



Estimación del balance hídrico mediante variables climáticas, en la cuenca del río Cazones, Veracruz, México

doi: 10.4136/ambi-agua.1147

Received: 19 Jun 2013; Accepted: 25 Nov 2013

**Eduardo Santillán Gutiérrez; Gustavo Davila-Vazquez; José de Anda Sánchez*;
José de Jesús Díaz Torres**

Centro de Investigación y Asistencia en Tecnología y Diseño del Estado de Jalisco, A.C., México

*Autor correspondiente: e-mail: janda@ciatej.mx,

eddy_sancol@yahoo.com.mx, gdv@ciatej.mx, jdiaz@ciatej.mx

RESUMEN

El comportamiento hidrológico y la capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica, dependen de la variación temporal y espacial de los patrones de las variables climáticas, y de las características fisiográficas de la cuenca. Considerando que en ciertas regiones la disponibilidad del agua depende de la capacidad de captación de la cuenca, la utilización de métodos eficaces como los balances hídricos se ha hecho más recurrente, ya que permiten estimar y determinar el comportamiento hidrológico, su capacidad de captación y los flujos de agua, así como los procesos hidrológicos y los periodos en los cuales se presentan. En el presente trabajo, se llevo a cabo la estimación del Balance Hídrico Climático (BHC), y se estimó la evapotranspiración potencial en la cuenca del río Cazones. Los cálculos se realizaron utilizando el método de Thornthwaite y Mather, utilizando información de variables climáticas de temperatura y precipitación para el periodo comprendido entre los años 1981-2010. Como resultado de estas estimaciones, se encontró que las láminas de exceso de agua y de escurrimiento anual fueron de 638.63 y 637.02 mm respectivamente, generándose la mayor cantidad de escurrimiento en los meses de mayor precipitación. Además, los meses que corresponden al periodo húmedo y seco fueron identificados, al igual el régimen de las variables climáticas, y la presencia de excesos y déficits de agua en la cuenca durante un ciclo anual.

Palabras clave: escurrimiento superficial, excedente de agua, cuenca.

Avaliação do balanço hídrico por meio de variáveis climáticas na bacia do rio Cazones, Veracruz, México

RESUMO

O comportamento hidrológico e a capacidade de absorção de água de uma bacia hidrográfica dependem dos padrões de variação temporal e espacial de variáveis climáticas e das características fisiográficas da bacia. Considerando que em algumas regiões a disponibilidade de água depende da capacidade de absorção da bacia, a utilização de métodos eficazes como o balanço hídrico tornou-se de uso frequente porque ele permite estimar e determinar o comportamento hidrológico, a capacidade de captar e escoar água, assim como os processos hidrológicos e os períodos em que eles ocorrem. Neste trabalho, o Balanço Hídrico Climático (BHC) e a evapotranspiração potencial foram estimados para a bacia

hidrográfica do rio Cazonos. Os cálculos foram baseados no método de Thornthwaite e Mather, usando como informações as variáveis climáticas temperatura e precipitação do período de 1981 a 2010. Como resultado dessas estimativas, verificou-se que o excesso de água e de escoamento anual foi de 638,63 e 637,02 milímetros, respectivamente, gerando a maior quantidade de escoamento nos meses de maior precipitação. Além disso, os meses correspondentes ao período úmido e seco, o regime das variáveis climáticas e a ocorrência de excessos e escassez de água na bacia durante um ciclo anual foram identificados.

Palavras-chave: escoamento, o excesso de agua, bacia.

Assessment of hydric balance through climatic variables, in the Cazonos River Basin, Veracruz, Mexico

ABSTRACT

The hydrologic regime and the water catchment capacity of a hydrographic basin depend on the temporal and spatial variation patterns of climatic variables and on the physiographic characteristics of the watershed. In certain regions, where the availability of water depends on the catchment capacity of the watershed, the utilization of effective methods such as the hydric balance has become more frequently used because it enables an estimate of the hydrologic regime, the catchment capacity, and the water flows. It also enables an estimate of the hydrologic processes and the period in which they occurred. In the present work, assessments of the Climatic Hydric Balance (CHB) and of potential evapotranspiration were performed in the Cazonos river basin. The calculations followed the Thornthwaite and Mather method based on climatic variables such as temperature and precipitation during the period from 1981 to 2010. As a result of these assessments, it was found that the excess layer of water and the annual runoff were 638.63 mm and 637.02 mm, respectively. Further, the work identified the months that comprise the humid and dry periods, the regime of the climatic variables, and surpluses and deficits of water in the basin during an annual cycle.

Keywords: runoff, excess water, watershed.

1. INTRODUCCIÓN

Las funciones de los ecosistemas al que pertenecen, el comportamiento hidrológico y su capacidad de captación de agua de una cuenca hidrológica, dependen de la variación temporal y espacial de los patrones de las variables climáticas y de las características fisiográficas de la cuenca (Thattai et al., 2003). Debido a que en ciertas regiones, la disponibilidad del agua depende de la capacidad de captación de agua de la cuenca, se ha hecho más recurrente utilizar métodos eficaces como los balances hídricos, ya que permiten estimar y determinar el comportamiento hidrológico, su capacidad de captación y los flujos de agua, así como los procesos hidrológicos y los periodos en los cuales se presentan. Si bien, todos los balances hídricos parten del principio de conservación de la materia, existen diversos métodos y formas de estimarse, los cuales pueden ser mediante métodos estocásticos o estadísticos, funciones determinísticas, métodos numéricos y teóricos, así como aproximaciones semi-empíricas. En el caso del balance hídrico propuesto por Thornthwaite y Mather (1957), se basa en un método empírico al cual denominó Método Directo. A este tipo de balance se le suele conocer o llamar Balances Hídricos Climáticos (*BHC*), por el hecho de basarse en variables climatológicas para su estimación.

Este tipo de balance utiliza la capacidad de almacenamiento de agua del suelo o también conocido como capacidad de campo, como una referencia de la reserva de agua que puede retener en un cierto tipo de suelo y con una cierta cubierta vegetal. Además, el *BHC* utiliza

como datos de entrada valores de precipitación y temperatura de un cierto periodo de años (por lo menos 30 años) (Kar y Verma, 2005; Ruiz et al., 2012).

En diversos trabajos se ha utilizado los *BHC*, donde en la mayoría de los casos ha sido utilizado como un medio para examinar los principales componentes del ciclo hidrológico (precipitación, evapotranspiración y escurrimiento), y la forma en que estos alimentan y controlan el comportamiento de los caudales de la red de drenaje (Dingman, 2002; McCabe y Markstrom, 2007). En base a lo anterior, en el presente trabajo se plantea estimar el balance hídrico climático (*BHC*) para la cuenca del río Cazonos del Estado de Veracruz, México, utilizando el método directo de Thornthwaite y Mather, con el objetivo de definir los periodos húmedos y secos, así como estimar los excesos de agua, y la parte de escurrimientos que drenan hacia los ríos y arroyos.

1.1. Área de estudio

La cuenca del río Cazonos se localiza entre las coordenadas $20^{\circ} 18'$ y $21^{\circ} 15'$ Latitud Norte, y $97^{\circ} 17'$ y $98^{\circ} 32'$ Longitud Oeste, en la Región Hidrológica No. 27 denominada Norte de Veracruz Tuxpan-Nautla. Esta cuenca tiene un área aproximada de $2,688 \text{ km}^2$, la cual se distribuye entre los estados de Puebla, Hidalgo y Veracruz, México. El clima es de tipo cálido-húmedo, con una temperatura media anual de 23.6°C y con precipitaciones todo el año, teniendo una precipitación media anual de $1,494 \text{ mm}$. En la cuenca así como la zona donde se encuentra localizada, es constantemente afectada por fenómenos meteorológicos extremos como ciclones tropicales, los cuales suelen generar grandes cantidades de lluvia que al escurrir sobre suelos saturados producen inundaciones en las partes bajas de la cuenca (Figura 1) (INEGI, 2005; Pereyra y Pérez, 2006).

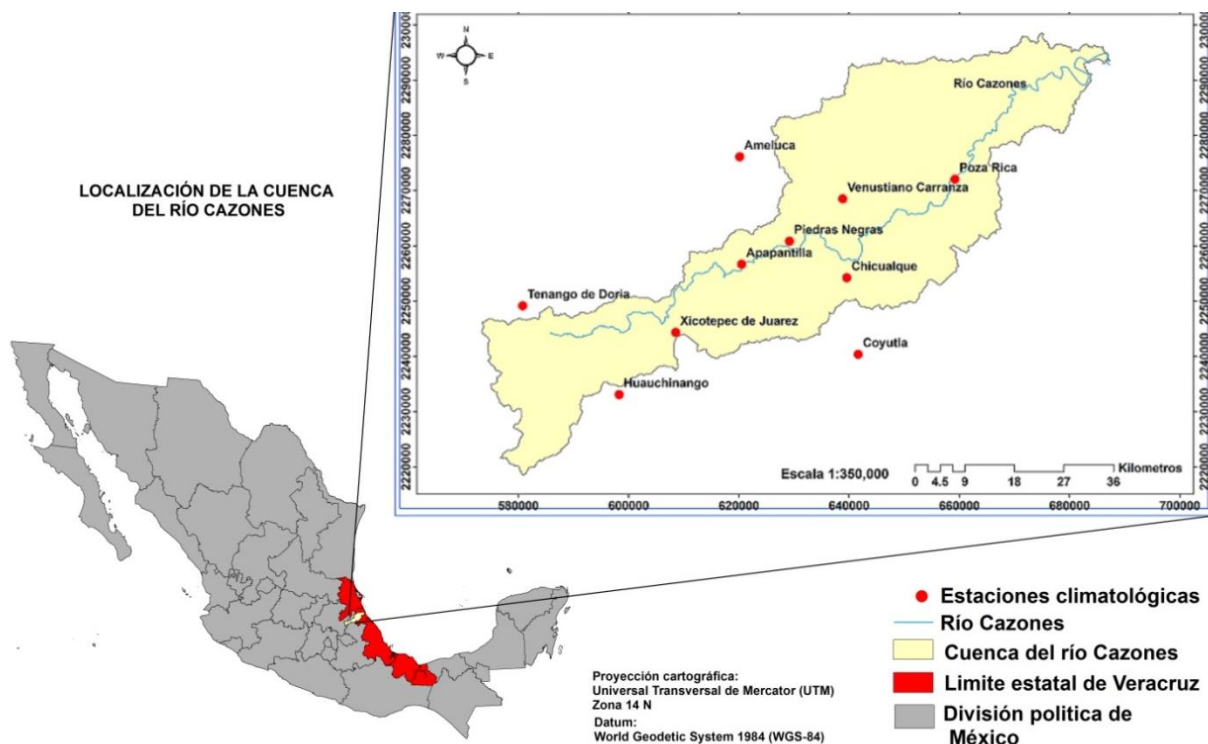


Figura 1. Ubicación de la cuenca del río Cazonos.

El sistema hidrológico tiene como principal afluente el río Cazonos. Este río nace a partir de las corrientes de los ríos Tulancingo y Chaltecontla que bajan de la Sierra de Hidalgo y desemboca en el Golfo de México a través de la llamada Barra Cazonos (Pereyra y Pérez, 2006).

El tipo de vegetación predominante, corresponde en su mayoría a agricultura temporal, pastizal inducido, selva alta perennifolia con vegetación secundaria, y en la parte noroeste y oeste, se puede encontrar bosque de pino, bosque de pino-encino, bosque oyamel y bosque mesófilo de montaña (INEGI, 2005).

En cuanto a la edafología, los tipos de suelo predominantes son de tipo Regosol, Vertisol, Feozem, Luvisol, Acrisol y Cambisol (INEGI, 2005). En estos tipos de suelos, las texturas que predominan son de tipo arcillosa, franco arcillosa, franco arenosa y arenosa. Donde el Cambisol, Acrisol y Luvisol su textura es de tipo arcilloso y franco arcilloso (suelos de mayor potencial de escurrimiento); y el Regosol, Vertisol y Feozem de tipo franco arenosa y arenosa (bajo potencial de escurrimiento) (CONABIO, 2011).

La geología está definida por 3 tipos de roca: sedimentaria, ígnea extrusiva e ígnea intrusiva, de las cuales la de mayor predominancia es la sedimentaria. La topografía en general es suave hacia la parte noreste, sin embargo hacia la parte suroeste las pendientes son más pronunciadas, con una altitud máxima de 2,800 msnm (INEGI, 2005).

2. MATERIAL Y METODOS

2.1. Obtención de datos de variables climáticas

Para realizar el *BHC* y el cálculo de la evapotranspiración potencial en la cuenca del río Cazonas, se seleccionaron 10 estaciones climatológicas en operación reportadas en el Servicio Meteorológico Nacional (*SMN*), donde se obtuvieron datos normales mensuales de precipitación y temperatura de un periodo de 1981-2010, los cuales fueron promediados para cada mes con el fin de obtener un valor representativo de cada una de las estaciones climatológicas en el área de estudio (Figura 1). La selección de las estaciones se hizo siguiendo lo propuesto por la Organización Meteorológica Mundial, en lo que se refiere a que los registros de cada estación deben ser de por lo menos de 30 años para el cálculo del Balance Hídrico Climático (*BHC*), y que la distribución de las estaciones sea uniforme dentro del área de estudio (WMO, 1994).

2.2. Determinación de la evapotranspiración potencial (*ETP*)

Para el cálculo de la evapotranspiración potencial, se definió el método de Thornthwaite y Mather (1957), el cual está basado en la determinación de la evapotranspiración en función de la temperatura y de la latitud de la zona de estudio y del mes (obtención de número de horas-sol por día). El método supone una región húmeda con vegetación verde, donde nunca falta aporte de agua (Aparicio, 2008). Lo anterior aplica para la cuenca del río Cazonas, pues existe una cobertura vegetal verde y presenta precipitación durante todo el año, presentándose en los meses de estiaje precipitaciones mayores a 45 mm y en meses lluviosos mayores a 200 mm (Figura 4).

Los valores de temperatura mensual se usaron para estimar la evapotranspiración potencial (*ETP*) mediante las Ecuaciones 1, 2, 3, y 4:

$$i = \left(\frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad (1)$$

$$I = \sum i \quad (2)$$

$$ETP \text{ sin corrección} = 16 \left(10 * \frac{t}{I} \right)^a \quad (3)$$

$$a = 6.75 \times 10^{-7} \times I^3 - 7.71 \times 10^{-5} \times I^2 + 1.792 \times 10^{-2} \times I + 0.49239$$

$$ETP = ETP \text{ sin corr.} \left(\frac{N}{12} * \frac{d}{30} \right) \quad (4)$$

donde:

i es el índice de calor mensual,

t es la temperatura media mensual,

I es el índice de calor anual,

a es un factor en función del índice de calor anual,

ETP sin corrección es la evapotranspiración potencial sin ajuste,

N es el número máximo de horas de sol dependiendo de la latitud y del mes,

d el número de días del mes, y por ultimo

ETP es la evapotranspiración potencial final.

2 3. Balance hídrico climático (BHC)

Para la estimación del *BHC* mensual, se consideró la precipitación como única entrada de agua y la evapotranspiración potencial como la salida de agua de esta en la cuenca, definiendo una capacidad de campo de 200 mm. Los datos de las variables climáticas fueron promediados para cada mes con el fin de obtener un valor representativo de cada una de las estaciones climatológicas en el área de estudio. El valor de capacidad de campo fue calculado en base a la homologación entre de los valores de la capacidad de retención del agua y los de profundidad radicular (según la textura del suelo y el tipo de vegetación) aportados por las tablas de balance de Dunne y Leopold (1978), y por los tipos y texturas del suelo, y el tipo de vegetación que se encuentran en la cuenca del río Cazonos (Tabla 1). La capacidad de campo se obtuvo aplicando la Ecuaciones 5:

$$CC = CR * PR \quad (5)$$

donde:

CC es la capacidad de campo,

CR es la capacidad de retención y

PR es la profundidad radicular de cierto tipo de vegetación.

Tabla 1. Homologación del tipo de textura de suelo y vegetación predominante en la cuenca del río Cazonas.

Textura del suelo	Tipo de vegetación en la cuenca del río Cazonas	*Tipo de vegetación manejada en tabla de balance Dunne y Leopold	Capacidad de retención (mm)	*Profundidad radicular de la vegetación (m)
Arenosa	Pastizal inducido y agricultura	Cultivo de raíces someras	100	0,50
Franco arenosa	Pastizal inducido y selva alta perennifolia	Cultivo raíces profundas	150	1,00
Franco arcillosa	Bosque mesófilo de montaña y pastizal inducido	Árboles frutales (arbolado y dehesa)	250	1,00
Arcillosa	Bosque pino-encino, bosque pino y bosque encino	Bosque cerrado	300	1,17

*Fuente: Dunne y Leopold (1978).

También para efectos del cálculo, se suele suponer que después del periodo seco la reserva de agua es nula, por consiguiente en base a las desigualdades $P-ETP < 0$ y $P-ETP > 0$, y a los resultados de la diferencia entre los parámetros de precipitación y evapotranspiración potencial, se identifican en la primera desigualdad los meses secos, y en la segunda los meses húmedos. En base a lo anterior, se podría definir que el mes de mayo tiene una reserva nula, para así iniciar con los cálculos en el mes de junio (inicio de los meses húmedos). Sin embargo, debido a que las condiciones de la cuenca del río Cazonas (capacidad de campo de 200 mm, y precipitación a lo largo de todo el año) permiten que se retenga agua en el suelo durante los meses secos, se tuvo que recalcular las reservas mes con mes, agregando la reserva existente del final del periodo seco a la reserva del inicio del periodo húmedo, dejando de lado el supuesto de asignar una reserva nula después del periodo seco. Definida la entrada y la salida de agua en la cuenca, y los supuestos, se determinan los diferentes parámetros para cada mes (i) (en mm), en base a las siguientes restricciones y operaciones (Tabla 2):

Tabla 2. Operaciones y restricciones para el cálculo de los diferentes parámetros del balance hídrico climático.

Parámetro	Operaciones	Restricciones
P : precipitación media mensual	P	-
ETP : evapotranspiración potencial mensual	ETP	-
$P-ETP$: diferencia entre P y ETP	$P-ETP$	-
R : reserva del suelo	$R_{i-1} + (P_i - ET_i)$ $R_i = R_{máx}$ 0	$Si 0 < R_{i-1} + (P_i - ET_i) < R_{máx}$ $Si R_{i-1} + (P_i - ET_i) > R_{máx}$ $Si 0 > R_{i-1} + (P_i - ET_i)$
VR : Variación de la reserva	$VR_i = R_i - R_{i-1}$	-
ETR : evapotranspiración real	$ETR_i = ET_i$ $ETR_i = P_i + VR_i $	<i>Solo en periodos húmedos</i> <i>En periodos secos</i>
DEF : déficit de agua	$D_i = ET_i - ETR_i$	-
EX : exceso de agua	$EX_i = [P_i - ET_i - VR_i]$ $EX_i = 0$	$Si (P_i - ET_i) > 0$ $Si (P_i - ET_i) \leq 0$
D : drenaje	$D = 0.5[D_{i-1} + EX_i]$	-

Nota: i se refiere al mes en curso, e $i-1$ al mes anterior.

Por último, para la comprobación del cálculo correcto del *BHC*, se debe cumplir para los valores anuales la siguiente relación (Ecuación 6):

$$ETP + EX = P + DEF \quad (6)$$

donde:

ETP es la evapotranspiración potencial anual,

EX es el exceso de agua anual,

P es la precipitación anual y

DEF es el déficit de agua anual.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados del *BHC* en la cuenca del río Cazonos indican que se tienen dos periodos a lo largo del año, un periodo seco y otro húmedo. El periodo seco (estiaje) que abarca desde el mes de febrero hasta el mes de mayo, y el periodo húmedo que abarca del mes de junio hasta el mes de febrero. Durante el periodo seco, no se presenta un déficit de agua en la cuenca, mientras que en el periodo húmedo se presenta un exceso de agua, coincidiendo la mayor cantidad de esta con los meses lluviosos, es decir, entre los meses de junio a diciembre. El comportamiento de los excesos de agua a lo largo del año encontrados en la cuenca del río Cazonos, son muy similares a los resultados obtenidos por Ruíz et al. (2012), en una zona tropical como lo es el estado de Tabasco, México, donde las condiciones son similares con las de la cuenca Cazonos. En ambos lugares el suelo presenta un cierto grado de exceso de agua cuando la precipitación es principalmente alta y la evapotranspiración baja. Lo anterior confirma que existe un aumento de los excesos de agua conforme aumenta la precipitación en la zona (Figura 2).

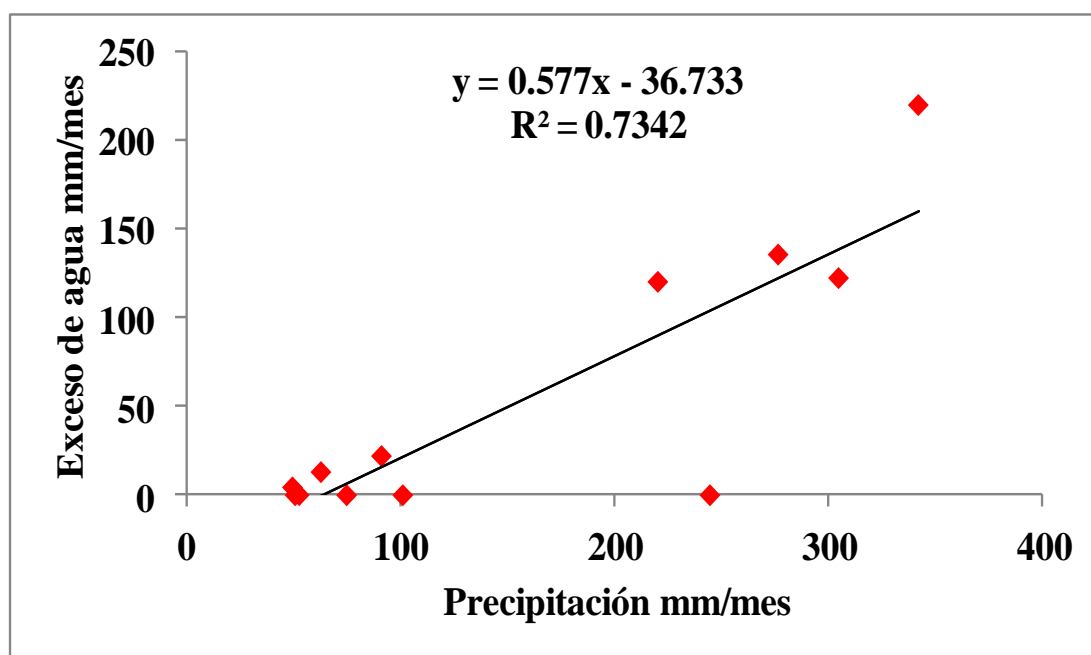


Figura 2. Correlación exceso de agua y precipitación.

La duración de los periodos de déficits o excesos hídricos en una cuenca, dependen de la configuración local y regional de los factores climáticos y fisiográficos que hacen variar la evapotranspiración y la precipitación. Es por ello que dentro de una cuenca podrían darse periodos de déficit y/o exceso de agua en diferentes regiones con diferentes tiempos de duración (Doria y Madramootoo, 2012; Zhiqiang et al., 2009; Ruiz et al., 2011). Lo anterior, se puede observar en el efecto que tiene la temperatura (factor climático) sobre la evapotranspiración durante el periodo seco y húmedo en la cuenca del río Cazonos. Donde durante en el periodo seco con el aumento de la temperatura la evapotranspiración aumenta, resultando en mayores pérdidas de agua del suelo, mientras que en el periodo húmedo, conforme la temperatura disminuye la evapotranspiración sigue el mismo comportamiento, disminuyendo la salida de agua en la cuenca (Figura 3).

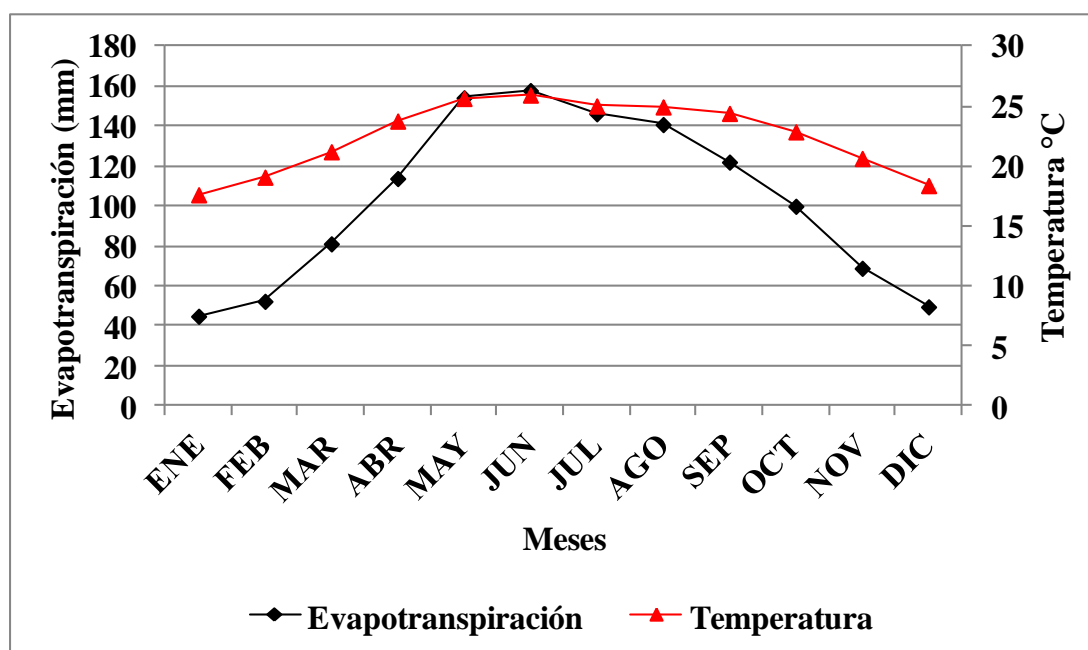


Figura 3. Evapotranspiración potencial y temperatura.

En el caso de la alteración de la precipitación, la temperatura, y por ende la evapotranspiración, también podrían estar relacionadas con la estacionalidad. Pues como lo menciona Thattai et al. (2003), la mayor variación en las variables climáticas de una región es debida a la estacionalidad. Sin embargo, lo anterior aplica principalmente a regiones templadas donde la estacionalidad es muy definida, y no a zonas subtropicales o tropicales como en la que se encuentra la cuenca del río Cazonos. Pues si bien se observa una variación considerable en la precipitación comparando las estaciones invierno y primavera con las de verano y otoño, en el caso de la temperatura es poco significativa entre estas. Durante la estación de primavera (periodo seco) se observa la mayor variación de las variables climáticas, teniendo menor precipitación y temperaturas mayores, propiciando el aumento de los fenómenos de la evapotranspiración, transpiración y la evaporación. Mientras que en las estaciones de verano y otoño, se observa un aumento significativo en la precipitación, mientras que la temperatura disminuye paulatinamente, ocasionando un mismo efecto en la evapotranspiración (Figura 4).

Por otro lado, Doria y Madramootoo (2012), Zhiqiang et al. (2009) y Ruiz et al. (2011) mencionan que la evapotranspiración y la precipitación son fenómenos físicos climáticos independientes, es decir, su presencia a lo largo de un año difícilmente coinciden en tiempo y espacio en la misma intensidad (cantidad). En el caso de la cuenca del río Cazonos, se puede

observar que efectivamente la evapotranspiración y la precipitación no suelen coincidir en una misma intensidad en ciertos periodos de tiempo, y esto se refleja principalmente en las estaciones de primavera, verano y otoño, pues cuando hay alta precipitación suele haber valores bajos de evapotranspiración y viceversa (Figura 4).

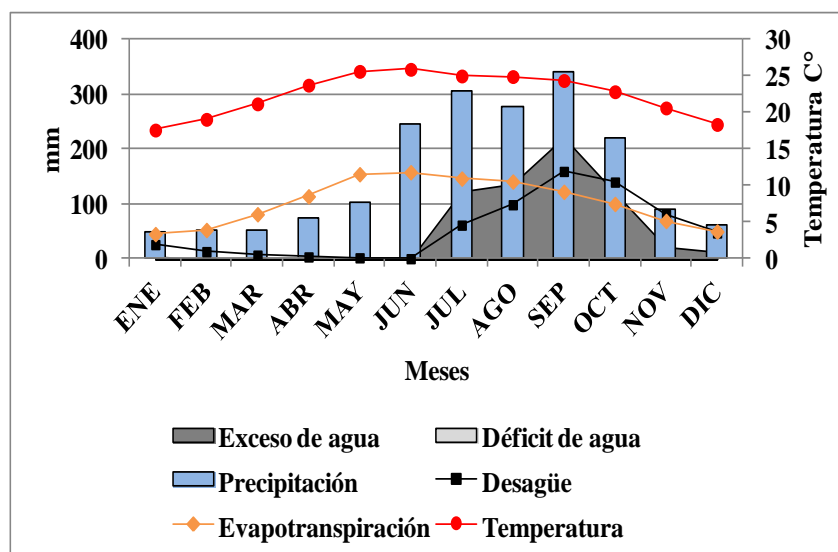


Figura 4. Precipitación, exceso de agua, temperatura, evapotranspiración y escurrimiento.

En cuanto al hecho que no exista un déficit de agua durante el periodo seco, es debido a que la evapotranspiración generada en la cuenca si bien no es cubierta por el agua que cae de la precipitación, alcanza a cubrir sus necesidades por la cantidad de agua que se tiene en las reservas del suelo durante los meses de febrero a mayo, los cuales no llegan a ser menores a 50 mm (Tabla 3). La cantidad de exceso de agua acumulado a lo largo del año es de 638.63 mm, valor que se encuentra dentro de los rangos de exceso de agua identificados en una zona tropical, como lo menciona Ruiz et al. (2012) en su estudio en el estado de Tabasco, México. Esta cantidad indica el exceso de humedad en el suelo presente en la cuenca del río Cazones, el cual se va generando mes a mes una cantidad de agua que el suelo va almacenando y reteniendo, hasta exceder la reserva máxima o capacidad de campo para generar el escurrimiento superficial. Sin embargo tal como lo menciona Yokoo et al., (2006) el excedente de agua y la cantidad de escurrimiento dependen de la combinación del tipo de suelo y la pendiente topográfica, así como de la estacionalidad de la precipitación y la evapotranspiración potencial. La afectación de la estacionalidad de estas variables se refleja en los meses (verano y otoño) donde se observa mayor exceso de agua (*EX*) y generación de escurrimiento (*D*) (Tabla 3).

Los resultados de la lámina de escurrimiento superficial mensual en la cuenca del río Cazones se determinaron en base a los excesos de agua mensuales que arrojó el *BHC*. El parámetro que determina la lámina de escurrimiento superficial es el drenaje o desagüe (*D*). Esta estimación se realizó considerando que el 50% del excedente de agua mensual escurre en el mismo mes, y el 50% restante se reparte progresivamente en los meses siguientes. En la cuenca se tiene escurrimiento en gran parte del año, sin embargo la lámina de escurrimiento entre los meses de febrero a junio es mínima, siendo la de menor cantidad en el mes de mayo de 1.61 mm, o bien un volumen de $.004 \text{ Mm}^3$. La baja generación de escurrimiento durante estos meses es debido a cambios en la precipitación (escasa lluvia o entrada de agua), y los de la temperatura y la evapotranspiración (aumento en los valores) que provocan una disminución de la humedad del suelo (Figura 4).

Tabla 3. Estimación del balance hídrico climático de la cuenca del río Cazonos.

Parámetros	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<i>T</i>	17.62	19.09	21.21	23.77	25.66	25.94	25.03	24.95	24.41	22.87	20.65	18.39	
<i>P</i>	49.32	52.46	50.58	74.70	100.98	244.76	304.97	276.69	342.30	220.38	91.00	62.66	1870.80
<i>ETP</i>	44.91	52.39	81.16	113.85	154.26	157.88	146.29	140.87	122.08	99.96	68.92	49.61	1232.17
<i>P-ET</i>	4.41	0.07	-30.58	-39.15	-53.28	86.88	158.69	135.83	220.22	120.42	22.08	13.05	
<i>R</i>	200.00	200.00	169.42	130.26	76.99	163.87	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	200.00	
<i>VR</i>	0.00	0.00	-30.58	-39.15	-53.28	86.88	36.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	
<i>ETR</i>	44.91	52.39	81.16	113.85	154.26	157.88	146.29	140.87	122.08	99.96	68.92	49.61	1232.18
<i>DEF</i>	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
<i>EX</i>	4.41	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	122.55	135.83	220.22	120.42	22.08	13.05	638.63
<i>D</i>	25.71	12.89	6.45	3.22	1.61	0.00	61.28	98.55	159.38	139.90	80.99	47.02	637.02

Nota: *T* = temperatura; *P* = precipitación; *ETP* = evapotranspiración potencial; *P-ET* = diferencia entre *P* y *ET*; *R* = reserva; *VR* = variación de la reserva; *ETR* = evapotranspiración real; *DEF* = déficit de agua; *EX* = exceso de agua; *D* = drenaje (escurrimiento).

La baja generación de escurrimiento durante estos meses es debido a cambios en la precipitación (escasa lluvia o entrada de agua), y los de la temperatura y la evapotranspiración (aumento en los valores) que provocan una disminución de la humedad del suelo (Figura 4). Lo anterior tiene relación con lo mencionado por Xu et al. (2012), donde menciona que el escurrimiento está relacionado con los cambios de la precipitación, temperatura y evapotranspiración, que impactan principalmente la humedad del suelo para la generación de escurrimiento. Las mayores láminas de escurrimiento se generan entre los meses de julio a noviembre, siendo el mes de septiembre donde se genera la mayor cantidad de 159.38 mm, es decir, un volumen de agua de .428 Mm³. También cabe señalar que el exceso de agua y la generación del escurrimiento en la cuenca es afectado por los cambios en la cubierta vegetal y por fenómenos meteorológicos extremos como huracanes tropicales. Pues como lo menciona Eagleson (2002), la cubierta vegetal influye en la humedad del suelo a través de la intercepción de la cubierta y la transpiración. Mientras que los fenómenos meteorológicos afectan la generación del escurrimiento, ya que al generarse mayor cantidad de lluvia se satura el suelo de humedad con mayor facilidad, propiciando escurrimientos extraordinarios que su vez producen inundaciones en la parte baja de la cuenca (Pereyra y Pérez, 2006). Con el fin de aminorar los efectos de estos dos factores presentes en la cuenca, como se mencionó en la metodología, para el *BHC* se consideró los diferentes tipos de cubierta vegetal y suelo para el cálculo del valor de capacidad de campo, y además se tomaron registros de precipitaciones de por lo menos 30 años.

La cantidad de escurrimiento anual generado, fue una lámina anual de 637.02 mm, que si contemplamos que esta cantidad se distribuye sobre el área de la cuenca del río Cazonos de 2,688 km², el volumen de agua captado en un año sería de 1.71230976 Mm³. Este resultado fue muy similar al reportado por la Comisión Nacional del Agua (CONAGUA) de 1.712 Mm³/año (CONAGUA, 2011). La similitud en los resultados anteriores, confirma que si bien el método de Thornthwaite y Matter para calcular el *BHC* mensual tiene la limitante de considerar, que los parámetros de entrada y los procesos hidrológicos son espacialmente promediados o agrupados. Este método puede ser una primera herramienta para la estimación de la generación de registros de escurrimiento en cuencas no aforadas, una alternativa para la estimación de los procesos hidrológicos de una cuenca en particular y su relación con las variables climáticas, así como otras aplicaciones relacionadas con el manejo y planificación de los recursos del agua (Xu y Singh, 1998).

En cuanto a los procesos y sus respectivos periodos identificados en base al *BHC* son los siguientes: entre los meses de junio a enero se presenta la recarga de humedad por la precipitación, el exceso de agua entre los meses de junio a noviembre, la generación de escurrimiento entre los meses de julio a enero, y la utilización de la humedad entre los meses de enero a junio (Figura 5).

En resumen, los resultados arrojados por el *BHC* realizado en la cuenca del río Cazonos, muestra una precipitación promedio anual de 1,870.80 mm, una evapotranspiración potencial promedio anual de 1,232.17 mm, un déficit promedio anual de 0 mm, un exceso de agua promedio anual de 638.63, y por último una lámina de escurrimiento promedio anual de 637.02 mm. Por último, comprobando el *BHC*, se tiene que si se cumple la igualdad de los valores anuales entre la evapotranspiración potencial más el exceso de agua, y la precipitación más el déficit de agua, pues la sumatoria de ambas operaciones aritméticas da la misma cantidad de 1,870.80 mm, con lo cual se confirma que el *BHC* realizado en la cuenca es correcto (Tabla 3).

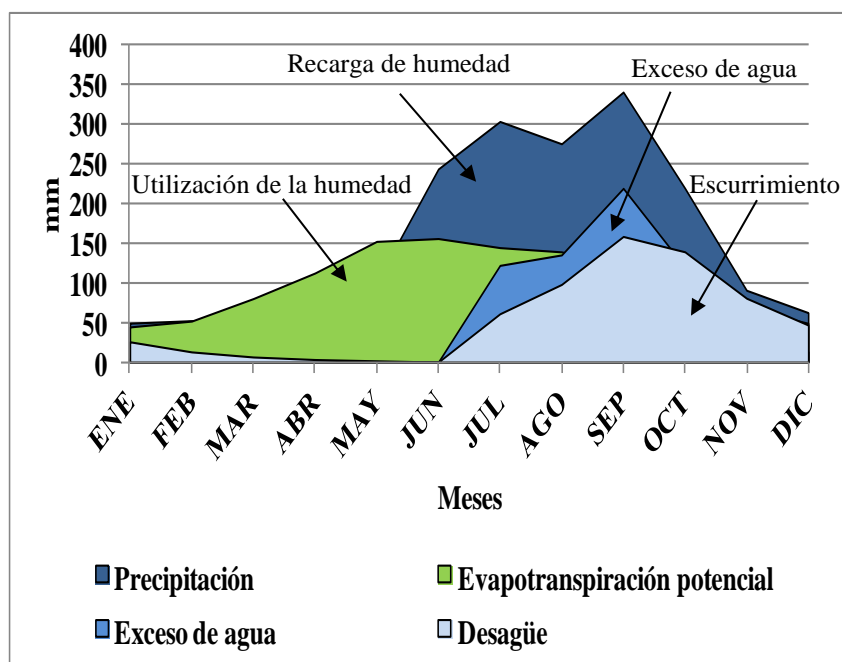


Figura 5. Procesos del BHC en la cuenca del río Cazones.

4. CONCLUSIONES

El balance hídrico climático (*BHC*) desarrollado en la cuenca del río Cazones, se realizó siguiendo el método directo propuesto por Thornthwaite y Mather y las reglas sugeridas por la WMO.

El balance hídrico permitió definir los periodos secos y húmedos, identificar en qué meses del año se genera la mayor cantidad de exceso de agua, y el esguerrimiento superficial en la cuenca, así como el comportamiento en los procesos hidrológicos por la afectación de los cambios en las variables climáticas. La lámina de esguerrimiento superficial anual generado fue de 637.02 mm, es decir, un volumen de agua captado de 1.71230976 Mm³, resultado similar al reportado por la Comisión Nacional del Agua de México (CONAGUA) de 1.712 Mm³. La similitud de los resultados anteriores confirma que si bien el método de *BHC* de Thornthwaite y Mather está basado en ecuaciones semi-empíricas y tiene como limitante la de considerar que los parámetros de entrada y los procesos hidrológicos son espacialmente promediados o agrupados. Se puede decir que el método es eficiente y confiable para poder realizar una primera estimación del esguerrimiento superficial, y conocer la cantidad de agua captada dentro de una cuenca no aforada, lo cual resulta en información relevante para el manejo y planificación de los recursos del agua de una cierta región.

5. REFERENCIAS

- APARICIO F. J. **Fundamentos de hidrología de superficie**. México, D. F.: Editorial Limusa, 2008. 304 p.
- COMISION NACIONAL PARA EL CONOCIMIENTO Y USO DE LA BIODIVERSIDAD (CONABIO). **La biodiversidad en Veracruz**: estudio de estado. México: Universidad Veracruzana; Instituto de Ecología, 2011.

- COMISION NACIONAL DEL AGUA - CONAGUA (México). **Estadísticas del agua en México, edición 2011**. Coyoacán, 2011.
- DINGMAN, S. L. **Physical hydrology**. 2nd Edition. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002. 646 p.
- DORIA, R. O.; MADRAMOOTOO C. A. Retracted: estimation of irrigation requirements for some crops in southern Quebec using CROPWAT. **Irrigation and Drainage**, v. 61, n, 4, p. 1-11, 2012. <http://dx.doi.org/10.1002/ird.497>
- DUNNE, T.; LEOPOLD, L. B. **Water in environmental planning**. San Francisco: W. H. Freeman and Co, 1978.
- EAGLESON, P. S. **Ecohydrology**: Darwinian expression of vegetation form and function. Cambridge: Cambridge University Press, 2002. p. 170–207.
- INSTITUTO NACIONAL DE GEOGRAFÍA, ESTADÍSTICA E INFORMÁTICA - INEGI. **Síntesis de información geográfica del Estado de Veracruz**. Aguascalientes, 2005.
- KAR G.; VERMA H. Climatic water balance, probable rainfall, rice crop water requirements and cold periods in AER 12.0 in India. **Agricultural Water Management**, v. 72, p. 15-32. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agwat.2004.09.001>
- MCCABE, G. J.; MARKSTROM, S. L. A monthly water-balance model driven by a graphical user interface: U.S. Geological Survey Open-File report 2007-1088, 6 p. 2007.
- PEREYRA D. D.; PEREZ J. A. A. Hidrología de superficie y precipitaciones intensas 2005 en el estado de Veracruz, en Tejeda Martínez, A. y C. M. In: WELSH RODRIGUEZ (eds.). **Inundaciones 2005 en el estado de Veracruz**. Xalapa: Universidad Veracruzana; Consejo Veracruzano de Ciencia y Tecnología, 2006. p. 81–99.
- RUIZ, A. O.; ARTEAGA, R. R.; VAZQUEZ, P. M. A.; LOPEZ, L. R.; ONTIVEROS, C. R. E. Requerimiento de riego y predicción del rendimiento en gramíneas forrajeras mediante un modelo de simulación en Tabasco, México. **Agrociencia**, v. 45, p. 745-760, 2011.
- RUIZ, O.; ARTEAGA, R.; VAZQUEZ, M. A.; ONTIVEROS, R. E.; LOPEZ, R. Balance hídrico y clasificación climática del Estado de Tabasco, México. **Revista Universidad y Ciencia**, v. 28, n. 1, p. 1-14, 2012.
- THATTAI, D.; KJERFVE, B.; HEYMAN, W. D. Hydrometeorology and variability of water discharge and sediment load in the inner Gulf of Honduras, Western Caribbean. **Journal of Hydrometeorology**, v. 4, p. 985-995, 2003.
- THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. Centerton: Drexel Institute of Technology, Laboratory of Climatology, 1957. (Publications in Climatology, 10)
- WORLD METEOROLOGICAL ORGANIZATION - WMO. **Guide to hydrological practices, no. 168**. [S.l.], 1994.
- XU, Y. C.; SINGH P.V. A Review on monthly water balance models for water resources investigations. **Water Resources Management**, v. 12, p. 31–50, 1998.
- XU, X.; YANG, D.; SIVAPALAN, M. Assessing the impact of climate variability on catchment water balance and vegetation cover. **Hydrologic and Earth System Sciences**, v. 16, p. 43–58, 2012. <http://dx.doi.org/10.5194/hess-16-43-2012>

-
- YOKOO, Y.; SIVALAPAN, M.; OKI, T. Investigating the roles of climate seasonality and landscape characteristics on mean annual and monthly water balances. **Journal of Hydrology**, v. 357, p. 255–269, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.05.010>
- ZHIGIANG, W.; BAOYUAN, L.; YAN, Z. Soil moisture of different vegetation types on the Loess Plateau. **Journal of Geographical Sciences**, v. 19, p. 707-718, 2009.