



**UNIVERSIDAD TÉCNICA PARTICULAR DE LOJA**

*La Universidad Católica de Loja*

**ÁREA TÉCNICA**

**TÍTULO DE INGENIERO CIVIL**

**Desarrollo de un software para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN.**

**AUTOR:** Jaramillo Eras, Cesar Alberto

**DIRECTOR:** Oñate Valdivieso, Fernando Rodrigo, PhD.

**LOJA – ECUADOR**

**2018**



*Esta versión digital, ha sido acreditada bajo la licencia Creative Commons 4.0, CC BY-NY-SA: Reconocimiento-No comercial-Compartir igual; la cual permite copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra, mientras se reconozca la autoría original, no se utilice con fines comerciales y se permiten obras derivadas, siempre que mantenga la misma licencia al ser divulgada. <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/deed.es>*

2018

## APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Doctor.

Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso.

### DOCENTE DE LA TITULACIÓN.

De mi consideración:

El presente trabajo de titulación: **Desarrollo de un software para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas** realizado por **Jaramillo Eras Cesar Alberto**, ha sido orientado y revisado durante su ejecución, por cuanto se aprueba la presentación del mismo.

Loja, septiembre de 2018

f).....

## DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS

“Yo, **Jaramillo Eras Cesar Alberto**, declaro ser el autor del presente trabajo de titulación: *Desarrollo de un software para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas*, de la Titulación Ingeniería Civil, siendo Fernando Rodrigo Oñate Valdivieso, director del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica Particular de Loja y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales. Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, son de mi exclusiva responsabilidad.

Adicionalmente declaro conocer y aceptar la disposición del Art. 88 del Estatuto Orgánico de la Universidad Técnica Particular de Loja que en su parte pertinente textualmente dice: “Forman parte del patrimonio de la Universidad la propiedad intelectual de investigaciones, trabajos científicos o técnicos y tesis de grado o trabajos de titulación que se realicen con el apoyo financiero, académico o institucional (operativo) de la Universidad”

f).....

Autor: César Alberto Jaramillo Eras

Cedula: 1105027385

## DEDICATORIA

Esta tesis la dedico a Dios por darme la salud, el amor, la sabiduría y la paciencia para poder culminarlo y a la Virgen del Cisne por guiarme cada día y darme la fuerza suficiente para seguir adelante.

Dedico especialmente a mis padres Hugo, Delia a mis abuelitos Mercedes, Celin, Teodora y Lucas (+), por ser lo mejor en mi vida, recuerden que todo esto nunca hubiera sido posible sin su apoyo incondicional, gracias porque entendieron mis ausencias y mis malos momentos, que a pesar de que en algunos momentos no estuvieron a mi lado para saber cómo iba mi proceso en mis estudios.

A mi querido hermano Daniel, como un incentivo para que se esfuerce en sus metas, y que sepa que ningún objetivo que nos propongamos en este mundo, con un poco de esfuerzo es imposible.

Finalmente, a mi querida novia Viviana gracias por tu apoyo incondicional en todo este tiempo, también es un logro para ti, ánimos a seguir adelante.

César A Jaramillo E.

## **AGRADECIMIENTO**

Este trabajo realizado en la Universidad Técnica Particular de Loja es un esfuerzo en el cual indirectamente han participada distintas personas ayudándome a realizar la programación, opinando sobre el tema, corriéndome, teniéndome paciencia, dando animo en los momentos difíciles y en los momentos de felicidad que tuve durante el desarrollo de este trabajo.

Al Dr. Fernando Oñate, un especial agradecimiento primero por haberme acogido y ayudado en la realización de este trabajo, por todas sus enseñanzas y consejos como persona y docente.

A mis amigos Pedro y Héctor por seguir adelante en la culminación de este trabajo y no rendirnos a pesar de todo. A mi amigo Jorge por ayudarme en el desarrollo de este trabajo infinitamente gracias. A Jackson por darme ánimos gracias amigo.

Estas palabras nunca serán suficientes para agradecerles infinitamente por todo lo que han hecho por mí.

César A Jaramillo E.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

APROBACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN.....	ii
DECLARACIÓN DE AUTORÍA Y CESIÓN DE DERECHOS.....	iii
DEDICATORIA .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	vi
ÍNDICE DE TABLAS .....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
RESUMEN.....	1
ABSTRACT .....	2
INTRODUCCIÓN.....	3
CAPÍTULO I: ESTADO DEL ARTE .....	5
1.1. Modelos hidrológicos.....	6
1.2. Balance Hídrico. ....	7
1.2.1. Balance hídrico de Thornthwaite Y Mather. ....	8
1.2.2. Evapotranspiración.....	11
1.2.3. Escorrentía .....	12
1.2.4. Capacidad de almacenamiento de agua del suelo o reserva. ....	12
1.2.5. Caudal.....	13
1.3. Herramientas informáticas.....	14
1.3.1. Python.....	14
1.3.2. PyQt5.....	14
1.3.3. Qt Designer.....	14
1.3.4. Java Eclipse Neon 3.0.....	14
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA .....	16
2.1. Metodología general.....	17
2.2. Zona de estudio.....	17
2.2.1. Ubicación y características de la zona de estudio.....	17

2.3.	Recopilación de datos. ....	18
2.3.1.	Datos de temperatura y precipitación.....	18
2.4.	Modelo hidrológico.....	19
2.5.	Metodología de programación. ....	21
2.5.1.	Herramientas virtuales.....	21
2.5.2.	Cálculo de datos previos.....	21
2.5.3.	Cálculo de la Evapotranspiración por el método de Thornthwaite.....	22
2.5.4.	Cálculo del Balance Hídrico por el método de Thornthwaite & Mather.....	24
2.6.	Diagrama de flujo.....	27
CAPÍTULO III: ANÁLISIS DE RESULTADOS .....		29
3.1.	Utilización del software .....	30
3.2.	Software. ....	30
3.2.1.	Ventana de Inicio.....	30
3.2.2.	Ventana Principal. ....	30
3.2.3.	Ventana de Configuración. ....	31
3.2.4.	Procesamiento de datos. ....	33
3.2.4.1.	Ventana de Estaciones.....	33
3.2.5.	Salida de datos.....	34
3.2.5.1.	Ventana de Evapotranspiración.....	34
3.2.5.2.	Ventana de Balance Hídrico.....	35
3.3.	Resultados en Microsoft Excel.....	47
CONCLUSIONES .....		48
RECOMENDACIONES.....		49
BIBLIOGRAFÍA.....		50
ANEXOS.....		56
Anexo 1: Estación meteorológica H0180 - variable de temperatura .....		57
Anexo 2: Estación meteorológica M0180 - variable de precipitación .....		57
Anexo 3: Factor de corrección por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una – Latitud Norte.....		58

Anexo 4: Factor de corrección por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una – Latitud Sur.....	58
Anexo 5: Cálculo de caudales en BaWare y en Excel. ....	59

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Valores sugeridos acerca de la disponibilidad de agua, según combinaciones de textura edáfica y vegetación. ....	13
---	----

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Subcuenca del río El Pindo.....	17
Figura 2. Subcuenca del río El Pindo.....	18
Figura 3. Diagrama de flujo metodológico del Balance Hídrico de la subcuenca del río El Pindo. .....	20
Figura 4. Diagrama de flujo metodológico de ventanas para el software.....	28
Figura 5. Interfaz gráfica de la ventana de inicio de BaWare .....	30
Figura 6. Interfaz gráfica de ventana principal de BaWare .....	31
Figura 7. Interfaz gráfica de la ventana.....	33
Figura 8. Interfaz gráfica de ventana estaciones de BaWare. ....	34
Figura 9. Esquema para cálculo de evapotranspiración potencial propuesto por Thornthwaite .....	34
Figura 10. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	36
Figura 11. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	37
Figura 12. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	38
Figura 13. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	39
Figura 14. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	40
Figura 15. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	41
Figura 16. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	42
Figura 17. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	43
Figura 18. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	44
Figura 19. Temperatura subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0.....	45
Figura 20. Evapotranspiración subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0.....	45
Figura 21. Déficit subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0 .....	46
Figura 22. Excesos subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0.....	46
Figura 23. Caudal subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0.....	47

## RESUMEN

La necesidad de conocimiento de los recursos hídricos en una cuenca se puede hacer cuantificando las diferentes variables que intervienen en el balance hídrico, por consiguiente, es necesario la aplicación de modelos hidrológicos mensuales. La presente investigación tiene el objetivo de desarrollar un software para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas. Se ha optado por la aplicación del modelo hidrológico de Thornthwaite & Mather para el cálculo del balance hídrico. La interfaz gráfica del software se desarrolló en PyQt5, el trabajo informático de la programación de los módulos de cálculo para el balance hídrico, se lo llevó a cabo en la plataforma Java Eclipse Neon 3.0 usando el lenguaje de programación Python.

Este trabajo se realizó en el periodo hidrológico 2000 al 2010 en la subcuenca del río El Pindo. Como resultado final de esta investigación se obtuvo un software para cálculo de balances hídricos en cuencas hidrográficas.

**Palabras claves:** Balance hídrico. Modelo hidrológico. Evapotranspiración potencial. Thornthwaite y Mather

## ABSTRACT

The need for knowledge of water resources in a basin can be done by quantifying the different variables involved in the water balance, therefore it is necessary to apply monthly hydrological models. The objective of this research is to develop software for the calculation of the water balance in hydrographic basins. The application of Thornthwaite & Mather's hydrological model has been chosen for the calculation of the water balance. The graphical interface of the software was developed in PyQt5, the computer work of programming the calculation modules for the water balance was carried out on the Java Eclipse Neon 3.0 platform using the Python programming language.

This work was carried out in the hydrological period 2000 to 2010 in the sub-basin of the El Pindo river. The final result of this research was a software for calculating water balances in hydrographic basins.

**Keywords:** Water balance. Hydrological model. Potential evapotranspiration. Thornthwaite & Mather

## INTRODUCCIÓN

El agua es esencial para la vida y su escasez perjudica profundamente a la oportunidad de crecimiento de una región. Evaluar los sistemas hídricos en una cuenca inevitablemente involucra predecir el comportamiento de las mismas y su respuesta ante cambios hidrológicos Zúñiga et al., (2012).

Un balance hídrico representa la evaluación de estos sistemas ante la necesidad de conocer la disponibilidad del agua, planificación y gestión de los recursos hídricos en una cuenca.

Elaborar estos balances hídricos y pronosticar los impactos que ocurren dentro del sistema, demanda de modelos hidrológicos que ayuden a entender de mejor manera los procesos del ciclo hidrológico en una cuenca hidrográfica.

El resultado final depende tanto de la precisión de los datos como de la calidad de la información que se encuentra disponible, lo cual condiciona la selección de un modelo hidrológico y las estrategias para construirlo, de esta forma el modelo se convierte en un receptor de información, que se alimenta de los datos conocidos de la cuenca para obtener información nueva y mejorar el entendimiento de los procesos que ocurren dentro de ella.

El método del balance hídrico en teoría es sencillo, se basa en el principio de continuidad (Gálvez, 2011) donde se agrupan las variables que intervienen en el ciclo hidrológico, se cuantifican las entradas como la precipitación a veces agua de riego y también se contabilizan las salidas como la evapotranspiración potencial, escorrentía superficial, almacenamiento superficial, el cual se halla condicionado a un espacio territorial (cuenca) y asociado a la variable temporal (tiempo) (Domecq, Civil, Baez, & Meteorología, 2007).

El cálculo del balance hídrico en una cuenca facilita la obtención información sobre: el volumen anual de escurrimiento o excedentes, el período en el que existe excedentes, el período en el que se produce un déficit de agua y el cálculo de demanda de agua para optimizar el uso del agua en ese período (Fernández & Fattorelli, 2011).

En este contexto se planteó un proyecto que consta de tres fases, siendo la primera fase el presente trabajo de investigación, que consiste en desarrollar un software cuyo nombre es Balance Water Software (BaWare) para cálculo de balances hídricos.

Para el área de estudio se ha tomado la subcuenca del río El Pindo donde se aplica el modelo hidrológico propuesto por Thornthwaite & Mather (1955) el cual ha permitido crear una herramienta para la representación y simulación de balances hídricos en cuencas hidrográficas.

La segunda fase consiste en la calibración automática de los parámetros que integran el balance hídrico. Finalmente, la tercera fase es la que se comprueban los resultados obtenidos por el software con datos reales de cuencas del país y datos de otras cuencas del mundo. Las dos últimas fases serán desarrolladas en futuros trabajos.

Para la correcta operación de este proyecto se ha planteado como objetivo general desarrollar un software para el cálculo del balance hídrico en cuencas hidrográficas y como objetivos específicos: Estudiar la variabilidad espacial y temporal de los diferentes términos del balance hídrico, recopilar metodologías adecuadas para el cálculo del balance hídrico y sus componentes y desarrollar y codificar los diferentes términos del balance hídrico en módulos de cálculo ejecutables.

Para el desarrollo y verificación del proyecto se recopiló la información de la subcuenca del río El Pindo, así como la información de las estaciones meteorológicas. El método que se utilizó para el cálculo del balance hídrico es el método de Thornthwaite & Mather.

Con este estudio se analizan los valores de caudal del balance hídrico, a partir del procesamiento de datos de precipitación y temperatura media mensual, con lo cual se obtiene la evapotranspiración potencial mensual y seguidamente se comienza con el proceso de cálculo para el balance hídrico que determina los índices de excesos y déficit hídricos.

La presente investigación consta de los siguientes capítulos:

Capítulo I: Describe las generalidades básicas del balance hídrico, del cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite y de la metodología utilizada para la generación del software.

Capítulo II: Comprende la metodología de programación que se empleó en el desarrollo del software y describe la zona de estudio que se empleó para la verificación del software

Capítulo III: Contiene el análisis y discusión de resultados obtenidos con el software.

Capítulo IV: Contiene las conclusiones, recomendaciones y anexos del proyecto.

**CAPÍTULO I:  
ESTADO DEL ARTE**

## **1.1. Modelos hidrológicos.**

La hidrología es una ciencia primordial en Ingeniería del Agua necesaria para su uso por profesionales dedicados a proyectos de recursos hídricos (Estévez et al., 2014). Según Tucci (1998) la base del estudio de la hidrología es la comprensión del ciclo hidrológico, de sus procesos e interrelaciones tanto superficiales y subsuperficiales.

Si bien las técnicas y métodos de medición de los componentes del ciclo hidrológico han evolucionado en el tiempo. Sin embargo, dentro del ciclo hidrológico hay componentes que son difíciles de medir o a su vez existen pocas herramientas que calculen el correcto funcionamiento de estas variables.

Bajo este marco es donde entran los modelos hidrológicos que según Javier & Sanjuan (2010) un modelo hidrológico no es la realidad, sino la representación conceptual o numérica de la realidad. Es una herramienta que mide la representación de los flujos y procesos del agua en una cuenca hidrográfica para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento de los diferentes componentes del ciclo hidrológico.

Para Devia et al., (2015) los modelos hidrológicos hoy en día son considerados una herramienta para la gestión de los recursos hídricos en cuencas hidrográficas y del medio ambiente.

El mejor modelo hidrológico es el que más se aproxima a la realidad con el menor uso de parámetros y complejidad. Beven & Keith, (2009) mencionan que la idea de los modelos hidrológicos se han venido desarrollado en las últimas tres décadas.

Entender el ciclo hidrológico implica entender la respuesta de la cuenca de manera continua en el tiempo y espacio, por tal razón la base de la modelación hidrológica es la modelación de las cuencas hidrográficas.

La cuenca hidrográfica considera también la dinámica del agua en el subsuelo, por lo que al incluir los aspectos geológicos, accede a identificar la localización de acuíferos y sus zonas de recarga (Vega, 2015). Estos flujos o procesos incluyen por ejemplo, las lluvias, los escurrimientos superficiales, la evaporación desde los embalses y desde las plantas, la infiltración en los suelos y la acumulación del flujo en las distintas capas de los suelos profundos, es decir los acuíferos, como resultado de ello los modelos hidrológicos se usan para:

- Extrapolar potenciales condiciones futuras a partir de condiciones actuales.
- Organizar de mejor manera la gestión y el planeamiento de los recursos hídricos.
- Realizar la modelación hidrológica de otros procesos.
- Una mejor comprensión del ciclo hidrológico de las cuencas hidrológicas.

Según Mejuto, Mayorga, & Fernandez (1997) los modelos hidrológicos pueden clasificarse en modelos matemáticos, físicos y analógicos. Un modelo matemático de una cuenca hidrológica puede ser de tres tipos: 1) teórico, 2) conceptual y 3) empírico (Ponce, 1989).

Song et al., (2015) dice que los modelos distribuidos para hidrología en cuencas son para comprender, reproducir y predecir el comportamiento de los sistemas hidrológicos. Sin embargo, estos modelos todavía son imperfectos para procesos físicos, porque utilizan datos de observación de incertidumbre para estimar los datos del modelo.

Según la experiencia llevada a cabo en la cuenca del río Chinchiná localizada en la región centro sur del departamento de Caldas, Colombia Ocampo et al., (2014) determinan que para efectuar el balance hídrico fueron empleados modelos agregados a escala mensual, de tipo conceptual que preservan el balance hídrico y modelos auto regresivos.

Los modelos conceptuales de balance hídrico a escala mensual simulan los procesos hidrológicos por la conceptualización de la cuenca como un conjunto de tanques interconectados a través de los cuales el agua pasa de la entrada como lluvia a la salida como caudal (Ocampo & Vélez, 2014).

A partir de esta información se decidió que el mejor método a adoptar para esta investigación era el modelo hidrológico de Thornthwaite & Mather (1955) este es un modelo matemático de tipo conceptual, uno de los primeros modelos de balance hídrico a escala mensual que ayuda a la modelación del ciclo hidrológico en cuencas hidrográficas.

## **1.2. Balance Hídrico.**

Un balance hídrico analiza la entrada y salida de agua de una cuenca hidrográfica en un volumen de control o sector a lo largo del tiempo, toma en consideración los cambios en el almacenamiento interno bajo diferentes escenarios, es decir cuantificar la oferta de agua que produce la cuenca durante el ciclo hidrológico (Llerena, 2003).

La necesidad del conocimiento de los fenómenos hidrológicos en una cuenca, hace necesario la aplicación de balances hídricos anuales que faciliten evaluar el periodo y la disponibilidad espacial del agua, siendo una herramienta útil para utilizar de manera más racional el recurso agua, su manejo, control y redistribución. Además de cuantificar los distintos fenómenos hídricos como: evapotranspiración, escorrentía e infiltración (Anisfeld, 2010).

El método del balance hídrico es una técnica que se utiliza para conocer características de una cuenca hidrográfica, solucionar problemas hidrológicos, evaluar los recursos hídricos de una cuenca, calcular periodos de déficit o exceso de agua, definir la hidrología de una zona y para la planificación hidráulica.

Este método utiliza la ejecución del principio de conservación de la masa o la ecuación de continuidad, siendo esta una ecuación muy simple aunque la cuantificación de sus términos es complicada por falta de medidas directas y por la variación espacial de la temperatura y precipitación (El-Naggar, 2007).

El método del balance hídrico se utiliza para calcular la evapotranspiración real (Martínez Alfaro et al., 2005)

$$\textit{Entradas} - \textit{Salidas} = \textit{Almacenamiento} \quad \text{Ec. (1)}$$

Con referencia a lo anterior las entradas en la ecuación del balance hídrico son la precipitación en cualquiera de sus formas. Las salidas incluyen la evapotranspiración y la salida de agua superficial y subterránea desde la cuenca, cuando las entradas superan a las salidas el volumen de agua almacenada aumenta y cuando ocurre lo contrario disminuye.

El método más utilizado y práctico para realizar un balance hídrico es el establecido por Thornthwaite & Mather (1955). Este método ha sido aplicado por Lozada & Sentelhas (2003) donde comparan los valores de los déficits y excesos hídricos estimados a partir de los balances hídricos climáticos normales y secuenciales, en las localidades de Bramón, Venezuela, Piracicaba y Brasil, utilizaron la precipitación, la temperatura y la capacidad de almacenamiento de agua del suelo.

Así mismo McCabe & Markstrom (2007) desarrollaron un programa mensual de balance de agua, para examinar los diferentes componentes del ciclo hidrológico, con la metodología de Thornthwaite, los cálculos de los componentes del balance hídrico se realizaron para una ubicación específica.

#### **1.2.1. Balance hídrico de Thornthwaite Y Mather.**

El balance hídrico es el proceso de contabilización de agua en el suelo (Tadeu, Tommaselli, & Leal, 2015). En el método del balance hídrico propuesto por Thornthwaite & Mather (1955) el suelo puede ser visto como un reservorio de agua, con una capacidad máxima de agua para retenerla, el agua entra al suelo a través de la precipitación y en respuesta a las condiciones atmosféricas se tiene pérdida de agua que es representada por la evapotranspiración potencial.

Thornthwaite & Mather (1955) parten de los siguientes supuestos para la aplicación del modelo hidrológico:

- La pérdida de agua en el suelo está en función de la evapotranspiración potencial y de la capacidad de reserva de agua del suelo disponible.

- La capacidad de reserva de agua del suelo disponible o simplemente reserva es la capacidad máxima de agua que el suelo puede retener y está en función del sistema radicular de la vegetación existente y de la textura del suelo.
- Si la cantidad de agua que entra al suelo es mayor que la capacidad de reserva de agua del suelo disponible, entonces este exceso puede perderse por gravedad para alimentar las aguas subterráneas o por escorrentía superficial.

Se asume un valor apropiado vegetación - suelo, el método del balance hídrico ayuda a evaluar la variación de la reserva, la evapotranspiración real, el déficit hídrico y el exceso hídrico en el suelo para un determinado periodo.

Así, el balance hídrico puede ser calculado para representar la entrada y salida de agua en el suelo para un determinado período, siendo la aplicación del método de Thornthwaite & Mather el más óptimo para condiciones mensuales.

Son varios los factores que influyen en el cálculo del balance hídrico, siendo los siguientes los principales:

- La temperatura la cual es un factor importante para el cálculo de la evapotranspiración potencial, por ende, es una variable determinante para calcular balances hídricos en cuencas hidrográficas pues interviene al inicio como un parámetro necesario. Viene expresada en °C se sigue la metodología de Thornthwaite (1948).

Según GWP & Sociedad Geografica de Lima (2011) la temperatura es la cantidad de energía solar, retenida por el aire, es una medida que depende de la radiación solar.

- De igual manera sucede con la precipitación, el agua que precipita es cualquier producto de condensación del agua atmosférica que cae sobre la superficie terrestre, tanto en forma líquida como llovizna, lluvia o sólida como la nieve o el granizo.

Estas precipitaciones son producidas por una transformación de la temperatura o de la presión, la cantidad de precipitación se mide en milímetros con un sensor llamado pluviómetro (Gálvez, 2011).

Según la FAO (2013) el agua que precipita en forma de lluvia puede tomar los siguientes caminos: 1) Quedar almacenada en el follaje de las plantas; 2) Alcanzar la superficie del suelo e infiltrarse; 3) Alcanzar la superficie del suelo y escurrir.

Dada esta variación espacial y temporal de las precipitaciones en las cuencas hidrográficas, la calidad de los registros de la precipitación dependerá de la ubicación de las estaciones pluviométricas y climatológicas, así como del tiempo durante el cual se almacenan los datos.

Una estación climatológica es la que puede realizar observaciones del tiempo atmosférico actual como: precipitaciones, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento,

radiación solar, evaporación, generalmente estas estaciones realizan tres mediciones al día (Abel, Cruz, & Perdomo, 2013).

La precipitación media de la cuenca se estimó mediante el método de los polígonos de Thiessen, el cual consiste en determinar el área de influencia alrededor de cada estación. Los polígonos de Thiessen se aplican a cuencas que poseen una distribución no uniforme de estaciones, sean climatológicas o pluviográficas (Monsalve Saénz, 1995)

Según Alonso et al., (2004), se basan en el siguiente criterio: Se asignara a cada punto de la cuenca la precipitación registrada en el pluviómetro más cercano, posteriormente se unen mediante líneas de trazo discontinuo las estaciones adyacentes, el resultado es una serie de triángulos, luego se dibujan, las mediatrices de cada uno de los triángulos, estas intersecciones de aquellas mediatrices antes trazadas definen un conjunto de polígonos, a cada polígono se le asigna la precipitación correspondiente a la estación que queda en su interior.

Un ejemplo de la aplicación de los polígonos de Thiessen se puede encontrar en Córdoba, Zea, & Murillo (2006) ellos utilizaron los polígonos de Thiessen para calcular la precipitación media de la cuenca del río Quito en el departamento de Choco, Colombia con el fin de elegir un método que cuantifique los volúmenes de precipitación para la estimación del recurso hídrico en la cuenca.

Por otra parte en (Artigas et al., 2014) utilizan y validan el modelo de balance hídrico de Thornthwaite & Mather a través de datos medios mensuales de temperatura y precipitación medidos en estaciones climatológicas.

En otro ejemplo Ruiz Álvarez et al., (2012) señalan que realizaron el balance hídrico para el estado de Tabasco México, con el objetivo de definir las épocas y regiones con déficit o exceso de humedad, ellos aplicaron la metodología que propuso Thornthwaite & Mather. Ruiz Álvarez et al., (2012) seleccionaron 40 estaciones climatológicas con datos mensuales de temperatura y de precipitación. A partir de la evapotranspiración de referencia la cual se calculó por el método de Hargreaves se realizó el balance hídrico, así encontraron cuatro regiones donde la humedad se comporta de modo diferente los mayores excesos son al sur del estado de Tabasco México.

Resultados similares han sido reportados también en otras publicaciones por ejemplo Singh et al., (2004) realizó un balance hídrico para calcular los periodos de déficit y excedente con ellos consiguió facilitar una mejor gestión de los recursos hídricos disponibles en la cuenca Nana Kosi, India, estos resultados han reforzado nuestro punto de vista sobre el modelo de Thornthwaite & Mather.

### **1.2.2. Evapotranspiración.**

Uno de los aspectos más importantes en estudios sobre hidrología y climatología es el cálculo de la evapotranspiración, según López Avendaño et al., (2015). Su conocimiento y estimación de la evapotranspiración es decisivo para la planeación y adecuada gestión de los recursos hídricos.

Higgins et al., (2011) dice que efectivamente la evapotranspiración debe intervenir en el balance hídrico de una cuenca, porque esto asegura la conservación del ciclo hidrológico y que la energía del sol recibido por la Tierra retorne a la atmosfera.

La evapotranspiración se define como la cantidad de agua que desde el estado sólido o líquido pasa a la atmosfera a estado de vapor ya sea por evaporación directa o por transpiración de las plantas y se expresa en milímetros por unidad de tiempo (Martínez Alfaro et al., 2005). Esta unidad expresa la cantidad de agua que una superficie con cultivos ha perdido en unidades de altura de agua (Allen G. et al., 2006).

Según Fontenot (2004) la evapotranspiración está en función de varios factores meteorológicos, entre ellos la temperatura, la radiación solar y la radiación atmosférica, la temperatura del aire y velocidad del viento.

La evapotranspiración es una variable difícil de estimar con precisión pues depende de factores ligados a la meteorología, a la vegetación y al suelo (Martínez Alfaro et al., 2005). Las principales variables que influyen para el cálculo de la evapotranspiración según Alocén (2007) son: 1) el clima; 2) el cultivo y 3) el suelo.

De acuerdo a la investigación realizada por Thornthwaite (1948) distingue dos clases de evapotranspiración, la evapotranspiración potencial (ETP) y la evapotranspiración real (ETR).

La evapotranspiración potencial se define como el volumen de agua que regresa a la atmósfera por evaporación directa del agua en el suelo, de las aguas estancadas y por la transpiración de las plantas (Hansen, Israelson, & Stringham, 1980).

Thornthwaite, (1948) dijo que la evapotranspiración potencial es la máxima cantidad de agua que puede transferir a la atmosfera un suelo cubierto completamente por vegetación, que crece en condiciones óptimas sin falta de agua.

Según Huo, Dai (2013) las regiones áridas del mundo se verán afectadas con el aumento o disminución de la evapotranspiración potencial, esto dará una alerta para la gestión de los recursos hídricos.

En términos generales, la evapotranspiración real puede ser definida como el volumen de agua que pasa a la atmosfera en forma de vapor como consecuencia de la evaporación directa y de la transpiración de las plantas (Martínez Alfaro et al., 2005).

Por otro lado, las correctas investigaciones de la evapotranspiración real de un cultivo permiten medir la disponibilidad del recurso y determinar el dimensionamiento de las obras hidráulicas, en la agricultura. Una característica importante de la evapotranspiración real es que se calcula indirectamente al usar la evapotranspiración potencial, la cual es corregida por un coeficiente de cultivo específico para cada especie agrícola.

Por tal razón la ecuación para el cálculo de la evapotranspiración potencial que recomienda Thornthwaite es también aplicable a zonas de latitudes medias y a regiones áridas y semiáridas (Martínez Alfaro et al., 2005).

### **1.2.3. Escorrentía**

Según FAO (2013) la escorrentía puede ser superficial o subsuperficial, la distribución está determinada por la infiltración y capacidad de almacenamiento de agua del suelo, los cuales dependen de factores geológicos, edáficos, climatológicos e hidrológicos.

La escorrentía superficial es la parte de la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje (ríos, quebradas, lagos) desplazándose por encima de la superficie del terreno por la acción de la gravedad (Juncosa, 2005).

Las lluvias muy intensas que superan la capacidad de almacenamiento de agua del suelo o que caen sobre superficies de terrenos poco permeables, producen escorrentía que puede ser aprovechada para diferentes usos.

En cuencas hidrográficas la escorrentía superficial no es controlada dando origen a fenómenos como la erosión del suelo e inundaciones. La investigación llevada a cabo por (Lagadec et al., 2016) en los últimos años ha mostrado que las características del suelo como el tipo, espesor, rugosidad permeabilidad, contenido de agua inicial, uso de la tierra, topografía y las precipitaciones son factores que influyen para el aumento de la escorrentía superficial.

### **1.2.4. Capacidad de almacenamiento de agua del suelo o reserva.**

En un reciente artículo de Marco & Torrico (2011) menciona que el suelo retiene agua de dos formas 1) Humedad libre en los poros; 2) Humedad higroscópica por ende es importante calcular la cantidad máxima de agua que puede ser retenida en el suelo esto se denomina, capacidad de almacenamiento de agua del suelo o reserva.

En vista de todo lo que se ha dicho hasta ahora, se puede decir que la reserva representa la cantidad de agua en milímetros que es capaz de absorber el suelo para el crecimiento normal de las plantas (Tadeu et al., 2015).

La reserva está en función del sistema radicular de la vegetación y de la textura del suelo, se suele calcular como la diferencia entre los valores de la capacidad de campo y punto de marchitez (Almorox Alonso, 2007).

La capacidad de agua disponible de un suelo varía, depende de la cantidad y tamaño de sus poros y de su textura, estructura y contenido de materia orgánica. La tabla 1 muestra los datos experimentales sobre los valores sugeridos acerca de la disponibilidad de agua en el suelo plateados por Thornthwaite & Mather (1957).

Tabla 1. Valores sugeridos acerca de la disponibilidad de agua, según combinaciones de textura edáfica y vegetación.

Vegetación	Textura del suelo	Disponibilidad de agua (en % del volumen)	Profundidad de las raíces (m)	Disponibilidad de agua en la zona radical (mm)
<b>Cultivos con raíces someras (espinacas, guisantes, zanahorias...).....</b>	Arenosa fina	10	0.50	50
	Franco - arenosa fina	15	0.50	75
	Franco - limosa	20	0.62	125
	Franco - arcillosa	25	0.40	100
	Arcillosa	30	0.25	75
<b>Cultivos con raíces moderadamente profundas (maíz, cereales, algodón, tabaco...).....</b>	Arenosa fina	10	0.75	75
	Franco - arenosa fina	15	1.00	150
	Franco - limosa	20	1.00	200
	Franco - arcillosa	25	0.80	200
	Arcillosa	30	0.50	150
<b>Cultivos con raíces profundas (alfalfa, pastos, arbustos).....</b>	Arenosa fina	10	1.00	100
	Franco - arenosa fina	15	1.00	120
	Franco - limosa	20	1.25	250
	Franco - arcillosa	25	1.00	250
	Arcillosa	30	0.67	200
<b>Huertos</b>	Arenosa fina	10	1.50	150
	Franco - arenosa fina	15	1.67	250
	Franco - limosa	20	1.50	300
	Franco - arcillosa	25	1.00	250
	Arcillosa	30	0.67	200
<b>Bosques maduros</b>	Arenosa fina	10	2.50	250
	Franco - arenosa fina	15	2.00	300
	Franco - limosa	20	2.00	400
	Franco - arcillosa	25	1.60	400
	Arcillosa	30	1.17	350

Fuente: (C. W. Thornthwaite & Mather, 1957)

Elaboración: (C. W. Thornthwaite & Mather, 1957)

### 1.2.5. Caudal.

Volumen de agua que pasa por determinada sección transversal del cauce del río en un intervalo de tiempo y se expresa en m<sup>3</sup>/s o l/s (Cahuana Andia & Yugar Morales, 2009).

### **1.3. Herramientas informáticas.**

#### **1.3.1. Python.**

Python es un lenguaje de programación poderoso, expresivo, legible y de alto nivel por consiguiente es fácil de aprender (Gracia, 2003). Cuenta con estructuras de datos eficientes y un enfoque simple pero efectivo a la programación orientada a objetos, que también puede utilizarse para el desarrollo web.

Su naturaleza es Open Source por esa razón Python es gratuito, el lenguaje Python se puede crear aplicaciones en todo tipo de áreas y plataformas, desarrollar páginas Web (Guido, 2017).

Python contiene una variedad muy extensa de librerías, que ayudan a realizar tareas sin necesidad de programar (Covantec & Mara, 2016).

#### **1.3.2. PyQt5.**

Según Esta & Código (2004) Qt es una biblioteca multiplataforma, creadas para desarrollar aplicaciones e interfaces gráficas, es un librería totalmente orientada a objetos.

Qt es desarrollado con el lenguaje de programación C++ de forma nativa pero existen módulos para otros lenguajes de programación como ser C, Python (PyQT), Java (QT Jambi), Perl (PerlQT), Gambas (gb.qt), Ruby (QTRuby), PHP (PHP-QT), Mono (Qyoto), entre los más reconocidos.

#### **1.3.3. Qt Designer.**

Qt Designer es una herramienta de desarrollo que ayuda a crear interfaces graficas de usuario, los componentes creados con Qt Designer pueden hacer uso del mecanismo de conexión conocido como signal – slots (González Gutiérrez, 2009).

Los forms en español formas que se crean al usar Qt Designer acaban traduciéndose en código C++. La interfaz gráfica de usuario (GUI) resultante en Qt Designer puede previsualizarse para comprobar el aspecto y su comportamiento además puede usarse para desarrollar la aplicación completa o ciertas partes de aplicaciones de escritorio (Buckingham, 2008).

#### **1.3.4. Java Eclipse Neon 3.0**

La plataforma Java Eclipse Neon 3.0 es un entorno de desarrollo integrado (IDE) que ayuda a la construcción de una variedad de herramientas para el desarrollo de proyectos.

En la web oficial de Eclipse ([www.eclipse.org](http://www.eclipse.org)), se define como “An IDE for everything and nothing in particular” (un IDE para todo y para nada en particular). Eclipse es, en el fondo, únicamente un almacén (workbench) sobre el que se pueden montar herramientas de desarrollo para cualquier lenguaje, mediante la implementación de los plugins adecuados (Barzanallana, 2017)

Además se considera como un paquete adecuado para el desarrollo de Eclipse en Eclipse.org; basado en la Plataforma Eclipse que agrega PDE, Git, Marketplace Client, código fuente y documentación del desarrollador.

Incluye un editor de texto que resalta la sintaxis del lenguaje, marca los errores y tiene autocompletado para nombres de funciones, clases y variables, de la misma forma podemos escribir código, compilar, ejecutar, depurar y usar múltiples herramientas cuenta con asistentes (wizards) que sirven como guía y ayuda para comenzar con un proyecto y así mismo como para el manejo del resto de las funciones.(Serrano, 2004)

Eclipse es una fundación sin ánimo de lucro apoyada por empresas y entidades que contribuyen a su desarrollo (Beaton & Rivieres, 2006).

**CAPÍTULO II:  
METODOLOGÍA**

## 2.1. Metodología general.

El enfoque metodológico empleado para este proyecto de investigación sigue el proceso esquematizado en la figura 1 y se describirá a detalle a lo largo del presente capítulo.

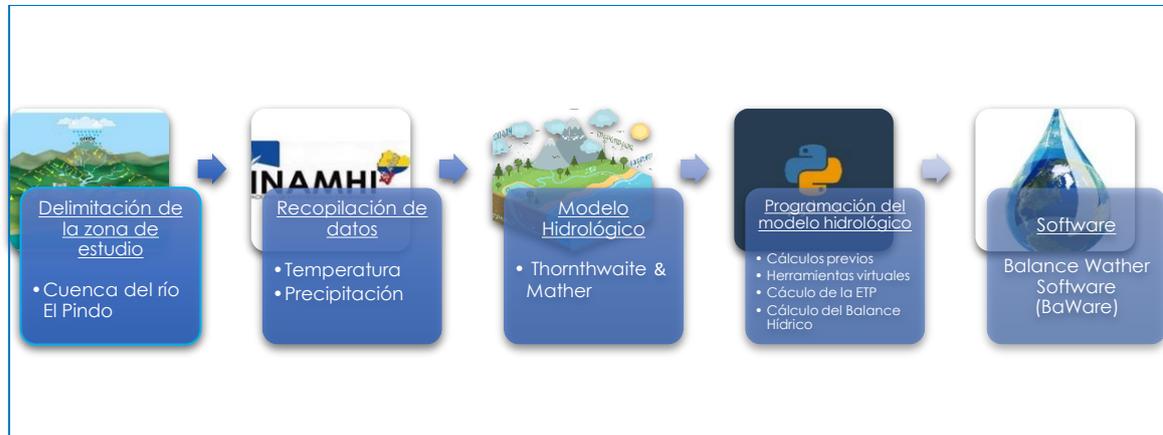


Figura 1. Subcuenca del río El Pindo

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Este trabajo se examinará para la subcuenca del río El Pindo, con el objetivo de conocer todas las variables climatológicas que involucra el cálculo del balance hídrico.

Para la realización de este proyecto de investigación, se ha optado por la aplicación del método de Thornthwaite & Mather, porque es un modelo hidrológico para cuencas hidrográficas que básicamente necesita datos de temperatura y precipitación, información que para este trabajo se encuentra disponible.

## 2.2. Zona de estudio.

### 2.2.1. Ubicación y características de la zona de estudio.

El desarrollo del presente proyecto se llevó a cabo en la subcuenca del río El Pindo, se encuentra ubicada en la región suroeste del Ecuador entre las provincias de Loja y El Oro. El Río Pindo es cabecera de la unidad hidrográfica Puyango en Ecuador.

El origen del recurso hídrico se encuentra ubicado entre los cantones de Zaruma y Portovelo. El río nace en la parte alta de la subcuenca y desciende a la parte baja de la cuenca a 520.00 msnm, donde se encuentra la estación hidrológica El Pindo AJ - H0587 a una latitud de 3° 45' 43" y 79° 38' 8" de longitud perteneciente al INAMHI.

Presenta cuatro afluentes principales: el río Calera, el río Amarillo, el río Luis y el río Ambocas, dan origen y forman el río Pindo. El clima de la subcuenca del río El Pindo se divide en ecuatorial de alta montaña y ecuatorial mesotérmico semihúmedo.

De acuerdo con Tapia Alvarado, (2016) el tipo de suelo del río El Pindo es de textura fina, media, a moderadamente gruesa, bien drenados, con capacidades limitadas de retención de

agua y con estabilidad estructural moderada. La disponibilidad hídrica del río El Pindo es usada principalmente para producción agrícola, turismo, entre otros.

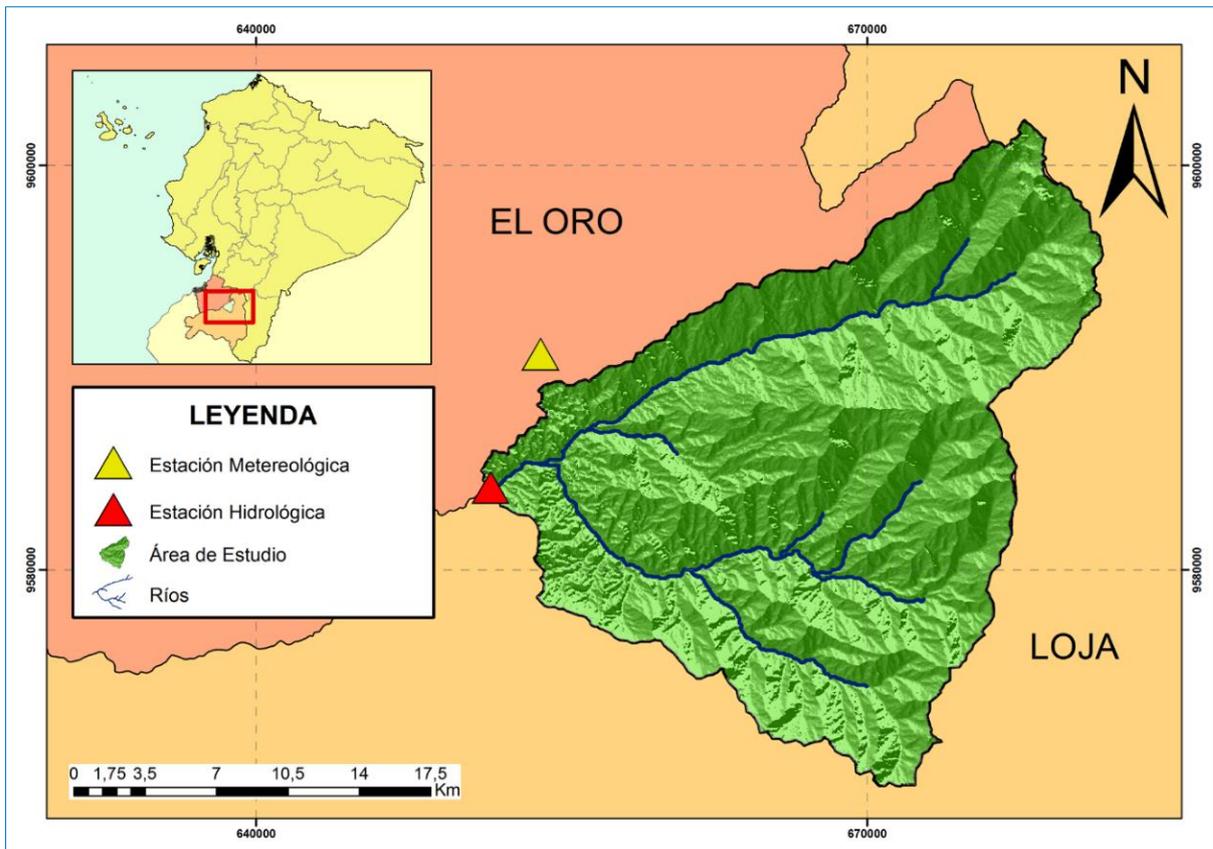


Figura 2. Subcuenca del río El Pindo  
Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

La subcuenca del río El Pindo cuenta con un área de 513.650 km<sup>2</sup>, esta cuenca hidrográfica presenta diversos cambios climáticos debido a las irregularidades geográficas, cuenta con pocas estaciones climatológicas por ende esto afectara la calidad de los datos los cuales ayudaran a calcular la evapotranspiración potencial.

### 2.3. Recopilación de datos.

#### 2.3.1. Datos de temperatura y precipitación.

El Servicio Meteorológico e Hidrológico Nacional del Ecuador (INAMHI) al tener la capacidad y la obligación de suministrar información vital sobre el tiempo, el clima y los recursos hídricos del pasado, presente y futuro presenta datos reales de estaciones climatológicas e hidrológicas alrededor de todo el Ecuador por tal motivo se ha tomado datos históricos de temperatura, precipitación y caudal para la subcuenca del río El Pindo.

Los datos fueron obtenidos de la estación climatológica Zaruma - M0180 situada a 3° 41' 51.1" de latitud y a 79° 36' 41.6" de longitud.

Se encuentra ubicada en la provincia de El Oro cantón Zaruma, contó con datos normales de temperatura y precipitación, los datos que se consideraron fueron mensuales, su ubicación espacial, así como su nombre y código como se puede observar en la figura 1.

Los datos fueron compilados en el anexo 1 en el cual se puede observar los datos de temperatura y en el anexo 2 datos de precipitación, todos estos datos son correspondientes a los años del 2000 al 2010, estos datos servirán para calcular la evapotranspiración potencial.

#### **2.4. Modelo hidrológico.**

El enfoque de la investigación adoptado para este estudio fue el modelo de Thornthwaite & Mather desarrollado en 1955 este es el modelo hidrológico de referencia, a partir de esto se hizo la evaluación de los recursos hídricos a nivel de cuenca hidrográfica.

Thornthwaite & Mather es un modelo distribuido para la simulación continua del ciclo hidrológico con el fin de lograr una estimación de los recursos hídricos a largo plazo. Este modelo hidrológico toma en cuenta las variaciones espaciales y temporales de los procesos hidrológicos en la subcuenca del río El Pindo, los cuales permitirán estimar un balance hídrico en la misma.

Según Khakbaz et al., (2012) la variabilidad espacial y temporal de las precipitaciones en una cuenca tiene impactos significativos en la respuesta hidrológica.

A continuación, se observa el diagrama de flujo metodológico del Balance Hídrico de la subcuenca del río El Pindo en la figura 3.

Este diagrama explica el método de Thornthwaite & Mather con el objetivo de facilitar la comprensión de la programación de los módulos de cálculo como la evapotranspiración, reserva, evapotranspiración real, déficit, excesos, escorrentía y caudal, todo a nivel mensual.

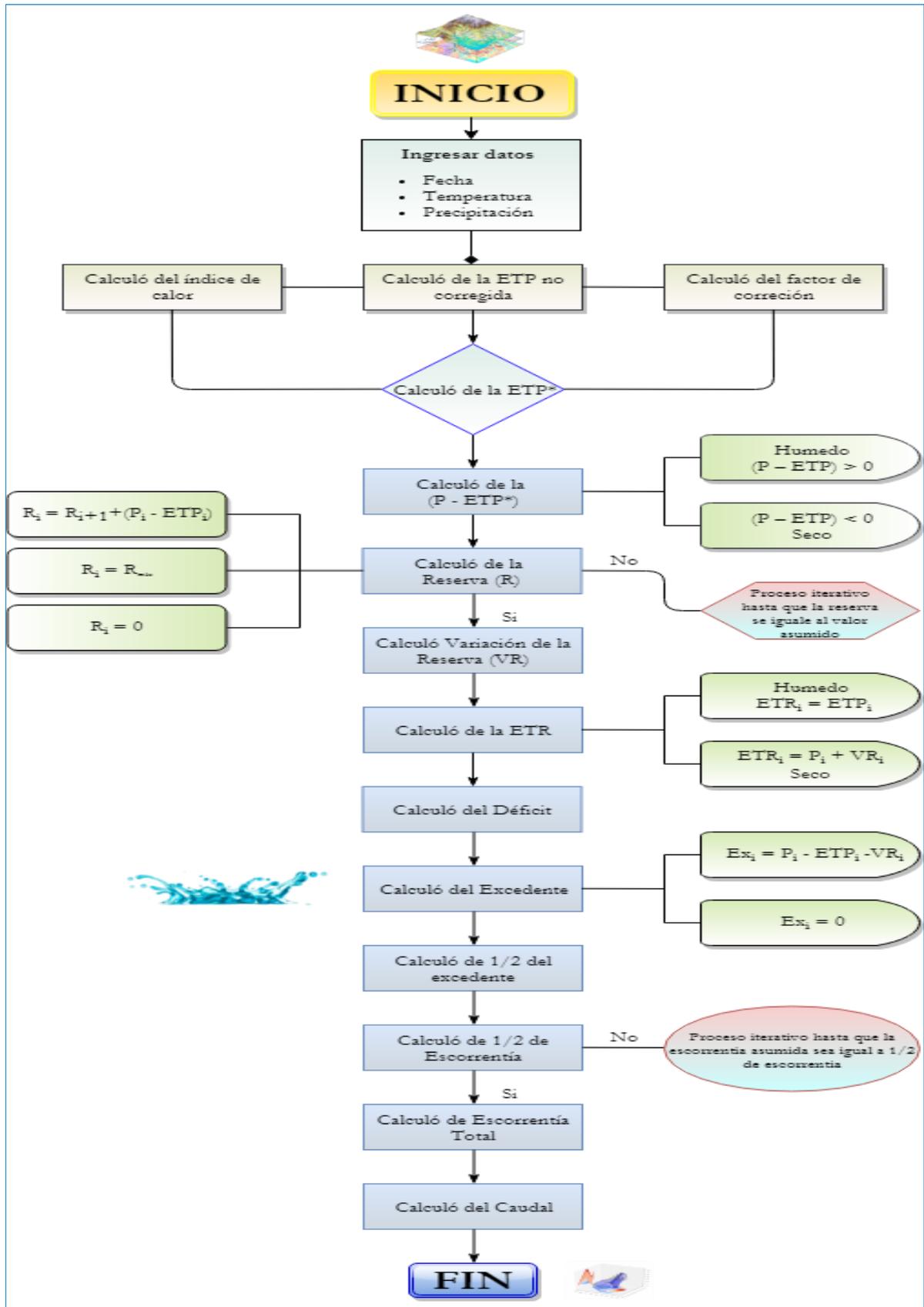


Figura 3. Diagrama de flujo metodológico del Balance Hídrico de la subcuenca del río El Pindo.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

## **2.5. Metodología de programación.**

En esta sección se describen las herramientas, las etapas de desarrollo del software, los métodos que se aplicaron para programar los módulos de cálculo y el diagrama de flujo del software.

Su desarrollo se llevó de la siguiente forma y en tres diferentes etapas:

- **Etapas de definición:** Planificación del proyecto para el desarrollo del software.
- **Etapas de desarrollo:** Diseño de la interfaz del software.
- **Etapas de mantenimiento:** Corrección de errores en ventanas y botones.

### **2.5.1. Herramientas virtuales.**

La interfaz gráfica del software se realizó en PyQt5. Y la programación de cada uno de los módulos de cálculo que contiene el software BaWare 1.0 para evaluar el balance hídrico se realizó en la plataforma Eclipse Java Neon 3.0 mediante el lenguaje de programación Python 3.6

### **2.5.2. Cálculo de datos previos.**

Previo a la programación de los módulos de cálculo del balance hídrico se realizó el siguiente proceso:

- Conocer el correspondiente valor de ponderación (área de influencia de la estación) ya sea para estaciones climatológicas o pluviográficas. Si en la cuenca de análisis existiera una sola estación climatológica, los coeficientes de ponderación para precipitación y temperatura serían del 100%.

Caso contrario, si en la cuenca de estudio existiera más de una estación se seguirá el siguiente proceso:

- Se une la ubicación de las estaciones con líneas rectas.
- Se trazan mediatrices a las líneas que unen las estaciones.
- Después se prolongan las mediatrices hasta el límite de la cuenca.
- Luego se calcula el área formada por las mediatrices para cada estación.
- Para terminar, el ponderador de área se calcula como el cociente entre el área asociada a cada estación y el área total.
- Estos valores son indispensables ya que en la ventana de Estaciones se ingresará dichos coeficientes con el objetivo de que calcule la precipitación media de la cuenca por el método de los polígonos de Thiessen. Internamente se ha programado dicho módulo de cálculo.

Este procedimiento previo, se lo realizó con el fin de homogenizar la precipitación que tiene la cuenca.

- Saber la cantidad de  $\alpha$  y  $\beta$ , más adelante en la sección 2.5.4. se explicarán dichos términos.
- Conocer el valor de reserva agua del suelo.
- Identificar la cantidad de humedad inicial del suelo.
- Conocer la cifra de escorrentía inicial.

En BaWare 1.0 se ingresa datos de entrada de las estaciones climatológicas o pluviográficas en formatos establecidos por los creadores del software. Una vez terminada la programación la computadora va a procesar estos datos, se los considera como la materia prima para obtener unos buenos resultados.

### **2.5.3. Cálculo de la Evapotranspiración por el método de Thornthwaite.**

Para estimar la evapotranspiración potencial Thornthwaite (1948) propuso una fórmula cual se basa en la temperatura media mensual, precipitación media mensual y la latitud los cuales son datos climatológicos accesibles.

Según Monreal et al., (1999) el método generalmente ofrece buenos resultados en zonas húmedas y subhúmedas con precipitaciones estivales con vegetación abundante.

Con el propósito de cuantificar el balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo y crear el software se comenzó el desarrollo del algoritmo de cálculo, para esto se ingresa la temperatura que actúa como la primera variable para el desarrollo del software. Dentro de la programación para el cálculo de la evapotranspiración por el método de Thornthwaite, el índice de calor es el primer módulo programado.

El índice de calor es la combinación de la temperatura del aire y la humedad, este índice proporciona una descripción de la manera en que se percibe la temperatura. (Hogares Juveniles Campesinos., 2006). El índice de calor mensual ( $i$ ) se calculó a partir de los datos de temperatura promedio mensual.

$$i = \left( \frac{t}{5} \right)^{1.514} \quad \text{Ec. (2)}$$

En donde:

$i$ : Índice de calor mensual

$t$ : Temperatura

Posteriormente se calculó el índice de calor anual ( $I$ ) que es la sumatoria del índice de calor mensual, en nuestro proyecto para la serie de años.

$$I = \sum_n i \quad \text{Ec. (3)}$$

En donde:

$I$  : Índice de calor anual  
 $i$  : Índice de calor mensual

Seguidamente se calculó la constante “ $a$ ” la cual es una variable que Thornthwaite (1948) utilizó en la fórmula para el cálculo de la evapotranspiración potencial, depende del índice de calor anual y de cada lugar.

$$a = 0.6751 \times 10^{-6} I^3 - 0.771 \times 10^{-4} I^2 + 0.01792 I + 0.49239 \quad \text{Ec. (4)}$$

En donde:

$a$  : Constante  $a$   
 $I$  : Índice de calor anual

Con los valores anteriormente calculados, se calcula la evapotranspiración potencial no ajustada en milímetros para meses de 30 días de 12 horas luz. Thornthwaite (1948) aplica la siguiente fórmula:

$$ETP = 1.6 \left( 10 \frac{t}{I} \right)^a \quad \text{Ec. (5)}$$

En donde:

$ETP$  : Evapotranspiración (mm)  
 $t$  : Temperatura (°C)  
 $a$  : Constante  $a$   
 $I$  : Índice de calor anual

Una vez determinado el valor de la evapotranspiración potencial se procede a calcular el factor de corrección, para esto primero se realizó un código de programación para calcular la interpolación de la latitud.

Según Seminario (2012) interpolar significa encontrar un valor intermedio entre dos o más puntos base conocidos, los cuales se pueden aproximar mediante polinomios. Con la definición anterior se interpola la latitud con los valores que se muestran en los anexos 3 y 4 correspondiente a una latitud norte y latitud sur.

La ecuación que se utilizó para programar la interpolación de la latitud ya sea para una latitud norte o sur es:

$$y = y_1 + \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \times (x - x_1) \quad \text{Ec. (6)}$$

Finalmente se calcula la evapotranspiración potencial corregida, Thornthwaite (1948) utiliza la siguiente fórmula:

$$ETP_{\text{corregida}} = f \times ETP \quad \text{Ec. (7)}$$

En donde:

$ETP_{\text{corregida}}$  : Evapotranspiración corregida mensual (mm)

$ETP$  : Evapotranspiración no corregida mensual (mm)

$f$  : Factor de corrección por duración media de las horas de sol

#### 2.5.4. Cálculo del Balance Hídrico por el método de Thornthwaite & Mather.

Seguidamente se procedió a calcular el balance hídrico por el método de Thornthwaite & Mather. Se continúa con el desarrollo del software, para esto se ingresó la precipitación media mensual en milímetros de la serie de años, como segunda variable de la tabulación de datos, obtenidos de las estaciones. A continuación, se revisarán los diferentes procesos de cálculo:

En esta parte se ha descrito el método de Thornthwaite & Mather, se comenzó al realizar la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración la cual organiza, que mes es húmedo y que mes es seco.

Según Thornthwaite & Mather (1955) es húmedo cuando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial corregida es mayor a cero ( $P - ETP_{\text{corregida}} \geq 0$ ). Y es seco cuando la diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración potencial corregida es menor a cero ( $P - ETP_{\text{corregida}} \leq 0$ ).

Un balance hídrico se suele empezar al finalizar el periodo de estiaje, con el objetivo de suponer que, en ese mes, la reserva de agua en el suelo es nula. Un buen cálculo de reserva se realiza basándose en el uso del suelo, la textura del suelo y la profundidad de las raíces según lo sugerido por Thornthwaite y Mather, ver tabla 1.

La reserva varía con la cantidad de precipitación y según el mes si es seco o húmedo, pues si existe mayor precipitación y menor evapotranspiración, el suelo absorbe agua y aumenta la capacidad de reserva de agua del suelo, sin embargo, si existe menor precipitación y mayor evapotranspiración, el suelo no absorberá agua, por lo tanto, la reserva se mantendrá o a su vez se reducirá.

Para el desarrollo del proyecto se adopta un valor de 0.0 mm como reserva mínima y un valor de 100.0 mm como reserva máxima. Para el cálculo de la reserva se utilizan las siguientes ecuaciones:

$$R = R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \quad Si \quad R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \leq R_{m\acute{a}x} \quad Ec. (8)$$

$$R = R_{m\acute{a}x} \quad Si \quad R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \geq R_{m\acute{a}x} \quad Ec. (9)$$

$$R = 0 \quad Si \quad 0 \geq R_{i-1} + (P_i - ETP_i) \quad Ec. (10)$$

En donde:

$R$  : Reserva (mm)

$R_{i-1}$  : Reserva del mes anterior (mm)

$P_i$  : Precipitación (mm)

$ETP_i$  : Evapotranspiración potencial (mm)

$R_{m\acute{a}x}$  : Reserva máxima (mm)

A continuación se calcula la variación de la reserva, la cual es la diferencia entre la reserva del mes actual ( $R_i$ ) y la del mes anterior ( $R_{i-1}$ ).

Los cálculos se empiezan después de un periodo de sequía, es decir, en el mes donde la precipitación es mayor que la evapotranspiración. Aplicamos la siguiente ecuación:

$$VR = R_i - R_{i-1} \quad Ec. (11)$$

En donde:

$VR$  : Variación de la reserva (mm)

$R_i$  : Reserva del mes actual (mm)

$R_{i-1}$  : Reserva del mes anterior (mm)

Luego se calcula la evapotranspiración real es decir la verdadera lámina de agua que ha sido evaporada en el mes, depende de la precipitación la evapotranspiración potencial y de la reserva. Se utilizaron las siguientes ecuaciones:

- Periodo húmedo:

$$ETR_i = ETP_i \quad Ec. (12)$$

- Periodo seco:

$$ETR_i = P_i + |VR_i| \quad Ec. (13)$$

En donde:

$ETR_i$ : Evapotranspiración real del mes actual (mm)

$ETP_i$ : Evapotranspiración potencial del mes actual (mm)

$P_i$ : Precipitación (mm)

$|VR_i|$ : Variación de la reserva (mm)

Después se calculó el déficit que es el volumen de agua que faltó para satisfacer la evapotranspiración, por la escasez de las reservas de agua en el suelo. Según Marco & Torrico (2011) cuando en una cuenca existe déficit, no significa que las plantas lleguen al punto de marchitez, sino que sufren un estrés hídrico, que se refleja en el desarrollo y la producción vegetal. Se utilizó la siguiente ecuación:

$$D_i = ETP_i - ETR_i \quad \text{Ec. (14)}$$

En donde:

$D_i$ : Déficit (mm)

$ETP_i$ : Evapotranspiración potencial del mes actual (mm)

$ETR_i$ : Evapotranspiración real del mes actual (mm)

Por otra parte, se calcula el excedente que es el agua que cayó por precipitación y que excedió porque alcanzó la capacidad de reserva de agua del suelo.

- Si la  $(P_i - ETP_i) \geq 0$

$$Ex_i = P_i - ETP_i - VR_i \quad \text{Ec. (15)}$$

- Si la  $(P_i - ETP_i) \leq 0$

$$Ex_i = 0 \quad \text{Ec. (16)}$$

En donde:

$Ex_i$ : Excedente (mm)

$P_i$ : Precipitación (mm)

$ETP_i$ : Evapotranspiración potencial del mes actual (mm)

$VR_i$ : Variación de la reserva (mm)

Una vez llegado a este punto se calcularon los últimos parámetros que integran el balance hídrico basándonos en el procedimiento utilizado por el autor Villón Béjar (2004) el cual dice,

que el excedente se reparte en dos partes, una mitad para escorrentía superficial y la otra mitad se infiltra para salir nuevamente a la superficie el mes siguiente.

En BaWare 1.0  $\alpha$  del excedente se calcula al ingresar un valor correspondiente a la variable  $\alpha$ , ya que no se puede afirmar un valor exacto del 0.5 porque, esto depende de la zona de estudio, del tipo de suelo, cobertura vegetal, entre otros.

El excedente está en milímetros y se calcula con la siguiente ecuación:

$$\alpha \text{ del excedente} = \frac{\text{Excedente}}{2} \quad \text{Ec. (17)}$$

De igual manera que la variable anterior para calcular  $\beta$  de escorrentía superficial, se ingresa un valor correspondiente a la variable  $\beta$ . La escorrentía superficial del mes anterior, está en milímetros y su ecuación es:

$$\beta \text{ de escorrentía superficial} = \frac{\text{Escorrentía del mes anterior}}{2} \quad \text{Ec. (18)}$$

Posteriormente se calculó la escorrentía total en milímetros, representa la cantidad de agua que fluye en la superficie. Según Villón Béjar (2004) se inicia el cálculo en el primer mes que hay excedentes, su ecuación es:

$$\text{Escorrentía total} = \beta \text{ de escorrentía} + \alpha \text{ del excedente} \quad \text{Ec. (19)}$$

Finalmente se calcula el caudal, que representa el volumen de agua que escurre de la cuenca, su ecuación es:

$$Q = A \times \text{Escorrentía}_{total} \quad \text{Ec. (20)}$$

En donde:

$Q$  : Caudal (m<sup>3</sup>/s)

$A$  : Área de la cuenca (km<sup>2</sup>)

## 2.6. Diagrama de flujo.

Con el objetivo de visualizar la forma en que se programaron las herramientas virtuales se procedió a establecer diagramas de flujo, que permitan reproducir el proceso, sistema o algoritmo informático de la programación de las ventanas.

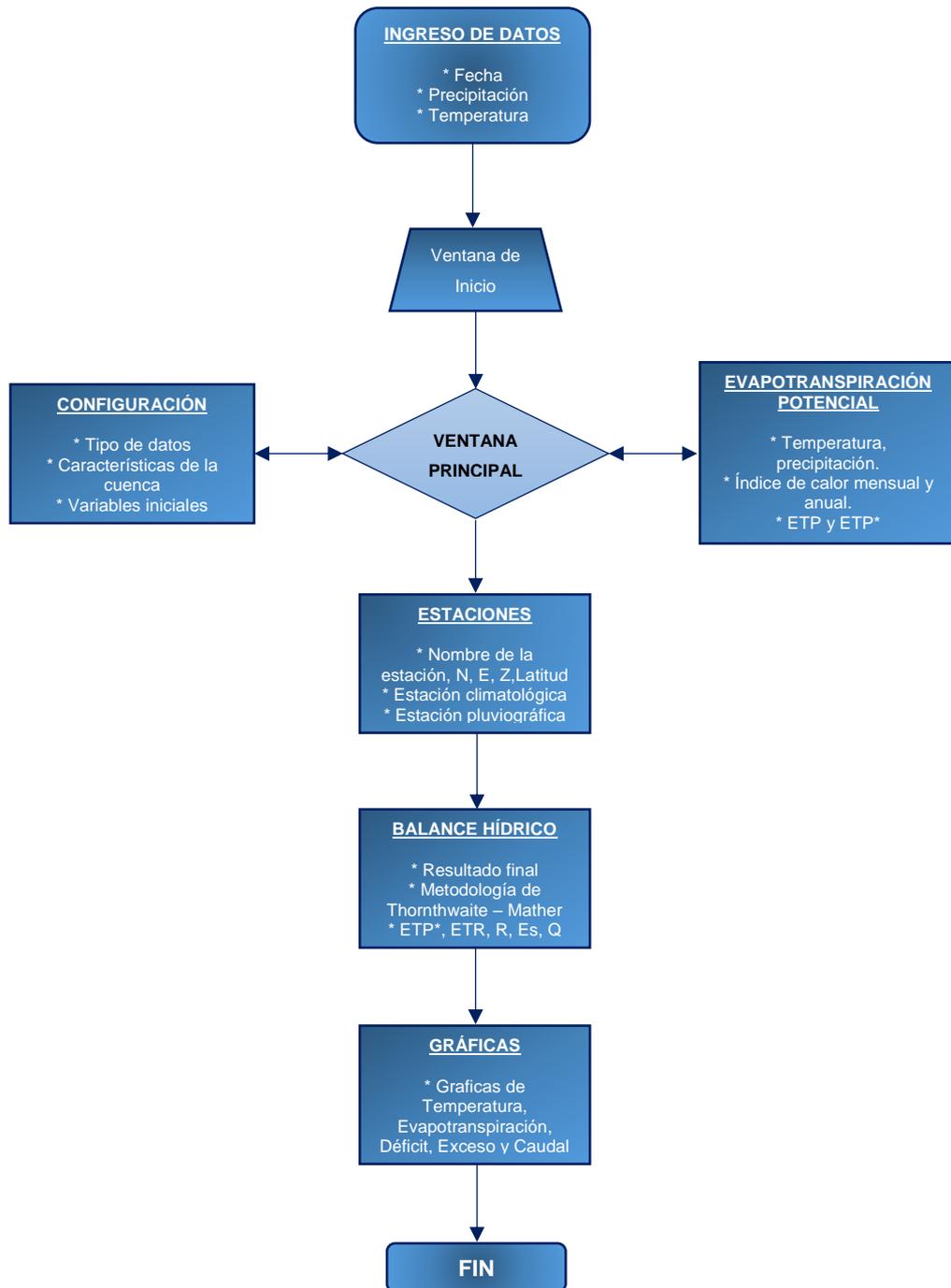


Figura 4. Diagrama de flujo metodológico de ventanas para el software.  
 Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor

**CAPÍTULO III:  
ANÁLISIS DE RESULTADOS**

### 3.1. Utilización del software

Para conocer de una forma más detallada acerca del software BaWare 1.0 se recomienda descargar el manual del usuario. Este manual se encuentra dentro del software en la ventana principal se presiona el botón “AYUDA”.

### 3.2. Software.

La implementación del software BaWare 1.0 se convierte en una aplicación para el cálculo de balances hídricos en cuencas hidrográficas. BaWare 1.0 fue sintetizado usando el mismo método que fue detallado por Thornthwaite & Mather, el desarrollo se llevó a cabo en la plataforma Java Eclipse Neon 3.0 con el lenguaje programación Python.

Se utilizó diversas estructuras informáticas para formar la interfaz gráfica que al final quedaría como se presenta a continuación.

#### 3.2.1. Ventana de Inicio.

En la figura 5 se presenta la interfaz gráfica de la ventana de inicio es sencilla, un preámbulo al inicio del software donde se da la bienvenida e indicaciones generales.

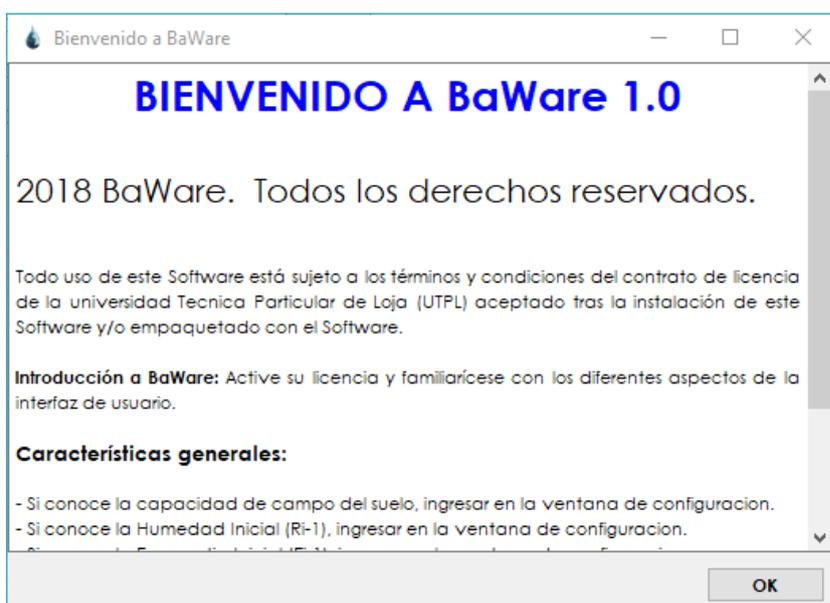


Figura 5. Interfaz gráfica de la ventana de inicio de BaWare

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

#### 3.2.2. Ventana Principal.

En la figura 6 se presenta la ventana principal la cual proporciona un entorno visual sencillo para permitir una correcta comunicación entre el usuario con el software, pide la información del país, estado, nombre del proyecto, descripción del proyecto y el nombre de la persona quien lo realiza, todo esto referente al balance hídrico, estos datos del software se pueden obviar, el software seguirá su proceso de cálculo.

En la parte izquierda de la interfaz gráfica de la figura 6, el usuario puede observar el menú de opciones:

- **Configuración:** Opción para configurar la entrada de datos.
  - **Estaciones:** Opción para ingresar las estaciones climatológicas o pluviométricas.
  - **Evapotranspiración:** Opción para calcular la evapotranspiración potencial por Thornthwaite.
  - **Balance Hídrico:** Opción para calcular el balance hídrico por Thornthwaite & Mather.
  - **Calibración:** Opción para calibrar el balance hídrico.
  - **Graficas:** Opción de visualización de graficas finales y del balance hídrico calibrado.
- Cabe destacar que está en orden secuencial y en la parte derecha se observa la ventana donde se mostrara el balance hídrico final.
- **Ayuda:** Opción para visualizar el manual del software, como una ayuda al usuario.

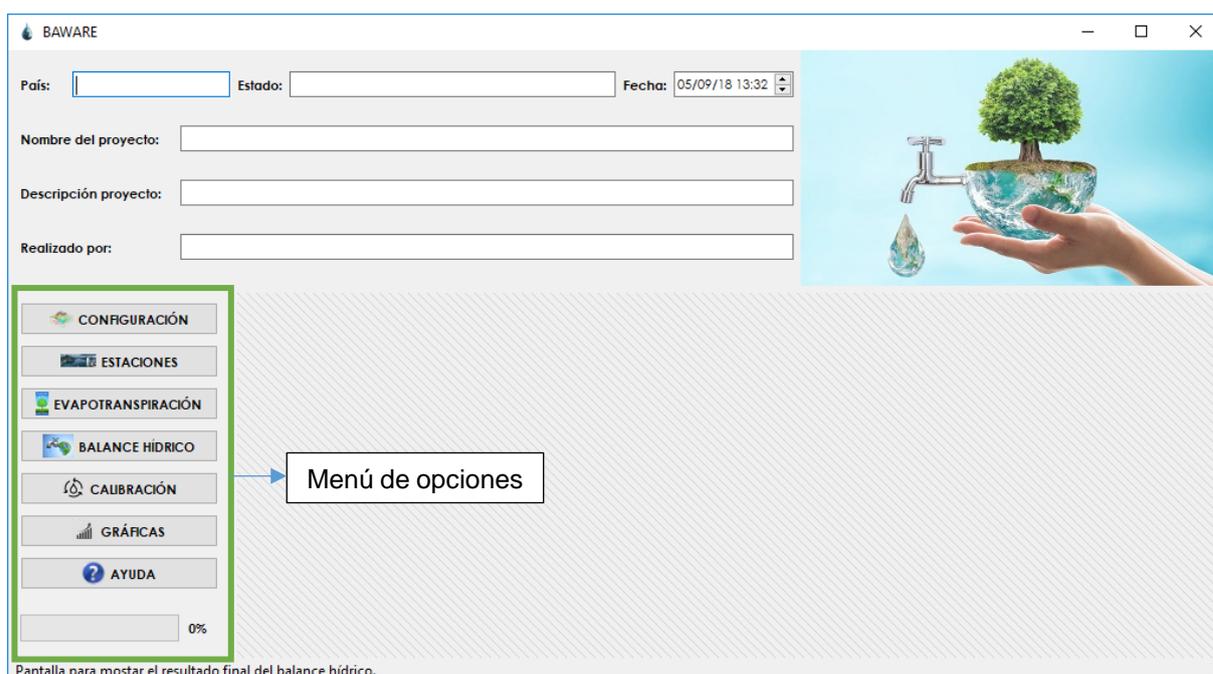


Figura 6. Interfaz gráfica de ventana principal de BaWare

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 3.2.3. Ventana de Configuración.

La ventana de configuración tiene como objetivo ayudar al usuario a ingresar datos importantes los cuales son necesarios para que el software comience con el cálculo del balance hídrico, como se observa en la figura 7. Los datos a ingresar son:

- **Tipo de Separador:** En esta opción se puede escoger entre los diversos separadores que admite el software como por ejemplo ( , ; /)

- **Tipo de Datos:** Es la única opción que se tiene (Mensual) en esta versión ya que el software realiza balances hídricos para datos mensuales.
- **Latitud de la cuenca:** Se podrá elegir entre la latitud norte y la latitud Sur esto depende de donde se encuentre la zona de estudio. En nuestro caso la latitud de la cuenca del río El Pindo está a 3.761 S°
- **Área de la cuenca:** Es el área de la cuenca en estudio para la cuenca del río El Pindo es de 513.650 km<sup>2</sup>

Cabe recalcar que el modelo hidrológico seleccionado para el cálculo de la evapotranspiración es el modelo de Thornthwaite por ende en la figura 7 en “Coeficientes para cálculo de evapotranspiración” se coloca los coeficientes que tiene las fórmulas de Thornthwaite, como valores constantes, luego estos valores cambiarán con los valores de las funciones objetivos que se ingresen en la ventana de calibración, en la segunda fase del proyecto.

- **x1:** Según Thornthwaite (1948) para calcular la evapotranspiración mensual, en milímetros por meses de 30 días y para una duración de 12 horas, se necesita el valor de “a” el cual es un exponente que varía con el lugar, para este proyecto se toma el valor de 0.0000006751
- **x2:** Es el valor del 0.0000771
- **x3:** Es el valor del 0.01792
- **x4:** Es el valor del 0.49239
- **x5:** Es el valor del 1.6

$$a = 0.6751 \times 10^6 I^3 + 0.771 \times 10^4 I^2 + 0.01792I + 0.49239 \quad \text{Ec. (21)}$$

- **Reserva del suelo:** El usuario podrá asumir un valor de reserva entre 0.0 mm y 100.0 mm como mínima y máxima respectivamente, o a su vez investigará la reserva del suelo del área de estudio. Para el desarrollo del proyecto se tomó una reserva inicial de 100.0 mm como máxima.
- **Humedad Inicial (Ri-1):** El usuario podrá asumir, calcular o investigar una humedad inicial al mes anterior antes de iniciar el cálculo o podrá dejarlo por defecto (0.00 mm). Sin embargo, hay que tomar en consideración que existirán cambios en el cálculo del balance hídrico, en el caso de que se llegase a encontrar una humedad inicial. Para este proyecto se asumió una humedad inicial de 0.00 mm con el objetivo que en la parte de calibración se obtenga el valor real.
- **Escorrentía Inicial (Es-1):** Esta opción ayuda al cálculo de los caudales mensuales, por tal motivo es importante que el usuario sepa discernir si es que existió o no, escorrentía el mes anterior.

Si no existió escorrentía inicial se asumirá un valor de 0.00 mm y el cálculo del balance hídrico continuara y si existió se recomienda al usuario, calcular o investigar el valor correcto de escorrentía inicial.

Para este proyecto se asumió una escorrentía inicial de 0.00 mm con el propósito que en la parte de calibración se obtenga el valor verdadero.

The image shows a software configuration window titled "CONFIGURACIÓN". It contains several sections for user input:

- Tipo de Separador:** A dropdown menu with a semicolon (;) selected.
- Tipo de Datos:** A radio button labeled "Mensual" is selected.
- CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA:**
  - Latitud de la cuenca (°):** A dropdown menu with "Nº" selected and a text box containing "0.0".
  - Área de la cuenca (km²):** A text box containing "0.0".
- COEFICIENTES PARA CÁLCULO DE EVAPOTRANSPIRACIÓN:**
  - x1:** Text box with "0.000006751"
  - x2:** Text box with "0.0000771"
  - x3:** Text box with "0.01792"
  - x4:** Text box with "0.49239"
  - x5:** Text box with "1.6"
- VARIABLES INICIALES:**
  - α excedente:** Text box with "0.50"
  - β escorrentía:** Text box with "0.50"
  - Reserva del suelo (mm):** Text box with "100"
  - Humedad Inicial (Ri-1):** Text box with "0.0"
  - Escorrentía Inicial (Es-1):** Text box with "0.0"
- OK** button at the bottom right.

Figura 7. Interfaz gráfica de la ventana de configuración de BaWare.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 3.2.4. Procesamiento de datos.

#### 3.2.4.1. Ventana de Estaciones.

El formato de datos a ingresar en el software son archivos de tipo Microsoft Excel en formato (.csv) pueden estar separados por (, . /) La ventana de estaciones se presenta en la figura 8 donde se puede observar las variables a ingresar.

Para la elaboración del proyecto se toma la estación climatológica Zaruma - M0180 la cual pertenece a la subcuenca del río El Pindo por consiguiente sus coeficientes de ponderación de precipitación (C.P.P) y temperatura (C.P.T) son 100.0% debido a que solo se ha ingresado una única estación.

En caso de existir más de una estación climatológica o pluviométrica se realizará como paso previo la correspondiente ponderación de precipitación y temperatura

Los datos de la temperatura y precipitación se observan en anexo 1 y en el anexo 2 respectivamente.

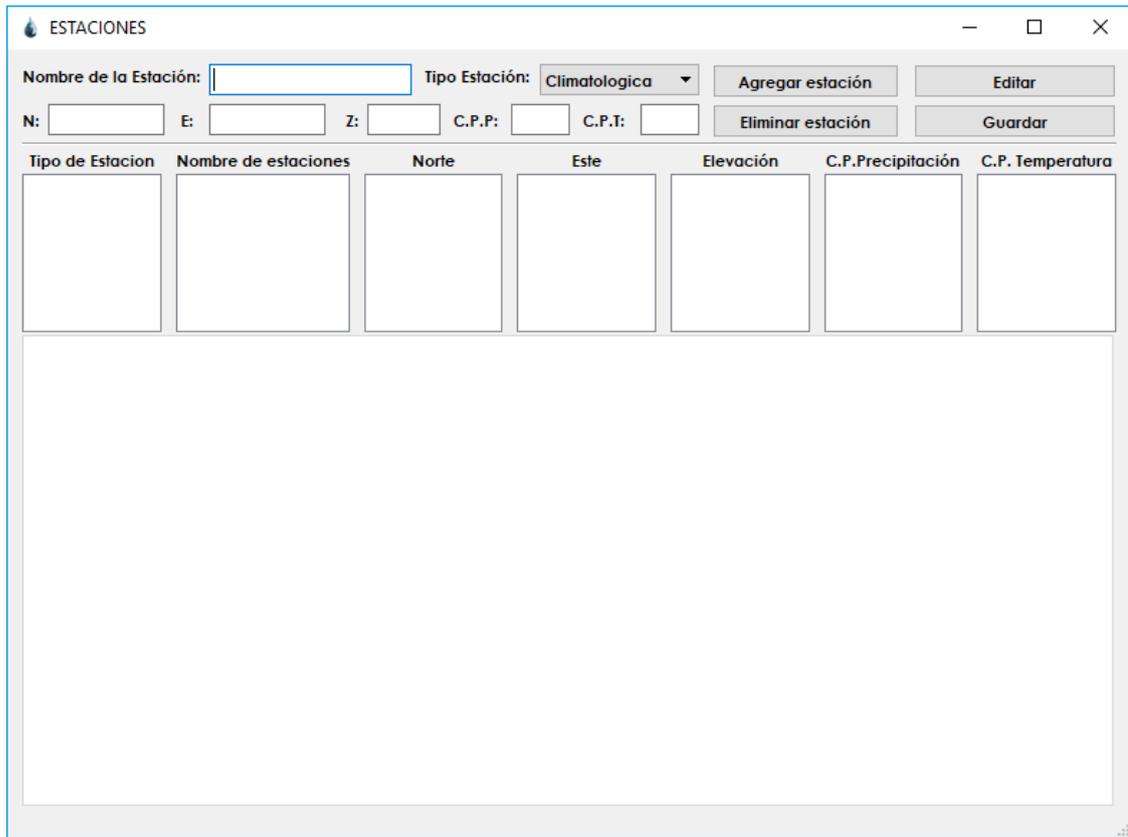


Figura 8. Interfaz gráfica de ventana estaciones de BaWare.

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 3.2.5. Salida de datos

#### 3.2.5.1. Ventana de Evapotranspiración.

La ventana de evapotranspiración potencial tiene la misma interfaz gráfica que la ventana para el cálculo del balance hídrico. La diferencia entre las dos ventanas radica en su módulo de cálculo programado internamente.

El botón de evapotranspiración potencial calcula dicho valor, sigue el procedimiento planteado por Thornthwaite, este proceso se observa en la figura 9.

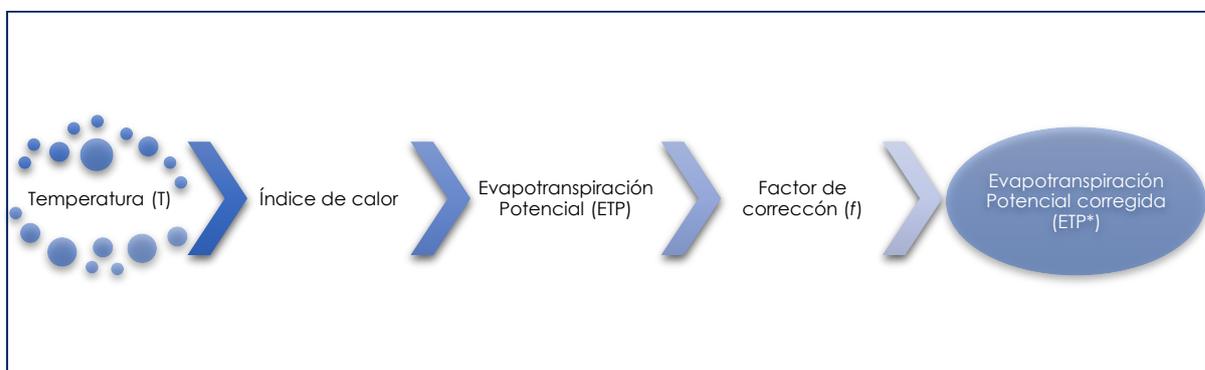


Figura 9. Esquema para cálculo de evapotranspiración potencial propuesto por Thornthwaite

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 3.2.5.2. Ventana de Balance Hídrico.

La ventana del balance hídrico es donde se presenta el resultado final calculado por BaWare 1.0. La figura 10 muestra la interfaz gráfica de la ventana principal de BaWare.

Para evaluar el software BaWare 1.0, como ya se ha dicho se utilizó datos de la subcuenca del río El Pindo en el periodo 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre del 2010.

Inicialmente se recopiló la información necesaria de la estación climatológica Zaruma - M0180 de temperatura y precipitación.

Posteriormente con estos datos tabulados se inició con la programación de las interfaces gráficas como ventanas, distanciadores, botones, líneas gráficas, ítems, combos de series, para el software en PyQt5 Designer.

Finalmente se continuó con la programación de los módulos de cálculo para el balance hídrico los cuales son:

- Fecha
- Temperatura (T)
- Índice de calor (I)
- Evapotranspiración no corregida (ETP)
- Factor de corrección ( $f$ )
- Evapotranspiración corregida (ETP\*)
- Precipitación (P)
- Precipitación – Evapotranspiración (P-ETP\*)
- Reserva  $\text{®}$
- Variación de la reserva (VR)
- Evapotranspiración real (ETR)
- Déficit (D)
- Excedente (Ex)
- $\alpha$  de Excedente
- $\beta$  de Escorrentía
- Escorrentía total
- Caudal (Q)

En resumen, el balance hídrico para la subcuenca del río El Pindo se presenta a continuación. De la figura 10 a la 18 se muestran los resultados obtenidos con el software desarrollado, todo a nivel mensual.

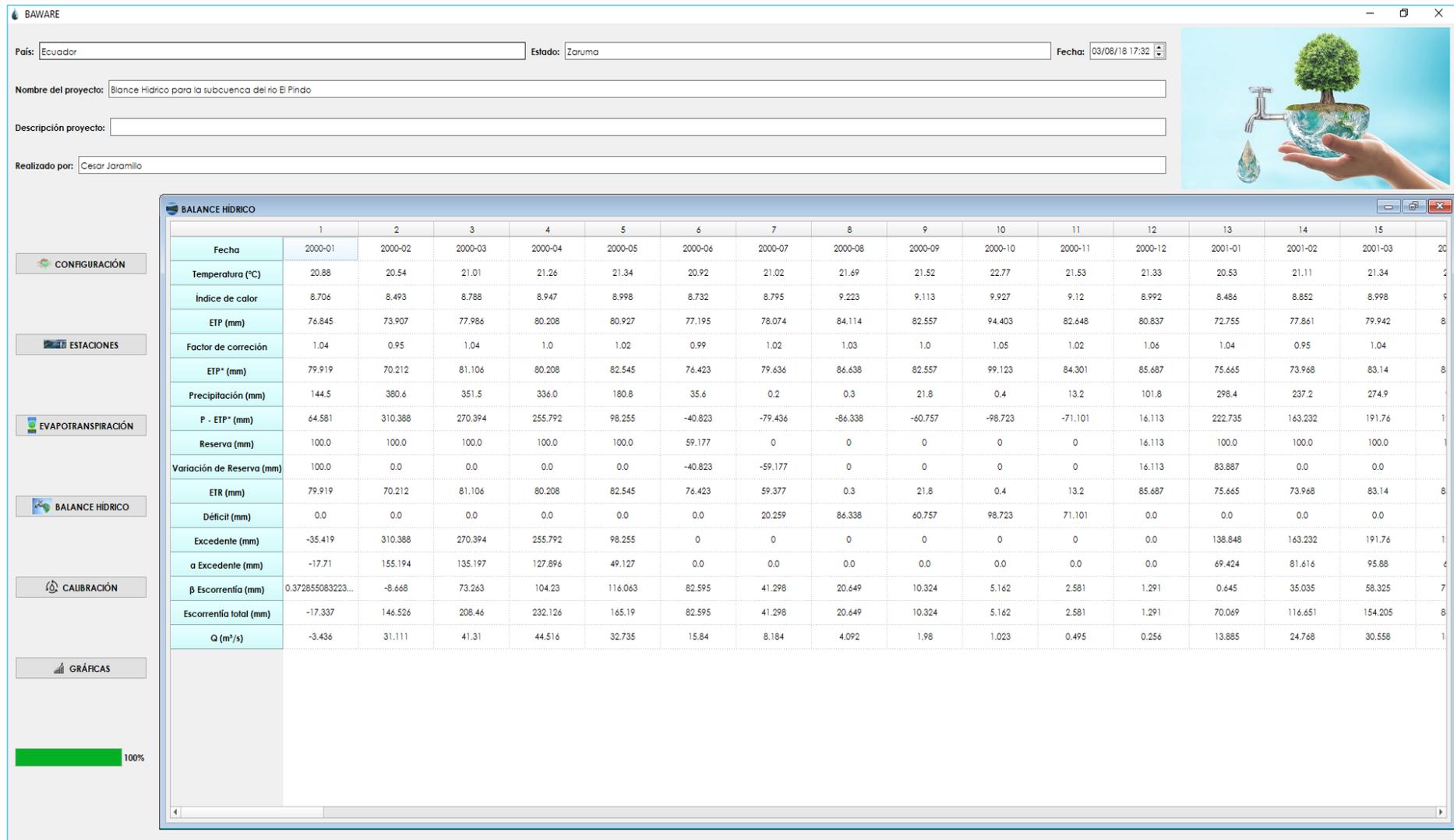


Figura 10. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

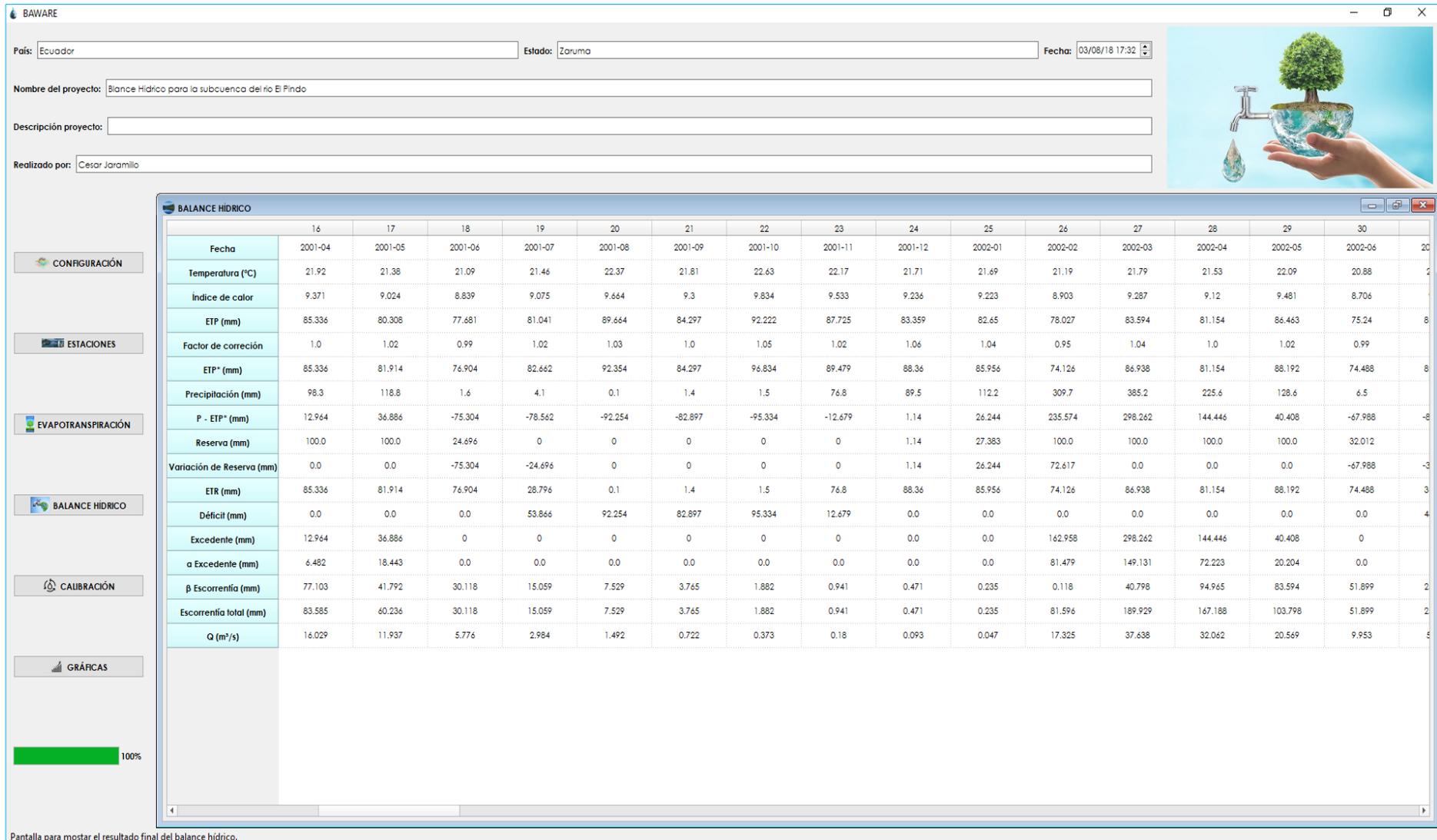


Figura 11. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

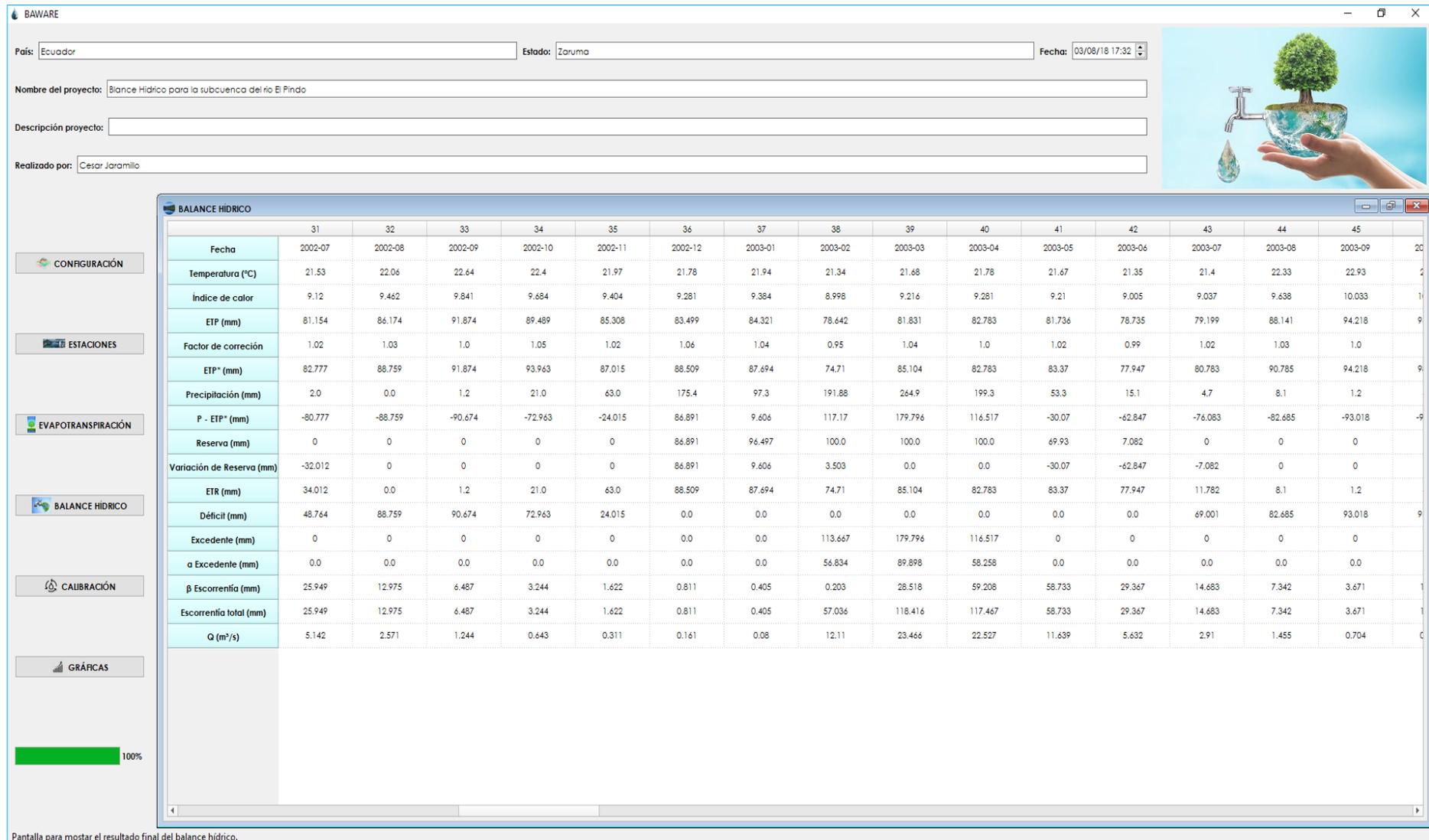


Figura 12. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

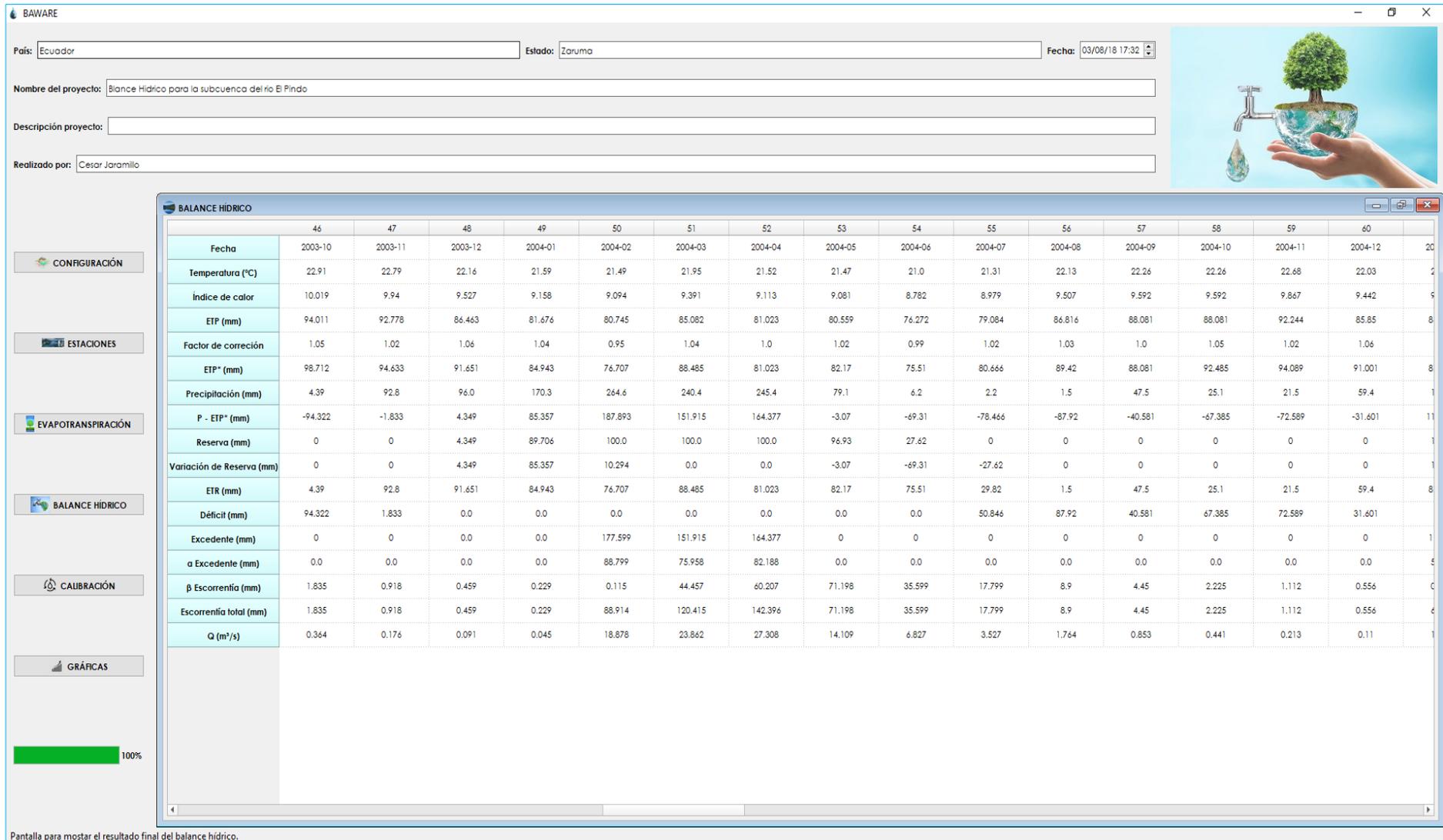


Figura 13. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

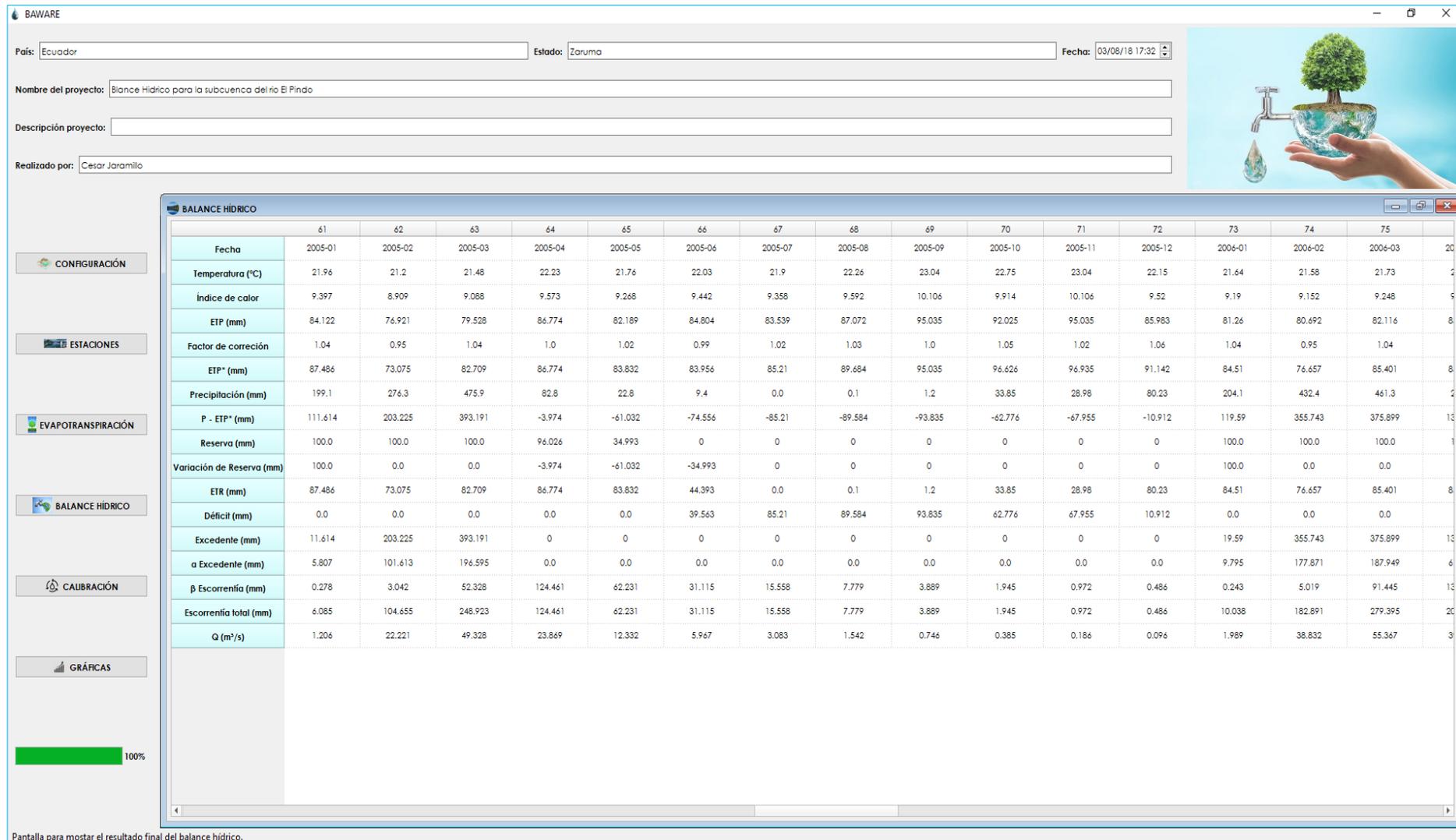


Figura 14. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

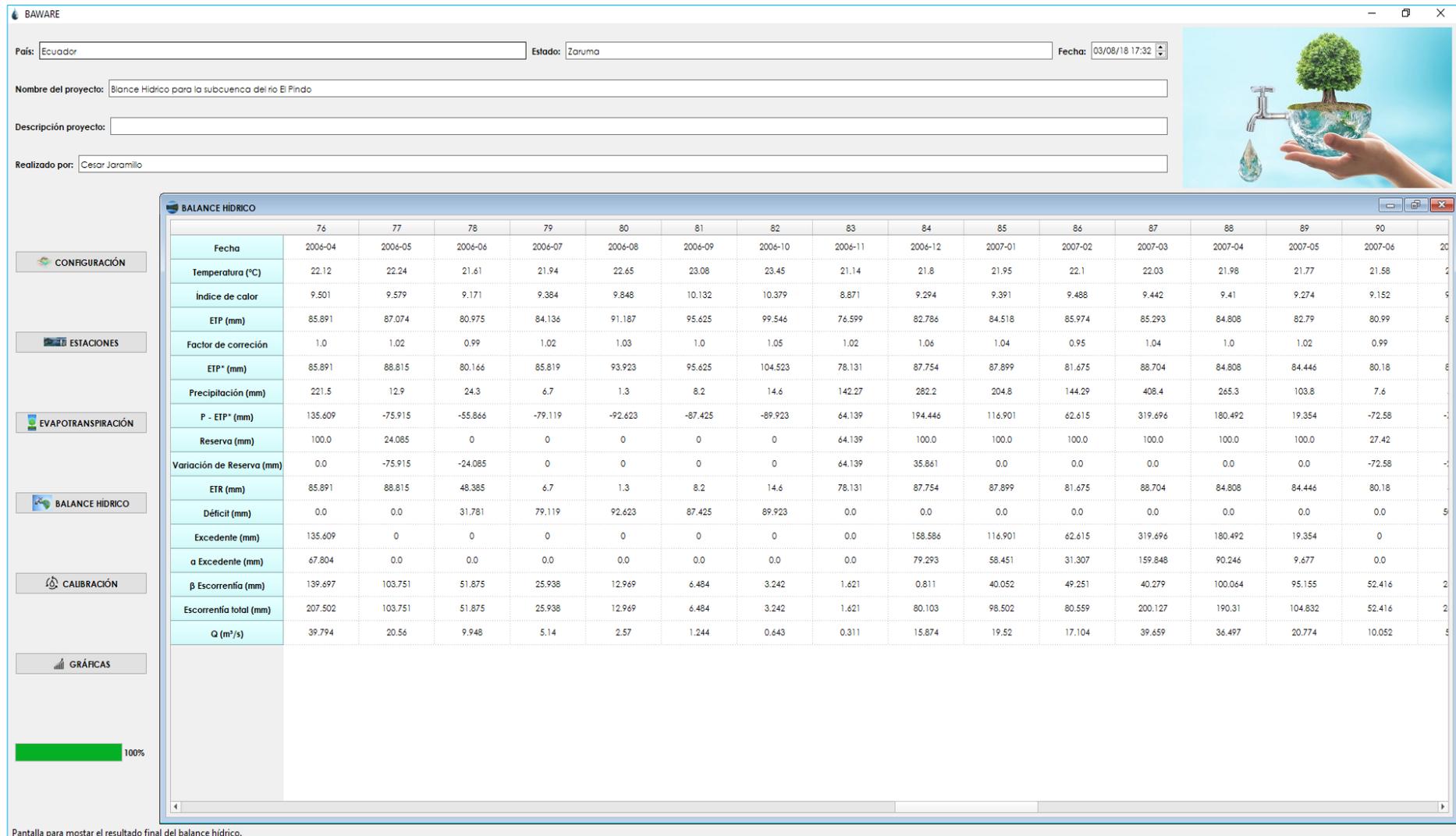


Figura 15. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0  
Fuente: Elaboración propia

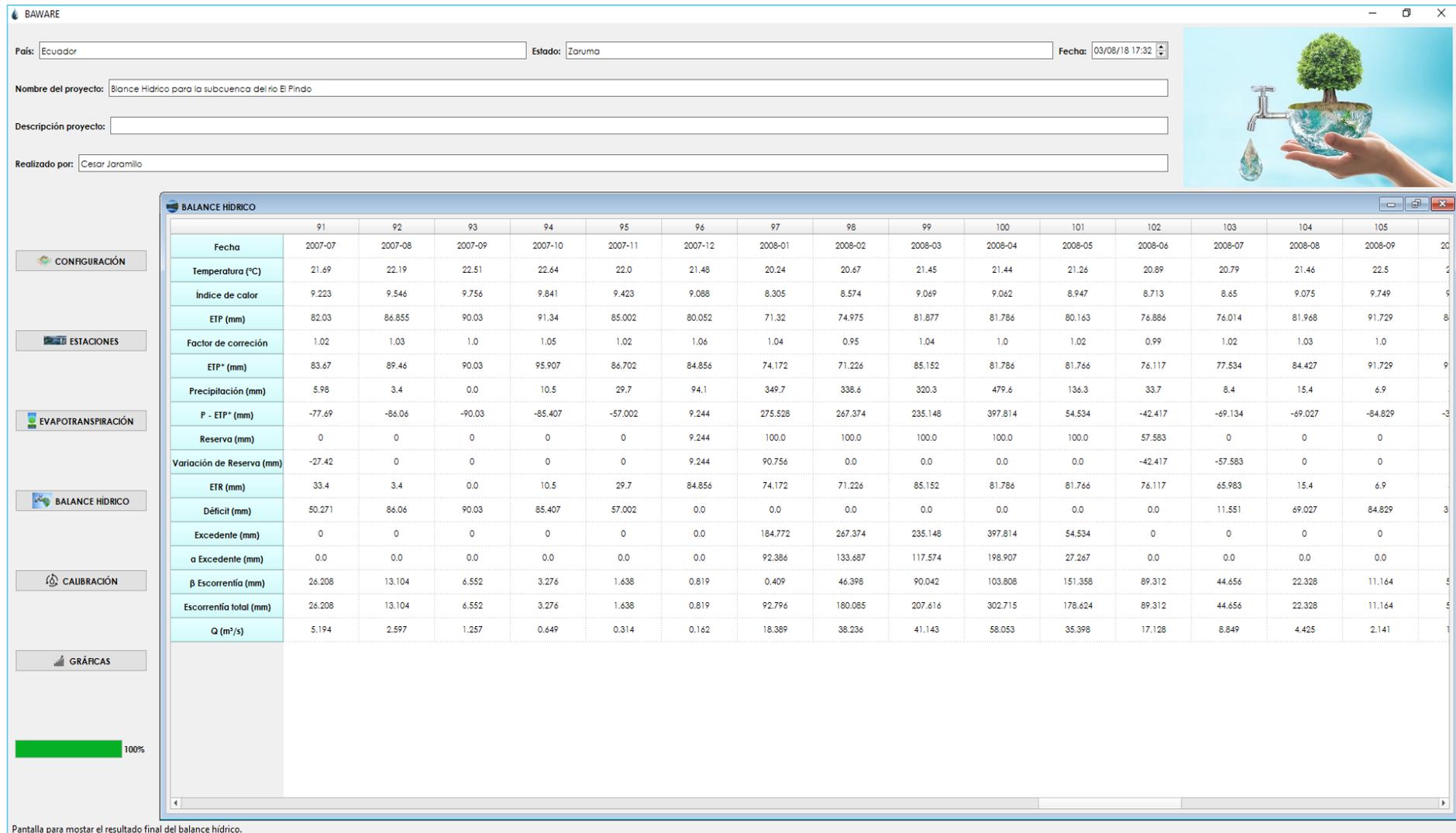


Figura 16. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

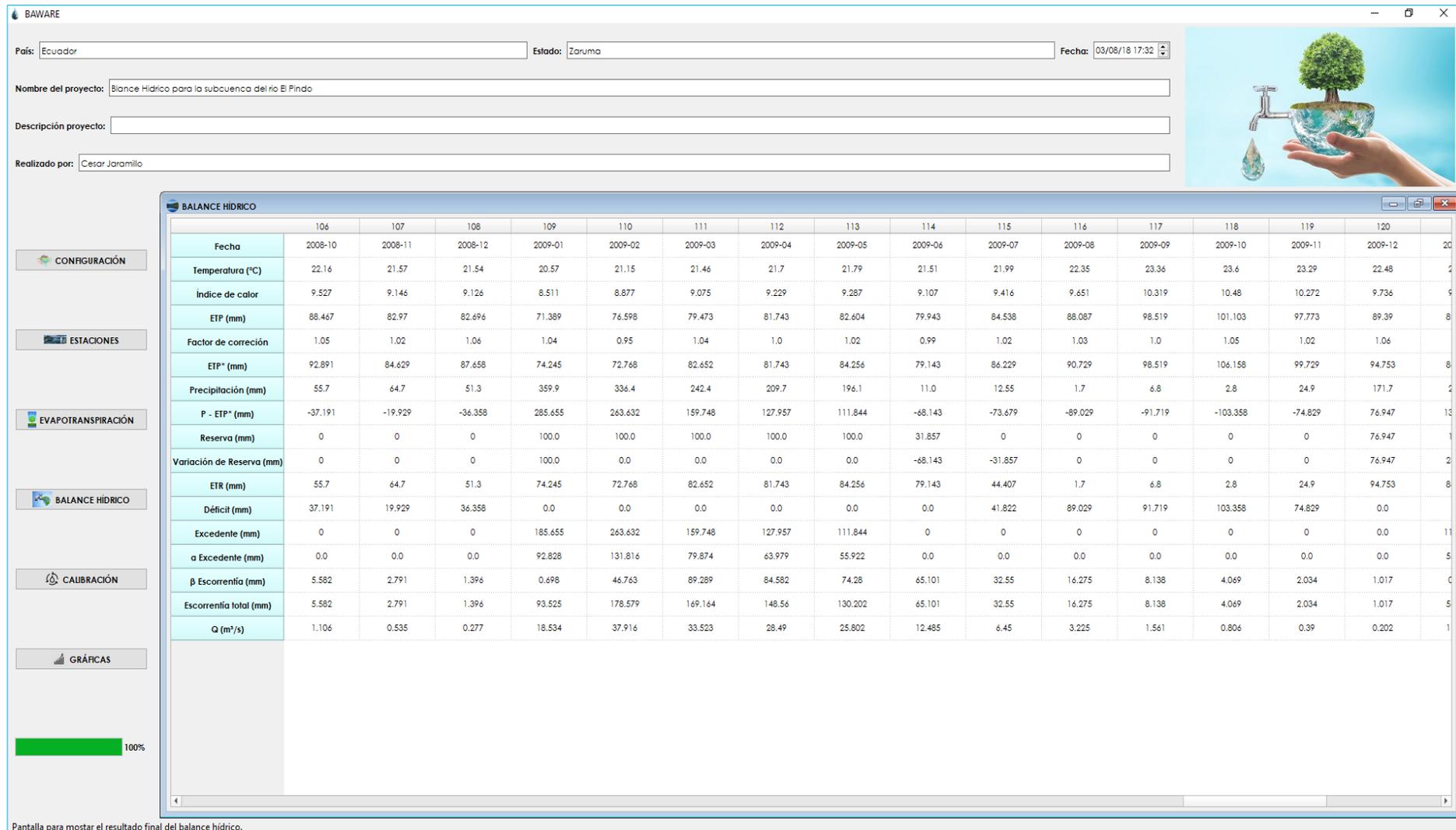


Figura 17. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

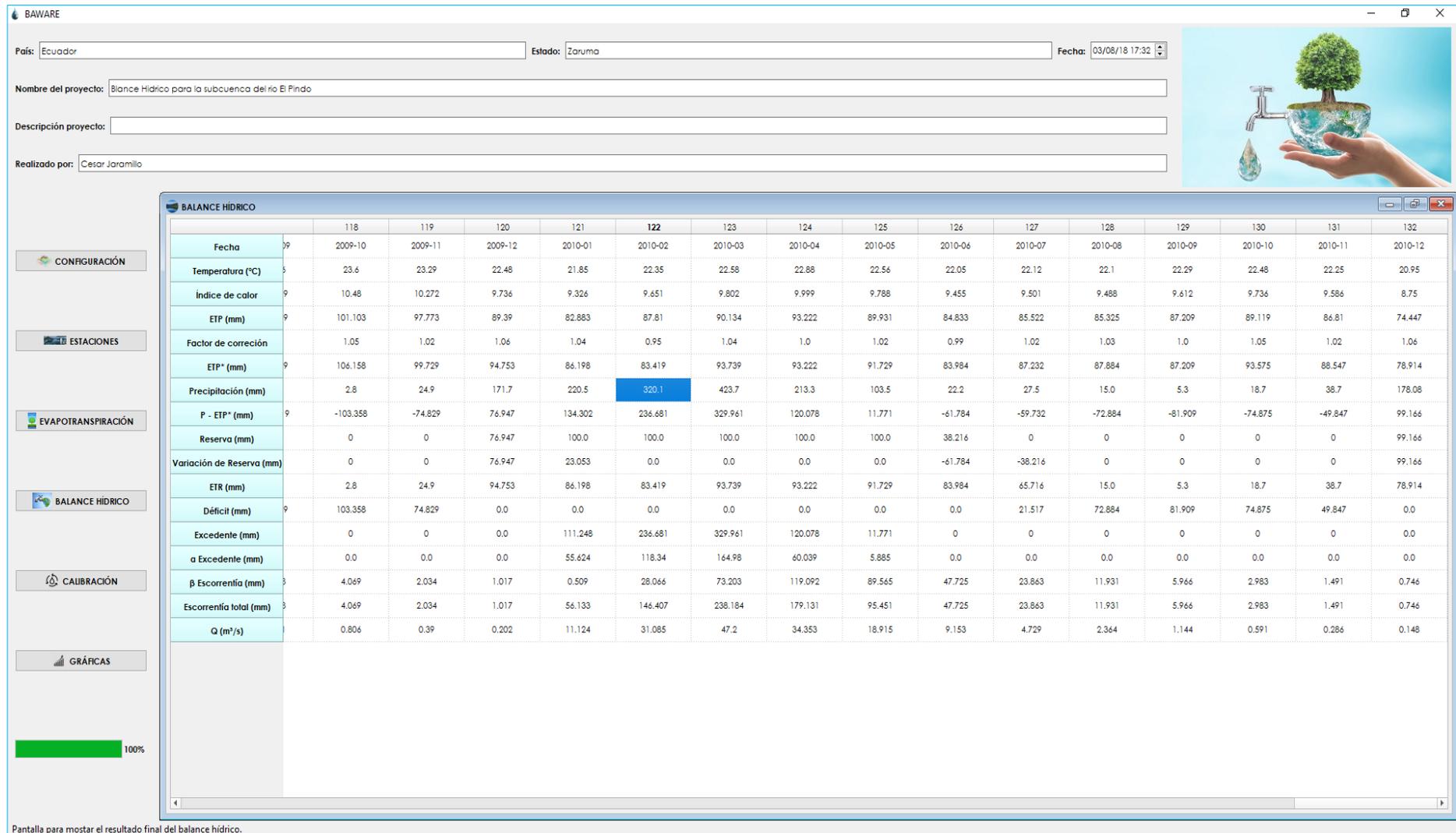


Figura 18. Balance hídrico de la subcuenca del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Una función que tiene BaWare 1.0 es realizar gráficas de las variables que intervienen en el balance hídrico. A continuación, se presentan las figuras 19 a la 23 donde se muestran los datos de temperatura, evapotranspiración potencial, déficit, exceso y caudal.

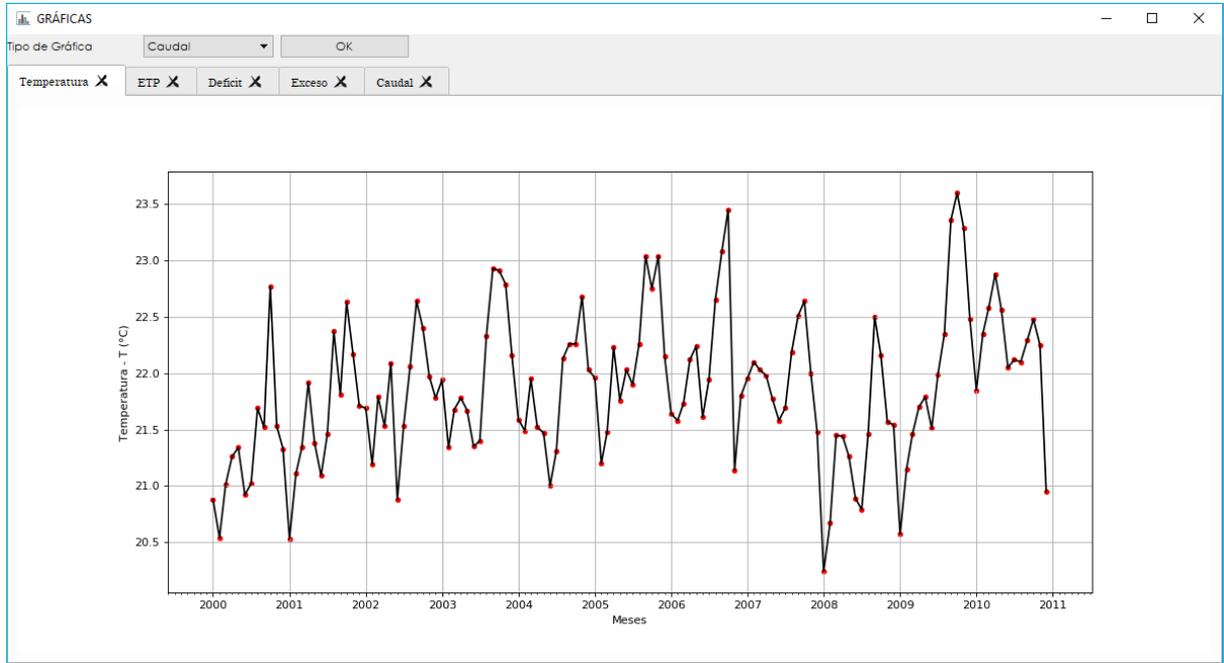


Figura 19. Temperatura subcuena del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

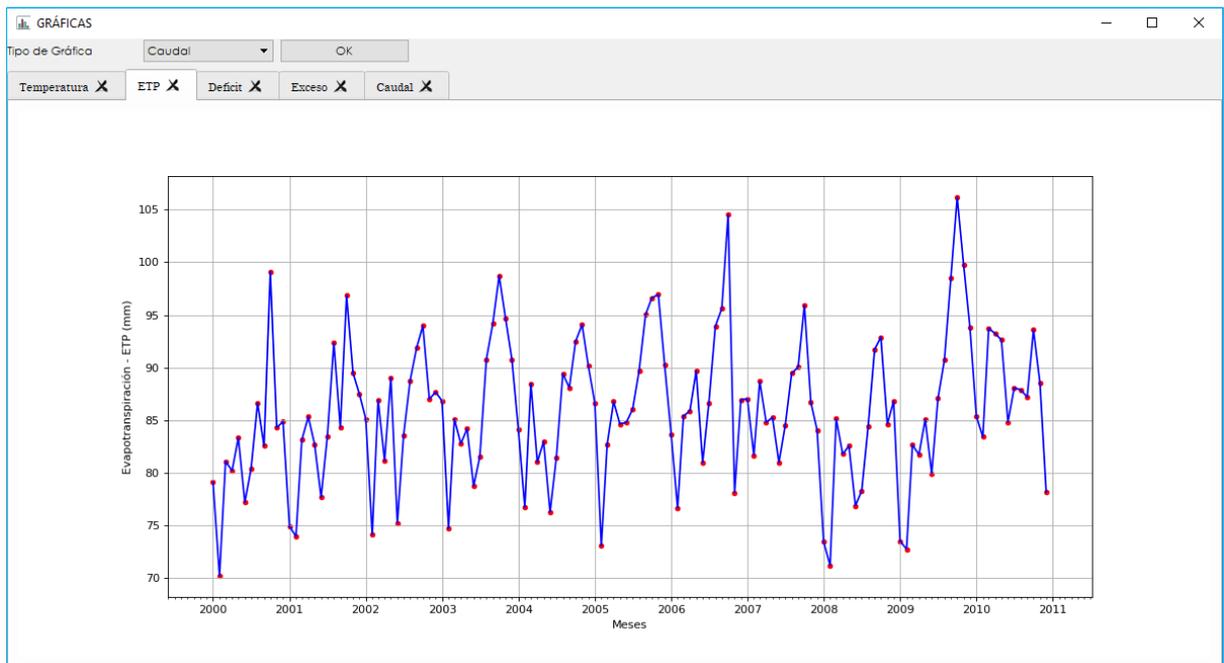


Figura 20. Evapotranspiración subcuena del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

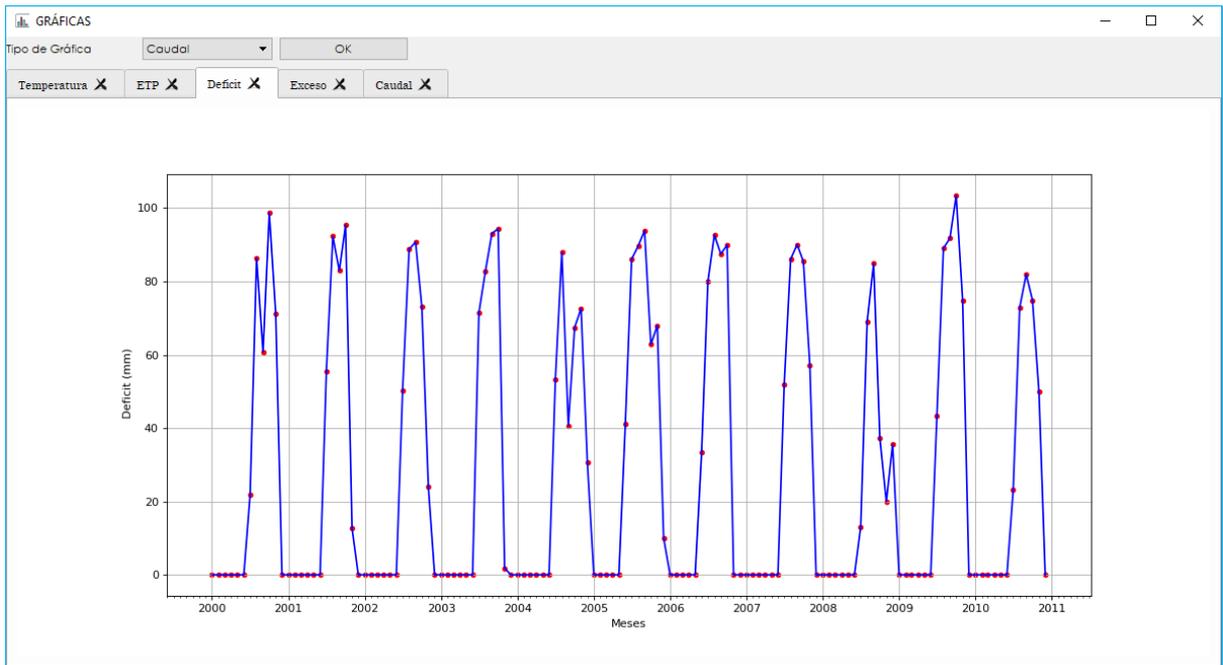


Figura 21. Déficit subcuena del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

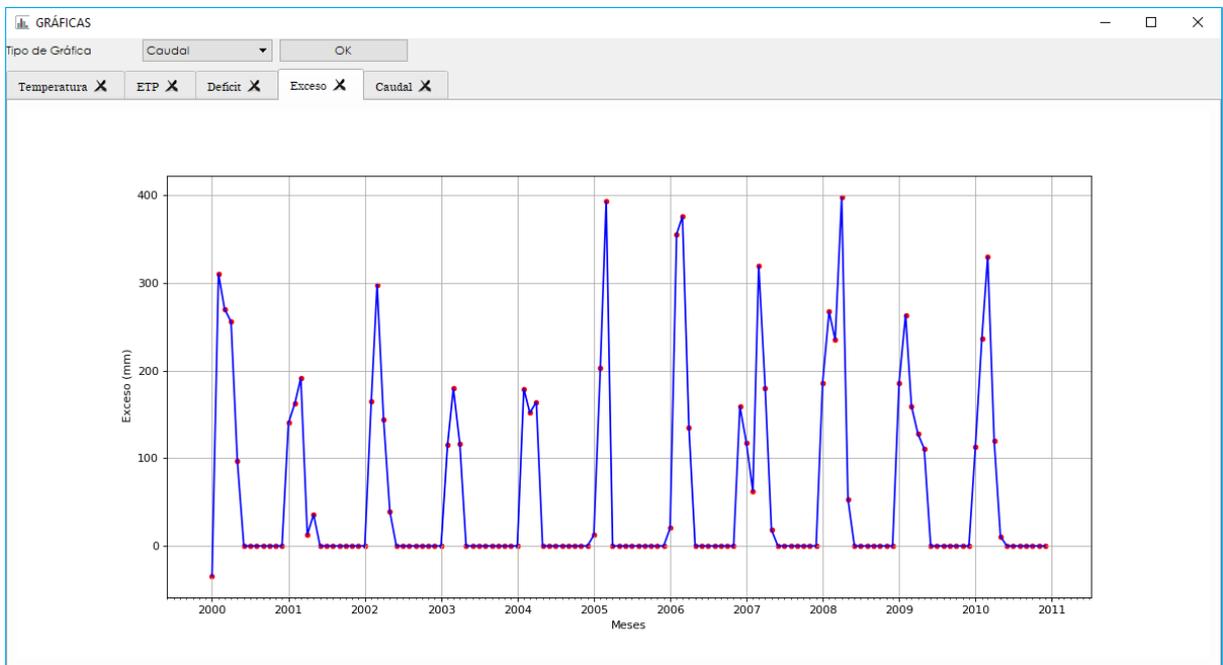


Figura 22. Excesos subcuena del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

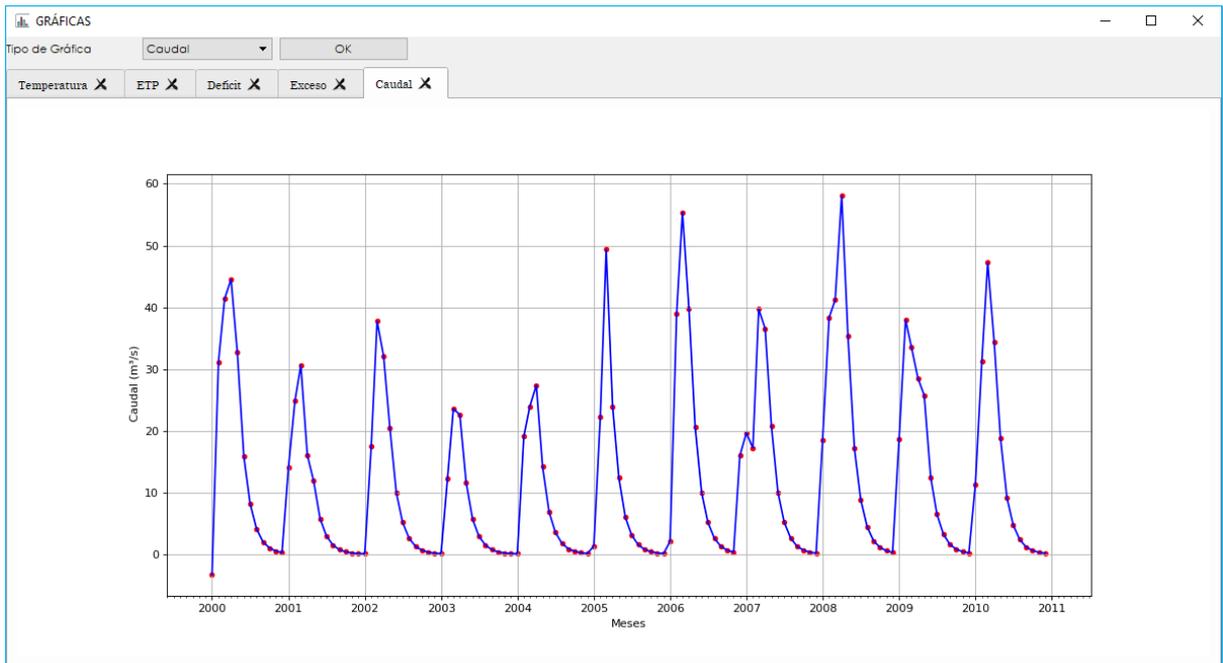


Figura 23. Caudal subcuena del río El Pindo – Software BaWare 1.0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

### 3.3. Resultados en Microsoft Excel.

Los resultados obtenidos con el BaWare 1.0 se comprobaron con una hoja electrónica en Microsoft Excel. Sin embargo, la verificación del software corresponde a la fase 3 por este motivo, solo se presentan los resultados de caudal que se muestran en el anexo 5.

## CONCLUSIONES

- Este trabajo de investigación ha permitido evaluar el estudio del balance hídrico se lo realizó con el modelo hidrológico propuesto por Thornthwaite & Mather, para la subcuenca del río El Pindo. Mediante este estudio se ha logrado desarrollar un software que se lo bautizó con el nombre de Balance Water Software (BaWare) para el cálculo de balances hídricos en cuencas hidrográficas.
- Los datos de entrada que BaWare necesita para realizar el balance hídrico se los tabulo en una serie de 10 años tanto para precipitación y temperatura, desde el periodo 1 de enero del 2000 hasta el 31 de diciembre del 2010 para la subcuenca del río El Pindo.
- En BaWare los puntos principales han sido el módulo de cálculo para la evapotranspiración potencial por el método de Thornthwaite y el cálculo de caudales para la subcuenca del río El Pindo.
- Los resultados obtenidos por BaWare son idénticos a los resultados obtenidos de forma manual mediante una hoja electrónica en Excel, el máximo porcentaje de error es de 6.3% y el mínimo de 0.1%
- En BaWare en la ventana estaciones se ingresó los coeficientes de ponderación de precipitación y de temperatura estos se obtuvieron con la metodología que se utiliza para el cálculo de los polígonos de Thiessen. Internamente se programó el modulo para que realice el cálculo de la precipitación media de la cuenca por el método antes mencionado, esto con el objetivo de distribuir la precipitación uniformemente.
- En las gráficas obtenidas entre los años 2000 al 2010 por BaWare para la subcuenca del río El Pindo, se puede observar que el periodo de déficit está comprendido entre los meses de julio, agosto, septiembre, octubre y noviembre y que el periodo de excesos corresponde a los meses de enero febrero marzo, abril, mayo y junio.
- En este estudio, se encontró que las variables iniciales como  $\alpha$  excedente,  $\beta$  escorrentía, humedad inicial y escorrentía inicial podrían causar cambios en los primeros dos a tres meses del año.
- Los caudales calculados por BaWare son los que la subcuenca del rio El Pindo escurre en el mes, están en función de la escorrentía superficial y del área de la cuenca.
- Gracias a esta investigación hemos creado un vínculo, entre la metodología de Thornthwaite & Mather y la programación con Python, en módulos de cálculo para el desarrollo de BaWare para cálculo de balances hídricos.
- Queda claro que a partir del presente estudio queda una puerta abierta, a la investigación para poder mejorar el software con investigaciones futuras, donde se pueda implementar más herramientas para el cálculo de balances hídricos.

## **RECOMENDACIONES**

- Con el objetivo de tener una mayor precisión en los resultados, se recomienda tener la mayor cantidad de datos de las estaciones rellenos.
- Se requiere más investigación para determinar un correcto valor de capacidad de almacenamiento de agua del suelo, anterior al mes de inicio.
- Se sugiere profundizar con estudios de otras metodologías de cálculo para balances hídricos y comprarlas con el software desarrollado.
- Una investigación adicional en este campo sería calcular la interceptación en la vegetación, esto ayudaría a un mejor cálculo de la evapotranspiración potencial.
- Al usar el software se recomienda leer el manual del usuario con el propósito que no se ingresen datos incorrectos o mal ubicados. Al final este manual nos conducirá a tener un buen cálculo del balance hídrico.

## BIBLIOGRAFÍA

- Abel, H., Cruz, V., & Perdomo, G. S. (2013). *Implementación de una estación meteorológica*. Universidad de El Salvador.
- Allen G., R., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (2006). Evapotranspiración del cultivo: Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. *FAO :Estudios FAO Riego y Drenaje* 56, 297. <http://doi.org/10.1590/1983-40632015v4529143>
- Almorox Alonso, J. (2007). *Capacidad de retención de agua disponible*. OpenCourseWare de la Universidad Politécnica de Madrid. Madrid. España.
- Alocén, J. (2007). *Manual práctico para el diseño de sistemas de miniriego*. (A. Conrado, Ed.) Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO) (Conrado An). Honduras: Impresiones Industriales.
- Alonso, M. A., Maqua, M. P. A., Andray, A. B., Prieto-Lavin, T. C., Gonzalez, R. M. C., & Castellano, G. C. (2004). Guía para la elaboración de estudios del medio físico: contenido y metodología, (5), 809.
- Anisfeld, S. C. (2010). *Water resources* (2da ed.). Washington: Island Press. Recuperado a partir de <https://books.google.es>
- Artigas, M., Barrera, B., & Franch, F. S. (2014). Análisis comparado del Balance Hídrico del suelo y bioclimático de la estación del Palacio de Doñana con los datos termohigrométricos del Sabinar del Marques (Parque Nacional de Doñana). *Dpto. Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla*, (1986), 769–778.
- Barzanallana, R. (2017). *Mi primera hora con Eclipse*. Universidad de Murcia. Murcia. Recuperado a partir de <https://www.um.es/docencia/barzana/DAWEB/Mi-primera-hora-con-Eclipse.pdf>
- Beaton, W., & Rivieres, J. d. (2006). Eclipse platform technical overview. *Retrieved on November, 2003*(July 2001), 1–20.
- Beven, K., & Keith, B. (2009). *Environmental Modelling: ¿An Uncertain Future?* (1ra ed.). Londres: Taylor & Francis. Recuperado a partir de <https://www.taylorfrancis.com>
- Buckingham, D. (2008). Nuevas Tecnologías de la Programación Universidad de Granada. Recuperado el 12 de abril de 2018, a partir de <https://s3.amazonaws.com>
- Cabrera, J. (1998). *Modelos Hidrológicos: Conceptos y aplicabilidades* (No. 3). Lima - Perú.

Recuperado a partir de <https://revistas.unilasalle.edu.br/index.php/Rbca/article/viewFile/268/761>

- Cahuana Andia, A., & Yugar Morales, W. (2009). *Material De Apoyo Didactico Para La Enseñanza Y Aprendizaje De La Asignatura De Hidrologia* (1ra ed.). Universidad Mayor de San Simón, Cochabamba. Bolivia.
- Córdoba, S., Zea, J., & Murillo, W. (2006). Estimación de la precipitación media, evaluación de la red pluviométrica y cuantificación del balance hídrico en la cuenca del río Quito en el departamento de Choco, Colombia. *Meteorología Colombiana*, 10(1970), 100–110.
- Covantec, R. L., & Mara, S. C. De. (2016). Materiales del curso de programación en Python - Nivel básico.
- Devia, G. K., Ganasri, B. P., & Dwarakish, G. S. (2015). A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4(1cwrcoe), 1001–1007.
- Domecq, R. M., Civil, I., Baez, H. S. A. J., & Meteorologia, L. (2007). *Balance Hidirco Integrado Del Acuífero Patiño I. Introducción*. Asunción. Recuperado a partir de <http://www.senasa.gov.py/>
- El-Naggar, E. M. (2007). Water Flow and Chemical Transport in a Subsurface Drained Watershed. *Universidad de Illinois en Urbana-Champaign*, 1(Resurgimientos naturales y ciencias ambientales), 189. Recuperado a partir de <http://hdl.handle.net/2142/83120>
- Electrónica, C. D. E. I. (2014). Desarrollo de un sistema didáctico aplicado a inversores trifásicos, empleando el sistema embebido Raspberry Pi mediante la técnica de modulación vectorial espacial, 93.
- Estévez, J., Moreno-Pérez, F., Roldán-Cañas, J., Serrat-Capdevila, A., González, J., Francés, F., ... Giráldez, J. V. (2014). Hydrology and its role in water engineering. *Ingeniería del agua*, 18(1), 1.
- FAO. (2013). *Captación y almacenamiento de agua lluvia - Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago de Chile (Maval Ltda). Santiago de Chile - Chile: Vitacura, Santiago, Chile. Recuperado a partir de [www.rlc.fao.org](http://www.rlc.fao.org)
- Fernández, P. C., & Fattorelli, S. (2011). *Diseño Hidrológico* (2da Edició). Zaragoza: Publicada en la biblioteca virtual de la WASA - GN (Water Assessment y Advisory Gobal Network).
- Fontenot, R. L. (2004). an Evaluation of Reference Evapotranspiration Models in Louisiana. *Thesis*, (August), 1–83.

- Gálvez, J. J. O. (2011). *Cartilla Técnica: Balance Hídrico Superficial*. (Z. N. Goicochea, Ed.) *Global Water Partnership South America* (Primera). Lima: Sociedad Geográfica de Lima.
- González Gutiérrez, D. (2009). *Tutorial de Qt4 Designer*. (D. González, Ed.) (1ra ed.). Barcelona. España: Universidad Politécnica de Catalunya.
- Gracia, I. (2003). *Introducción a la programación con Python*. *Universitat Jaume I* (2da ed.). Castellon. España: Unoversidad Publica en Castellon de la Plana.
- Guido, R. (2017). *Traducido y empaquetado por la comunidad de Python Argentina* (Vol. I).
- Hansen, V. E., Israelson, O. W., & Stringham, G. E. (1980). Irrigation principles and practices. 4th edition. *Irrigation principles and practices*. 4th edition.
- Higgins, G. B. O., Sánchez, M., & Carvacho, L. (2011). Comparación de ecuaciones empíricas para el cálculo de la evapotranspiración de referencia en la Región del Libertador, 186, 171–186.
- Hogares Juveniles Campesinos. (2006). *Manual abecedario ecológico la más completa guía de términos ambientales*. San Pablo.
- Huo, Z., Dai, X., Feng, S., Kang, S., & Huang, G. (2013). Effect of climate change on reference evapotranspiration and aridity index in arid region of China. *Journal of Hydrology*, 492, 24–34. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2013.04.011>
- Javier, J., & Sanjuan, V. (2010). *ONU Medio Ambiente* (1ra ed.). México: UNOPS. Recuperado a partir de <https://www.unops.org>
- Juncosa, R. (2005). Escorrentía. En *Hidrología I: Ciclo Hidrológico* (1ra ed., pp. 65–84). Murcia. España: Escuela Técnica Superior. Recuperado a partir de <http://caminos.udc.es/>
- Khakbaz, B., Imam, B., Hsu, K., & Sorooshian, S. (2012). From lumped to distributed via semi-distributed: Calibration strategies for semi-distributed hydrologic models. *Journal of Hydrology*, 418–419, 61–77.
- Lagadec, L. R., Patrice, P., Braud, I., Chazelle, B., Moulin, L., Dehotin, J., ... Breil, P. (2016). Description and evaluation of a surface runoff susceptibility mapping method. *Journal of Hydrology*, 541, 495–509.
- Llerena, C. A. (2003). Servicios Ambientales de las cuencas y produccion de agua, conceptos, valoracion, experiencias y sus posibilidades de aplicacion en el Peru, 9–12.
- López Avendaño, J. E., Díaz Valdés, T., Watts Thorp, C., Rodríguez, J. C., Castellanos

- Villegas, A. E., Partida Ruvalcaba, L., & Velázquez Alcaraz, T. de J. (2015). Evapotranspiración y coeficientes de cultivo de chile bell en el Valle de Culiacán, México. *Terra Latinoamericana*, 33(3), 209–219.
- Lozada, B. I., & Sentelhas, P. C. (2003). Diferencias entre las deficiencias y excedentes hídricos estimados a partir del balance hídrico climático normal y secuencial de las localidades de Bramon , Venezuela , y Piracicaba , Brasil. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Santa Maria*, 11, 195–198.
- Marco, I., & Torrico, A. (2011). *Determinación de Balances Hídricos en microcuencas y subcuencas*. Cochabamba - Bolivia.
- Martínez Alfaro, P. E., Martínez Santos, P., & Castaño Castaño, S. (2005). *Fundamentos de hidrogeología*. Mundi-Prensa.
- McCabe, G. J., & Markstrom, S. L. (2007). A Monthly Water-Balance Model Driven By a Graphical User Interface. *U.S. Geological Survey*, 1–12.
- Mejuto, M. F., Mayorga, A. V., & Fernandez, S. C. (1997). La utilización de modelos en Hidrología. *Instituto de Desarrollo Regional de la Universidad de Castilla La Mancha*, 1(1), 13.
- Monreal, T. E., Calvo-rubio, F. C., Estrela Monreal, T., Cabezas Calvo-rubio, F., & Estrada Lorenzo, F. (1999). La evaluación de los recursos hídricos en el Libro Blanco del Agua en España. *Ingeniería del Agua*, 6(6), 125–138.
- Monsalve Saéñz, G. (1995). *Hidrología en la Ingeniería*. (R. Buenahora, Ed.) *Hidrología en la Ingeniería* (87a ed.). Bogota - Colombia: Escuela Colombiana de Ingeniería.
- Ocampo, O. L., & Vélez, J. J. (2014). Análisis comparativo de modelos hidrológicos de simulación continua en cuencas de alta montaña: caso del Río Chinchiná. *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, 13(24), 43–58.
- Ponce, V. (1989). Hydrological Models. En *Engineering Hydrology* (Prentice H, pp. 1–61).
- Ruiz Álvarez, O., Ramírez, R. A., Peña, M. V., Capurata, R. O., & López, R. L. (2012). Balance Hídrico Y Clasificación Climática Del Estado De Tabasco , México. *Universidad y Ciencia Trópico Húmedo*, 28(1), 1–14.
- Seminario, R. (2012). Metodos Numéricos Para Ingeniería. En D. de I. C. y Agrícola (Ed.), (1a ed., p. 69). Bogota - Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Recuperado a partir de [www.ingenieria.bogota.unal.edu.co](http://www.ingenieria.bogota.unal.edu.co)

- Serrano, E. (2004). Introducción al Tutorial de Eclipse Parte 1 : Entorno de Proyectos de Eclipse. En S. Iwai (Ed.), *Introducción al Tutorial de Eclipse* (I, pp. 1–40). Mursia: Dirección Genral de Investigacion del Ministerio de Edcación y Ciencia. Recuperado a partir de <http://www.eclipse.org/legal/main.html>
- Singh, R. K., Hari Prasad, V., & Bhatt, C. M. (2004). Remote sensing and GIS approach for assessment of the water balance of a watershed. *Hydrological Sciences Journal*, 49(1), 131–142.
- Song, X., Zhang, J., Zhan, C., Xuan, Y., Ye, M., & Xu, C. (2015). Global sensitivity analysis in hydrological modeling: Review of concepts, methods, theoretical framework, and applications. *Journal of Hydrology*, 523(225), 739–757. <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.02.013>
- Tadeu, J., Tommaselli, G., & Leal, A. C. (2015). Cálculo del Balance Hídrico usando modelamiento de datos espaciales: estudio aplicado a la cuenca del río Buena Vista. *Revista Formação*, 22(1), 119–137.
- Tapia Alvarado, A. P. (2016). *Balance Hídrico usando un Modelo Hidrológico Distribuido en la Unidad Hidrográfica Río Pindo, Provincias de Loja y El Oro, Ecuador*. Universidad Agraria La Molina. Recuperado a partir de <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2408/Q02-R459-T.pdf?sequence=1>
- Thornthwaite, C., & Mather, J. (1955a). The water balance. *Publications in climatology, laboratory of climatology, VIII*, 104 pp.
- Thornthwaite, C., & Mather, J. (1955b). The Water Budget and Its Use in Irrigation. *Yearbook of Agriculture*, 346–358. Recuperado a partir de <https://naldc.nal.usda.gov/download/IND43894582/PDF>
- Thornthwaite, C. W. (1948). An Approach toward a Rational Classification of Climate. *Geographical Review*, 38(1), 55. <http://doi.org/10.2307/210739>
- Thornthwaite, C. W., & Mather, J. . (1957). *Instructions and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance*. Centerton N.J.: Drexel Institute of Technology Laboratory of Climatology. Recuperado a partir de <http://www.worldcat.org/title/instructions-and-tables-for-computing-potential-evapotranspiration-and-the-water-balance/oclc/70371630>
- Vega, E. (2015, abril). Usos Consuntivos del y presiones atópicas sobre las cuencas en México. (R. Jiménez Martínez, Ed.) *Cuencas de México*, (1), 20–32.

Villón Béjar, M. (2004). *Hidrología*. (T. de C. Rica, Ed.). Costa Rica.

Zúñiga, R., Muñoz, E., & Arumí, J. L. (2012). Estudio de los procesos hidrológicos de la cuenca del Río Diguillín. *Obras y proyectos*, (11), 69–78. <http://doi.org/10.4067/S0718-28132012000100007>

## **ANEXOS**

## Anexo 1: Estación meteorológica H0180 - variable de temperatura

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA - TEMPERATURA											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	20,9	20,5	21,7	21,9	21,6	22,0	21,6	21,9	20,2	20,6	21,8
2	20,5	21,1	21,2	21,3	21,5	21,2	21,6	22,1	20,7	21,2	22,4
3	21,0	21,3	21,8	21,7	21,9	21,5	21,7	22,0	21,4	21,5	22,6
4	21,3	21,9	21,5	21,8	21,5	22,2	22,1	22,0	21,4	21,7	22,9
5	21,3	21,4	22,1	21,7	21,5	21,8	22,2	21,8	21,3	21,8	22,6
6	20,9	21,1	20,9	21,3	21,0	22,0	21,6	21,6	20,9	21,5	22,0
7	21,0	21,5	21,5	21,4	21,3	21,9	21,9	21,7	20,8	22,0	22,1
8	21,7	22,4	22,1	22,3	22,1	22,3	22,7	22,2	21,5	22,4	22,1
9	21,5	21,8	22,6	22,9	22,3	23,0	23,1	22,5	22,5	23,4	22,3
10	22,8	22,6	22,4	22,9	22,3	22,7	23,4	22,6	22,2	23,6	22,5
11	21,5	22,2	22,0	22,8	22,7	23,0	21,14	22,0	21,6	23,3	22,2
12	21,3	21,7	21,8	22,2	22,0	22,2	21,8	21,5	21,5	22,5	21,0

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

## Anexo 2: Estación meteorológica M0180 - variable de precipitación

ESTACIÓN CLIMATOLÓGICA - PRECIPITACIÓN											
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010
1	144,5	298,4	112,2	97,3	170,3	199,1	204,1	204,8	349,7	359,9	220,5
2	380,6	237,2	309,7	191,9	264,6	276,3	432,4	144,3	338,6	336,4	320,1
3	351,5	274,9	385,2	264,9	240,4	475,9	461,3	408,4	320,3	242,4	423,7
4	336,0	98,3	225,6	199,3	245,4	82,8	221,5	265,3	479,6	209,7	213,3
5	180,8	118,8	128,6	53,3	79,1	22,8	12,9	103,8	136,3	196,1	103,5
6	35,6	1,6	6,5	15,1	6,2	9,4	24,3	7,6	33,7	11,0	22,2
7	0,2	4,1	2,0	4,7	2,2	0,0	6,7	6,0	8,4	12,6	27,5
8	0,3	0,1	0,0	8,1	1,5	0,1	1,3	3,4	15,4	1,7	15,0
9	21,8	1,4	1,2	1,2	47,5	1,2	8,2	0,0	6,9	6,8	5,3
10	0,4	1,5	21,0	4,4	25,1	33,8	14,6	10,5	55,7	2,8	18,7
11	13,2	76,8	63,0	92,8	21,5	29,0	142,3	29,7	64,7	24,9	38,7
12	101,8	89,5	175,4	96,0	59,4	80,2	282,2	94,1	51,3	171,7	178,1

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

**Anexo 3: Factor de corrección por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una – Latitud Norte.**

LATITUD - N°	E	F	M	A	M	J <sub>N</sub>	J <sub>L</sub>	A	S	O	N	D
0	1.02	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.00	0.93	1.03	1.02	1.06	1.03	1.06	1.05	1.01	1.03	0.99	1.02
10	0.98	0.91	1.03	1.03	1.08	1.06	1.08	1.07	1.02	1.02	0.98	0.99
15	0.97	0.91	1.03	1.04	1.11	1.08	1.12	1.08	1.02	1.01	0.95	0.97
20	0.95	0.90	1.03	1.05	1.13	1.11	1.14	1.11	1.02	1.00	0.93	0.94
25	0.93	0.89	1.03	1.06	1.15	1.14	1.71	1.12	1.02	0.99	0.91	0.91
30	0.90	0.87	1.03	1.08	1.18	1.17	1.20	1.14	1.03	0.98	0.89	0.88
35	0.87	0.85	1.03	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.85
40	0.84	0.83	1.03	1.11	1.24	1.25	1.27	1.18	1.04	0.96	0.83	0.81
45	0.80	0.81	1.02	1.13	1.28	1.29	1.31	1.21	1.04	0.94	0.79	0.75
50	0.74	0.78	1.02	1.15	1.33	1.36	1.37	1.25	1.06	0.92	0.76	0.70

Fuente: (Villón Béjar, 2004)

Elaboración: (Villón Béjar, 2004)

**Anexo 4: Factor de corrección por duración media de las horas de sol expresada en unidades de 30 días, con 12 horas de sol cada una – Latitud Sur.**

LATITUD - S°	E	F	M	A	M	J <sub>N</sub>	J <sub>L</sub>	A	S	O	N	D
0	1.02	0.94	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04	1.04	1.01	1.04	1.01	1.04
5	1.04	0.95	1.04	1.00	1.02	0.99	1.02	1.03	1.00	1.05	1.03	1.06
10	1.08	0.97	1.05	0.99	1.01	0.96	1.00	1.01	1.00	1.06	1.05	1.10
15	1.12	0.98	1.05	0.98	0.98	0.94	0.97	1.00	1.00	1.07	1.07	1.12
20	1.14	1.00	1.05	0.97	0.96	0.91	0.95	0.99	1.00	1.08	1.09	1.15
25	1.17	1.01	1.05	0.96	0.94	0.88	0.93	0.98	1.00	1.10	1.11	1.18
30	1.20	1.03	1.06	0.95	0.92	0.85	0.90	0.96	1.00	1.12	1.14	1.21
35	1.23	1.04	1.06	0.94	0.89	0.82	0.87	0.94	1.00	1.13	1.17	1.25
40	1.27	1.06	1.07	0.93	0.86	0.78	0.84	0.92	1.00	1.15	1.20	1.29
45	1.31	1.10	1.07	0.91	0.81	0.71	0.78	0.90	0.99	1.17	1.26	1.36
50	1.37	1.12	1.08	0.89	0.77	0.67	0.74	0.88	0.99	1.19	1.29	1.41

Fuente: (Villón Béjar, 2004)

Elaboración: (Villón Béjar, 2004)

## Anexo 5: Cálculo de caudales en BaWare y en Excel.

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2000-01	3.54	3.57	1.0%
2000-02	31.11	30.33	2.6%
2000-03	41.31	41.60	0.7%
2000-04	44.52	45.78	2.8%
2000-05	32.74	32.46	0.9%
2000-06	15.84	16.23	2.4%
2000-07	8.18	8.11	0.9%
2000-08	4.09	4.06	0.9%
2000-09	1.98	2.03	2.4%
2000-10	1.02	1.01	0.9%
2000-11	0.50	0.51	2.4%
2000-12	0.26	0.25	1.0%
	<b>Máximo</b>		<b>2.8%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.7%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2001-01	13.89	14.04	1.1%
2001-02	24.77	24.55	0.9%
2001-03	30.56	30.69	0.4%
2001-04	16.03	16.93	5.3%
2001-05	11.94	12.35	3.3%
2001-06	5.78	5.76	0.3%
2001-07	2.98	3.09	3.3%
2001-08	1.49	1.54	3.3%
2001-09	0.72	0.71	1.5%
2001-10	0.37	0.39	3.3%
2001-11	0.18	0.18	1.6%
2001-12	0.09	0.10	3.6%
	<b>Máximo</b>		<b>5.3%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.3%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2002-01	0.05	0.05	2.5%
2002-02	17.33	16.90	2.5%
2002-03	37.64	37.90	0.7%
2002-04	32.06	33.31	3.7%
2002-05	20.57	20.87	1.4%
2002-06	9.95	10.43	4.6%
2002-07	5.14	5.22	1.4%
2002-08	2.57	2.61	1.4%
2002-09	1.24	1.30	4.6%
2002-10	0.64	0.65	1.4%
2002-11	0.31	0.33	4.6%
2002-12	0.16	0.16	1.2%
	<b>Máximo</b>		<b>4.6%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.7%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2003-01	0.08	0.08	4.9%
2003-02	12.11	11.81	2.5%
2003-03	23.47	23.69	0.9%
2003-04	22.53	23.42	3.8%
2003-05	11.64	11.71	0.6%
2003-06	5.63	5.86	3.8%
2003-07	2.91	2.93	0.6%
2003-08	1.46	1.46	0.6%
2003-09	0.70	0.73	3.8%
2003-10	0.36	0.37	0.5%
2003-11	0.18	0.18	3.8%
2003-12	0.09	0.09	0.5%
	<b>Máximo</b>		<b>4.9%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.5%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2004-01	0.05	0.05	1.6%
2004-02	18.88	18.32	3.1%
2004-03	23.86	24.31	1.8%
2004-04	27.31	28.46	4.0%
2004-05	14.11	14.23	0.8%
2004-06	6.83	7.11	4.0%
2004-07	3.53	3.56	0.9%
2004-08	1.76	1.78	0.8%
2004-09	0.85	0.89	4.1%
2004-10	0.44	0.44	0.8%
2004-11	0.21	0.22	4.2%
2004-12	0.11	0.11	1.0%
	<b>Máximo</b>		<b>4.2%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.8%</b>

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2005-01	1.21	1.22	1.2%
2005-02	22.22	22.71	2.2%
2005-03	49.33	48.94	0.8%
2005-04	23.87	24.47	2.5%
2005-05	12.33	12.23	0.8%
2005-06	5.97	6.12	2.5%
2005-07	3.08	3.06	0.8%
2005-08	1.54	1.53	0.8%
2005-09	0.75	0.76	2.4%
2005-10	0.39	0.38	0.7%
2005-11	0.19	0.19	2.7%
2005-12	0.10	0.10	0.4%
	<b>Máximo</b>		<b>2.7%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.4%</b>

Fuente: El autor

Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2006-01	1.99	2.11	5.6%
2006-02	38.83	38.05	2.1%
2006-03	55.37	54.96	0.7%
2006-04	39.79	40.93	2.8%
2006-05	20.56	20.47	0.5%
2006-06	9.95	10.23	2.8%
2006-07	5.14	5.12	0.5%
2006-08	2.57	2.56	0.5%
2006-09	1.24	1.28	2.7%
2006-10	0.64	0.64	0.5%
2006-11	0.31	0.32	2.7%
2006-12	15.87	16.01	0.9%
	<b>Máximo</b>		<b>5.6%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.5%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2007-01	19.52	19.71	1.0%
2007-02	17.10	16.23	5.4%
2007-03	39.66	39.61	0.1%
2007-04	36.50	37.66	3.1%
2007-05	20.77	20.90	0.6%
2007-06	10.05	10.45	3.8%
2007-07	5.19	5.23	0.6%
2007-08	2.60	2.61	0.6%
2007-09	1.26	1.31	3.8%
2007-10	0.65	0.65	0.7%
2007-11	0.31	0.33	3.9%
2007-12	0.16	0.16	0.8%
	<b>Máximo</b>		<b>5.4%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.1%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2008-01	18.39	18.78	2.1%
2008-02	38.24	38.89	1.7%
2008-03	41.14	41.35	0.5%
2008-04	58.05	59.94	3.1%
2008-05	35.40	35.66	0.7%
2008-06	17.13	17.83	3.9%
2008-07	8.85	8.92	0.7%
2008-08	4.43	4.46	0.7%
2008-09	2.14	2.23	3.9%
2008-10	1.11	1.11	0.8%
2008-11	0.54	0.56	4.0%
2008-12	0.28	0.28	0.6%
	<b>Máximo</b>		<b>4.0%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.5%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2009-01	18.53	18.19	1.9%
2009-02	37.92	40.01	5.2%
2009-03	33.52	35.78	6.3%
2009-04	28.49	28.55	0.2%
2009-05	25.80	26.36	2.1%
2009-06	12.49	13.18	5.3%
2009-07	6.45	6.59	2.1%
2009-08	3.23	3.29	2.1%
2009-09	1.56	1.65	5.2%
2009-10	0.81	0.82	2.1%
2009-11	0.39	0.41	5.3%
2009-12	0.20	0.21	3.8%
	<b>Máximo</b>		<b>6.3%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.2%</b>

Fuente: El autor  
Elaboración: El autor

Fecha	Caudal	Caudal	Error
	BaWare	M. Excel	
	m <sup>3</sup> /s	m <sup>3</sup> /s	%
2010-01	11.12	11.02	1.0%
2010-02	31.09	31.04	0.2%
2010-03	47.20	48.00	1.7%
2010-04	34.35	35.97	4.5%
2010-05	18.92	19.31	2.1%
2010-06	9.15	9.66	5.2%
2010-07	4.73	4.83	2.1%
2010-08	2.36	2.41	2.1%
2010-09	1.14	1.21	5.2%
2010-10	0.59	0.60	2.1%
2010-11	0.29	0.30	5.2%
2010-12	0.15	0.15	1.9%
	<b>Máximo</b>		<b>5.2%</b>
	<b>Mínimo</b>		<b>0.2%</b>

Fuente: El autor  
 Elaboración: El autor