrica. El consumo doméstico representa menos de 3% del consumo total. Uno de los problemas que destacan a nivel del consumo es la falta de gestión relacionada con las aguas servidas. Las plantas de tratamiento son muy escasas y, en la mayor parte de los casos, las aguas servidas se descargan directamente a los ríos (IARNA-URL, 2005).

Al día de hoy, no existen normativas relacionadas con la gestión del agua a nivel nacional. Tampoco existen instituciones dedicadas a esta tarea. El recurso está gestionado de manera sectorial, y no se toma en cuenta la cuenca como unidad de gestión privilegiada. La débil institucionalidad que caracteriza a los esfuerzos de gestión, contribuye fuertemente a la insostenibilidad del manejo de los recursos hídricos en el país.

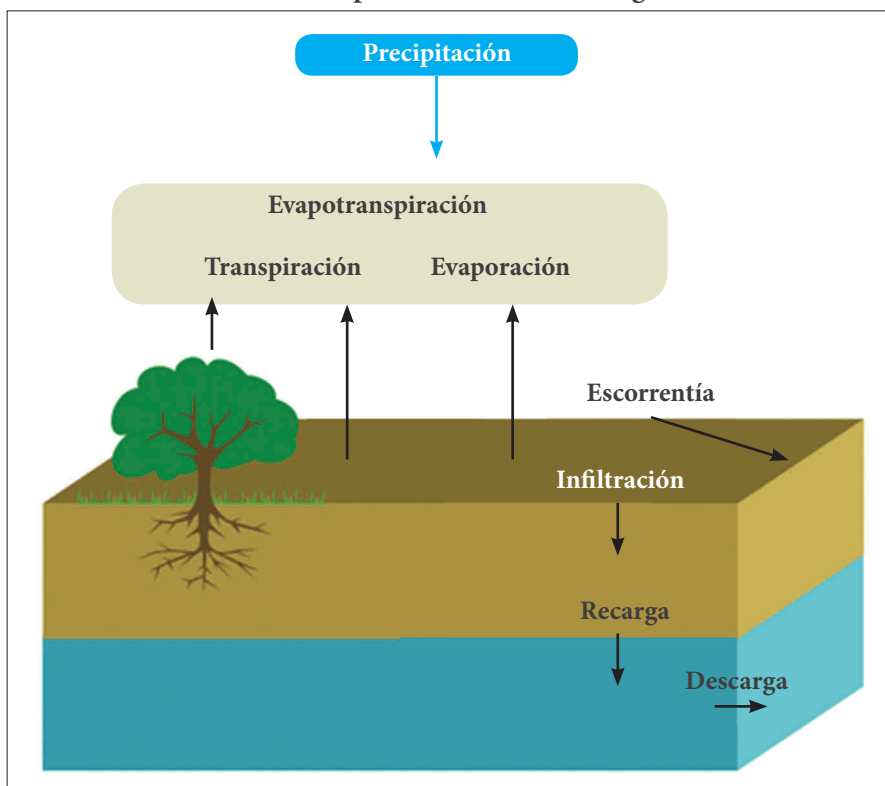
3.2. Marco conceptual

3.2.1 Noción de balance hidrológico

En el contexto del presente estudio, el *balance hidrológico* se define como una herramienta que permite describir el movimiento de los flujos de agua dentro del ciclo hidrológico en su expresión puramente biofísica; es decir, sin tomar en cuenta los aspectos relacionados con el manejo y la extracción del recurso por la sociedad.

El término balance “hidrológico” se diferencia del balance “hídrico”, pues el segundo generalmente consiste en un balance entre la oferta de agua determinada por el subsistema natural y la demanda por parte de las sociedades humanas. La Figura 1 muestra el balance hidrológico de forma simple.

Figura 1
Forma simple del balance hidrológico



Fuente: elaboración propia.

Habitualmente, el balance hidrológico se formula a través de una ecuación, la cual, en su forma más básica, podría ser (Sáenz, 1995):

$$\Delta A = E - S$$

donde:

ΔA es la variación en el almacenamiento (en el suelo o en el acuífero)

E son las entradas al sistema:

- Precipitación,
- Importaciones de agua,
- Recarga lateral (aguas subterráneas provenientes de otras cuencas).

S son las salidas del sistema:

- Evaporación,
- Transpiración,
- Escorrentía,
- Infiltración,
- Descarga (aguas subterráneas hacia otras cuencas),
- Exportación de agua.

Para el presente análisis, el cálculo del balance hidrológico se realizó a nivel de las subcuencas de la República de Guatemala, con el objetivo de estimar la cantidad de agua potencialmente disponible para extracción (uso doméstico, industria, servicios, agricultura, etc.).

La determinación del balance hidrológico se basó en la estimación de la variación del almacenamiento de agua en el suelo (positiva o negativa), tomando en cuenta como única entrada las precipitaciones; y como salidas la evapotranspiración, la escorrentía superficial y subsuperficial, y la percolación hacia los acuíferos (recarga).

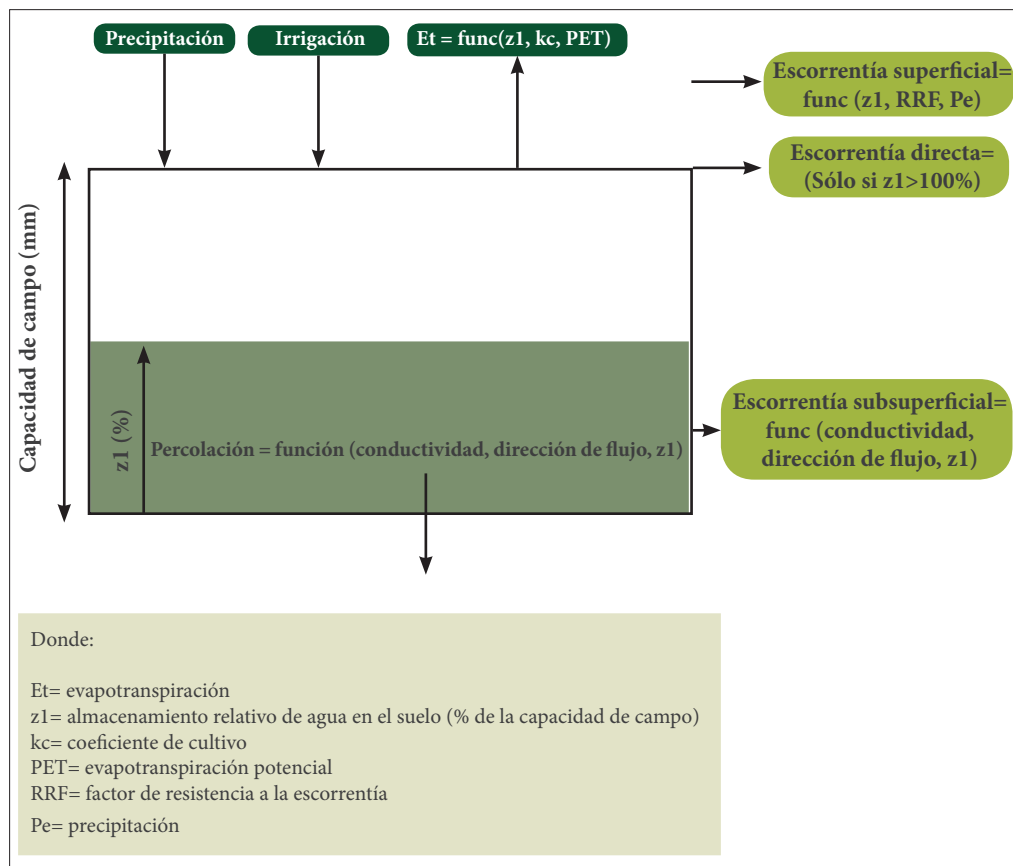
La base conceptual del modelo utilizado para calcular el balance hidrológico en el área metropolitana se detalla en la Figura 1.

3.2.2 El modelo hidrológico de la plataforma WEAP

El modelo que se utilizó para determinar el balance hidrológico corresponde al módulo de hidrología del Sistema de Evaluación y Planificación del Agua (WEAP), el cual permite realizar un balance hídrico de suelos basado en la simulación de la variación del volumen de agua almacenada en el suelo.

A continuación, se dará una descripción resumida de los algoritmos del modelo, basada en Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005). Los elementos del balance hidrológico modelados con WEAP son presentados en la Figura 2.

Figura 2
Elementos del balance hidrológico modelados con WEAP



Fuente: elaboración propia con base en Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005).

El balance de masas definido por el modelo hidrológico está dado por la siguiente ecuación. Se observa cómo cada término de la ecuación, que corresponde a un elemento del balance hidrológico, es afectado de forma diferente por los parámetros indicados (ver Anexo 1 para los significados de las variables):

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t) k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2z_{1,j}^2}{3} \right) - P_e(t) \frac{RRF_j}{z_{1,j}^2} - f_j k_j z_{1,j}^2 - (1-f_j) k_j z_{1,j}^2$$

Donde:

- Primer término:** cambio de humedad en el suelo.
- Segundo término:** precipitación.
- Tercer término:** evapotranspiración.
- Cuarto término:** escorrentía superficial.
- Quinto término:** flujo intermedio o escorrentía subsuperficial.
- Sexto término:** percolación.

Símbolo	Significado
j	área fraccional
Sw	capacidad de campo
t	tiempo
Pe	precipitación
PET	evapotranspiración potencial
kc	coeficiente de cultivo
z1	almacenamiento relativo de agua en el suelo (% de la capacidad de campo)
RRF	Factor de resistencia a la escorrentía
k	conductividad hidráulica saturada
f	dirección preferencial de flujo

- Precipitación:** corresponde a la cantidad total de agua precipitada durante el tiempo del estudio.
- Evapotranspiración:** el cálculo de la evapotranspiración real para una clase de uso de la tierra en particular, depende de la evapotranspiración potencial, dada por la ecuación de Penman-Montieth, por el coeficiente de cultivo/planta (Kc), y las condiciones reales de disponibilidad de agua para las plantas (Recuadro 1).
- Escorrentía superficial:** su cálculo depende del nivel de precipitación, de un factor de resistencia a la escorrentía (RRF – siendo el mismo dependiente del índice de área foliar y de la pendiente), y del nivel de saturación del suelo.
- Flujo intermedio o escorrentía subsuperficial:** corresponde a los flujos horizontales de agua que ocurren debajo de la superficie del suelo. Dicha escorrentía contribuye finalmente a los caudales de los ríos. Su estimación depende de la cantidad de agua presente en el suelo, de la conductividad hidráulica del mismo, y de la dirección preferencial de los flujos.
- Percolación:** corresponde a la lámina de agua que contribuye a la recarga de los acuíferos. Depende de la cantidad de agua presente en el suelo, de la conductividad hidráulica del mismo, y de la dirección preferencial de los flujos.

Recuadro 1

Cálculo de la evapotranspiración

El cálculo de la evapotranspiración dentro de los algoritmos de WEAP se inspira de la metodología establecida por Allen, Pereira, Raes & Smith (1998). Según ellos, el cálculo de la evapotranspiración pasa por tres etapas:

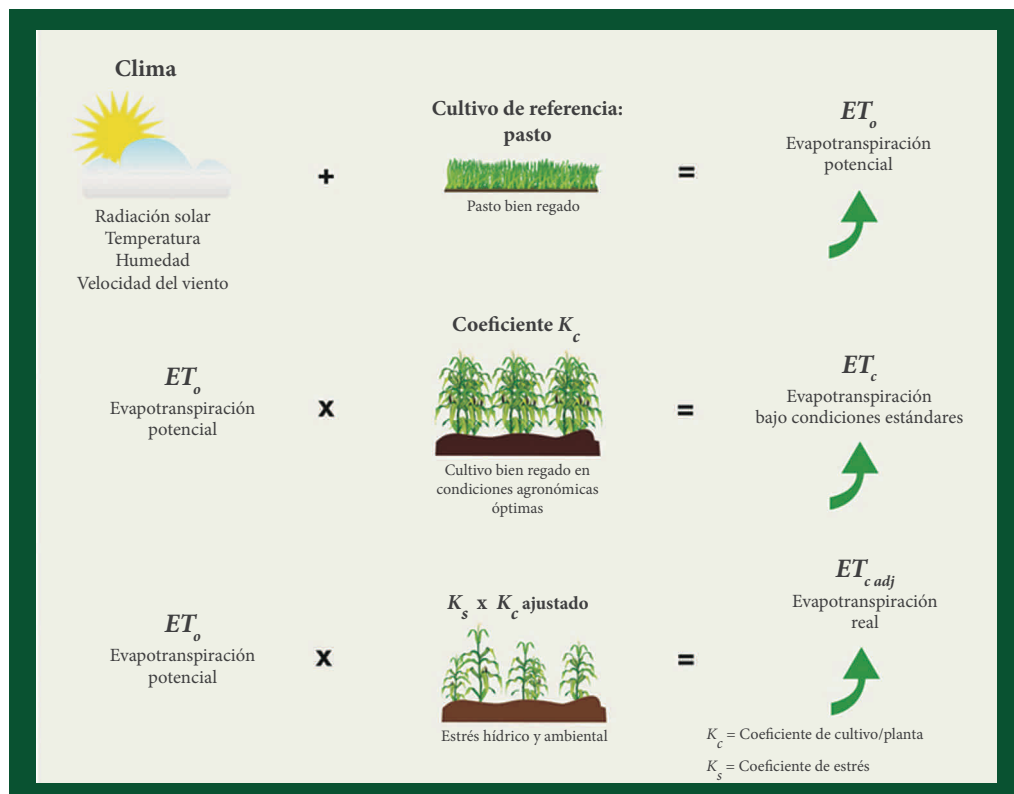
1. Cálculo de la evapotranspiración potencial o evapotranspiración de referencia (ET_0): esta etapa permite determinar el potencial de la atmósfera para hacer transpirar a un cultivo de referencia (pasto bien regado de 0.12 metros de altura). El cálculo de ET_0 se basa en los factores meteorológicos que ayudan a describir las condiciones atmosféricas: radiación solar, temperatura, humedad y velocidad del viento. Con base en estos valores, la evapotranspiración de referencia puede ser calculada gracias a la siguiente ecuación, denominada Penman-Monteith y descrita por Allen *et al.* (1998):

$$\lambda ET = \frac{\Delta(R_n - G) + \rho_a c_p \frac{(e_s - e_a)}{r_a}}{\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right)}$$

donde λET es la evapotranspiración potencial, R_n es la radiación neta, G es el flujo de calor del suelo, $(e_s - e_a)$ representa el déficit de presión del vapor del aire, ρ_a es la densidad del aire a presión constante, c_p es el calor específico del aire, Δ es la pendiente de la relación entre presión del vapor a saturación y temperatura, γ es la constante psicrométrica, y r_s y r_a son la resistencia de la superficie y la resistencia aerodinámica.

2. Cálculo de la evapotranspiración de los cultivos o plantas bajo condiciones estándares (ET_c): esta segunda etapa permite determinar la evapotranspiración de los cultivos o plantas en condiciones óptimas (sin enfermedades, buen riego, a nivel de producción máxima). El cálculo de ET_c se basa en ET_0 , a la cual se integran las características que distinguen a cada cultivo (relacionadas con la fisionomía vegetal principalmente: altura, albedo, resistencia del dosel y evaporación del suelo). La integración de dichos factores se hace a través del coeficiente de cultivo K_c , determinado para cada tipo de cultivo o planta. ET_c se obtiene multiplicando ET_0 por K_c : $ET_c = ET_0 K_c$
3. Cálculo de la evapotranspiración real ($ET_{c\ adj}$): a este nivel se toman en cuenta las condiciones de estrés hídrico, las cuales tienen consecuencias obvias en términos de los volúmenes de agua evapotranspirados. La estimación requiere del cálculo del balance hídrico del suelo, lo que permite determinar la cantidad de agua disponible en el suelo y definir un coeficiente de estrés (K_s). El cálculo de la evapotranspiración real diaria en condición de estrés hídrico tiene aplicaciones principalmente para la planificación del riego.

Figura 3
Cálculo de la evapotranspiración



Fuente: elaboración propia, con base en Allen, Pereira, Raes & Smith (1998).

3.2.3 La relación entre agua y bosque

El ciclo hidrológico está condicionado por varios factores, principalmente relacionados con el clima, la geología y el uso de la tierra. De estos factores, el que más llama la atención en el ámbito de la gestión es el uso de la tierra, ya que es el único sobre el cual las sociedades pueden tener un impacto directo y a corto plazo.

Durante las últimas décadas, la importancia de la relación entre el uso de la tierra y el estado de los recursos hídricos ha sido subrayada por muchos actores, a nivel nacional e internacional, y el énfasis ha sido puesto sobre el rol que tiene el bosque en el ciclo hidrológico. Según la percepción pública, el bosque y la reforestación poseen muchas propiedades positivas en cuanto a sus efectos sobre la hidrología superficial.

No obstante, es importante presentar un breve resumen de la literatura científica existente sobre este tema, ya que en el contexto del estudio se examinan los efectos de ciertos tipos de uso de la tierra sobre la disponibilidad de agua. Los principales temas que se consideran relevantes para este estudio son los efectos del bosque y la reforestación sobre:

1. **Disponibilidad anual de agua superficial.** La mayor parte de los estudios muestran que una reducción en la cobertura vegetal tiende a resultar en el aumento de la disponibilidad anual de agua. A fortiori, la reforestación tiende a causar una disminución de dicha disponibilidad (Bosch & Hewlett, 1982; Bruijnzeel, 1990). Estos efectos de la deforestación y la reforestación sobre la disponibilidad de agua superficial se explican principalmente por las diferencias en los volúmenes de evapotranspiración generados según el tipo de cobertura: una cobertura vegetal alta (bosque) tenderá a consumir mucho más agua (bajo la forma de evapotranspiración) que una cobertura baja (pastos, cultivos, etc.), y esto afecta directamente el volumen anual de agua superficial disponible.
2. **Atenuación de los extremos hidrológicos** (caudales pico y caudales base) relacionada con la presencia de bosque. En cuanto a la regulación de los máximos hidrológicos, muchos estudios concluyen que la presencia de cobertura boscosa permite atenuar, tanto la respuesta hidrológica de las cuencas (Kaimovitz, 2001), como la de los picos hidrológicos. En efecto, la alta capacidad de infiltración de un bosque permite que se absorba la mayor parte de la escorrentía. No obstante, en cuencas mayores parece ser que los factores climáticos a grande y mediana escala dominan el efecto de la pérdida de cobertura boscosa a nivel local, ya que el incremento de la respuesta hidrológica puede ser sometido a un efecto de “dilución” relacionado con la presencia de áreas contiguas caracterizadas por una respuesta hidrológica menos intensa (Bruijnzeel, 1990, 2004).

En cuanto a la regulación de los mínimos hidrológicos, los estudios publicados afirman que la deforestación provoca la disminución de los caudales de temporada seca. Cabe

mencionar que estos caudales (caudales base) son condicionados por los flujos de agua infiltrados durante la estación lluviosa, que migran lentamente hacia los acuíferos y luego abastecen a los ríos durante la temporada seca, cuando el abastecimiento por la escorrentía superficial y sub superficial es limitado o inexistente. La baja de los caudales base, causada por la deforestación, se explica principalmente porque la pérdida de cobertura boscosa reduce las oportunidades de infiltración durante la estación lluviosa. En efecto, la conversión de un uso forestal hacia otros tipos de usos provoca generalmente la disminución de las oportunidades de infiltración, debida a una o varias de las siguientes razones: i) exposición prolongada de los suelos a precipitaciones intensas (compactación); ii) compactación por el uso de maquinaria; iii) sobrepastoreo; iv) desaparición de la microfauna del suelo; y v) incremento de las áreas impermeables (carreteras, viviendas, entre otras) (Bruijnzeel, 2004).

Muchas veces, la reducción de las oportunidades de infiltración no está compensada por los flujos de agua adicionales liberados gracias a una menor evapotranspiración (menos bosque). Por lo tanto, los caudales base disminuyen. No obstante, si las capacidades de infiltración del suelo logran ser mantenidas después de la deforestación (por ejemplo, medidas de conservación del suelo), y a esto se le suma la disminución de la evapotranspiración causada por la eliminación del bosque, probablemente aumentarían los caudales de temporada seca (Bruijnzeel, 1990, 2004).

Por otro lado, no ha sido evidenciado de forma clara que la reforestación pueda “reparar” los efectos de la deforestación sobre los caudales base. Existen estudios de caso sobre esfuerzos de reforestación que muestran que durante la temporada seca, después de reforestar, el aumento en las oportunidades de infiltración no compensa las pérdidas de agua (Calder, 2007). Este resultado se explica principalmente por el hecho de que un bosque reforestado o plantado no tiene las mismas características que un bosque natural. En otro estudio ha sido comprobado que la disminución de la disponibilidad de agua superficial causada por la reforestación es más pronunciada en una sola temporada seca que a nivel anual, así como en los ecosistemas más secos (Farley, Jobbagy & Jackson, 2005).

3. **Erosión.** En muchos estudios se evidencia una relación positiva entre la presencia de bosque y una menor erosión. Esto se debe al hecho de que el bosque ofrece una protección física al suelo ante las precipitaciones, a través del dosel, del sotobosque y del mantillo. Asimismo, la producción de sedimentos es particularmente baja para un bosque, en comparación con otros tipos de uso de la tierra. No obstante, según la calidad del bosque, el nivel de erosión y de producción de sedimentos puede variar considerablemente. En efecto, si por un lado para un bosque natural primario la producción de sedimentos es muy baja, por el otro, para una plantación mal manejada pueden ser muy altos (debido a la presencia de zanjas de drenaje, prácticas de deshierbe, etc.) (Bruijnzeel, 2004; Calder, 2007).

Al momento de evaluar las relaciones entre el bosque y el agua, es importante tomar en cuenta el hecho de que un bosque primario natural posiblemente no tendrá las mismas

propiedades que un bosque secundario, o que una plantación. Igualmente, la agricultura bien manejada, o ciertos sistemas agroforestales, pueden presentar propiedades similares a las de ciertos bosques.

IV

Material y métodos

En esta parte se describirá el proceso de construcción del modelo en la plataforma WEAP, los datos requeridos, y los procedimientos y tratamientos realizados anteriormente a su integración al modelo.

4.1. Definición de la escala de trabajo

Previo a la construcción del modelo, se delimitaron geográficamente las unidades de modelación, las cuales corresponden a unidades coherentes desde el punto de vista hidrológico. La delimitación de las unidades de respuesta hidrológica está basada en información climática, características de los suelos y de uso de la tierra. En el contexto del estudio se definieron 6,087 unidades de respuesta hidrológica.

4.2. Construcción del modelo

4.2.1 La plataforma WEAP

Como ha sido mencionado anteriormente, el modelo hidrológico utilizado para estimar la disponibilidad de agua –u oferta hidrológica– para las subcuencas de Guatemala corresponde al módulo “hidrología” de la plataforma WEAP (Sistema de Evaluación y Planificación del Agua), que se presenta como un sistema de apoyo a la toma de decisiones en materia de Gestión Integrada de Recursos Hídricos (GIRH).

Yates, Sieber, Purkey & Huber-Lee (2005) describen esta plataforma como una herramienta que permite relacionar los procesos hidrológicos a nivel de cuenca con los aspectos socioeconómicos de la gestión de los recursos hídricos. Este aspecto hace de WEAP una herramienta particularmente adaptada para abordar problemáticas de GIRH. Además, permite analizar varios tipos de escenarios (climatológicos, cambios en el uso de la tierra, etc.) en un entorno de modelación dinámica.

4.3. Datos de entrada

A continuación, se describirán de los datos utilizados en el modelo, así como los procedimientos realizados previamente a su integración. En el Cuadro 1 se presentan los datos requeridos por el modelo, así como el nivel al cual se registró cada uno.

Cuadro 1
Datos de entrada del modelo

Dato	Nivel de entrada	Fuente
Precipitación	Subcuenca	Base de datos Worldclim (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005).
Temperatura	Subcuenca	Base de datos Worldclim (Hijmans <i>et al.</i> , 2005).
Velocidad del viento	Subcuenca	Estaciones meteorológicas del Insivumeh.
Humedad	Subcuenca	Estaciones meteorológicas del Insivumeh.
Latitud	Subcuenca	Sistema de Información Geográfica IARNA-URL.
Conductividad hidráulica	Serie de suelo	Mapa de series de suelos de Simmons (Simmons, Tarano & Pinto, 1959).
Capacidad de campo	Serie de suelo	Mapa de series de suelos de Simmons (Simmons <i>et al.</i> , 1959).
Categorías de uso de la tierra	Categoría de uso de la tierra	Mapa de uso de la tierra del 2012 (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, 2014)
Coefficiente de cultivo	Categoría de uso de la tierra	Allen, Pereira, Raes & Smith (1998), Snyder, Orang, Bali & Eching (2000).
Factor de resistencia a la escorrentía	Categoría de uso de la tierra	Scurlock, Asner & Gower (2001).

Fuente: elaboración propia.

4.3.1 Datos climáticos

- **Precipitación promedio mensual:** los valores mensuales de precipitación se obtuvieron de la base de datos *WorldClim*, que son representativos del periodo 1950-2000 (Hijmans, Cameron, Parra, Jones & Jarvis, 2005). A través del uso del SIG se extrajeron los datos mensuales del área de estudio a partir de las capas *raster*. Luego, se calculó el valor promedio de precipitación mensual a nivel de cada subcuenca.
- **Temperatura promedio mensual:** se empleó el mismo procedimiento utilizado para los valores de precipitación.
- **Velocidad del viento:** los valores de velocidad del viento promedio mensual se obtuvieron de las estaciones de medición del Instituto de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología (Insivumeh). Dichas estaciones se encuentran georeferenciadas, con lo cual se lograron definir los polígonos de Thiessen. Según la ubicación de cada subcuenca dentro de dichos polígonos, se atribuyó un valor a nivel de cada subcuenca.
- **Humedad:** se empleó el mismo procedimiento utilizado para los valores de velocidad del viento.
- **Latitud:** a través del SIG se calculó la latitud exacta del centro geométrico de cada subcuenca.

4.3.2 Datos de uso de la tierra

- **Categorías de uso de la tierra:** la superficie de las categorías presentes en las subcuencas fue obtenida a partir del mapa de uso de la tierra del año 2012 (Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra, 2014).
- **Coeficientes de cultivo:** los valores de coeficientes de cultivos (coeficientes de evapotranspiración) para cada categoría de uso de la tierra se determinaron con base en el estudio de Allen, Pereira, Raes & Smith (1998) y la herramienta BISm (*Basic Irrigation Scheduling*) desarrollada por Snyder, Orang, Bali & Eching (2000). Los valores utilizados para cada categoría se muestran en el cuadro 2.

En el caso de la categoría “cultivos” fue necesario identificar el tipo de cultivo más representativo a nivel nacional, para poder atribuirle un coeficiente de evapotranspiración. Al analizar el último censo agropecuario (Instituto Nacional de Estadística y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación [INE y MAGA], 2004), se pudo observar que el maíz representaba el 67% de la superficie de cultivos anuales cosechados. Por tanto, se utilizaron las características del cultivo de maíz para poder determinar el coeficiente de evapotranspiración. Para la categoría “bosque” se usó el coeficiente de evapotranspiración de un bosque mixto, derivado del promedio de los coeficientes de evapotranspiración determinados para los bosques latifoliados y coníferos.

Cuadro 2
Valores de coeficientes de cultivos

Categorías de uso de la tierra	Kc1	Kc2	Kc3	Kc4	Kc5	Kc6	Kc7	Kc8	Kc9	Kc10	Kc11	Kc12
Agricultura anual	0.24	0.23	0.22	0.21	0.34	1.04	1.04	0.61	0.24	0.25	0.26	0.26
Arboles dispersos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Bosque	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Cultivo de banano-plátano	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08	1.08
Cultivo de caña de azúcar	1.25	1.25	1.25	0.75	0.75	0.4	0.4	0.4	1.25	1.25	1.25	1.25
Cultivo de café	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Cultivo de hule	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cultivo de palma africana	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cultivos permanentes arbóreos	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Cultivos permanentes arbustivos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95

Continuación del cuadro 2

Categorías de uso de la tierra	Kc1	Kc2	Kc3	Kc4	Kc5	Kc6	Kc7	Kc8	Kc9	Kc10	Kc11	Kc12
Cultivos permanentes de plantas o tallos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Cultivos permanentes herbáceos	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Espacios abiertos, sin o con poca vegetación	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Pastizales	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sabanas	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Sin información	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Urbano	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24	0.24
Vegetación arbustiva baja (guamil-matorral)	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Zonas agrícolas heterogéneas	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95	0.95
Zonas húmedas	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1
Agricultura anual	0.24	0.23	0.22	0.21	0.34	1.04	1.04	0.61	0.24	0.25	0.26	0.26

Fuente: elaboración propia.

- **Factor de resistencia a la escorrentía:** en WEAP, dicho factor corresponde a un índice que toma en cuenta factores de pendiente y de índice de área foliar. Varía de 0.1 y 10 (las valores más altos significan más resistencia a la escorrentía). En el presente estudio, dicho factor se construyó con base en los valores de índice de área foliar determinados por Scurlock, Asner & Gower (2001), y en los valores de pendiente derivados del modelo numérico de terreno (MNT), utilizando sistemas de información geográfica. Se calcularon las pendientes promedio para cada una de las unidades de respuesta hidrológica, y se determinaron tres clases, a las cuales se atribuyó un puntaje entre uno y diez (Cuadro 3). Luego, se calculó el promedio entre el índice de área foliar y el puntaje de pendiente a nivel de cada área fraccional, dándole una ponderación doble al índice de área foliar.

Cuadro 3
Clases y puntajes de pendiente

Pendiente (%)	0-5	5-10	10-15	15-25	>25
Puntaje	10	8	6	4	1

Fuente: elaboración propia.

4.3.3 Características del agua en el suelo

- **Capacidad de campo:** este valor fue calculado para cada serie de suelos con base en sus clases texturales, tales como fueron descritas por Simmons, Tarano y Pinto (1959). Los valores de capacidad de campo (en porcentaje de volumen de suelo) se obtuvieron gracias a las ecuaciones de Saxton & Rawls (2006), reunidas y automatizadas en el modelo *Soil Water Characteristics*. Seguidamente, se multiplicó el valor calculado por los datos de profundidad dados por Simmons, Tarano y Pinto (1959), para obtener el contenido de agua a capacidad de campo, en milímetros.

Con el fin de evaluar el efecto del tipo de cobertura, se aplicó un factor de compactación para las categorías de uso agrícola (granos básicos y hortalizas), y un factor de descompresión para las categorías de uso forestal (bosques de coníferas, latifoliadas y mixtos).

- **Conductividad hidráulica saturada:** para cada serie de suelo, este valor (en distancia/tiempo) también se obtuvo de la descripción de textura dada por Simmons, Tarano y Pinto (1959). Luego, se utilizó el modelo *Soil Water Characteristics* para obtener el valor de conductividad hidráulica. En el caso de la categoría de uso “áreas urbanas”, se usó el valor de conductividad hidráulica para un suelo urbanizado, dado por el modelo *Soil Water Characteristics* (Saxton & Rawls, 2006) (recuadro 2).

Recuadro 2 Modelo *Soil Water Characteristics*

Soil Water Characteristics es un modelo que permite determinar las características del agua en el suelo, como la conductividad hidráulica y la capacidad de campo, con base en variables simples, siendo la principal la textura.

Se ha logrado establecer una correlación estadística entre la textura del suelo y variables como la conductividad hidráulica y la capacidad de campo, lo que permite obtener estimaciones de calidad suficiente para diferentes tipos de análisis, sin pasar por un extenso y costoso trabajo de campo y/o de laboratorio. El modelo agrupa las ecuaciones determinadas por Saxton y Rawls (2006), y ha sido integrado a un interfase gráfico.

Este modelo también ofrece soluciones prácticas para estimar las características del agua en el suelo, con aplicaciones en análisis hidrológicos o en la gestión del agua para la agricultura.

Fuente: elaboración propia.

4.4. Calibración

4.4.1 El modelo Cropwat

Según Droubi *et al.* (2008), el parámetro que más influye los resultados del balance hidrológico en WEAP –es decir, el más sensible– es la conductividad hidráulica saturada. Los autores indican que los valores de este parámetro en WEAP no corresponden exactamente a los valores de conductividad hidráulica saturada, tales como están definidos en el ámbito de las ciencias del suelo. Es decir, el valor está utilizado de manera específica por WEAP, por lo que la conductividad hidráulica saturada según este modelo tiene que ser más baja que la conductividad hidráulica saturada determinada por las ciencias del suelo (Droubi *et al.*, 2008). Por lo tanto, es necesario calibrar este parámetro.

Dada la poca disponibilidad de estudios y pruebas de campo en la zona, se propuso usar el modelo Cropwat para obtener valores de evapotranspiración (recuadro 3). De este modo, se pudo calibrar el parámetro de conductividad hidráulica saturada en WEAP con el objetivo de acercarse a los valores de evapotranspiración obtenidos con Cropwat.

Se calcularon los valores de evapotranspiración real para cada una de las series de suelos modeladas en WEAP. No se pudieron calcular valores para las áreas urbanas, ya que los procesos de evaporación ocurren de manera diferente y no se pueden modelar con Cropwat. Algunas series de suelos tampoco pudieron ser modeladas, dado que sus valores de conductividad hidráulica (determinadas por el modelo *Soil Water Characteristics*) se encontraban fuera de rango de Cropwat.

Se observó que, dividiendo los valores de conductividad hidráulica originalmente definidos en WEAP entre 100, los valores de evapotranspiración real obtenidos en WEAP se acercaban a aquellos obtenidos con Cropwat. Por lo tanto, se aplicó el factor de división entre 100 al parámetro de conductividad hidráulica saturada, originalmente definido con el modelo *Soil Water Characteristics*, para cada una de las unidades de respuesta hidrológica modelada.

A continuación, se compararon los valores de evapotranspiración real obtenidos para las 256 áreas fraccionales en WEAP y Cropwat. El promedio del valor absoluto de las tasas de variación calculadas para cada área fraccional resultó ser de 12.4%. Además, se calculó la desviación estándar de este promedio, que resultó ser de 8.1%. Por lo tanto, los resultados obtenidos con WEAP se consideraron como aceptables.

Recuadro 3

El modelo Cropwat

Cropwat es un modelo computarizado desarrollado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO), que permite evaluar la evapotranspiración potencial y real de los cultivos, así como los requerimientos de irrigación. Los elementos modelados por Cropwat se basan en los documentos de trabajo No. 33 (Doorenbos, Kassam, & Bentvelsen, 1979) y 56 (Allen *et al.*, 1998) de la FAO.

Con base en información sobre el clima, los suelos y los cultivos o vegetación, Cropwat calcula el balance diario de humedad en el suelo, permitiendo evaluar el consumo real de los cultivos (ETc adj), y estimar los requerimientos de irrigación (ver recuadro 2).

Por lo tanto, Cropwat constituye una herramienta de apoyo en la toma de decisiones para la planificación y la gestión de la irrigación. De hecho, permite planificar calendarios de riego bajo varias condiciones climáticas y de producción.

Fuente: elaboración propia.

4.5. Escenarios modelados

El balance y la oferta hidrológica se estimaron tanto para la situación actual (línea base) – es decir con los datos climáticos y de uso de la tierra actuales – como para un escenario a futuro. Dicho escenario corresponde a un escenario de cambio climático sin repuesta por parte de la sociedad en términos de reforestación (escenario tendencial). Para ello, se usaron las proyecciones de precipitación y temperatura al 2020 obtenidas del modelo HCCPR-HADCM3 para el escenario A2 del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) (recuadro 4). Se emplearon los datos de uso de la tierra actual.

Recuadro 4

Escenarios de emisiones de gases de efecto invernadero (SRES) y su modelación

Las emisiones futuras de gases de efecto invernadero (GEI) son el producto de complejos sistemas dinámicos movidos por fuerzas determinantes como el crecimiento demográfico, el desarrollo socioeconómico, el cambio tecnológico, entre otros. Los escenarios son imágenes alternativas futuras, y constituyen un instrumento apropiado para analizar de qué manera influirán esas fuerzas en las emisiones, así como para evaluar el margen de incertidumbre de dicho análisis.

- **Línea evolutiva y familia de escenarios A1:** describe un mundo futuro con un rápido crecimiento económico, una población mundial que alcanza su valor máximo hacia mediados del siglo y luego disminuye, y una breve introducción de nuevas y más eficientes tecnologías. Sus características distintivas son la convergencia entre regiones, la creación de capacidad y el aumento de las interacciones culturales y sociales,

acompañadas de una notable reducción de las diferencias regionales, en cuanto a ingresos por habitante. La familia de escenarios A1 se desarrolla en tres grupos que describen direcciones alternativas del cambio tecnológico en el sistema de energía.

- **Línea evolutiva y familia de escenarios A2:** describe un mundo heterogéneo. Sus características son la autosuficiencia y la conservación de identidades locales. Las pautas de fertilidad en el conjunto de las regiones convergen lentamente, con lo que se obtiene una población mundial en continuo crecimiento. El desarrollo económico está orientado básicamente a las regiones, mientras que el crecimiento económico por habitante y el cambio tecnológico están fragmentados y son más lentos que en otras líneas evolutivas.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios B1:** describe un mundo convergente con una misma población mundial, que alcanza un máximo hacia mediados del siglo y desciende posteriormente, como en la línea evolutiva A1; pero presenta rápidos cambios orientados a una economía de servicios y de información, acompañados de una utilización menos intensiva de los materiales y la introducción de tecnologías limpias, con un aprovechamiento eficaz de los recursos. Da preponderancia a las soluciones de orden mundial encaminadas a la sostenibilidad económica, social y medioambiental, así como a una mayor igualdad, pero en ausencia de iniciativas adicionales relacionadas con el clima.
- **Línea evolutiva y familia de escenarios B2:** describe un mundo en el que predominan las soluciones locales a la sostenibilidad económica, social y medioambiental. Es un mundo cuya población aumenta en forma progresiva, a un ritmo menor que en el escenario A2, con unos niveles de desarrollo económico intermedios y un cambio tecnológico menos rápido y más diverso que en las líneas evolutivas B1 y A1. Aunque este escenario está también orientado a la protección del ambiente y a la igualdad social, se centra en los niveles local y regional.

Modelo HADCM3

Es un modelo de circulación del clima global elaborado por el Hadley Center del Reino Unido, que incluye la relación atmósfera-océano. Entre sus características más sobresalientes están: la resolución atmosférica del modelo dispone de 19 niveles con una resolución de $2.5^{\circ} \times 3.5^{\circ}$, los cuales equivalen a unos 417 x 278 kilómetros en el Ecuador, y unos 295 x 278 km a 45° de latitud, aproximadamente. Dispone de seis bandas espectrales para longitudes de onda corta y ocho para longitudes de onda larga. Los efectos de los gases como el CO_2 , el vapor de agua y el ozono están representados de manera explícita, además incluye una simple categoría de parámetros para los aerosoles. Es decir, a partir de la concentración estimada de gases de efecto invernadero en la atmósfera es capaz de modelar temperaturas y precipitación, cuya base de análisis es la circulación climática global.

Fuente: elaboración propia.

4.6. Estimación del consumo y del balance hídrico

En una última fase, con el objetivo de determinar el balance hídrico en las subcuencas del país, se estimó el consumo de agua para cada cuenca. La estimación de dicho consumo se realizó con base en valores de población e indicadores de consumo genéricos dados por la literatura.

La población de cada cuenca se estimó con base en los datos del censo poblacional del 2002 (INE, 2002). Se utilizaron los datos de población de 2002 registrados a nivel de poblados, proyectados hasta el año 2020, ya que dichos datos pueden agregarse a nivel de subcuenca a través del SIG.

La proyección de los datos de población a nivel de poblados se basó en las tasas de evolución definidas en cada municipio por el INE (2002), y fueron transferidas a nivel de cada poblado según su ubicación municipal.

Para estimar el consumo de agua per cápita se utilizó el umbral definido por el Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD, 2006) como la cantidad mínima de agua por habitante necesaria para cubrir varios usos (doméstico, agrícola, industrial y ambiental). Dicho umbral es de 1,700 metros cúbicos por habitante por año.

Multiplicando la población por este umbral se estimó entonces el consumo anual teórico de agua dentro de cada cuenca. Luego, se obtuvo el balance hídrico haciendo la diferencia entre la disponibilidad anual por cuenca y dicho valor de consumo.

V

Resultados

5.1. Resultados por cuenca

5.1.1 Balance hidrológico

El presente estudio permitió determinar el balance hidrológico de las subcuencas de Guatemala. Se distinguieron los flujos de entrada de agua en el sistema (precipitaciones y lámina de humedad acumulada en el suelo durante el año anterior) y los flujos de salida (evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, recarga y lámina de humedad en el suelo acumulada durante el año). Asimismo, se identificaron las cuencas que más reciben agua de precipitación, así como las que más pierden agua por la evapotranspiración. El balance para cada subcuenca está presentado en el cuadro 4.

5.1.2 Disponibilidad hídrica

Con base en el balance hidrológico definido previamente, se estimó la oferta hidrológica anual. Por oferta hidrológica se entiende el volumen de agua que el subsistema ambiental deja disponible anualmente, es decir después de que los procesos de evapotranspiración se hayan realizado.

La oferta o disponibilidad hídrica anual comprende la recarga anual de agua subterránea, más la contribución anual directa hacia los cuerpos de agua superficial, a través de la escorrentía superficial y subsuperficial, más el agua almacenada en los suelos. Se obtuvo restando la evapotranspiración al total de las salidas del balance hidrológico. A nivel de agua subterránea no se tomó en cuenta el volumen ya almacenado en los acuíferos. No obstante, el conocimiento de la recarga anual provee insumos interesantes, ya que comparándola con los volúmenes extraídos anualmente se puede tener una idea del nivel de sostenibilidad de la extracción de agua. En este caso, la disponibilidad hidrológica anual fue calculada en metros cúbicos por kilómetro cuadrado por año, para cada una de las subcuencas. El dato de oferta hidrológica está presentado en la figura 4.

Se puede observar que las cuencas que muestran los niveles de oferta hidrológica más importantes están ubicadas en el suroccidente del país (cuencas de los ríos Ocosito, Naranjo y Suchiate), así como en la parte central y en la Franja Transversal del Norte (cuencas de los ríos Cahabón, Chixoy, Ixcán, Xaclbal, Tzea, Icbolay, Sebol, Sarstún, río Dulce, Livingston). En estas cuencas, la oferta hidrológica anual es superior a 1.5 millones de metros cúbicos por kilómetro cuadrado por año.

Las cuencas con potencial de oferta hidrológica media están ubicadas en el sur del departamento de Petén, en la parte sur oriental del país (vertiente del Pacífico), así como en ciertas partes de la vertiente del Caribe (subcuenca de los ríos Polochic).

Las cuencas con menor potencial de oferta hidrológica se encuentran en la parte norte del departamento de Petén, así como en la zona del corredor seco y sus alrededores.

Cuadro 4
Balance hidrológico de las subcuencas de Guatemala (millones de m³)

Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Entradas		Salidas				
			Precipi- tación	Agua almacenada en el suelo el año anterior	Evapotrans- piración	Recarga	Almacena- miento de agua en el suelo	Escorrentía subsuper- ficial	Escorrentía superficial
Pacífico	Achiguate	Achiguate	2,542.70	199.2	1,048.20	563.3	199.2	99.4	831.9
	Atitlán-Madre Vieja	Atitlán	569.9	68	255.5	137.4	68	24.2	152.9
		Madre Vieja	1,810.60	164.3	852.2	417.4	164.3	73.7	467.4
	Coatán	Coatán	408.1	54.7	188.3	73	54.7	12.9	133.9
	Coyolate	Coyolate	5,958.90	480.4	2,573.70	1,427.60	480.4	251.9	1,705.70
	Los Esclavos	Los Esclavos	4,322.00	459.9	2,166.50	553.6	459.9	97.7	1,504.40
	Maria Linda	Maria Linda	4,747.70	553.9	2,273.20	719.2	553.9	126.9	1,628.60
	Nahualate	Nahualate	4,318.20	359.5	1,819.10	894.1	359.5	157.8	1,447.30
	Ocosito-Naranjo	Naranjo	3,518.00	245	1,231.40	1,041.00	245	183.7	1,062.10
		Naranjo Ocosito	2,083.90	360.9	1,311.60	184.8	360.9	32.6	555.2
		Ocosito	2,375.40	229.8	948.9	472.6	229.8	83.4	870.7
	Ostúa-Güija	Ostúa Güija	3,352.70	375.8	1,965.90	393.3	375.8	69.4	924.2
	Paso Hondo	Paso Hondo	1,769.60	229.6	942.8	180.1	229.6	31.8	614.8
	Paz	Paz	2,884.90	341.9	1,583.10	194.3	341.9	34.3	1,073.60
	Samalá	Samalá	2,743.20	335.1	1,265.70	523	335.1	92.3	862.3
	Sis-Icán	Sis-Icán	2,500.60	285.9	1,188.30	172.2	285.9	30.4	1,109.90
	Suchiate	Suchiate	3,019.20	231.3	1,114.20	512.2	231.3	90.4	1,302.50

Continuación del cuadro 4

Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Entradas		Salidas			
			Precipitación	Agua almacenada en el suelo el año anterior	Evapotranspiración	Recarga	Almacenamiento de agua en el suelo	Escorrentía subsuperficial
Golfo de México	Candelaria	Candelaria	3,778.40	481.1	3,483.60	84.5	481.1	14.9
		Blanco	778.4	47.2	344	98.7	47.2	17.4
		Chixoy	5,295.60	225.7	2,076.60	484	225.7	85.4
		Copón	2,229.70	120.6	944.4	296.1	120.6	52.2
		Cubulco	3,596.30	227.2	1,813.50	640.2	227.2	113
		Icbolay	4,721.30	151.5	1,776.20	377.3	151.5	66.6
		Pucal	1,946.90	241.6	1,107.00	253	241.6	44.7
		Salamá	927.1	71.7	524	124.4	71.7	22
		San Roman	3,890.90	204.8	2,139.60	198.1	204.8	35
		Tzea	3,869.80	219.7	1,651.50	363	219.7	64.1
		Cuilco	3,296.80	284.7	1,500.00	628.9	284.7	111
		Ixcán	5,909.60	255.6	2,564.90	460.4	255.6	81.2
		Las Cruces	1,254.60	130	948.3	23.8	130	4.2
		Las Pozas	878.3	56.6	627.7	13.8	56.6	2.4
		Machaquilá	3,631.70	238.9	2,359.30	194.4	238.9	34.3
	La Pasión	Riachuelo Machaquilá	3,150.50	151	1,738.00	80.6	151	14.2
		San Juan	2,269.70	202.5	1,672.30	50.1	202.5	8.8
		Santa Isabel	4,259.40	194.8	2,321.50	95.6	194.8	16.9

Continuación del cuadro 4

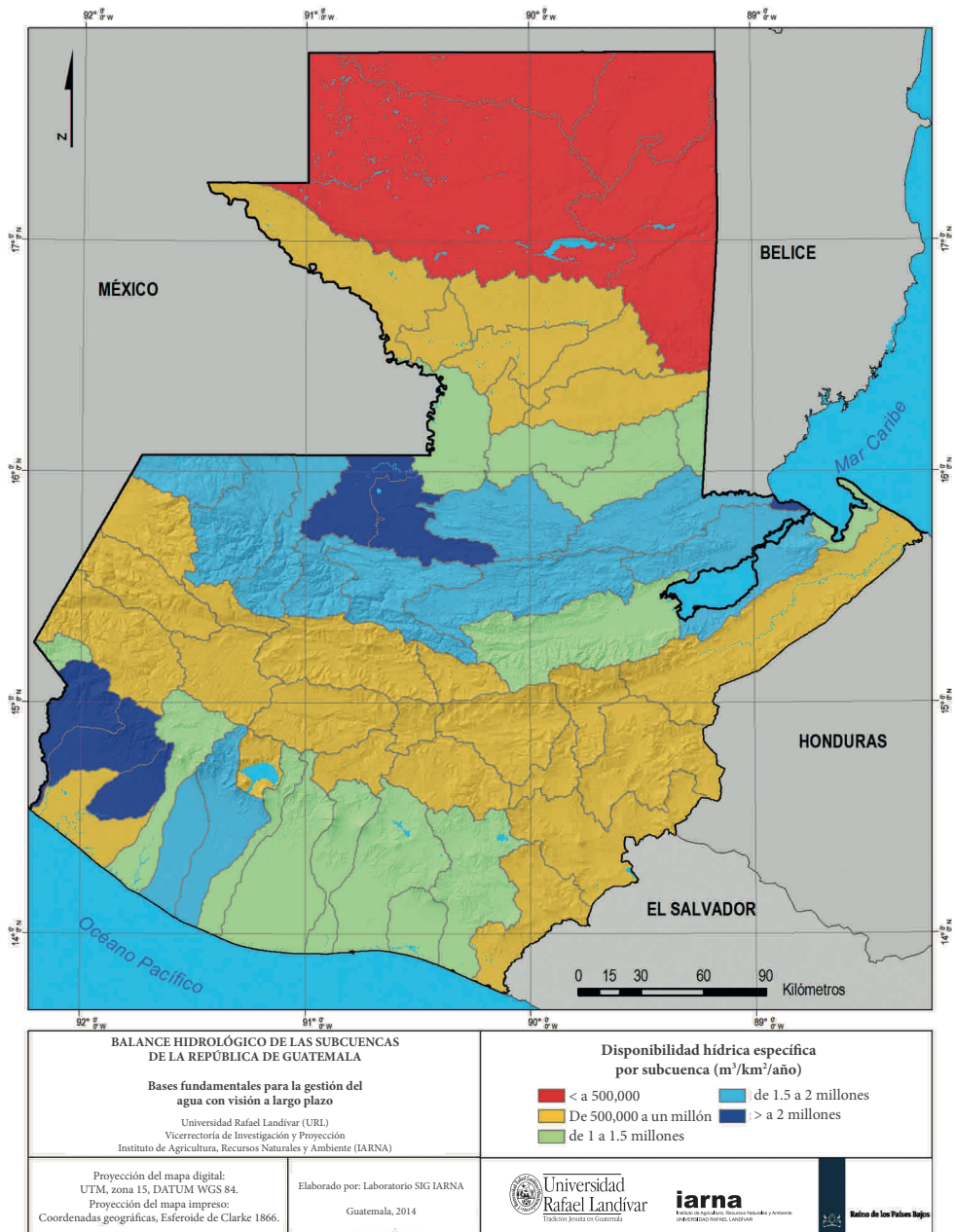
Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Entradas		Salidas			
			Precipitación	Agua almacenada en el suelo el año anterior	Evapotranspiración	Recarga	Almacenamiento de agua en el suelo	Escorrentía subsuperficial
Golfo de México	La Pasión	Sayaxché	2,268.10	156.4	1,672.40	152.5	156.4	26.9
		Sebol	6,073.00	186.2	2,555.70	353.7	186.2	62.4
		Subín	3,075.50	373.9	2,468.00	80.9	373.9	14.3
	Nentón	Nentón	2,298.50	209.4	1,239.50	112.9	209.4	19.9
	Pojóm	Pojóm	2,636.80	131.6	1,175.60	141.3	131.6	24.9
	San Pedro	San Pedro	18,055.60	1,812.80	14,778.20	333.2	1,812.80	58.8
	Selegua	Selegua	2,327.60	159.5	1,238.80	161.4	159.5	28.5
	Usumacinta	Usumacinta	5,579.60	529.3	3,996.40	114.7	529.3	20.2
	Xaclbal	Xaclbal	3,832.30	257	1,712.30	461.5	257	81.4
	Bahía de Amatique	Livingston	256.7	7.7	120.5	14	7.7	2.5
Caribe	Lago Izabal	Puerto Barrios	1,223.50	59.4	655.7	175.2	59.4	30.9
		Cahabón	7,078.80	223.4	2,620.50	778.2	223.4	137.3
		Izabal	7,061.60	309	3,605.10	394.1	309	69.6
	Hondo	Polochic	8,066.70	500.4	3,856.40	822.3	500.4	145.1
	Mohó	Hondo	3,808.30	391	3,613.80	81.1	391	14.3
	Mopán	Mohó	1,202.60	54.5	657.8	19.1	54.5	3.4
	Motagua	Mopán	7,078.40	663	5,997.60	142.1	663	25.1
		Chuacús	2,157.90	214	1,298.30	264.5	214	46.7
		El Tambor	838.7	76.6	453.8	100.9	76.6	17.8
								266.2

Continuación del cuadro 4

Vertiente	Cuenca	Subcuenca	Entradas		Salidas			
			Precipitación	Agua almacenada en el suelo el año anterior	Evapotranspiración	Recarga	Almacenamiento de agua en el suelo	Escorrentía subsuperficial
Caribe	Motagua	Grande	2,792.80	292.7	1,794.20	290.8	292.7	51.3
		Las Vacas	1,968.10	232.1	1,008.50	282.5	232.1	49.9
		Motagua alto	1,873.80	247.2	1,074.30	301.2	247.2	53.2
		Motagua bajo	7,943.40	608.7	5,038.90	734.8	608.7	129.7
		Pixcayá	879.6	123.2	481.2	123.8	123.2	21.8
		Suchicul	486.3	47.5	294.9	58.6	47.5	10.3
		Teculután	1,679.80	123.7	869.3	245	123.7	43.2
		Sarstún	5,907.50	211	2,808.40	279.2	211	49.3
			213,061.8	16,681.9	119,406.8	19,945.7	16,681.9	3,519.8
Total								70,192.5

Fuente: elaboración propia.

Figura 4
Disponibilidad hídrica en las subcuencas de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

Además de evaluar la oferta hidrológica bruta de cada cuenca, se calculó la oferta hidrológica por habitante, con el objetivo de identificar las cuencas que se encuentran más sujetas a presiones con respecto a la extracción de agua. Los resultados se presentan en la figura 5.

Las cuencas con mayores niveles de oferta hidrológica por habitante están ubicadas en la parte norte y occidental del departamento de Petén (corresponden a zonas con muy baja densidad poblacional, en las cuencas de los ríos Candelaria, Hondo y Usumacinta), así como en la zona de la Franja Transversal del Norte (subcuenca Sarstún).

Al contrario, las cuencas con menores niveles de oferta hidrológica por habitante están ubicadas alrededor del área metropolitana de Guatemala, en el corredor seco, a lo largo de la cadena volcánica y en la vertiente del Pacífico; y corresponden a zonas con altas densidades de población.

En la actualidad, tres subcuencas (Pixcayá, Las Vacas y Atitlán) presentan una disponibilidad por debajo de los 1,700 metros cúbicos per cápita, lo cual ha sido determinado como el umbral mínimo para cubrir las necesidades mínimas de cada individuo. Entre estas tres subcuencas, la subcuenca Las Vacas presenta una situación de escasez, pues tiene una disponibilidad per cápita inferior a 1,000 metros cúbicos.

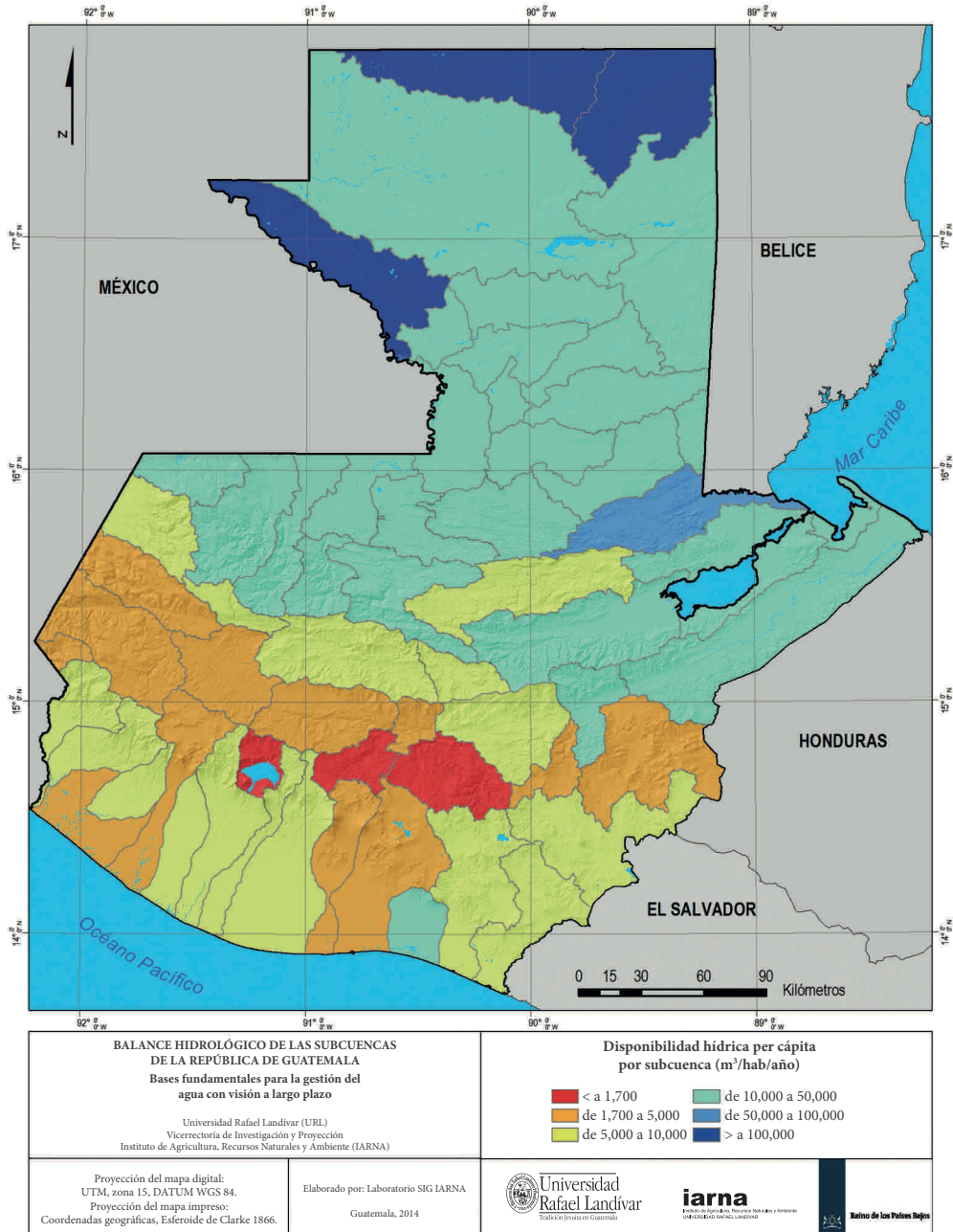
Además de haber tomado en cuenta la situación actual, la oferta hidrológica fue determinada por un escenario de cambio climático tendencial al 2020 (figura 6). Esto permitió evaluar las tendencias evolutivas de dicha oferta para cada cuenca.

Se puede notar que las cuencas para las cuales la oferta hídrica va disminuir de manera más drástica están ubicadas principalmente en el norte del departamento de Petén y en la parte sur-oriental del corredor seco.

Las cuencas que presentan una disminución mediana de la oferta hidrológica al 2020 están ubicadas principalmente en el corredor seco, alrededor de la cadena volcánica (sector oriental), en el departamento de Huehuetenango y en la parte sur del departamento de Petén.

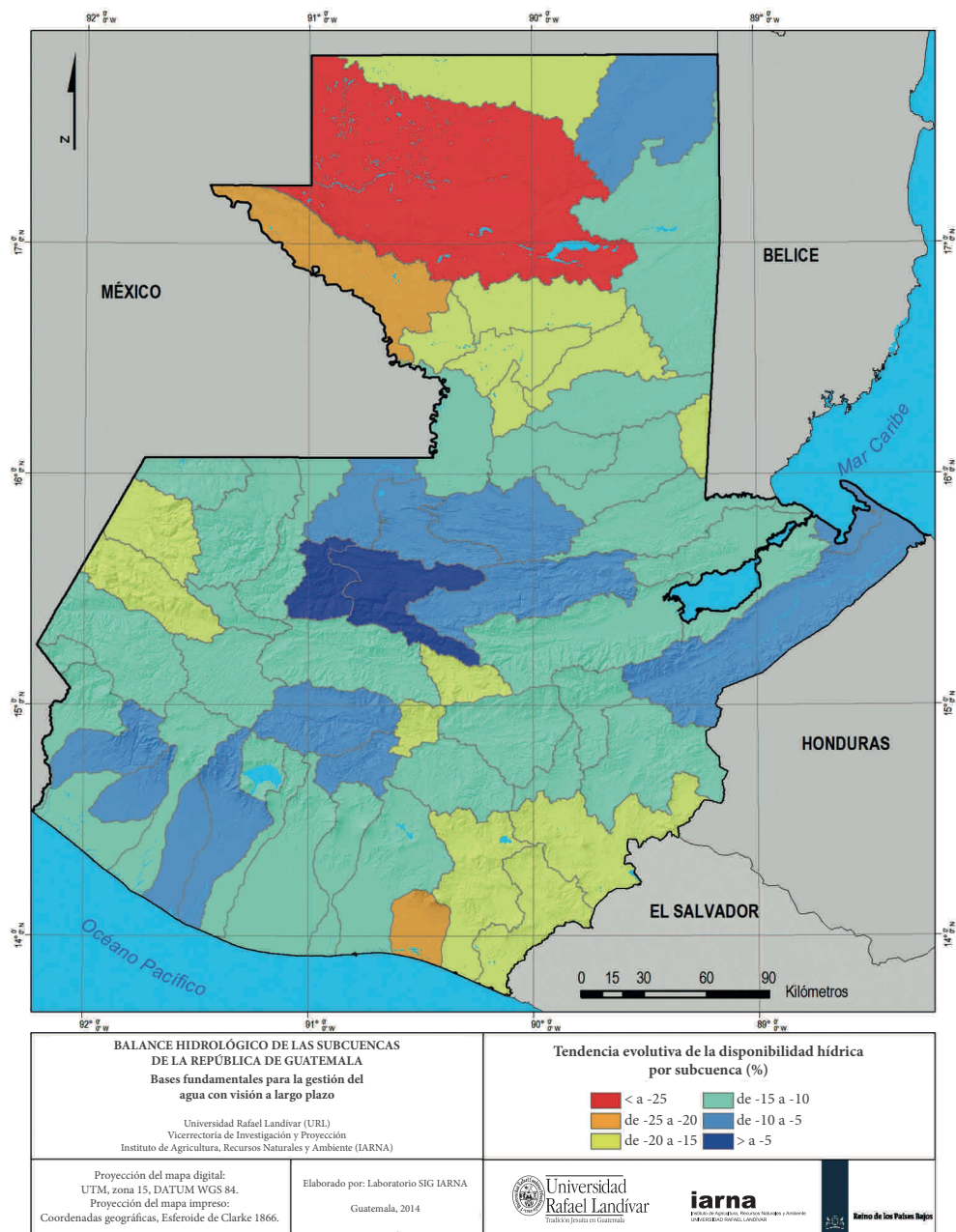
Las cuencas con menor disminución de la oferta hídrica están ubicadas en la parte central del país, en la Franja Transversal del Norte y en la mitad occidental de la vertiente del Pacífico.

Figura 5
Disponibilidad hídrica per cápita en las subcuencas de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

Figura 6
Evolución de la disponibilidad hídrica al 2020 en las subcuencas de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

5.1.3 Balance hídrico

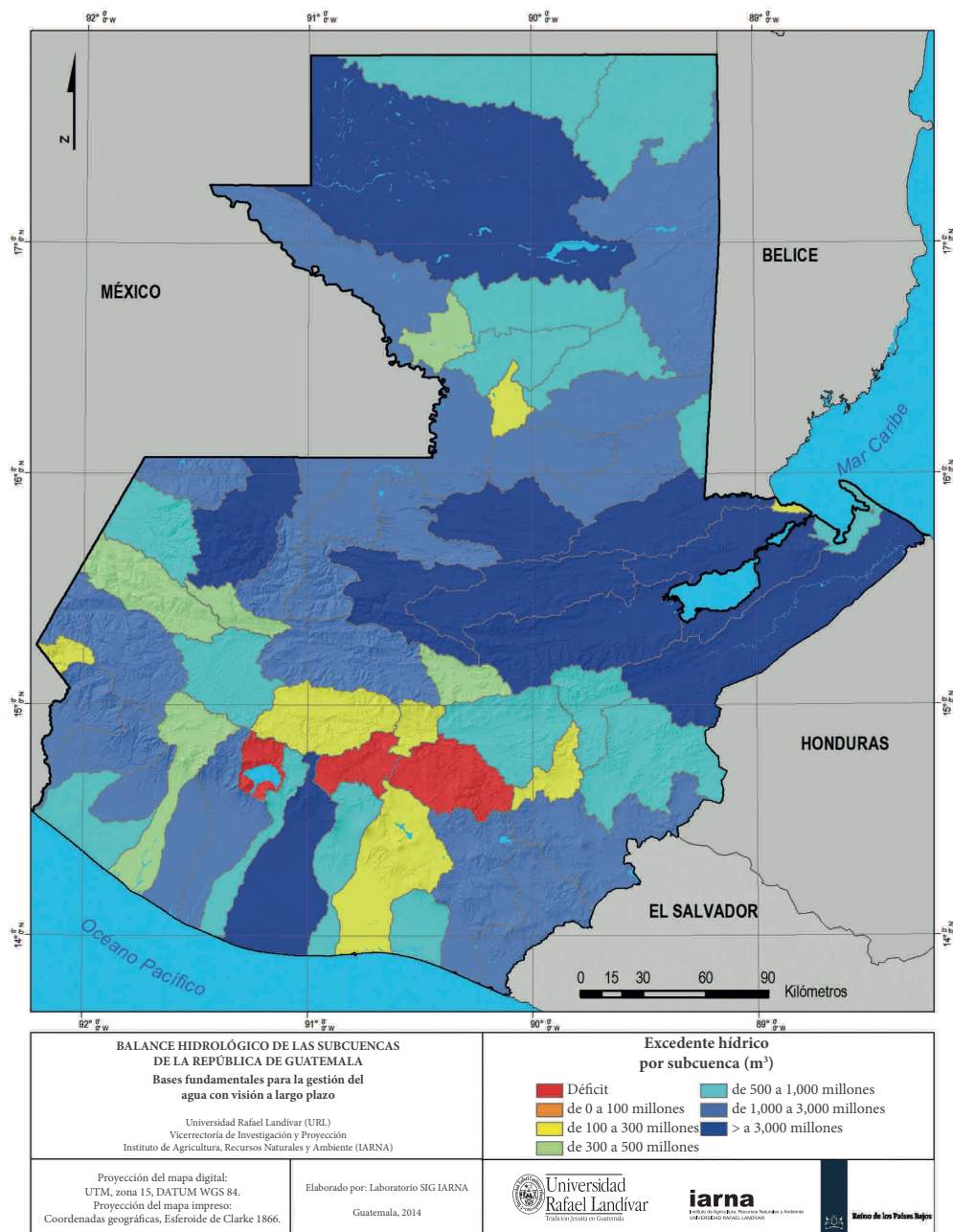
Con base en los datos de disponibilidad y de consumo, se calculó el balance hídrico para poder estimar el excedente (o déficit) de recursos hídricos en cada subcuenca del país.

Los resultados del balance están presentados por subcuenca en las figuras 7 y 8. Se puede observar que las subcuencas con el mayor excedente de recursos hídricos están principalmente ubicadas en la parte central del país y en el área del Caribe, así como en la parte sur occidente del país, en la vertiente del Pacífico.

A lo contrario, las cuencas con menor excedente en recursos hídricos están ubicadas en el área del corredor seco; en la cabecera de la cuenca del río Motagua (sur de Quiché); alrededor del área metropolitana (subcuencas de los ríos Las Vacas, María Linda y Pixcayá) y de las áreas urbanas mayores del altiplano central y occidental; así como en la parte norte del departamento de Petén. Además, subcuencas vinculadas con el área metropolitana (Las Vacas y Pixcayá), así como la subcuenca del Lago de Atitlán, se caracterizan por tener un balance hídrico anual deficitario.

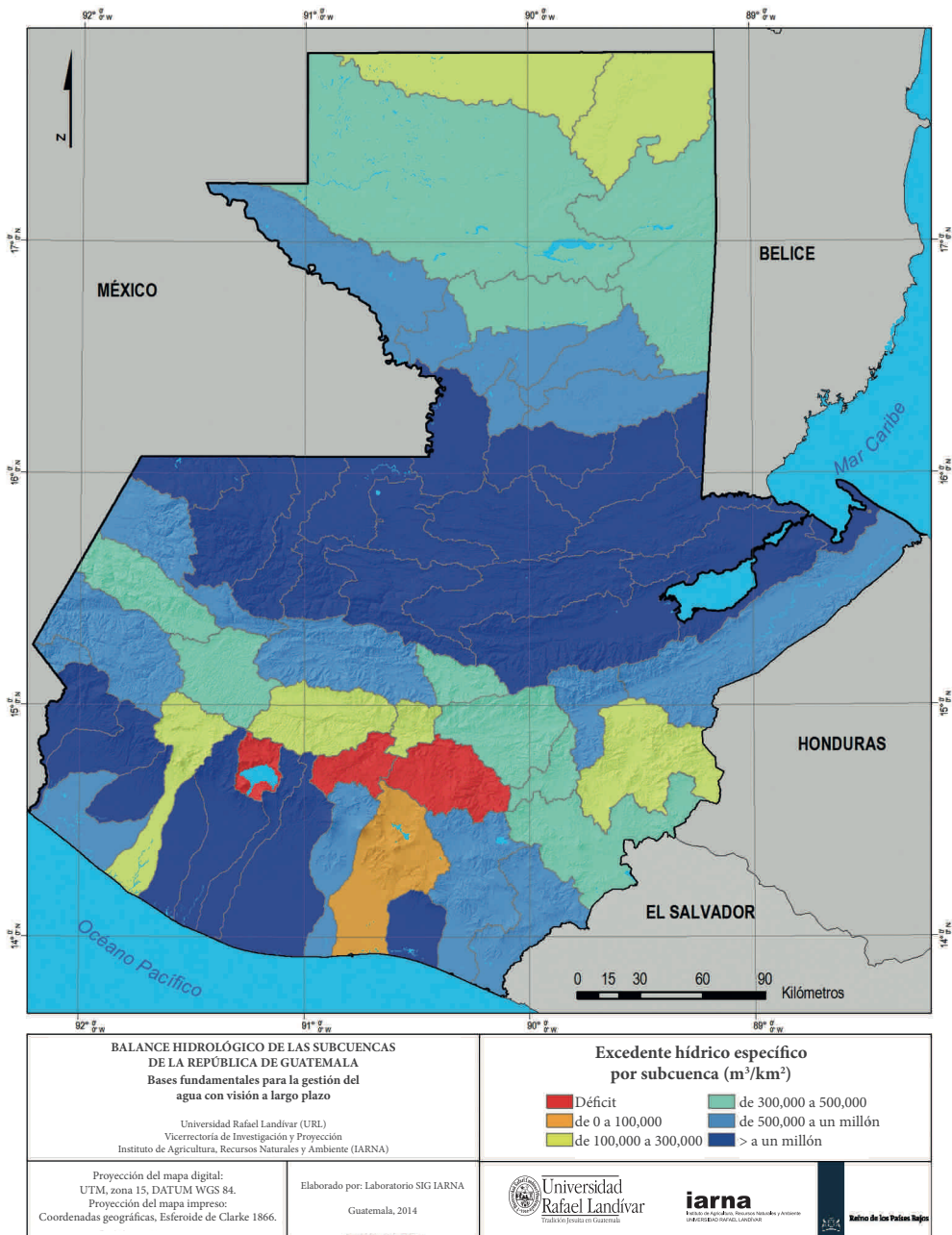
Al observar los datos del balance por unidad de superficie para el año 2020 (figura 9), se puede notar una progresión de las zonas con mayor presión sobre los recursos hídricos, principalmente en el área del corredor seco y su extensión hacia el altiplano occidental y México. Las zonas central y sur-occidente siguen siendo las áreas con mayor excedente de recursos hídricos por unidad de superficie.

Figura 7
Excedente bruto de agua en las subcuencas de Guatemala



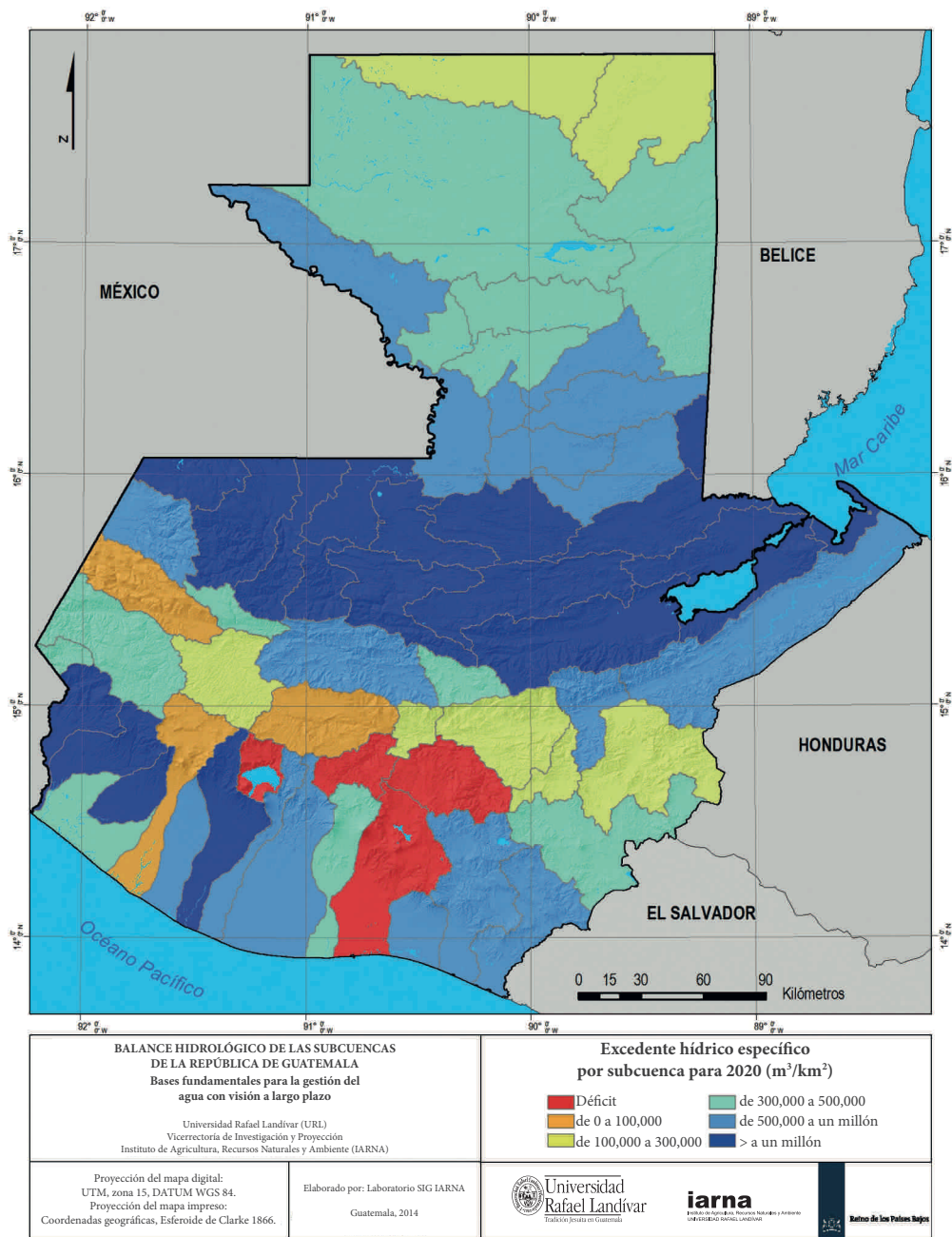
Fuente: elaboración propia.

Figura 8
Excedente bruto de agua por unidad de superficie en las subcuencas de Guatemala



Fuente: elaboración propia.

Figura 9
Excedente bruto de agua por unidad de superficie en las subcuencas de Guatemala, al año 2020



Fuente: elaboración propia.

5.2. Resultados por vertiente

5.2.1 Oferta anual total de agua

La oferta total de agua para cada vertiente fue determinada a través de la suma del total anual de precipitaciones registradas en cada subcuenca.

- **Vertiente del Pacífico**

La oferta anual total de agua para la vertiente del Pacífico se presenta en el cuadro 5, tanto para la situación actual, como para el escenario tendencial. La cantidad total de agua precipitada en la vertiente durante un año ha sido estimada a 48,926 millones de metros cúbicos. Se puede apreciar también, que para el año 2020 se espera una disminución de las precipitaciones en dicha vertiente en más del 7% .

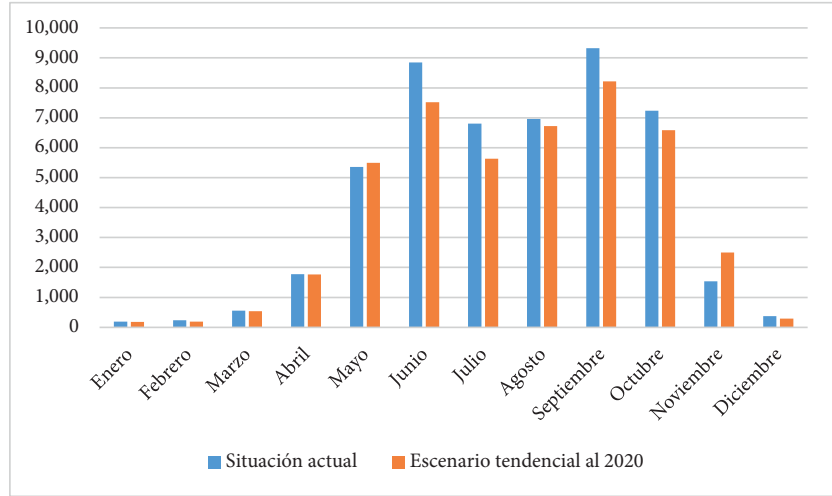
La figura 10 muestra la distribución mensual de dicha oferta total y permite apreciar la importante variabilidad a la cual está sometida esta oferta a lo largo del año. En efecto, las estaciones húmedas y secas son muy marcadas. Por otro lado, se puede observar que la disminución de las precipitaciones para el 2020 es mayor durante la estación húmeda.

Cuadro 5
Precipitaciones en la vertiente del Pacífico (millones de metros cúbicos)

Periodo de tiempo	Precipitación anual	Evolución (%)
Situación actual	48,926	-
Escenario tendencial al 2020	45,214	-7.6

Fuente: elaboración propia.

Figura 10
Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Pacífico
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

• **Vertiente del Golfo de México**

La oferta anual total de agua para la vertiente del Golfo de México se presenta en el cuadro 6. Las precipitaciones anuales en la vertiente se elevan a 101,832 millones de metros cúbicos. Por lo tanto, la vertiente del Golfo de México es la que presenta el valor más alto de las tres vertientes en términos de oferta anual total de agua.

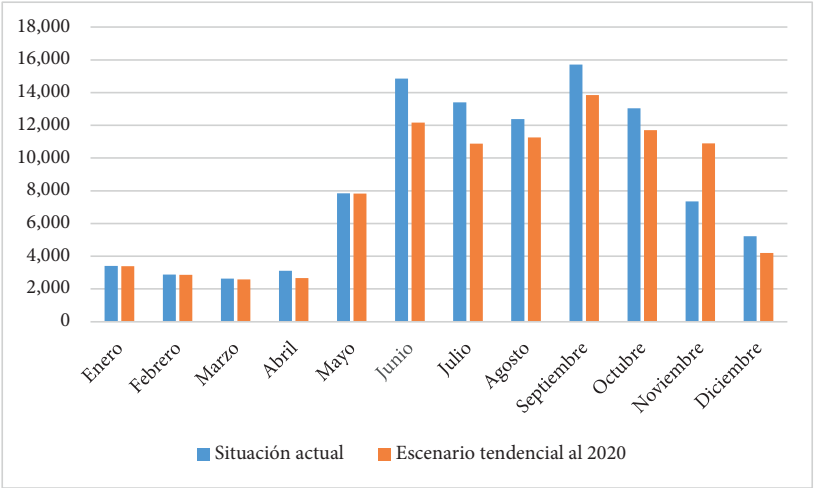
Para el 2020 se espera una disminución de las precipitaciones de alrededor del 7% en la vertiente del Golfo de México. Como se puede observar en la figura 11, las estaciones son menos marcadas en comparación con la vertiente del Pacífico pero, al igual que esta vertiente, la disminución de las precipitaciones para el año 2020 es más fuerte durante los meses húmedos.

Cuadro 6
Precipitaciones en la vertiente del Golfo de México (millones de metros cúbicos)

Periodo de tiempo	Precipitación anual	Evolución (%)
Situación actual	101,832	-
Escenario tendencial al 2020	94,307	-7.4

Fuente: elaboración propia.

Figura 11
Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Golfo de México
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

• **Vertiente del Caribe**

La oferta anual total de agua para la vertiente del Golfo del Caribe se presenta en el cuadro 7, la cual se eleva a 62,304 millones de metros cúbicos por año. Para el 2020 se espera una disminución de las precipitaciones de alrededor del 6%.

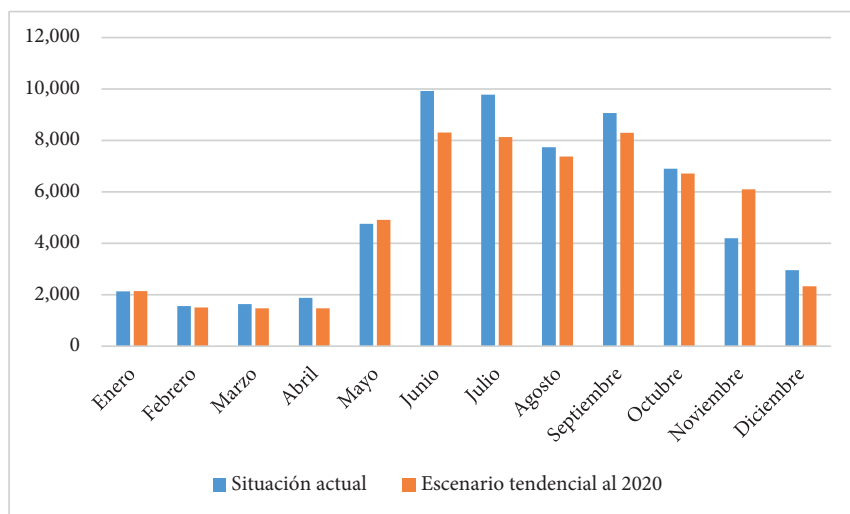
En la figura 12 se puede observar que, al igual que para las otras vertientes, la disminución de las precipitaciones para el año 2020 es más fuerte durante los meses húmedos.

Cuadro 7
Precipitaciones en la vertiente del Caribe (millones de metros cúbicos)

Periodo de tiempo	Precipitación	Evolución
Situación actual	62,304	-
Escenario tendencial al 2020	58,362	-6.3

Fuente: elaboración propia.

Figura 12
Repartición mensual de las precipitaciones en la vertiente del Caribe
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

5.2.2 Balance hidrológico

• Vertiente del Pacífico

El balance hidrológico anual de la vertiente del Pacífico para el periodo actual se puede apreciar en el cuadro 8 y en la figura 13. En dicha figura, los valores positivos corresponden a los flujos de entrada de agua en el sistema (precipitaciones y lámina de humedad acumulada en el suelo durante el año anterior) y los valores negativos son los flujos de salida (evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subsuperficial, recarga y lámina de humedad en el suelo acumulada durante el año).

En la vertiente del Pacífico, los flujos de salida más importantes corresponden a la evapotranspiración y a la escorrentía superficial, los cuales representan respectivamente el 42% y el 30% del total de las salidas. Los flujos de recarga potencial hacia los acuíferos se elevan a 8,459 millones de metros cúbicos, es decir, representan el 16% de las salidas. Esta vertiente presenta los valores de recarga más altos, principalmente debido a la importante presencia de suelos volcánicos altamente permeables. El resto de los flujos de salida corresponden al almacenamiento de agua en el suelo y a la escorrentía subsuperficial, los cuales representan el 9% y 3% respectivamente.

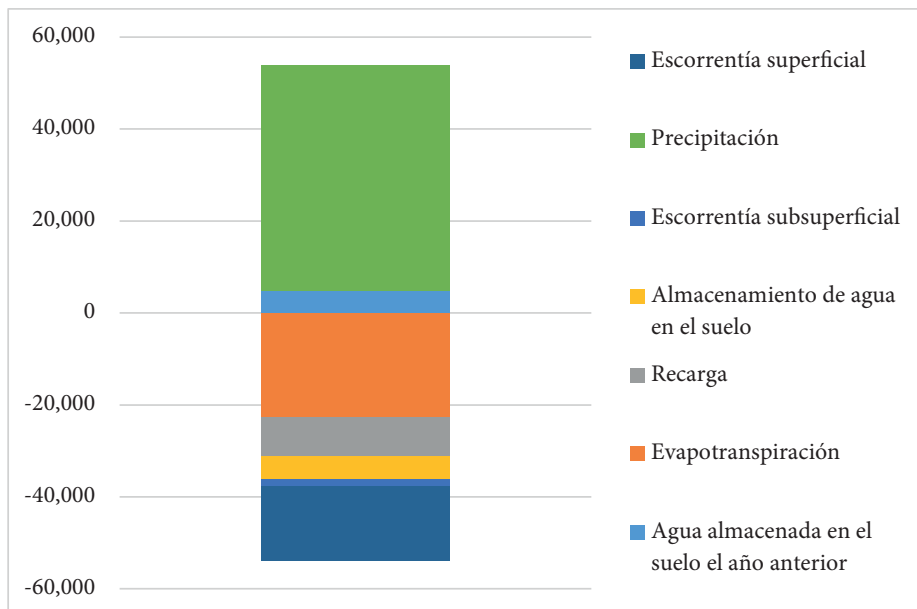
Al analizar la evolución de los flujos de salida al 2020, se observa que el rubro más reducido es la escorrentía superficial. La recarga potencial hacia los acuíferos disminuye un 6.27%. Debido al aumento de las temperaturas y a la disminución de las precipitaciones, la evapotranspiración llegará a representar más del 45% del total de los flujos de salida.

Cuadro 8
Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Pacífico,
y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Aspecto	Actual	Actual (%)	2020	2020 (%)	Evolución (%)
Evapotranspiración	22,728	42.2	22,815	45.5	0.38
Recarga	8,459	15.7	7,929	15.8	-6.27
Almacenamiento de agua en el suelo	4,975	9.2	4,874	9.7	-2.03
Escorrentía subsuperficial	1,493	2.8	1,399	2.8	-6.27
Escorrentía superficial	16,247	30.1	13,073	26.1	-19.54
Total	53,903	100.0	50,090	100.0	-7.07

Fuente: elaboración propia.

Figura 13
Balance hidrológico de la vertiente del Pacífico
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

- **Vertiente del Golfo de México**

El balance hidrológico anual de la vertiente del Golfo de México para el periodo actual se puede apreciar en el cuadro 9 y en la figura 14. En dicha vertiente, la evapotranspiración representa más del 50% de los flujos de salida. El segundo flujo más importante es la escorrentía superficial, que corresponde al 31%. Le siguen el almacenamiento de agua en el suelo y la recarga, que representan cada uno alrededor del 6% de los flujos de salida. La escorrentía subsuperficial corresponde al 1%.

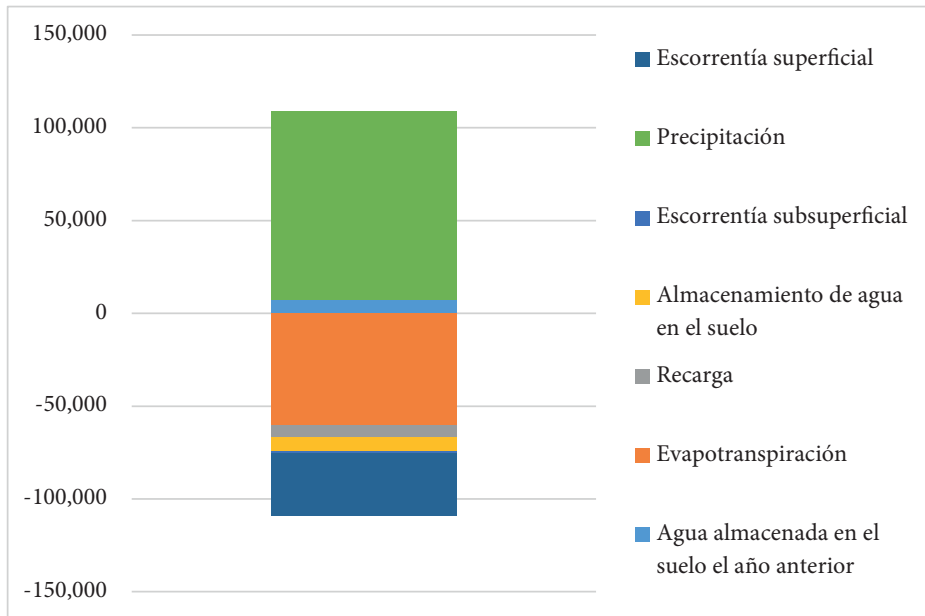
Para el año 2020 se espera una reducción del 18% de la escorrentía superficial. Los flujos de recarga hacia los acuíferos se verían bastante reducidos, ya que su disminución alcanzaría un 8%. Según este escenario, la evapotranspiración podría llegar a representar el 58% de los flujos de salida.

Cuadro 9
Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Golfo de México, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Aspecto	Actual	Actual (%)	2020	2020 (%)	Evolución (%)
Evapotranspiración	60,429	55.4	59,653	58.6	-1.29
Recarga	6,379	5.8	5,867	5.8	-8.02
Almacenamiento de agua en el suelo	7,322	6.7	7,454	7.3	1.81
Escorrentía subsuperficial	1,126	1.0	1,035	1.0	-8.02
Escorrentía superficial	33,899	31.1	27,752	27.3	-18.13
Total	109,154	100.0	101,762	100.0	-6.77

Fuente: elaboración propia.

Figura 14
Balance hidrológico de la vertiente del Golfo de México
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

• Vertiente del Caribe

El balance hidrológico anual de la vertiente del Caribe para el periodo actual se puede apreciar en el cuadro 10 y en la figura 15. El principal flujo de salida corresponde a la evapotranspiración, que representa el 54% del total de los flujos. El segundo flujo más importante es la escorrentía superficial, que corresponde al 30%. El almacenamiento de agua en el suelo y la recarga representan respectivamente el 6.6% y 7.7% de los flujos de salida.

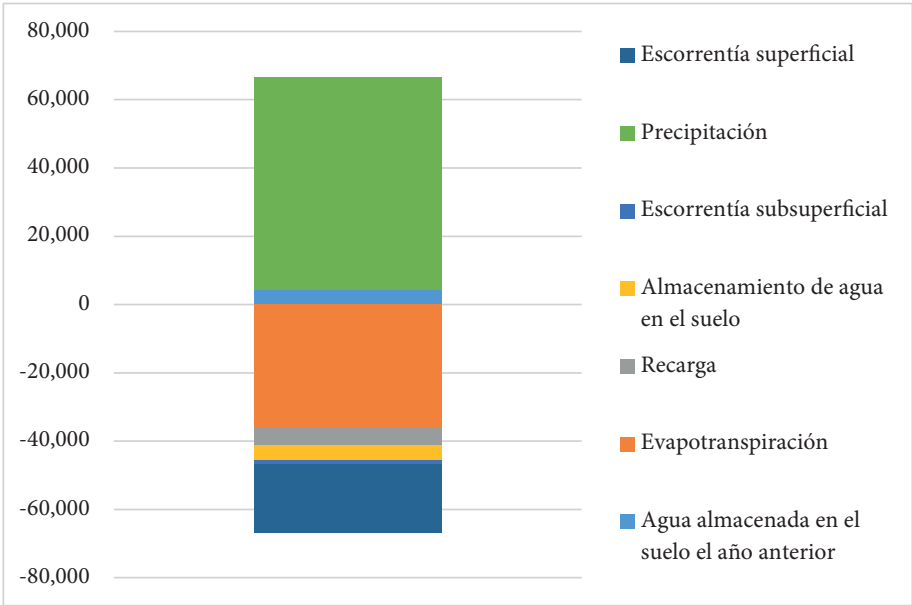
Para el 2020 se espera una disminución del 15% de la escorrentía superficial. En cuanto a la recarga, se ha estimado que disminuiría a un 7%. La evapotranspiración llegaría a representar el 57% de los flujos de salida.

Cuadro 10
Flujos de salida del balance hidrológico para la vertiente del Caribe, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Aspecto	Actual	Actual (%)	2020	2020 (%)	Evolución (%)
Evapotranspiración	36,249	54.4	35,773	56.8	-1.31
Recarga	5,108	7.7	4,741	7.5	-7.17
Almacenamiento de agua en el suelo	4,385	6.6	4,571	7.3	4.25
Escurrentía subsuperficial	901	1.4	837	1.3	-7.17
Escurrentía superficial	20,047	30.1	17,011	27.0	-15.14
Total	66,690	100.0	62,934	100.0	-5.63

Fuente: elaboración propia.

Figura 15
Balance hidrológico de la vertiente del Caribe
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

5.2.3 Disponibilidad hídrica

Con base en el balance hidrológico definido previamente, se estimó la oferta hidrológica anual. Por oferta hidrológica se entiende el volumen de agua que deja disponible anualmente el subsistema ambiental, y es potencialmente captable por las sociedades humanas.

La oferta o disponibilidad hídrica anual comprende la recarga anual de agua subterránea, más la contribución anual directa hacia los cuerpos de agua superficial, a través de la escorrentía superficial y subsuperficial, más el agua almacenada en los suelos. Se obtuvo restando la evapotranspiración del total de las salidas del balance hidrológico. A nivel del agua subterránea, no se tomó en cuenta el volumen ya almacenado en los acuíferos. No obstante, el conocimiento de la recarga anual provee insumos interesantes, ya que comparándola con los volúmenes extraídos anualmente se puede tener una idea del nivel de sostenibilidad de la extracción del agua.

• Vertiente del Pacífico

La disponibilidad hídrica para la vertiente del Pacífico se detalla en el cuadro 11, tanto para el periodo actual, como para el escenario tendencial al 2020. La oferta hídrica actual ha sido estimada en 31,174 millones de metros cúbicos por año. Se espera una disminución del 12.5% de dicha oferta para el año 2020, en las condiciones climáticas definidas según el escenario de emisiones de gases de efecto invernadero A2 del IPCC.

Cuadro 11
Disponibilidad hídrica en la vertiente del Pacífico, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Situación actual	2020 (escenario tendencial)	Evolución (%)
31,174	27,275	-12.51

Fuente: elaboración propia.

• Vertiente del Golfo de México

La disponibilidad hídrica para la vertiente del Golfo de México se detalla en el cuadro 12, tanto para el periodo actual, como su tendencia evolutiva al 2020. La disponibilidad hídrica actual ha sido estimada en 48,725 millones de metros cúbicos.

Esta vertiente presenta el nivel de oferta hídrica más importante, en comparación con las otras dos, y para el año 2020 se espera una disminución de casi el 14% de su oferta hídrica.

Cuadro 12
Disponibilidad hídrica en la vertiente del Golfo de México, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Situación actual	2020 (escenario tendencial)	Evolución (%)
48,725	42,109	-13.58

Fuente: elaboración propia.

• **Vertiente del Caribe**

La disponibilidad hídrica para la vertiente del Caribe se detalla en el cuadro 13, tanto para el periodo actual, como su tendencia evolutiva al 2020. La disponibilidad hídrica actual ha sido estimada en 30,441 millones de metros cúbicos por año. Dicha disponibilidad podría disminuir a más del 10% de aquí al 2020.

Cuadro 13
Disponibilidad hídrica en la vertiente del Caribe, y tendencias de evolución al 2020 (en millones de metros cúbicos y porcentaje)

Situación actual	2020 (escenario tendencial)	Evolución (%)
30,441	27,161	-10.78

Fuente: elaboración propia.

5.3. Resultados a nivel nacional

Los resultados del balance y de la disponibilidad de agua a nivel nacional se presentan en la figura 16 y en los cuadros 14 y 15. El total anual de las precipitaciones ha sido estimado en 213,062 millones de metros cúbicos.

Al analizar los flujos de salida del balance, se puede apreciar que el volumen de agua que sale bajo la forma de evapotranspiración es de 119,407 millones de metros cúbicos, que representa el 52% de dichos flujos a nivel nacional. El segundo flujo de salida más importante es la escorrentía superficial, que se eleva a 70,193 millones de metros cúbicos, y representa el 31% de los flujos de salida.

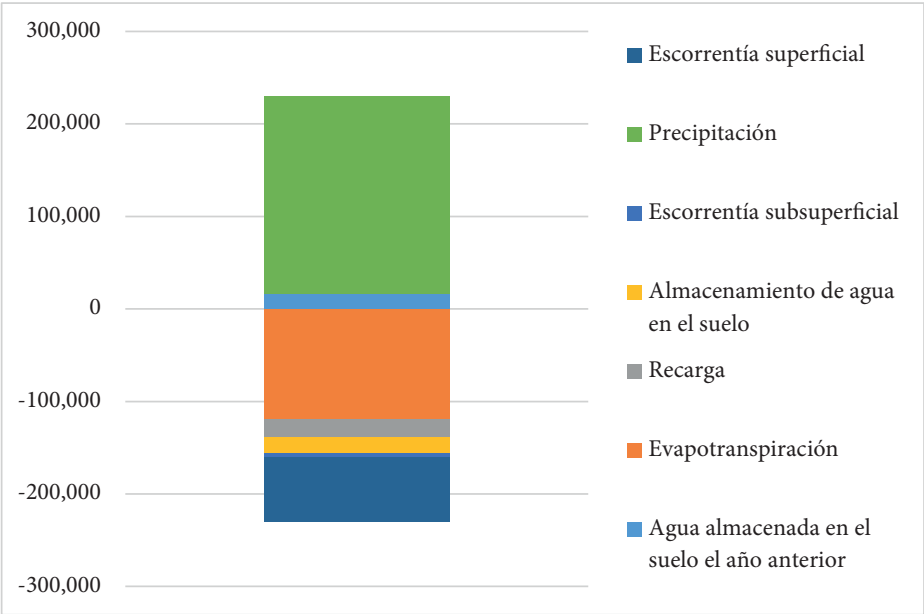
Los flujos de salida están distribuidos de la siguiente manera: 99% corresponde a la recarga anual total, que se eleva a 19,946 millones de metros cúbicos; 7.2% al almacenamiento de agua en el suelo, cuyo volumen alcanza los 16,682 millones de metros cúbicos anualmente; y 1.6% a la escorrentía subsuperficial.

A nivel nacional se estimó una oferta o disponibilidad hídrica anual de 110,340 millones de metros cúbicos. Al 2020, podría disminuir un 12.5%, para llegar a ser de 96,545 millones de metros cúbicos.

El cálculo del balance hídrico a nivel nacional dio como resultado un excedente de 85,461 millones de metros cúbicos al año. El consumo representa entonces el 22% de la disponibilidad total anual.

El ratio consumo/disponibilidad es mayor en la vertiente en la cuenca del Pacífico, en donde el consumo representa el 36% de la disponibilidad anual. Dicho ratio tiene un valor menor en la vertiente del Golfo de México, donde el consumo representa el 12% de la disponibilidad anual. Al año 2020, el consumo de agua a nivel nacional podría representar el 30% de la disponibilidad anual, mientras que en la vertiente del Pacífico, alcanzaría casi el 50% de los recursos disponibles.

Figura 16
Balance hidrológico de Guatemala
(millones de metros cúbicos)



Fuente: elaboración propia.

Cuadro 14
Disponibilidad hídrica en Guatemala, y tendencias de evolución al 2020
(millones de metros cúbicos y porcentaje)

Situación actual	2020 (escenario tendencial)	Evolución (%)
110,340	96,545	-12.50

Fuente: elaboración propia.

Cuadro 15
Balance hídrico de las vertientes de Guatemala
(millones de de m³/año)

Vertiente	Disponibilidad		Consumo		Balance		Consumo/ Disponibilidad	
	Actual	2020	Actual	2020	Actual	2020	Actual	2020
Pacífico	31,174	27,275	11,133	12,939	20,041	14,336	0.36	0.47
Golfo de México	48,725	42,109	5,720	6,917	43,005	35,192	0.12	0.16
Caribe	30,441	27,161	8,026	9,185	22,415	17,976	0.26	0.34
Total	110,340	96,545	24,879	29,041	85,461	67,504	0.22	0.30

Fuente: elaboración propia.

VI

Conclusiones

- La República de Guatemala cuenta con una disponibilidad hídrica anual de 110,340 millones de metros cúbicos. Con una proyección de población de 14,635,674 habitantes para el 2013, la disponibilidad anual de agua per cápita alcanza los 7,539 metros cúbicos. Por lo tanto, dicha disponibilidad se encuentra mucho más arriba del umbral propuesto por el PNUD para satisfacer los requerimientos de agua para la agricultura, la industria, el uso doméstico y el medio ambiente, lo cual es de 1,700 metros cúbicos por habitante por año (PNUD, 2006). No obstante, dicha disponibilidad está desigualmente repartida en el espacio, y ciertas áreas disponen de más agua que otras.
- El 44% del agua disponible se encuentra en la vertiente del Golfo de México y, por lo tanto, es la vertiente con los niveles de disponibilidad hídrica más altos. Las vertientes del Pacífico y del Caribe representan, cada una, el 28% de la disponibilidad hídrica nacional.
- Las subcuencas que presentan un nivel mayor de disponibilidad hídrica por kilómetro cuadrado se encuentran en la parte central del país y en la Franja Transversal del Norte, así como en la parte sur occidente de la vertiente del Pacífico. Dichas subcuencas cuentan con una disponibilidad de agua anual superior a 1.5 millones de metros cúbicos por kilómetro cuadrado. Las subcuencas con menor disponibilidad hídrica se encuentran en la zona del corredor seco, así como en la parte norte del departamento de Petén. Estas subcuencas cuentan con una disponibilidad hídrica anual inferior a 500,000 metros cúbicos por kilómetro cuadrado.
- A nivel de disponibilidad hídrica anual per cápita, las subcuencas con mayor disponibilidad se encuentran en la zona de la Franja Transversal del Norte y en la cuenca del Lago de Izabal, así como en la parte norte de Petén (densidad de población muy baja). Estas subcuencas cuentan con una disponibilidad hídrica superior a los 100,000 metros cúbicos por habitante por año. Al contrario, las subcuencas con menor disponibilidad están ubicadas principalmente alrededor del corredor seco, así como en ciertas cuencas muy urbanizadas de la vertiente del Pacífico (María Linda, Samalá, Ocosito-Naranjo). La disponibilidad hídrica anual por habitante en estas subcuencas es inferior a 5,000 metros cúbicos. Además, existen tres subcuencas para las cuales la disponibilidad hídrica anual per cápita está por debajo del umbral de los 1,700 metros cúbicos: la subcuenca del río Las Vacas (723 m³/hab/año), la subcuenca del río Pixcayá (1,307 m³/hab/año) y la subcuenca del Lago de Atitlán (1,400 m³/hab/año). Por lo tanto, la subcuenca del río Las Vacas se encuentra en una situación de escasez de agua, ya que la disponibilidad anual per cápita se encuentra por debajo del umbral de los 1,000 metros cúbicos por habitante por año (PNUD, 2006).
- Las condiciones de cambio climático descritas por el escenario de emisiones A2 del IPCC resultarían en una reducción del 7% del total de las precipitaciones anuales que, junto al aumento de las temperaturas, tendrían como consecuencia la disminución de la disponibilidad hídrica anual en más del 12%. Dicha oferta pasaría de 110,340 millones de metros cúbicos a 96,545 millones de metros cúbicos. Esta disminución se puede caracterizar de bastante fuerte, ya que el plazo es inferior a los 10 años.

- Las subcuencas más afectadas por el cambio climático, en términos de disponibilidad hídrica, están ubicadas principalmente en la parte norte del país. La disponibilidad hídrica anual se podría ver afectada en más del 20% de aquí al 2020. Las subcuencas que estarían medianamente afectadas se encuentran mayoritariamente en el área del corredor seco, así como en la franja sur del departamento de Petén. Las cuencas menos afectadas al 2020 están ubicadas en la parte central del país, alrededor de la Franja Transversal del Norte, en la cuenca Cahabón-Polochic-Lago de Izabal, en la cuenca baja del Motagua, así como en la vertiente del Pacífico, principalmente en la parte occidental. En dichas cuencas, la disminución de la disponibilidad hídrica sería inferior al 10%, de aquí al 2020.

VII

Recomendaciones

Considerando las principales conclusiones del presente estudio, se puede afirmar que es necesario y urgente poner en marcha iniciativas constructivas para mantener los niveles de disponibilidad hídrica a futuro en Guatemala. Los esfuerzos tienen que ser asumidos por actores públicos y privados, así como por la sociedad civil, y deben encajar en el paradigma de la gestión integrada de recursos hídricos, que privilegia las acciones locales e interinstitucionales bajo un enfoque sistémico y de largo plazo. Los principales esfuerzos deben enfocarse, por lo menos, en los siguientes puntos:

- A nivel del subsistema natural, es necesario iniciar lo más pronto posible un programa de manejo y restauración de las cuencas y subcuencas del país, con el fin de mantener los procesos hidrológicos que determinan la disponibilidad hídrica. Los resultados del presente estudio pueden ser útiles para priorizar la ubicación de dichos esfuerzos. La zona del corredor seco aparece como prioritaria, ya que cuenta actualmente con los niveles de disponibilidad anual de agua per cápita más bajos del país y, según las proyecciones al 2020, la disminución de la disponibilidad hídrica en esta zona será de mediana a alta. El área metropolitana de Guatemala está en situación crítica, pues la subcuenca del río Las Vacas aparece ya en situación de estrés hídrico.
- Con el fin de poder seguir aprovechando las aguas superficiales, es indispensable iniciar esfuerzos de conservación y restauración de los ríos. Bajo esta perspectiva, es necesario tomar en cuenta, por un lado, su estado ecológico (que depende de factores biológicos, hidromorfológicos y físico-químicos); y por el otro, el estado puramente físico-químico y microbiológico del agua.
- Es imperativo iniciar un trabajo de investigación acerca de los principales acuíferos del país (principales áreas urbanas y agrícolas) para poder modelar dichos acuíferos y tener un conocimiento de las tendencias a las cuales están sometidos, en un contexto de cambio climático y de extracción intensa. Es necesario implementar un sistema de monitoreo de aguas subterráneas, con el fin de tener certeza sobre su estado físico-químico y microbiológico.
- A nivel del sector agrícola se requieren iniciativas relacionadas con la adaptación al cambio climático. Dichas iniciativas deben promover prácticas que tomen en cuenta el ciclo hidrológico y permitir mejorar el uso del recurso agua a nivel de las parcelas. Se deben incluir prácticas de manejo y conservación de suelos, la selección generalización de cultivos que demandan menos agua, técnicas de riego eficientes, etc.
- Es indispensable crear normativas a nivel nacional que fomenten la generalización de prácticas que favorezcan la infiltración. A nivel de las áreas urbanas y de las carreteras, se deben establecer normas a las empresas de lotificación y construcción, para que integren elementos de hidráulica de pequeña escala en sus proyectos, que permitan incrementar la recarga y limitar la escorrentía. En efecto, como se pudo ver a través del estudio, los recursos superficiales van a ser los más afectados por el cambio climático, así como por la contaminación; y los recursos subterráneos se van a volver cada vez más importantes para el abastecimiento, tanto de las áreas urbanas, como de las zonas agrícolas.

- Es necesario implementar un sistema de tratamiento de las aguas residuales provenientes de la industria, la agricultura y los hogares para limitar la contaminación hacia los cuerpos de agua superficial, y así asegurar una calidad de agua suficiente para consolidar los sistemas de captación existentes, y eventualmente crear nuevos.
- Por otro lado, es necesario regular la demanda, a través de instrumentos legales y reglamentaciones. Es imprescindible sensibilizar a los usuarios hacia nuevas prácticas que no generen desperdicio de agua, a través de campañas de comunicación masivas.
- Finalmente, es importante continuar esfuerzos de investigación para tener un conocimiento más preciso de los procesos biofísicos relacionados con el agua en el país. Dichos esfuerzos deberían de enfocarse en la áreas geográficas con más interés, tomando en cuenta múltiples factores (biofísicos, sociales, económicos, etc.).

Referencias

1. Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). Crop evapotranspiration, guidelines for computing crop water requirements. *FAO Irrigation and drainage paper 56*: 333. Roma: FAO. Recuperado de: <http://www.fao.org/docrep/X0490E/X0490E00.htm>
2. Bahri, A. (2012). *Integrated urban water management*. Stockholm. Recuperado de: <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:TEC+BACKGROUND+PAPERS#0>
3. Bosch, J. M., & Hewlett, J. D. (1982). A review of catchment experiments to determine the effect of vegetation changes on water yield and evapotranspiration. *Journal of Hydrology*, 55(1-4), 3–23. doi:10.1016/0022-1694(82)90117-2
4. Bruijnzeel, L. A. (1990). *Hydrology of moist tropical forests and effects of conversion: a state of knowledge review*. Amsterdam: The Faculty of Earth Science.
5. ----- (2004). Hydrological functions of tropical forests: not seeing the soil for the trees? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 104(1), 185–228. doi:10.1016/j.agee.2004.01.015
6. Calder, I. R. (2007). Forests and water—Ensuring forest benefits outweigh water costs. *Forest Ecology and Management* 251(1-2), 110–120. doi:10.1016/j.foreco.2007.06.015
7. Doorenbos, J., Kassam, A. H., & Bentvelsen, C. I. M. (1979). *Yield response to water*. Roma.
8. Droubi, A., Al-Sibai, M., Abdallah, A., Wolfer, J., Huber, M., Hennings, V., ... Dechieh, M. (2008). *Development and application of a decision support system (DSS) for water resources management in Zabadani bassin, Syria and Berrechid Basin, Morocco*. Damascus.
9. Farley, K. a., Jobbagy, E. G., & Jackson, R. B. (2005). Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy. *Global Change Biology* 11(10), 1565–1576. doi:10.1111/j.1365-2486.2005.01011.x
10. Global Water Partnership. (2000). Integrated water resources management. (P. Hlavinec, T. Kukharchyk, J. Marsalek, & I. Mahrikova, Eds.) *Water Science and Technology* (62): 353–63. Stockholm: Author. doi:10.2166/wst.2010.262
11. Grupo Interinstitucional de Monitoreo de Bosques y Uso de la Tierra. (2014). *Mapa de bosques y uso de la tierra 2012, mapa de cambios en uso de la tierra 2001 - 2010 para estimación de emisiones de gases de efecto invernadero*. Guatemala: Autor.
12. Hijmans, R. J., Cameron, S. E., Parra, J. L., Jones, P. G., & Jarvis, A. (2005). Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology* 25(15), 1965–1978. doi:10.1002/joc.1276
13. Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar. (2005). *Situación del recurso hídrico en Guatemala*. Guatemala: Autor.
14. ----- (2012). *Perfil ambiental de Guatemala 2010-2012: Vulnerabilidad local y creciente construcción del riesgo*. Guatemala: Autor.
15. Instituto Nacional de Estadística. (2002). *Censos nacionales XI de población y VI de habitación*. Guatemala: Autor.
16. Instituto Nacional de Estadística y Ministerio de Agricultura, Ganadería y Alimentación. (2004). *IV Censo nacional agropecuario*. Guatemala: Autor.
17. Kaimovitz, D. (2001). Cuatro medio verdades: la relación bosques y agua en Centroamérica. *Revista Forestal Centroamericana* 33, 6–10.
18. Muller, M. (2010). Fit for purpose: taking integrated water resource management back to basics. *Irrigation and Drainage Systems* 24(3-4), 161–175. doi:10.1007/s10795-010-9105-7
19. Sáenz, G. M. (1995). *Hidrología en la ingeniería*. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería
20. Saxton, K. E., & Rawls, W. J. (2006). Soil water characteristic estimates by texture and organic matter for hydrologic solutions. *Soil Science Society of America Journal* 70(5), 1569–1578. doi:10.2136/sssaj2005.0117

21. Scurlock, J. M. O., Asner, G. P., & Gower, S. T. (2001). *Worldwide historical estimates of leaf area index, 1932 – 2000*. Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center.
22. Simmons, C., Tarano, J. & Pinto, J. (1959). Clasificación de reconocimiento de los suelos de la República de Guatemala. Guatemala: Servicio Cooperativo Interamericano de Agricultura e Instituto Agropecuario Nacional.
23. Snyder, R. L., Orang, M., Bali, K., & Echings, S. (2000). *Basic irrigation scheduling (BIS)*. Regents of the University of California.
24. United Nations Development Programme. (2006). *Human development report 2006. Beyond scarcity: Power, poverty and the global water crisis*. New York: Author. doi:10.1016/S1352-0237(02)00387-8.
25. Yates, D., Sieber, J., Purkey, D., & Huber-Lee, A. (2005). WEAP21A demand-, priority-, and preference-driven water planning model. Part 1: Model characteristics. *Water International*, 30(4), 487–500.

Serie

Textos para la educación y el cuidado de la vida

Esta serie de documentos, producida por el IARNA-URL, se inspira en el deseo de fomentar la curiosidad y el respeto por la naturaleza, sus componentes y sus interacciones con la sociedad. Se ha diseñado pensando en todas las personas que anhelan vivir bien y en paz, sobre todo para la población de jóvenes, quienes quizá, sin darse cuenta, se enfrentarán a un futuro más difícil en la medida que continúen nuestros inaceptables ritmos de agotamiento, degradación y contaminación ambiental.

Presentamos esta serie con las ideas del ex Rector de la Universidad Rafael Landívar, Rolando Alvarado, S.j.: "El camino del cuidado siempre es posible retomarlo. Habría que partir del reconocernos como fruto y parte de la naturaleza, conocer y aceptar su vida interna, su lógica, sus posibilidades y sus límites; aprovechar con racionalidad todo cuanto nos ofrece para acondicionar nuestra estancia en ella, e intervenir en sus entrañas y en su rostro de una forma cariñosa y responsable, y no con la voracidad de quien la explota o de la frialdad de quien solo pretende usarla".

Este documento ha sido publicado por el Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente de la Universidad Rafael Landívar (IARNA/URL).

El presente trabajo expone, con base científica, la realidad hidrológica de la República de Guatemala a nivel de subcuencas del país.

Con una visión de largo plazo, tan necesaria en la gestión de un bien tan estratégico para la vida, este trabajo pretende motivar el surgimiento de estrategias concretas, territorialmente diferenciadas para dar un salto cualitativo en la gestión del agua en el país y de la institucionalidad que debe hacer operativas tales estrategias.

