

**XXVIII CONGRESO LATINOAMERICANO DE HIDRÁULICA
BUENOS AIRES, ARGENTINA, SEPTIEMBRE DE 2018**

**EVALUACIÓN TEMPORAL DE LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN UNA
CUENCA HIDROLÓGICA USANDO EL MODELO DEL BALANCE DE
AGUA EN EL SUELO (SWB)**

Mauricio José Ríos¹, Fermín Pascual Ramírez², Rosalva Mendoza Ramírez³ y Rodolfo Silva Casarín³

¹Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) campus Morelia, Michoacán, México.

²Instituto de Investigaciones en Ecosistemas y Sustentabilidad, UNAM, Campus Morelia, Michoacán, México.

³Instituto de Ingeniería, UNAM. México.

E-mail: mjose@cieco.unam.mx; fpascualr@cieco.unam.mx; rmr@pumas.iingen.unam.mx; rsc@pumas.iingen.unam.mx

RESUMEN:

El presente trabajo se desarrolló mediante la aplicación del modelo Soil Water Balance en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán, México. Se utilizó información geoespacial y tabular para realizar la estimación de la recarga hídrica de los años 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015; posteriormente, se analizó la disponibilidad hídrica respecto a los volúmenes concesionados en el Registro Público de Derecho del Agua de los años 2000, 2003, 2009 y 2015. Se obtuvieron valores de recarga altos para los años 1992 y 2000; por otro lado, los valores bajos se presentaron para 2009 y 2015. En cuanto a la disponibilidad hídrica superficial y subterránea, la tendencia es decreciente en el período analizado, mientras que, los volúmenes comprometidos en las concesiones van en aumento. Se realizó el cálculo de la Disponibilidad relativa y el Índice de Disponibilidad de Aguas Subterráneas obteniendo cifras similares a las oficiales. Los resultados obtenidos mostraron que el modelo puede ser usado de manera confiable para estimar la disponibilidad hídrica a nivel de cuenca.

ABSTRACT:

This work shows the application of the Soil Water Balance model in the basin of Lake Zirahuén, Michoacán, México. Geospatial and tabular information was used to estimate the water recharge for 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 and 2015; subsequently, the water availability was analyzed with respect to the volumes committed in the Public Registry of Water Law for 2000, 2003, 2009 and 2015. High recharge values were found for the years 1992 and 2000, while there were low values for 2009 and 2015. Regarding the superficial and underground water availability of the period analyzed, a decreasing tendency is noted, while the water volumes committed in the concessions are seen to increase. The relative Availability and the Index of Groundwater Availability were calculated, obtaining figures similar to the official rates. The results obtained in this analysis show that the model is reliable in estimating water availability at basin level.

PALABRAS CLAVES: recarga hídrica; sistemas geoespaciales; modelo Soil Water Balance.

INTRODUCCIÓN

Conocer la Disponibilidad Hídrica (DH) de una región permite evaluar las condiciones del recurso y con ello la capacidad de cobertura a la población. En México la estimación de la disponibilidad media anual de aguas superficiales y subterráneas se realiza con fundamento en la Norma Oficial Mexicana (NOM) 011 establecida por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) (DOF, 2015). Para evaluar la disponibilidad media anual de agua en un acuífero subterráneo, a la recarga total anual se le resta la suma de la descarga natural comprometida y la extracción de aguas subterráneas. Los volúmenes anuales de extracción son los asignados y concesionados por la CONAGUA mediante el Registro Público de Derechos del Agua (REPDA) (DOF, 2015). En la Ley Federal de Derechos, se establecen los procedimientos para la estimación de las zonas de disponibilidad de aguas superficiales y subterráneas. En aguas superficiales, se determina mediante la Disponibilidad relativa (D_r) y en aguas subterráneas mediante el cálculo del Índice de disponibilidad de aguas subterráneas (I_{das}) (DOF, 2016).

El modelo del balance de agua en el suelo (SWB) (Westenbroek et al., 2010) permite calcular el balance hídrico considerando la distribución espacial de los insumos y la fisiografía del área de trabajo. Es alimentado con valores tabulares establecidos y con información de precipitación y temperatura; también utiliza información cartográfica sobre clasificación de uso del suelo, grupo hidrológico de suelo, dirección de flujo, y capacidad de almacenamiento de agua en el suelo. El modelo está diseñado para aprovechar las ventajas de los Sistemas de Información Geográfica (Westenbroek et al., 2010) y calcular el balance hídrico por cada unidad mínima de análisis (píxel) para después hacer la integración de resultados a nivel de la cuenca en diferentes resoluciones temporales. El objetivo del trabajo fue calcular la DH en una cuenca hidrológica localizada en la región centro sur de México y analizar su variabilidad temporal.

El material se encuentra organizado en 4 apartados, a saber: el primero describe el sitio de estudio, el segundo presenta la metodología usada, el tercero muestra los resultados obtenidos, y finalmente en el cuarto se dan las conclusiones que se hacen del trabajo.

SITIO DE ESTUDIO

La cuenca del lago de Zirahuén que se ubica entre los paralelos $19^{\circ}21'09''$ y $19^{\circ}29'50''$ de Latitud Norte, y los meridianos $101^{\circ}29'11''$ y $101^{\circ}46'21''$ de Longitud Oeste, en el estado de Michoacán de Ocampo (Figura 1); pertenece a la provincia fisiográfica Eje Neovolcánico y a la subprovincia Neovolcánica Tarasca (INEGI, 2001). Se ubica dentro de la Región Hidrológica 18 'Balsas'; la superficie oficial es 273.07 km^2 , es una cuenca de tipo endorreico, la corriente superficial principal es el río El Silencio (CONAGUA, 2009) que desemboca al lago de Zirahuén. En la mayor parte de la región prevalece el clima templado subhúmedo. El régimen de precipitación oscila entre los 1000 y 1200 mm anuales con temperaturas máximas de 18°C a 21°C y temperaturas mínimas entre 6°C y 9°C (INEGI, 2005a); en cuanto a la cobertura vegetal, predomina el bosque de pino-encino, el bosque mesófilo de montaña y el bosque de encino-pino. El uso de suelo principal es para la actividad agrícola de temporal anual. La litología consiste de rocas ígneas intrusivas del Cenozoico constituida por basaltos y, en menor medida, brechas volcánicas básicas, basalto-brecha volcánica básica, aluviones, dacita y toba básica (INEGI, 2005b); el territorio se encuentra ocupado por 47 localidades con 37137 habitantes.

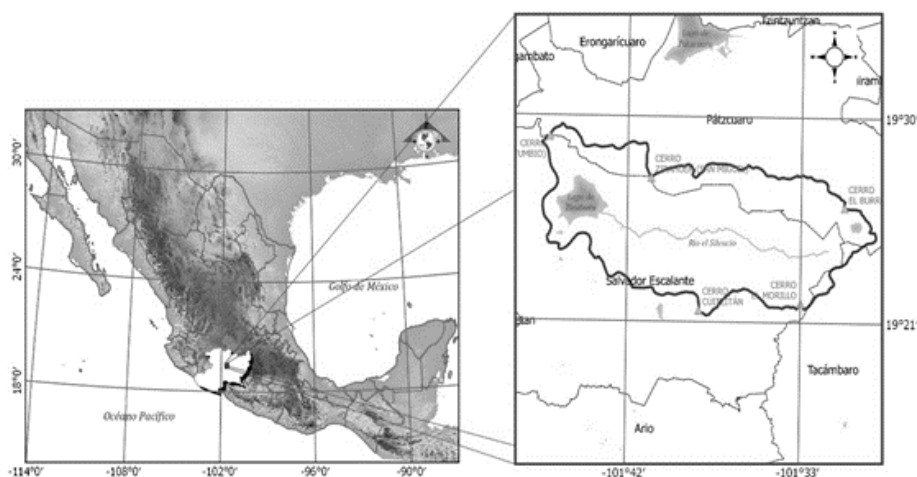


Figura 1.- Localización de la cuenca del lago de Zirahuén, Mich., México

(Fuente: José, 2017)

METODOLOGÍA

El modelo SWB requiere contar con información relativa a climatología (datos diarios de precipitación y temperatura (máxima y mínima)), topografía, edafología, morfología de la cuenca, uso de suelo y vegetación, e inventario de aprovechamiento de las fuentes superficiales y subterráneas del recurso agua.

Los datos se deben organizar en archivos de dos tipos, a saber: raster y tabulares. Al primer tipo corresponden las propiedades del suelo, tales como: cobertura, grupo hidrológico y capacidad de retención de humedad, y la dirección del flujo. En forma de tabla se dan los datos climáticos diarios y los aprovechamientos del recurso. El modelo incorpora dos archivos tabulares para consultar las propiedades de tipo, uso y capacidad de retención de agua en el suelo.

El análisis de la información disponible permitió definir las siguientes condiciones para hacer el modelo de la cuenca:

- a) Se eligió una malla bidimensional cuadrada con un tamaño de celda de 100 m x 100 m.
- b) La información climatológica y la de uso y cobertura del suelo permitió seleccionar los años de 1972, 1980, 1992, 2000, 2003, 2009 y 2015 para evaluar y analizar la variabilidad temporal de la RH.
- c) Se hicieron las conversiones de datos necesarias porque el modelo SWB trabaja con unidades inglesas
- d) El método para estimar la evapotranspiración potencial fue el de Hargreaves y Samani (1985).
- e) El cálculo de la recarga se realiza con la ecuación 1 (Hart et al., 2008), los componentes de la ecuación se utilizan de manera continua a lo largo del modelo dependiendo de la fase del proceso de cálculo en que se encuentre.

$$R = (P + D + I) - (Int + E + Etp) - \Delta Hs \quad (1)$$

Donde: R es la recarga; P la precipitación; D identifica al deshielo; I es el flujo de entrada; Int es la intercepción; E el escurrimiento; Etp la evapotranspiración potencial; ΔHs es la humedad del suelo.

- f) La humedad del suelo (ΔHs) es calculada mediante la aplicación de los métodos de balance suelo-agua publicados en Thornthwaite (1948) y Thornthwaite-Mather (1955, 1957).

- g) El flujo de entrada (I) se calcula a partir del archivo de direcciones de flujo derivado del modelo digital de elevación, para dirigir el flujo de salida (escorrentía superficial) a las celdas adyacentes.
- h) El parámetro de Intercepción (Int) está definido como la cantidad de lluvia específica que se encuentra atrapada, utilizada, evaporada o transpirada por las plantas. Los valores de precipitación diaria deben exceder la cantidad de intercepción especificada antes de que se asuma que cualquier agua alcanza la superficie del suelo.
- i) El escurrimiento (E) se calcula utilizando el método de número de curva de lluvia-escorrentía (SCS, 1985). Esta relación lluvia-escorrentía se basa en cuatro propiedades de la cuenca: tipo de suelo, uso de la tierra, topografía y antecedente de condición de escorrentía.

El modelo permite calcular, para cada año seleccionado, los principales componentes de la recarga (estimada como la diferencia entre la precipitación y los procesos de pérdida) por separado en cada unidad mínima de análisis, esto es a nivel de pixel o celda de la malla. Las fuentes y sumideros de agua para cada celda, son determinados con base en los datos climáticos de entrada y las características del terreno aportadas por el modelo digital de elevaciones.

La DH se calculó con base en los datos reportados por el REPDA, respecto a la totalidad de los volúmenes concesionados de aguas superficiales y subterráneas en la cuenca en los años 2000, 2003, 2009 y 2015. Para el caso del agua superficial, puesto que todos los componentes del balance se han considerado, la DH se estima a partir de la D_r , que se obtiene restando el volumen medio anual comprometido (a partir del REPDA) al volumen medio anual de escurrimiento (SWB). Para el caso del agua subterránea, se usa el I_{das} , recarga total anual (calculada con SWB) menos la suma de la descarga natural comprometida (DOF) y la extracción de aguas subterráneas (REPDA).

RESULTADOS

Recarga hídrica

Los resultados en las corridas de simulación con el modelo SWB, mostraron que los mayores volúmenes (área por lámina unitaria) se obtuvieron en las corridas de los años 1992 y 2000; los valores más bajos en las corridas de los años 2009 y 2015 (Figura 2). La Tabla 1 detalla los resultados de las variables más importantes del ciclo hidrológico integrados a nivel de la cuenca.

Tabla 1.- Valores de los principales componentes de la recarga hídrica

Año	Recarga (mm/año)	Intercepción (mm/año)	Escurrecimiento (mm/año)	Evapotranspiración Potencial (mm/año)
1972	178.816	26.924	484.124	1238.25
1980	156.464	27.178	596.9	1771.65
1992	415.798	32.512	935.228	1560.068
2000	206.756	31.242	681.736	1695.704
2003	107.696	44.45	519.684	1555.496
2009	53.086	43.18	465.582	1613.154
2015	45.212	41.402	487.426	1636.268
Promedio	166.26	35.27	595.81	1581.51

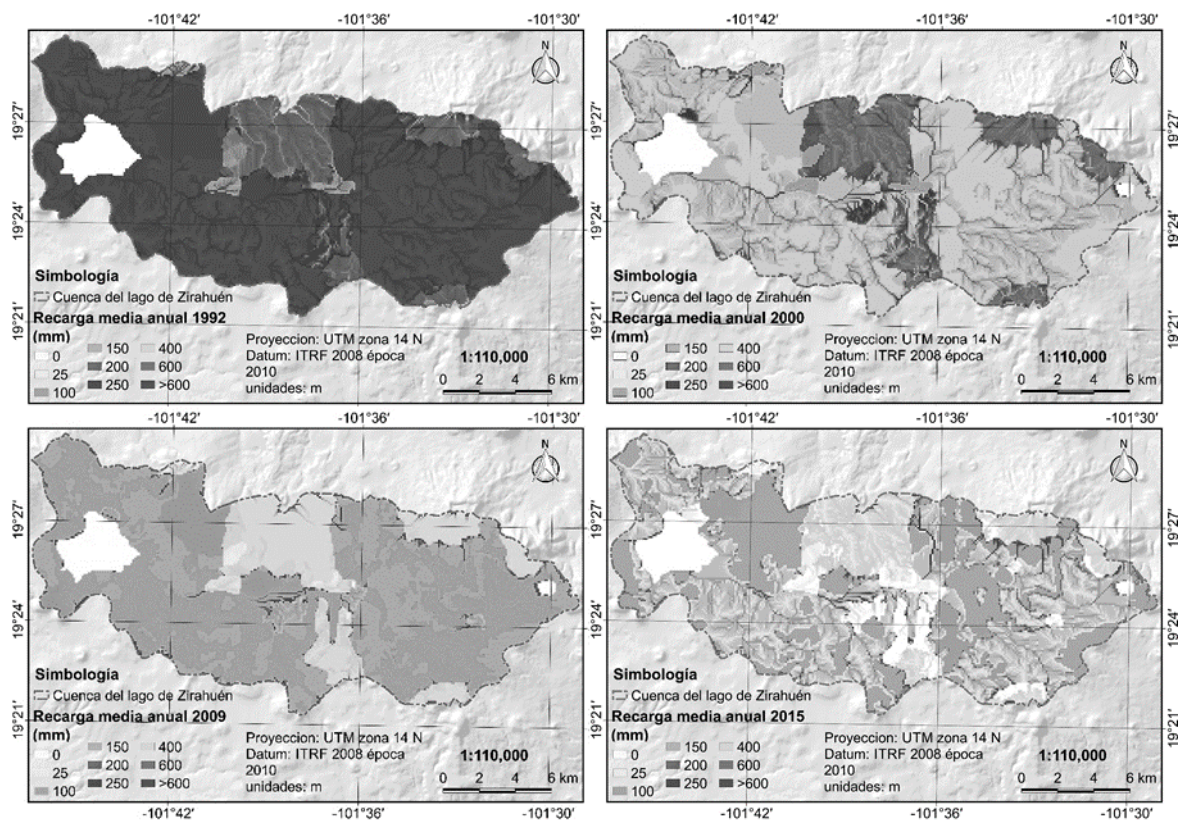


Figura 2.-Variación espacial y temporal de la recarga 1992, 2000, 2009 y 2015 (Fuente: José, 2017)

Disponibilidad hídrica

Los resultados obtenidos con la simulación fueron analizados de manera conjunta con los volúmenes de agua concesionados, de conformidad con la base de datos del REPDA, de manera legal en la cuenca para los años 2000, 2003, 2009 y 2015.

Se encontró que a lo largo del tiempo los volúmenes concesionados de aguas subterráneas y superficiales han aumentado, siendo la segunda la de mayor volumen comprometido. Para el agua subterránea, el uso agrícola presentó un aumento del 676% del año 2000 al 2015, indicando que se ha concesionado casi siete veces más. En lo referente a las aguas superficiales, el uso público urbano mostró un incremento del 320%, es decir, tres veces más el volumen de concesión.

La Tabla 2, detalla la relación que existe entre los volúmenes de recarga calculados por el modelo SWB y la demanda de agua. Esta comparación permite conocer los volúmenes de agua disponibles a futuro. La disponibilidad de agua subterránea ha sido calculada restando a la recarga los volúmenes comprometidos.

Tabla 2.- DH subterránea en $Mm^3/año$

Año	Recarga	Demanda de aguas subterráneas	Disponibilidad hídrica Subterránea
	$Mm^3/año$	$Mm^3/año$	$Mm^3/año$
2000	56.5204	0.0964	56.4241
2003	29.4406	0.1816	29.259
2009	14.512	0.1818	14.3302
2015	12.3595	0.7479	11.6116

De lo mostrado por la Tabla 2, se observa tendencia decreciente en el volumen de agua subterránea disponible en la cuenca. La disponibilidad está condicionada por dos procesos: en primer lugar, por el incremento en los volúmenes comprometidos; y, en segundo lugar, por la disminución en los volúmenes de recarga, propiciada por las variaciones climáticas y la eliminación de la cubierta de suelo.

Respecto al agua superficial, la disponibilidad se calculó de manera análoga al caso de la subterránea, considerando los volúmenes de agua comprometidos y los volúmenes de escurrimiento de agua obtenidos con el modelo SWB. Aunque la demanda superficial de agua es mínima comparada con los escurrimientos calculados, como ya se apuntaba, existe tendencia creciente en la demanda de agua. Por lo que toca a la disponibilidad, los volúmenes parecen mantener similitud en 2003, 2009 y 2015 (Tabla 3).

Tabla 3.- DH superficial en Mm³/año

Año	Escurrimiento	Demanda de aguas superficiales	Disponibilidad hídrica superficial
	Mm ³ /año	Mm ³ /año	Mm ³ /año
2000	186.3646	0.755	185.6096
2003	142.0648	2.1926	139.8723
2009	127.2751	2.4389	124.8362
2015	133.2465	3.1761	130.0704

De acuerdo a las estimaciones de la CONAGUA emitidas en el DOF (2017), el acuífero ‘Nueva Italia’, al que pertenece la cuenca, se encuentra clasificado en zona de disponibilidad 4 (suficiente volumen disponible) con valor de I_{das} en 0.82; con los resultados aquí obtenidos, se calculó el I_{das} y resultó en 0.99. En cuanto a la D_r , se reporta el valor de 0.9489, clasificada en zona de disponibilidad 1 (zona de escasez), la simulación con SWB permitió calcular la D_r en 0.9215. Los cálculos obtenidos del I_{das} (0.99) y de la D_r (0.9215) a partir de datos obtenidos en el presente trabajo, ubican a la cuenca y al acuífero en el mismo rango de clasificación de zonas de disponibilidad que las oficiales.

CONCLUSIONES

La aplicación del modelo SWB, aporta un método alternativo confiable para la evaluación del recurso hídrico en cuencas hidrográficas, ya que considera la dinámica del uso del territorio y la dinámica de la cubierta vegetal como factores esenciales en la estimación de la disponibilidad hídrica. En consecuencia, se propone como una herramienta útil en la planeación, ordenamiento y gestión integrada de cuencas.

Mediante el análisis de series de tiempo, se encontró que la recarga hídrica es altamente influenciada por los regímenes de precipitación en el área; sin embargo, pudo observarse el decremento paulatino desde 1972 hasta el 2015.

En el periodo de análisis se encontró que los usos más demandantes de agua dentro de la cuenca son el uso público urbano y el agrícola. El crecimiento de la población, así como la expansión de la mancha urbana, incrementa la necesidad de mayores volúmenes de agua para satisfacer las actividades cotidianas y las económicas de la región.

REFERENCIAS

CONAGUA. (2009). *Programa Hídrico Visión 2030 del Estado de Michoacán de Ocampo*. (S. del M. A. y R. Naturales, Ed.) (Primera ed.). México, D.F. Recuperado a partir de www.conagua.gob.mx

- DOF.** (2015). “Conservación del recurso agua-Que establece las especificaciones y el método para determinar la disponibilidad media anual de las aguas nacionales”, Pub. L. No. NOM-011-CONAGUA-2015, Diario Oficial de la Federación 1. México, D.F.
- DOF.** (2016). *Ley Federal de Derechos*, Pub. L. No. Última reforma publicada en el DOF el 7 de diciembre de 2016, Diario Oficial de la Federación 1. México, D.F.
- DOF.** (2017). “Acuerdo por el que se dan a conocer las zonas de disponibilidad que corresponden a las cuencas y acuíferos del país para el ejercicio fiscal 2017, en términos del último párrafo del artículo 231 de la Ley Federal de Derechos vigente”, Pub. L. No. ACUERDO, 96. México, D.F.
- Hart, D. J., Schoephoester, P. R., y Bradbury, K. R.** (2008). Groundwater recharge in Southeastern Wisconsin estimated by a GIS-based model. Wisconsin.
- Hargreaves, G. H. y Samani, Z. A.** (1985). “Reference Crop Evapotranspiration from ambient air temperature”. *American Society of Agriculture Engineering*. Chicago, IL. USA.
- INEGI.** (2001). Conjunto de datos vectoriales fisiográficos. escala 1:1,000,000. Serie I. Aguascalientes, Ags.
- INEGI.** (2005a). Guía para la interpretación de cartografía climatológica. Aguascalientes, Ags. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415323.004>
- INEGI.** (2005b). Guía para la interpretación de cartografía geológica. Aguascalientes, Ags.
- José, R. M.,** (2017). *Evaluación de la disponibilidad hídrica en la cuenca del lago de Zirahuén, Michoacán*. Tesis de Maestría. Facultad de Ingeniería. Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez. Chiapas.
- Soil Conservation Service.** (1985). Section-4. En *National Engineering Handbook*. Washington, DC.
- Thornthwaite, C. W.** (1948). “An Approach toward a Rational Classification of Climate”. *Geographical Review*, Vol. 38, No. 1. pp. 55-94.
- Thornthwaite, C.W. y Mather, J. R.** (1955). *The Water Balance*. Laboratory of Climatology, Centerton, NJ, USA.
- Thornthwaite, C. W. y Mather, J. R.** (1957). “Instructions and Tables for Computing Potential Evapotranspiration and Water Balance”. *Publ. Climatol*, 10 (3), 185–311.
- Westenbroek, M. S., Kelson, V. A., Dripps, W. R., Hunt, R. J. y Bradbury, K. R.** (2010). SWB: A Modified Thornthwaite-Mather Soil Water Balance Code for Estimating Groundwater Recharge. U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A31, 60. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>