



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

INGENIERÍA CIVIL

**DISERTACIÓN DE GRADO PREVIO A LA
OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA CIVIL**

**BALANCE HÍDRICO DE LA CUENCA DEL RÍO
GRANOBLES LOCALIZADA EN LA DEMARCACIÓN
HÍDRICA DEL ESMERALDAS, MEDIANTE LA
APLICACIÓN DEL PROGRAMA HYDROBID.**

DIRECTORA: PhD. Ing. PATRICIA GARCÉS ABAD. MSc.

AUTORA: CAROLINA FABIOLA ANDRADE MOSCOSO

QUITO, JULIO 2020

Contenido

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	2
1.1. Antecedentes	2
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Principal	4
1.2.2. Específicos	4
1.3. Justificación	4
1.4. Alcance.	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO.....	9
2.1. Parámetros hidrometeorológicos.	9
2.1.1. Precipitación.....	9
2.1.2. Infiltración.....	13
2.1.3. Escorrentía.....	16
2.1.4. Evapotranspiración.....	21
2.1.5. Percolación.....	26
2.1.6. Almacenamiento.....	28
2.1.7. Balance Hídrico	29
2.2. Datos morfológicos de la cuenca.....	31
2.2.1. Área de drenaje.....	33
2.2.2. Perímetro de la cuenca.....	34

2.2.3.	Forma de la cuenca.....	34
2.2.4.	Sistema de drenaje de la cuenca.	35
2.3.	Datos fluviométricos.	37
2.3.1.	Hidrograma.....	37
2.3.2.	Procesamiento de datos de hidrología.....	39
2.3.3.	Determinación de la curva de duración.....	42
2.3.4.	Determinación de la curva de caudales.....	43
2.4.	Cambio Climático	44
2.4.1.	Origen del paradigma del Cambio Climático.....	45
2.4.2.	Escenarios del paradigma del Cambio Climático	46
2.5.	Introducción a la modelación numérica y de simulación.....	48
2.5.1.	Modelos de simulación hidrológica: generalidades.	48
2.5.2.	Ventajas de la simulación y modelación mediante el uso de software.	50
2.5.3.	Software más utilizados. Descripción breve de características.	51
CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE HYDROBID		54
3.1.	Generalidades.....	54
3.2.	Características del HydroBID.....	54
3.3.	Caracterización del HydroBID.	55
3.3.1	Parámetros y ecuaciones fundamentales del HydroBID.	62
3.3.2	Procesamiento de datos de hidrología.....	65
3.4	Funcionamiento del software HydroBID.....	65

3.4.1	Interfaz del software.	66
3.4.2	Recopilación de datos y estructura de la base de datos.	69
3.4.3	Datos de ingreso (Inputs) al software.	71
3.4.4	Parámetros y opciones del modelamiento del HydroBID.	74
3.4.5	Datos de salida (Outputs) del modelo.	76
CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANOBLES		81
4.1	Descripción de la zona de estudio	81
4.1.1	Localización de la cuenca y actividades socioeconómicas.	86
4.1.2	Caracterización física del área de estudio.	87
4.2	Procesamiento de datos.	90
4.2.2	Completar datos faltantes.	91
4.2.3	Análisis de consistencia de datos.	93
4.3	Calibración y validación del modelo HydroBID.	94
4.3.2	Calibración.	96
4.3.3	Validación	103
4.3.4	Modelamiento de Cambio Climático en el HydroBID.....	106
CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS		111
5.1	Resultados del modelamiento.	111
5.1.2	Balance Hídrico.....	111
5.1.3	Hidrogramas diarios y mensuales.	120

5.2	Escenarios del comportamiento de la cuenca ante cambio y variabilidad climáticos.	126
5.2.2	Escenario 1	126
5.2.3	Escenario 2	127
5.3	Comparación de escenarios	127
CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....		131
6.1	Conclusiones.....	131
6.2	Recomendaciones.....	133
BIBLIOGRAFÍA		135

Índice de tablas

Tabla 1:	Cuadro de porosidad, rendimiento y permeabilidad según tipo de suelo	14
Tabla 2:	Número de curva para el cálculo de la escorrentía	18
Tabla 3:	Resultados de la Calibración.....	30
Tabla 4:	Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos.....	65
Tabla 5:	Línea de tiempo de estaciones hidro-meteorológicas en la cuenca del Río Granobles. Durante el período: 2000 – 2015	70
Tabla 6:	Salidas del Modelo.....	79
Tabla 7:	Resultados de la Calibración.....	101
Tabla 8:	Proyecciones de cambio climático, basadas en el Average GCM Ensemble	

.....	109
Tabla 9: Parámetros del balance hídrico	115
Tabla 10: Parámetros del balance hídrico	120

Índice de Gráficos

Gráfico 1: Número de curva para el cálculo de la escorrentía	20
Gráfico 3: Balance Hídrico, Caudales mensuales	112
Gráfico 4: Balance Hídrico, Caudales por año.....	114
Gráfico 5: Precipitación	116
Gráfico 6: Evapotranspiración	117
Gráfico 7: Caudal Directo	117
Gráfico 8: Almacenamiento de la cuenca	118
Gráfico 9: Almacenamiento de la cuenca	119

Índice de imágenes

Imagen 1: Interfaz del QGIS con AHDTools	58
Imagen 2: Flujo de datos en el software HydroBID	61
Imagen 3: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID	66
Imagen 4: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID	67
Imagen 5: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID.....	67

Imagen 6: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Setup	68
Imagen 7: Localización de las estaciones hidro-meteorológicas en la cuenca del Río Granobles	69
Imagen 8: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Tools, Climate Data Interpolation tool	72
Imagen 9: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID.....	73
Imagen 10: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Model Parameters	75
Imagen 11: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Run Model ..	76
Imagen 12: Captura de Pantalla de View Stats and Graphs, Water Balance	77
Imagen 13: Captura de Pantalla de View Stats and Graphs, Graph.....	78
Imagen 14: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas	81
Imagen 15: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas	82
Imagen 16: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas	83
Imagen 17: Ubicación de cuenca del río Granobles.....	84
Imagen 18: Ubicación de la estación meteorológica Tomalón	86
Imagen 19: Orden del río Granobles.....	88
Imagen 20: Relación entre complejidad del modelo, disponibilidad de datos y capacidad predictiva.....	91
Imagen 21: Captura de Pantalla Parámetros de Calibración.....	98
Imagen 22: Captura de Pantalla Parámetros de Salida.....	100
Imagen 23: Captura de Pantalla Curva de Duración de Flujo.....	102
Imagen 24: Captura de Pantalla resultados de la validación.....	105
Imagen 25: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Climate	

Scenario.....	106
Imagen 26: Captura de Pantalla de ingreso de Datos del Escenario 2, Climate	
Scenario.....	110
Imagen 27: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico mensual de la cuenca	
del Río Granobles.....	112
Imagen 28: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico mensual de la cuenca	
del Río Granobles.....	113
Imagen 29: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico anual de la cuenca del	
Río Granobles.....	114
Imagen 30: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico de la cuenca del Río	
Granobles	115
Imagen 31: Curva diaria de Caudal observado vs modelado.....	121
Imagen 32: Curva mensual de Precipitación.....	122
Imagen 33: Curva mensual de Evapotranspiración, Temperatura y Heliofanía.	123
Imagen 34: Curva de Salidas de la cuenca: Evapotranspiración y Escorrentía.	124
Imagen 35: Curva diaria de Filtración y Percolación.....	125
Imagen 36: Captura de Pantalla de Balance Hídrico del Escenario 1 de cambio	
climático.....	127
Imagen 37: Captura de Pantalla de Balance Hídrico del Escenario 2 de cambio	
climático.....	127
Imagen 38: Tabla Comparativa entre Escenarios climáticos	128

Dedicatoria

A los curiosos, a los que buscan, a los que persisten...

“Las abuelas del pueblo organizaban las rogativas con la participación de niños, jóvenes y adultos que en voz alta oraban y cantaban con fervor en la plaza central del pueblo, pidiendo lluvia para salvar a los cultivos.

Estos soñadores asistían con optimismo y entusiasmo a la minga llevando su tonga y cargando su herramienta para romper el suelo, quitar las piedras y, entre cantos, conversas y risas cumplían sus tareas para abrir los surcos por donde pasaría el agua.”

(Moscoso, 2019: 111,120)

AGRADECIMIENTOS

A todo el personal de la Facultad de Ingeniería, de Deportes, de Cultura y de Pastoral de la Pontificia Universidad Católica del Ecuador, que brindó su ayuda durante mi paso por la academia.

A mi directora de tesis, Dra. Patricia Garcés MSc. quien fue incondicional al prestarme su guía, conocimientos, por las tertulias académicas y tener mucha paciencia.

Al Mgtr. Ing. Luis Poveda, como tutor en SENAGUA y guía en el manejo del software HYDROBID en el Ecuador.

A mi familia, Fabiola, Gonzalo, Nathalie, porque fueron un apoyo fundamental durante mi vida académica, exigiéndome, cuestionándome y sosteniéndome.

A mis amigos, que siempre estuvieron para hablar, para crecer, para descubrir, para vivir.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Antecedentes

La Constitución del Ecuador aprobada en el 2008, en el capítulo séptimo “derechos de la naturaleza” en los artículos del 71 al 74 reconoce que la naturaleza “tiene derecho a que se respete integralmente su existencia y el mantenimiento y regeneración de sus ciclos vitales...”¹. Además, el art. 14 reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir; por lo que se hace necesario conocer la capacidad hídrica de cada ecosistema que el Ecuador tiene para una correcta gestión del agua.

El analizar el balance hídrico de las cuencas nos ayudará a cuantificar el recurso en diferentes entornos, de acuerdo con la ubicación geográfica, entre otros aspectos, del análisis del territorio.

Esta investigación comprende las variaciones de parámetros y características hidrológicas, observación puntal de la cuenca del río Granobles. Dicho río pertenece a la cuenca alta del Río Guayllabamba de la demarcación hídrica del Esmeraldas.

¹ Artículo 71. CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, Ecuador, 2008.

De acuerdo con el Plan de manejo integrado de la cuenca del Guayllabamba Alto, se tiene la siguiente información de la cuenca del Pisque: Área de la cuenca es de 1136 km², con una altitud media de la cuenca de 1840 m.s.n.m. con un promedio de lluvia anual de 883mm y con un caudal promedio anual de 14.9 l/s.km², una evapotranspiración de 409 mm, y coeficiente de escurrimiento de 0.54, la cuenca en estudio es la cuenca del río Granobles que se encuentra dentro de la cuenca del Pisque.

La presente investigación usa solamente programas informáticos de uso libre, sin embargo, en el uso del software se presentaron dificultades. Estas novedades fueron desde el contar con técnicos conocedores de las incidencias, mismas que se presentaban durante el análisis de las rutinas propias del modelo. Otro problema serio constituye los datos históricos registrados, puesto que en el Ecuador es un insumo que no es de una calidad confiable, pero para solventar estos vacíos se optó por el relleno de datos hidrometeorológicos mediante el método estadístico de la regresión lineal, y una base de datos adaptada a la realidad del uso de suelo en el Ecuador.

La aplicación del software HYDROBID requiere del conocimiento previo de programas de sistema de información geográfica y de una base teórica en el ciclo hidrológico y cada uno de sus componentes, para comprender mejor los resultados que el programa solicita. Durante la investigación se tuvo en cuenta que todo modelamiento hidrológico debe ser lo más parecido a lo observado en la cuenca, como validación del modelo, con la finalidad de realizar proyecciones a futuro sobre la cuenca.

1.2. Objetivos

1.2.1. Principal

Determinar el balance hídrico de la cuenca del río Granobles de la demarcación hídrica del Esmeraldas, utilizando el programa informático HydroBID.

1.2.2. Específicos

1.2.2.1 Conocer los conceptos básicos de la hidrología de una cuenca hidrográfica, que son aplicables al software.

1.2.2.2 Revisar el programa, sus fundamentos de cálculo, insumos, y los resultados que el software HydroBID ofrece.

1.2.2.3 Modelar la cuenca del río Granobles localizada en la demarcación hídrica del Esmeraldas, y la aplicación del software HydroBID para determinar el balance hídrico.

1.2.2.4 Analizar e interpretar los resultados obtenidos de la aplicación software HydroBID para proyectar posibles escenarios hidrológicos de la cuenca del río Granobles.

1.3. Justificación

La Asamblea General de la ONU, en su reunión anual correspondiente a la edición 2010 reconoce que *“El acceso al agua potable y al saneamiento es un derecho humano esencial para el pleno disfrute de la vida y de todos los derechos humanos”*, por lo

que exhorta a los estados miembros de la organización a la implementación de estudios e investigaciones para la toma de decisiones fundamentadas, orientadas a buscar el bien de los ciudadanos.

El Ecuador, como país miembro de la ONU, implementa normativas específicas sobre los derechos de la naturaleza, como la Constitución vigente desde el 2008, Art.14 en la cual se *“Reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir y declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas y la biodiversidad...”* y dentro del capítulo relacionado con los derechos de la naturaleza, art. 71 inciso tercero, expresa que *“El Estado incentivará a las personas naturales, jurídicas y a los colectivos, para que protejan la naturaleza, y promoverá el respeto a todos los elementos que forman un ecosistema”*.

El agua, junto con otros elementos ambientales y factores geográficos conforman los ecosistemas, que requieren ser protegidos. Para ello, el Estado Ecuatoriano ha diseñado normativas, políticas, estrategias, metodologías e instrumentos para garantizar la vida en dichos ecosistemas. Así, el Plan Nacional de Desarrollo denominado Plan del Buen Vivir (2017-2021) es un modelo de planificación que se sostiene en tres ejes: la garantía de derechos, la economía y la participación ciudadana, a través de 9 objetivos estratégicos, (2017: 46).

El eje uno de dicho Plan, titulado “derechos para todos durante toda la vida”, en el tercer objetivo expresa: *“garantizar los derechos de la naturaleza para las actuales y*

las futuras generaciones”, para ello se requiere: (i) generar la información actualizada sobre los ecosistemas, (ii) caracterizar las fuentes hídricas, (iii) determinar los balances hídricos, (iv) establecer la calidad de las fuentes de agua y (v) mejorar los modelos de gestión del agua, entre otros estudios especializados. Además, para el manejo adecuado de recursos naturales se requiere levantar información técnica de las cuencas hidrográficas, modelar de manera confiable sus características hidrológicas y proyectar varios escenarios de estas.

La presente investigación se enmarca en el objetivo 6 del Plan Estratégico de la PUCE, que plantea “promover la producción e investigación científica con un enfoque innovador para el desarrollo del conocimiento y la resolución de problemas globales y locales”.

Por lo expuesto, conocer la capacidad hídrica de los ecosistemas del Ecuador es importante para la carrera de Ingeniería Civil, puesto que la sostenibilidad y la conservación del medio ambiente, especialmente el agua está conexas con la industria de la construcción, los estudios hidrológicos están presentes en el análisis de factibilidad, en la ejecución y evaluación de los proyectos. Por otro lado, estudiar la cuenca alta del río Granobles, implica abordar una zona geográfica de alto impacto para la economía nacional, puesto que siendo afluente del río Guayllabamba importante abarca una zona industrial, agrícola y ganadera cercana a la capital de los ecuatorianos. El área de la demarcación hídrica del Esmeraldas es de $32\,536.23\text{km}^2$ que contiene numerosas microcuencas, como la del río Granobles que es un afluente del río Guayllabamba.

El Plan de Ordenamiento Territorial del Cantón Pedro Moncayo perteneciente a la provincia de Pichincha, donde se encuentra la cuenca, dice que: “*nivel de cobertura de agua potable es del 48.27%.*” (2018). Además, dice que: “*los cultivos están en 2868 hectáreas, las cuales no cuentan con este recurso fundamental, por lo cual sus cultivos están a expensas de las condiciones climáticas*”. Por lo que, la investigación que se propone ayudará a los pobladores a tomar decisiones adecuadas para el manejo de recursos hídrico de su zona requiriendo un especial énfasis en la conservación del agua.

Las instituciones públicas y privadas encargadas de la gestión del agua, demandan de metodologías, instrumentos y sistemas para llevar a cabo el adecuado manejo del agua, por su parte el Banco Interamericano de Desarrollo-BID, a través del Instituto de Investigaciones Triangulo (RTI) desarrolló, en el 2011, una herramienta informática para modelar sistemas hidrológicos y de análisis climático: HYDROBID aplicada para estimar la capacidad hídrica de las cuencas de América Latina y el Caribe, entre los cuales consta el Ecuador.

1.4. Alcance.

Esta investigación corresponde al área de la hidrología con la aplicación de una herramienta informática del software libre desarrollado por el Banco Interamericano de Desarrollo HYDROBID, para analizar el recurso hídrico de la cuenca río Granobles localizada en la demarcación hídrica del Esmeraldas. El producto final de esta investigación será el balance hídrico de la cuenca para proyectar diversos escenarios

hidrológicos para dicha cuenca.

La investigación considera la aplicación del software HYDROBID, en la cuenca del río Granobles localizada en la demarcación hídrica del Esmeraldas. El programa informático demanda de datos hidrometeorológicos de la cuenca objeto de estudio, que se obtendrá de los anuarios hidrológicos y meteorológicos del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología, INAMHI.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Parámetros hidrometeorológicos.

Para entender la hidrología es importante conocer varios conceptos básicos que funcionan dentro del ciclo hidrológico natural de agua. Según Navas (2007), el ciclo hidrológico se define como la secuencia de fenómenos por medio de los cuales el agua pasa de la superficie terrestre, en la fase de vapor, a la atmósfera y regresa en sus fases líquida y sólida, la transferencia de agua desde la superficie de la tierra hacia la atmósfera, en forma de vapor de agua, se debe a la evaporación directa, a la transpiración por las plantas y animales y por sublimación (paso directo del agua sólida a vapor de agua).

“La cantidad de agua movida, dentro del ciclo hidrológico, por el fenómeno de sublimación es insignificante en relación con las cantidades movidas por evaporación y transpiración, cuyo proceso conjunto se denomina evapotranspiración” (Fattorelli S., y Fernández P., 2011).

2.1.1. Precipitación.

La mayor parte de agua que se precipita sobre la superficie terrestre proviene de la humedad que se evapora de los océanos y que es transportada por circulación

atmosférica a lo largo de grandes distancias (Chow, V.T., Maidment, D, Mays, L.1994). Para resumir esta teoría Linsley (1967) afirma que la precipitación es el término que determina a todas las formas de humedad que emanan de las nubes y caen a la tierra. Este elemento básico de la hidrología se presenta cuando el aire llega a una temperatura suficientemente fría, con una presión adecuada, con tamaños grande de gotas y con una saturación en humedad dentro de la nube, de esa manera tendrá lugar la precipitación (Linsley, 1967).

Chow (et al., 1994), define al agua precipitable como la cantidad de humedad contenida en una columna atmosférica. Posteriormente el vapor de agua se enfría y se satura, dando un primer efecto de la precipitación: el punto de rocío. A medida que el aire sube y se enfría, el agua se condensa de un estado de vapor a un estado líquido. La condensación requiere de una partícula sólida llamada núcleo *de condensación* alrededor del cual las moléculas del agua se pueden unir iónicamente puesto que son atraídos por la electrostática y se enlazan polarmente, algunos núcleos son partículas de polvo, de sal, entre otros.

Las pequeñas gotas de agua crecen dentro de las nubes, mediante el proceso de condensación e impacto con otras gotas cercanas, se fusionan. Cuando son lo suficientemente grandes, es decir, su diámetro está alrededor de 1 mm, actúa la fuerza de gravedad y hace caer la gota formada, atravesando la base de la nube, para precipitarse de manera vertical sobre la superficie terrestre o sobre los océanos, puede presentarse en formas diferentes como lluvia, lluvia congelada, llovizna, nieve,

aguanieve y granizo. (Chow, et al., 1994), o también se puede presentar como una precipitación horizontal como las heladas, la escarcha, la niebla o el rocío (Seoáñez, 2001:159).

El agua atmosférica es principalmente un gas o vapor, pero breve y localmente puede convertirse en líquido, como lluvia, o en las pequeñas gotas de agua de las nubes, o puede convertirse en sólido en la nieve, en el granizo y en los cristales de hielo o en las nubes.

La formación de nubes es originada por el vapor de agua que es transportado por la circulación de aire en la atmósfera, se condensa y posteriormente se precipita (Monsalve, 1995). Presentando diferentes tipos de precipitación como son:

- La precipitación **por convección** o elevación frontal es esporádica y su intensidad puede oscilar desde ligeros chaparrones hasta tormentas. Chow (et al., 1994) y Linsley (1967) coinciden que, este tipo de precipitación está causada por la elevación natural del aire más ligero y cálido, sobre zonas de aire más denso y frío.
- La precipitación **orográfica** proviene de la elevación de una masa de aire que no pasa sobre barreras montañosas, principalmente se presentan en zonas litorales o en valles. Linsley (1967) explica que tienen a representar la precipitación media anual de un específico sitio geográfico.

- La precipitación **por convergencia** se presenta cuando dos masas de aire de aproximadamente la misma temperatura que viajan en dirección contraria y se encuentran en el mismo nivel, provocando la presión necesaria para que se produzca la precipitación, de acuerdo con lo que explica Monsalve (1999).

La precipitación puede ser medida en un área dada, mediante los instrumentos meteorológicos. En el caso de Ecuador, se tiene al Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) que ubica dichos instrumentos en diversos puntos del país, llamados pluviómetros, estos están expuestos a los elementos propios de la cuenca, es decir, viento, cambio de temperatura, sismos, animales, movimiento de suelos, crecimiento de vegetación, etc. Estos efectos o fenómenos hacen que la medición de la precipitación no sea completamente real, pero dan una buena información histórica del comportamiento de las lluvias.

Los datos recogidos son variables al tipo de instrumento y la sensibilidad que estos presenten, o incluso de la habilidad del lector de datos en el caso de no ser automáticos. y se presentan a los investigadores como precipitaciones medias diarias (\bar{P}) que, según Sokolov y Chapman (1981:30), se calculan como una media aritmética de todas las lecturas de precipitación (P_i) que se realizaron durante el día en las estaciones usadas (n):

$$\bar{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i}{n}$$

También se puede medir como son las precipitaciones de una cuenca con el método de las isoyetas (línea sobre un mapa que representa la misma cantidad de precipitación en

la cuenca), las lluvias presentan gran variabilidad espacial y temporal, que indican un contorno de lluvia constante, en un área determinada. Este es un método gráfico que permite comprender el comportamiento de las precipitaciones en una cuenca, las líneas son una representación de cantidad e intensidad en función del tiempo (Chow, et al., 1994).

2.1.2. Infiltración.

La infiltración se presenta cuando la precipitación toca al suelo y penetra la superficie del terreno por el fenómeno de absorción, que según Monsalve (1999) depende de la capacidad de permeabilidad y gradiente hidráulico propio de cada suelo. En tanto que para Gribbin (2017), es el proceso que continua a lo largo del fenómeno pluvial, traspasando los intersticios de aire que se encuentran en el suelo, y llenándolos hasta saturarse. Conforme a Seoáñez (2001), cuando se llega a infiltrabilidad permanente, cuando ya no hay espacios vacíos de aire, se puede decir que el suelo llegó a un régimen invariable por la lentitud del flujo del agua en la subsuperficie. Por lo que se puede entender que la infiltración es el paso de agua de la superficie a la subsuperficie del terreno donde cayó la gota.

Para conocer la capacidad de infiltración, Monsalve (1999), identifica varios factores como: la humedad del suelo al momento que cae la precipitación, la permeabilidad del suelo dado por las características físicas propias del terreno, temperatura del agua, temperatura del suelo y finalmente de las condiciones de contorno referentes a lluvias

previas o regadíos cercanos al terreno en estudio. Seoáñez (2001:130) dice que este proceso depende también de la textura y la estructura del suelo, si la precipitación es líquida o sólida y si hay un flujo que alimenta al suelo o no.

En el siguiente cuadro se pueden apreciar las aproximaciones de porosidad, rendimiento específico y permeabilidad que Linsley (1967) propone:

Tabla 1: Cuadro de porosidad, rendimiento y permeabilidad según tipo de suelo

Material	% Porosidad	% Rendimiento	Permeabilidad [cm/seg]
Arcilla	45	3	0.5×10^{-4}
Arena	35	25	0.04
Grava	25	22	0.25
Grava y Arena	20	16	0.095
Areniscas	15	8	0.033
Calizas densas y Esquistos	5	2	0.5×10^{-4}
Cuarcita y granito	1	0.5	0.5×10^{-4}

Fuente: Hidrología para ingenieros Linsley. (1967: 144)

Existen varios métodos para calcular la infiltración uno de ellos es mediante la diferencia entre la precipitación y la escorrentía superficial en una cuenca, conociendo que el suelo tiene varias zonas por las que el agua se propaga de manera subterránea y son: zona de saturación, zona de transmisión, zona de humificación, frente de humificación. El comportamiento del agua subterránea se explica como un bulbo de humectación, puesto que inicialmente toma una forma esférica porque la difusión horizontal es muy fuerte, pero la diferencia va decreciendo hasta que la infiltración vertical puede doblar y hasta triplicar las dimensiones de la infiltración horizontal (Seoáñez, 2001:248).

En la superficie, la infiltración influye sobre la escorrentía, que es lo que suele suceder de forma más o menos inmediata. La capacidad de infiltración de un suelo se presenta cuando la lluvia sobre el terreno es mayor o igual a cero. Para Monsalve (1999): “*es la capacidad máxima con que un suelo puede absorber agua, y se define como la cantidad resultante de restar la intensidad de lluvia i , a la capacidad de infiltración f , en un tiempo dado Δt .*”

$$\text{Exceso de precipitación} = \left(i \left[\frac{mm}{hr} \right] - f \left[\frac{mm}{hr} \right] \right) \Delta t \text{ ”.}$$

Según Aparicio (1987:179) hay métodos empíricos que de acuerdo con las mediciones de lluvia y escurrimiento mediante una resta simple puede saberse el nivel de infiltración, menciona un método basado en el número de curva (CN) para determinar la altura de lluvia efectiva:

$$Pe = \frac{\left(P - \frac{508}{CN} + 5.08 \right)^2}{P + \frac{2032}{CN} - 20.32} [mm]$$

Finalmente, Monsalve considera la humedad que antecede a la tormenta que va a ser medida, presenta tres niveles: antecedente seca (AMC I), antecedente promedio (AMC II), antecedente húmeda (AMC III). Este autor (1995:146), sugiere utilizar las siguientes relaciones para encontrar el número de curva que será utilizada en la ecuación que usa Aparicio:

$$CN_I = \frac{CN_{II}}{2.3 - 0.013CN_{II}}$$

$$CN_{III} = \frac{CN_{II}}{0.43 + 0.0057 CN_{II}}$$

siendo CN_{II} obtenida de cuadro de escorrentía.

2.1.3. Escorrentía.

La escorrentía es el producto originado durante la precipitación que no se filtra, ni absorbe en el suelo, ni evapora, ni estanca. Es un fenómeno superficial de transporte de agua colina abajo, mediante la concentración y escurrimiento en canales naturales que son guiados por la topografía propia de cada cuenca.

Según Aparicio (1987) hay tres tipos de escurrimiento: el superficial, el subsuperficial y el subterráneo. Siendo el primero el sujeto de estudio de esta investigación, puesto que depende directamente de la precipitación conocida como tormenta. La escorrentía superficial se presenta luego de una precipitación y por efecto de la topografía del terreno forma una corriente de agua, puede ser alimentada también por aguas subterráneas (Monsalve, 1999).

Para calcular el comportamiento de una tormenta, se utiliza el método de la curva de escorrentía (CN), que fue desarrollado por el Soil Conservation Service de los Estados Unidos de América, SCS. (Monsalve, 1999: 150). Este método empírico dice que el suelo no puede absorber toda el agua de una precipitación y hace que se escurra, es decir que en función de uso del suelo y del tipo de suelo del lugar que se está estudiando una parte se intercepta, otra parte se infiltra y otra se escurre. La capacidad para abstraer agua es inversamente proporcional a un parámetro numérico tomado de la curva de escorrentía (CN).

Este método, CN – SCS, se basa en datos meteorológicos de precipitación y escurrimiento durante 24 horas, no toma en consideración la intensidad de lluvia. La variación de CN va desde 1 hasta 100 y depende de las realidades físicas de la cuenca como la precipitación que se presenta, el tipo y uso del suelo, cobertura vegetal y humedad previa del suelo. Es importante mencionar que el método de la curva CN fue desarrollado para cuencas rurales de tamaño no mayor a 250 km², Monsalve (1999:152) dice que para cuencas de mayor área requiere un discernimiento del uso del método mencionado; añade también que hay una sensibilidad a la humedad antecedente propia de la cuenca.

Para que el CN de una cuenca, describa la realidad observada, se debe considerar varios factores entre los cuales se citan los tipos de suelo hidrológico.

Aparicio (1987: 189) clasifica a los suelos de la siguiente manera:

- *Grupo A: Arenas con poco limo y arcilla, son suelos muy permeables.*
- *Grupo B: Arenas finas y limos.*
- *Grupo C: Arenas muy finas, limos, suelos con alto contenido de arcilla.*
- *Grupo D: Arcillas en grandes cantidades; suelos poco profundos con subhorizontes de roca sana; suelos muy impermeables.*

Además de la clasificación, se debe considerar el uso del suelo de la cuenca, es decir establecer si hay cobertura, si está cubierto al menos el 5% de residuos vegetales durante todo el año (CR), si las labores campesinas consideran la pendiente del terreno y se realizan en línea recta (R), si los cultivos siguen las curvas de nivel (C), si el terreno tiene terrazas para conservar el suelo y optimizar los cultivos (T). La siguiente tabla presenta los valores de CN de acuerdo con los parámetros expresados previamente.

Tabla 2: Número de curva para el cálculo de la escorrentía

Tipo de vegetación	Uso de suelo	Condición hidrológica	Tipo de suelo			
			A	B	C	D
Barbecho ²	Desnudo	-	77	86	91	94
	CR	Pobre	76	85	90	93
	CR	Buena	74	83	88	90
Cultivos Alineados	R	Pobre	72	81	88	91
	R	Buena	67	78	85	89
	CR + R	Pobre	71	80	87	90
	CR + R	Buena	64	75	82	85
	C	Pobre	70	79	84	88
	C	Buena	65	75	82	86
	C + CR	Pobre	69	78	83	87
	C + CR	Buena	64	74	81	85
	C + T	Pobre	66	74	80	82
	C + T	Buena	62	71	78	81
	C + T + CR	Pobre	65	73	79	81
	C + T + CR	Buena	61	70	77	80
Cultivos no alineados, o con surcos pequeños mal definidos	R	Pobre	65	76	84	88
	R	Buena	63	75	83	87
	CR + R	Pobre	64	75	83	86
	CR + R	Buena	60	72	80	84
	C	Pobre	63	74	82	85
	C	Buena	61	73	81	84
	C + CR	Pobre	62	73	81	84
	C + CR	Buena	60	72	80	83
	C + T	Pobre	61	72	79	82
C + T	Buena	59	70	78	81	

² **Barbecho** adj. Dicho de una tierra labrantía: Que no se siembra durante un tiempo para que descansa. Diccionario de la Real Academia Española de la Lengua. Recuperado: <https://dle.rae.es/barbecho>

	C + T + CR	Pobre	60	71	78	81
	C + T + CR	Buena	58	69	77	80
Cultivos densos de leguminosas o prados en alternancia	R	Pobre	66	77	85	89
	R	Buena	58	72	81	85
	C	Pobre	64	75	83	85
	C	Buena	55	69	78	83
	C + T	Pobre	63	73	80	83
	C + T	Buena	51	67	76	80
Pastizales o pastos naturales	-	Pobre	68	79	86	89
	-	Regular	49	69	79	84
	-	Buena	39	61	74	80
Pastizales	C	Pobre	47	67	81	88
	C	Regular	25	59	75	83
	C	Buena	6	35	70	79
Prados permanentes	-	-	30	58	71	78
Matorral – herbazal, siendo matorral preponderante	-	Pobre	48	67	77	83
	-	Regular	35	56	70	77
	-	Buena	≤30	48	65	73
Combinación de arbolado y herbazal, cultivos leñosos	-	Pobre	57	73	82	86
	-	Regular	43	65	76	82
	-	Buena	32	58	72	79
Montes con pastos (aprovechamientos pastoriles)	-	Pobre	45	66	77	83
	-	Regular	36	60	73	79
	-	Buena	25	55	70	77
Bosques	-	Muy pobre	56	75	86	91
	-	Pobre	46	68	78	84
	-	Regular	36	60	70	76
	-	Buena	26	52	63	69
	-	Muy buena	15	44	54	61
Caseríos	-	-	59	74	82	86
Caminos en tierra	-	-	72	82	87	89
Caminos con firme	-	-	74	84	90	92

Fuente³: Clasificación grupo de catedráticos en lucha contra la desertificación.

El método del número de curva CN, toma en consideración la intensidad de lluvia, la humedad previa del suelo, contemplando la posibilidad de que el suelo se encuentre saturado en el momento de producirse una nueva precipitación, ya que aplica

³“Pequeña guía de uso del modelo MODIPÉ”; A. Martínez de Azagra, J. Mongil & J; del Río (2003). <http://www.oasification.com/tablasden.htm>

parámetros relativos al uso y características hidrológicas del suelo. Si el suelo está seco, habrá menos posibilidad de escorrentía, por el contrario, si el suelo está saturado habrá mayor posibilidad de escorrentía.

El software HydroBID, calcula la escorrentía superficial mediante el número de CN, Moreda (et al, 2014: 20) explica en la nota técnica que habla sobre las ecuaciones usadas en el modelo, que los números de curva son asignados de acuerdo con el tipo y uso de suelo de cada cuenca, también considera la humedad que almacena el suelo cinco días previos puesto que es una influencia a la capacidad de infiltración y escorrentía basado en la publicación: “*Procedimiento basado en eventos para estimar los rendimientos mensuales de sedimentos*” de Haith en 1985:

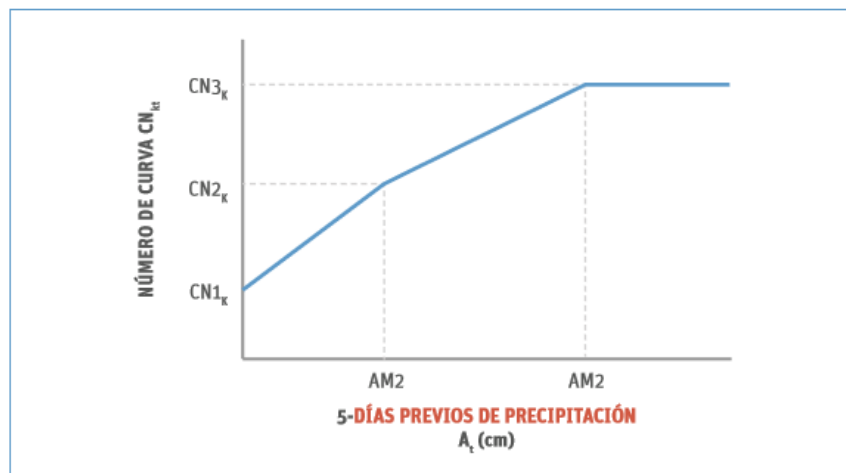


Gráfico 1: Número de curva para el cálculo de la escorrentía
Fuente: Moreda et al, 2014: 20

El gráfico expresa la representación del número de curva (CN) asignado en el software por uso de suelos, presenta las condiciones de CN1k para suelo seco, CN2k para un suelo promedio y CN3k para un suelo húmedo, tal como se mencionó en el capítulo

de infiltración (Moreda et al., 2014).

Posteriormente se calcula la esorrentía (RO_t) en cm, usando la ecuación del número de curva del U. S. Soil Conservation Service, donde intervienen la suma de la lluvia y deshielo (R_t) y un parámetro de detención (D_t) el cual es la relación empírica de $\frac{2540}{CN_t}$.

$$RO_t = \left(\frac{R_t - 0.2D_t}{R_t + 0.8D_t} \right)^2$$

Fórmula tomada de Moreda et al. (2014: 20)

2.1.4. Evapotranspiración.

La evapotranspiración es la suma de dos procesos independientes que están correlacionados, estos son la evaporación desde la superficie terrestre comprende la evaporación directa desde la superficie del suelo y la transpiración desde la superficie de la vegetación. (Chow, et al., 1994: 83), siendo la principal fuente de humedad para la precipitación (Linsley, 1967:52).

EVAPORACIÓN

La evaporación se produce en los cuerpos de agua o en el agua contenido en la superficie del suelo en donde las moléculas de agua pasan del estado líquido a un estado gaseoso. (Aparicio, 1987;47). Uno de los principales factores que influyen en la evaporación es la radiación solar, se requiere aproximadamente 600 calorías por cada gramo de agua evaporada (Linsley, 1967:104), otro factor es la habilidad para

transportar el vapor fuera de la superficie de evaporación que depende de la velocidad del viento sobre la superficie y del gradiente de humedad específica en el aire por encima de ella. (Chow, et al., 1994: 83). La tasa de variación de la temperatura con respecto a la altitud es otro factor, como también, la presión atmosférica y la presión de vapor de agua (Monsalve, 1995).

TRANSPIRACIÓN

La transpiración es el fenómeno que aporta agua a la atmósfera mediante la presencia de la vegetación. Para Aparicio (1987), la transpiración es el agua que sale a través de hojas de las plantas en forma de vapor de agua. Navas (2007), complementa diciendo que el agua es absorbida por las raíces, transportada por los tallos y difundida a la atmósfera a través de pequeñas aberturas en las hojas llamadas estomas. Y por último Linsley (1967) confirma que hay una relación importante de mayor cantidad de transpiración cuando la planta se encuentra en crecimiento.

EVAPOTRANSPIRACIÓN

La evapotranspiración, se conoce como la cantidad de agua transferida del suelo a la atmósfera por evaporación y por la transpiración de las plantas. (Monsalve, 1995: 21). Es decir, la evapotranspiración es la combinación de dos procesos, el proceso de *Evaporación* que consiste en la emisión de vapor de agua por una superficie libre a temperatura inferior a su punto de ebullición; y el proceso de la *Transpiración* que es el proceso por el cual el agua de la vegetación pasa a la atmósfera en la forma de vapor. (Chow, et al., 1994:93). Siendo los factores determinantes de este fenómeno el

suministro de energía calórica y el transporte de vapor, además la cantidad de humedad que ya existe en el ambiente.

Existen varios métodos para calcular la evapotranspiración como el método de balance de energía que considera la relación de la radiación neta con el calor latente por la densidad del agua. (Chow, et al., 1994:86)

$$E_r = \frac{R_n}{l_v \rho_w}$$

Y el método aerodinámico que considera un coeficiente de transferencia de vapor (B) por la diferencia de la presión de vapor de agua con la presión de vapor de aire (Chow, et al., 1994:86).

$$E_a = B(e_{as} - e_a)$$

El coeficiente B tiene parámetros de humedad relativa, velocidad del viento, presión del aire, densidad del agua y del aire y una relación de alturas (Chow, et al., 1994:86).

$$B = \frac{0.622k^2 \rho_a u_2}{p \rho_w \left[\ln \left(\frac{z_2}{z_0} \right) \right]^2}$$

Estos cálculos no son satisfactorios porque no se considera la transferencia de masa y los aspectos energéticos de la evapotranspiración como se presentan en la realidad.

Sino de manera aislada (Brutsaert, 2013). Es por esa razón que en términos hidrológicos se calcula la evapotranspiración potencial.

El método de estimación de potencial de evapotranspiración (PET) utilizado por el HydroBID se desarrolló en 1962, usa la temperatura media diaria y el número de horas de luz diurna:

$$PET_t = \frac{0.021H_t^2 e_t}{T_t + 273}$$

Dónde:

- T_t es la temperatura media en el día.
- H_t es el número de horas de luz solar por día durante el mes, considerando la declinación solar (δ), la latitud geográfica(Φ) en radianes y la rotación angular (ω) de la tierra:

$$H_t = \frac{2\text{Cos}^{-1}[-\tan\delta \tan\Phi]}{\omega}$$

- e_t es la presión de vapor de agua saturada, puede ser aproximada como:

$$e_t = 33.8639[(0.00738T_t + 0.8072)^2 - 0.000019(1.8T_t + 4) + 0.001316]$$

Milibars

Para $T_t > 0$

Los valores dependen de la cobertura vegetal de la cuenca, pero está limitada por la disponibilidad de humedad en el suelo (Moreda, et al, 2014: 18). Se considera almacenamiento de agua al agua superficial, almacenada en el suelo y en la zona no

saturada sobre la superficie de la cuenca y al agua subterránea. El agua almacenada es determinante para el balance hídrico puesto que una parte se evapora y sigue inmediatamente el ciclo hidrológico y otra parte se filtra y se almacena por largos períodos hasta que llega la estación que permite incorporarse al ciclo hidrológico (Sokolov y Chapman, 1981:83).

MÉTODO DE THORNTHWAITE PARA LA EVAPOTRANSPIRACIÓN.

La Evapotranspiración, es conocido también como “uso consuntivo”, es un factor que incide directamente en el cálculo del balance hídrico, siendo este un método de salida de la cuenca hidrológica (Aparicio, 1987: 56). Para Heras (1972:50) este método es la comparación entre la evapotranspiración potencial (sea mensual o anual) con la precipitación media en el mismo período, dando 3 clasificaciones para comprender la cantidad de agua: si la precipitación es superior, habrá superávit (s). Si es inferior, habrá déficit (d). Si son iguales, habrá satisfecho las necesidades de agua del terreno(n).

Es por eso que, Thornthwaite desarrolló su método, en 1944, para el cálculo mensual como función de las temperaturas de cada cuenca. El cálculo está determinado por la fórmula:

$$U_j = 1,6k_a \left(\frac{10T_j}{I} \right)^a$$

Fórmula tomada de Aparicio (1987: 56).

En donde, se toma en cuenta la temperatura media en el mes (T_j); una constante que depende de la latitud y el mes del año, para el Ecuador tiene una variación 0.94 a 1.04

(Ka), finalmente hay una constante I de eficiencia de temperatura.

Con el método descrito se puede determinar, un índice hídrico anual para cada cuenca, en el que los meses áridos tienen menor influencia ya que la aridez no es acumulable y la reserva de agua sí lo es. La fórmula que calcula este índice es:

$$I_m = I_h - 0.6I_a$$

- índice de humedad: $I_h = 100 \frac{s}{n}$
- índice de aridez: $I_a = 100 \frac{d}{n}$

Fórmulas tomadas de Heras (1972:50)

En donde n es el número de días y s es en número de días lluviosos y d el número de días secos.

2.1.5. Percolación

La percolación es una característica del escurrimiento subterráneo, es decir, que ocurre cuando el agua en la zona de estudio sobrepasa la capacidad disponible de agua del suelo, estando este no saturado, a estratos profundos (Monsalve, 1995). Para Linsley (1967) un fragmento de la precipitación puede percolar de manera vertical hasta alcanzar el nivel hidrostático, el cauce subterráneo se llama también caudal base y estación seca, ya que eventualmente las corrientes subterráneas salen a un cauce o a la superficie, los efluentes subterráneos toman mucho tiempo en salir a un cauce superficial por la baja velocidad de los flujos y el recorrido no determinado es difícil de recorrerlo. La percolación es el movimiento del agua que se realiza a través del

suelo. (Idem:142)

La percolación y el agua subterránea pueden ser correlacionados por el sincretismo que presentan los dos fenómenos, incluso la zona saturada (S_t) poco profunda se simula como un embalse lineal simple, puesto que a medida que el agua llega a niveles más profundos hay menor permeabilidad en los suelos (idem:142). El flujo o el volumen de agua subterránea (R_t) y la infiltración profunda (M_t) se calculan de la siguiente manera:

$$R_t = rS_t \quad \text{y} \quad M_t = sS_t$$

En la nota técnica 2 del uso del HydroBID, cita a Hann (1972) para definir a r y s como: “constantes de recesión de agua subterránea, existe una alta correlación entre sí.” (Moreda, et al, 2014:22).

Cuando la característica propia de cada suelo permite la permeabilidad, es decir que está no saturado, se puede calcular la percolación (P_t) con la siguiente ecuación:

$$P_t = \text{Max}(0, (U_t + R_t + M_t - Q_t - E_t - U^*))$$

- U_t es la humedad del suelo de las zonas no saturada en el comienzo del día.
- G_t es el flujo o el volumen de agua subterráneas que luego se descargará a las corrientes fluviales.
- D_t es la infiltración hacia la zona saturada profunda, respectivamente, en el día t (cm).
- Q_t es la esorrentía de la cuenca.
- E_t es la evapotranspiración real.

Fórmulas tomadas de (Moreda, et al, 2014:21)

2.1.6. Almacenamiento

Para el balance hídrico es importante considerar el efecto de almacenamiento en las zonas altas de la cuenca, puesto que es parte del ciclo hidrológico cuando ocurren desglaciación, deshielos o afloramiento del agua mediante pozos cuando hay sequías en la superficie de la cuenca, se conocen valores típicos adimensionales del coeficiente de almacenamiento en un acuífero libre (0.01 a 0.15) y en un acuífero confinado (0.00001 a 0.01), pero dichos valores deben ser mejor estudiados según las características de cada cuenca (Aucatoma, et al., 1998).

Para Sokolov y Chapman (1981:86) el almacenamiento de agua en las cuencas hidrográficas puede ser:

- Agua superficial (S) almacenada sobre la superficie de la cuenca, es decir que el agua puede almacenarse en los glaciares, en lagos, pantanos embalses, charcos. Este tipo de almacenamiento tiene como característica que los vientos, la temperatura y el nivel de agua, hace que se evapore y se incorpore rápidamente a ciclo hidrológico de una cuenca.
- Agua Subsuperficial (M), también conocida como flujo no saturado fluye a través del suelo no saturado cerca de la superficie terrestre. Es decir, se almacena en el suelo en la zona no saturada.
- Agua Subterránea (G) son acuíferos que dependen del tipo de suelo en el que están ubicados, y la provisión de agua subterránea se puede determinar por observación y por datos de porosidad eficaz. En cuencas con

condiciones hidrogeológicas homogéneas el nivel medio se calcula como media aritmética, mientras que en cuencas con condiciones heterogéneas se calcula como media ponderada. Las variaciones del agua subterránea almacenada se deben determinar para cada estructura que constituya la cuenca.

2.1.7. Balance Hídrico

El balance hídrico es una de las interacciones físicas que sucede en una cuenca hidrográfica, se lo entiende como el equilibrio entre el ingreso de agua ya sea por precipitación, deshielo, aporte de aguas subterráneas y/o trasvase desde otras cuencas hidrográficas colindantes; y la salida de agua por evapotranspiración, infiltración y escorrentía superficial en un determinado tiempo. (Dunne y Leopold, 1978).

El sistema se representa por una transformación de la entrada $I(t)$ y salida $Q(t)$, que a su vez se iguala a la ecuación de continuidad para el flujo no permanente de densidad constante (Chow 1994:208) en donde $\frac{dS}{dt}$ es el cambio de almacenamiento.

$$\frac{dS}{dt} - I(t) + Q(t) = 0$$

Los datos de entrada comprenden los valores de precipitación P , las aguas superficiales que ingresan a la cuenca Q_{supl} y las aguas subterráneas que pueden

venir de otra masa de agua Q_{subl} . Las salidas dentro del balance hídrico son la evapotranspiración E y la salida de flujos superficiales o subterráneos, Q_{supo} y Q_{subo} respectivamente, pero esta manera de ver a las entradas y salidas no es suficiente para una cuenca hidrológica, también se debe considerar la variación de volumen de agua almacenada en el suelo de la cuenca o en la vegetación de esta, ΔS , puesto que este almacenamiento natural servirá para nutrir de agua a los cauces en momentos de sequía. (Sokolov y Chapman, 1981:19), por último, se debe considerar un error residual (v) de las estimaciones de los elementos que influyen en el cálculo del balance hídrico, dando como ecuación general la siguiente expresión:

$$P + Q_{supl} + Q_{subl} - E - Q_{supo} - Q_{subo} - \Delta S - v = 0$$

El error residual, se puede estimar mediante la característica porosa del suelo, que según Sokolov y Chapman (1981) se puede obtener en la siguiente tabla que indica el valor medio de la porosidad eficaz en diversos materiales:

Tabla 3: Resultados de la Calibración

Tipo de suelo	v_{sz}
Arenas muy finas y arenas limosas	0.10 – 0.15
Arenas finas y arenas arcillosas	0.15 – 0.20
Arenas medias	0.20 – 0.25
Arenas gruesas y gravas	0.25 – 0.35
Areniscas con arcilla cementada	0.02 – 0.03
Calizas fracturadas	0.01 – 0.10

Fuente: Sokolov y Chapman, 1981:99

Según lo expresado en los párrafos anteriores, se puede decir que el almacenamiento de la cuenca en diferentes estaciones del año es de suma importancia para determinar un superávit o un déficit en el cuerpo hídrico que se está estudiando. Además, se puede subdividir la cuenca para tener regiones homogéneas y calcular adecuadamente cada uno de los parámetros que influyen en el cálculo del balance hídrico.

2.2. Datos morfológicos de la cuenca.

Cuenca Hidrográfica

La cuenca hidrográfica es un área delimitada por la topografía, compuesta de uno o varios cauces de agua provenientes de la escorrentía superficial, posee una salida o desembocadura para descargar el efluente (Chow, 1994). El área de la cuenca se determina por las líneas divisorias que son líneas imaginarias que perfilan el límite de la cuenca de drenaje, siendo obtenidos en los puntos más altos sugeridos por la topografía del terreno. (Monsalve, 1999)

La cuenca hidrográfica cumple con varias funciones inherentes a los ecosistemas circundantes tales como la ambiental y la hidrológica. La primera regula el clima y genera biodiversidad, y la segunda se refiere a la captación, almacenamiento y descarga del agua en todos sus estados. Otra función es regular y abastecer

continuamente de agua dulce a los usuarios de la cuenca y favorecer el ciclo hidrológico (Monsalve, 1999).

Datos morfológicos de la cuenca

La morfología de la cuenca está dada por los canales fluviales naturales propios de cada cuenca, como lo describe Gutiérrez en su libro Geomorfología (2008:201), depende directamente de la interacción entre el flujo y los materiales erosionables en el límite del canal. Las características morfológicas dependen de la forma, relieve, red de drenaje, los tipos de suelos, la capa vegetal, la geología las prácticas agrícolas, etc. (Monsalve, 1999: 37). Existen varias clasificaciones morfológicas de redes de drenaje, que menciona Gutiérrez (2008) en un trabajo previo de Gregory y Walling (1973), dendrítica, rectangular, radial, centripeta, enrejada, paralela, anular, desordenada.

Perfil longitudinal.

El perfil longitudinal de un río es la línea obtenida a partir de las diferentes alturas desde su nacimiento a su desembocadura. El perfil longitudinal de la cuenca es cóncavo, aunque muchos ríos no tienen una concavidad clara, ya que contienen partes aplanadas y quebradas. El nivel de base general está constituido por la altura mínima y corresponde al nivel del mar, aunque pueden existir niveles de base locales, como lagos, bandas de rocas resistentes, embalses, etc. Si el nivel de base cambia, los ríos tienden a ajustarse al perfil de equilibrio mediante transformaciones en el sistema de canales, anchura y rugosidad o modificando la pendiente del canal por erosión o sedimentación. Si la roca es fácilmente erosionable, tal como margas o arcillas rápidamente puede alcanzar la divisoria de aguas de otro río, para finalmente remontar

hasta el curso fluvial, (Gutiérrez, 2008: 201).

Bajo el mismo precepto, Derruau (1977) en su libro: “Las formas del relieve terrestre”, expresa que la densidad de los cursos de agua varía, son escasos en las zonas permeables, ya que los cauces se forman por infiltración en profundidad, donde existe la presencia de calizas. Por el contrario, en las regiones arcillosas, que son suelos impermeables el barranco más pequeño tiene un arroyo. Estas últimas diferencias provienen, en parte, del relieve y en parte del clima, es por esto que se clasificó a las cuencas como:

“endorreicas, que son cuencas que tienen uno o dos cursos de agua, pero no llegan al mar; exorreicas, que son cuencas que tienen cuencas fluviales que desembocan en el mar desaparecen en un lago temporal o permanente; y por último cuencas arreicas que corresponden a desiertos donde la precipitación es escasa y la evaporación considerable” (Derruau, 1977:11).

2.2.1. Área de drenaje.

El área de drenaje para Monsalve (1999: 37), es una definición muy concreta que dice: *“es el área plana (proyección horizontal) incluida entre su divisoria topográfica.”* De modo similar Gribbin (2017) amplía la explicación diciendo que al calcular la cantidad de escurrimiento en un flujo de agua que resulta de un fenómeno pluvial, primero se determina el tamaño del área sobre el cual cae la lluvia. El área de tierra recibe el nombre de área de captación, o área de drenaje siendo para cada corriente, un área bien definida de terreno que intercepta la precipitación y la conduce por gravedad a la corriente principal. Como primer paso en el cálculo del escurrimiento se utiliza un plano acotado de la cuenca para trazar la divisoria que circunda la corriente, y con ayuda de softwares se puede obtener el valor del área de la cuenca.

2.2.2. Perímetro de la cuenca.

El perímetro de una cuenca está dado para describir la forma que tiene la cuenca, se observa que la relación área-perímetro tiene influencia en las características hidrográficas de la cuenca si bien el valor del área es el mismo la forma de su perímetro hace que no se comporten igual. (Heras, 1972: 344).

2.2.3. Forma de la cuenca.

Puesto que una cuenca tiene siempre un área y un perímetro perfectamente definido hay que conocer cómo se puede determinar varios aspectos que identificará como redonda, alargada, u otra forma. En el párrafo anterior se habló de tiempo de concentración como característica importante para definir la forma de la cuenca, de modo similar Monsalve (1999:37). Hay varios factores que ayudan a la caracterización de forma y son:

- Índice de Gravelius o coeficiente de compacidad (Kc) que relaciona el perímetro de la cuenca y la longitud de la circunferencia de un círculo de área igual a la cuenca.

$$Kc = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}}$$

Coeficiente de compacidad es el valor que indica la regularidad de la forma de la cuenca, es decir, cuanto más irregular sea la cuenca mayor será su coeficiente de compacidad. Si el valor se acerca a 1.0 las cuencas serán circulares, y mientras los

valores que se alejen o sean mayores serán cuencas irregulares con menor a concentrar volúmenes de agua de escurrimiento, es decir tienen un buen drenaje.

- Factor de forma (Kf) es un valor adimensional que explica el comportamiento que va a tener la cuenca cuando se presenten crecidas, es la relación entre el ancho medio (B), se obtiene cuando se divide el área por la longitud axial de la cuenca; con la longitud axial de la cuenca (L) se mide cuando se sigue el curso del agua más largo desde la desembocadura hasta la cabecera más distante de la cuenca. El ancho medio, A es el área de drenaje en Km².

$$Kf = \frac{A}{L^2} \quad (\text{Monsalve, 1999:38})$$

Un valor de Kf superior a 1.0 indica una tendencia a concentrar el escurrimiento de la cuenca, siendo cuencas inundables. Si el factor de forma es menor a la unidad la cuenca está libre de inundaciones por crecientes de los cauces (Lux, s.f.).

2.2.4. Sistema de drenaje de la cuenca.

El sistema de drenaje está constituido por el río principal y sus tributarios. Existe un orden de las corrientes de agua que refleja el grado de ramificación dentro de una cuenca. Siendo clasificados como: corrientes de primer orden, son pequeños canales que no tiene tributarios; corrientes de segundo orden, cuando dos corrientes de primer orden se unen; corrientes de tercer orden, cuando dos corrientes de segundo orden se unen. Y así sucesivamente (Monsalve, 1999:39). Si una corriente de orden “n” se une

con una corriente de “n+1”, la corriente resultante será la corriente de orden “n+1”.

La densidad de drenaje (Dd), es parte del sistema de drenaje, ya que establece la relación entre la longitud total (L) de los cursos de agua de la cuenca en km y su área total (A) de la cuenca en km².

$$Dd = \frac{L}{A}$$

Usualmente la densidad de drenaje se encuentre en el rango de valores entre 0.5 km/km² para cuencas con drenaje pobre hasta 3.5 km/km² para cuencas excepcionalmente bien drenadas (Monsalve, 1999;39).

Dentro de este sistema de drenaje es importante mencionar la sinuosidad de las corrientes de agua, que es la relación entre la longitud del río principal medida a lo largo de su cauce, L, y la longitud del valle del río principal medida en la línea curva o recta, Lt.

$$S = \frac{L}{L_t}$$

Este parámetro da una medida de la velocidad de la escorrentía del agua a lo largo de la corriente. Un valor de S menor o igual a 1.25 indica una baja sinuosidad (Monsalve,1999).

2.3. Datos fluviométricos.

Los datos fluviométricos son aquellos que provienen de la medición de la escorrentía superficial, es decir de los caudales o flujos de los ríos que conforman a una cuenca.

2.3.1. Hidrograma.

El tránsito de caudales es un procedimiento para determinar el tiempo y la magnitud del caudal, es decir, hidrograma de caudal. Si el flujo es una creciente, el procedimiento se conoce específicamente como tránsito de crecientes. En un punto de un curso de agua utilizando hidrogramas conocidos o supuestos en uno o más puntos aguas arriba (Chow, et al., 19924:49).

Para realizar los hidrogramas es necesario la medición de caudales, para lo cual el primer concepto que se debe conocer es “nivel de agua” que consiste en la elevación propia de un río con respecto al punto de caudal nulo de la corriente (Linsley, 1967:66), se debe tener un registro continuo del nivel de un cauce de agua mediante los diferentes tipos de aforos.

El hidrograma es la curva que representa gráficamente los caudales en el tiempo. Sirve para estudiar la variación del caudal en las corrientes. Navas (2007: 47), considera al hidrograma como la expresión integral de las características fisiográficas y climatológicas de la cuenca. Linsley (1967: 86) asegura que, de acuerdo con la finalidad del diagrama, se puede indicar la escorrentía total de una estación y que

existen varios procedimientos para dibujar la gráfica. Para Aparicio (1987: 29), según la escala de tiempo que se utilice puede haber hidrogramas por tormenta, diario, mensual, anual, etc.

Para comprender como se interpreta un hidrograma se debe comprender que los valores medios históricos que provienen de las estaciones hidro-meteorológicas son contrastados alrededor de valores medios y variaciones aleatorias, después de procesarlos.

Las distribuciones empíricas de los histogramas suelen darse de manera unimodal en las medidas de mensuales, y bimodales en las medidas anuales; siendo la distribución unimodal caracterizada por un gráfico que contiene una sola cima con datos que ayudan al crecimiento y decrecimiento de la curva. Y siendo la distribución bimodal caracterizada por un gráfico en donde se pueden leer varios picos y cimas por la heterogeneidad de los datos, para Linsley (1967), este último tipo es típico de las épocas cercanas a los equinoccios.

En el software HydroBID el flujo total (F_t) de la cuenca es la suma de la escorrentía (RO_t) y del flujo del agua subterránea (G_t) que brota del almacenamiento, tal como lo menciona Moreda (2014:22):

$$F_t = RO_t + G_t$$

2.3.2. Procesamiento de datos de hidrología.

La hidrología, maneja gran cantidad de datos, por lo que la estadística facilita la recopilación, preparación análisis e interpretación de datos, por lo tanto la teoría de probabilidades es aplicada para el estudio de los fenómenos hidrológicos, cuando se habla de homogenización de datos, se debe separar muy claramente en homogeneidad en el tiempo, temporalidad, y la homogeneidad en el espacio, espacialidad; siendo esa la única manera de disminuir incertidumbres estadísticas en las proyecciones sintéticas del comportamiento hidrológico de una determinada cuenca.

La hidrología trabaja con una gran cantidad de datos, pero dichos insumos requieren ser series continuas completas, en un rango de tiempo para realizar el análisis hidrometeorológico, por lo que es imperativo completar los datos faltantes, mediante el uso de la estadística. Los datos faltantes se deben a muchos factores, por ejemplo, la ausencia del instrumento de medición, la inoperancia del técnico de campo al leer los registros, cambio de lugar o modernización del instrumento de medida, la extensión de las observaciones en el tiempo o incluso la densidad de la red de instrumentos en áreas determinadas (Heras, 1972).

Generalmente no hay una buena calidad de datos en el Ecuador, puesto que, si bien es cierto que hay cuencas con una buena cantidad de datos, hay otras cuencas que no dispone de datos para su estudio. Sin embargo, las estaciones instaladas por el Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI), dan una caracterización de las cuencas por los datos de precipitaciones, temperaturas y aforos diarios; mediante el

uso de la estadística se puede establecer operaciones reiterativas para determinar diferentes leyes de regresiones entre precipitaciones y aportaciones, también para comprobar la fiabilidad de los datos y por último para resolver un problema hidrológico.

Para Monsalve (1999) se puede utilizar el método de la relación normalizada, para el relleno de datos desconocido o faltantes (P_x), en el cual conoce el número de estaciones pluviométricas (n), las precipitaciones de las estaciones que van a ser la base para el relleno de datos (P_n), la precipitación media anual de la estación en la que vamos a rellenar el dato (N_x), y la precipitación media anual de las estaciones que serán la base para el relleno de datos (N_n) utilizando la siguiente ecuación:

$$P_x = \frac{1}{n} \left[\left(\frac{N_x}{N_1} \right) P_1 + \left(\frac{N_x}{N_2} \right) P_2 + \dots + \left(\frac{N_x}{N_n} \right) P_n \right]$$

Aunque para esta investigación, en lo que corresponde a datos pluviométricos, se optó por la teoría que Heras (1972: 404) propone: la correlación lineal obteniendo la aportación media (\bar{A}), desde la precipitación media (\bar{P}), siendo el primer caso que analiza y corresponde a la ley de regresión lineal.

$$\bar{A} = a\bar{P} - b$$

La regresión lineal, en cuencas con precipitaciones abundantes, como el caso de la cuenca del río Granobles, tiene la ventaja de ser válida, sin variar los coeficientes, para diversos años y para cuencas parciales de una misma cuenca general y, por ser lineal, es factible la superposición de las ecuaciones de varias cuencas para integrar una

fórmula general.

La ley de correlación tendría la forma: $A = aP^n + bP^{n-1} + \dots + m$ pudiendo calcularse los coeficientes de correlación:

$$r = \frac{\sigma_{AP}}{\sqrt{\sigma^2_A \sigma^2_P}}$$

Siendo así, los coeficientes $a \sim 0.90 - 0.95$ y $b \sim 400 \pm 50$ mm en regiones lluviosas, pero para obtener cierta precisión a y b, a partir de los datos disponibles, conviene calcular los valores medios de aportaciones y precipitaciones:

$$\bar{A} = \frac{\sum A}{n}; \quad \bar{P} = \frac{\sum P}{n}.$$

Para calcular la recta de regresión de mínimos cuadrados de la distancia ortogonal, se emplearía el procedimiento indicado para la correlación entre caudales definiendo un término aleatorio que vendría a sumarse a los antes mencionados para indicar la probable desviación de las aportaciones, respecto a las calculadas por la regresión. (HERAS,1972: 404)

Hay también otros métodos de correlación como los no lineales o parabólicos que se aplican a regiones secas, pero como no es el caso de la investigación se lo descarta, teniendo en cuenta que cualquier fenómeno que afecte las características de periodicidad, tendencia, o persistencia puede experimentar cambios en los datos rellenados en la serie de datos.

2.3.3. Determinación de la curva de duración.

Se denomina curva de duración al gráfico que describe la frecuencia acumulativa de una serie continua de datos diarios de caudal (Linsley, 1967:284), esta muestra la duración relativa de diversas magnitudes dependiendo del período de observación en el que se requiere hacer el análisis. Este método es muy común para definir el comportamiento hidrológico de una cuenca (Sawicz et al., 2011).

La determinación de las curvas de caudales es la representación gráfica de la función de distribución de los flujos. El uso de probabilidades es importante para comprender las frecuencias de crecidas (Heras, 1972: 362). Es importante mencionar que un indicador de este método es la pendiente de la curva de duración del flujo, para tener una mejor interpretación de la curva se debe tener datos diarios y para conocer el aporte de aguas subterráneas se debe determinar la pendiente en el tercio medio de la curva. (Sawicz et al., 2011).

El gráfico que se obtiene de este concepto, curva caudal-duración, muestra el porcentaje de tiempo en el que un caudal determinado sea igual o se excede durante un lapso, también se usa para determinar el potencial de suministro de agua, puesto que puede leerse directamente el caudal disponible en cualquier porcentaje de tiempo. A inicios del siglo XX, la agencia científica del servicio geológico de los Estados Unidos (USSG) estableció los porcentajes de interpretación de la curva de duración, es decir 90% del tiempo es una medida del potencial de energía original y el 50% del tiempo es un índice del potencial de energía con medios de almacenamiento adecuados

(Linsley, 1967:284). La relación que existe entre los caudales Q90 y Q50 (Q90/Q50) puede ser interpretado como la representación entre el flujo por escorrentía y el flujo de las aguas subterráneas (Smakhtin, 2001).

La pendiente de la curva de duración requiere el cálculo de un índice de variabilidad, y este índice se encuentra entre el 33% (Q33) y el 66% (Q66) de la curva caudal-duración que de acuerdo con Sawicz et al. (2011) se puede utilizar la siguiente formula:

$$SFDC = \frac{\ln(Q33\%) - \ln(Q66\%)}{(0.66 - 0.33)}$$

2.3.4. Determinación de la curva de caudales.

La curva de caudales se la conoce también como relación de nivel-caudal, que es un gráfico parabólico de los datos medidos periódicamente del flujo y de las observaciones combinadas con el nivel de agua. Cuando la curva tiene irregularidades se puede inferir que la sección transversal no es uniforme o que el control tuvo una variante entre las corrientes altas y bajas por una sedimentación o erosión en el cauce del río (Linsley, 1967:78).

Se considera una curva de caudales aceptable cuando la dispersión está próxima a la línea media de los caudales, si es moderadamente permanente y la pendiente de la línea de carga es constante. Cuando la curva no es aceptable se realiza una corrección, con la diferencia entre el caudal medio y el caudal medido. Para Linsley (1967:78) se debe

confirmar los valores obtenidos con la ecuación del coeficiente proporcional:

$$\frac{q}{q_o} = \left(\frac{s}{s_o}\right)^k$$

Esta ecuación está dada por la proporcionalidad entre caudal (q), superficie libre de agua (s) y el desnivel entre dos secciones fijas (q_o y s_o) que miden la superficie libre de agua. El exponente m hace referencia a un ajuste propio de la mecánica de fluidos con un valor de $\frac{1}{2}$ y el exponente k debe determinarse empíricamente de acuerdo con las condiciones de los desniveles de entre las miras.

Para determinar la curva de caudales hay dos métodos, el racional y el NRCS. La principal diferencia entre estos es la manera que tratan las pérdidas de precipitación. El método racional es el que usa el coeficiente de escurrimiento como multiplicador sin diferenciar períodos de recurrencia, mientras que el método de la NRCS, realiza un proceso de pérdidas iniciales del escurrimiento sobre el terreno para determinar el caudal, por lo que se puede considerar un proceso más real del comportamiento hidrológico (Gribbin, 2017:253).

2.4. Cambio Climático

A lo largo de la historia del planeta Tierra han ocurrido muchas variaciones climáticas, tal es así que la glaciación más reciente se dio hace 18 000 años, se estima que son procesos naturales con intervalos de 100 000 años aproximadamente (De Alba, 1996).

2.4.1. Origen del paradigma del Cambio Climático

Desde la revolución industrial las actividades del ser humano sobre el planeta cambiaron drásticamente, puesto que hay un aumento en la emisión de gases invernadero, quema de biomasa, uso de aerosoles clorofluorocarbonos (CFCs), que han aumentado la concentración de los gases atmosféricos (CIIFEN, 2014:7) que producen un aumento lento pero paulatino en la temperatura de la tierra.

A nivel mundial se ha llegado a un consenso sobre que los efectos antropogénicos sobre el clima deben ser mitigados, es por esa razón que en el 2011 se acordó un proyecto regional de *“Información de Cambio Climático y Biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales en Bolivia, Ecuador y Perú”* (CIIFEN, 2014: 9)⁴.

Las proyecciones climáticas se realizan mediante modelos de circulación global en relación del océano con la atmósfera, tomando en consideración la radiación solar y el cambio de uso de suelo. Este modelo resolvió utilizar una variación de 1°C a 4°C (CIIFEN, 2014: 12), en varios escenarios que describen posibles líneas evolutivas del

⁴ Publicación realizada por el Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno del Niño en el marco del proyecto ATN/OC – 12439 – RG “Información de cambio climático y adaptación en la región de los Andes Tropicales”, financiado por el Banco Interamericano de Desarrollo BID, bajo la iniciativa de Bienes Públicos Regionales.

clima, actualmente se analizan comportamientos físicos, ecológicos y económicos.

2.4.2. Escenarios del paradigma del Cambio Climático

Las estimaciones sobre el cambio climático las hicieron los expertos intergubernamentales sobre el cambio climático (IPCC). Las llaman escenarios, se puede dar de manera global o regional, provocando una diferenciación de escalas conforme a áreas delimitadas (IPCC, 2007). La herramienta que se suele usar para escenarios regionales tiene parámetros globales y fenómenos relacionados con la geomorfología de la cuenca para adaptar a los requerimientos de cada estudio (CIIFEN, 2014: 14).

Hay varios tipos de escenarios para los estados futuros del clima como por ejemplo los escenarios de emisión que reflejan opiniones sobre las emisiones que tendrá las tendencias socioeconómicas, ambientales y tecnológicas; también están los escenarios climáticos que son representaciones de posibles estados futuros del clima (temperatura, precipitación, y otros fenómenos climatológicos).

Los escenarios climáticos se subdividen en: incrementales, análogos espaciales y temporales, por extrapolación y modelos físicos-climáticos. Además, están los escenarios medioambientales que hacen énfasis en factores ambientales distintos del clima que pueden ser independientes del cambio climático. Esos factores son la disponibilidad de agua y su calidad a nivel de cuencas, variaciones en el nivel del mar debido a factores geológicos, características del suelo y su uso en condiciones locales

de la atmosfera que influyen en la calidad del aire (CIIFEN, 2014: 18).

Finalmente, el escenario más actualizado es el de vulnerabilidad, en el cuál explora estrategias de mitigación con respecto a los escenarios tradicionales. La información primaria sobre posibles cambios climáticos debido al origen antropogénico, integrados con escenarios alternativos de emisión RCP, que es la manera en que el IPCC nombra a los escenarios posibles por el cambio climático (Representative Concentration Pathways) son:

- a) RCP 2.6, es un escenario de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a fin de siglo; este escenario se ha supuesto que, inicialmente la temperatura crece hasta mediados de siglo, y decrece hacia el final de siglo cumpliendo con el objetivo.
- b) RCP 4.5, es un escenario de estabilización en el existe un decrecimiento demográfico desde 2065, para tener una menor necesidad energética de hasta tres veces el orden de magnitud.
- c) RCP 6.0, hay un crecimiento demográfico, pero a través de imposiciones políticas, se disminuirá las emisiones partir de 2060.
- d) RCP 8.5, es el escenario en los que no hay políticas de cambio climático, es el escenario que tiene valores mayores de todos los escenarios descritos. (CIIFEN, 2014: 20).

La variabilidad de escenarios requiere traducirse en indicadores que permitan ilustrar, comunicar y caracterizar las tendencias climáticas para el futuro, tanto en temperatura

y precipitación. Como se ha mencionado antes, las proyecciones globales servirán para las proyecciones regionales hasta que se realice las proyecciones tipificadas de cada área de interés (CIIFEN, 2014: 21).

2.5. Introducción a la modelación numérica y de simulación.

Debido a la relevancia del impacto hídrico en la vida de los seres humanos y su relación con el ambiente hay una serie de modelos matemáticos, informáticos e hidrológicos que se desarrollaron para la predicción de escenarios que ayuden al manejo sustentable de los recursos hídricos.

2.5.1. Modelos de simulación hidrológica: generalidades.

Modelo es la representación simbólica de una realidad. Ningún modelo es perfecto y puede cambiar con el tiempo y con los contextos. Existen modelos teóricos, gráficos, epistémicos, matemáticos, filosóficos y artísticos (Yurem,2010).

De acuerdo con Braga (2002: 4): *“el objetivo de un modelo es simular de forma fidedigna un sistema real, debe ser lo suficientemente general para variabilidad de condiciones ambientales”*. El modelo matemático hidrológico requiere de un proceso iterativo que busca simular o prever la realidad de una cuenca. Heras (1972: 471) al referirse a las formulaciones matemáticas para simular fenómenos hidrológicos naturales expresa que estas pueden ser: **probabilísticas**, es decir independientemente

del tiempo, se ignora la secuencia de ocurrencia de las variaciones relacionadas en el proceso y se admite que el cambio de su ocurrencia sigue una distribución de probabilidad definitiva, en la cual las variables están consideradas como aleatorias puras. **Estocásticas**, o sea dependiente del tiempo, la secuencia de ocurrencia de las variaciones es observada y las variables pueden ser, aún, aleatorias puras o impuras, y la distribución de probabilidades de las variables puede o no variar con el tiempo.

Finalmente, el HydroBID genera una serie de tiempo de proyecciones de flujos de agua, en escala diaria o mensual. Para las proyecciones el software utiliza el método de interpolación, que es un método de distancia ponderada inversa (IDW), en el cual se requiere datos diarios históricos de precipitación y temperatura de la cuenca en estudio.

Steyaert, citado en Dalles y Vianei (2009), dice que los procesos ambientales reales son bastante complejos con respecto a cómo se presentan en los modelos hidrológicos, e incluso pueden llegar a comportamientos no lineales, la posibilidad de expresar los procesos físicos como un conjunto de ecuaciones muy complejas no es posible, por lo que se usa procesos simplificados para modelar a una cuenca.

La evaluación hidrológica corresponde al análisis detallado de las unidades de recursos y sus componentes. Se incluye el proceso mediante el cual se comparan y documentan las condiciones actuales y futuras de una cuenca a través de diferentes herramientas, como: muestreos de campo, recopilación de datos, modelos espaciales, entre otros (López, 2016).

Cabrera (2016) explica que la modelación de una cuenca implica establecer una relación entre variables de entrada y variables de salida, además los modelos semi distribuidos representan mejor las posibles variaciones de las características del suelo, efectos de pendiente, entre otros, por lo tanto, los modelos representan una simplificación de la realidad observada.

2.5.2. Ventajas de la simulación y modelación mediante el uso de software.

Según la guía internacional de investigación y métodos para el cálculo del balance hídrico (Sokolov y Chapman, 1981: 60) señala que, mientras más pequeña es el área de estudio, más complejo se vuelve el análisis por la cantidad de incertidumbres que se presentan en micro ecosistemas, por lo que utilizar un método inductivo es muy largo y requiere de una alta prolijidad en el análisis manual, pero las herramientas computacionales permiten analizar pequeñas áreas de estudio y grandes extensiones solamente con la calibración del modelo donde los datos simulados se ajustan a los datos observados.

Los modelos hidrológicos para Aparicio (1987:127) son métodos que aíslan los factores importantes de la precipitación y extrapolan los datos medidos en campo para tener una idea de la máxima cantidad de lluvia que puede presentarse en la zona de estudio. Existen dos tipos de modelos que menciona el autor, el plano inclinado que es un método simplificado para precipitaciones orográficas o frontales y el método convergente para tormentas conectivas.

Para Heras (1972) todo proceso hidrológico es estocástico, puesto que toman tanto del análisis determinístico como del probabilístico para simplificar las series temporales que pueden ser procesos continuos o discretos (Heras, 1972: 471). Muchas veces es difícil de obtener una respuesta exacta por lo que es necesario hacer varias hipótesis de los comportamientos hidrológicos de una cuenca teniendo aproximaciones de las posibles variables de los fenómenos físicos que se estudia, y dada la cantidad de escenarios, datos y variables es mejor realizar modelos computacionales que reducen el tiempo de análisis.

Los modelos hidrológicos cuantifican las relaciones entre hidrogramas con datos como precipitación, caudal y erosión del suelo que permitirán comprender mejor a la cuenca (Santos, 2009), desde los datos observados los modelos son calibrados para una proyección matemática de la cuenca.

2.5.3. Software más utilizados. Descripción breve de características.

Dentro de la ingeniería hidrológica hay una gran variedad de softwares que ayudan a modelar, analizar, crear series sintéticas, evaluar y proyectar. Algunos sirven para el procesamiento de los datos como R o Python. Para Coli (2018) es importante destacar que los modelos no son representaciones exactas sino simplificaciones de problemas complejos, en el área de los recursos hídricos actualmente se usan diferentes tipos de software para diferentes áreas, y para la hidrología se mencionaran unos pocos

modelos computacionales como:

- HEC-RAS, es un software gratuito que representa la dinámica de los cauces de forma unidimensional y estudia las posibles inundaciones de una cuenca, fue desarrollado por el cuerpo de ingenieros de los Estados Unidos. Trabaja en la plataforma ArcGIS. (Polo, 2018)
- MODFLOW es un modelo que analiza de acuíferos y aguas subterráneas, mediante el método de las diferencias finitas. Su aplicación es muy popular alrededor del mundo. (RTI - HYDROBID, 2018)
- El modelo SWAT, posibilita la simulación de diferentes procesos físicos de una cuenca, además predice el impacto de usos del suelo en el agua, tanto en cantidad como en calidad. (López, 2016)
- TMPA, Multi-Satellite Precipitation Analysis, está diseñado para combinar mediciones en Tierra, cuando es posible, con estimaciones de precipitación de varios sistemas satelitales. (Horna, 2016)
- CROPWAT, es un software de uso libre desarrollado por la FAO, para calcular las necesidades hídricas para riego. (Arteaga, R., Ángeles, V., & Vázquez, M., 2011).
- HydroSHEDS es un programa computacional de geo-referenciamiento que provee información hidrológica a múltiples escalas, mediante mapas locales o regionales, dando información de la elevación de la topografía de cada cuenca. Este software es la base para desarrollar el HYDROBID, puesto que se puede obtener las direcciones de los flujos, la red de los cauces, y los límites de las cuencas hidrológicas. (Rinner, et al., 2014).

- GWFL, es un modelo utilizado para analizar la calidad del agua y comprender las cargas máximas totales de una cuenca de alta aplicabilidad para el estudio hídrico (Zouda, et al., 2017)

De los software mencionados, algunos de estos constituyen la base para el nuevo modelo HydroBID, mismo que toma las mejores características para incorporarlas en esta propuesta para América Latina. Otros autores aplican o plantean modelos que pueden ser evaluados y comparados con el HydroBID en futuras investigaciones.

CAPÍTULO III: DESCRIPCIÓN DEL SOFTWARE HYDROBID

3.1. Generalidades

Los modelos hidrológicos explican el comportamiento de una cuenca hidrológica que debe ser comprendida como un sistema, porque ingresa agua por medio de diversas formas, una de ellas es la precipitación y sale el agua de la cuenca por su cauce principal o por el uso que adquiera. Cabrera (2012). Los modelos hidrológicos se presentan como una necesidad y una herramienta para conocer mejor el funcionamiento y el comportamiento del ciclo hidrológico y se los utiliza como herramienta para la comprensión del comportamiento de una determinada cuenca para la gestión, el planeamiento, y como base para la modelación de otros procesos.

La modelación exige varios pasos: 1) la comprensión de la cuenca o problema a estudiar es decir identificar y definir los procesos y variables que intervienen en la generación de caudales, a lo que se ha denominado el modelo perceptual (perceptual se refiere a las mediciones por observación); 2) el modelo conceptual según Cabrera (2012) consiste en relacionar entre sí, las variables y procesos por medio de ecuaciones. En esta etapa se incluyen coeficientes y parámetros que posteriormente se les asignará valores adecuados mediante un proceso de calibración. Finalmente, el modelo requiere pasar a una etapa de validación en la que se evalúa su capacidad de predicción.

3.2. Características del HydroBID

El Hidro-BID es una herramienta informática que mediante la simulación, modela el comportamiento hidrológico, proporciona información para comprender los

fenómenos extremos y los efectos del cambio climático, permite el análisis de los problemas del recurso hídrico en múltiples escalas, hace posible la gestión y planificación de los recursos hídricos de manera eficiente, y aunque no es posible controlar los cambios en los fenómenos climáticos, permite adaptarnos y sobrellevarlos con el menor impacto posible. (Mauro Nalesso: 2017). Como toda herramienta tiene limitaciones una de las cuales es que no permite el análisis hidrodinámico.

3.3. Caracterización del HydroBID.

El Banco Interamericano de Desarrollo (BID), mediante el Instituto Triángulo de Investigaciones (RTI), desarrolló una herramienta para modelar sistemas hidrológicos bajo escenarios climáticos, cambio poblacional y efectos antropogénicos en las cuencas; que estimarán la capacidad hídrica superficial en cuencas y subcuencas de América Latina y el Caribe. El software: HydroBID trabaja con la plataforma libre QGIS, una base de datos SQL que relaciona los datos geográficos con el software (HydroBID), para analizar la disponibilidad de volúmenes y caudales a varias escalas.

Los sistemas de información geográfica (GIS), permiten visualizar, gestionar, editar y analizar datos, y diseñar mapas. Parafraseando a Proaño y Montalvo (1999), los sistemas de información geográfica son parte de la tecnología computacional para representar y procesar datos geográficos, de manera gráfica, tiene componentes como

la geo-codificación de los datos espaciales y la descripción de estos en términos digitales con respecto a un punto marco de referencia.

El Quantum Geographic Information System (QGIS), es un software de uso libre que maneja sistemas de información geográfica, que será utilizado como base en el software HydroBID, en el cual se puede obtener un modelo de la geomorfología de la zona de estudio, curvaturas, áreas, perímetros, entre otras características básicas de una cuenca. Además, se puede exportar los datos resultados para hacer curvas hipsométricas, áreas de captación de una cuenca, longitud de la red de flujo, entre otros mapas, mediante mallas de información.

Parafraseando a Proaño y Montalvo (1999) los sistemas de información geográfica (GIS) son parte de la tecnología computacional para representar y manejar datos geográficos de manera gráfica, tiene componentes como la geo-codificación de los datos espaciales y la descripción de estos en términos digitales con respecto a un punto o marco de referencia. Dichos componentes son considerados dentro de un esquema organizacional como:

- a) base de datos espacial y atributos,
- b) sistema de despliegue cartográfico,
- c) sistema de digitalización de mapas,
- d) sistema manejador de base de datos,
- e) sistema de análisis geográfico,
- f) sistema de procesamiento de imágenes,
- g) sistema de análisis estadístico.

Los sistemas de información geográfica tienen dos formas de representación digital de mapas: Vectorial y Ráster. El modo vectorial representa objetos codificando de modo explícito sus fronteras, representadas mediante coordenadas o vértices que delimitan segmentos rectos, se puede representar mediante puntos, líneas y polígonos en los archivos del GIS. El modo ráster es una superposición al mapa y sus límites quedan delimitados por rejillas de tamaño regular (pixel) cuanto más pequeña la figura, sea cuadrado, rectángulo, triángulo o hexágono, más precisa será la representación digital. (Olaya, 2010)

El QGIS⁵, puede tener complementos o plug-ins que pueden ser instalados y que extienden la funcionalidad del programa, es por esta facilidad que RTI desarrolló una base de datos hidrográfica analítica para Latino América y el Caribe, conocida como ADH-LAC. Este complemento viene en las carpetas de instalación del programa HydroBID, se llama *AHDTtools*. Para que este plugin sea activado en HydroBID se deben seguir los siguientes pasos:

- a) copiar *AHDTtools* en la carpeta de ejecución del QGIS,
- b) reconocer *AHDTtools* en a la pestaña de complementos,
- c) utilizar en los archivos tipo shapes que también fueron proporcionados en la carpeta de instalación del HydroBID.

⁵ La versión en la que esta investigación trabaja es la 2.18. (Las Palmas).

Imagen 1: Interfaz del QGIS con AHDTools



Fuente: QGIS 2.18

El complemento *AHDTools*, es una herramienta para seleccionar las cuencas o los ríos de Latino América, relaciona la selección con un código en la base de Datos facilitada en las carpetas de instalación del HYDROBID y devuelve el área y longitud de las cuencas seleccionadas. En la nota técnica: base de datos hidrográficos para América Latina y el Caribe presentada por: Rinner J., Bruhn M., Miralles -Wilhelm F., Muñoz R., dice: *“Provee un marco para la parametrización de modelos en una manera consistente, que provee la conectividad del flujo aguas arriba / aguas abajo necesarias para dichos modelos, y provee la data necesaria para mostrar los resultados en forma gráfica”* (Rinner, et al., 2014: 55).

Para el hidrólogo Jorge Escurra, (RTI-HYDROBID, 2018) hay tres componentes importantes al tratar el modelo HydroBID: la base analítica de datos AHD-LAC, la base de datos SQLITE y el modelo hidrológico lluvia-escorrentía que es un algoritmo que permite generar caudales diarios mediante un modelamiento tipo tanques. Estos tres componentes interactúan para realizar un mejor modelamiento hidrológico dentro del software.

La Base de Datos de Hidrología Analítica para América Latina y el Caribe, AHD-LAC, es una base datos que maneja información geográfica, como alturas máximas de

las cadenas montañosas, valles, longitud de los cauces, pendientes y otras particularidades geométricas que permiten al usuario obtener los datos necesarios para la caracterización física de la cuenca. La información de la AHD está basada en las imágenes satelitales de STRM de la NASA (RTI-HYDROBID, 2018) se puede trabajar de manera flexible y adaptable a cada necesidad de modelamiento. La AHD sigue el patrón del software NHDPLUS y de HydroSHEEDS, por lo que se puede utilizar un modelo de base vectorial en lugar de ráster, permitiendo, de esa manera, una aproximación a la realidad de los caudales, sus relaciones y la hidrografía.

La AHD es una base de datos en formato shape files para tener compatibilidad en el software QGIS que trabaja con un sistema único de identificación de cuencas mediante el uso de polígonos usando una codificación especial para toda Latinoamérica, se la trata como COMID. Además, realiza una interconexión entre cauces principales correspondientes a la misma cuenca, para comprender mejor el caudal y la relación entre subcuencas que aportan al cauce principal. También, contiene atributos descriptivos como: uso de tierras, tipos de suelos precargados para poder calcular mejor la curva de escurrimiento. Finalmente, tiene la opción de ingresar datos históricos como precipitaciones y temperatura para caracterizar hidro-meteorológicamente el área de estudio, así realizar modelamientos más ajustados a la realidad de cada cuenca de estudio.

Es importante reconocer que la dinámica del software QGIS con el plugin *AHDTools*, permite escoger las cuencas hidrográficas aguas abajo, también se puede seleccionar el segmento fluvial aguas arriba de manera sencilla. El HydroBID, permite varios usos

de análisis y modelaje hidrológico, aunque las características son contenidas en el plugin ADH se puede actualizar para incluir segmentos fluviales reales, y pueden ser comparados con imágenes satelitales o mapas.

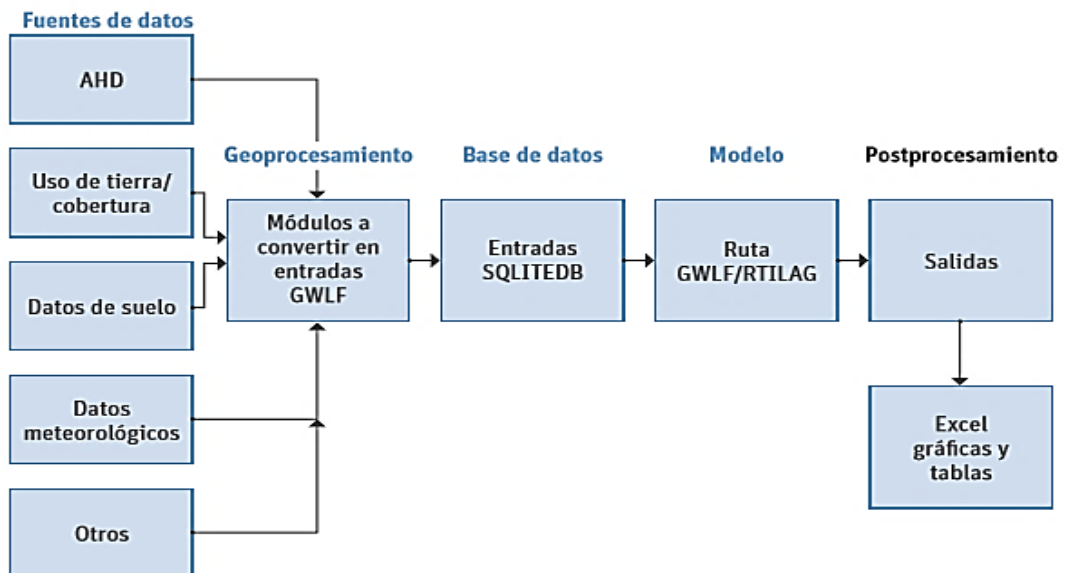
La delimitación de las cuencas, mediante el software propuesto en esta investigación, es muy cercano a los resultados reales obtenidos en las diferentes instituciones encargadas de los recursos hídricos en toda Latino América, como se comprueba en la nota técnica al comparar áreas de drenaje. (Rinner, et al., 2014: 12). Esto permite realizar modelos de balance hidrológico que incluyan eventos extremos como inundaciones, sequías, impactos ambientales y acción antropogénica como la construcción de embalses.

Otro componente importante al momento de usar el HydroBID, es una base de datos llamada SQLite, que es un modelo informático de uso libre. Para el modelo hidrológico que se usa en esta investigación, se tiene datos indexados de clima, uso de tierras tipo de suelos, conjuntamente se puede rellenar esos datos de modo que el modelo sea fiel a la realidad, con datos observados en cada cuenca. Esta base de datos organiza, parametriza y relaciona la información que tiene la base de datos AHD mediante un código de identificación de cada cuenca, COMID, que es un número asignado por esta herramienta informática.

Cabe señalar que para el correcto uso del software se deben instalar los siguientes programas en un orden específico: primero instala el programa SQLite, luego el

ejecutable HydroBID y finalmente la base de datos AHD. El funcionamiento lógico del software tiene primero los insumos como fuente de datos, unos están dados en las carpetas de instalación y otros como los datos meteorológicos deben ser ingresados por el usuario. Mediante algoritmos propios del programa se entrelazan los datos ingresados o seleccionados, y se produce una nueva base de datos con la caracterización propia de la cuenca en estudio. Se ingresan valores de ajuste en el software HydroBID y se corre nuevamente con algoritmos propios del programa. Finalmente, los outputs o datos de salida son los hidrogramas, y el balance hídrico de la cuenca de estudio en el interfaz del software, y archivos de Excel para ser procesados en QGis u otros programas informáticos.

Imagen 2: Flujo de datos en el software HydroBID



Fuente: Moreda et al, 2014: 31

3.3.1 Parámetros y ecuaciones fundamentales del HydroBID.

El HydroBID, trabaja con tres componentes, dos de dichas bases de datos ya fueron descritas y un tercer componente da soporte al funcionamiento matemático del software, llamado modelo hidrológico lluvia-escorrentía; cuyo algoritmo permite generar caudales diarios.

El modelo hidrológico lluvia-escorrentía se basa en el método de la función generalizada de carga de cuencas, conocido como “Factor de carga de cauces generalizados” o “GWLF” por sus siglas en inglés (The Generalized Watershed Loading Function). Este es un modelo estándar, que se desarrolló en 1987 y sirve para analizar la calidad del agua de las cuencas, también brinda la capacidad de simular escorrentías desde una cuenca hidrográfica no puntual, con variabilidad de tamaño y uso de suelo; utiliza los datos hidro-meteorológicos diarios y sigue realizando los cálculos de balance de agua.

“Los parámetros requeridos por el GWLF son los datos históricos del clima, datos de transporte (tamaño de la cuenca, uso del suelo, número de curva, Coeficientes de cobertura ET, Coeficientes de erosionabilidad, horas de luz y meses de luz, temporada de cultivo en meses, cantidad inicial de agua disponible pre existente en la cuenca (cm de agua), relación de distribución de sedimentos agua del suelo), y datos de nutrientes del suelo (Nitrógeno (N) y fósforo (P) punto de origen de las cargas, concentraciones de N / P de fondo en GW, antecedentes de concentraciones de P en el suelo, antecedentes de concentraciones de N en el suelo, meses de estiércol repartidos, población en sistemas sépticos dentro de la cuenca.)” (Shilling et al., n.d.)

El método GWLF, desde que salió al mundo técnico de la hidrología, se ha utilizado en muchos trabajos, pero la Universidad Estatal de Pennsylvania en los Estados Unidos

realizó una versión autorizada que utiliza los sistemas de información geográfica, titulada AVGWLF, se realizaron cambios de código de programación para usar este programa en diferentes regiones del mundo (Shilling et al., n.d.).

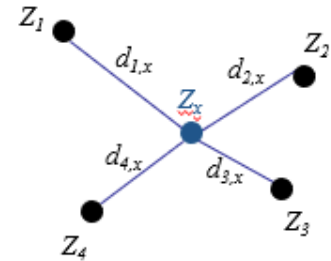
El BID encargó a RTI, la arquitectura de un software que modifique los algoritmos para América Latina y el Caribe, aquel instituto de investigaciones (RTI) tomó lo mejor de varios softwares y proporcionó el nuevo HydroBID. Dentro de este, se puede tener una base de datos regional denominada LAC-AHD, con la que se puede trabajar en varias escalas de detalle, tomando en consideración el uso y los tipos de suelo (Moreda et al., 2014:17).

El HydroBID aplica una parte del modelo GWLF en conjunto con “lag-routing” que es conocido como método retardo-enrutamiento, que de acuerdo con Moreda et al. (2014), El modelo calcula la escorrentía desde las precipitaciones que el modelador ingresa en cada cuenca, posteriormente determina la evaporación y la infiltración de la capa no saturada, para tener un flujo base por cada cuenca de captación, luego se realiza un ajuste por percolación y deduce el volumen almacenado de agua en las capas de suelo, para entregar un balance en cero. Se puede concluir que la variación en el almacenamiento de las cuencas en el verdadero valor de este software.

La simulación calcula un promedio ponderado de la distancia entre los centroides de las cuencas ($Z_{(x)}$), la distancia a la ubicación de las estaciones y homogeniza las cuencas que están cerca con respecto a condiciones de comportamiento hídrico,

pondera de acuerdo con los valores medidos, es decir que los lugares cercanos tienen mayor influencia sobre los lugares lejanos disminuyendo el peso en función de la distancia (Moreda et al., 2014). El método usa la siguiente fórmula:

$$Z(x) = \frac{\sum \frac{Z_i}{d_{i,x}}}{\sum \left(\frac{1}{d_{i,x}}\right)^p}$$



Dónde:

Z_i = valor del punto de muestreo i

$d_{i,x}$ = distancia entre Z_x y Z_i

p = exponente de ponderación

Fórmula tomada de RTI-HYDROBID (2018)

Actualmente el HydroBID no tiene la opción de calidad de agua, pero mantiene la opción de arrastre de sedimentos y aguas subterráneas. De acuerdo con la información que proporciona la segunda nota técnica del HydroBID, la siguiente tabla describe los parámetros con los que actualmente trabaja el software mediante la base de datos AHD (Moreda, et al, 2014:23):

Tabla 4: Principales parámetros del GWLF que están relacionados con la generación de flujos

Parámetros	Descripción	Método de estimación
Capacidad disponible de Agua del Suelo	Este parámetro activa el inicio de la percolación.	Puede ser estimado por las características del suelo.
Número de Curva	Controla la cantidad inicial de abstracción y usada para calcular la detención	Se escoge usando el uso del suelo y el tipo de clasificación del suelo.
Coefficiente de la curva de evaporación (CV)	Representa la variación estacional de la evaporación debido al crecimiento de la vegetación.	Se estima mensualmente.
Coefficiente de recesión de aguas subterráneas (r)	Controla la tasa de flujo de agua subterránea desde la zona saturada	En estaciones de aforo en las cuencas, el parámetro de recesión puede ser estimado usando técnicas de separación hidrográfica.
Parámetro de percolación (s)	Controla la tasa de percolación hacia el acuífero de aguas subterráneas profundas	Dependiendo de la formación geológica, los valores de percolación pueden ser muy variables.

Fuente: Nota Técnica HydroBID, (Moreda, et al., 2014)

3.3.2 Procesamiento de datos de hidrología.

El Software HydroBID no realiza ningún procesamiento de datos, este debe realizarse por cualquier método, de manera manual o mediante el uso de cualquier otro programa.

3.4 Funcionamiento del software HydroBID.

El manual de funcionamiento del HydroBID, indica que se debe instalar el programa QGIS, la plataforma Java, la Base de Datos SQLite y la Base de Datos AHD, antes de usar la plataforma desarrollada por el Banco Interamericano de Desarrollo.

Una vez que todo ese paquete esté instalado se puede navegar por QGis, para escoger

la cuenca que se va a estudiar, mediante la localización manual o mediante las herramientas propias del QGIS brinda para la ubicación geográfica. Para poder usar el HYDROBID se debe sacar insumos desde este software de información geográfica, como: el código de identificación COMID, la ubicación de las estaciones meteorológicas y las coordenadas de los centroides de las cuencas de estudio.

3.4.1 Interfaz del software.

Al abrir el software se visualiza la ventana de inicio que contiene una serie de pestañas. En aquella que titula *Setup*, se observa casillas para ser rellenas por el operador del software de esa manera configurar la cuenca con los datos básicos que servirán para ejecutar el programa.

Imagen 3: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID



The screenshot shows the 'Setup' window of the HydroBID software. It features a tabbed interface with the following tabs: 'Setup', 'Climate Scenario', 'Model Parameters', 'Reservoirs', 'Sediment Parameters', 'Groundwater', 'Run Model', and 'Output'. The 'Setup' tab is active, displaying 'Setup Options' with the following fields:

Run Name:	CuencaRioGranobles
Catchment:	303047813
Start date (dd/mm/yyyy):	01/01/2010
End date (dd/mm/yyyy):	31/12/2015

Fuente: HYDROBID

En la casilla *run name* se coloca el nombre de archivo o corrida. En la siguiente entrada *catchment* se ingresa el código de identificación de la cuenca dado por el Plugin ADH, COMID. A continuación, se coloca el periodo que utilizará el programa para el modelamiento, debe ser coherente con los datos históricos que se ingresaron previamente.

En la siguiente sección, *Data Base File Options*, se puede escoger la base de datos de SQLite que corresponde a la cuenca para utilizar los diferentes parámetros preestablecidos. Las entradas de *MetData Table*, sirve para escoger la base de datos de la cuenca caracterizada previamente en la entrada de datos climáticos, se explicará más adelante.

Imagen 4: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID

The screenshot displays two sections of the HydroBID interface. The first section, titled "Database File Options:", includes a text input field for "DB Location" containing the path "C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\ecuador_2017.sqlite" and a "Browse..." button. Below it is a dropdown menu for "DB Met Data Table" with "GRANOBLES_valManu" selected, and a "Load Table Names" button. The second section, titled "Climate Data File Options:", includes a text input field for "Climate Data" and a "Browse..." button. Below it is a dropdown menu for "Climate Scenario".

Fuente: HydroBID

En la segunda sección, *Climate Data File Options*, y sus correspondientes pestañas se dejarán en blanco por esta ocasión ya que no hay archivos que se pueda usar para comprender los efectos del cambio climáticos sobre la cuenca en estudio.

Imagen 5: Captura de Pantalla del Interfaz del HydroBID

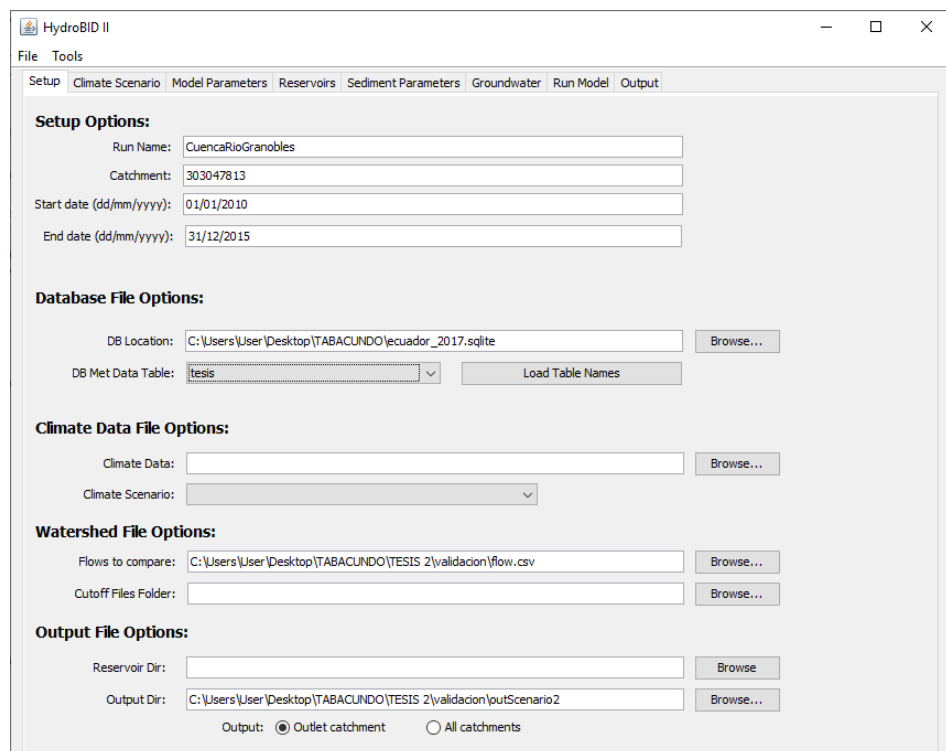
The screenshot displays two sections of the HydroBID interface. The first section, titled "Watershed File Options:", includes a text input field for "Flows to compare" containing the path "C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\TESIS 2\validacion\flow.csv" and a "Browse..." button. Below it is a text input field for "Cutoff Files Folder" and another "Browse..." button. The second section, titled "Output File Options:", includes a text input field for "Reservoir Dir" and a "Browse" button. Below it is a text input field for "Output Dir" containing the path "C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\TESIS 2\validacion\putScenario2" and a "Browse..." button. At the bottom, there is an "Output:" label with two radio buttons: "Outlet catchment" (which is selected) and "All catchments".

Fuente: HydroBID

En la tercera sección *Flow Options*, hay casillas para ingresar los datos de caudal en *Observed flows*, al llenar esta casilla es suficiente, pero se puede agregar el archivo de coordenadas geográficas de las estaciones de flujo en las siguientes casillas.

Finalmente, está *Output Options*, donde se coloca la ruta del archivo de salida de los resultados del modelamiento en *OutputDir*. Si la cuenca tiene reservorios o embalse se puede subir una carpeta con archivos que contenga datos de demanda, caudales de ingreso y salida en *Reservoir Folder*. Si no hay embalses se puede dejar la casilla vacía. Y para concluir, hay dos opciones que permiten escoger entre las cuencas que se están modelando y de escoger a todas las cuencas que están relacionadas con la simulación.

Imagen 6: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Setup

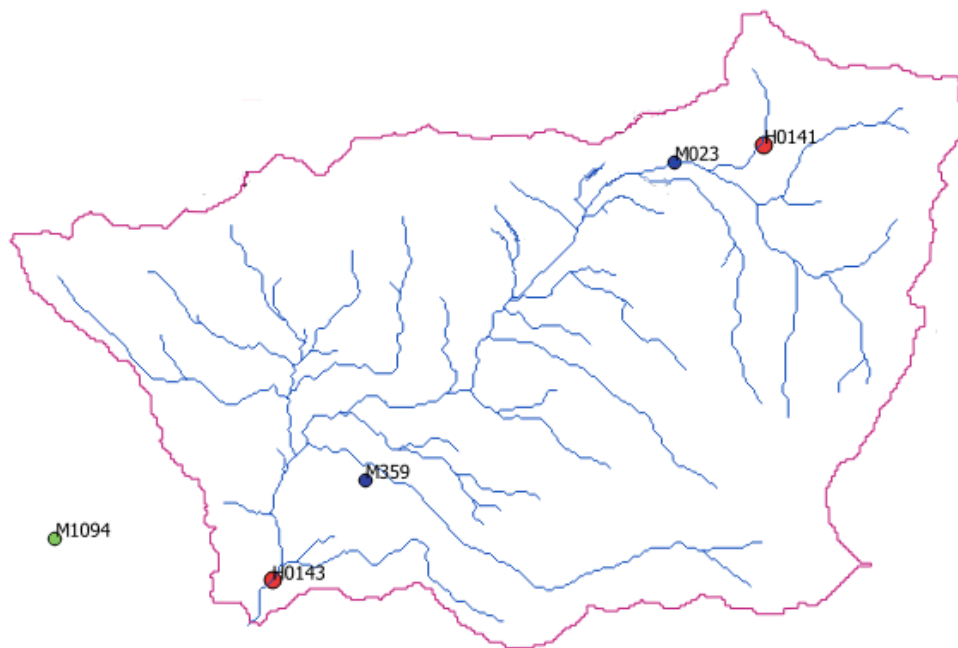


Fuente: HydroBID

3.4.2 Recopilación de datos y estructura de la base de datos.

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) proporcionó la base de datos que recopilan las estaciones hidrológicas y meteorológicas que influyen en la cuenca de estudio de esta investigación, dando como resultado la tabulación de datos diarios en un período de 15 años para la estación hidrológica Granobles AJ Guachalá y un período de 25 años para la estación meteorológica Tomalón. Las estaciones que se utilizaron son las que muestran en el siguiente gráfico:

Imagen 7: Localización de las estaciones hidro-meteorológicas en la cuenca del Río Granobles



Fuente: INAMHI. Dirección de Gestión hidrológica 2011

Siendo las estaciones meteorológicas, que contienen datos de lluvia y temperatura:

M023, M359 y M1094. Y la estación hidrológica, que contienen datos de caudales: H0143.

Se ha realizado una línea del tiempo de los datos de las estaciones que se utilizó en el modelamiento con el programa informático HydroBID, al existir una heterogeneidad en los años de los datos históricos hidro-meteorológicos se decidió trabajar con el periodo 2000-2015. La variabilidad de datos en las estaciones meteorológicas e hidrológicas hace que escoger el periodo más adecuado para modelar sea determinado por la cantidad de vacíos a rellenar en la serie de datos históricos.

Tabla 5: Línea de tiempo de estaciones hidro-meteorológicas en la cuenca del Río Granobles. Durante el período: 2000 – 2015

Tipo de la estación	Nombre de la estación	Cantidad de Datos	Vacíos Rellenados
Hidrológica (Caudal)	Granobles AJ Guachalá H0143	5844 datos diarios	4.71 %
Meteorológica (Precipitación)	Olmedo M023	5844 datos diarios	3.43 %
Meteorológica (Temperatura)	Olmedo M023	5844 datos diarios	3.54%
Meteorológica (Precipitación)	Tomalón Tabacundo M1094	5844 datos diarios	2.65 %
Meteorológica (Temperatura)	Tomalón Tabacundo M1094	5844 datos diarios	2.91%

Realizado por: Carolina Andrade

La cuenca del río Granobles tiene dos estaciones meteorológicas dentro de la cuenca y una fuera de la cuenca. También tiene una estación hidrológica, que después del análisis se encontró un valor aceptable de vacíos y se rellenaron los datos faltantes mediante la regresión lineal simple. De esa manera, se crea un registro completo para cada estación obteniendo una serie continua de datos, es decir que los datos observados

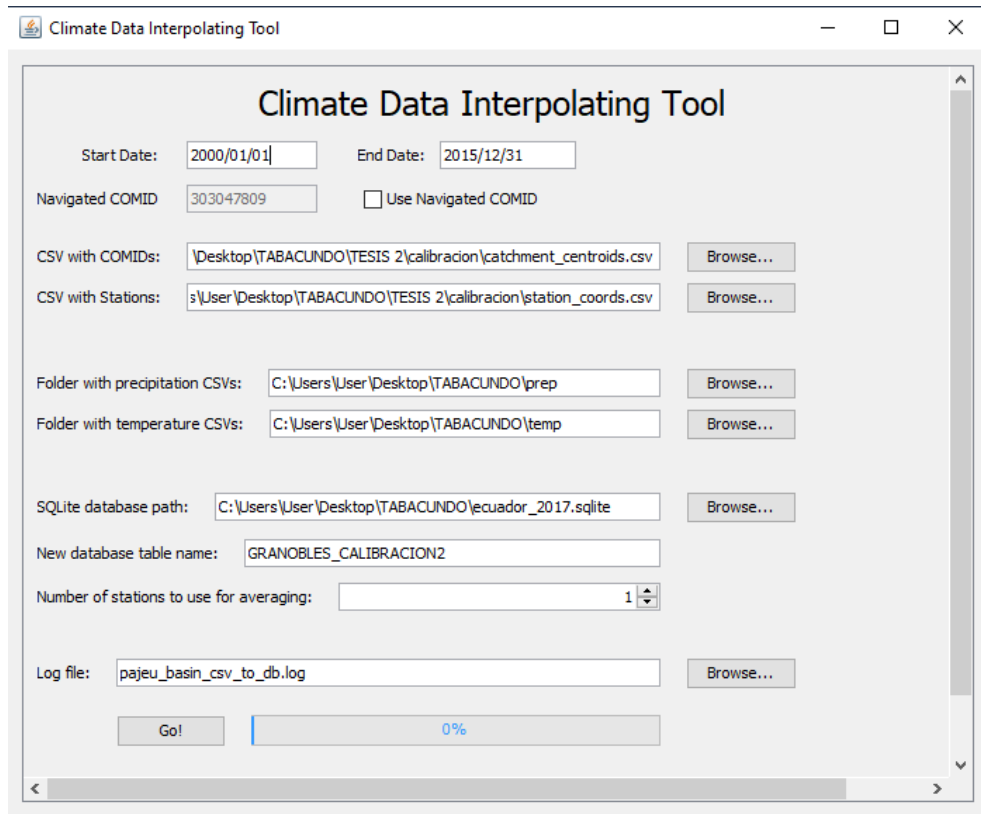
sirvieron para el relleno de los datos faltantes y evitar celdas vacías en los archivos que se usan como inputs en el HydroBID.

La información facilitada por el INAMHI se encuentra en el período que va desde el año 2000 hasta el año 2015, por lo que se opta por realizar la calibración del modelo con los 10 primeros años de información y la validación con los 5 años restantes.

3.4.3 Datos de ingreso (Inputs) al software.

Los datos de ingreso al programa (Inputs) son los datos históricos de la cuenca, que comprende la observación y registro de la precipitación, la temperatura y el caudal. Es necesario ingresar los archivos en formato tipo [.csv] (delimitado por comas), porque es de fácil lectura en el software de información geográfica que se está presentando. Los archivos meteorológicos deben ser subidos al programa en la pestaña Tools, en la ventana de *climate data interpolation tool*, cuya interfaz se describe a continuación:

Imagen 8: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Tools, Climate Data Interpolation tool



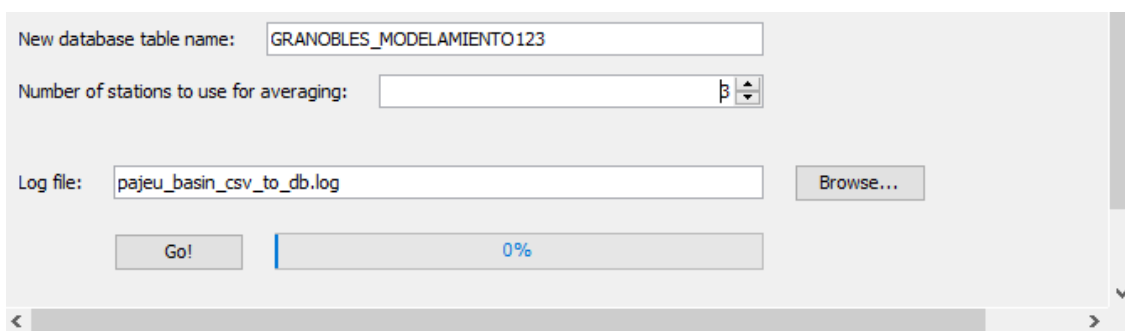
Fuente: HydroBID

En la ventana desplegada (*climate data interpolation tool*) se ponen los datos que pertenecen a la cuenca, siendo previamente obtenidos y ordenados en una carpeta de fácil acceso, en el siguiente orden:

1. Período de análisis: se rellenan las fechas de inicio y fin de la corrida;
2. Un archivo [.csv] que contenga los centroides de las microcuencas que pertenezcan a la cuenca de estudio;
3. Un archivo con las coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas, estos archivos se los obtiene previamente desde el QGIS.
4. Una carpeta que contenga los archivos de los datos de precipitación, y
5. Una carpeta con los archivos de los datos de temperatura.

Se selecciona la base de datos SQLite que corresponde a los datos de uso de suelo, y densidad poblacional correspondientes a datos preestablecidos para el Ecuador, esta base de datos fue facilitada por la secretaría nacional del agua. Finalmente, Antes de completar los datos que corresponden a la cuenca, se debe asignar un nombre al archivo que resultará de la corrida del software en la sección de *New Data Base Table Name*, y poner especial atención en el número de estaciones meteorológicas en la cuenca. Por ultimo se presiona *Go*. Cuando esté hecho, solo se sale de la pestaña y se regresa a la pestaña *SETUP*.

Imagen 9: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID



Fuente: HydroBID

Es fundamental que los datos tengan un orden ascendente diario, que en este caso empieza el 1 de enero de 2000 y termina el 31 de diciembre de 2010 con formato día/mes/año. El archivo solo debe contener 2 columnas: una con la fecha y la otra con los datos históricos observados. Cabe señalar que, para **la precipitación**, los datos deben estar **en centímetros** de lluvia dentro de los archivos que servirán de insumos al modelo HydroBID.

El programa hace una relación entre los archivos subidos, por lo que es importante

prestar atención al nombre de los archivos que contengan los datos meteorológicos, debe ser igual a los colocados en el archivo donde están las coordenadas de las estaciones. El software HydroBID, toma el primer año ingresado como datos falsos, es decir que aquel año no sirve realmente para la modelación, pero si para la calibración del modelo.

Para la validación del modelo es importante tener en el mismo formato, los datos de caudales y las coordenadas de la estación hidrológica. En este estudio los datos de validación se toman desde el 1 de enero del 2011 hasta el 31 de diciembre de 2015.

3.4.4 Parámetros y opciones del modelamiento del HydroBID.

En las pestañas de la interfaz de inicio se encuentra: *Model Parameters*, cuya función es determinar los parámetros más ajustados a la realidad de la cuenca que se va a analizar. Entre ellos esta: la velocidad promedio que tiene el cauce del río, la ubicación del centroide de la cuenca, la latitud, el día aproximado en el que comienza y termina la temporada de crecimiento de la vegetación (aplica para cuencas que se dedican a la agricultura), la identificación de los límites de la cuenca aguas arriba, que servirá en la calibración.

En la misma pestaña, parámetros del modelamiento hay varias opciones que permiten caracterizar a la cuenca con datos hidrológicos. En el capítulo 2 se trataron de manera teórica los elementos de un ciclo hidrológico, en el software HydroBID se debe ingresar un valor individual o un multiplicador para los parámetros que están

disponibles para la corrida del modelo.

Para la calibración, se requiere: *CN*, que es número de curva y tiene relación directa con la esorrentía de la cuenca, *AWC*, es el inicio de la percolación, *r* es el coeficiente de recesión para el almacenamiento cuando el suelo ya está saturado, *s* o *Seepage*, es el coeficiente de permeabilidad que está relacionada directamente con la infiltración, en el acuífero subterráneo, *Grow season ET*, es el factor de evapotranspiración durante el crecimiento de la vegetación, *Dormant season ET*, es el factor de evapotranspiración durante la temporada restante de vida de la vegetación, y por último el porcentaje de impermeabilidad del suelo de la cuenca, es decir cuanta cobertura impermeable existe en la cuenca de estudio, dependerá directamente si es una cuenca en el sector urbano o en el sector rural.

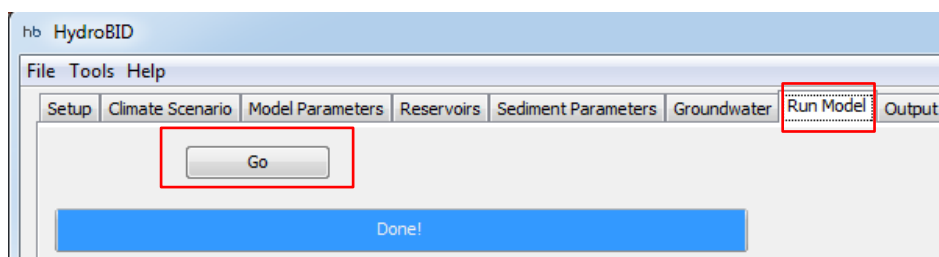
Imagen 10: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Model Parameters

	Single Value	Multiplier	Use Calibrated	Replace All	
Curve Number (CN)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Available Water Content (AWC)	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Recession Coeff. (r)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Seepage Coeff. (s)	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Grow season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Dormant season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="text"/>
Impervious cover percent:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	1.0

Fuente: HydroBID

En la calibración es importante seleccionar la opción *Replace All*, para que el software acepte ese dato como nuevo ingreso. Una vez que el dato sea el óptimo para la cuenca en estudio se debe seleccionar la opción *Use Calibrated*, que para el software comprenda como una constante sin opción a modificarse durante las corridas y futuros escenarios.

Imagen 11: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Run Model



Fuente: HydroBID

Las corridas de calibración, validación y posibles escenarios serán efectuadas con los datos de caracterización que se ingresaron de manera manual en esta pestaña del programa. Posteriormente, en la pestaña que dice *Run Model*, se presiona sobre el recuadro que contiene la palabra *Go*, para que el modelo empiece a trabajar la barra debajo mostrará el avance de la corrida, hasta terminar.

3.4.5 Datos de salida (Outputs) del modelo.

La interfaz del software HydroBID, tiene como última pestaña OUTPUT donde se muestran los resultados de la corrida del modelo. En ella, se puede encontrar tablas y gráficos que ayudarán a analizar si la corrida es exitosa o si debe calibrar nuevamente los datos para que sea más efectiva.

Cada ejecución o, como se ha llamado durante toda la investigación, cada corrida del modelo, el HydroBID produce cuatro archivos con el nombre de la corrida (Run Name), y se guardan en la dirección de la carpeta que se proporcionó previamente en la pestaña *Setup*.

Para observar, los resultados de cada corrida, se debe presionar sobre el recuadro que dice *View Stats and Graphs*, en donde se desplegarán tablas con estadísticas mensuales y diarias sobre el desempeño del modelo mostrando los errores de volumen mensuales o anuales, las curvas de duración de flujo y el balance hídrico de la cuenca en estudio.

En la pestaña de Balance hídrico se crea una tabla que proporciona un resumen anual de todos los parámetros incluidos en el balance hídrico como los valores de precipitación, evapotranspiración entre otros, colocados en el modelo informático HydroBID.

Imagen 12: Captura de Pantalla de View Stats and Graphs, Water Balance

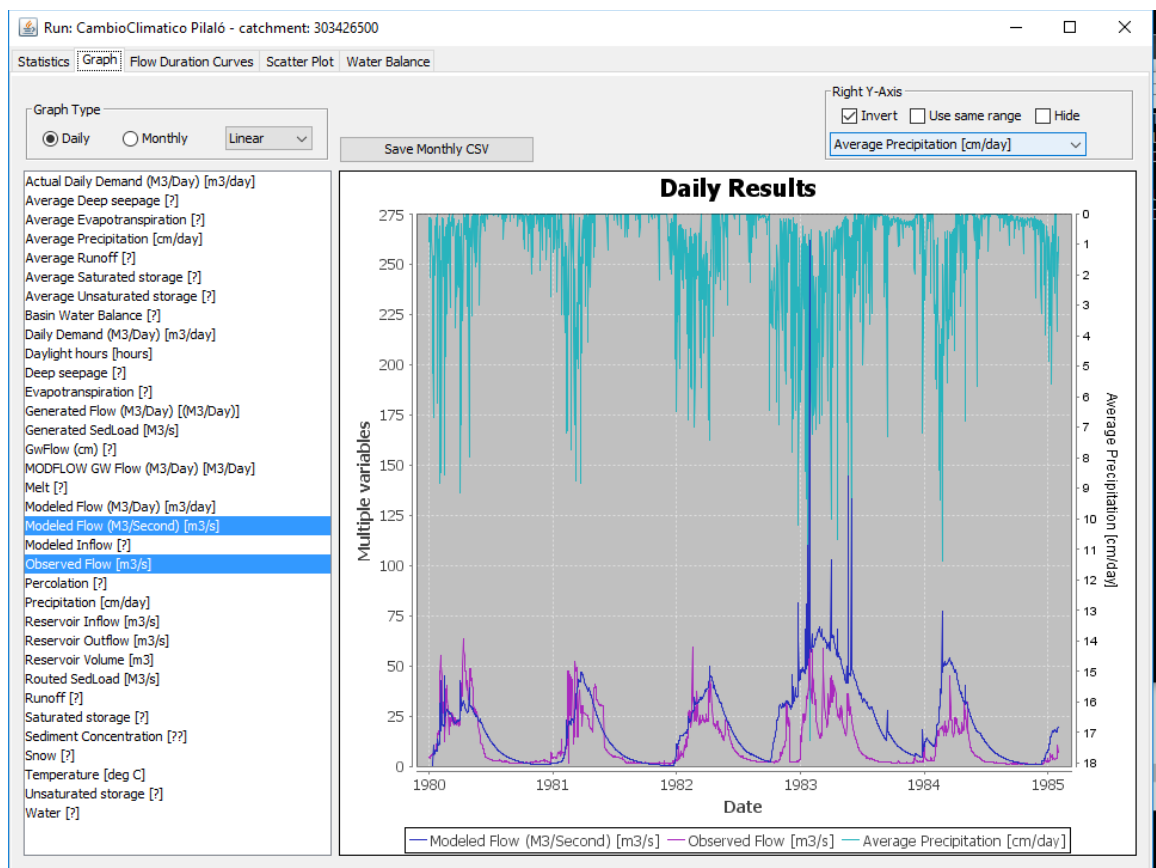
Date Range	Precipitation	Evapotransp...	Runoff	Shallow GW ...	Total Flow	Δ Unsaturat...	Δ Saturated ...	Net GW Con...	Recharge	Volume Balan...
2001	2.33422E-4	1.81112E-4	8.93873E-6	2.76045E-5	3.65432E-1	5.18418E-3	3.95507E-3	0.0	3.9159E-6	1.64705E-8
2002	2.81437E-4	2.08103E-4	8.0055E-6	5.53123E-5	6.33178E-1	8.55403E-3	7.90421E-3	0.0	7.84644E-6	3.01555E-9
2003	1.95858E-4	1.9007E-4	4.24548E-6	1.21275E-5	1.6373E-1	5.36458E-3	1.7195E-3	0.0	1.72037E-6	-1.71022E-8
2004	3.61977E-4	2.04854E-4	1.81153E-5	9.75628E-5	1.15678E0	9.07909E-3	1.39658E-2	0.0	1.384E-5	3.83656E-8
2005	2.57089E-4	1.71948E-4	8.49168E-6	7.59888E-5	8.44805E-1	5.67106E-3	1.08454E-2	0.0	1.07796E-5	-1.40635E-8

Fuente: HydroBID

Las salidas (outputs) que el modelo presenta en la pestaña *Water Balance* son guardadas en un archivo de formato [.csv], y un cuadro de resumen de la interfaz del

software da los valores de la precipitación, la evapotranspiración, la escorrentía, descarga de aguas poco profundas, caudal total, humedad diaria almacenada en el suelo no saturado, humedad diaria almacenada en el suelo saturado, contribución neta de aguas subterráneas, recarga y finalmente el balance que usualmente tendrá un tendencia a cero porque es un error del balance que considera almacenamiento (Moreda, et al, 2014:39).

Imagen 13: Captura de Pantalla de View Stats and Graphs, Graph



Fuente: HydroBID

En la pestaña con el título *Graph*, se puede obtener la gráfica del hidrograma, si se selecciona en la lista a la izquierda de la pantalla la serie de tiempo que se desea visualizar el gráfico varía de acuerdo con las solicitudes del operador del software, en el eje de las ordenadas del gráfico, se escoge si el análisis es diario o mensual, con

formato de la gráfica en escala logarítmica o normal.

Cada una de las salidas de esta pestaña, son comparadas con la precipitación observada media de la cuenca, y los parámetros del modelamiento se describen en la siguiente tabla que corresponde a la descripción dada en la nota técnica denominada manual de uso del software HydroBID.

Tabla 6: Salidas del Modelo

<i>Nombre del Campo</i>	<i>Unidades</i>	<i>Descripción</i>
Actual Daily Demand	m^3/day	Demanda diaria de agua.
Average Deep Seepage	cm	Promedio de infiltración
Average Evapotranspiration	cm	Promedio de evapotranspiración
Average Precipitation	cm/day	Promedio diario de precipitación
Average Runoff	cm/day	Promedio diario de escorrentía
Average Saturated Store	cm	Media de almacenamiento de con saturación del área
Average Unsaturated Store	cm	Media de almacenamiento cuando el suelo no está saturado.
Basin Water Balance		Porcentaje del volumen de error del balance hídrico de la cuenca.
Daily Demand	m^3/day	Demanda diaria de agua.
Daylight hours	hours	Horas de luz solar sobre la cuenca.
Deep Seepage	cm	Media de infiltración hacia almacenamiento profundo del área
Evapotranspiration	cm/day	Evapotranspiración media del área
Generated Flow	m^3/day	Flujo generado
ModFlow Gw Flow	m^3/day	Flujo medio de agua subterránea del área
Melt	cm	Media del deshielo del área
Modeled Flow	m^3/day	Caudales modelados en la cuenca.
Modeled Inflow	m^3/day	Flujo de entrada a las cuencas de captación
Observed flow	m^3/day	Caudales observados en la cuenca.
Percolation	cm/day	Percolación media del área
Reservoir Inflow	m^3/day	Caudal de entrada hacia un reservorio
Reservoir Outflow	m^3/day	Caudal de salida desde un reservorio
Reservoir Volumen	m^3	Volumen del reservorio
Runoff	cm/day	Escorrentía de la cuenca
Saturated Storage	Cm	Almacenamiento cuando el suelo está saturado
Sediment concentration		Concentración de los sedimentos en la cuenca.

Snow	cm/day	Nivel de nieve media de la cuenca.
Temperature	°C	Temperatura media de la cuenca.
Unsaturated Storage	Cm	Media de almacenamiento no saturado del área
Water		Agua (nieve y lluvia) media del área (cm)

Fuente: Nota Técnica 2. HydroBID

Existe también la posibilidad de que el software devuelva los gráficos de la curva de duración, este gráfico es el que permite evaluar si la calibración y la validación están bien. Además, están los valores de eficiencia como el factor de correlación (r), correlación modificado, y el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe, cuya mayor desventaja, de los dos últimos es que las diferencias entre los valores observados y simulados se calculan como valores al cuadrado, por lo que se podría sobreestimar los valores altos y subestimar los valores bajos de caudal (Legates y McCabe, 1999).

Finalmente, en la simulación de la cuenca para proyecciones futuras, se debe aplicar a los datos históricos un porcentaje esperado de incremento o decremento de los datos meteorológicos de la cuenca en estudio (Moreda, et al, 2014:39).

CAPÍTULO IV: SIMULACIÓN DE LA CUENCA DEL RÍO GRANOBLES

4.1 Descripción de la zona de estudio

El Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) y la Secretaría Nacional del Agua (SENAGUA), mediante un acuerdo ministerial firmado en el 2010 se estructura un reglamento de división por regiones para la delimitación y codificación de cuencas denominado método Pfafstetter. Actualmente, el Ecuador maneja un nivel 5, en nueve demarcaciones hidrográficas que son: D.H. de Mira, D.H. de Esmeraldas, D.H. de Manabí, D.H. de Jubones, D.H. de Puyango-Catamayo, D.H. de Napo, D.H. de Pastaza, D.H. de Santiago y la D.H. de Guayas. Con la Demarcación hídrica de las Islas Galápagos como mención especial, para todo el territorio nacional, vigentes según acuerdo Ministerial. N.66 del 2010.

El método Pfafstetter es un sistema jerárquico de ordenamiento y las unidades son delimitadas geográficamente desde las uniones de ríos, bifurcaciones, etc., se caracteriza por subdividirse por categorías de detalle de una cuenca.

Imagen 14: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas



Fuente: INAMHI. Dirección de Gestión hidrológica 2011

La cuenca de estudio de esta investigación es la cuenca del río Granobles que se encuentra aportando al río Guayllabamba y pertenecen a la demarcación hídrica del Esmeraldas que según el acuerdo ministerial 2010-66 de la Secretaría Nacional del Agua tiene los siguientes límites geográficos:

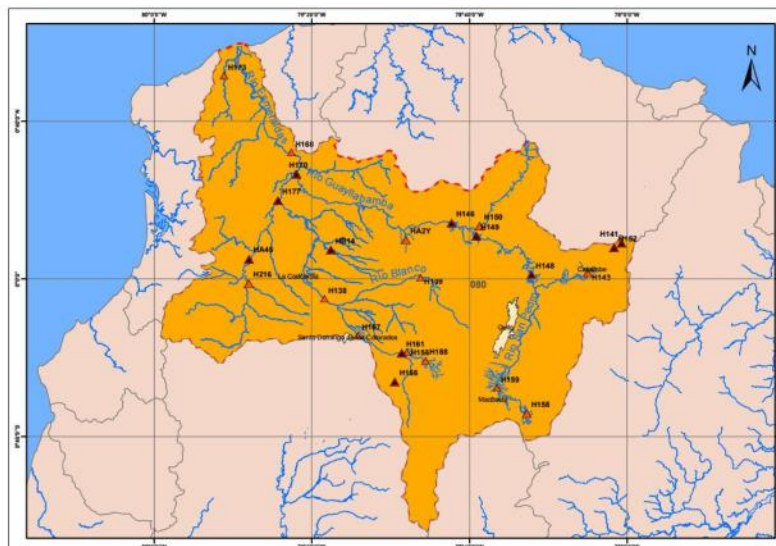
Norte: Latitud: 10161379, Longitud: 736470

Sur: Latitud: 98819933, Longitud: 740442

Este: Latitud: 1001752, Longitud: 838313

Oeste: Latitud: 10082733, Longitud: 600551

Imagen 15: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas

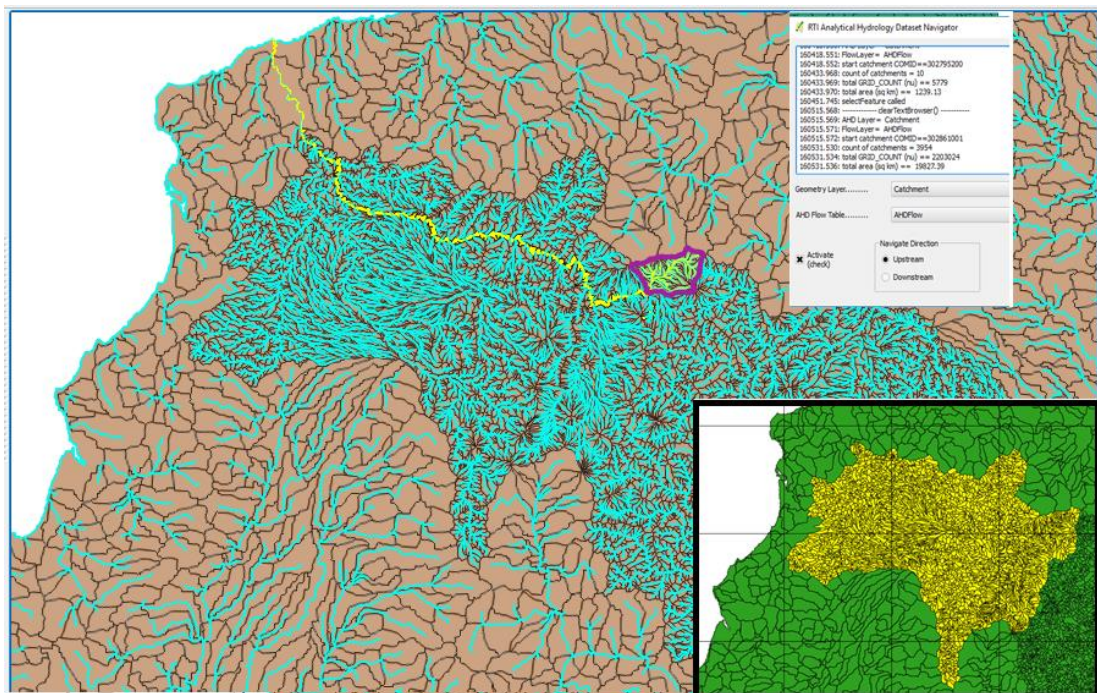


Fuente: INAMHI. Dirección de Gestión hidrológica 2011

Con un área geográfica de 32.078 km² y contiene a 18 cuencas, 329 sub-cuencas con 4 129 km de longitud total de los ríos de esta demarcación, reorganizadas en 4 centros zonales: Quito, Santo Domingo, Esmeraldas, y San Lorenzo; comienza en la región interandina con el punto más alto en el flanco occidental del Volcán Cayambe y finaliza el drenaje de la cuenca con el río Esmeraldas al océano Pacífico, se debe diferenciar que la macro cuenca tiene un área total de drenaje de 32 536,23 km², cuyo

dato fue obtenido por el programa QGis, para la preparación del programa HydroBID.

Imagen 16: Delimitación de la demarcación hídrica Esmeraldas



Fuente: HYDROBID.

La demarcación hídrica del Esmeraldas se puede subdividir en parte alta y baja, siendo la parte alta la cuenca del Guayllabamba, y a su vez esta se clasifica en parte alta con presencia de páramos, en la baja con presencia de cultivos y bosques. El río Granobles se encuentra en la subcuenca del río Pisque que es parte de la cuenca del Guayllabamba Alto, la pertenencia política del río Granobles corresponde al gobierno autónomo descentralizado del cantón Pedro Moncayo.

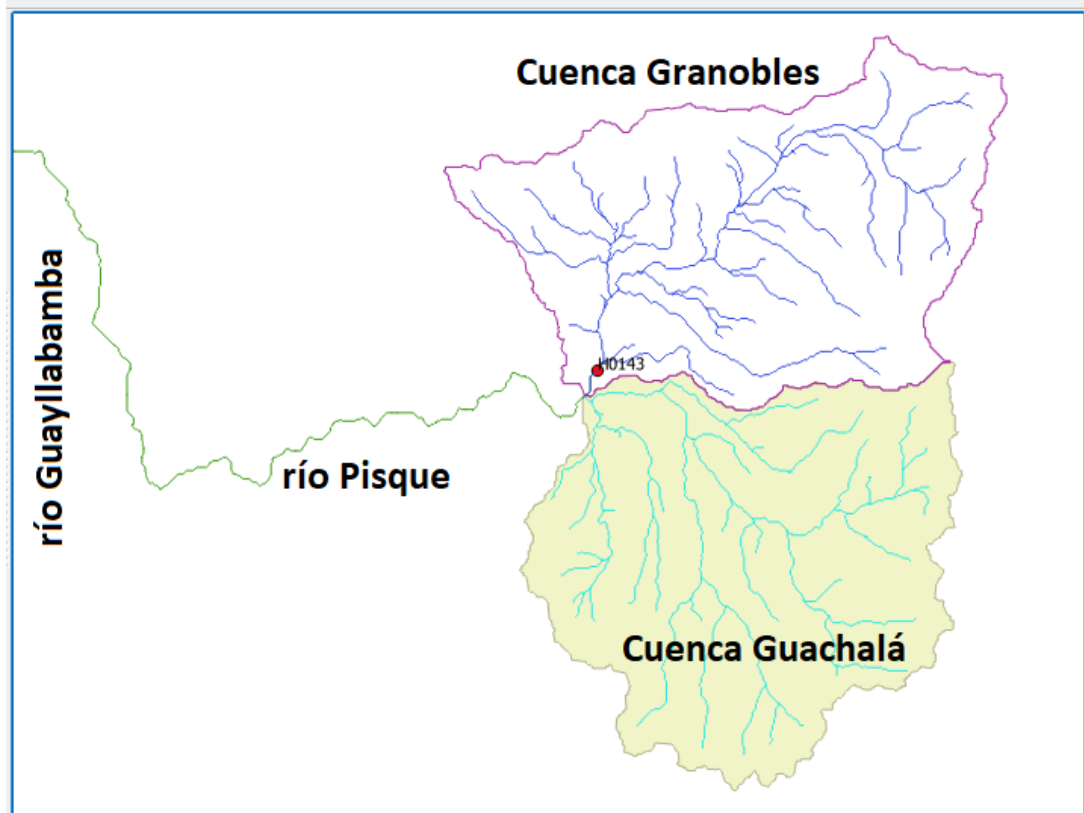
De acuerdo con el Plan de manejo integrado de la cuenca del Guayllabamba Alto, se

porosidad primaria intergranular alta en la parte baja de la cuenca, es decir, de acuíferos de alto rendimiento y acuíferos locales y discontinuos, estas mediciones se realizaron mediante pozos sumideros y también en vertientes abiertas. La zona presenta relieves volcánicos montañosos formando llanuras y gargantas que dan paso a los cuerpos hídricos.

El plan de ordenamiento territorial de la parroquia La Esperanza ((PDOT-La Esperanza, 2015) da información sobre el punto más alto de la cuenca que es 4 300 m.s.n.m ubicado en el Cerro Negro, por lo que se puede inferir que tiene un clima frío. Los suelos tienen un uso agrícola con presencia de maíz, alfalfa, papa, chocho, cebada, haba, quinua y aguacate; uso pecuario con presencia de pastizales y vegetación herbácea, y uso de tipo de industrial con presencia mayoritaria de florícolas y madereras. (PDOT- La Esperanza, 2015).

La estación hidrológica Granobles AJ Guachalá se encuentra ubicada en las coordenadas geográficas 0.02583; -78.1667 tal como lo indica la fotografía 17, *“Los datos obtenidos corresponden a la Estación del INAHMI ubicada en Tomalón. De acuerdo con los técnicos, la validez de la información es para un radio de 40Km por lo cual es perfectamente aplicable para el área de estudio.”* (PDOT-La Esperanza, 2015:65).

Imagen 18: Ubicación de la estación meteorológica Tomalón



Fuentes: INAMHI e HydroBID.

4.1.1 Localización de la cuenca y actividades socioeconómicas.

La cuenca del río Granobles se encuentra bajo la jurisdicción del cantón Pedro Moncayo, el crecimiento demográfico del cantón ha ido evolucionando de acuerdo con los datos obtenidos en el INEC⁸, como indican los censos: en 1990 vivían 15 718 personas, en el 2001 las estadísticas demográficas señalan que moraban 25 594

⁸ INEC- Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. www.ecuadorencifras.gob.ec

pobladores y finalmente en el 2010 constaban de 33 172 habitantes asentados en la zona. Los pobladores mayoritariamente se auto identifican como mestizos (68 %).

La educación tiene varios aspectos a considerar: analfabetismo en mayores a 15 años es de 10.2%, el acceso a educación básica es de 92.5%, acceso al bachillerato es del 69.31%, acceso a educación superior 12.16%. Cabe señalar que son datos del censo del 2010, ya que no se cuenta con datos actualizados.

El cantón Pedro Moncayo tiene una alta tasa de empleabilidad que varía del 80.58% al 100% de la población económicamente activa. Y de estos datos se sabe que el 60% son varones. El trabajo primario del cantón es agrícola y ganadero siendo el 55% de pobladores dedicados a esta tarea.

4.1.2 Caracterización física del área de estudio.

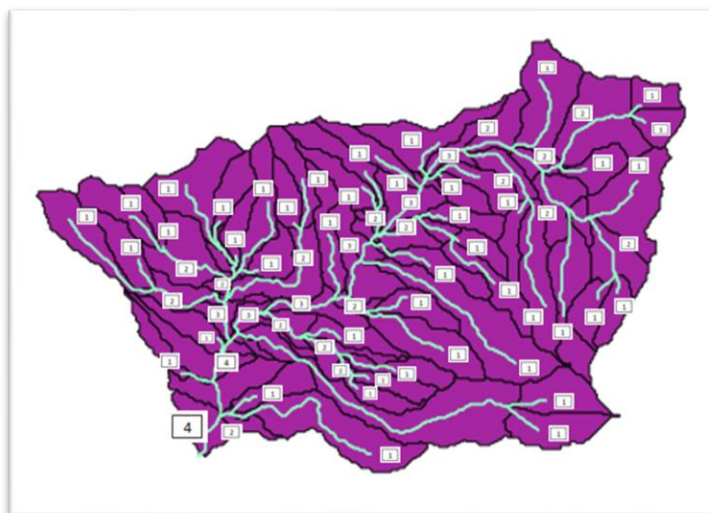
El río Granobles nace en el flanco oriental del volcán Cayambe, que junto con el río Guachalá forman el río Pisque, siendo un afluente importante del río Guayllabamba. El Plan de ordenamiento territorial del cantón Pedro Moncayo identifica la cuenca del Pisque de la siguiente manera: *“el área total de la microcuenca es de 1.185 km², la longitud del río desde el nacimiento a la desembocadura es de 65 km, densidad de*

drenaje 0,40 (unidad permeable), con una pendiente media de 4%.” (PDOT-Pedro Moncayo, 2018).

La cuenca del río Granobles, se delimitó mediante el Software QGis, con información del plug-in desarrollado por el BID, AHD Tools. Contiene 89 subcuencas con un área de drenaje de 396.88 km², la identificación única COMID es: 303047813, la longitud total de los cauces dentro de la cuenca es de 217 km, se determinó el perímetro mediante las herramientas propias de QGis, dando como resultado 110.73 km.

El tipo de la cuenca del río Granobles es endorreica de orden 4, porque desemboca dentro de la plataforma continental en la cuenca del río Pisque. De acuerdo las mediciones en el QGis la proyección de la longitud de la cuenca es de 29.27 km, el ancho medio de la cuenca es de 13.56 km. Mediante cálculos realizados se sabe que el Kc es de 1.56, el Kf es de 0.46, el Dd es de 0.54 y la sinuosidad es de 1.52, finalmente el tiempo de concentración es de 97.81 horas.

Imagen 19: Orden del río Granobles



Fuente: AHD Tools, HydroBID, QGis.

4.1.2 Caracterización hidrometeorológica del área de estudio.

La hidrometeorología es el estudio de los fenómenos atmosféricos que afectan al ciclo hidrológico, tiene mucho que ver con la meteorología puesto que se pueden analizar la presión atmosférica, la presión de vapor, la humedad relativa, absoluta y específica (Aparicio, 1987: 113). En los Andes hay mucha variabilidad climática, tanto por la orografía como por corrientes oceánicas, aumentando aún más en el Ecuador por la cercanía a la latitud 0, por lo tanto, la región de la cuenca del río Granobles tiene influencia tanto local como regional y remota teniendo patrones de glacial por la Cercanía al volcán Cayambe hasta valles de baja montaña en extensiones muy cortas.

Durante la época de sequía, la circulación de los vientos se caracteriza por un centro de alta presión sobre el altiplano, y en épocas de lluvia baja la presión y se presentan células anticiclónicas sobre la cuenca, creando una migración estacional de los vientos, a manera de convergencia intertropical (CIIFEN, 2014: 5). Según las fuentes del INAMHI y corroboradas por las imágenes de landsat, se observa mucha nubosidad en la zona de estudio. El valor de Número de Curva compuesto de la cuenca del río Granobles es 64,11.

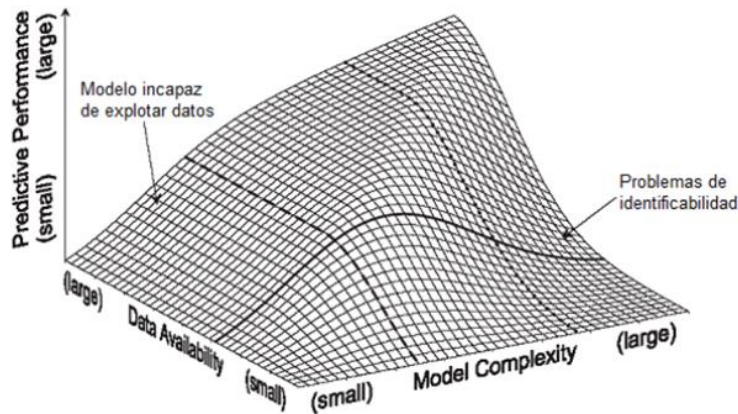
La cuenca del río Granobles tiene una gran reserva de agua en la capa freática, puesto que es la cuenca alta de montaña y tiene presencia de páramo, es decir que las

aportaciones de cada año pueden depender, no solo de las de aquel año, sino también de las de años anteriores.

4.2 Procesamiento de datos.

El procesamiento de los datos históricos de una cuenca es la base de todo estudio hidrológico, puesto que en la referencia del pasado se puede proyectar. Se tiene variables dependientes como la disponibilidad en cantidad y calidad de los datos, para Cabrera (2018:3), establece la relación entre la complejidad de los modelos con respecto a disponibilidad de los datos, ya que es importante comprender qué tipo de datos se tiene para aplicar un determinado modelo hidrológico, el autor recomienda usar un modelo poco complejo si los datos tienen poca confiabilidad y de la misma manera se podría utilizar un modelo de mayor complejidad si los datos son de alta resolución.(Cabrera, J. 2018:3), tal como lo muestra la figura realizada por Grayson, R. y Blöschl, G., en el año 2000.

Imagen 20: Relación entre complejidad del modelo, disponibilidad de datos y capacidad predictiva



Fuente: Grayson, R. y Blöschl, G., 2000.

El gráfico relaciona la capacidad predictiva de un modelo, dependiendo directamente de la calidad y cantidad de datos disponibles para el modelo. La disponibilidad de datos es determinante en la selección del modelo a utilizar y en la capacidad predictiva de dicho modelo.

4.2.2 Completar datos faltantes.

La complejidad de un estudio hidrológico está en la alta incertidumbre que se maneja, y muchas de las incógnitas se las rellena con métodos estadísticos innumerables, también la variabilidad de los comportamientos meteorológicos que están basados en la estadística, Heras (1972:361) afirma que: “...es difícil llegar a un estudio matemático y preciso de los problemas físicos que condicionan los fenómenos hidrológicos.”.

Para proyectar los modelos a futuro se debe trabajar con ciertos márgenes de seguridad, como lo menciona Chow (1994:46) hay varios sistemas de cálculo para la precipitación media y cada sistema puede dar un resultado diferente, por lo que es necesaria la interpretación apropiada de los datos de campo, para Monsalve (1999:84) la ausencia o mala calidad de los datos puede darse por falta de equipo en el lugar de la estación meteorológica o por negligencia del operador del equipo, finalmente Linsley (1967:46) concuerda con el autor Monsalve en que se deben completar los datos faltantes con estimaciones estadísticas del registro perdido.

Los procedimientos que Linsley (1967:47) menciona son: el de interpolación, y el de la razón este autor dice que este último método es usado por el buró del clima de los Estados Unidos, se basa en estimar el dato faltante con la media aritmética de tres estaciones próximas y espaciadas uniformemente alrededor de la estación solo si la diferencia entre cada estación es de máximo el 10% entre ellas.

El método de la razón que propone Linsley (1967:47) como el método complementario para las situaciones que la interpolación no pueda solventar está dado por la siguiente ecuación:

$$Px = \frac{1}{n} \left(\frac{Nx}{N_A} P_A + \frac{Nx}{N_B} P_B + \frac{Nx}{N_C} P_C + \dots + \frac{Nx}{N_n} P_n \right)$$

En donde el dato de precipitación a ser llenado es P_x y las estaciones que se usan de datos con un peso cuyo valor es una relación ponderada o también llamada relación normalizada.

El método de la regresión lineal es el más usado por los hidrólogos, Heras (1972:404) lo describe como ley más sencilla de correlación para poder generar predicciones de los datos históricos de la hidrología. El criterio establecido es la suma de los cuadrados de las distancias a la recta de punto de equilibrio que contiene las inercias, siendo

$$y = ax + b$$

Para lo cual se debe determinar los parámetros a y b , como las derivadas parciales de la suma de cuadrados igualadas a cero (Heras, 1972: 404).

4.2.3 Análisis de consistencia de datos.

El análisis de consistencia de datos se conoce también como el análisis de doble masa que para Heras (1972:404) es una forma de contraste y es el siguiente paso después de rellenar los datos. El método de la doble masa también *“prueba la regularidad del registro de una estación, comparando su precipitación acumulada anual, o por estaciones del año, con los valores acumulados correspondientes de la precipitación media de un grupo de estaciones circundantes.”* (Linsley, 1967:48). Monsalve (1999:84) concuerda con los autores ya mencionados, sugiriendo graficar los datos históricos en una curva acumulativa con respecto al tiempo, tanto para información de

precipitación, temperatura o caudal.

La curva resultante es una línea representando que si son proporcionales se graficará como recta, la pendiente de la recta se puede determinar con la siguiente igualdad:

$$\frac{\sum a_i}{\sum b_i} = k$$

La pendiente de la recta es el indicador de este método, ya que, por la ecuación previa, muestra una proporcionalidad, por lo tanto, si hay una variación puede que haya un cambio o exista la presencia de errores de tipo sistemático, en los posible se debe corregir el menor número de datos (Heras, 1972: 383). Se debe poner atención, tal como afirma (Linsley, 1967:48), en los puntos representados puesto que se desvían, los valores irregulares, siempre alrededor de la línea que dibuja la media, RTI añade que si la curva no es homogénea, se puede considerar un cambio de instrumento en la estación de estudio (RTI, PPP, 2016).

4.3 Calibración y validación del modelo HydroBID.

En los modelos informáticos de modelamiento hidrológico se realizan procesos de ajuste que reproduzcan de manera sintética, los fenómenos que se observan en los datos históricos de una cuenca (Leal, 2009: 8). Dichos ajustes, hacen referencia a dos procesos muy conocidos en la hidrología que son la calibración y la validación del software.

El proceso de calibración es la búsqueda de parámetros que disminuyan las diferencias en el comportamiento hidrológico de una cuenca y los resultados de la simulación del modelo (Cabrera, 2017:8).

El HydroBID, utiliza una evaluación de los outputs (parámetros de salida) para conocer qué tan cercano está la predicción con respecto a la realidad, y son:

- El coeficiente de eficiencia de Nash- Sutcliffe, tiene rangos que varían entre -1.0 y 1.0 y el valor de 1.0 indica que el hidrograma de caudales simulados encaja perfectamente con los datos observados.
- El coeficiente de correlación varía desde -1.0 a 0 para una relación lineal positiva y desde 0 a 1.0 para una relación lineal negativa, y
- El error de volumen general, en donde se relaciona el caudal observado con el caudal simulado en el período en el que se realiza la corrida.

Según Braga (2002), el modelo no debe ser exacto en la calibración, puesto que solo debe buscar una tendencia del comportamiento de la cuenca, se debe buscar la precisión para usar los parámetros que la caracterizan a lo largo del tiempo.

Finalmente, el modelo debe pasar a una etapa de validación, en la cual se evalúa su capacidad de predicción. (Cabrera, 2017:8) demostrando que los pronósticos hidrológicos son los adecuados. Cabe mencionar que los períodos de calibración y validación deben ser distintos e independientes.

La validación es un procedimiento dirigido a verificar el desempeño del modelo de simulación que ya está calibrado, está basado en el análisis de sensibilidades, es decir, que si el modelo no se ajusta se debe recalibrar, puesto que se pueden definir donde se presentan los problemas del modelamiento (Braga,2002:7).

Para realizar el estudio de la cuenca del río Granobles se cuenta con datos desde el 1 de enero de 2000 al 31 de diciembre de 2015. Para lo cual, la calibración se realizará con dos tercios de los datos (10 años) y la validación con el tercio restante (5 años).

4.3.2 Calibración.

La calibración en el software HydroBID, es de manera manual, es decir depende mucho del operador del sistema, y del conocimiento de la zona, puesto que los valores a ingresar deben ser lo más parecidos a la realidad de la cuenca (RTI-HYDROBID, 2018).

Se debe tomar en cuenta que en la pestaña de *Setup*, las opción de Outlet Catchment este pinchada, luego en los parámetros del modelo (*Model Parameters*) el primer punto a calibrar es la velocidad del tiempo de concentración, el software tiene el valor preestablecido de 0.5 m/s que, de acuerdo con Moreda, et al. se determinó para Latinoamérica mediante la ecuación empírica diferencial de Jobson para velocidades promedios basada en el flujo y la pendiente de la cuenca, aunque se puede cambiar si se realizan los cálculos específicos para cada realidad (2014:22). Posteriormente se solicita la latitud que servirá para ubicar a la cuenca y realizar los cálculos de

evapotranspiración potencial, se sugiere que para esta opción se marque la casilla que vincula a la cuenca con el QGis y la pone automáticamente en el modelamiento.

Las casillas de “*Start growing season*” y “*End Growing season*” hace referencia a la producción agrícola de la zona de estudio, por lo que se debe colocar el día en que comienzan a crecer los cultivos y el día en el que la planta deja de crecer y ya no es parte del ciclo de cultivo. Los días son contados anualmente, siendo 1 el primero de enero y 365 el 31 de diciembre. Para la cuenca del río Granobles, se optó por colocar los 365 días puesto que se trata de terrenos usados para la agricultura con alta presencia de invernaderos a lo largo de todo el año.

Se debe poner la identificación COMID de la subcuenca que contenga un reservorio artificial de agua (*cutoff*), en esta investigación no se encontró ningún tanque de reserva en la cuenca por lo que se deja vacía la casilla.

Los parámetros hidrológicos para el modelamiento deben ser colocados de la manera más fiel posible a la realidad, para que se ajuste al comportamiento real de la cuenca. Aunque el proceso es iterativo, se puede reducir los intentos y optimizar el tiempo si se conoce cada cuenca, cada parámetro se describe a continuación:

Imagen 21: Captura de Pantalla Parámetros de Calibración

	Single Value	Multiplier	Use Calibrated	Replace All	Value
Curve Number:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	1.5
AWC:	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	0.1
R Coefficient:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	0.008
Seepage:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	0.00075
Grow season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	1
Dormant season ET factor:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	1
Impervious cover percent:	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	1

Fuente: HydroBID

- Número de curva, **Curve Number**, es el valor que relaciona el uso del tipo de suelo, es decir si es suelo urbano, agrícola o forestal, y va directo al algoritmo que determina la curva de la escorrentía. Se sabe que el suelo de la cuenca en estudio es de tipo B, que tiene una condición hidrológica buena con una vegetación combinada de árboles, matorrales, arbustos, y cultivos en surcos hechos por los campesinos. En la base de datos, propia del HydroBID, el CN inicial compuesto de la cuenca es de 64 que corresponde a un suelo con cultivos informales. Luego de iniciada la calibración se coloca un multiplicador igual a 1.5 que correspondería a un CN de 96 que corresponde a un suelo removido sin vegetación.
- **AWC**, es la capacidad disponible de agua en el suelo, es decir es el volumen de agua que se encuentra en la capa superior del suelo o en la zona no saturada, de

forma que puede ser transferida a la atmósfera por evapotranspiración. Puesto que se estima que las lluvias son constantes tanto por la altura de la cuenca, es decir a nivel del páramo, como por la geografía, se tiene que el multiplicador inicial para AWC puede ser de 0.7 es decir un 30% de saturación del suelo. Después de las iteraciones propias de la calibración, se determina un multiplicador de 0.1 ya que este parámetro es sensible a la pendiente de la curva de duración y eso ayuda definir los picos y valles de los modelamientos diarios y mensuales.

- Coeficiente de recesión, **R coefficient**, es un coeficiente que está relacionado en la interacción de los sistemas de agua subterránea y de aguas superficiales. Es decir, caracteriza el flujo de agua procedente de la zona saturada que contribuye a los caudales de los ríos en la cuenca, se opta por un coeficiente R igual a 0.008, este parámetro ayuda a ajustar la temporalidad de los eventos estacionales de la precipitación.
- Infiltración, **See Page**, va directamente relacionado con la cantidad de agua que pasa desde la superficie hacia un acuífero superficial. Este parámetro es extremadamente sensible en la cuenca del río Granobles, puesto que es directamente proporcional a la cantidad de escorrentía que presenta la cuenca. Como había una subestimación en el modelo se opta por aumentar el nivel de la escorrentía disminuyendo la infiltración a 0.0075.
- Factor de crecimiento de la vegetación para el cálculo de la EVT, **Growing season ET factor**, es un factor que está relacionado directamente con la

evapotranspiración, y determina cuando las plantas están en fase de crecimiento.

- Factor de Marchitez de la vegetación para el cálculo de EVT, **Dormant season ET factor**, es el factor que cambia cuando las plantas ya no pueden crecer más, y modifica la evapotranspiración actual.
- Impermeabilidad del suelo, **Impervius cover percent**, es el porcentaje estimado del suelo que ya es impermeable, es decir que si el suelo está pavimentado aumenta la permeabilidad.

Imagen 22: Captura de Pantalla Parámetros de Salida

Run: CalibraciónGranobles - catchment: 303047813

Overall Statistics

Statistic	Value
Overall volume err...	-9.1
Correlation, r(-)	0.19
Modified Correlatio...	0.14
Nash-Sutcliffe Effi...	-0.23

Monthly volume error

Month	Observed Mean (m ³ /s)	Simulated Mean (m ³ /s)	Ove(%)
January	3.78	2.17	-42.57
February	5.81	5.69	-2.04
March	5.44	6.23	14.37
April	8.27	6.83	-17.42
May	6.21	4.79	-22.85
June	8.21	3.55	-56.7
July	3.79	1.5	-60.3
August	1.25	0.88	-29.16
September	0.94	1.43	52.6
October	2.85	6.08	113.7
November	5.56	6.52	17.32
December	7.36	8.32	12.91

Fuente: HydroBID

En el recuadro de la imagen 22 se observa los resultados que se obtuvieron. Para comprender si la calibración está correcta se debe analizar los resultados u outputs, pues el análisis tiene varias aristas: Las estadísticas muestran el error entre el modelamiento y los valores observados en la realidad. La curva de duración presenta

de manera gráfica la brecha entre el modelo y los datos observados. Además, línea de tendencia junto con los errores mensuales dan una idea de que tan cerca a la realidad se muestra en la calibración.

Se observa parámetros, o coeficientes estadísticos que ayudan a comprender que tan cercanos están los valores ajustados entre la curva simulada y la curva observada. En las estadísticas totales hay valores de volumen de error que se puede leer por el signo del error como una sobre o subestimación del modelo. La correlación, la correlación modificada y la eficiencia Nash- Sutcliffe son parámetros estadísticos que indican el ajuste de la línea de tendencia del modelamiento con la nube de puntos de los datos históricos. De acuerdo con la recomendación de RTI, la calibración del río Granobles está dentro de los siguientes rangos:

Tabla 7: Resultados de la Calibración

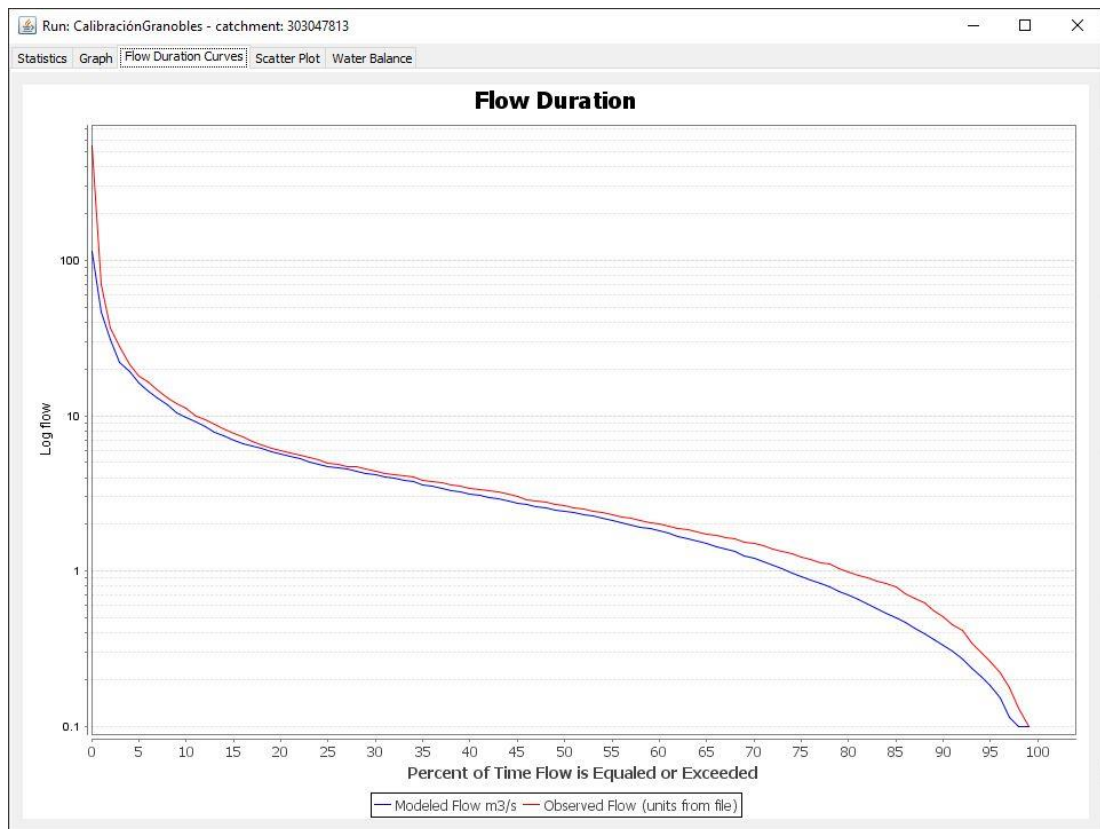
Parámetro	Valores obtenidos para la calibración	Valores adecuados en un modelo calibrado
Volumen de error (<i>Overall volume error</i>)	-9.1	+/(20-30 o 20-40)
Número de correlación (<i>Correlation, r</i>)	0.19	Lo más cercana a 1 posible
Correlación Modificada (<i>Modified correlation</i>)	0.14	Lo más cercana a 1 posible
Nash-Sutcliffe Efficiency	-0.23	Cercano a 0.4 ó 0.6

Fuente: HydroBID

Simultáneamente se debe observar la curva de duración de flujo, pues es la manera gráfica de comprender el comportamiento hidrológico que va afectando a la calibración del modelo. Pues, el flujo depende de los parámetros de comportamiento

hidrológicos y afectan directamente al caudal. Se puede observar si se requiere cambiar la pendiente de la curva (AWC), si se debe acercar las curvas (SeePage), si los valores del número de curva no son correctos (CN), si los valores extremos se presentan de una manera adecuada (R coefficient).

Imagen 23: Captura de Pantalla Curva de Duración de Flujo



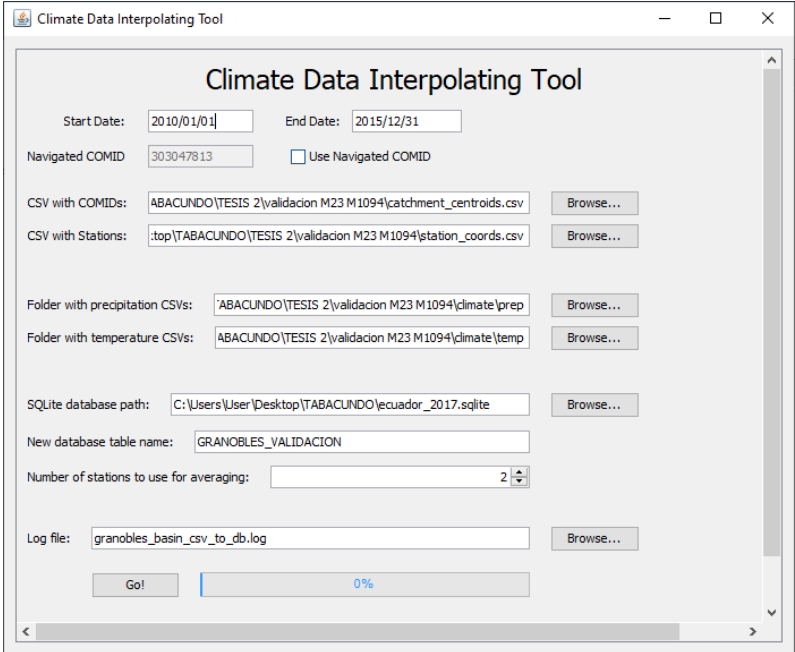
Fuente: HydroBID

Aunque los valores de Nash-Sutcliffe son considerados como insuficientes, la paridad de las curvas, modelada como observada se consideran adecuados para aceptar los parámetros de infiltración, número de curva, coeficiente de recesión y cantidad de agua previa en el suelo.

4.3.3 Validación

Los resultados de la validación se evalúan de la misma manera que la calibración, sin que los parámetros del modelamiento hayan sido cambiados en la pestaña “*Model Parameter*”, se realiza una comparación gráfica y numérica en el lapso que se optó. Para validar el modelo se debe caracterizar hidrológicamente a la cuenca, con los valores correspondiente a las fechas de la validación, tanto en precipitación y temperatura, así se obtiene una base de datos propia de la validación

Imagen 24: Captura de Pantalla Ingreso de Insumos para la validación



The screenshot shows the 'Climate Data Interpolating Tool' window. The interface includes the following fields and controls:

- Start Date:** 2010/01/01
- End Date:** 2015/12/31
- Navigated COMID:** 303047813, with a checkbox for 'Use Navigated COMID'.
- CSV with COMIDs:** ABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\catchment_centroids.csv
- CSV with Stations:** :top\TABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\station_coords.csv
- Folder with precipitation CSVs:** ABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\climate\prep
- Folder with temperature CSVs:** ABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\climate\temp
- SQLite database path:** C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\ecuador_2017.sqlite
- New database table name:** GRANOBLES_VALIDACION
- Number of stations to use for averaging:** 2
- Log file:** granobles_basin_csv_to_db.log

At the bottom, there is a 'Go!' button and a progress indicator showing 0%.

Fuente: HydroBID

En la Pestaña de SETUP, se cambian las fechas, las del periodo de validación se carga la base de datos de la caracterización hidrológica y finalmente se ingresa el archivo de caudal para el período en el que se va a validar el modelo:

Imagen 25: Captura de Pantalla Configuración del modelo para validación.

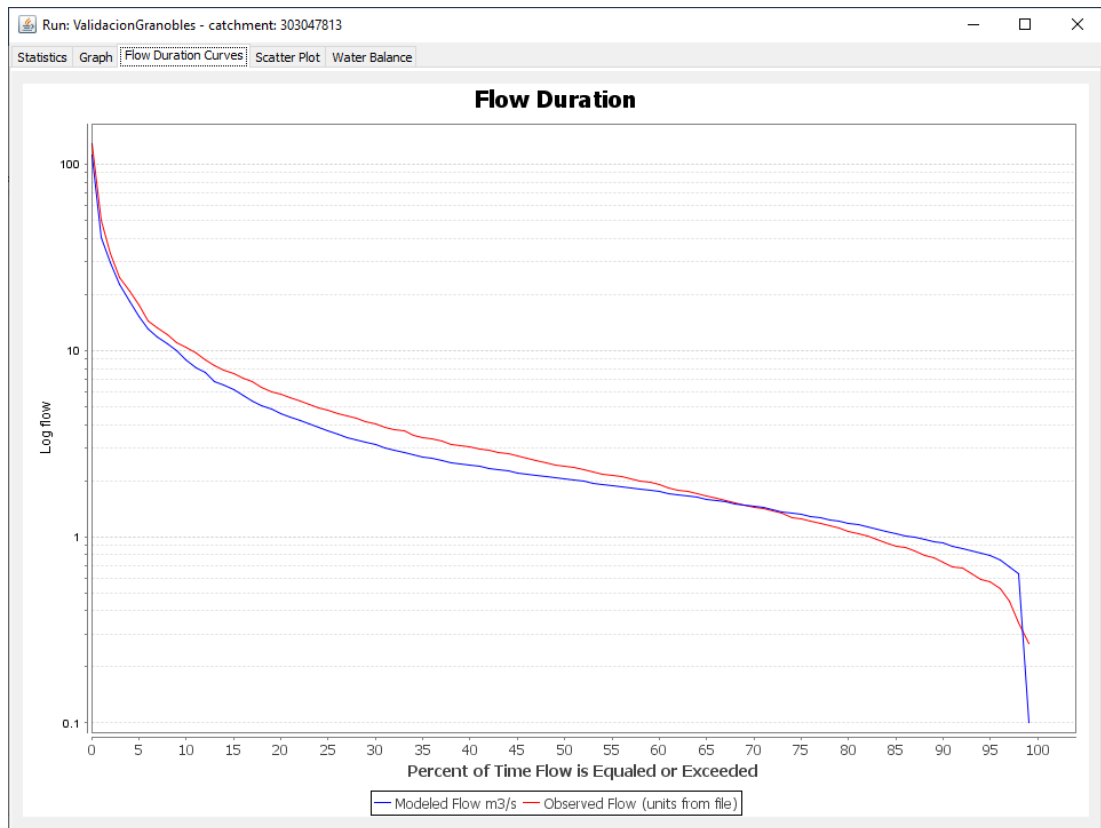
The screenshot shows the 'Setup' tab of the HydroBID II software. The window title is 'HydroBID II'. The menu bar includes 'File' and 'Tools'. The main content area is divided into several sections:

- Setup Options:** Run Name: ValidationGranobles; Catchment: 303047813; Start date (dd/mm/yyyy): 01/01/2010; End date (dd/mm/yyyy): 31/12/2015.
- Database File Options:** DB Location: C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\ecuador_2017.sqlite; DB Met Data Table: GRANOBLES_VALIDACION; Load Table Names button.
- Climate Data File Options:** Climate Data: (empty field); Climate Scenario: (dropdown menu); Browse... button.
- Watershed File Options:** Flows to compare: C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\flow.csv; Cutoff Files Folder: (empty field); Browse... buttons.
- Output File Options:** Reservoir Dir: (empty field); Output Dir: C:\Users\User\Desktop\TABACUNDO\TESIS 2\validacion M23 M1094\put; Output: Outlet catchment All catchments.

Fuente: HydroBID

Se corre y se leen los resultados, se evalúa la curva de duración y los parámetros de salida de la validación. Se acepta y se puede asumir que esa corrida es la que dará los resultados de Balance Hídrico y todos los parámetros hidrometeorológicos de la cuenca. De esa manera comienza el análisis de resultados.

Imagen 24: Captura de Pantalla resultados de la validación



Fuente: HydroBID

En las curvas de validación se observan dos cortes en Q₆₉ y en Q_{98.5} en este tramo se observa una sobreestimación del caudal en el modelamiento, por lo que se debe tener especial cuidado al analizar los resultados, comprendiendo la variabilidad estadística de los errores y posibles escenarios.

En Q₉₉ el modelo muestra un caudal de $0.1 \text{ m}^3/\text{s}$ como mínimo caudal modelado, y $0.266 \text{ m}^3/\text{s}$ el caudal observado.

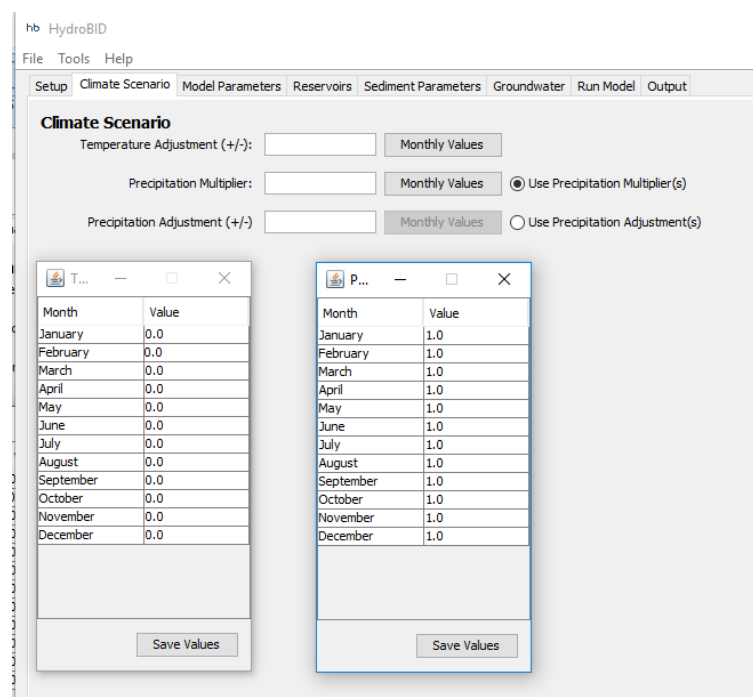
4.3.4 Modelamiento de Cambio Climático en el HydroBID

El software HydroBID, permite varias acciones propias de una cuenca, entre ellas está el modelamiento para cambio climático, que con variaciones mensuales proyectará escenarios futuros con variaciones de temperatura y precipitación.

Dentro de la interfaz de este programa informático se encuentra una pestaña que se titula: *Climate Scenario*, donde se puede ingresar los valores absolutos de las variables de temperatura para cada mes en la tabla T, se requiere una corrida para cada variable.

Es decir, si hay escenarios de aumento de temperatura se realiza una corrida, si hay escenarios de disminución de temperatura se realizará otra corrida. Para el caso de precipitación se usa un multiplicador mensual que se ingresa de manera porcentual.

Imagen 25: Captura de Pantalla del Interfaz del Software HydroBID, Climate Scenario



Fuente: HydroBID

Los valores de la imagen 25 son los valores iniciales, de esta manera debe estar para la calibración, validación y escenarios que no tengan más que los datos históricos de la cuenca. Es una buena práctica revisar estos valores antes de realizar cualquier corrida.

Las proyecciones que se estiman de manera arbitraria para esta investigación son incrementales. Son arbitrarias, porque no se encontró un estudio de los escenarios climáticos para el Ecuador para el 2050 que identifique las desviaciones mensuales de temperatura ni precipitación, y son incrementales porque tanto la precipitación como la temperatura aumentarán mediante la herramienta que presta el software HydroBID. Los eventos extremos son considerados una variación al comportamiento hidrometeorológico habitual de una cuenca, se presentan en combinación con cambios atmosféricos, vulnerabilidad de una población y factores físicos que contribuyen a los desastres naturales, es por esta razón, que es importante estudiarlos y proyectar escenarios para prevenir las catástrofes y reducir de la mejor manera la vulnerabilidad de ecosistemas y asentamientos humanos (CIIFEN, 2014: 7). Los eventos extremos que enuncia Seoáñez son: *“los ciclones, tornados, ventiscas y tempestades de nieve, sequías, golpes de calor, tormentas y lluvias torrenciales, riadas, nieblas, heladas, avalanchas y aludes.”* (2001:395). Por esta razón es importante el estudio de escenarios climáticos, para tener un estimado de volúmenes de agua en cada posible evento extremo que se presente.

Los eventos extremos que están ligados al clima pueden dividirse en dos grupos, los de origen natural, es decir fenómenos naturales y los de origen antrópico, es decir producidos por la actividad humana, aunque usualmente es difícil establecer una diferenciación entre las causas puesto que hay varias corrientes que dicen que los fenómenos están asociados entre sí.

El Panel intergubernamental de Cambio Climático de las Naciones Unidas (IPCC), periódicamente presenta informes que sugieren las metodologías de proyecciones de cambio climático. El último comunicado de prensa⁹, del 8 de octubre del 2017. Sugiere disminuir el aumento de temperatura a 1.5°C, en lugar de 2°C. Por lo que se asume dos escenarios de temperatura para la cuenca del río Granobles.

Con respecto a los escenarios de precipitación, los modelos de cambio climático tienen que evaluar más parámetros meteorológicos, en la parte alta de la cuenca se puede sobre estimar la precipitación en un rango desde el 50% al 90% por encima de los datos históricos de la cuenca (Rodríguez, 2010: 44). Los valores para estudio de cambio climático para la cuenca del río Granobles quedan de la siguiente manera:

⁹ https://www.ipcc.ch/pdf/session48/pr_181008_P48_spm_es.pdf

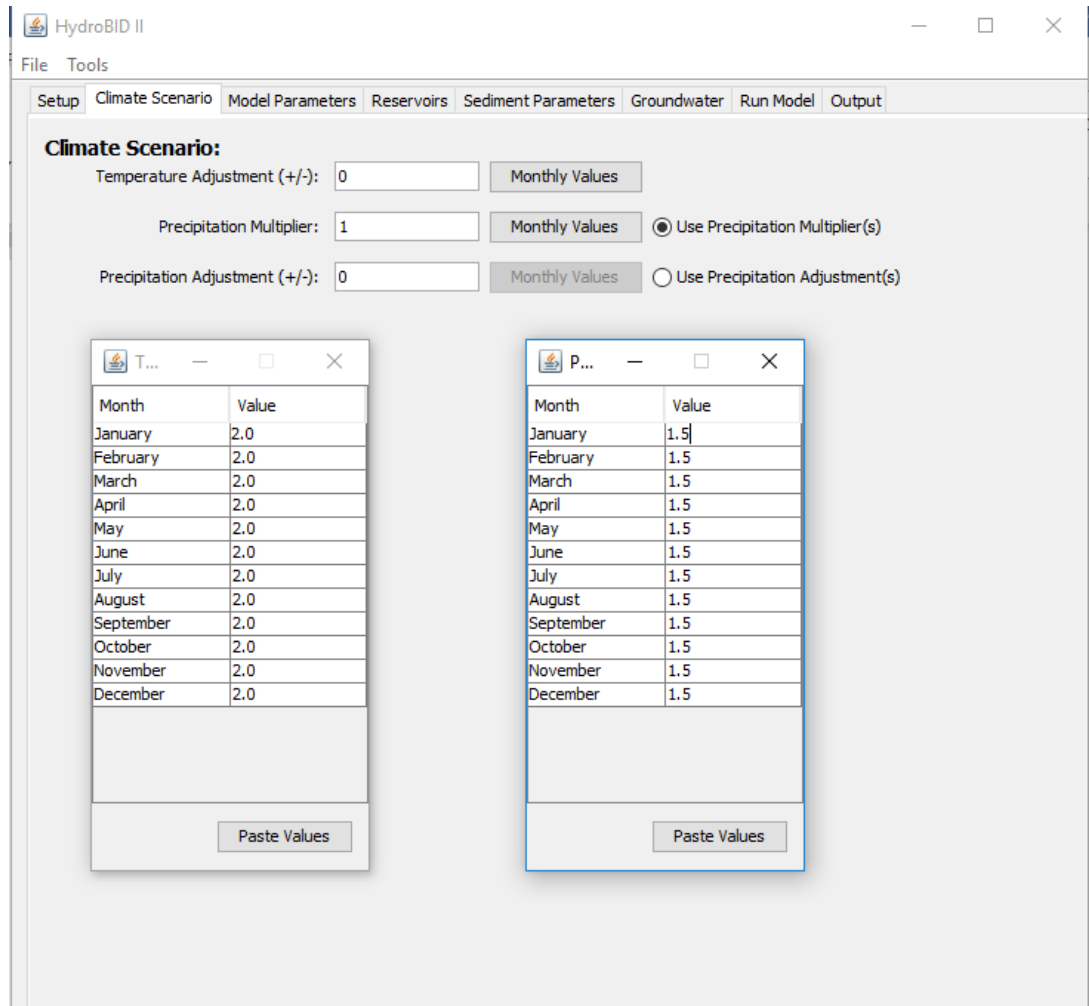
Tabla 8: Proyecciones de cambio climático, basadas en el Average GCM Ensemble

Mes	Escenario 1		Escenario 2	
	Precipitación	Temperatura	Precipitación	Temperatura
	Multiplicador	°C	Multiplicador	°C
Enero	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Febrero	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Marzo	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Abril	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Mayo	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Junio	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Julio	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Agosto	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Septiembre	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Octubre	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Noviembre	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C
Diciembre	1.5	1.5 °C	1.5	2 °C

Realizado por: Carolina Andrade.

Después de realizada la calibración y validación del modelo se puede utilizar los mismos parámetros iniciales de la cuenca con los datos meteorológicos de la validación, puesto que las proyecciones solo se dan en las variaciones climáticas de los datos históricos ingresados mediante la siguiente herramienta:

Imagen 26: Captura de Pantalla de ingreso de Datos del Escenario 2, Climate Scenario



Fuente: HydroBID

Finalmente, se hace un clic en el botón “Paste Value” y se corre el modelo para evaluar los resultados de los escenarios ingresados y para comparar con las corridas de validación. Para comparar los posibles cambios.

CAPÍTULO V: ANÁLISIS DE RESULTADOS

5.1 Resultados del modelamiento.

El modelamiento hidrológico con el sistema HydroBID, para la cuenca del río Granobles proporciona gráficos y valores numéricos, principalmente se analizará el cálculo del balance hídrico que es el producto final de esta investigación. Además, se realizará una evaluación del comportamiento de la cuenca con respecto a los recursos hídricos a través del estudio de hidrogramas.

5.1.2 Balance Hídrico

En el balance hídrico se toman en cuenta factores como la precipitación, la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía y la percolación, tal como se ha explicado en el capítulo II. Sin embargo, se debe considerar el almacenamiento que puede tener una cuenca, que se determinará por medio de la diferencia entre el inicio y el final del período del balance hídrico.

En la pestaña *Statistics*, aparecen dos tablas, que indican el caudal mensual y el caudal anual tanto el observado como el modelado:

Imagen 27: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico mensual de la cuenca del Río Granobles

Monthly volume error			
Month	Observed Mean (m ³ /s)	Simulated Mean (m ³ /s)	Ove(%)
January	3.31	8.11	145.08
February	5.75	8.04	39.77
March	5.2	7.28	40.1
April	6.26	6.55	4.57
May	5.35	6.23	16.51
June	4.57	3.04	-33.53
July	2.09	2.31	10.56
August	2.22	1.88	-15.28
September	1.59	2.5	57.01
October	2.65	4.16	57.08
November	2.92	6.21	112.61
December	2.79	4.56	63.12

Fuente: HydroBID

En la Imagen 27, se observa caudales mensuales de descarga de la cuenca, y una comparación en porcentaje del error entre los resultados observados y los simulados dentro del modelo. Aunque el error indique sobre estimación y subestimación de los caudales el valor de error de calibración y validación permite seguir con el análisis de datos. Con estos valores exportados al Excel se realiza un gráfico que contiene las siguientes curvas:

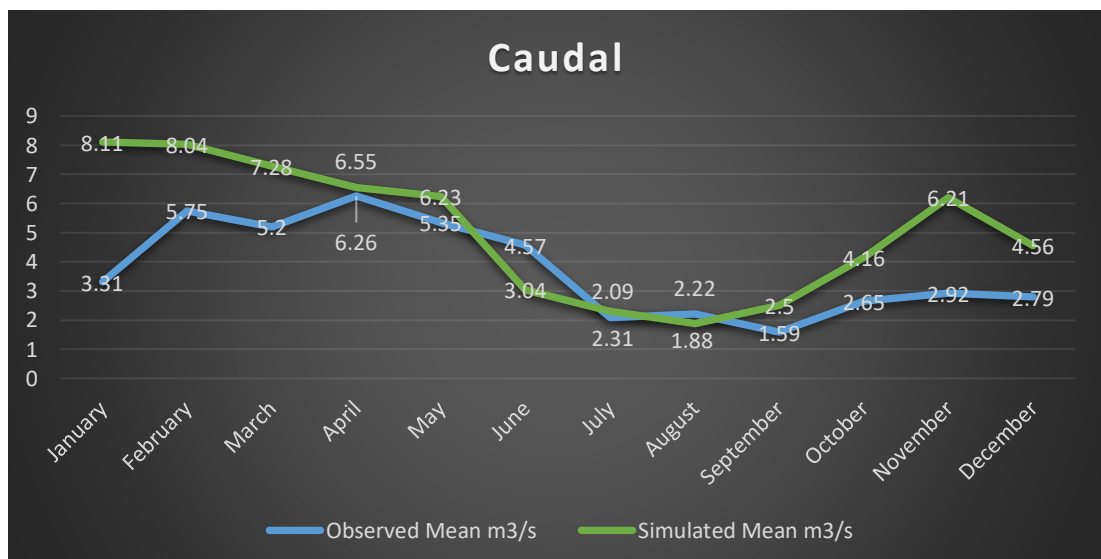
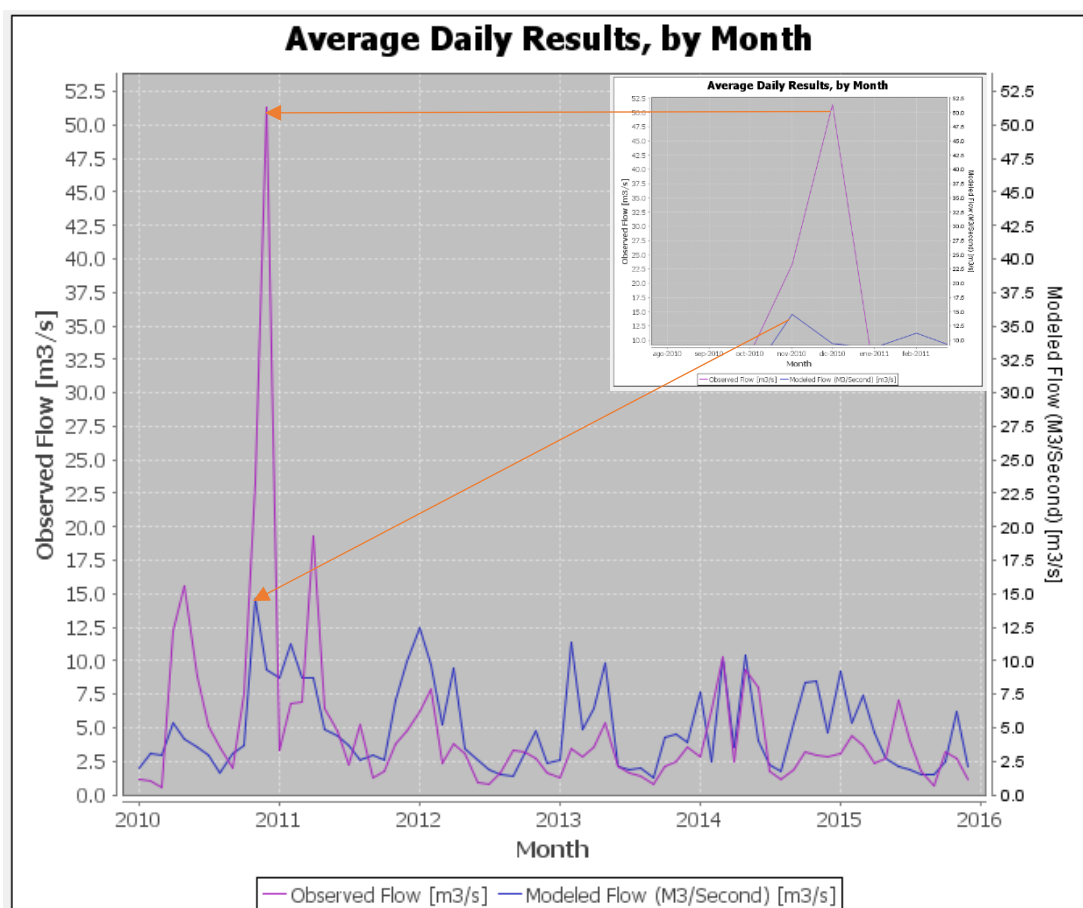


Gráfico 3: Balance Hídrico, Caudales mensuales. Realizado por la autora

La primera observación que se hace es comprender la estacionalidad de los ríos, dando como resultado que los meses con mayor caudal en los cuerpos hídricos son: febrero, marzo, abril, mayo y junio. Y los meses con menor caudal son julio, agosto, septiembre, octubre, noviembre, diciembre y enero. Dando como resultado un comportamiento bimodal en la cuenca del río Granobles.

Imagen 28: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico mensual de la cuenca del Río Granobles



Fuente: HydroBID

En la imagen 28, se observa el caudal modelado por el Sistema HydroBID de color azul y el caudal observado de color rojo. Se puede observar que el modelamiento tiene

variaciones importantes en los picos de crecidas, siendo el de mayor brecha entre sí 51.36 m³/s el 1 de noviembre del 2010 como observado y 14.5 m³/s el 11 de diciembre del 2010 como modelado, siendo la tercera parte del posible caudal del balance hídrico.

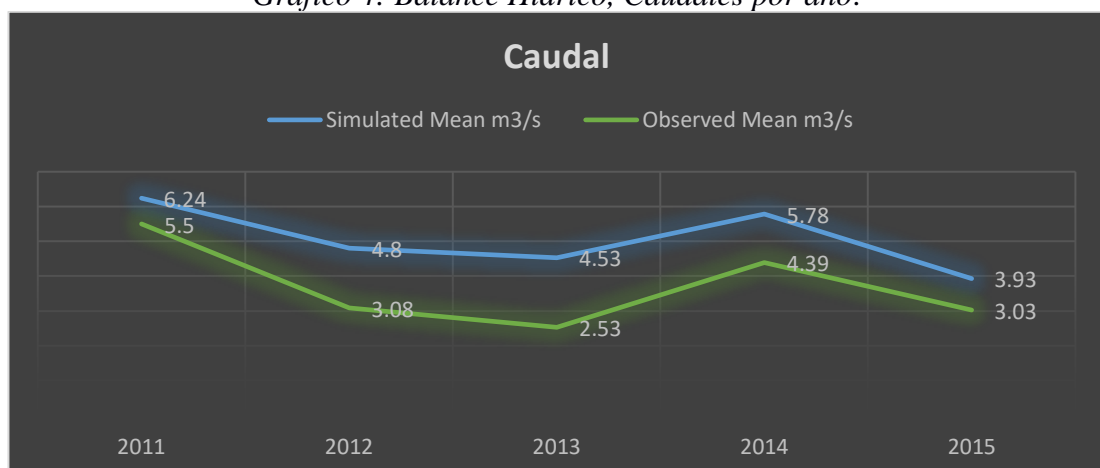
Imagen 29: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico anual de la cuenca del Río Granobles

Annual overall error			
Year	Observed Mean (m ³ /s)	Simulated Mean (m ³ /s)	Ove(%)
2011	5.5	6.24	13.36
2012	3.08	4.8	55.65
2013	2.53	4.53	79.23
2014	4.39	5.78	31.44
2015	3.03	3.93	29.54

Fuente: HydroBID

En la imagen 29, se observa la salida de la cuenca de manera anual, durante los años 2013 y 2015 hubo menor cantidad de agua en los cauces y en el año 2011 se presentaron las mayores crecidas dentro del período analizado tal como muestra el siguiente gráfico.

Gráfico 4: Balance Hídrico, Caudales por año.



Realizado por la autora

Los componentes del balance hídrico se presentan en la pestaña *Water Balance* con tablas que se identifican de la siguiente manera:

Tabla 9: Parámetros del balance hídrico

Descripción en inglés	Descripción en español
Data Range	Rango de Fecha
Precipitation	Precipitación
Evaporation	Evapotranspiración
Runoff	Escorrentía
Shallow GW Discharge	Descarga de aguas poco profundas
Total Flow	Caudal Total
Δ Unsaturated Storage	Almacenamiento No Saturado
Δ Saturated Storage	Almacenamiento Saturado
Net GW Contribution	Contribución neta de aguas subterráneas
Recharge	Recarga
Volume Balance Error	Error de Volumen del Balance.

Fuente: HydroBID

Los datos de los componentes del balance hídrico modelado se pueden entender como almacenamiento en millones de metros cúbicos al año tal como se presenta en la siguiente imagen de la interfaz del software HydroBID:

Imagen 30: Captura de Pantalla resultados de balance hídrico de la cuenca del Río Granobles

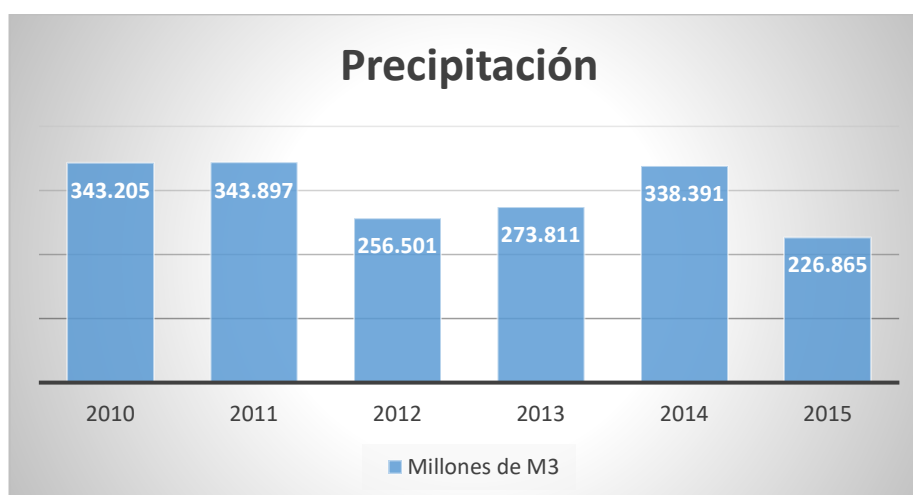
Date Range	Precipitation	Evapotranspiration	Runoff	Shallow GW ...	Total Flow	Δ Unsaturated S...	Δ Saturated Sto...	Net GW C...	Recharge	Volume Balance Error
2010	3.43205E2	1.58023E2	1.07541E2	4.07309E1	1.48272E2	3.96251E0	2.91625E1	0	3.78797E0	-2.52691E-3
2011	3.43897E2	1.49624E2	1.18909E2	7.76257E1	1.96535E2	-3.80403E0	-5.67354E0	0	7.21919E0	-2.65845E-3
2012	2.56501E2	1.11026E2	8.61266E1	6.54171E1	1.51544E2	-6.69457E-1	-1.14815E1	0	6.08379E0	-1.94416E-3
2013	2.73811E2	1.23431E2	1.0102E2	4.2047E1	1.43067E2	3.51707E-3	3.40085E0	0	3.91037E0	-2.02189E-3
2014	3.38391E2	1.41459E2	1.23444E2	5.89567E1	1.82401E2	-1.97541E-2	9.06929E0	0	5.48298E0	-2.4503E-3
2015	2.26865E2	1.17864E2	7.70257E1	4.68557E1	1.23881E2	-2.80758E-1	-1.89554E1	0	4.35758E0	-1.75681E-3

Fuente: HydroBID

Los valores que se presentan en la imagen 30, es la cantidad anual de agua modelada, tanto para precipitación, evapotranspiración, escorrentía y caudal subsuperficial. Estos dos últimos suman el caudal directo. Además, proporciona valores de almacenamiento de la cuenca del río Granobles calculados con los parámetros de calibración para comprender la infiltración y percolación del sistema hidrológico.

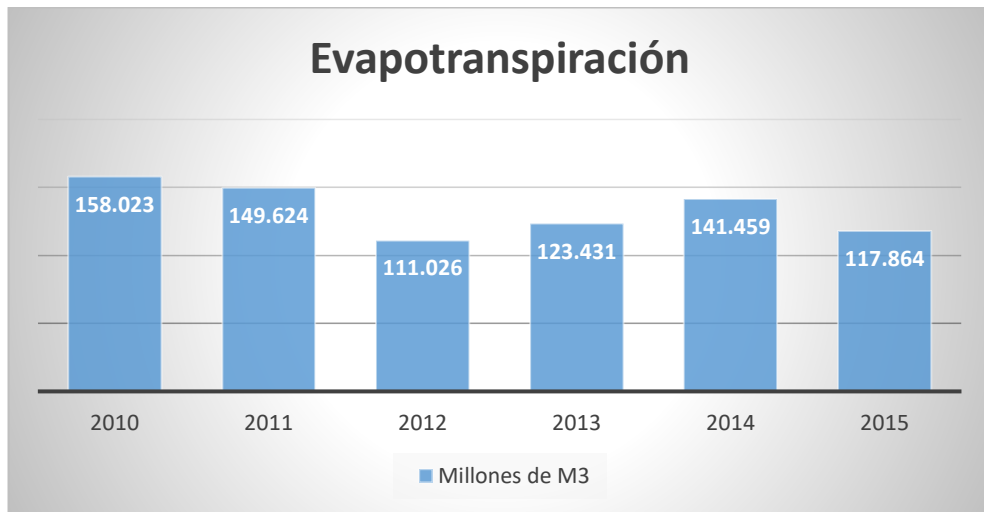
Como el análisis del balance hídrico de esta investigación es solamente superficial, los valores de *Net GW Contribution*, que se refiere a aguas subterráneas, es cero en todas las corridas del modelo.

A partir del cuadro presentado en la interfaz de HydroBID se puede transportar los datos a Excel y determinar los siguientes gráficos de cantidad del agua en la cuenca de estudio.



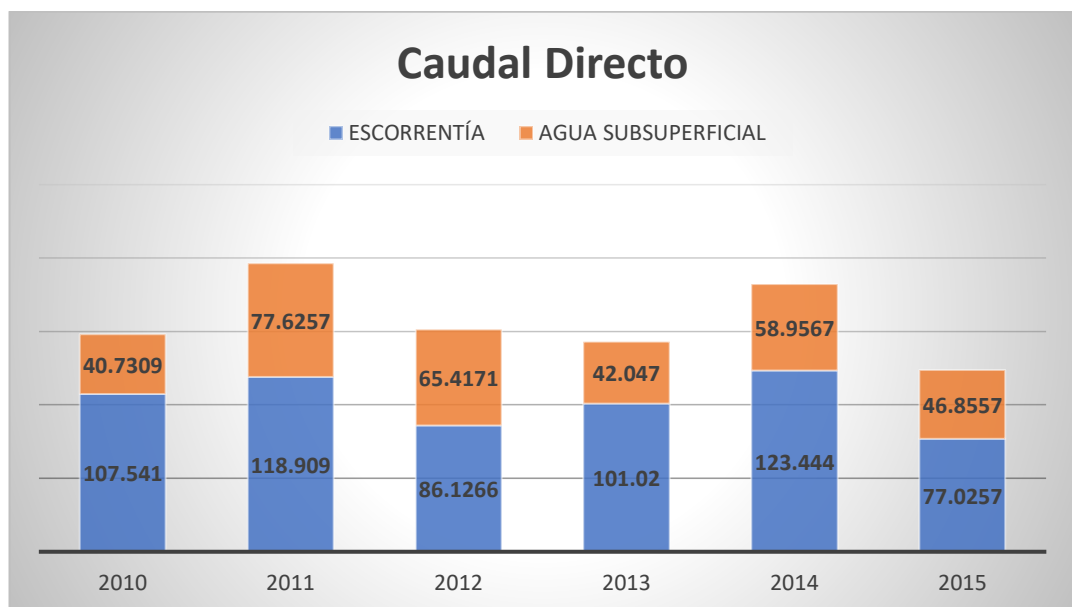
*Gráfico 5: Precipitación.
Realizado por la autora*

En el Gráfico 5 se observa la cantidad de precipitación como ingreso al balance hidrológico, siendo el 2011 el año más lluvioso, y el año 2015 el que presentó menos cantidad de lluvia.



*Gráfico 6: Evapotranspiración.
Realizado por la autora*

En el gráfico 6 se observan los valores de evapotranspiración de la cuenca, siendo un componente de salida importante en el balance hídrico, dando como el año 2015 como el más caluroso porque existe una incidencia directa con la evapotranspiración.

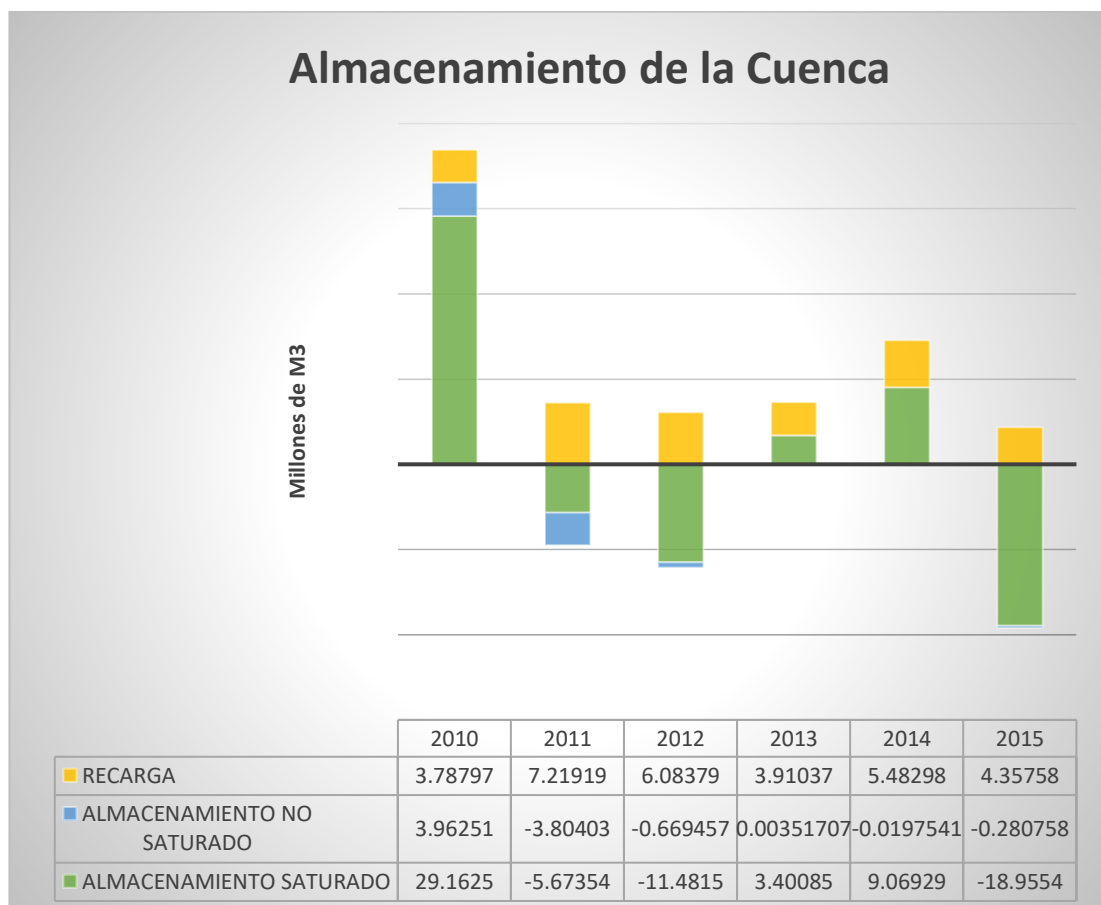


*Gráfico 7: Caudal Directo.
Realizado por la autora*

El siguiente componente que afecta a las salidas de agua en el balance hídrico de la

cuenca es la escorrentía que junto con el caudal subsuperficial producen un caudal directo, que son los que mantienen los cauces con agua de manera perenne. Tal como viene sucediendo, hay una consistencia en que el año 2015 es el que menos cantidad de agua hubo en los cauces de la cuenca y el año 2011 hubo crecidas en los ríos de la cuenca del río Granobles.

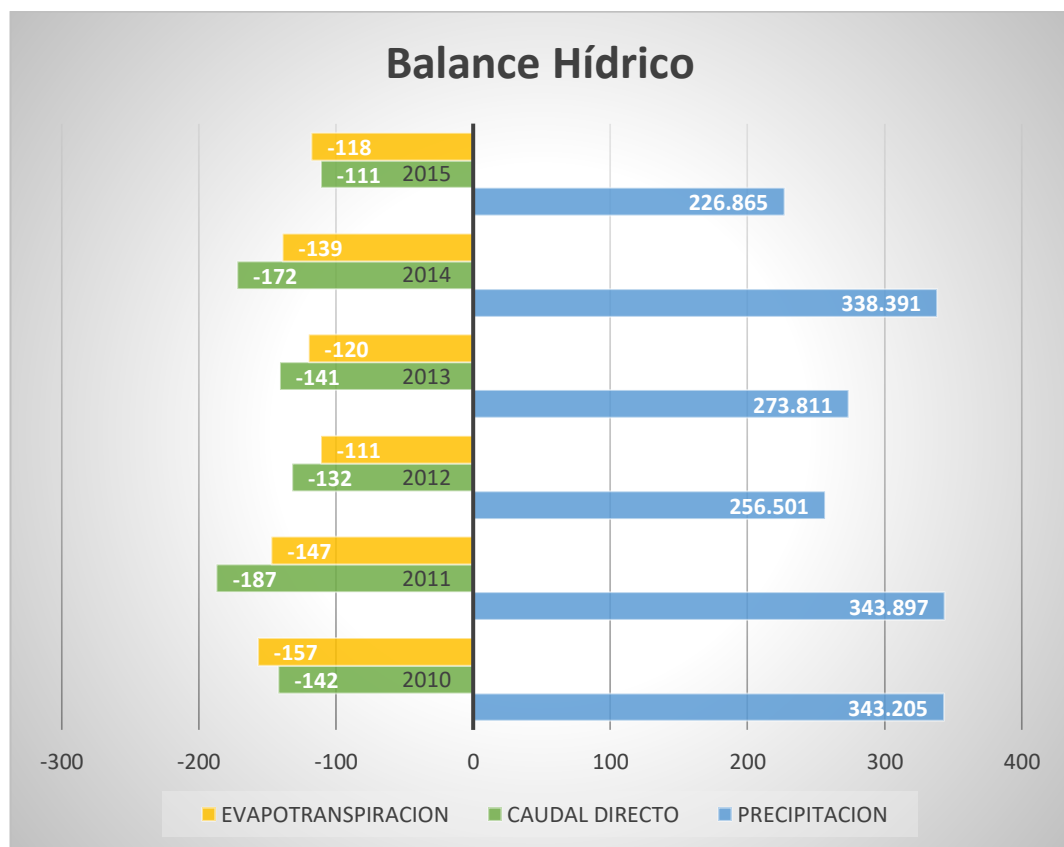
La cuenca del río Granobles se encuentra en el inicio de la demarcación hídrica del Esmeraldas, está en las faldas del nevado Cayambe. Es de gran importancia analizar el almacenamiento de la cuenca para conocer la cantidad de agua en el acuífero y la recarga en esta zona.



*Gráfico 8: Almacenamiento de la cuenca
Realizado por la autora*

Dado que el almacenamiento de agua en una cuenca es de gran importancia se observan varios niveles de almacenamiento, dependiendo directamente de la velocidad de infiltración y de la cantidad de interceptación de la precipitación, además de las condiciones físicas del suelo donde se mueve el agua. En los años 2012 y 2015 la cuenca requiere del uso del almacenamiento para poder seguir con las demandas del recurso hídrico.

Se observa también que, en los años 2010, 2013 y 2015 son los años con menor cantidad de recarga, y se debe revisar los diarios meteorológicos para comprender mejor estos fenómenos.



*Gráfico 9: Almacenamiento de la cuenca
Realizado por la autora*

En el Gráfico 9 se muestra el ingreso de agua a la cuenca mediante precipitación y las salidas de la cuenca mediante evapotranspiración y escorrentía, se observa que hay un superávit de agua en la cuenca del río Granobles, siendo solamente el balance del sistema de la cuenca, sin comparar con las demandas antrópicas propia de los usuarios del agua en el cantón Cayambe.

Además, se observa que durante los años secos (2011, 2012 y 2015) hay estrés hídrico en la cuenca, llegando a valores inferiores a cero en el agua superficial, y entrando a actuar el almacenamiento durante estos años, cabe mencionar que en esta muestra de 6 años la cuenca está muy próxima a un déficit hídrico, es por esa razón que se habla de un stress sobre la cuenca del río Granobles.

Tabla 10: Parámetros del balance hídrico

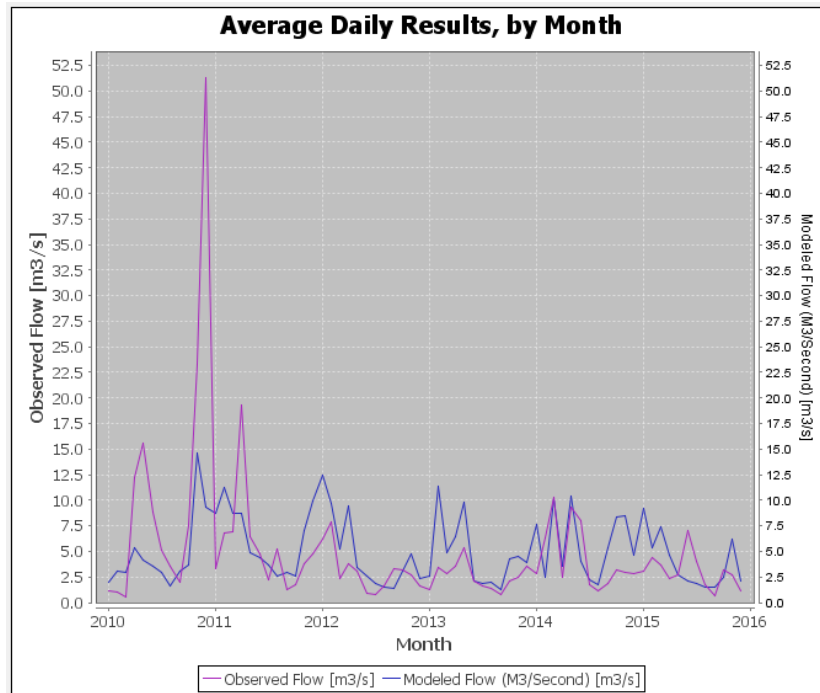
FECHA	PRECIPITACION	EVAPOTRANSPIRACION	ESCORRENTÍA	AGUA SUBSUPERFICIAL	CAUDAL DIRECTO	BALANCE	ALMACENAMIENTO NO SATURADO	ALMACENAMIENTO SATURADO	AGUAS SUBTERRANEAS	RECARGA	ERROR EN EL BALANCE HIDRICO
2010	343.21	158.02	107.54	40.73	148.27	36.91	3.96	29.16	0.00	3.79	0.00
2011	343.90	149.62	118.91	77.63	196.54	2.26	3.80	5.67	0.00	7.22	0.00
2012	256.50	111.03	86.13	65.42	151.54	6.07	0.67	11.48	0.00	6.08	0.00
2013	273.81	123.43	101.02	42.05	143.07	7.31	0.00	3.40	0.00	3.91	0.00
2014	338.39	141.46	123.44	58.96	182.40	14.53	0.02	9.07	0.00	5.48	0.00
2015	226.87	117.86	77.03	46.86	123.88	14.88	0.28	18.96	0.00	4.36	0.00

Realizada por Carolina Andrade Moscoso

5.1.3 Hidrogramas diarios y mensuales.

El HydroBID presenta varias gráficas dentro del interfaz, que se presentarán a continuación:

Imagen 31: Curva diaria de Caudal observado vs modelado



Fuente: HydroBID

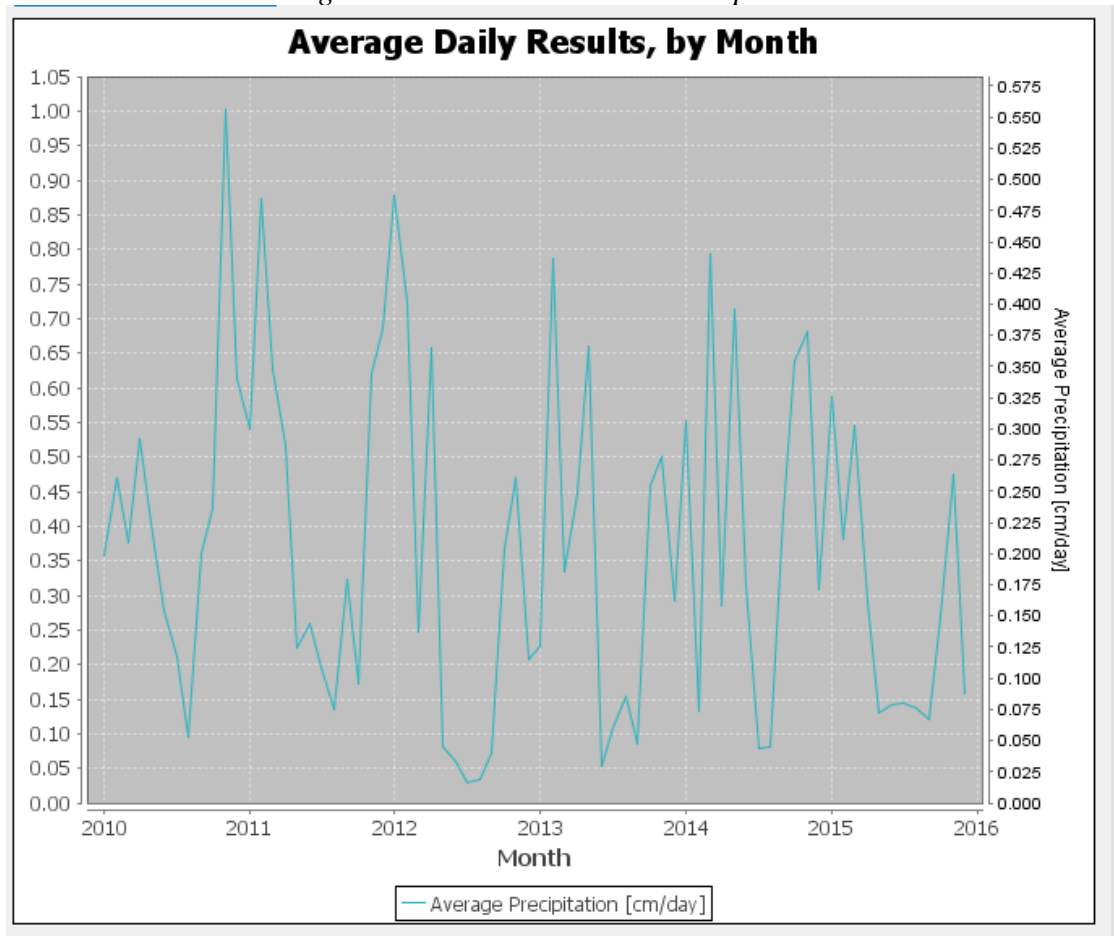
La imagen 30 muestra el primer producto del software HydroBID, un gráfico del caudal observado en magenta y el caudal modelado en azul, durante el periodo 1 de enero 2010 al 31 de diciembre del 2015.

La primera observación es la variación del caudal a través del tiempo, siendo lo más importante de analizar en el gráfico los máximos en la primera mitad del año y los mínimos hacia la segunda mitad del año. Se observa un evento extremo de lluvia el 1 de diciembre del 2011 dando como resultado un caudal de 51.36 m³/s. El sistema modela el día de mayor caudal el 1 de noviembre del mismo año con caudal máximo de 51.45 m³/s.

Sin embargo, el HydroBID también modela el día de menor caudal siendo el 1 de julio

del 2010 con un caudal de 1.57 m³/s, mientras que los datos observados dan al 3 de enero del 2010 con 0.53 m³/s. Mediante correos electrónicos con los desarrolladores del HydroBID se comprendió que el pico del primer año es despreciable, tal como ocurre en la calibración.

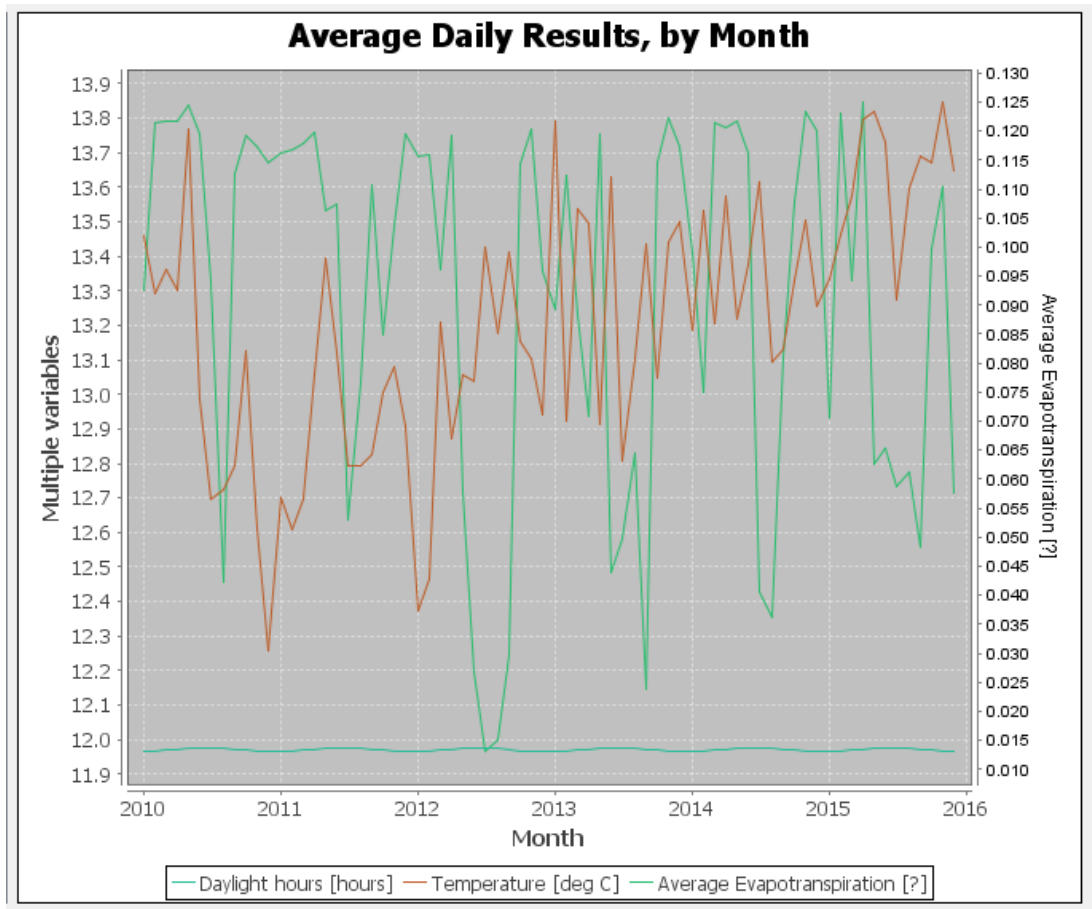
Imagen 32: Curva mensual de Precipitación



Fuente: HydroBID

La imagen 32 presenta el gráfico de precipitación mensual, teniendo como punto precipitación máxima de 1 cm de lluvia por día y el punto de precipitación mínima de 0.016 cm de lluvia en el día en toda la cuenca del Granobles.

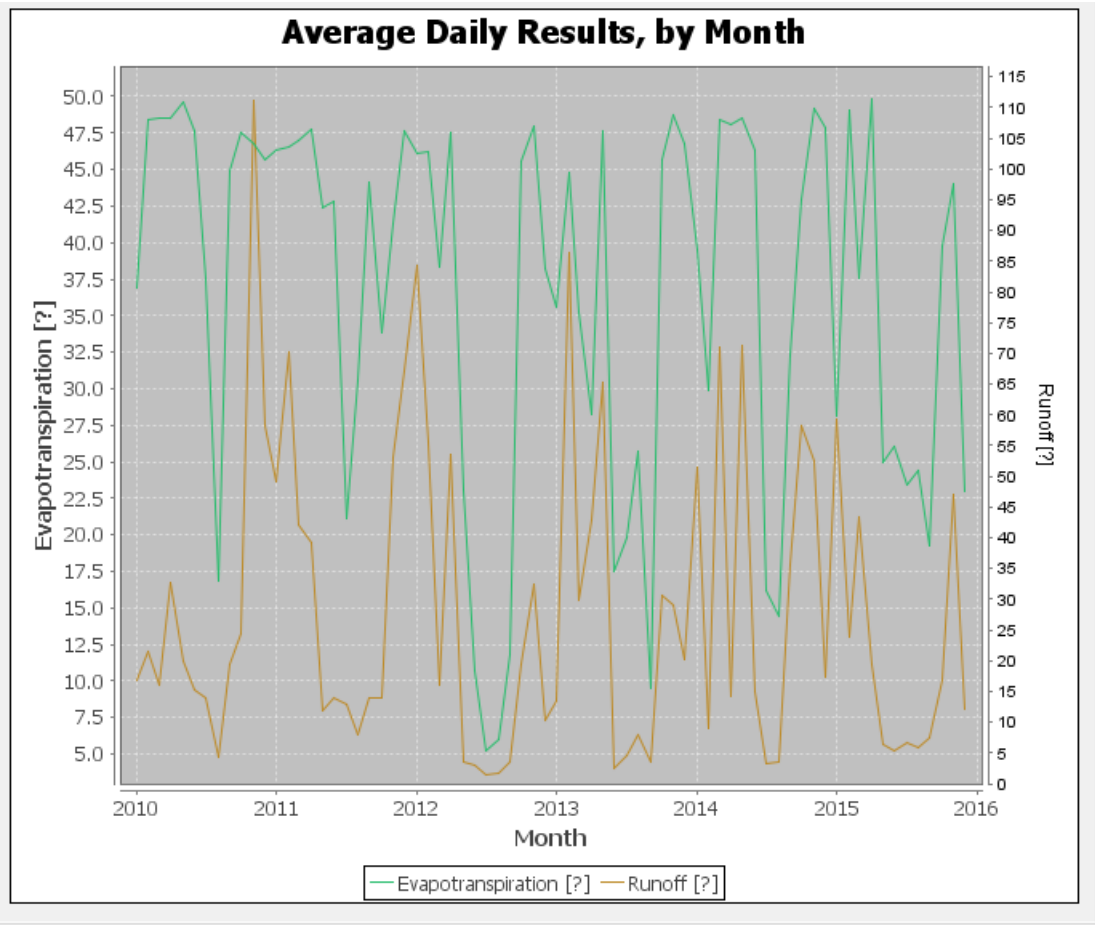
Imagen 33: Curva mensual de Evapotranspiración, Temperatura y Heliofanía.



Fuente: HydroBID

La Evapotranspiración depende directamente de la temperatura del ambiente y la cantidad de horas de luz que hay en la cuenca. Se observa una media de temperatura de 13.2 °C, un aproximado de 12 horas de luz, que da un comportamiento armónico de la evapotranspiración. Picos (máximos en el gráfico) y valles (mínimos en el gráfico) de las curvas iguales tanto en temperatura y evapotranspiración. Se debe comprender que el tipo de vegetación y el estado de crecimiento también genera una variabilidad en la transpiración, pero esas variables fueron usadas en la calibración del modelo.

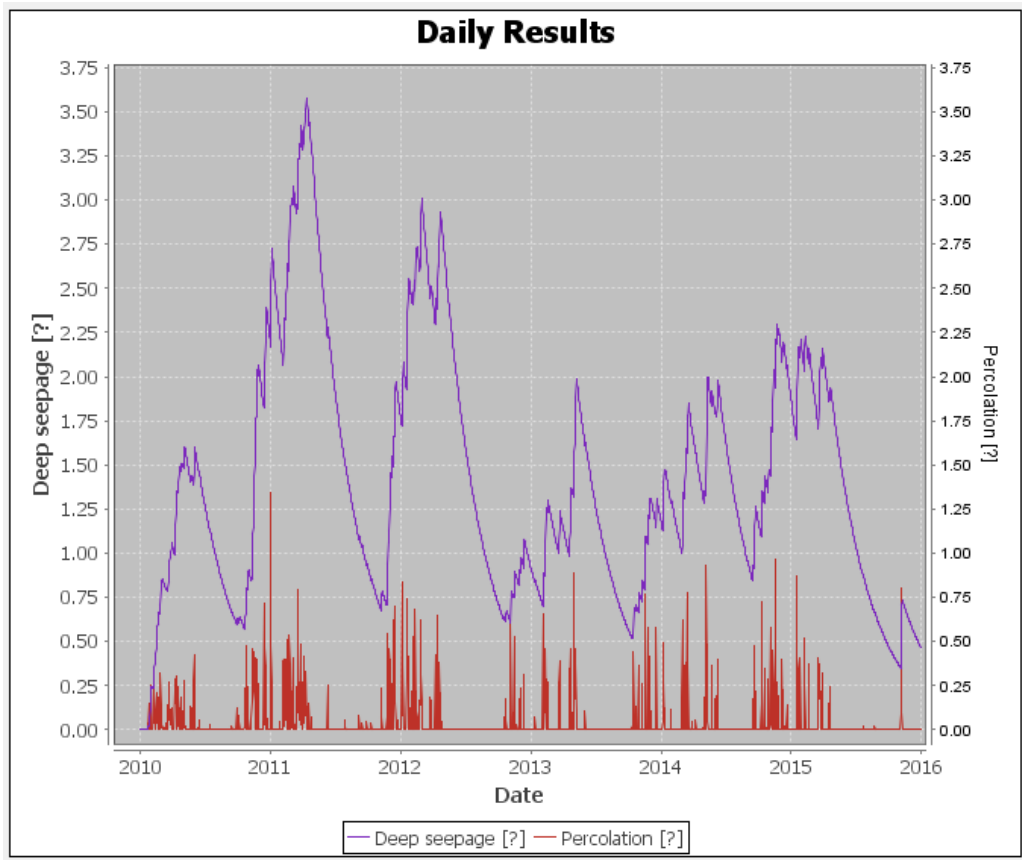
Imagen 34: Curva de Salidas de la cuenca: Evapotranspiración y Escorrentía.



Fuente: HydroBID

El balance hídrico de una cuenca tiene entradas y salidas y la pestaña de *Graph* en el interfaz del software HydroBID permite superponer los componentes para comprender el comportamiento de la cuenca. En esta imagen se observan las salidas del balance: Evapotranspiración y Escorrentía superficial.

Imagen 35: Curva diaria de Filtración y Percolación.



Fuente: HydroBID

La imagen 35 muestra dos variables sensibles para el almacenamiento, la infiltración y la percolación, se puede señalar que la infiltración es mayor a la percolación depende de las características del suelo y la capacidad de permeabilidad y drenaje. Teniendo en cuenta que hay presencia de limos, arenas y rocas andesitas propias de la cordillera en donde se encuentra la cuenca. La percolación presenta un comportamiento más lento que la infiltración.

Como la cuenca del río Granobles es una cuenca alta, y los valores de percolación e infiltración son considerables muestran una clara zona de recarga hídrica correspondiente a la cuenca del Guayllabamba.

5.2 Escenarios del comportamiento de la cuenca ante cambio y variabilidad climáticos.

Los resultados del modelo con parámetros de cambio climático son el nuevo balance hídrico y la serie temporal de los caudales, que pueden ser evaluados en gráficas y tablas (Moreda, et al, 2014). Dentro del análisis del comportamiento hídrico de una cuenca para el cambio climático, se observa la mudanza del comportamiento normal con las condiciones históricas. Se aplican varios escenarios para estimar posibles eventos extremos que se analizará con los siguientes escenarios.

5.2.2 Escenario 1

El escenario 1 considera el aumento del 50% de precipitación y el aumento de 1.5°C en la temperatura, se confirma que los resultados también están correlacionados con el aumento de la evapotranspiración y el de la esorrentía de la cuenca tal como se puede ver en la siguiente tabla:

Imagen 36: Captura de Pantalla de Balance Hídrico del Escenario 1 de cambio climático

Units: Aggregate to:

Surface Water Balance

Date Range	Precipitation	Evapotranspiration	Runoff	Shallow GW ...	Total Flow	Δ Unsaturated ...	Δ Saturated Sto...	Net GW ...	Recharge	Volume Balance Error
2010	5.02069E2	1.7817E2	1.91043E2	7.61106E1	2.67153E2	4.13699E0	4.55348E1	0	7.07828E0	-3.70349E-3
2011	4.97861E2	1.74304E2	2.13066E2	1.13677E2	3.26742E2	-4.13647E0	-9.61703E0	0	1.05719E1	-3.85419E-3
2012	3.54684E2	1.27843E2	1.41063E2	9.05177E1	2.31581E2	-3.92487E-1	-1.27629E1	0	8.41814E0	-2.69328E-3
2013	4.02974E2	1.38836E2	1.85636E2	6.90316E1	2.54667E2	0E0	3.05382E0	0	6.41994E0	-2.96773E-3
2014	4.88548E2	1.59388E2	2.22984E2	8.77382E1	3.10722E2	5.06528E-2	1.02303E1	0	8.15965E0	-3.51943E-3
2015	3.20161E2	1.4744E2	1.23614E2	6.97514E1	1.93365E2	-7.43166E-2	-2.70545E1	0	6.48688E0	-2.47841E-3

Fuente: HydroBID

5.2.3 Escenario 2

El escenario 2 considera el aumento del 50% de precipitación y el aumento de 2 °C en la temperatura, se empiezan a ver diferencias en el almacenamiento de la cuenca con la saturación del suelo, tal como se puede ver en la siguiente tabla:

Imagen 37: Captura de Pantalla de Balance Hídrico del Escenario 2 de cambio climático

Units: Aggregate to:

Surface Water Balance

Date Range	Precipitation	Evapotranspiration	Runoff	Shallow GW ...	Total Flow	Δ Unsaturated S...	Δ Saturated ...	Net GW Co...	Recharge	Volume Balance Error
2010	5.02069E2	1.82872E2	1.91043E2	7.31482E1	2.64191E2	4.10855E0	4.40991E1	0	6.80279E0	-3.70349E-3
2011	4.97861E2	1.7763E2	2.13066E2	1.10235E2	3.233E2	-4.10855E0	-9.20869E0	0	1.02518E1	-3.85419E-3
2012	3.54684E2	1.30433E2	1.41063E2	8.79269E1	2.2899E2	-2.58451E-1	-1.26555E1	0	8.1772E0	-2.69328E-3
2013	4.02974E2	1.41205E2	1.85636E2	6.68436E1	2.52479E2	0E0	3.07605E0	0	6.21646E0	-2.96773E-3
2014	4.88548E2	1.62806E2	2.22984E2	8.4844E1	3.07828E2	4.00199E-2	9.98688E0	0	7.89049E0	-3.51943E-3
2015	3.20161E2	1.48858E2	1.23614E2	6.76922E1	1.91306E2	3.83147E-3	-2.62998E1	0	6.29538E0	-2.47841E-3

Fuente: HydroBID

5.3 Comparación de escenarios

En la siguiente tabla se muestra el resumen de los resultados obtenidos en las 3 corridas del modelo con los dos diferentes escenarios climáticos:

Imagen 38: Tabla Comparativa entre Escenarios climáticos

DATA RANGE		PRECIPITATION	EVAPOTRANSPIRATION	RUN OFF	SHALLOW GW DISCHARGE	TOTAL FLOW		UNSATURATED STORAGE	SATURATED STORAGE	NET GW CONTRIBUTION	RECHARGE		VOLUMEN BALANCE ERROR	
RANGO		PRECIPITACIÓN	EVAPOTRANSPIRACIÓN	ESCORRENTÍA	AGUA SUBSUPERFICIAL	CAUDAL DIRECTO	BALANCE	ALMACENAMIENTO NO SATURADO	ALMACENAMIENTO SATURADO	AGUAS SUBTERRANEAS	RECARGA	ALMACENAMIENTO	ERROR EN EL BALANCE	
		(1)	(2)	(3)	(4)	(5)	(6)	(7)	(8)	(9)	(10)	(11)	(12)	
						(5 = 3 + 4)	(6 = 1 - 2 - 5)					(11 = 7 + 8 + 9 + 10)		
Escenario Original	T=0 ; P=1	2010	343.21	158.02	107.54	40.73	148.27	36.91	3.96	29.16	0.00	3.79	36.91	0.0025
		2011	343.90	149.62	118.91	77.63	196.54	2.26	3.80	5.67	0.00	7.22	2.26	0.0026
		2012	256.50	111.03	86.13	65.42	151.54	6.07	0.67	11.48	0.00	6.08	6.07	0.0018
		2013	273.81	123.43	101.02	42.05	143.07	7.31	0.00	3.40	0.00	3.91	7.31	0.0020
		2014	338.39	141.46	123.44	58.96	182.40	14.53	0.02	9.07	0.00	5.48	14.53	0.0023
	2015	226.87	117.86	77.03	46.86	123.88	14.88	0.28	18.96	0.00	4.36	14.88	0.0017	
Escenario 1	T=1,5 °C ; P=1,5	2010	502.07	178.17	191.04	76.11	267.15	56.75	4.14	45.53	0.00	7.08	56.75	0.0037
		2011	497.86	174.30	213.07	113.68	326.74	3.19	4.14	9.62	0.00	10.57	3.18	0.0039
		2012	354.68	127.84	141.06	90.52	231.58	4.74	0.39	12.76	0.00	8.42	4.74	0.0027
		2013	402.97	138.84	185.64	69.03	254.67	9.47	0.00	3.05	0.00	6.42	9.47	0.0030
		2014	488.55	159.39	222.98	87.74	310.72	18.44	0.05	10.23	0.00	8.16	18.44	0.0035
	2015	320.16	147.44	123.61	69.75	193.37	20.64	0.07	27.05	0.00	6.49	20.64	0.0025	
Escenario 2	T=2°C ; P=1,5	2010	502.07	182.87	191.04	73.15	264.19	55.01	4.11	44.10	0.00	6.80	55.01	0.0037
		2011	497.86	177.63	213.07	110.24	323.30	3.07	4.11	9.21	0.00	10.25	3.07	0.0039
		2012	354.68	130.43	141.06	87.93	228.99	4.74	0.26	12.66	0.00	8.18	4.74	0.0027
		2013	402.97	141.21	185.64	66.84	252.48	9.29	0.00	3.08	0.00	6.22	9.29	0.0030
		2014	488.55	162.81	222.98	84.84	307.83	17.91	0.04	9.99	0.00	7.89	17.92	0.0035
	2015	320.16	148.86	123.61	67.69	191.31	20.00	0.00	26.30	0.00	6.30	20.00	0.0025	

Elaborado por la Autora
Fuente: HydroBID

En la imagen 38, se presentan los resultados obtenidos en el software HydroBID, en la columna de la izquierda se rotula el escenario con las variables que se toman en cada uno. La temperatura se muestra como adición y la precipitación como multiplicador con respecto al escenario original. El rango de años también se encuentra en esta sección informativa.

Las siguientes columnas muestran los resultados arrojados por el modelamiento, el caudal directo (5) es la suma de la escorrentía (3) y el flujo subsuperficial (4). La columna (6), *Balance*, se añadió para visualizar el balance hídrico utilizando la ecuación en la que la precipitación es la entrada de agua a la cuenca y las salidas son la evapotranspiración con el caudal directo. Las columnas de la (7) a la (10) indican los valores de almacenamiento. Finalmente, la última columna (12) es la resta entre el balance y el almacenamiento total de la cuenca, lo que el programa le llama error de volumen en el balance.

Al comparar los resultados de cada año, se debe tomar en cuenta que el aumento de la cantidad de precipitación es consecuencia del multiplicador que el operador del software ingresó. Para entender en cuanto afecta la elevación de temperatura se debe observar la columna de evapotranspiración (2). En los dos escenarios la escorrentía permanece constante, es decir la temperatura no influye en esta fase del ciclo hidrológico.

En lo referente al Balance, columna (6), se corrobora que el aumento en temperatura y precipitación afectan a los resultados del escenario original. Sin embargo, la

diferencia entre escenarios no es significativa, es decir el incremento de $0,5^{\circ}\text{C}$ en la temperatura no representa una variación considerable en el balance hídrico, se mantienen los déficit y superávit en el período estudiado.

CAPÍTULO VI: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones.

- La cuenca del río Granobles es endorreica de orden 4, tiene forma irregular, esto lo confirma el valor del parámetro $K_c = 1.56$, el factor de forma $K_f = 0.46$ indica que no presentaría tendencia a inundaciones. Su densidad de drenaje es 0.54, esto significa que la cuenca tiene un drenaje pobre y como su factor de sinuosidad es mayor a 1.25 el río presenta meandros.
- Con ayuda de los gráficos se confirman los períodos estacionales de la cuenca estudiada, como son la época seca y la época lluviosa, así también la forma de la distribución estacional anual. Se corrobora que la época lluviosa se presenta en los meses de noviembre a febrero y la época seca se presentan entre junio y julio. Lo cual da el carácter bimodal a la distribución hidrológica.
- El balance hídrico de la cuenca del río Granobles presenta un superávit en los años lluviosos como son: 2010, 2013 y 2014, y un déficit en los años secos: 2011, 2012 y 2015. Considerando que los resultados obtenidos en el presente estudio son válidos para el período comprendido entre 2000 y 2015, para el espacio físico de 396.88 km^2 que encierra la cuenca del río Granobles.

- El software HYDROBID, utiliza únicamente datos de precipitación, temperatura y caudales como insumo extra al programa para caracterizar la cuenca en estudio. Los datos obtenidos en campo por parte del INAMHI, requieren siempre un análisis externo al software HYDROBID. Los datos que no cumplan con estos parámetros cambiarán la confiabilidad del modelamiento, puesto que el programa no los identifica ni tampoco hay retroalimentación sobre posibles errores.
- Una ventaja del uso del HydroBID es su uso libre, tanto como el software en sí mismo como los programas auxiliares como SQLITE y QGIS. Que, para las solicitudes actuales de la hidrología son de gran ayuda para ubicar y referenciar las características y comportamientos de las cuencas.
- Una deficiencia que tiene el software HydroBID es la falta de manejo de datos para la calidad del agua, por lo que para el estudio del balance hídrico se deben considerar fuentes de agua que podrían ser útiles para ser potabilizadas, siendo aplicables solamente en las cuencas de alta montaña, es decir en cuencas donde los caudales tienen gran movilidad y rapidez como para auto depurarse y mantener contenidos mínimos de oxígeno, o donde se sabe que el agua dulce proviene de lluvias y deshielos, con un bajo contenido de contaminación química, siendo únicamente lugares como reservas naturales o en páramos.
- En el escenario 1 supone el aumento del 50% de precipitación y el aumento de 1.5°C en la temperatura, lo que hace que las precipitaciones aumenten al año

un máximo de 502.069 millones m^3 y un mínimo de 320.16 millones m^3 . Al aumentar la precipitación aumenta la escorrentía y a su vez el volumen del caudal dando como valor máximo de 326.74 millones de m^3 al año.

- El escenario 2 considera el aumento del 50% de precipitación y el aumento de 2 °C en la temperatura. Se mantienen los valores de escorrentía del escenario 1. Sin embargo, los resultados del balance hídrico no presentan grandes diferencias entre los dos escenarios.

6.2 Recomendaciones.

- Para el manejo del Software HydroBID se necesita: comprender conceptos como modelos hidrológicos, manejo de base de datos con aplicación a la estadística científica y utilizar sistemas de información geográfica. Por lo que, es importante incluir la materia de Hidrología 2 en la malla curricular de la carrera de Ingeniería Civil de la PUCE, donde también se pueda abordar temas sobre hidrología subterránea.
- Frente a la dificultad de interpretar los resultados que el programa devuelve es necesario considerar las entradas y salidas de agua subterránea en el balance hídrico, las variaciones en el almacenamiento propios de la cuenca y deshielos, mediante una calibración manual del modelo. Se sugiere que el análisis de campo determine si los parámetros teóricos usados corresponden a la realidad de la cuenca.

- Es importante realizar una mayor cantidad de modelamientos de cuencas utilizando el HydroBID, para optimizar el uso del software en el Ecuador se recomienda utilizar en cuencas con características hidrometeorológicas, geomorfológicas y de uso de suelo similares a la cuenca estudiada en esta investigación, de esa manera se obtendrán parámetros confiables de eficiencia en los modelamientos
- Para completar el análisis de la cuenca del río Granobles es realizar un levantamiento de información de los usos autorizados y no autorizados del agua por Senagua, así como también generar una base de datos sobre las captaciones superficiales y subterráneas. De esa manera se puede comparar la oferta de agua de la cuenca con la demanda del uso de agua de la cuenca.

BIBLIOGRAFÍA

Acuerdo 2010 – 66 (2010), Creación de Demarcaciones Hídricas del Ecuador. SENAGUA. Quito – Ecuador, 20 de enero de 2010.

Aparicio, F. (1987) Fundamentos de Hidrología de Superficie, Editorial Limusa S.A., Mexico D.F., México.

Arteaga, R., Ángeles, V., & Vázquez, M., (2011). Programa CROPWAT para planeación y manejo del recurso hídrico. *Revista mexicana de ciencias agrícolas*, 2, 179-195. Recuperado de:

http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-09342011000200001&lng=es&tlng=es

Aucatoma, J., Iza, F., Egas, F., Lorre, C. (1998) Estudio de modelo hidrológico físico del comportamiento de la hidrología superficial y subterránea. Tesis de grado ingeniería civil. Universidad Central del Ecuador. Quito- Ecuador.

Bai, P., Liu, X., Liu, C., (2017) Improving hydrological simulations by incorporating GRACE data for model calibration, *Journal of Hydrology*.

Braga, R. (2002). El Proceso de desenvolvimiento de un modelo, publicación de la Universidad de Trás-os-Montes e Alto Douro, Brasil.

Brutsaert, W. (2013). Hydrology, an Introduction, Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom.

Burbano, N., Becerra, S., Pasquel, E., (2015). Introducción a la Hidrogeología del Ecuador, 2da Edición. INAMHI, Quito – Ecuador.

Campo, A., Neyra, F., Guillen M., (2003). Caracterización hidrológica de la cuenca alta del río Granobles, determinación de amenazas y riesgos, Cantón Cayambe. XXXI Curso Internacional de Geografía Aplicada “Geografía Ambiental: uso y manejo del agua” Centro Panamericano de Estudios e Investigaciones Geográficas. Quito – Ecuador.

Cabrera, J., (2012). Modelos Hidrológicos, Universidad Nacional de Ingeniería de Perú, Perú.

CIIFEN (2014). Metodología para la estimación de vulnerabilidad de Ecuador, Perú y Bolivia, Proyecto Información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales.

CIIFEN.org (2018). CIIFEN - Centro Internacional para la Investigación del Fenómeno de El Niño recuperado de:

http://www.ciifen.org/index.php?option=com_content&view=category&layout=blog&id=100&Itemid=340&lang=es

Chow, V.T., Maidment, D, Mays, L. (1994) Hidrología Aplicada, McGraw-Hill Interamericana, Bogotá, Colombia.

Constitución de la República del Ecuador (2008), Quito – Ecuador, 20 de octubre de 2008

Dalles, C. y Vianei J. (2009). Conceitos Básicos de Modelagem Hidrológica. Brasil.

De Alba, E., (1996) El cambio climático Global, memorias del primer seminario nacional sobre cambio climático, Santafé de Bogotá – Colombia.

De la Vega, M. (2005). Uso sustentable del agua potable, alcantarillado y residuos sólidos: propuesta de capacitación y participación comunitaria para el área urbana de Tulcán. Tesis, Gestión Social. PUCE, Quito Ecuador.

Derruau, M. (1977), Las formas del relieve terrestre, Masson, S.A. Paris, Francia.

Dunne, T y Leopold, L.B. (1978) Water in Environmental Planning. Macmillan, San Francisco. USA.

Fattorelli S., y Fernandez P. (2011) DISEÑO HIDROLÓGICO. Associazione Italiana di Idronomia. Segunda Edición.

Gleason, J. (2014) Sistemas de Agua Sustentables en las Ciudades, editorial Trillas,

Ciudad de México, México.

Gribbin, J. (2017) Introducción a la hidráulica e hidrología con aplicaciones para la administración del agua pluvial. Cengage learning editores, S.A. cuarta edición, México D.F., México.

Guía de Prácticas Hidrológicas, (2009). Volumen II: Gestión de recursos hídricos y aplicación de prácticas hidrológicas, Capítulo 6: Modelización de sistemas hidrológicos, recuperado de: http://www.whycos.org/hwrp/guide/index_es.php

Gutiérrez, M. (2008) Geomorfología, Editorial Pearson, Madrid, España.

Heras, R. (1972), Manual de Hidrología, dirección general de obras hidráulicas, centro de estudios hidrográficos, Madrid, España.

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), (2007). Climate Change 2007: Climate Change Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution to the Working Group II for the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva. UNFCCC. <http://ipcc.ch/>

Kazmann, R. (1969), Hidrología Moderna, Editorial Continental S.A., México D.F., México.

Kozanis, S., Christofides, A., Mamassis, N., Efstratiadis, A., Koutsoyiannis, D.

(2005). Hydrognomon: A hydrological data management and processing software tool.
10.13140/RG.2.2.34222.10561.

Leal, L. (2009) Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceitos e Aplicações, Revista Brasileira de Geografia Física. Recife, Brasil.

Legates, D.R., McCabe, G.J. (1999). "Evaluating the use of "goodness-of-fit" measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 35.

Linsley, R. (1967) Hidrología para ingenieros, Ediciones del Castillo, Madrid España.

López, C. (2016) Evaluación Hidrológica de la cuenca del Río Coca en Función del Cambio de uso de suelo por medio del modelo SWAT, Tesis, EPN. Quito, Ecuador.

Lux, B. (Sin Fecha) Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Universidad de San Carlos de Guatemala, recuperado de:

https://www.academia.edu/25058750/Conceptos_b%C3%A1sicos_de_Morfometr%C3%ADa_de_Cuencas_Hidrogr%C3%A1ficas

Lvovitch, M.I. (1974) World water balance (General report), Institute of Geography of the AS of the USSR, Moscow, recuperado de:
<http://hydrologie.org/redbooks/a092/093019.pdf>

Moscoso, F., (2019) La Providencia: Historia, Memoria y Cultura de un pueblo Chimboracense. Quito – Ecuador.

Monsalve, G. (1999). Hidrología en la Ingeniería. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería.

Moreda F., Miralles -Wilhelm F., Muñoz R., (2014). Hydro-BID: Un sistema integrado para la simulación de impactos del cambio climático sobre los recursos hídricos. Parte 2. Nota Técnica del BID, Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y Saneamiento. Washington, DC. Estados Unidos. RTI Internacional.

Nalesso, M., Coli, P. (2017). Guía paso a paso Manual del Hydro-BID. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y Saneamiento. Washington, DC. Estados Unidos.

Navas, G. (2007). Diseño de un sistema de riego: cálculo de la demanda de agua de los cultivos, métodos de riego, aplicación al proyecto de la microcuenca del río El Ángel. PUCE. Ecuador.

Olaya, V. (2010). Sistemas de Información Geográfica. Versión online 1.0.

ONU, Resolución A/RES/64/292. Asamblea General de las Naciones Unidas. Agosto de 2010 recuperado de:

http://www.un.org/spanish/waterforlifedecade/human_right_to_water.shtml

Pérez, V. (2000) Balance hídrico superficial de la cuenca del río Napo. Tesis de grado ingeniería civil. Universidad Central del Ecuador. Quito – Ecuador.

Plan estratégico de desarrollo institucional 2016 – 2020 PUCE (2016), Dirección de Aseguramiento de la Calidad. Quito-Ecuador.

PDOT-Pedro Moncayo (2018) Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial del Cantón Pedro Moncayo, Actualización 2018 -2025. Tabacundo Pichincha – Ecuador. Recuperado de: <https://docplayer.es/94582368-Plan-de-desarrollo-y-ordenamiento-territorial-pdot.html>

PDOT-La Esperanza (2015) Actualización Plan de Desarrollo y Ordenamiento Territorial de la Parroquia rural de La Esperanza del Cantón Pedro Moncayo, provincia de Pichincha. Recuperado de: http://app.sni.gob.ec/sni-link/sni/PORTAL_SNI/data_sigad_plus/sigadplusdiagnostico/1768112770001_FAS E%20I%20DIAGN%C3%93STICO-LA%20ESPERANZA%20FINAL_30-10-2015_16-46-58.pdf .

Polo, R. (2018). ¿Qué es HEC - RAS y para qué sirve? Recuperado de <https://www.cursosgis.com/que-es-hec-ras-y-para-que-sirve/>.

Pomboza, R. (Loza, 1991) Estudio del balance hídrico superficial del Ecuador. Tesis de grado ingeniería civil. Universidad Central del Ecuador. Quito- Ecuador.

Poveda, L. (2018). Hydro-BID Determinación del Balance Hídrico en la Cuenca del Río San Pablo, Ecuador. Nota Técnica. Subsecretaría Técnica de los Recursos Hídricos. Senagua. Quito-Ecuador.

Proaño, R. y Montalvo, F. (1999) Estimación de la recarga del acuífero centro norte de Quito, mediante el estudio de hidrología superficial aplicando un sistema de información geográfica. Tesis de grado ingeniería civil. Universidad Central del Ecuador. Quito- Ecuador.

Rineer J., Bruhn M., Miralles -Wilhelm F., Muñoz R. (2014). Base de datos de hidrología analítica para América latina y el Caribe. Parte 1. Nota Técnica del BID. Banco Interamericano de Desarrollo, División de Agua y Saneamiento. Washington, DC. Estados Unidos.

Rodríguez, A. (2010). Evaluación de los modelos globales del clima utilizados para la generación de escenarios de cambio climático con el clima presente en Colombia. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. Bogotá, Colombia. Recuperado de: <http://modelos.ideam.gov.co/media/dynamic/escenarios/evaluacion-de-modelos-globales-ipcc.pdf>

RTI - HYDROBID (2018). Curso Virtual del manejo de software HYDROBID, recuperado de: <https://edge.edx.org/courses/course-v1:IDBx+IDB3.1x+2T2018/courseware/70c2d27bfde545a19d86906b71494567/57a6>

[7febc8e942bb81c7ca77f13cf126/?child=last](https://doi.org/10.24345/7febc8e942bb81c7ca77f13cf126/?child=last)

Sandoval, K. (2009) Balance hídrico para riego en la microcuenca del río Blanco Cayambe – Ecuador. Recuperado del repositorio de tesis de la Universidad Politécnica Salesiana:

<https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/10850/1/Balance%20hidrico%20para%20riego%20en%20la%20microcuenca%20del%20río%20Blanco.pdf>

Santos, L. L. (2009). Modelos Hidráulicos-Hidrológicos: Conceptos y aplicaciones, Revista brasileña de geografía física, Recife, Brasil.

Sawicz, K., Wagener, T., Sivapalan, M., Troch, P.A., Carrillo, G., (2011) Catchment classification: empirical analysis of hydrologic similarity based on catchment function in the eastern USA. www.hydrol-earth-syst-sci-discuss.net/8/4495/2011/ doi: 10.5194/hessd-8-4495-2011

SENPLADES (2017) **Plan Nacional para el Buen Vivir 2017-2021**. Secretaría Nacional de Planificación y Desarrollo - Senplades, Quito, Ecuador.

Seoáñez, M. (2001) Tratado de climatología aplicada a la ingeniería medio ambiental: Análisis climático, Uso del análisis climático en los estudios medio ambientales. Ediciones mundo prensa. Madrid-España.

Shilling, F., Sommarstrom, S., Kattelmann, R., Florsheim, J., Washburn, B.,

Keithley, C., y Henly, R. Manual de Evaluación de la Cuenca de California.

Recuperado de: <http://cwam.ucdavis.edu/pdfs/GWLF.pdf>

Silva, G. (1998). Hidrología Básica. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Sokolov, A. y Chapman, T. (1981) Guía internacional de investigación y métodos para el cálculo del balance hídrico UNESCO, París, Francia.

Yurem M. (2010) Leyes, teorías y modelos. Edición, 2. Editorial, Trillas. México D.F. México.

Zubieta R., Getirana, A., Espinoza, J.C., Lavado, W. (2015) Impacts of Satellite-based Precipitation Datasets on RainFall-Runoff Modeling of the western Amazon Basin of Perú and Ecuador, Journal of Hydrology, doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.06.064>

Zuoda, Q., Geling, K., Chunli, Ch., Yu, Q., Ze, X. Yuqiu, W. (2017) Comparison of Swat and GWLF Model Simulation Performance in Humid South and Semi-Arid North of China. Department of Environmental Science and Engineering, Nankai University Binhai College, Tianjin, China

