

CÁLCULO DE BALANCE HÍDRICO USANDO MODELAMIENTO DE DATOS ESPACIALES: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista, Ecuador¹

Ana Cecilia CORAL

Estudiante de Maestría PPGG de la FCT/UNESP – Presidente Prudente-SP.

Becaria de la SENESCYT-Ecuador

e-mail: anacorallo@yahoo.es

Jose Tadeu GARCIA TOMMASELLI

Prof. Dr. do Departamento de Geografia da FCT/UNESP – Presidente Prudente - SP.

e-mail: tadeu@fct.unesp.br

Antonio Cezar LEAL

Prof. Dr. do Depto de Geografia da FCT/UNESP – P. Prudente - SP. Pesquisador PQ-CNPq

e-mail: cezar@fct.unesp.br

Resumen: En el presente trabajo se expone el proceso metodológico para calcular el balance hídrico promedio mensual para una cuenca hidrográfica localizada en la región costa de Ecuador, con el objetivo de evaluar la importancia de la vegetación en la dinámica hídrica. El procedimiento utiliza herramientas SIG para elaborar el balance hídrico del suelo de acuerdo a la metodología clásica de Thornthwaite y Mather, la cual permite calcular las variables del sistema hídrico a partir de la definición de la capacidad máxima de agua disponible en el terreno (CAD), las medidas (promedio o totales) de precipitación y del estimado de la evapotranspiración potencial siguiendo la metodología propuesta por Thornthwaite. En el ambiente de SIG fue posible realizar el balance hídrico aplicando álgebra de mapas a superficies continuas. Los productos intermedios y finales de este ejercicio de simulación (i.e. modelos) son capas ráster o matrices espacio-temporales que representan la condición hídrica promedio a escala temporal (mensual) y espacial (píxel) en la cuenca de estudio. Se realizó un muestreo de los resultados parciales y finales para comprobar la exactitud de la metodología propuesta. En base a los resultados de esta comparación se evalúa que la metodología propuesta presenta resultados satisfactorios y puede ser aplicada a otras unidades de análisis de escalas más amplias.

Palabras clave: cuenca hidrográfica, balance hídrico, SIG, modelamiento espacial

CÁLCULO DE BALANÇO HÍDRICO USANDO MODELAGEM DE DADOS ESPACIAIS: estudo aplicado à bacia do rio Buena Vista, Equador

Resumo: Neste trabalho se expõe o processo metodológico para calcular o balanço hídrico médio mensal de uma bacia hidrográfica localizada na região costeira do Equador, com o intuito de avaliar a importância da vegetação sobre a dinâmica da água. O procedimento utiliza ferramentas GIS para calcular o balanço hídrico do solo de acordo com a metodologia clássica proposta por Thornthwaite e Mather, o qual permite calcular as variáveis do sistema hídrico com base na definição da capacidade máxima de água disponível no solo (CAD), medidas (média ou total) de precipitação e evapotranspiração potencial estimada segundo a metodologia proposta por Thornthwaite. No ambiente SIG foi possível realizar o balanço hídrico mediante a utilização de álgebra de mapas em superfícies contínuas. Os produtos intermediários e finais deste exercício de simulação (i.e. modelos) são camadas raster ou matrizes que representam a condição média da água na escala temporal (mensal) e espacial (pixel) na bacia em estudo. Foram feitas amostragens dos resultados parciais e elaborados balanços hídricos para conferir a acuracidade da metodologia proposta. Face aos resultados dessa comparação avalia-se que, a metodologia proposta apresenta resultados satisfatórios e pode ser aplicada a outras unidades de análise de escalas maiores.

Palavras-chave: bacia hidrográfica, balanço hídrico, SIG, modelagem espacial.

WATER BUDGET CALCULATION BY SPATIAL MODELING DATA: study applied to basin of Buena Vista river, Ecuador

Abstract: In this paper discussed the methodological process to calculate the monthly average water balance of a watershed located in the coastal region of Ecuador, in order to show the roll of the vegetation on the water dynamics. The method uses GIS tools to estimate the soil water balance based on the classic methodology of Thornthwaite and

¹Texto elaborado durante el trabajo de investigación a nivel de Maestría en el Programa de Pos graduación de la FCT-UNESP, P. Prudente.

Mather, which allows calculating the water regime from the definition of the maximum available water capacity in the soil, the measurement (average or total) of precipitation and potential evapotranspiration estimated by Thornthwaite. GIS environment allowed water balance estimation through map algebra applied to continuous surfaces. The intermediate and final products of this simulation exercise (i.e. models) are raster layers or space-temporal matrices representing average water condition in scales of time (monthly) and space (pixel) in the study watershed. Sampling of partial and final results was performed to verify the accuracy of the proposed methodology. Based on the results of this comparison was assessed that the proposed methodology presents satisfactory results and can be applied to larger units of analysis.

Key words: Watershed, water balance, GIS, spatial modeling

1. Introducción

En el presente trabajo se muestra el proceso metodológico para el cálculo del Balance Hídrico Climático (BHC) aplicado a una cuenca hidrográfica localizada en la región costa del Ecuador, con el objetivo de mostrar la importancia de la vegetación en la dinámica hídrica.

La ejecución del balance fue realizado para determinar el régimen hídrico (déficit y excesos de agua) promedio mensual del área de estudio. El método fue aplicado para un año típico, que considera las condiciones típicas o promedio de temperatura y precipitación de los 12 meses. Los promedios mensuales de temperatura y precipitación se derivan de una serie temporal de registros de mediciones en campo (estaciones meteorológicas).

La cuenca hidrográfica es la unidad territorial más aceptada para el estudio y la gestión de los recursos hídricos (Dourojeanni et al, 2002). Su estructura y funcionalidad se explican en relación al ciclo del agua y a la dinámica hidrológica que se distribuye espacial y temporalmente en su contexto geográfico. El enfoque de cuencas está siendo incorporado también en la planificación y gestión territorial con énfasis en la conservación y restauración de bosques y otros ecosistemas. En el caso de Ecuador este enfoque ha sido incluido en la nueva Constitución (2008) y en la Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento de agua del 2014.

El enfoque de cuencas hidrográficas considera la optimización de las funciones ecológicas de bosques y otros ecosistemas en los regímenes hidrológicos para obtener beneficios tales como la producción de agua, eficiencia en la regulación hidrológica y en la adaptación al cambio climático, entre otros.

En Brasil, el glosario de términos hidrológicos de la Agencia Nacional de Aguas, define al balance hídrico como el "balance de las entradas y salidas de agua en el interior de una región hidrológica bien definida (una cuenca, un lago, etc.), considerando las variaciones efectivas de acumulación" (ANA, 2001), se trata del estudio fundamental para la planificación y gestión de aguas en cuencas hidrográficas.

En esa perspectiva, en la resolución CNRH145/2012, que establece las directrices para la elaboración de los planes de cuenca hidrográfica se establecen tres etapas para la elaboración de los

planes de recursos hídricos en cuencas hidrográficas: diagnóstico, pronóstico y plan de acción. En la etapa de diagnóstico se debe elaborar la "evaluación del cuadro actual de los usos de agua y de las demandas hídricas asociadas; y el balance entre las disponibilidades y las demandas hídricas evaluadas". En la etapa de pronóstico está prevista la "evaluación de las demandas y de las disponibilidades hídricas de los escenarios evaluados; y el balance entre las disponibilidades y demandas hídricas con la identificación de los posibles escenarios de conflicto". Los estudios realizados en las etapas anteriores fundamentan la elaboración del plan de acción, con el cual "se busca mitigar, minimizar y anticiparse a los problemas relacionados a los recursos hídricos superficiales y subterráneos, de manera de promover los usos múltiples y la gestión integrada".

La tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG) se presenta como una herramienta idónea para apoyar la toma de decisiones en la gestión ambiental, particularmente por su capacidad de análisis y modelamiento de datos espaciales, así como por la eficiencia de sus resultados cartográficos para identificar áreas específicas de manejo ambiental para optimizar la regulación hidrológica en una cuenca.

La adopción del método de Balance Hídrico Climatológico (BHC) de Thornthwaite y Mather (1955) responde, por un lado a la disponibilidad de la información requerida y, por otro, porque es un método clásico en los estudios de la auto-ecología para relacionar las características hídricas de los suelos con la presencia y vigor de las especies forestales (Blanco et al, 1989; Blanco, 1990; Bañares et al., 1991; Elena y Sánchez, 1991; Gadullo y Sánchez, 1994; Blanco y Sánchez, 1993; Blanco y Rubio, 1996, 1997).

El ejercicio del BHC en un ambiente SIG pretende relacionar a la cobertura vegetal con la funcionalidad hídrica de la cuenca hidrográfica. Por definición, la aplicación de técnicas de modelamiento de datos espaciales permite simular las interacciones de las condiciones climáticas y edáficas, incluyendo la cobertura vegetal, que supone el método de BHC. En consecuencia, la realización de este ejercicio podría representar un efecto aproximado de la vegetación sobre la condición hídrica en matrices (ráster) con características espacio-temporales en el contexto geográfico de la cuenca

Tradicionalmente, el cálculo de balance hídrico se aplica a sitios puntuales y los resultados del cálculo son posteriormente distribuidos a un área de interés mediante técnicas de extrapolación. El método expuesto en este trabajo se diferencia del tradicional, puesto que el cálculo del balance se aplica espacialmente distribuido en el área de interés, lo que permite visualizar la distribución espacial del proceso de contabilización del agua (balance hídrico) en superficies continuas, por lo tanto no requiere de procesos de extrapolación a posteriori.

2. El balance hídrico climático (BHC) de Thornthwaite y Mather

El balance hídrico es el proceso de contabilización de agua en el suelo. En el método del balance hídrico climático (BHC), propuesto por Thornthwaite y Mather (1955), el suelo puede ser visto como un reservorio de agua, con una capacidad máxima para retenerla (Capacidad de Agua Disponible-CAD). El agua entra al suelo a través de la precipitación (P), y en respuesta a las condiciones atmosféricas se tiene una potencial pérdida de agua (demanda atmosférica) que es representada por la evapotranspiración potencial (ETP).

Thornthwaite y Mather (1955) parten de los siguientes supuestos (Pagney, 1982):

1. La pérdida de agua en el suelo es una función de la evapotranspiración potencial (ETP) y de la capacidad de agua disponible (CAD). En el transcurso de los meses secos, las pérdidas se convierten en potenciales acumuladas, también llamadas "negativos acumulados" (NEG).
2. La capacidad de agua disponible (CAD) es la capacidad máxima de agua que el suelo puede retener y es una función del sistema radicular de la vegetación y de la textura del suelo (gruesa, medio, fina).
3. Si la cantidad de agua que entra al sistema (suelo) es mayor que su CAD entonces este exceso puede perderse por gravedad (alimentando las aguas subterráneas) o por escorrentía superficial.

Estableciendo una CAD apropiada al complejo vegetación-suelo, el método de BHC permite estimar la evapotranspiración real (ETR), la deficiencia hídrica (DEF), el exceso hídrico (EXC) y la variación de almacenamiento (ARM) de agua en el suelo en un determinado periodo. El ARM y la variación de almacenamiento (ALT) representa el balance entre lo que entra y sale de agua. Así, el BHC puede ser calculado para representar la entrada-salida de agua en el suelo para un período que puede ser un evento de lluvia, un día, mes o año, específico o promedio, siendo la aplicación del método de Thornthwaite y Mather más adecuada para las condiciones promedias mensuales.

3. Los elementos que intervienen en el cálculo del BHC

El método de BHC requiere de varios elementos para su cálculo, que pueden ser clasificados en tres momentos: los de la etapa de inicio que son los elementos que constituyen las condiciones climáticas y edáficas; los de la etapa de contabilidad o balance hídrico per se, que son los elementos que permiten realizar el balance que cierra llegado a una condición estable; y finalmente los

elementos de la etapa resultado que son los que representan la condición hídrica. A continuación se definen estos elementos en la lógica del BHC, así como su procedimiento para generarlos.

3.1. Temperatura media mensual (Tm)

Representa el promedio mensual de temperatura que se deriva de una serie temporal de registros de mediciones en campo (estaciones meteorológicas) que para el caso de estudio corresponde a 30 años. La temperatura viene dada en °C y es el elemento que permite estimar la evapotranspiración potencial siguiendo el método de Thornthwaite (1948).

3.2. Evapotranspiración Potencial (ETPm)

La evapotranspiración potencial (ETP) representa la cantidad de lluvia necesaria para que no exista deficiencia hídrica. En el método adoptado, esta variable viene dada en milímetros y se determina usando la fórmula de Thornthwaite (1948) que define a la evapotranspiración potencial para cada mes (m), dado por:

$$ETPm = 16 * (10t_m/I)^a \quad (1)$$

Donde,

ETPm es la evapotranspiración potencial para el mes m

Tm es la temperatura promedio del mes m.

I es conocido como índice de calor anual y viene dado por la ecuación

$$I = \sum_{m=1}^{12} \left(\frac{T_m}{5}\right)^{1,514} \quad (2)$$

y a está definido por la ecuación:

$$a = 675(I \times 10^{-3})^3 - 77,1(I \times 10^{-3})^2 + 1792(I \times 10^{-5}) + 0,49329 \quad (3)$$

3.3. Precipitación media mensual (Pm)

Representa la entrada de agua en el método del BHC. Viene dada en milímetros y es usada para calcular la pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP).

3.4. Pérdida o adición potencial de agua en el suelo (P-ETP).

Este elemento es usado en varios momentos en el proceso de contabilización del agua, es decir en el cálculo del balance hídrico *per se*. Corresponde a la diferencia entre la precipitación (P) y la evapotranspiración potencial (ETP).

Es calculada mensualmente, para los fines de este ejercicio se denominará PEP. Así, cada mes (m) estará dada por la ecuación:

$$PEP_m = P_m - ETP_m \quad (4)$$

También es calculado anualmente (PEPanual), sumando los parciales mensuales, según:

$$PEP_{anual} = \sum_{m=1}^{12} PEP_m \quad (5)$$

Dados estos valores es posible identificar los meses secos y los meses húmedos. En el método aplicado, es importante definir cuál es el mes que da inicio a la estación seca, pues es a partir de ese mes que se inicia la contabilidad del almacenamiento de agua (ARM), es decir al balance hídrico. En el caso de estudio la estación seca comienza en el mes de mayo.

Adicionalmente, se determina la pérdida potencial acumulada, es decir los valores negativos de los PEP mensuales (PEP-) y la adición potencial, es decir los valores positivos de los PEP mensuales (PEP+), estos valores mensuales serán sumados para tener el acumulado de pérdidas y adiciones potenciales en un año. Los acumulados anuales serán usados en la contabilidad del balance y en la toma de decisiones que requiere el método. Para los fines prácticos la adición potencial de agua acumulada en el año se denominará SUMPEP+ y la pérdida potencial de agua acumulada en un año se denominará SUMPEP-

3.5. Negativo acumulado (NEG)

Corresponde al cálculo de las pérdidas de agua en el balance *per se*. El método clásico de BHC, requiere de operaciones iterativas para la contabilidad de las entradas ARM y de las pérdidas NEG y de la toma de decisiones según la condición del balance que se presente en el suelo, la cual indicará si acumula a las entradas de agua (ARM) o a las pérdidas (NEG).

En el caso de este estudio, el cálculo de los negativos acumulados (NEG) no era eficiente para la corrida del modelo de datos espaciales pues representaba generar más ráster parciales que luego serían recalculados junto a los ARM. Para superar esa dificultad, se adoptó el método de Mendonça (1958) que consigue simplificar el método de BHC de Thornwaithe y Matter (1955)

suprimiendo el cálculo del negativo acumulado NEG, para aumentar la eficiencia en el computo de los datos (PEREIRA, 2005). Así, el modelo realizado en este estudio no requirió generar el cómputo de este elemento.

3.6. Capacidad de agua disponible CAD

Representa la cantidad de agua en milímetros que es capaz de retener el suelo. Es una función del sistema radicular de la vegetación y de la textura del suelo (gruesa, medio, fina). Así que viene dada por la combinación de los tipos de textura de suelo y los tipos de cobertura vegetal. Como se muestra en la Tabla 1, corresponde una capacidad de agua disponible (CAD) a cada asociación de suelo-vegetación en la cuenca de estudio.

Tabla 1. CAD según el complejo suelo-vegetación de la cuenca del Río Buena Vista

Tipo de cobertura	Textura del suelo	CAD
Vegetación arbustiva y herbácea	Franco arenoso fino	150
	Franco limoso	250
	Franco arcilloso	250
Cultivo de ciclo corto, pastos	Franco arenoso fino	75
	Franco limoso	125
	Franco arcilloso	100
Bosque	Franco arenoso fino	300
	Franco limoso	400
	Franco arcilloso	400

Fuente: Adaptado de Martínez et al (2013)

3.7. Agua almacenada en el suelo (ARM)

Representa la variación de almacenamiento de agua en el suelo en un determinado periodo. El ARM viene a ser el balance entre lo que entra y sale de agua. Esta variable da inicio a la contabilidad de agua, es decir al balance hídrico. En el área de estudio se presentan dos estaciones en el año, la lluviosa de 4 meses y la seca de 8 meses. En ese sentido, el cálculo de esta variable ARM inicia al final de la estación lluviosa, pues eso supone que el suelo en este mes ha acumulado la mayor cantidad de agua. De este cálculo inicial depende el ARM de los siguientes meses. Los ARM están en función de las entradas y salidas de agua, es decir de las variables de precipitación (P) y evapotranspiración (ETP).

Para el cálculo del ARM inicial, el método del BHC considera las siguientes proposiciones:

1. Si la sumatoria de las relaciones entre la precipitación mensual (P) y la evapotranspiración potencial mensual es mayor o igual a la capacidad de agua disponible en el suelo (CAD). Entonces se puede considerar que el agua

almacenada (ARM) es igual a la capacidad de agua disponible (CAD), ya que el CAD representa la máxima cantidad de agua que el suelo puede retener, pues el exceso de agua puede percolar o escurrir pero no entra en la contabilidad del balance hídrico.

2. Si el balance anual de las entradas de agua dadas por la precipitación (P) y las salidas potenciales dadas por la evapotranspiración potencial (ETP) es menor a la capacidad de agua disponible (CAD) y si las adiciones potenciales acumuladas en el año (SUMPEP+) son iguales o mayores a la capacidad de agua disponible (CAD), entonces se asume que el agua almacenada (ARM) es la capacidad de agua disponible (CAD).
3. Para los casos que no se cumplan ninguna de las dos condiciones anteriores, el agua almacenada en el suelo (ARM), para ese mes, es calculado por la siguiente fórmula:

$$ARM = \frac{SUMPEP+}{1 - e^{-\frac{SUMPEP-}{CAD}}} \quad (6)$$

Donde,

SUMPEP+ representa la adición potencial de agua acumulada en el año

SUMPEP- representa la pérdida potencial de agua acumulada en el año

Luego del cálculo del ARM inicial comienza el proceso iterativo para calcular los ARM de los subsiguientes meses hasta completar el año, que representa un ciclo. El ciclo se completa cuando llega al mes de inicio del balance, en el caso de estudio el balance comenzó en el mes de mayo, el mes en que inicia la estación seca. El método requiere realizar iterativamente este cálculo hasta el cierre del balance.

El cálculo de ARM requiere establecer algunas condicionales. Así, dados CAD, y PEP_m dado por la ecuación (4) se tiene para cada mes m, las siguientes 3 proposiciones:

1. Si PEP_m < 0 entonces

$$ARM_m = ARM_{m-1} * e^{\frac{PEP_m}{CAD}} \quad (7)$$

Donde,

m representa el mes sobre el que se realiza el cálculo

m-1 representa el mes anterior a m

2. Si $PEP_m < 0$ y $ARM_{m-1} + PEP_m \geq CAD$, entonces

$$ARM_m = CAD \quad (8)$$

3. Para los casos que no cumplan las dos condiciones dadas anteriormente, entonces:

$$ARM_m = ARM_{m-1} + PEP_m \quad (9)$$

Al finalizar el primer ciclo de iteraciones se da inicio a un proceso continuo de comparación hasta cerrar el balance. De este modo, el balance cierra cuando se cumple la siguiente condición:

$$ARM_{m_{i-1}} \approx ARM_{m_i} \quad (10)$$

Donde,

m representa el mes del cálculo

i representa el ciclo (iteración) de cálculo

i-1 representa el ciclo (iteración) anterior

Llegados a esta etapa es necesario establecer un criterio de convergencia para el cierre del balance. El criterio de convergencia definido para el área de estudio, caracterizada por ser una región seca, es una tolerancia menor al 5%, es decir:

$$\frac{|ARM_i - ARM_{i-1}|}{ARM_{i-1}} < 0,05 \quad (11)$$

Donde,

i representa el ciclo (iteración) de cálculo

i-1 representa el ciclo (iteración) anterior

El criterio de convergencia se aplica para comparar los ARM entre iteraciones por mes, después de terminado el primer ciclo. Por ejemplo, si en un segundo ciclo de iteraciones, se tiene "ARM5_1" que representa el ARM del mes 5 de la primera iteración y "ARM5_2" como ARM del mes 5 de la segunda iteración (recién calculada) entonces el balance cierra si el valor absoluto de la

diferencia entre estos valores es menor al 5% del valor absoluto de ARM de la primera iteración es decir del "ARM5_1".

Una vez que el balance cierre se procede a calcular los elementos que definirán la condición hídrica y que se describen a continuación:

3.8. Alteración mensual de almacenamiento de agua (ALT).

Se define como la retirada o reposición de agua que ocurre de un mes al subsiguiente mes. En otras palabras, es la variación del agua almacenada (ARM) en un mes y el almacenamiento de agua (ARM) del mes contiguo.

El cálculo de alteración mensual de almacenamiento estaría dado por la ecuación:

$$ALT_m = ARM_m - ARM_{m+1} \quad (12)$$

Donde,

m representa el mes de cálculo

m+1 representa el mes siguiente al mes de cálculo

Por definición:

Si $ALT < 0$ entonces hay "retirada de agua",
si $ALT > 0$ entonces hay "reposición de agua".

3.9. Evapotranspiración Real (ETR)

La evapotranspiración real para cada mes (ETR_m) es calculada considerando las siguientes proposiciones:

1. Si la precipitación (P) es mayor que la evapotranspiración potencial (ETP) entonces la evapotranspiración real (ETR) es equivalente a la evapotranspiración potencial del mes, es decir:

$$Si P_m > ETP_m \rightarrow ETR_m = ETP_m \quad (13)$$

2. Si la precipitación (P) es menor que la evapotranspiración potencial (ETP) entonces la evapotranspiración real (ETR) es el residuo de la precipitación menos la alteración de agua (ALT) del mes. Es decir:

$$Si P_m < ETP_m \rightarrow ETR_m = P_m - ALT \quad (14)$$

3.10. Deficiencia hídrica (DEF)

Representa el déficit de agua (DEF) y viene dado por la ecuación:

$$DEF_m = ETP_m - ETR_m \quad (15)$$

Conforme a la ecuación (15) se calculan los déficits hídricos (DEF) para cada mes.

3.11. Exceso hídrico (EXC)

Para calcular el excedente de agua (EXC) se debe considerar la siguiente proposición:

$$Si \text{ ARM} = \text{CAD} \rightarrow \text{EXC}_m = \text{PEP}_m - \text{ALT}_m \wedge Si \text{ ARM} \neq \text{CAD} \rightarrow \text{EXC}_m = 0 \quad (16)$$

Conforme a la expresión (16) Se calculan los excedentes hídricos (EXC) para cada mes.

4. Ambientación en SIG

En el ambiente SIG se requiere representar cada variable del método de BHC en formatos cartográficos que permitan la aplicación de operaciones matemáticas y lógicas entre ellas, de manera de simular las relaciones que propone el método. Esto se traduce a las variables y algoritmos propuestos en el método de BHC de Thornthwaite y Mather (1955). El formato ráster se presenta como la mejor opción para el análisis espacial multivariable, y en el caso de estudio, para el modelamiento espacial del BHC.

El suelo, entendido como el sistema donde se dan las entradas y salidas de agua, que propone el método de BHC, está definido por la unidad de píxel en el ambiente de SIG. Como se especificó anteriormente, el método de BHC considera la CAD del suelo en función de su condición edáfica, que se define por la combinación del tipo de textura del suelo y la cobertura vegetal. En la plataforma de SIG, estas variables están definidas por la combinación de una matriz espacial (ráster), cuyos valores de píxel representan los tipos de textura del suelo, con otra matriz ráster cuyos valores de píxel representan los tipos de cobertura vegetal. Para la representación espacial, en el ambiente de SIG, de la condición climática de un año hidrológico promedio, el método demanda el uso de matrices ráster de precipitación y temperatura media mensual.

A continuación se describe el proceso metodológico realizado para calcular el BHC en la cuenca de estudio en el ambiente de SIG, lo que demanda generar superficies continuas de los elementos del BHC, y por ende un manejo exhaustivo de álgebra de mapas.

4.1. Datos de Entrada²

4.1.1. Capas ráster de precipitación y temperatura mensual:

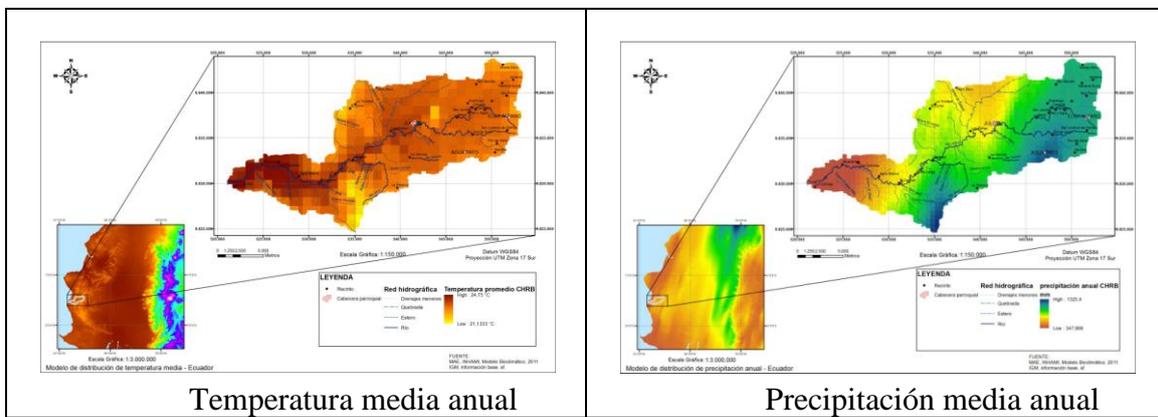
Se prepararon 12 capas ráster correspondientes a los 12 meses con información de precipitación (P) dada en milímetros y 12 capas ráster con información de temperatura (T) dada en °C. Estas capas ráster fueron proporcionadas por el Ministerio de Ambiente del Ecuador para la realización de este estudio.

MAE (2011) generó los 12 ráster con información de precipitación promedio mensual , mediante la aplicación de técnicas de interpolación y con base en registros pluviométricos de una serie temporal de 1970-2009. Para los 12 ráster con la información de temperatura, MAE (2011) organizó los modelos generados por WorldClim-Global Climate Data de la serie 1950-2000 y que están disponibles en www.worldclim.org.

En el caso de estudio las capas de precipitación se denominaron de P1 a P12 y las de temperatura de T1 a T12 manteniendo coherencia con el orden del año calendario.

En la Figura 1, se puede observar el recorte espacial del área de interés sobre los modelos de temperatura y precipitación anual.

Figura 1. Recorte espacial de los modelos de temperatura y precipitación del Ecuador (MAE, 2011)



4.1.2. Capa Ráster de Textura de Suelo

La capa ráster con información de tipo de textura del suelo fue generada a partir de la cobertura de suelos del Ecuador (2009), que se encuentra disponible en el portal del Sistema Nacional de Información (SNI): <http://sni.gob.ec/coberturas>³

² La metodología aplicada en el caso de estudio no incurrió en gastos para la adquisición de los datos de entrada.

³ Fecha de descarga: 10/05/2014

4.1.3. Capa ráster de tipos de cobertura vegetal

La capa ráster que contiene la información de los tipos de cobertura vegetal fue generada con herramientas de geoprocésamiento (clasificación de imágenes) a partir de la imagen satelital Landsat 8 de fecha 16/09/2013, disponible en el portal del U.S. Geological Survey en: <http://glovis.usgs.gov/>⁴

4.2. Generación de las capas ráster iniciales

4.2.1. Generación de la capa ráster CAD

Mediante álgebra de mapas se combinaron las matrices ráster de cobertura vegetal y textura de suelo. Posteriormente, fue asignado un valor de CAD a cada combinación conforme a la Tabla 1 del ítem 3.6.

4.2.2. Generación de las capas ráster de evapotranspiración potencial

Aplicando álgebra de mapas en base a lo definido anteriormente se generaron 14 capas ráster de superficie continua distribuidas espacialmente en el área de estudio:

- La capa ráster con el valor de la 'a' constante siguiendo la ecuación (3)
- La capa ráster del índice de calor anual 'T' siguiendo la ecuación (2)
- Las 12 capas ráster correspondientes a la Evapotranspiración Potencial (ETP) mensual. siguiendo la ecuación (1).

El método de ETP de Thornthwaite (1948) considera meses de 30 días con días de duración solar de 12 horas. En el caso de estudio la latitud es muy próxima a la línea ecuatorial por lo tanto el ajuste por latitud (duración de luz solar) pudo ser desconsiderado en este ejercicio.

En la tabla 2, en la columna expresión de álgebra de mapas, se muestra la sintaxis usada para el cálculo de los ráster ETP para cada mes, este cálculo requiere la generación previa de las superficies continuas del índice de calor anual (I) y de la constante (a). Nótese que se ha aplicado un ajuste para que cada mes se refiera a 30 días. Los ráster de salida son las evapotranspiraciones potenciales para cada mes.

⁴ Fecha de descarga: 05/01/2014

Tabla 2. Expresiones usadas para el cálculo de los ETP mensuales

Mes	Expresión de álgebra de mapas	Ráster de Salida
1	$16 * \text{Power}((10 * T1 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP1
2	$16 * \text{Power}((10 * T2 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (28/30)$	ETP2
3	$16 * \text{Power}((10 * T3 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP3
4	$16 * \text{Power}((10 * T4 / \text{Iannual}), \text{aconstante})$	ETP4
5	$16 * \text{Power}((10 * T5 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP5
6	$16 * \text{Power}((10 * T6 / \text{Iannual}), \text{aconstante})$	ETP6
7	$16 * \text{Power}((10 * T7 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP7
8	$16 * \text{Power}((10 * T8 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP8
9	$16 * \text{Power}((10 * T9 / \text{Iannual}), \text{aconstante})$	ETP9
10	$16 * \text{Power}((10 * T10 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP10
11	$16 * \text{Power}((10 * T11 / \text{Iannual}), \text{aconstante})$	ETP11
12	$16 * \text{Power}((10 * T12 / \text{Iannual}), \text{aconstante}) * (31/30)$	ETP12

4.2.3. Generación de las capas ráster de pérdidas o adiciones potenciales

Aplicando álgebra de mapas en base a las definiciones establecidas anteriormente, se generaron 39 capas ráster de superficies continuas con información sobre las pérdidas y/o adiciones potenciales de humedad acumuladas mensual y anualmente. Las capas ráster generadas fueron:

- Las 12 capas ráster con información de los P-ETP mensuales, denominadas "PEP"
- La capa ráster de P-ETP anual, denominada "PEPanual"
- Las 12 capas ráster con los valores negativos de P-ETP correspondientes a cada mes, denominadas "PEP-"
- Las 12 capas ráster con valores positivos de P-ETP correspondientes a cada mes, denominadas "PEP+"
- La capa ráster de la sumatoria de los PEPnegativos (PEP-), denominada "SUMPEP-"
- La capa ráster de la sumatoria de los PEPpositivos (PEP+), denominada "SUMPEP+"

4.3. Corrida del modelo

En el método del BHC, ARM representa la dinámica de balance de entradas y pérdidas de agua en el suelo. La contabilidad de ARM requiere de operaciones iterativas y tomas de decisión, lo que implica el uso de funciones lógicas para su cálculo. En ese sentido, y desde la perspectiva de la

distribución espacial, este cálculo representa el mayor desafío pues se simulará la contabilidad de entradas y salidas de agua por píxel, entendiendo que las entradas y salidas están definidas por superficies continuas de cada mes.

Aplicando álgebra de mapas se elaboró un algoritmo que incluye todas las condicionales y fórmulas para generar el ráster ARM de inicio del balance. En el caso de estudio, el balance inicia en el mes de mayo por lo que se denominó al ARM inicial como "ARM5". El algoritmo para generar ARM5 en álgebra de mapas sigue la siguiente expresión:

$$\text{"ARM5"} = \text{CON}(\text{"PEPannual"} \geq \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{CON}(\text{"SUMPEP+"} \geq \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{CON}(\text{"SUMPEP+"} / (1 - \text{EXP}(\text{"SUMPEP-" / "CAD"})) \geq \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{"SUMPEP+"} / (1 - \text{EXP}(\text{"SUMPEP-" / "CAD"}))))))$$

Nótese el uso del operador condicional CON y la función exponencial EXP. Algebra de mapas incluye operadores lógicos y funciones exponenciales, lo cual permitió la ejecución del balance hídrico.

A continuación, se procede a generar las capas ráster de ARM de los subsiguientes meses, de forma iterativa hasta completar un ciclo. En el caso de estudio, esto corresponde al cálculo del ARM del mes de junio, que se denominó "ARM6". El algoritmo diseñado para el cálculo de "ARM6" viene dado por:

$$\text{"ARM6"} = \text{CON}(\text{"PEP6"} < 0, \text{"ARM5"} * \text{EXP}(\text{"PEP6"} / \text{"CAD"}), \text{CON}(\text{"SUP"} \geq \text{"CAD"}, \text{"CAD"}, \text{"ARM5"} + \text{"PEP6"}))$$

Este algoritmo fue aplicado sucesivamente para el cálculo de los ARM de los subsiguientes meses. La corrida del balance es la etapa de mayor esfuerzo y requiere de un manejo prolijo de álgebra de mapas. El balance hídrico cerró aplicando el criterio de convergencia definido en la ecuación 12, luego del tercer ciclo de iteraciones.

4.4. Resultados del modelo: Condición hídrica

Una vez cerrado el balance se procede a generar los ráster que representan la condición hídrica que corresponde a 24 capas ráster:

- 12 capas ráster correspondientes a la distribución espacializada del déficit hídrico mensual (DEF) y,
- 12 capas ráster correspondientes a la distribución espacializada del exceso hídrico mensual (EXC).

Previo al proceso de generación de los ráster DEF y EXC, se precisa generar:

- 12 capas ráster de ALT correspondientes a los 12 meses, usando la ecuación (12) y,
- 12 capas ráster de evapotranspiración real (ETR) correspondiente a los 12 meses, usando las ecuaciones (13) y (14)

Los ALT mensuales son derivados de una operación de matemática básica según la ecuación (12). Siguiendo la lógica aplicada en este ejercicio, en álgebra de mapas el cálculo del ráster "ALT 1" del mes 1 corresponde a:

$$\text{"ALT1"} = \text{"ARM1"} - \text{"ARM2"}$$

Una vez calculados los 12 ráster ALT, se procede a calcular los ETR mensuales. Integrando la ecuación (13) y la ecuación (14) en álgebra de mapas se tiene que la capa ráster "ETR1" está definida por:

$$\text{"ETR1"} = \text{CON}(\text{"PEP1"} \geq 0, \text{"ETP1"}, (\text{"P1"} - \text{"ALT1"}))$$

Siguiendo con el procedimiento, en base a la ecuación (15) se generan las 12 capas ráster de deficiencia hídrica (DEF) y en base a la ecuación (16) se generan las 12 capas ráster del excedente hídrico (EXC).

En el caso del ejercicio, dados "ARM1" y "PEP1" del mes 1 entonces el exceso hídrico del mes 1 "EXC1" estará dado por:

$$\text{"EXC1"} = \text{CON}(\text{"ARM1"} == \text{"CAD"}, \text{"PEP1"} - \text{"ALT1"}, 0)$$

4.5. Validación de resultados

Para comprobar la coherencia de los resultados se realizó el cálculo del balance hídrico usando el aplicativo de Excel desarrollado por Tommaselli (2002) para una muestra de 9 puntos (píxel) seleccionados aleatoriamente. De este modo fueron comparados los resultados y pudo comprobarse la coherencia con los resultados del modelamiento de datos espaciales.

5. Resultados de la Aplicación del BHC

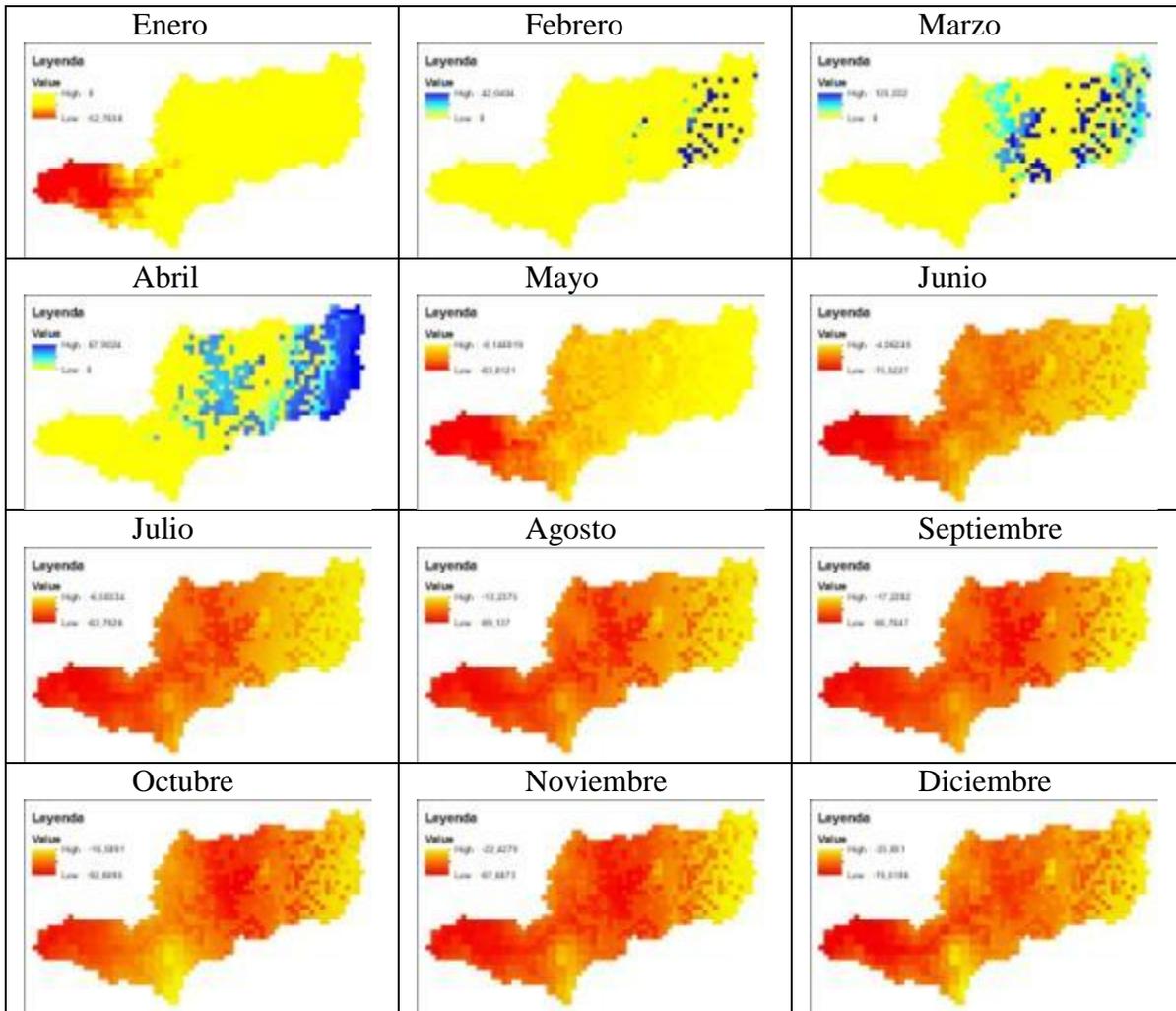
La condición hídrica se refleja mediante la combinación de los mapas de excedente hídrico EXC y deficiencia hídrica DEF para los 12 meses del año, el resultado de esta combinación muestra la distribución espacial del déficit-excedente hídrico en la cuenca hidrográfica así como la variabilidad mensual durante un año típico.

El área de estudio presenta condiciones de alto déficit hídrico durante todo el año. Hay un localizado y puntual exceso de humedad en febrero que se incrementa gradualmente hasta abril. Las zonas que presentan esta condición hídrica de exceso en estos meses, son también las que están siendo usadas para actividades agrícolas, cultivos de maíz principalmente. El balance hídrico realizado en la cuenca de estudio precisó de tres ciclos (iteraciones) para poder cerrar el balance.

Los algoritmos de álgebra de mapas generados en este ejercicio permitieron realizar el cálculo del balance hídrico espacialmente distribuido utilizando como entrada las superficies continuas con los datos de precipitación y temperatura media mensual y capacidad de campo. Este procedimiento puede ser replicado en cualquier plataforma SIG con soporte de álgebra de mapas.

En la Figura 2, se muestra el resultado final de la corrida del modelo del BHC en el área de estudio y que corresponde a la dinámica espacio-temporal de la condición hídrica en un año típico.

Figura 2. Condición hídrica anual del área de estudio



6. Conclusiones y Discusión

- La adopción del método del balance hídrico climático de Thornthwaite y Mather (1955) permite mostrar el papel de la cobertura vegetal en la dinámica hídrica de la cuenca hidrográfica.
- El procedimiento realizado fue eficiente para simular la dinámica del régimen hídrico durante un año (promedio) y la distribución espacial de la condición hídrica en el área de estudio. Los resultados son matrices espacio-temporales que representan la dinámica hidrológica a escala temporal (mensual) y a escala espacial (pixel).
- La metodología desarrollada puede complementarse con la incorporación de procesos de calibración y ajustes para mejorar la precisión y exactitud de los resultados.

- La elaboración del BHC constituye un estudio básico para auxiliar la planificación de recursos hídricos en cuencas hidrográficas, en combinación con estudios de oferta y demanda de agua (cuantitativa y cualitativa) actuales y futuras.

7. Referencias

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Superintendência de Informações Hidrológicas. **Dicionário de Termos Hidrológicos**. Brasília, 2001.

BRASIL. CONSELHO NACIONAL DE RECURSOS HÍDRICOS. **Resolução 145, de 12 de dezembro de 2012**. Estabelece diretrizes para a elaboração de Planos de Recursos Hídricos de Bacias Hidrográficas e dá outras providencias. Brasília, CNRH, 2012.

DOUROJEANNI, A., JOURAVLEV, A., CHÁVEZ, G. **Gestión del Agua a nivel de cuencas: teoría y práctica**. Disponible en: <http://www.cepal.org/dnri/publicaciones/xml/5/11195/lc11777-p-e.pdf>. Último acceso 06/11/2014.

MAE, **Modelo Bioclimático Del Ecuador Continental**, 2011.

MARTÍNEZ BATLLE, J.R., Tavarez San José, C. E., Díaz del Olmo, F., Cámara Artigas, R., **Manual de Ordenamiento y Gestión de Cuencas**, versión digital en pdf. Disponible en: http://www.geografiafisica.org/wp-content/uploads/2013/02/manual_transferencia_ordenacion_cuencass_tecnicas_usando_ArcGIS.pdf. Último acceso en 6/11/2014.

MENDONÇA, P.V. **Sobre o novo método de balanço hidrológico do solo de Thornthwaite-Mather**. In: CONGRESSO LUSO-ESPANHOL PARA O PROGRESSO DAS CIÊNCIAS, 24., Madrid. Anais... Madrid, p.271-282, 1958.

PEREIRA, A.R. **Simplificando o Balanço Hídrico De Thornthwaite-Mather**, In: Bragantia, Campinas, v.64, n.2, p.311-313, 2005.

THORNTHWAITE, C. W. **An approach toward a rational classification of climate**. Geogr. Rev.. 38. 55-94, 1948.

THORNTHWAITE, C.W.; MATHER, J.R. **The water balance**. Centerton, NJ: Drexel Institute of Technology - Laboratory of Climatology, Publications in Climatology, vol.VIII, n.1, p. 104, 1955.

TOMMASELLI, J.T.G. Balanço Hídrico. **Roteiro de execução do balanço hídrico climático**, versión digital en formato pdf. 2005.

TOMMASELLI, J.T.G. Rotina para cálculo **do balanço hídrico climático em planilhas eletrônicas**, versión digital en formato ods y xls, 2002.

Recebido em: 19/11/2014

Aprovado em: 19/05/2015