



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

CARRERA DE INGENIERÍA DE MEDIO AMBIENTE

PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

**“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON SWAT EN LA SUBCUENCA DEL RÍO
PATATE”**

Proyecto de Investigación presentado previo a la obtención del Título
de Ingeniera en Medio Ambiente

AUTORA:

Cintha Gissela Oña Cando

TUTOR:

Ing. Arturo Renán Lara Landázuri Mg.

LATACUNGA-ECUADOR

Febrero - 2018

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

Yo, Cinthya Gissela Oña Cando, declaro ser autor del presente proyecto de investigación: **Modelamiento Hidrológico con SWAT en la Subcuenca del Río Patate**, siendo Mg. Renán Arturo Lara Landázuri, tutor del presente trabajo; y eximo expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además certifico que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo investigativo, don de mi exclusiva responsabilidad.

.....

Cinthya Gissela Oña Cando

Numero de C.I. 055001521-8

CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR

Comparecen a la celebración del presente instrumento de cesión no exclusiva de obra, que celebran de parte **OÑA CANDO CINTHYA GISSELA**, identificado con C.C. N° **055001521-8**, de estado civil **SOLTERO** y con domicilio en Saquisilí, a quien en lo sucesivo se denominarán **LOS CEDENTE**; y, de otra parte, el Ing. MBA. Cristian Fabricio Tinajero Jiménez, en calidad de Rector y por tanto representante legal de la Universidad Técnica de Cotopaxi, con domicilio en la Av. Simón Rodríguez Barrio El Ejido Sector San Felipe, a quien en lo sucesivo se le denominará **LA CESIONARIA** en los términos contenidos en las cláusulas siguientes:

ANTECEDENTES: CLÁUSULA PRIMERA.- LA CEDENTE Es una persona natural estudiante de la carrera de Ingeniería de Medio Ambiente, titular de los derechos patrimoniales y morales sobre el trabajo de grado Proyecto de Investigación la cual se encuentra elaborada según los requerimientos académicos propios de la Facultad según las características que a continuación se detallan:

Historial académico.- (Septiembre 2012- Febrero 2013 hasta Octubre 2017- Marzo 2018).

Aprobación HCA.- 25 de Abril de 2017

Tutor.- M.Sc. Renán Arturo Lara Landázuri

Tema: “**MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON SWAT EN LA SUBCUENCA DEL RÌO PATATE**”

CLÁUSULA SEGUNDA.- LA CESIONARIA es una persona jurídica de derecho público creada por ley, cuya actividad principal está encaminada a la educación superior formando profesionales de tercer y cuarto nivel normada por la legislación ecuatoriana la misma que establece como requisito obligatorio para publicación de trabajos de investigación de grado en su repositorio institucional, hacerlo en formato digital de la presente investigación.

CLÁUSULA TERCERA.- Por el presente contrato, **LA/EL CEDENTE** autoriza a **LA CESIONARIA** a explotar el trabajo de grado en forma exclusiva dentro del territorio de la República del Ecuador.

CLÁUSULA CUARTA.- OBJETO DEL CONTRATO: Por el presente contrato **LA/EL CEDENTE**, transfiere definitivamente a

LA CESIONARIA y en forma exclusiva los siguientes derechos patrimoniales; pudiendo a partir de la firma del contrato, realizar, autorizar o prohibir:

- a) La reproducción parcial del trabajo de grado por medio de su fijación en el soporte informático conocido como repositorio INSTITUCIONAL que se ajuste a ese fin.
- b) La publicación del trabajo de grado.
- c) La traducción, adaptación, arreglo u otra transformación del trabajo de grado con fines académicos y de consulta.
- d) La importación al territorio nacional de copias del trabajo de grado hechas sin autorización del titular del derecho por cualquier medio incluyendo mediante transmisión.
- f) Cualquier otra forma de utilización del trabajo de grado que no está contemplada en la ley como excepción al derecho patrimonial.

CLÁUSULA QUINTA.- El presente contrato se lo realiza a título gratuito por lo que **LA CESIONARIA** no se halla obligada a reconocer pago alguno en igual sentido **LAS CEDENTES** declara que no existe obligación pendiente a su favor.

CLÁUSULA SEXTA.- El presente contrato tendrá una duración indefinida, contados a partir de la firma del presente instrumento por ambas partes.

CLÁUSULA SÉPTIMA.- CLÁUSULA DE EXCLUSIVIDAD.- Por medio del presente contrato, se cede en favor de **LA CESIONARIA** el derecho a explotar la obra en forma exclusiva, dentro del marco establecido en la cláusula cuarta, lo que implica que ninguna otra persona incluyendo **LA/EL CEDENTE** podrá utilizarla.

CLÁUSULA OCTAVA.- LICENCIA A FAVOR DE TERCEROS.- LA CESIONARIA podrá licenciar la investigación a terceras personas siempre que cuente con el consentimiento de **LA/EL CEDENTE** en forma escrita.

CLÁUSULA NOVENA.- El incumplimiento de la obligación asumida por las partes en las cláusula cuarta, constituirá causal de resolución del presente contrato. En consecuencia, la

resolución se producirá de pleno derecho cuando una de las partes comunique, por carta notarial, a la otra que quiere valerse de esta cláusula.

CLÁUSULA DÉCIMA.- En todo lo no previsto por las partes en el presente contrato, ambas se someten a lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, Código Civil y demás del sistema jurídico que resulten aplicables.

CLÁUSULA UNDÉCIMA.- Las controversias que pudieran suscitarse en torno al presente contrato, serán sometidas a mediación, mediante el Centro de Mediación del Consejo de la Judicatura en la ciudad de Latacunga. La resolución adoptada será definitiva e inapelable, así como de obligatorio cumplimiento y ejecución para las partes y, en su caso, para la sociedad. El costo de tasas judiciales por tal concepto será cubierto por parte del estudiante que lo solicitare.

En señal de conformidad las partes suscriben este documento en dos ejemplares de igual valor y tenor en la ciudad de Latacunga, el 01 del mes de agosto de 2017.

Cinthy Gissela Oña Cando

Ing. MBA. Cristian Tinajero Jiménez

EL CEDENTE

EL CESIONARIO

AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN

En calidad de Director del Trabajo de Investigación sobre el tema:

“MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON SWAT EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PATATE”, de **OÑA CANDO CINTHYA GISSELA**, con C.C. 055001521-8 de la carrera de **INGENIERÍA DE MEDIO AMBIENTE**, considero que dicho Informe Investigativo cumple con los requerimientos metodológicos y aportes científico-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyecto que el Honorable Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, Marzo de 2018

Firma

.....
TUTOR DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Ing. Renán Arturo Lara Landázuri

C.C. 040048801-1

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Miembros del Tribunal de Lectores aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad Académica de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales, por cuanto el postulante: **CINTHYA GISSELA OÑA CANDO** con C.C. 055001521-8, Con la tesis cuyo título “**MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON SWAT EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PATATE**”, ha considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes al Acto de Sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, Marzo de 2018

Para constancia firman:

.....
LECTOR 1

Ing. Mercy Ilbay Mg.
C.C. 060414790-0

.....
LECTOR 2

Ing. Juan Espinosa Mg.
C.C. 171347432-6

.....
LECTOR 3

Ing. Vinicio Mogro
C.C. 050165751-4

AGRADECIMIENTO

Al culminar mi proyecto con éxito quiero expresar un agradecimiento a mi tutor y lectores que fueron una base primordial y por su valioso aporte.

A mi madre por su amor, apoyo y confianza por su constancia en brindarme su apoyo incondicional.

A mi familia por el apoyo incondicional que he recibido durante mi etapa estudiantil.

A mi madre Magdalena Oña quien ha sido mi pilar fundamental para lograr cumplir una de mis mayores metas, quien siempre ha estado para darme ánimos.

A mis amigas y amigos quienes me han demostrado lealtad y una amistad de forma incondicional y desinteresada.

DEDICATORIA

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

FACULTAD DE CIENCIAS AGROPECUARIAS Y RECURSOS NATURALES

TITULO: “MODELAMIENTO HIDROLÓGICO CON SWAT EN LA SUBCUENCA DEL RÍO PATATE”

Autor: Cinthya Gissela Oña Cando

RESUMEN

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) es un modelo hidrológico semidistribuido, que considera condiciones climáticas y características físicas de la subcuenca del Río Patate (SbRP) como: propiedades del suelo, topografía, cobertura vegetal y uso de la tierra. En esta investigación se evaluó el modelamiento hidrológico con SWAT en la SbRP. Para el estudio se consideraron 7 estaciones meteorológicas que se encuentran en el interior de la cuenca para las variables temperatura y precipitación, y una estación hidrológica (H817) para el caudal. 20 años fueron analizados: 14 años (1995-2008) para la validación y 6 años (2009-2014) para la calibración. La eficiencia de la simulación del caudal en la SbRP fue evaluada por el coeficiente de Nash- Sutcliffe. Los resultados determinaron 960 unidades hidrológicas de respuesta (HRU). El 70% de la cuenca posee un tipo de suelo que se dedica a la agricultura, el 10% al pastoreo, el 7% corresponde al área urbana, 5% son área de bosque, el 5% posee cuerpos de agua y 0.2% sin uso agropecuario. Mediante el Modelo de Elevación Digital (DEM) se determinó 5 clases de pendiente, siendo las más representativas la pendiente regular ondulada. El coeficiente de Nash- Sutcliffe fue de 0.32 para la etapa de calibración y 0.35 para la etapa de validación. La simulación en la SbRP bajo el modelo fue satisfactoria. Sin embargo, la modelación con WEAP (Water Evaluation and Planning System) presentó un coeficiente de Nash- Sutcliffe de 0.77 para

la etapa de calibración y 0.80 para la etapa de validación. La simulación de caudales para el período 1995-2014 bajo el modelo de WEAP es excelente para la SbRP.

Palabras clave: SWAT, WEAP, calibración, validación, modelación.

TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI

FACULTY OF AGRICULTURAL SCIENCE AND NATURAL RESOURCES

TITLE: "HYDROLOGICAL MODELING WITH SWAT IN THE SUBCUENCA OF THE RIVER PATATE"

Author: Cinthya Gissela Oña Cando

ABSTRACT

SWAT (Soil and Water Assessment Tool) is a semi-distributed hydrological model that considers the climatic conditions and physical characteristics of the Patate River sub-cuenca (SbRP) like: soil properties, topography, vegetation cover and land use. In this research, hydrological modeling with SWAT was evaluated in the SbRP. For the study, 7 meteorological stations were considered that are inside the cuenca for the temperature and precipitation variables and a hydrological station (H817) for the flow. 20 years were analyzed: 14 years (1995-2008) for validation and 6 years (2009-2014) for calibration. The efficiency of the flow simulation in the SbRP was evaluated by the Nash-Sutcliffe coefficient. The results determined 960 response hydrological units (HRU). 70% of the cuenca has a type of land that is dedicated to agriculture, 10% under grass, 7% corresponds to the urban area, 5% are forest area, 5% has water bodies and 0.2% unused agricultural. Through the DEM, 5 slope classes were determined, the representative slope being regular, undulating. The Nash-Sutcliffe coefficient was 0.32 for the calibration stage and 0.35 for the validation stage. The simulation in the SbRP under the model was satisfactory. However, modeling with WEAP (Water Evaluation and Planning System) presented a Nash-Sutcliffe coefficient of 0.77 for the calibration stage and 0.80 for the validation stage. The simulation of flows for the period 1995-2014 under the WEAP model is

Keywords: SWAT, WEAP, calibration, validation, modeling.

ÍNDICE

DECLARACIÓN DE AUTORÍA	ii
CONTRATO DE CESIÓN NO EXCLUSIVA DE DERECHOS DE AUTOR.....	iii
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN	vi
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	vii
AGRADECIMIENTO	viii
DEDICATORIA.....	ix
RESUMEN	x
1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO.....	2
2. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO	3
3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
4. OBJETIVOS:	5
5.1. OBJETIVO GENERAL:.....	5
5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:	5
6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:.....	6
7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA	7
7.1. Ciclo Hidrológico	7
7.1.1. Precipitación.....	7
7.1.2. Evapotranspiración.....	7
7.1.3. Infiltración y Percolación	7
7.1.4. Flujo Lateral	8
7.2. Escorrentía	8

7.2.1.	Tipos de escorrentía.....	8
7.2.2.	Escorrentía superficial o directa	8
7.2.3.	Escorrentía hipodérmica o subsuperficial.....	8
7.2.4.	Escorrentía subterránea.....	9
7.3.	Cuenca Hidrográfica	9
7.3.1.	Subcuenca.....	9
7.3.2.	Microcuenca	9
7.4.	Componentes de una cuenca hidrográfica	10
7.4.1.	Biológicos.....	10
7.4.2.	Físicos.....	10
7.4.3.	Socioeconómicos	10
7.5.	Parámetros morfométricos	10
7.5.1.	Área	10
7.5.2.	Cuenca grande	11
7.5.3.	Cuenca pequeña.....	11
7.5.4.	Longitud, perímetro y ancho.	11
7.6.	Modelo de Elevación Digital (DEM).....	11
7.7.	Suelo	12
7.8.	Calibración.....	12
7.9.	Validación.....	12
7.10.	Método por vector regional	13
7.11.	Coeficiente de NASH-SUTCLIFFE	13
7.12.	Coeficiente De Determinación (R2).....	14
7.13.	Clasificación de los modelos:.....	14
7.13.1.	Modelos Concentrados	15
7.13.2.	Modelos Distribuidos	15
7.13.3.	Modelos semidistribuidos.....	15

7.13.4.	MIKE – BASIN / MIKESHE	15
7.13.5.	TOP MODEL	15
7.13.6.	MODELO VHM.....	16
7.13.7.	WEAP.....	16
7.13.8.	SWAT.....	17
8.	PREGUNTA CIENTÍFICA	18
9.	METODOLOGÍA	19
9.1.	MODALIDAD BÁSICA DE INVESTIGACIÓN.....	20
9.1.1.	Aplicada.....	20
9.1.2.	Numérica	20
9.1.3.	Bibliográfica Documental	20
9.2.	TIPO DE INVESTIGACIÓN	20
9.2.1.	No experimental	20
9.2.2.	Exploratoria	20
9.2.3.	Cuantitativa.....	21
9.3.	Selección del lugar de estudio	21
9.3.1.	Área de estudio	21
9.4.	Información hidrometeorológica	22
9.5.	Recopilación de datos	23
9.6.	Metodología.....	24
9.7.	Completación de datos	24
9.7.1.	Media Aritmética.....	24
9.7.2.	Método del Vector regional.....	24
9.8.	Procesamiento de la información para Swat.....	24
9.8.2.	Delimitación de la Cuenca (Watershed Delineator).....	24
9.8.3.	Uso de Suelos/Cobertura Vegetal.....	25
9.8.4.	Tipo de Suelo	26

9.8.5.	Pendiente	26
9.8.6.	Calibración y Validación.....	26
9.9.	Los parámetros de Caudal.....	28
9.10.	Procedimiento para Weap	29
9.10.1.	Definición de bandas de elevación	29
9.10.2.	Unidades	29
9.10.3.	Índice de área foliar (LAI).....	30
9.10.4.	Zona radicular de conductividad (Ks)	30
9.10.5.	Valores del coeficiente de cultivo Kc.....	31
9.11.	Análisis de consistencia para WEAP	31
9.12.	Calibración del modelo	32
10.	ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.....	32
10.1.	Modelo SWAT	32
10.1.1.	Uso de suelo	32
10.1.2.	Tipo de suelo	33
10.1.3.	Pendiente	34
10.1.4.	Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU)	35
10.1.5.	Calibraciones y validaciones	36
10.1.6.	Calibración	38
10.1.7.	Validación.....	38
10.2.	MODELO WEAP	40
10.2.1.	Calibración y validación.....	40
10.3.	Comparación con SWAT Y WEAP	43
11.	IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS):.....	46
12.	PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO	47
13.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	48
14.	BIBLIOGRAFÍA.....	49

15. ANEXOS	52
------------------	----

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Beneficiarios Directos	3
Tabla 2. Beneficiarios indirectos	3
Tabla 3. Objetivos y Actividades.....	6
Tabla 4. Valores de ajuste del Coeficiente de NASH-SUTCLIFFE	14
Tabla 5. Características de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la Subcuenca del río Patate, periodo 1995-2014	23
Tabla 6. Clasificación de SWAT	25
Tabla 7. Clasificación según la (USDA, 2014)	26
Tabla 8. Parámetros de caudal calibrados automáticamente	27
Tabla 9. Catchemts de ingreso para el modelo	29
Tabla 10. Valores de LAI	30
Tabla 11. Valores de Ks	30
Tabla 12. Valores de Kc	31
Tabla 13. Caudales anuales.....	31
Tabla 14. Resultados del uso del suelo	32
Tabla 15. Resultados del tipo de suelo	33
Tabla 16. Resultados del rango de la pendiente	34

Tabla 17. Tabla de los índices de evaluación para estimación de caudales con SWAT, fase de calibración y validación.....	37
Tabla 18. Parámetros utilizados para calibración y validación	37
Tabla 19. Tabla de los índices de evaluación para estimación de caudales con WEAP, fase de calibración y validación.....	40
Tabla 20. Criterios de eficiencia para los modelos WEAP Y SWAT	43

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fases del proyecto	19
Figura 2: Ubicación de de subcuenca del río Patate: a) Distribución de la precipitación, periodo 1995-2014.....	21
Figura 3: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológica.....	22
Figura 4: Uso de suelo.....	33
Figura 5: Tipo de suelo	34
Figura 6: Rango de la pendiente.....	35
Figura 7: HRU.....	35
Figura 8: Proceso hidrológico simulado con SWAT (a) periodo de calibración (1995-2008)	38
Figura 9. Proceso hidrológico simulado con SWAT (b) periodo de validación (2009-2014)	39
Figura 10. Calibración y validación del modelo SWAT para la SbRP con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el periodo 1995-2008 y b) hidrograma de validación para el periodo 2009-2014	39
Figura 11. Calibración y validación del modelo WEAP para la SbRP con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el periodo 1995-2008 y b) hidrograma de validación para el periodo 2009-2014	41
Figura 12. Diagrama de dispersión entre las series simuladas y observadas para el periodo 1995-2014.....	42
Figura 13. Calibración y validación de lo modelo SWAT y WEAP para la SRP. (a) hidrograma para el periodo de calibración (1994-2008) con caudales observados y simulados. (b)	

hidrograma para el periodo de validación (2009- 2014) con caudales observados y simulados	44
Figura 14. Hidrograma de caudales mensuales observado vs simulado para el periodo 1995-2014.	45

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Índices mensual y anual del Vector y de las estaciones (BrunetMoret).....	52
Anexo 2: Modelo Hidrológico WEAP	55
Anexo 3: Hoja de vida	56

INFORMACIÓN GENERAL

Título del proyecto:

Modelamiento hidrológico con SWAT en la Subcuenca del Río Patate

Fecha de inicio:

Abril 2017

Fecha de finalización:

Marzo 2018

Lugar de ejecución:

Subcuenca del Río Patate

Faculta que auspicia:

Facultad de Ciencias Agropecuarias y Recursos Naturales

Carrera que auspicia:

Ingeniería de Medio Ambiente

Proyecto de vinculación:

Cuencas Hídricas

Equipos de trabajo:

Coordinador: Cinthya Gissela Oña Cando

Tutor: M.Sc. Renán Arturo Lara Landázuri

Lector 1: M.Sc. Mercy Lucila Ilbay Yupa

Lector 2: M.Sc. Juan Miguel Espinosa Soto

Lector 3: M.Sc. Yenso Vinicio Mogro Cepeda

Área de conocimiento:

UNESCO: Área de Servicio: Protección del Medio Ambiente y Seguridad

Línea de investigación:

- Tecnologías de la Información (TICS) y Diseño Gráfico.

Sub líneas de investigación de la carrera:

- Educación Ambiental
- Salud, Seguridad y Ambiente

1. JUSTIFICACIÓN DEL PROYECTO

El problema en la subcuenca se define a que no existe información pluviométrica completa, por lo que no se ha podido realizar un modelamiento de escurrimiento de agua, por lo tanto no se ha podido realizar la gestión territorial, planificación de desarrollo y generar las medidas de mitigación de riesgos. Este tipo de modelamiento requiere una gran cantidad de información física y climatológica, técnico que son fundamentales para la toma de decisiones por parte de los GADs. Los municipios del área necesitan cumplir con la Ley y planificar su desarrollo territorial, por lo tanto este tipo de estudios ayudara para que los habitantes puedan estar preparados ante efectos naturales catastróficos como inundaciones.

Los aportes que se van a generar con los resultados de esta investigación son conocer la metodología para el modelamiento hidrológico, la información geoespacial con datos reales, para planificación y conservación de los recursos hídricos.

Esta investigación va a beneficiar directa e indirectamente a todos los habitantes de la provincia de Cotopaxi y Tungurahua. Los beneficiarios primarios son todos los niveles de gobierno (parroquial, municipal y provincial) y los secundarios son los habitantes. Este estudio aporta resultados confiables y la facilidad de conocer los datos en toda la provincia. Además permitirá identificar en que época existen caudales máximos y mínimos durante el año, de igual manera puede servir como una guía metodológica para estudios que se realicen en otras provincias del Ecuador.

Este trabajo también tiene un impacto científico porque se van a generar nuevos modelos de procesamiento y uso de información a incorporarse en la formación de los técnicos ambientales. La utilidad práctica es que se pueden complementar los informes que produce el INAMHI, los mismos que muchas veces no son puntuales y se basan en procesos de simulación poco estandarizados.

2. BENEFICIARIOS DEL PROYECTO

Tabla 1. Beneficiarios Directos

Provincia	Cantón	Entidades	
Cotopaxi	Latacunga	GAD Provincial	Secretaria de Agua (SENAGUA) Juntas de agua
	Salcedo		
Tungurahua	Patate	GAD Municipal	
	Pelileo	GAD Parroquial Consejo Provincia	
	Pillaro		
	Quisapincha		

Elaborado por: Oña, C (2018)

Tabla 2. Beneficiarios indirectos

Provincia	Hombres	Mujeres	Total	
Ambato	159.830	179.026	329.856	
Latacunga	82.301	88.188	170.489	
Patate	6.720	6.777	13.497	
			TOTAL	513.842

Fuente: INEC, 2010

Elaborado por: Oña, C (2018)

3. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.

En el Ecuador, debido a la falta de información hidrometeorológica, las investigaciones acerca del funcionamiento hidrológico de los ecosistemas son todavía escasas. No se dispone de estudios específicos que sirvan de medio de consulta para conocer la variabilidad espacial y temporal del clima. Los impactos hidrológicos del cambio de uso y cobertura vegetal afectan a varios componentes del ciclo hidrológico incluyendo la evapotranspiración, infiltración y escorrentía superficial.

Las consecuencias hidrológicas pueden ser devastadoras, puesto que las cuencas no son capaces de controlar eventos máximos de precipitaciones y las posibles consecuencias pueden ser daños en la infraestructura humana e inundaciones. Por otro lado, en épocas de verano, la escasez de agua puede ser más peligrosa para el caudal mínimo o ecológico puede generar problemas sociales profundos. La ausencia de metodologías para la obtención y manejo de información de escorrentía es un gran problema no solo en esta cuenca sino en todo el país.

A través del presente estudio se analizará el mapa de escorrentía en la subcuenca del Río Patate. El modelo SWAT es una herramienta que permite realizar escenarios de los impactos al ambiente que se darían a lo largo del tiempo en una subcuenca debido a las alteraciones de múltiples variables como el suelo, manejo el agua, etc.

No existe una base de datos de escorrentía a nivel nacional, peor aún a nivel regional, es por ello que la determinación de los caudales máximos es un problema relevante. En muchos casos. Estos estudios hidrológicos se realizan sin registros pluviométricos. Una correcta determinación del coeficiente de escorrentía constituye una ventaja significativa para realizar una correcta simulación de ocurrencia de eventos futuros, drenajes, entre otros.

Los datos del clima son fundamentales para el diseño, operación y mantenimiento de proyectos de aprovechamiento y control de agua, para la toma de medidas preventivas ante la ocurrencia de eventos extremos. El problema en la subcuenca se define a que no existe un modelamiento de escurrimiento, debido a que no existe información pluviométrica completa.

4. OBJETIVOS:

5.1. OBJETIVO GENERAL:

- * Realizar el modelamiento hidrológico con SWAT de la subcuenca del Río Patate.

5.2. OBJETIVOS ESPECIFICOS:

- Construir una base de datos para el modelamiento hidrológico.
- Calibración y validación del modelo SWAT para la subcuenca del Río Patate.
- Comparación de SWAT con WEAP en la subcuenca del Río Patate.

6. ACTIVIDADES Y SISTEMA DE TAREAS EN RELACIÓN A LOS OBJETIVOS PLANTEADOS:

Tabla 3. Objetivos y Actividades

Objetivo 1	Actividad(tareas)	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Construir una base de datos para el modelamiento hidrológico.	<ul style="list-style-type: none"> * Delimitación de la subcuenca alta del Río Patate. * Selección de estaciones dentro de la zona de estudio * Análisis exploratorio de datos. * Mapas de capas de Cobertura vegetal, tipo de suelos 	Base de datos lista para ingresar en el programa	<p>TÉCNICA:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Selección de la estación que se encuentran en la zona de estudio 2. Técnica del análisis espacial con la herramienta hydrology del programa ArcGis 3. Bases de datos (temperatura, precipitación y caudales) 4. Completación de datos por el método de regresión lineal y hydraccess. 5. Modelo de Elevación Digital (DEM) 6. Cobertura Vegetal 7. Tipo de suelo(FAO) 8. Extracción de capas <p>EQUIPO:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Computadora <p>SOFTWARE</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ SWAT ▪ ARC GISS ▪ Hydraccess
Objetivo 2	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Calibración y validación del modelo SWAT para la subcuenca del Río Patate.	<ul style="list-style-type: none"> * Implementación * Calibración y validación del modelo hidrológico 	Modelo hidrológico	<p>TÉCNICA:</p> <p>SWAT</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ajuste del modelo a los datos observados 2. CFRS World 3. CFRS (Climate Forecast System Reanalysis), 1995-2014 4. SWAT CUP <p>WEAP</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Ingresar datos meteorológicos (temperatura, precipitación y humedad relativa) 2. Altura de las estaciones base 3. Cobertura vegetal 4. Coeficiente de cultivo 5. Tipo de suelo 6. Factor de la resistencia a la escorrentía 7. Factor de temperatura 8. Medidor de Caudal <p>EQUIPO:</p> <p>Computadora</p> <p>SOFTWARE</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. SWAT 2. WEAP
Objetivo 3	Actividad	Resultado de la actividad	Descripción de la actividad (técnicas e instrumentos)
Comparación de SWAT con WEAP en la subcuenca del Río Patate.	<ul style="list-style-type: none"> * Analizar los resultados de cada modelo 	Gráfico de la comparación de datos	<p>TÉCNICA:</p> <ol style="list-style-type: none"> 1. Grafica de caudales <p>EQUIPO:</p> <ul style="list-style-type: none"> ▪ Computadora

Elaborado por: Oña, C (2018)

7. FUNDAMENTACIÓN CIENTÍFICO TÉCNICA

7.1. Ciclo Hidrológico

Se describe al ciclo hidrológico como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). El ciclo hidrológico es completamente irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el ser humano. Una muestra de ello son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua para las diferentes actividades, otros periodos de sequías y otros de inundaciones. (Morán, 1996)

El ciclo hidrológico está conformado por los siguientes componentes:

7.1.1. Precipitación

Desde el punto de vista hidrológico, la precipitación es la fuente primaria del agua de la superficie terrestre; sus mediciones y análisis forman el punto de partida de los estudios concernientes al uso y control del agua. No toda el agua precipitada llega a la superficie de forma directa, hay una parte de ella que es interceptada en su trayecto; esta intercepción la realizan las plantas, por lo que se puede diferenciar dos términos, la precipitación incidente y la precipitación neta. (Barrionuevo, 2009)

7.1.2. Evapotranspiración

Es el resultado del proceso en donde el agua cambia de estado líquido a gaseoso directamente (evaporación) y a través de la actividad metabólica de las plantas y animales (transpiración). Esta humedad es transferida de regreso a la atmósfera en forma de vapor. Es pues la suma de la evaporación y de la transpiración y es mayor cuanto más densa sea la cobertura de vegetación por unidad de área. (Zuleta, 2013)

7.1.3. Infiltración y Percolación

La infiltración es el paso del agua a través de la superficie del suelo hacia el interior de la tierra; mientras que la percolación es el movimiento del agua dentro del suelo, ambos fenómenos, están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda. (Morán, 1996)

7.1.4. Flujo Lateral

El flujo lateral es el agua que se mueve por debajo de la superficie del suelo y sobre el nivel de los acuíferos, la cual fluye subsuperficialmente y alimenta los canales de drenaje, ríos, lagos. El flujo subsuperficial lateral es calculado simultáneamente con la percolación para el perfil del suelo entre (0-2m) mediante un modelo de almacenamiento cinético, que usa la ecuación de conservación de la masa con el perfil entero del suelo como el volumen de control. El balance hidrológico es la cuantificación de las componentes del ciclo hidrológico en las cuencas hidrográficas o de cuerpos de agua subterráneas. Su propósito es determinar los principales flujos hídricos en las cuencas. (Jiménez, Benegas, & Cervantes, 2009)

7.2. Escorrentía

La escorrentía es el agua generada por una cuenca en la forma de flujo superficial y por tanto constituye la forma más disponible del recurso. El estudio de la escorrentía reviste gran importancia en la planificación de recursos hídricos y en diseño de obras. En manejo de cuencas es muy importante puesto que ella es un reflejo del comportamiento y estado de una cuenca. (Ibáñez, 2015)

7.2.1. Tipos de escorrentía

- a. Escorrentía Superficial o Directa
- b. Escorrentía Hipodérmica o Subsuperficial
- c. Escorrentía Subterránea. (Hidología, 2015)

7.2.2. Escorrentía superficial o directa

Es la precipitación que no se infiltra en ningún momento y llega a la red de drenaje moviéndose sobre la superficie del terreno por la acción de la gravedad, corresponde a la precipitación que no queda tampoco detenida en las depresiones del suelo, y que escapa a los fenómenos de evapotranspiración. El proceso que describe el agua cuando se inicia un aguacero depende de las características del terreno: la primera lluvia caída se invierte en llenar la capacidad de retención de la parte aérea de las plantas y en saturar el suelo. (Hidología, 2015)

7.2.3. Escorrentía hipodérmica o subsuperficial

Es el agua de precipitación que, habiéndose infiltrado en el suelo, se mueve subhorizontalmente por los horizontes superiores para reaparecer súbitamente al aire libre como manantial e incorporarse a microsurcos superficiales que la conducirán a la red de drenaje. (Hidología, 2015)

7.2.4. Escorrentía subterránea

La escorrentía subterránea llamada también como escorrentía base, se forma con la unión de las partículas del agua precipitada que penetra a través de los poros y fisuras de las rocas del subsuelo, este proceso es conocido como infiltración, el agua que se infiltra se realizará con una velocidad pequeña o lenta. Parte del agua infiltrada recarga las zonas saturadas y a su vez esta agua circulará por los acuíferos, y será colectada finalmente por los ríos, lagos o mar. (Hidraulica, 2016)

7.3. Cuenca Hidrográfica

Se define como una unidad territorial en la cual el agua que cae por precipitación se reúne y escurre a un punto común o que fluye toda al mismo río, lago, o mar. En esta área viven seres humanos, animales y plantas, todos ellos relacionados. También se define como una unidad fisiográfica conformada por la reunión de un sistema de cursos de ríos de agua definidos por el relieve. En la cuenca hidrográfica, se distinguen por lo general tres sectores característicos: Alto, Medio y Bajo, los cuales en función a las características topográficas del medio pueden influir en sus procesos hidrometeorológicos y en el uso de sus recursos. (Ordoñez, 2011)

7.3.1. Subcuenca

Conjunto de microcuencas que drenan a un solo cauce con caudal fluctuante pero permanente. (Ordoñez, 2011)

7.3.2. Microcuenca

Una micro cuenca es toda área en la que su drenaje va a dar al cauce principal de una Subcuenca; es decir, que una Subcuenca está dividida en varias microcuencas. (Ordoñez, 2011)

7.4. Componentes de una cuenca hidrográfica

Según el autor (Lux, 2016), los componentes de una cuenca se clasifican en:

7.4.1. Biológicos

Los bosques, los cultivos y en general los vegetales conforman la flora, constituyendo junto con la fauna el componente biológico.

7.4.2. Físicos

El agua, el suelo, el subsuelo, la temperatura y el aire constituyen el componente físico de la cuenca.

7.4.3. Socioeconómicos

Son las comunidades que habitan en la cuenca, las que aprovechan y transforman los recursos naturales para su beneficio, construyen obras de infraestructura, de servicio y de producción, los cuales elevan nivel de vida de estos habitantes.

7.5. Parámetros morfométricos

Las características físicas de una cuenca tienen una relación estrecha con el comportamiento de los caudales que transitan por ella. Generalmente se dispone de poca información cartográfica, esto hace que el encontrar esa relación no sea fácil y que por lo tanto su uso en estudios hidrológicos sea limitado. Por otra parte no se puede garantizar que toda la información morfométrica de las cuencas utilizadas para el estudio se pueda obtener en una misma escala, lo cual aumenta el grado de incertidumbre sobre la confiabilidad de los parámetros.

7.5.1. Área

Es el tamaño de la superficie de cada cuenca en km^2 . Se obtiene automáticamente a partir de la digitalización y poligonización de las cuencas en un programa de sistemas de información

geográfica. El área de una cuenca en general, se encuentra relacionada con los procesos que en ella ocurren. También se ha comprobado que la relación del área con la longitud de la misma es proporcional y también que esta inversamente relacionada a aspectos como la densidad de drenaje y el relieve relativo. Una cuenca se puede clasificar atendiendo a su tamaño, en cuenca grande y cuenca pequeña. (Villon, 2002)

7.5.2. Cuenca grande

Es aquella cuenca en la que predominan las características fisiográficas de la misma (pendiente, elevación, área, cauce). Una cuenca, para fines prácticos, se considera grande, cuando el área es mayor de 250 km^2 . (Villon, 2002)

7.5.3. Cuenca pequeña

Es aquella cuenca que responde a las lluvias de fuerte intensidad y pequeña duración, y en la cual las características físicas (tipo de suelo, vegetación) son más importantes que las del cauce. Se considera cuenca pequeña aquella cuya área varía desde unas pocas hectáreas hasta un límite, que para propósitos prácticos, se considera 250 km^2 . (Villon, 2002)

7.5.4. Longitud, perímetro y ancho.

La longitud, L , de la cuenca puede estar definida como la distancia horizontal del río principal entre un punto aguas abajo (estación de aforo) y otro punto aguas arriba donde la tendencia general del río principal corte la línea de contorno de la cuenca.

El perímetro de la cuenca o la longitud de la línea de divorcio de la hoya es un parámetro importante, pues en conexión con el área nos puede decir algo sobre la forma de la cuenca. Usualmente este parámetro físico es simbolizado por la letra mayúscula.

El ancho se define como la relación entre el área (A) y la longitud de la cuenca (L) y se designa por la letra W . (Villon, 2002)

7.6. Modelo de Elevación Digital (DEM)

Un modelo digital de elevación es una representación visual y matemática de los valores de altura con respecto al nivel medio del mar, que permite caracterizar las formas del relieve y los

elementos u objetos presentes en el mismo. Estos valores están contenidos en un archivo de tipo ráster con estructura regular, el cual se genera utilizando un equipo de cómputo y un software especializados. (INEGI, 2017)

En los modelos digitales de elevación existen dos cualidades esenciales que son la exactitud y la resolución horizontal o grado de detalle digital de representación en formato digital. Estas características varían dependiendo del método que se emplea para generarlos y para el caso de los que son generados con tecnología LIDAR se obtienen modelos de alta resolución y gran exactitud (valores submétricos). (INEGI, 2017)

7.7. Suelo

Como otras palabras comunes la palabra suelo tiene varios significados. Su significado tradicional se define como el medio natural para el crecimiento de las plantas. También se ha definido como un cuerpo natural que consiste en capas de (horizontes del suelo) compuestas de materiales de minerales meteorizados, materia orgánica, aire y agua. El suelo es el producto final de la influencia del tiempo y combinado con el clima, topografía, organismos (flora, fauna y ser humano), de materiales parentales (rocas y minerales originarios). Como resultado el suelo difiere de su material parental en su textura, estructura, consistencia, color y propiedades químicas, biológicas y físicas. (FAO, 2018)

7.8. Calibración

La calibración es importante para determinar la representatividad de los caudales con los datos históricos. No importa lo complejo y avanzado que sea un modelo, la incertidumbre siempre se da en las diferentes fases de la modelación. (Mantovan & Todini, 2006) La calibración puede resultar incoherente y compleja, ya sea por falta de información de las entradas y salidas del balance hídrico, como también por el poco conocimiento que se tengan de las características físicas de la cuenca. (Duan, Gupta, & Sorooshian, 1993) Por ello, es importante ser imparcial con la información disponible, esto permite al evaluador actuar con ética y mantener sus posiciones e intereses personales al margen. (Reitsma, Zigurs, Lewis, & Wilson, 1996)

7.9. Validación

La validación de un modelo como “el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración” según (Knudsen, 1996). De esta manera, se dice que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el período de validación muestran errores o límites aceptables. Como se menciona, la validación de un modelo se hace para un lugar determinado pues es imposible, realizar una validación generalizada (así como es imposible realizar una calibración generalizada). Usualmente, la validez de un modelo para un período diferente al de calibración se asume como verdadera considerando condiciones futura similares a las actuales. Estas asunciones son válidas para casos simples como la completación de datos pues el período desconocido se encuentra “dentro del período calibrado y las características pueden asumirse iguales, pero este no es el caso general. (Knudsen, 1996)

7.10. Método por vector regional

Es un método de cálculo orientado a tres tareas definidas: la crítica de datos, la homogenización y la extensión-completación de datos de precipitación. El vector regional elabora una estación ficticia (vector) que sea una “especie de promedio” de todas las estaciones de la zona. El vector se calcula bajo el concepto de precipitación media extendida, salvando los problemas del peso de las estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas. (Espinoza, 2015). Se calcula mediante el concepto de precipitación media, para evitando problemas de las estaciones más lluviosas sobre las menos lluviosas. Empleando el método de mínimos cuadrados para encontrar los índices pluviométricos regionales anuales Z_i y la precipitación media extendida P_j , esto se logra al minimizar la siguiente expresión

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^M \left(\frac{P_{ij}}{P_i} - Z_i \right)^2$$

Donde; i es el índice del año, j es el índice de la estación, N es el número de años, M es el número de estaciones. P_{ij} es la precipitación anual en la estación j el año i , P_j es la precipitación media extendida al período de N años y finalmente Z_i es el índice pluviométrico regional del año i . Se ejecutó este método mediante HYDRACCES. (Vauchel & Ilbay, 2017)

7.11. Coeficiente de NASH-SUTCLIFFE

Para reducir el problema de las diferencias cuadráticas y la sensibilidad resultante en valores extremos por el NSE se calculó el coeficiente de Nash-Sutcliffe, empleando valores

logarítmicos del caudal observado y del caudal simulado, como resultado la influencia de caudales bajos incrementa los errores y hace más sensible a la medida del criterio estadístico. (Cabrera, 2012)

$$\log NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\log Q_{oi}) - \log(QS_i))^2}{\sum_{i=1}^n (\log Q_{oi}) - \log(QS)^2}$$

Mide cuánto de la variabilidad de las observaciones es explicada por la simulación. Si la simulación es perfecta, E=1; si se intentase ajustar las observaciones con el valor promedio, entonces E=0. Algunos valores sugeridos para la toma de decisiones son resumidos en la siguiente tabla. (Cabrera, 2012)

Tabla 4. Valores de ajuste del Coeficiente de NASH-SUTCLIFFE

E	AJUSTE
<0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy Bueno
>0.8	Excelente

Fuente: (Cabrera, 2012)

Elaborado: Oña, C (2018)

7.12. Coeficiente De Determinación (R²)

El coeficiente de determinación R² varía entre 0 y 1, es mejor mientras está más cercano a 1. Se usa como una medida de dispersión del modelo. Este coeficiente puede interpretarse como la proporción de varianza representada por los valores calculados con el modelo respecto a los valores observados. Cov (Q_o, Q_s) es la covarianza entre los valores observados y los calculados, Sd(Q_o) es la desviación típica de valores observados y Sd (Q_s) es la desviación típica de los valores calculados. (Mena, 2010)

7.13. Clasificación de los modelos:

Según Bladé (2014), los modelos se clasifican en:

7.13.1. Modelos Concentrados

Sólo pueden evaluar la respuesta de la cuenca en el punto de salida de la misma, sin tener en cuenta la respuesta de las subcuencas de forma individual.

7.13.2. Modelos Distribuidos

Permiten la evaluación de la respuesta tanto de la cuenca en conjunto como de las subcuencas de manera individual, pudiendo así mismo obtener la respuesta en cualquier punto de la cuenca.

7.13.3. Modelos semidistribuidos

Consiste en la división de la cuenca en un conjunto de subcuencas, con parámetros y características uniformes y conectadas entre sí, mediante un modelo agregado.

Ejemplos de modelo

En este contexto se pueden utilizar diferentes técnicas de modelación las mismas que se caracterizan de acuerdo con la conceptualización de los procesos.

7.13.4. MIKE – BASIN / MIKESHE

Es una poderosa base física, de parámetros distribuidos, totalmente integrado para la simulación en tres dimensiones de los sistemas hidrológicos. Se ha aplicado con éxito en múltiples escalas, utilizando datos climáticos distribuidos espacialmente y continuos para simular una amplia gama de los procesos hidrológicos integrados, hidráulicos y los problemas de transporte en lugares húmedos, así como en las zonas más áridas. (Cacoango, 2014)

7.13.5. TOP MODEL

Es una herramienta de modelización semi-distribuida y basada en procesos físicos que se fundamenta en el concepto del índice topográfico $\ln(a/\tan b)$, donde a es el área de drenaje hacia este punto de la cuenca y b la pendiente del terreno. Es una indicación de la susceptibilidad

de ciertos puntos de la cuenca a saturarse completamente y por ello puede ser visto como un índice de similaridad hidrológica. (Fernández, 2008)

7.13.6. MODELO VHM

VHM es un modelo de precipitación-escorrentía, el cual es semiconceptual (caja gris), continuo, y semidistribuido. Utiliza datos como datos de entrada una lista única de precipitación, datos de evapotranspiración y, caudal para calibrar el mismo.

El modelo da como resultados caudales que deberán ser interpretados por el usuario y ajustados a la manera deseada solamente mediante observación. Tiene como herramienta el subprograma WEST PRO, el mismo que tiene como función la separación de flujos y la selección de picos, tanto del flujo lento como del flujo rápido. (Fernández, 2008)

7.13.7. WEAP

WEAP es un modelo semi-distribuido, el área de estudio total se divide en sub-cuencas adyacentes (catchments). Los datos climáticos (precipitación, temperatura, humedad, viento) se aplican uniformemente dentro de cada subcuenca, las cuales están divididas por el uso/cobertura de suelo. (Ramirez, 2015)

El modelo WEAP, fue creado en 1988 por Jack Sieber, con el patrocinio de Stockholm Environment Institute (SEI). Se trata de un modelo de planeamiento integrado del recurso hídrico, que opera bajo el modelo de balance hídrico y puede ser aplicado a los sistemas agrícolas y municipales, a cuencas pequeñas o grandes. El modelo tiene la capacidad de simular procesos como: lluvia escorrentía, flujo base, recarga subterránea, etc. De igual manera, tiene capacidad para hacer análisis sectoriales, de conservación de agua, derechos de agua, operación de embalses, generación hidroeléctrica, rastreo de contaminantes, calidad de agua, valoración de vulnerabilidad y mantenimiento de los requerimientos de los ecosistemas, también cuenta con un módulo de análisis financiero que permite hacer comparaciones beneficio-costos de diferentes proyectos o alternativas y explorar escenarios alternativos de largo alcance.

El desarrollo de un modelo WEAP incluye generalmente las siguientes etapas:

1. Definición del estudio: En esta etapa se establecen el marco temporal, los límites espaciales, los componentes del sistema y la configuración del problema.

2. **Búsqueda de información:** En esta etapa se hace una recolección de datos de acuerdo con el tipo de estudio definido. Esta etapa puede ser iterativa, y generalmente se realiza en dos partes: una etapa de recolección de datos generales, y una etapa de recolección de datos específicos una vez que se ha montado el modelo y se han identificado necesidades adicionales de información.
3. **Desarrollo del modelo:** En esta etapa se construye el esquema, se realiza la entrada de datos y se efectúan corridas iniciales de modelo para observar su comportamiento preliminar y eliminar posibles inconsistencias y errores.
4. **Calibración:** Aquí se desarrolla una caracterización de la oferta y demanda actual del agua, las cargas de contaminantes, los recursos y las fuentes para el sistema.
5. **Uso del modelo, generación de escenarios:** Una vez que el modelo está calibrado, se pueden explorar los impactos que tendrían una serie de supuestas alternativas sobre las políticas futuras, costos, y clima, por ejemplo, en la demanda de agua, oferta de agua, hidrología y contaminación. (Cisneros, 2016)

7.13.8. SWAT

El modelo SWAT es una herramienta para la evaluación del agua y del suelo, fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para United States Department of Agriculture (USDA) y el Servicio Agrícola de Investigación (ARS)", (Arnold, et ál., 1998)., "ha sido validado en diferentes países a nivel mundial, fue desarrollado para predecir el impacto de las prácticas agrícolas, producción de agua y sedimentos, calidad del agua por el uso de plaguicidas y fertilizantes, mediante dos fases: terrestre y enrutamiento del ciclo hidrológico.

El modelo SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca, para propósitos de simulación, la cuenca hidrográfica será dividida en un número de subvertientes o subcuencas. El uso de subvertientes en la simulación es muy útil, particularmente cuando hay diversas áreas de la misma cuenca que se ven afectadas por el uso de suelos o suelos bastantes desiguales de tal forma, que impactan grandemente la hidrología del sector.

El modelo SWAT requiere información específica acerca del clima, propiedades del suelo, topografía, cobertura vegetal, uso de la tierra y prácticas agrícolas que acontecen en las cuencas. Los procesos físicos asociados con el movimiento del agua, movimiento de sedimentos,

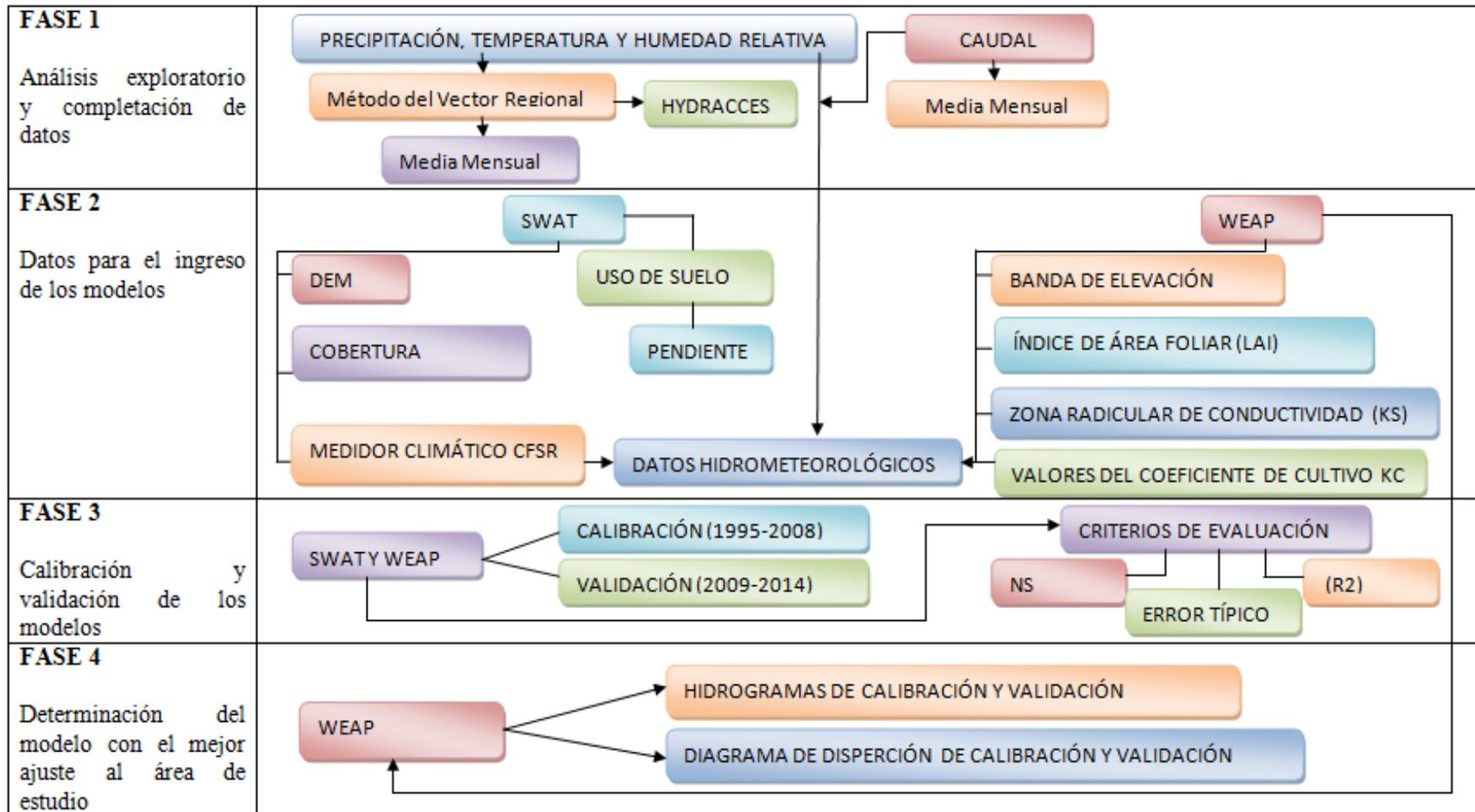
crecimiento del cultivo, ciclo de nutrientes y otros procesos son modelados con datos de entrada. (Cacoango, 2014)

8. PREGUNTA CIENTÍFICA

- P.C. El modelamiento hidrológico permitirá crear insumos para la gestión de la subcuenca del Río Patate.

9. METODOLOGÍA

Figura 1: Fases del proyecto



Elaborado por: Oña, C (2018)

En esta investigación se utilizará la siguiente metodología para el cumplimiento de los objetivos planteados:

9.1. MODALIDAD BÁSICA DE INVESTIGACIÓN

9.1.1. Aplicada

Recolección de la base de datos se realizará en las estaciones hidrometeorológicas.

9.1.2. Numérica

Mediante el modelo distribuido se van a conocer los datos de escorrentía de la subcuenca del Río Patate.

9.1.3. Bibliográfica Documental

La información se sustenta con material bibliográfico y documental la cual sirvió para realizar el marco teórico y para elegir la herramienta geoespacial.

9.2. TIPO DE INVESTIGACIÓN

9.2.1. No experimental

El método de investigación a usarse será la No Experimental, debido a que los datos se obtendrán directamente del lugar en estudio.

- AU= Automáticas
- AG = Agrometeorologica
- CP = Climatológica Principal
- CO = Climatológica Ordinaria
- PV = Pluviométrica
- PG = Pluviográfica

9.2.2. Exploratoria

Se centrará en analizar la precipitación, temperatura, velocidad del viento, radiación solar humedad relativa y escorrentía que existe en la subcuenca del Río Patate que permitirá conocer los datos.

9.2.3. Cuantitativa

Permite el estudio y análisis basados en la medición de datos de precipitación, temperatura, humedad y esorrentía se obtendrán de las estaciones hidrometeorológicas que se encuentren en la zona de estudio.

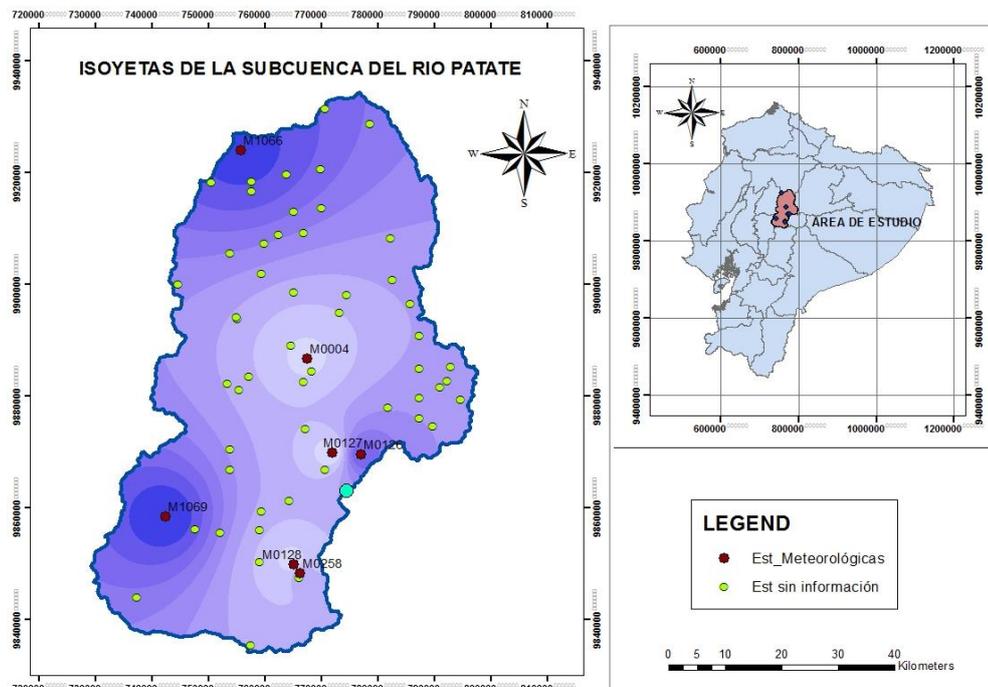
9.3. Selección del lugar de estudio

9.3.1. Área de estudio

La subcuenca del Río Patate es uno de los principales afluentes del río Pastaza, y está en el sector noroccidental de la cuenca, tiene una extensión aproximada de 4280.19 km² y un perímetro de 323,375 km. La parte alta de la cuenca comprende páramos dentro del Parque Nacional Llanganates, lo cual sirve como fuente de agua para poblaciones en el valle del Patate, es donde se encuentran algunas de las tierras agrícolas más importantes del país en las provincias de Cotopaxi y Tungurahua.

Dentro de esta sub-cuenca existe zonas urbanas e industriales como Ambato, Latacunga, Pelileo, Patate, Quisapincha y Píllaro.

Figura 2: Ubicación de de subcuenca del río Patate: a) Distribución de la precipitación, periodo 1995-2014



Fuente: ARCSaw

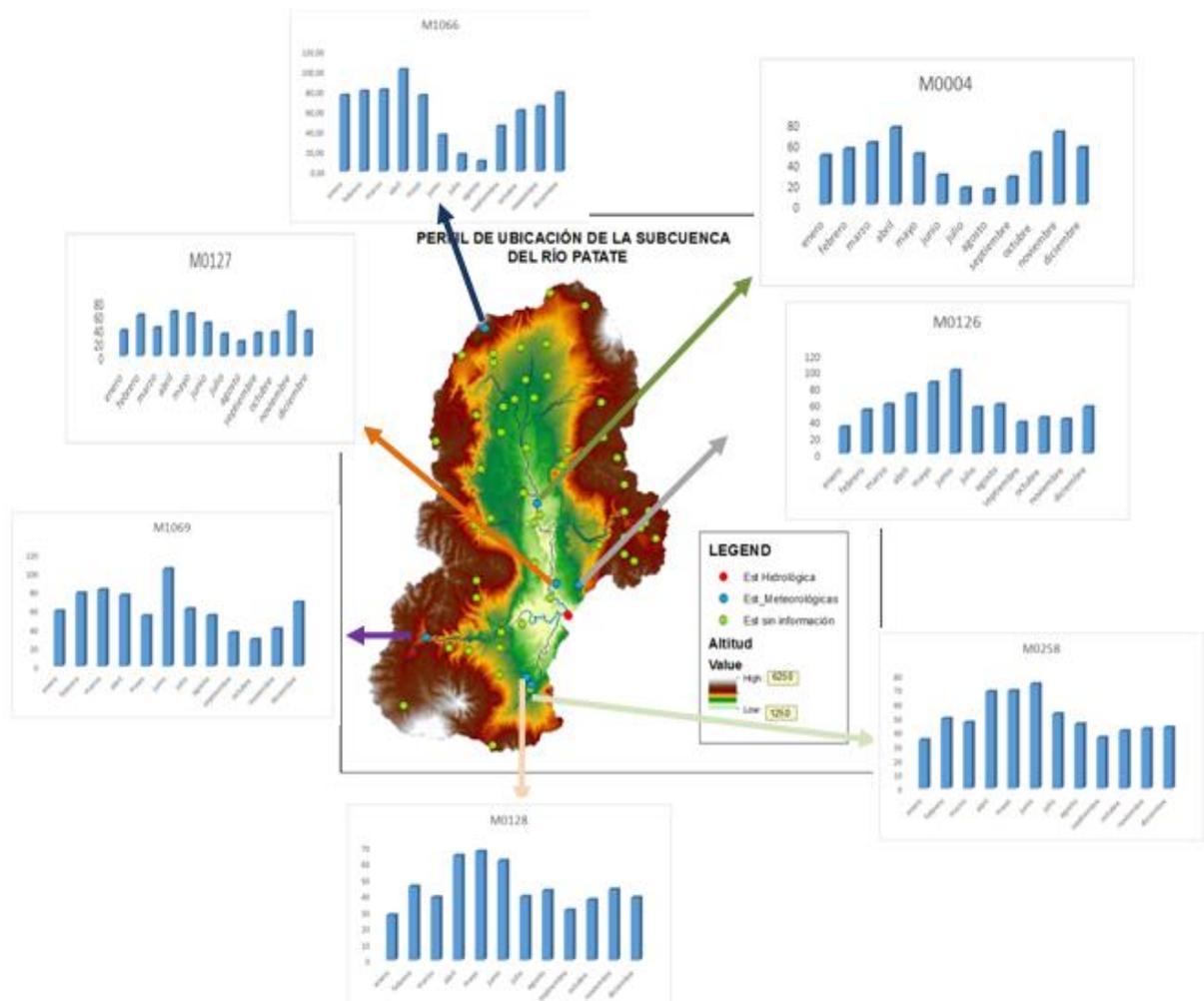
Elaborado por: Oña, C (2018)

9.4. Información hidrometeorológica

Se ha recopilado datos de 60 estaciones meteorológicas con datos de precipitación, temperatura y humedad provenientes del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI) (Tabla 1).

Los caudales fueron obtenidos a partir de la estación hidrológica, Patate D.J. Ambato. Se seleccionaron 7 estaciones al considerar un periodo en común de 20 años (1995-2014). Los datos de temperatura y precipitación fueron diarios y datos mensuales para caudal y humedad relativa.

Figura 3: Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrológica



Fuente: ARCSaw

Elaborado por: Oña, C (2018)

Tabla 5. Características de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la Subcuenca del río Patate, periodo 1995-2014

Código	Nombre	Tipo	Ubicación		Altitud	Estado
			Latitud	Longitud		
M1066	Cotopilalo Convenio INAMHI-CESA	CO*	-0.683	-78.7	3250	Activa
M0004	Rumipamba Salcedo	AG*	-1.02	-78.594	2685	Activa
M0127	Pillaro	CO*	-1.172	-78.555	2793	Activa
M0126	Patate	CO*	-1.175	-78.509	2220	Activa
M1069	Calamaca Convenio INAMHI HCPT	CP*	-1.276	-78.818	3402	Inactiva
M0128	Pedro Fermín Cevallos(Colegio)	CO*	-1.352	-78.615	2910	Activa
M0258	Querochaca (UTA)	AU, CP*	-1.367	-78.605	2865	Activa

*AG=Agrometeorológica, *CP=Climatológica Principal *CO=climatológica ordinaria, *PV=Pluviométrica, *PG=Pluviográfica y AU= Automática

Fuente: INAMHI

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.5. Recopilación de datos

La información necesaria para poder modelar una cuenca hidrográfica con el modelo SWAT y WEAP son:

- Topografía; curvas de nivel
- Textura de los Suelo
- Uso del suelo/Cobertura vegetal
- Información climática (precipitación, temperatura, humedad relativa y escorrentía)

9.6. Metodología

9.7. Completación de datos

9.7.1. Media Aritmética

Se realizó la completación de datos de caudal y humedad relativa con la media aritmética para las estaciones con datos faltantes iguales o menores al 10% (Morán, 1996)

9.7.2. Método del Vector regional

Para completar los datos de precipitación y temperatura se utilizó el Método del Vector Regional (MVR), mediante HYDRACCES (Vauchel & Ilbay, 2017)

Se completaron los datos de 7 estaciones por el MVR formando una zona homogénea de precipitaciones y temperaturas, correspondiente a la SbRP

Las representaciones gráficas mensuales de la zona alta de la SbRP son los resultados MVR (Anexo 1)

9.8. Procesamiento de la información para Swat

El procesamiento de la información cartográfica constó de:

- Descarga de archivos: DEM (<http://srtm.csi.cgiar.org/>), tipo de suelos (http://www.waterbase.org/download_data.html), cobertura vegetal/ usos (http://www.waterbase.org/download_data.html),
- Descarga de archivos variables climatológicas: temperatura, precipitación, evapotranspiración, humedad relativa (<http://globalweather.tamu.edu/>)
- Determinación de la pendiente en base a 5 categorías (tabla 16)

9.8.2. Delimitación de la Cuenca (Watershed Delineator)

- Modelo de elevación digital DEM

La obtención del modelo de elevación digital (DEM), se obtuvo USGS (Science for a changing world), el uso del software Arcgis versión 10.2.2.

- Sub-vertientes y corrientes de agua (Subbasins y streams)

SWAT realiza la determinación de sub vertientes y corrientes de agua en base al DEM. Una vez realizado se exporta a formato shapefile (.shp). Los atributos para el archivo de las sub-vertientes son:

GRIDCODE: Es el identificador de las sub-vertientes debe ser único.

SUBBASIN: Este valor es el mismo que el GRIDCODE.

Los atributos para el archivo de los ríos son:

ARCID: Es el identificador de cada corriente de agua

GRID_CODE: Es el número que indica a que sub-vertiente pertenece la corriente de agua, debe ser un valor único y corresponde al mismo valor de “GRIDCODE” del archivo de las sub-vertientes

FROM_NODE: Este valor corresponde a la sub- vertiente (GRIDCODE) en la cual la corriente de agua se origina.

9.8.3. Uso de Suelos/Cobertura Vegetal

Las categorías del uso de la tierra necesitan ser reclasificadas dentro de los tipos que el programa SWAT, requiere mediante la interfaz LAND USE. Para ello se utilizó la capa de suelo/ cobertura vegetal disponible Global Weather Data for SWAT.

Tabla 6. Clasificación de SWAT

USO DE SUELO	LAND USE
Sin uso agropecuario	RNGE
Cuerpos de agua	WATER
Afloramiento rocoso	FESC
Pasto	PAST
Agricultura	AGRL
Bosque	FRSE
Área Urbana	URMD

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.8.4. Tipo de Suelo

Los principales órdenes de suelos encontrados en la subcuenca del Río Patate fueron:

Tabla 7. Clasificación según la (USDA, 2014)

TIPO DE SUELO	SOILS	Clase taxonómica
Arenosa (Fina, media, gruesa)	COLTON	Andisols
Franco Arenosa	CROGHAN	Vertisols
Franco Arcilloso	SHEEPSCOT	Vertisols
Arcilloso	HERMON	Vertisols
Limoso	LYME	Vertisols

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.8.5. Pendiente

Los valores de referencia para la clasificación de la pendiente en la SbrP fueron tomados de, definiendo las clases dependiente.

Tabla 8. Clasificación de la pendiente

Clase	Rango (%)	Descripción
1	0 – 10	Pendiente débil, plana o casi plana
2	10- 25	Pendiente regular, ondulada
3	25 – 40	Pendiente Fuerte
4	40 – 55	Pendientes muy Fuertes
5	55 -9999	Pendientes abruptas

Fuente: (SARH, 2015)

Elaborado por: (Oña, 2018)

9.8.6. Calibración y Validación.

La calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los caudales medidos y los caudales simulados, ajustando los parámetros de mayor influencia. La validación del modelo consiste en medir su capacidad de predecir mediante la comparación de

los caudales observados con los simulados con los parámetros determinados en la fase de calibración, pero en un periodo de tiempo diferente.

Una buena calibración del modelo es importante en estudios de simulación hidrológica para reducir la incertidumbre en modelos de simulación.

Una calibración ideal del modelo implica:

1. La utilización de datos de lluvia promedio y de épocas de verano
2. Utilizar varias técnicas de evaluación
3. Calibración de todos los componentes a ser evaluados

La calibración como el proceso reiterado de la búsqueda de valores de los coeficientes que produzcan la menor diferencia entre resultados simulados y observados, lo cual implica la medición, estimación o ajuste de sus valores para mejorar la capacidad predictiva del modelo con respecto a algunas variables en particular. (Warnock, 2005)

Los parámetros resultantes del análisis de sensibilidad para el caudal que ParaSol

Tabla 9. Parámetros de caudal calibrados automáticamente

Parámetros		
Caudal	Extensión	Significado
Alpha_Bf	.gw	Recesión del caudal base
Canmx	.hru	Máximo almacenamiento por retención
Ch_K2	.rte	Conductividad hidráulica del canal principal
Ch_N2	.rte	De rugosidad n de Manning
Cn2	.mgt	Número que proviene de la curva SCS
Esco	.bsn.hru	Factor de compensación por evaporación en el suelo
Gwqmn	.gw	Profundidad umbral del acuífero superficial

Fuente: Oña, C (2018)

9.9. Los parámetros de Caudal

✓ ALPHA_BF (.gw): Es una constante de recesión del caudal base. Es un índice directo de la respuesta del caudal subterráneo a la recarga. La mejor forma de determinarlo es analizando periodos en los que no hay recarga en la cuenca. La expresión que define el ALPHA_BF es

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] = \frac{1}{BFD} \cdot \ln[10] = \frac{2.3}{BFD}$$

Donde α_{gw} es la constante de recesión del caudal base y BFD el número de días de caudal base en la cuenca.

✓ Gwqmn (.gw): La profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que el flujo de retorno ocurra. Para que el agua subterránea fluya debe cumplirse que la altura del acuífero superficial sea igual o mayor que Gwqmn. Se da en mm H₂O.

✓ Canmx (.hru): Es el máximo almacenamiento por retención (mm H₂O), debido a la cobertura vegetal puede haber retención de la lluvia. Esto puede afectar la erosión y depende de la densidad de la capa vegetal y su morfología. ArcSWAT permite la mayor retención de lluvia debida a la cobertura vegetal cuando está totalmente desarrollada (mediante el índice de área de hoja).

✓ Ch_K2 (.rte): Es la conductividad hidráulica del canal principal (mm/hr). Los caudales de un canal deben ser caracterizados por su relación con el agua subterránea pueden ser canales recargables o recargantes. Dependiendo del material del lecho del canal los valores de la conductividad Kr pueden variar entre 127 mm/hr para un material con tasas de pérdida altas (arenas y gravas) a 0.025 mm/hr para materiales con tasas de pérdida muy bajas (arcillas y limos).

✓ Ch_N2 (.rte): Es el coeficiente de rugosidad n de Manning para el canal

✓ CN2 (.mgt): El número que proviene de la curva SCS de lluvia para la condición de humedad II. Esta curva es función de la permeabilidad del suelo, del uso del suelo y de condiciones antecedentes de la humedad del suelo. Los valores para el numero de la curva SCS pueden ser encontrados en tablas para tipos de suelo y diferentes capas superficiales del suelo para pendientes del 5%; este parámetro es dependiente de CNOP, en caso de que el ultimo sea

necesario en alguna operación el programa tomará este último como valor para el número de la curva SCS con humedad II. Dependiendo de los diferentes usos agrícolas que puedan tener suelos rurales, existen tablas con el número así como para áreas urbanas

✓ *E_{sc}* (.bsn .hru): Es el factor de compensación por evaporación en el suelo. Este factor tiene la finalidad de facilitarle al usuario ajustar la distribución de la profundidad para la demanda evaporativa del suelo por capilaridad, agrietamiento y formación de costras. Dicha distribución varía con los valores de *E_{sc}*.

$$E_{soil.ly} = E_{soil.sl} - E_{soil.zu} \cdot E_{sc}$$

Donde *E_{soil}* es la demanda evaporativa para una capa en específico (ly), para la capa inferior (zl) y la capa superior (zu). (López, 2012)

9.10. Procedimiento para WEAP

9.10.1. Definición de bandas de elevación

La SbrP se dividió en 4 bandas (catchments) de nivel cada 1000 m (tabla 7)

Tabla 10. Catchments de ingreso para el modelo

Subcuenca	Banda De Elevación	Intervalo	Nombre del Catchemets	Etiqueta	Representa Caudal De Cabecera
PATATE	Banda 1	1000 m – 2000 m	PATATE1	PAT1	NO
	Banda 2	2000 m – 3000 m	PATATE2	PAT2	NO
	Banda 3	3000 m – 4000 m	PATATE3	PAT3	SI

Fuente: Oña, C (2018)

9.10.2. Unidades

Las unidades del Sistema Internacional se utilizaron en WEAP (caudal), y precipitación en mm/mes, temperatura en °C y humedad relativa en %.

9.10.3. Índice de área foliar (LAI)

El índice de área foliar es un parámetro que varía por el uso de suelo y es usado para controlar la respuesta de escurrimiento en la superficie.

Tabla 11. Valores de LAI

TIPO DE USO DE SUELO	LAI
Sin uso agropecuario	1.6
Cuerpos de agua	0.10
Afloramiento rocoso	1
Pasto	3
Agricultura	4
Bosque	5
Área Urbana	2

Fuente: (Vicuña, Lema, & Plaza, 2009)

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.10.4. Zona radicular de conductividad (Ks)

La tasa de conductividad varía entre la clasificación del suelo

Tabla 12. Valores de Ks

TIPO DE USO DE SUELO	Ks
Sin uso agropecuario	150
Cuerpos de agua	150
Afloramiento rocoso	150
Pasto	150
Agricultura	150
Bosque	150
Área Urbana	150

Fuente: (Vicuña, Lema, & Plaza, 2009)

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.10.5. Valores del coeficiente de cultivo Kc

Tabla 13. Valores de Kc

TIPO DE USO DE SUELO	Kc
Sin uso agropecuario	1
Cuerpos de agua	1
Afloramiento rocoso	0.1
Pasto	1
Agricultura	1
Bosque	0.38
Área Urbana	1

Fuente: (Vicuña, Lema, & Plaza, 2009)

Elaborado por: Oña, C (2018)

9.11. Análisis de consistencia para WEAP

En el análisis de doble masa que se realizó se decidió tomar como estación base a la H817, separando la información en dos periodos (1995-2008) y (2009-2015)

Tabla 14. Caudales anuales

AÑOS	mm3
1995	28.04
1996	28.19
1997	24.90
1998	27.51
1999	25.86
2000	27.84
2001	27.93
2002	27.93
2003	24.89
2004	26.38
2005	26.49

Fuente: (INAMHI)

Elaborado por: Oña, C Periodo 1: 1995 – Periodo 2: 2009 – Cálculo de los parámetros $n_1 = 14$ $n_2 = 6$	2006	31.42	(2018)
	2007	32.94	
	2008	34.01	2008
	2009	27.36	2014
	2010	25.26	
	2011	30.50	de cada periodo
	2012	30.32	
	2013	27.98	
	2014	30.20	

9.12. Calibración del modelo

El modelo WEAP requiere información hidrometeorológica y parámetros físicos definidos para la Sbrp. Los periodos de calibración y validación son los mismos considerados para la modelación con SWAT.

10. ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

10.1. Modelo SWAT

10.1.1. Uso de suelo

La Sbrp tiene una superficie de 463917 ha, la agricultura son la principal fuente de ingreso con una superficie de 70.68% en la cobertura vegetal, el pasto con un 10.51%, con una área urbana 7.34%, con un bosque de 5.81%, con unos cuerpos de agua de 5.20%, tiene un afloramiento rocoso 0.35% y sin uso agropecuario de 0.21%.

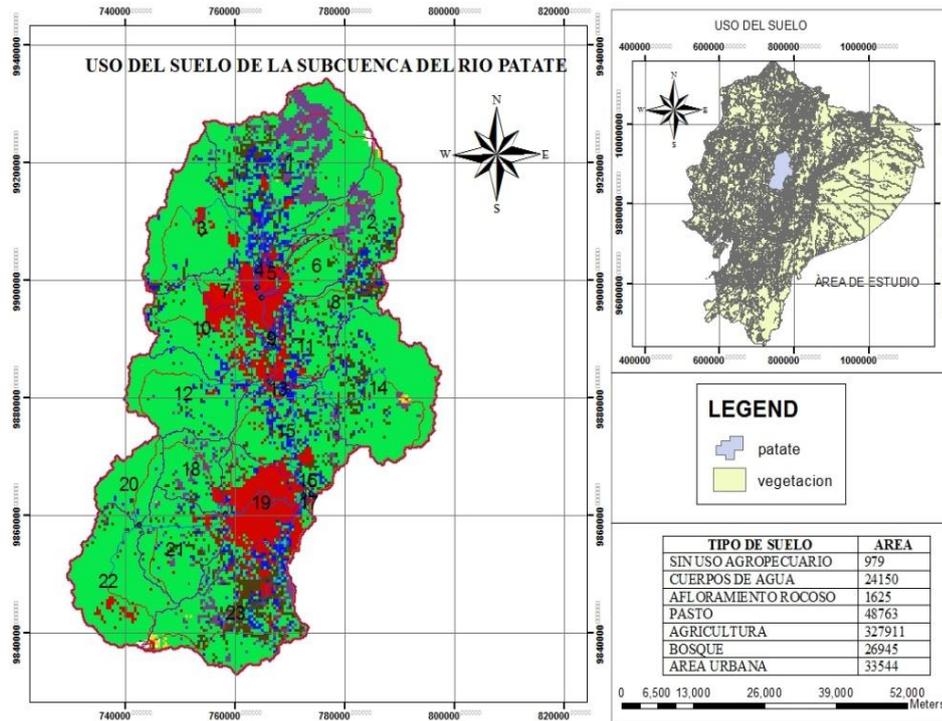
Tabla 15. Resultados del uso del suelo

USO	SUPERFICIE	SUPERFICIE EN (%)
Sin uso agropecuario	979	0.21
Cuerpos de agua	24150	5.20
Afloramiento rocoso	1625	0.35
Pasto	48763	10.51
Agricultura	327911	70.68

Bosque	26945	5.81
Área Urbana	33544	7.34
TOTAL	463917	100

Elaborado por: Oña, C (2018)

Figura 4: Uso de suelo



Fuente: ArcGIS 10.2.2

Elaborado por: Oña, C (2018)

10.1.2. Tipo de suelo

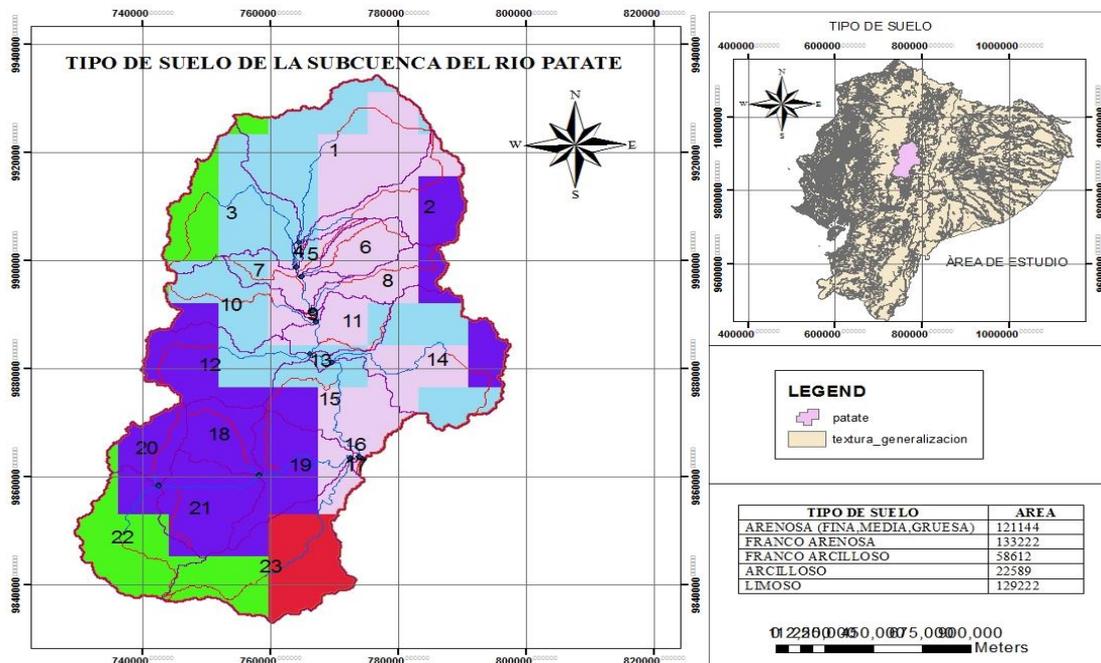
El tipo de suelo predominante fue suelo franco arenosa (CROGHAN) con un 28.67 % de área de estudio perteneciente a la clase taxonómica Vertisols, limoso (LYME) con un 27.80% perteneciente a la clase taxonómica Vertisols, arenosa (COLTON) con un 26.06% perteneciente a la clase taxonómica Andisols, franco arcilloso (SHEEPSCOT) con un 12.61% perteneciente a la clase taxonómica Vertisols y un suelo arcilloso (HERMON) con un 4.86% a la clase taxonómica Vertisols.

Tabla 16. Resultados del tipo de suelo

TIPO DE SUELO	SUPERFICIE	SUPERFICIE EN %
Arenosa (Fina, media, gruesa)	121144	26.06
Franco Arenosa	133222	28.67
Franco Arcilloso	58612	12.61
Arcilloso	22589	4.86
Limoso	129222	27.80
TOTAL	464789	100

Elaborado por: Oña, C (2018)

Figura 5: Tipo de suelo



Fuente: ArcGIS 10.2.2

Elaborado por: Oña, C (2018)

10.1.3. Pendiente

La pendiente tiene 5 clases la que predomina es el rango 10-25% la pendiente regular ondulada con un 53.55%, la pendiente fuerte con un rango 24-40 con un 25.94%, las pendientes muy fuertes con un rango 40-55 con un 10.56%, la pendiente abrupta con un rango 55-9999 con un 5.45% y una pendiente débil, plana o casi plana con un rango 0-10 con un 4.50%.

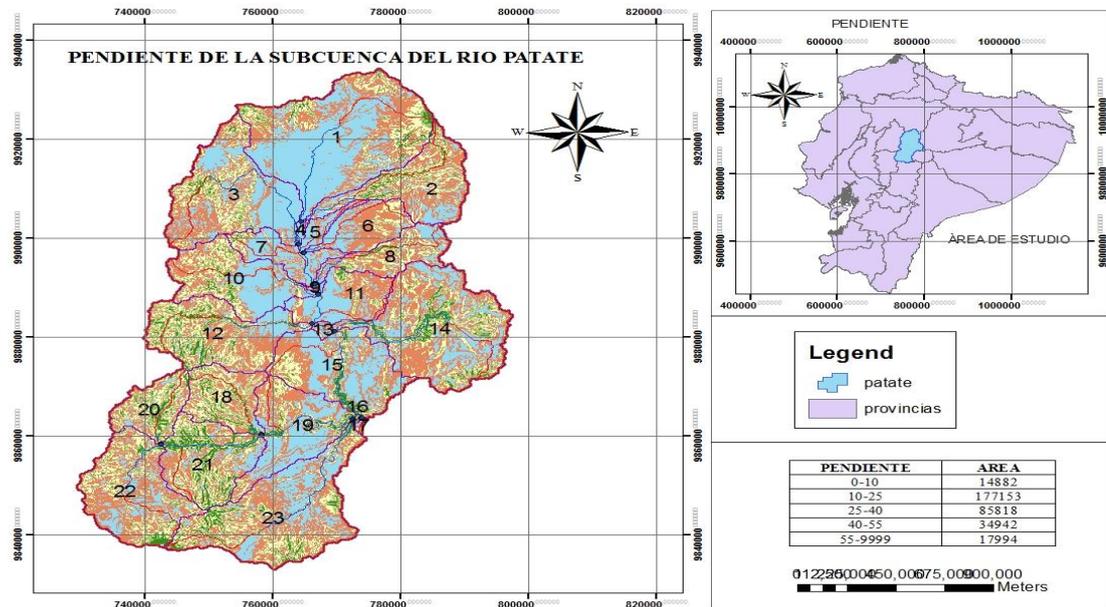
Tabla 17. Resultados del rango de la pendiente

Clase	Rango (%)	Descripción	Superficie	Porcentaje de Ocupación (%)
-------	-----------	-------------	------------	-----------------------------

1	0 – 10	Pendiente débil, plana o casi plana	14882	4.50
2	10- 25	Pendiente regular, ondulada	177153	53.55
3	25 – 40	Pendiente Fuerte	85818	25.94
4	40 – 55	Pendientes muy Fuertes	34942	10.56
5	55 -9999	Pendientes abruptas	17994	5.45
TOTAL			330789	100

Elaborado por: Oña, C (2018)

Figura 6: Rango de la pendiente



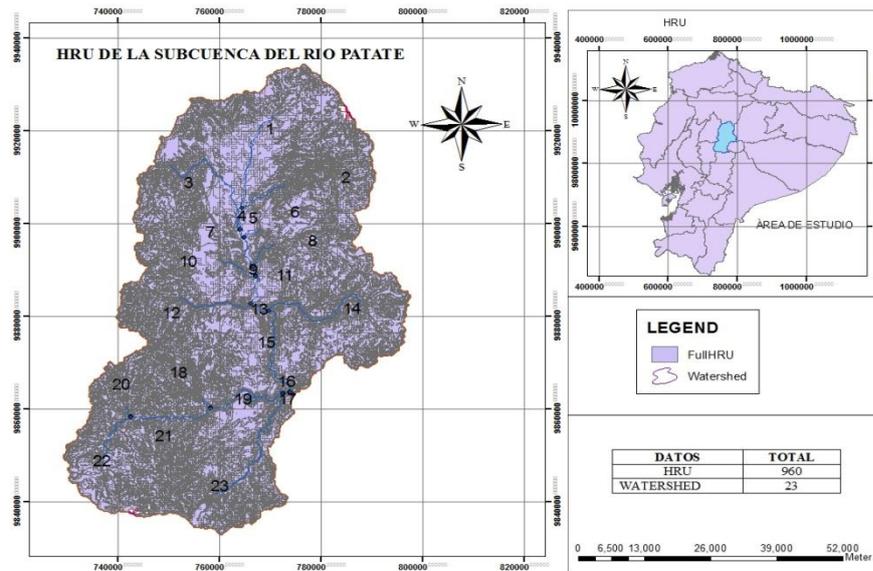
Fuente: ArcGIS 10.2.2

Elaborado por: Oña, C (2018)

10.1.4. Unidades Hidrológicas de Respuesta (HRU)

El modelo SWAT determinó 960 unidades hidrológicas y watershed 23 distribuidos a lo largo de la SbrP.

Figura 7: HRU



Fuente: ArcGIS 10.2.2

Elaborado por: (Oña, 2018)

10.1.5. Calibraciones y validaciones

Se realizaron 7 simulaciones cambiando los valores de las variables climáticas y físicas de la SbRP:

1. Utilizando los shapes de la FAO (cobertura vegetal y tipo de suelo), el modelo sobrestima los caudales máximos y subestima los caudales mínimos con gran exageración. Obteniendo un valor en NASH Insatisfactorio. (SIM A)(TABLA 18)
2. Con la imagen ráster de la cobertura vegetal y tipo de suelo se realizó la clasificación según la USDA y se obtuvo un valor de NASH Insatisfactorio. (SIM B)(TABLA 18)
3. Con los datos de las variables meteorológicas CFSR (Climate Forecast System Reanalysis), se obtuvo un valor de NASH Insatisfactorio. (SIM D)(TABLA 18)
4. Con el tipo de suelo (FAO) y cobertura vegetal utilizados (USDA), se obtuvo un valor de NASH Insatisfactorio. (SIM E)(TABLA 18)

5. Se volvió a reclasificar el tipo de suelo (FAO) y se obtuvo un valor de NASH Bueno. (SIM F)(TABLA 17). Con tipos de suelo de la (FAO), cobertura vegetal de la (USDA), pendiente (SARH) y variables climáticas (motor climático).
6. Con la (SIM G), se volvió a simular en SAW CUP y se logro obtener una buena calibración y validación, obteniendo un valor en NASH Muy Bueno. (SIM G)(TABLA 17)

En la simulación G se obtuvieron los mejores resultados en SWAT y en la simulación B para WEAP, para el coeficiente de NASH para el modelo de cuencas hidrográficas el valor óptimo.

Tabla 18. Tabla de los índices de evaluación para estimación de caudales con SWAT, fase de calibración y validación

SIM	ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ESTIMACIÓN PARA SWAT					
	ERROR TÍPICO		NASH		R ²	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
SIM A	9.85	7.16	-241.42	-258.87	0.00	0.00
SIM B	9.84	7.16	-194.97	-235.24	0.00	0.00
SIM C	9.80	7.16	-58.76	-69.17	0.01	0.00
SIM D	9.78	7.15	-47.31	-62.23	0.02	0.00
SIM E	8.19	6.23	-0.95	-1.03	0.31	0.24
SIM F	7.31	5.64	-0.10	-0.21	0.45	0.38
SIM G	5.96	4.68	0.32	0.35	0.57	0.57

Fuente: ArcSWAT

Elaborado por: Oña, C (2018)

La séptima calibración (SIM G) presento un mejor ajuste según los índices de evaluación de calidad de estimación (tabla 18). En base a la SIM G se realizó el ajuste de los parámetros de SWAT (Tabla 19) mediante SWAT CUP y se logró obtener un NASH 0.63 para la calibración y 0.68 para la validación, siendo un ajuste bueno según Morán, (1996).

Tabla 19. Parámetros utilizados para calibración y validación

Modelo	Parámetro	Calibración	Validación	Descripción
	CH_N2	0.15	0.15	Coficiente de Manning

	GW_REPAV	0.14	0.14	Coefficiente de revaporización del agua subterránea
	SHALLST	1000	1000	Profundidad inicial del agua en el acuífero superficial [mm]
SWAT	DEEPST	2000	2000	Profundidad inicial del agua en el acuífero profundo [mm]
	GW_DELAY	31	31	Retraso del agua subterránea [días]
	GWHT	1	1	Altura inicial del agua subterránea [m]
	GW_SPYLD	0.003	0.003	Rendimiento específico del acuífero superficial [m ³ /m ³]
	ALPHA_BF_D	0.01	0.01	Factor alfa de flujo de base para acuífero profundo [días]

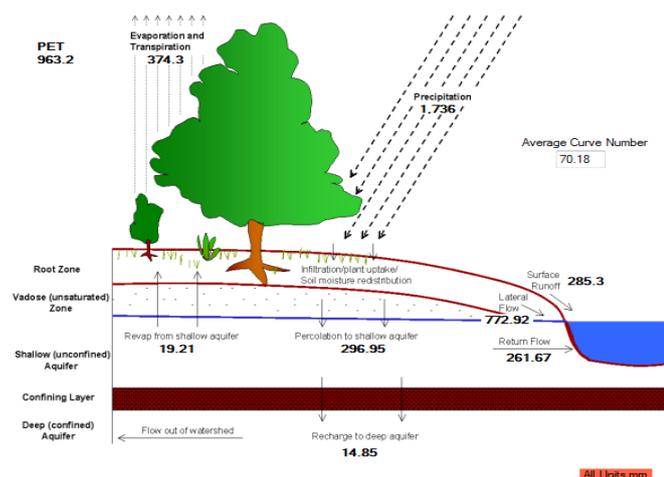
Fuente: ArcSWAT

Elaborado por: (Oña, 2018)

10.1.6. Calibración

En el periodo (1995-2008) la contribución de la precipitación fue 1736 mm/anales, pérdidas por evapotranspiración de 374.3 mm/añual, el rendimiento hídrico es 1319.89mm, con un 62% de escorrentía superficial y un 38% de flujo base (flujo de retorno y flujo lateral).

Figura 8: Proceso hidrológico simulado con SWAT (a) periodo de calibración (1995-2008)



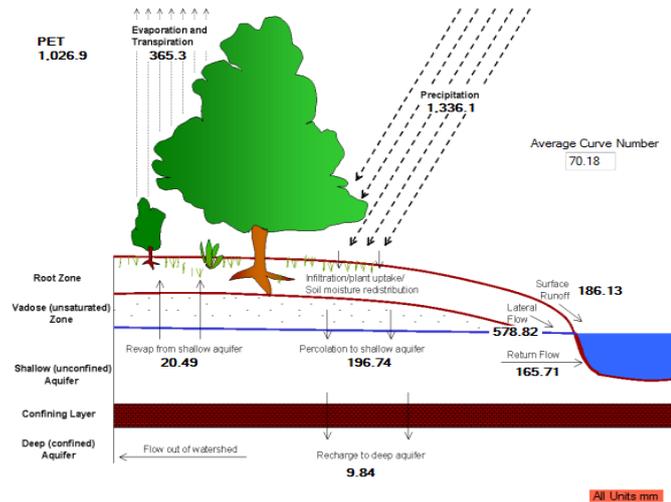
Fuente: ArcSWAT

Elaborado por: Oña, C (2018)

10.1.7. Validación

En el periodo (2009-2014) la contribución de la precipitación fue 1336 mm/anuales, pérdidas por evapotranspiración de 365.3 mm/añual, el rendimiento hídrico es 930.66mm/anuales, con un 54% de escorrentía superficial y un 46% de flujo base (flujo de retorno y flujo lateral).

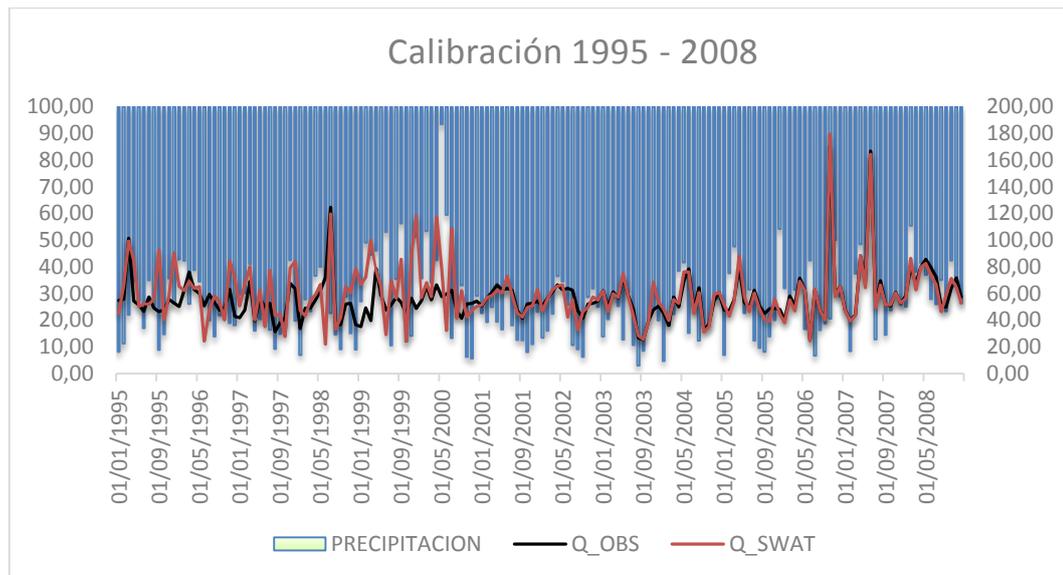
Figura 9. Proceso hidrológico simulado con SWAT (b) periodo de validación (2009-2014)

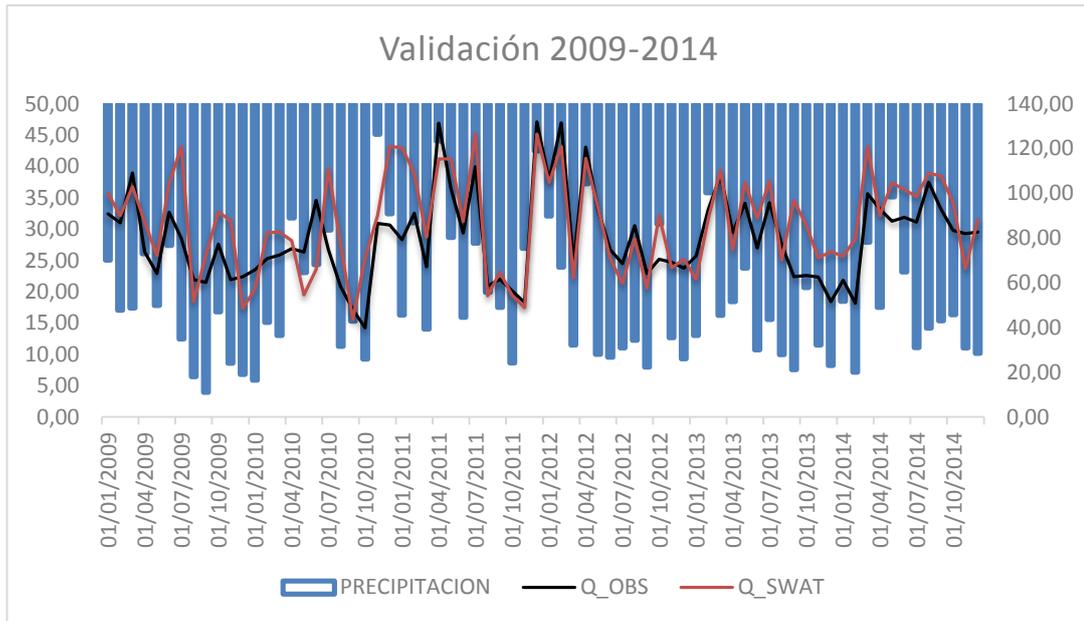


Fuente: ArcSWAT

Elaborado por: Oña, C (2018)

Figura 10. Calibración y validación del modelo SWAT para la SbRP con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el periodo 1995-2008 y b) hidrograma de validación para el periodo 2009-2014





Elaborado por: Oña, C (2018)

10.2. MODELO WEAP

10.2.1. Calibración y validación

Los índices de evaluación de calidad de estimación con el modelo WEAP fueron buenos, coeficiente de Nash 0.7 y 0.8 para la calibración y validación respectivamente, siendo un ajuste satisfactorio según Morán, (1996)

Entre los caudales observados y simulados con la precipitación existe una relación directa con el patrón de distribución del caudal en la SbRP. Los picos se reproducen muy bien en tiempo y magnitud en la calibración y validación. Se obtuvo un Nash Satisfactorio.

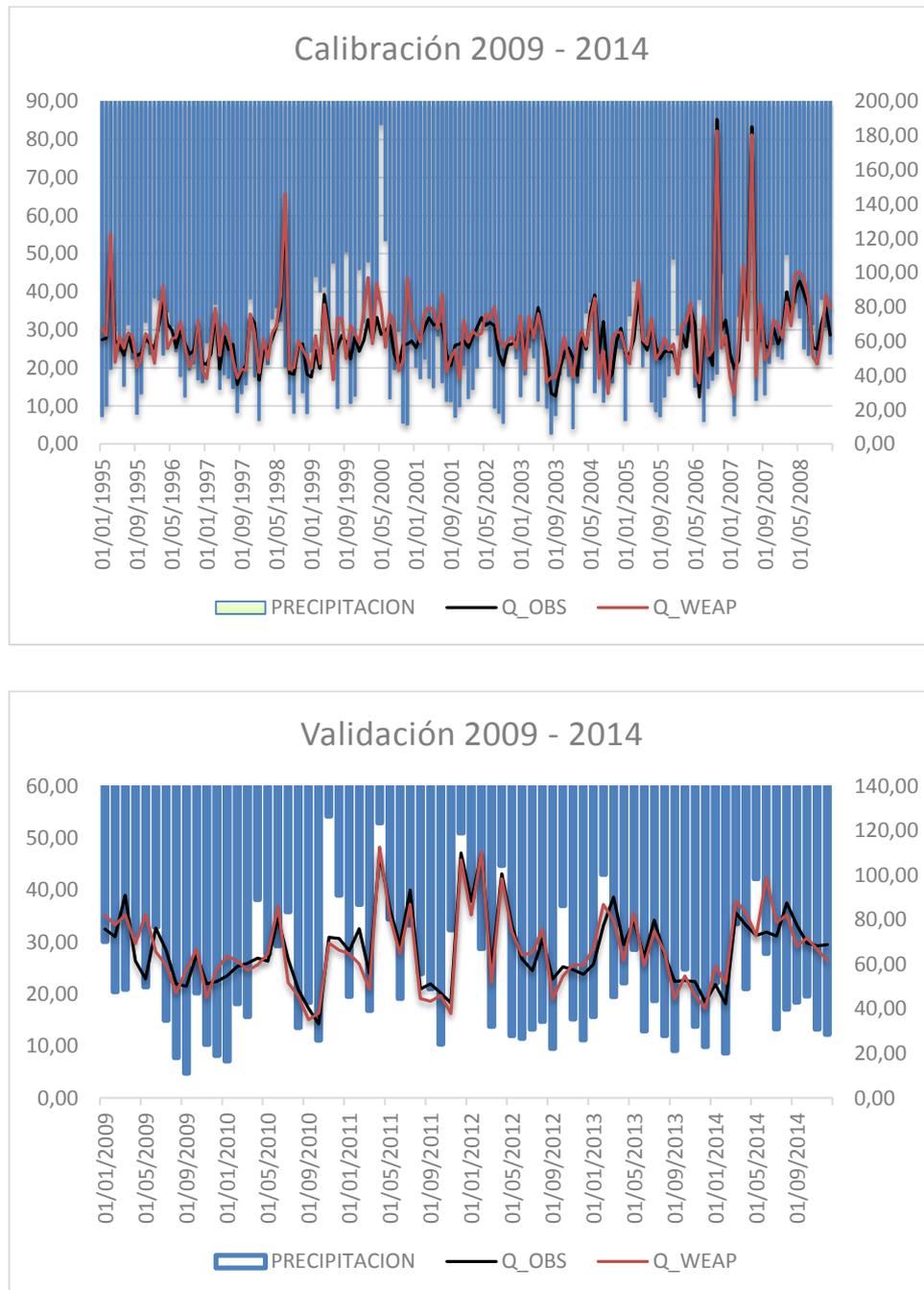
Tabla 20. Tabla de los índices de evaluación para estimación de caudales con WEAP, fase de calibración y validación

SIM	ÍNDICES DE EVALUACIÓN DE CALIDAD DE ESTIMACIÓN PARA WEAP					
	ERROR TÍPICO		NASH		R ²	
	Calibración	Validación	Calibración	Validación	Calibración	Validación
SIM A	3.92	3.06	0.77	0.80	0.81	0.82

Elaborado por: Oña, C. (2018)

Figura 11. Calibración y validación del modelo WEAP para la Sbrp con los valores de precipitación, caudales observados y simulados, a) hidrograma de calibración para el periodo 1995-2008 y b) hidrograma de validación para el periodo 2009-2014

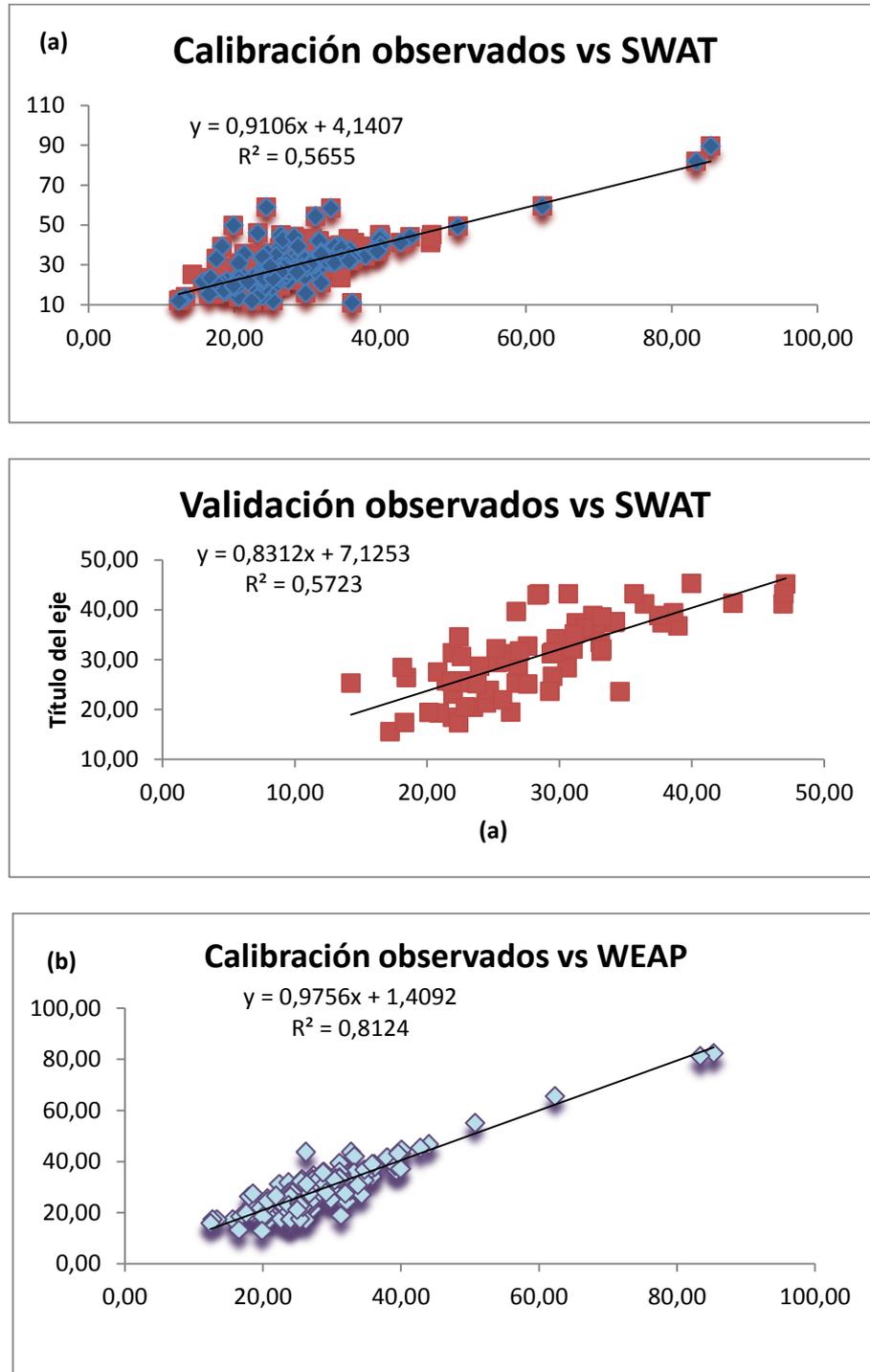
Los caudales observados y simulados en la Sbrp presentan una relación directa con el patrón de distribución de las precipitaciones. Los picos se reproducen muy bien en tiempo y magnitud para la calibración y validación (Figura 11).

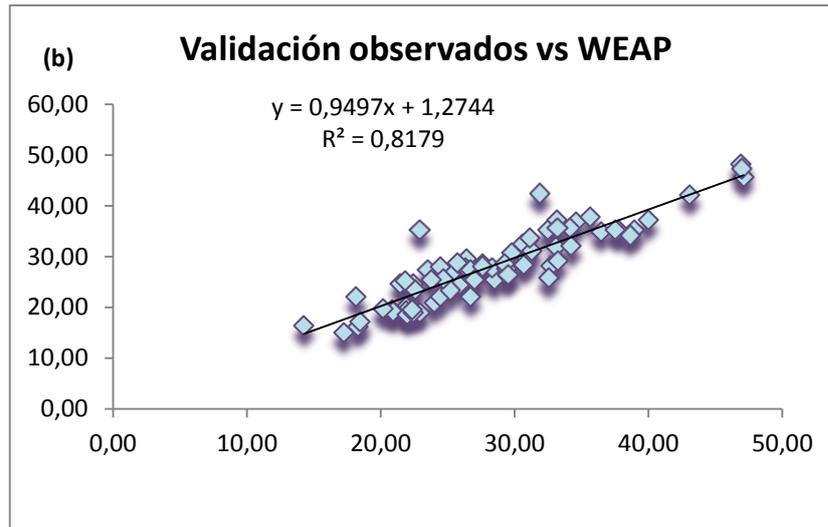


Elaborado por: Oña, C. (2018)

El modelo semiagregado WEAP predice bien los caudales en la Sbrp, la calidad de la simulación en base a R^2 para la calibración y validación es superior a 0.8 (Figura 11).

Figura 12. Diagrama de dispersión entre las series simuladas y observadas para el periodo 1995-2014





Elaborado por: Oña, C. (2018)

10.3. Comparación con SWAT Y WEAP

Tabla 21. Criterios de eficiencia para los modelos WEAP Y SWAT

Los resultados para los dos modelos semidistribuidos (SWAT Y WEAP), demuestran heterogeneidad, siendo el modelo WEAP el que mejor resultados presenta para la SbRP.

PERIODO	MODELO	CAUDAL (m3/s)		ESTADISTICO		
		Obs.	Sim.	R2	NASH	ERROR TIPICO
CALIBRACION	SWAT	28.17	28.91	0.72	0.63	4.76
	WEAP		28.75	0.81	0.77	3.92
VALIDACION	SWAT	28.60	30.04	0.75	0.66	3.57
	WEAP		28.88	0.82	0.80	3.06

Elaborado por: Oña, C. (2018)

Se muestran la capacidad de los modelos SWAT Y WEAP para representar caudales mensuales simulados en la SbRP; los valores del coeficiente de Nash en SWAT es muy bueno y en WEAP es satisfactorio con valores mayores al umbral de 0.40, lo que demuestra que es una simulación con un ajuste satisfactorio. Sin embargo el modelo WEAP presentó un coeficiente de Nash en la calibración (1995-2008) de 0.77 y para la validación (2009-2014) de 0.80. La simulación con SWAT en el periodo de calibración subestima los caudales pero en el periodo de validación

sobrestima los caudales. Por el contrario WEAP sigue la tendencia de los caudales observados para los dos periodos.

Figura 13. Calibración y validación de lo modelo SWAT y WEAP para la SbrP. (a) hidrograma para el periodo de calibración (1994-2008) con caudales observados y simulados. (b) hidrograma para el periodo de validación (2009- 2014) con caudales observados y simulados

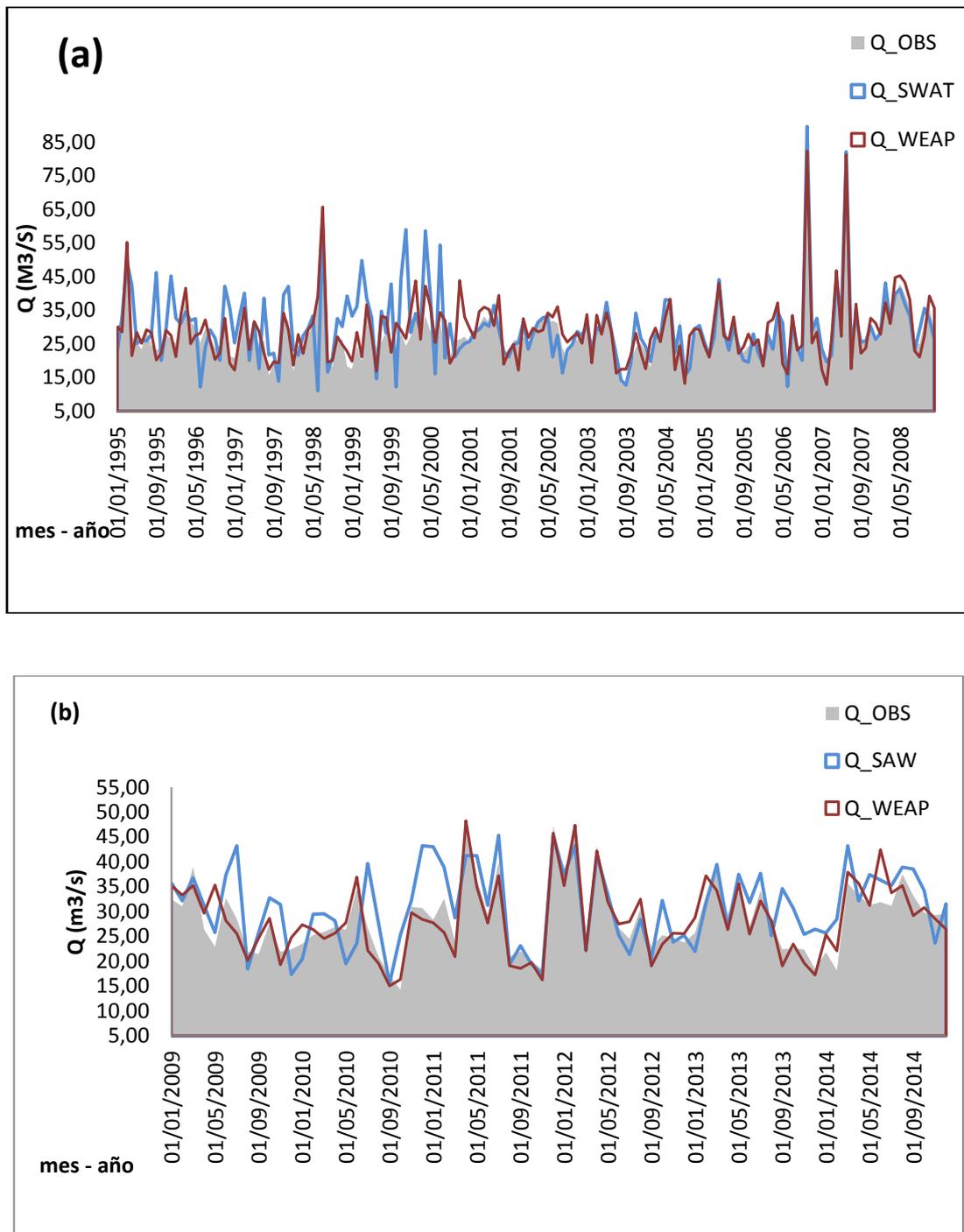
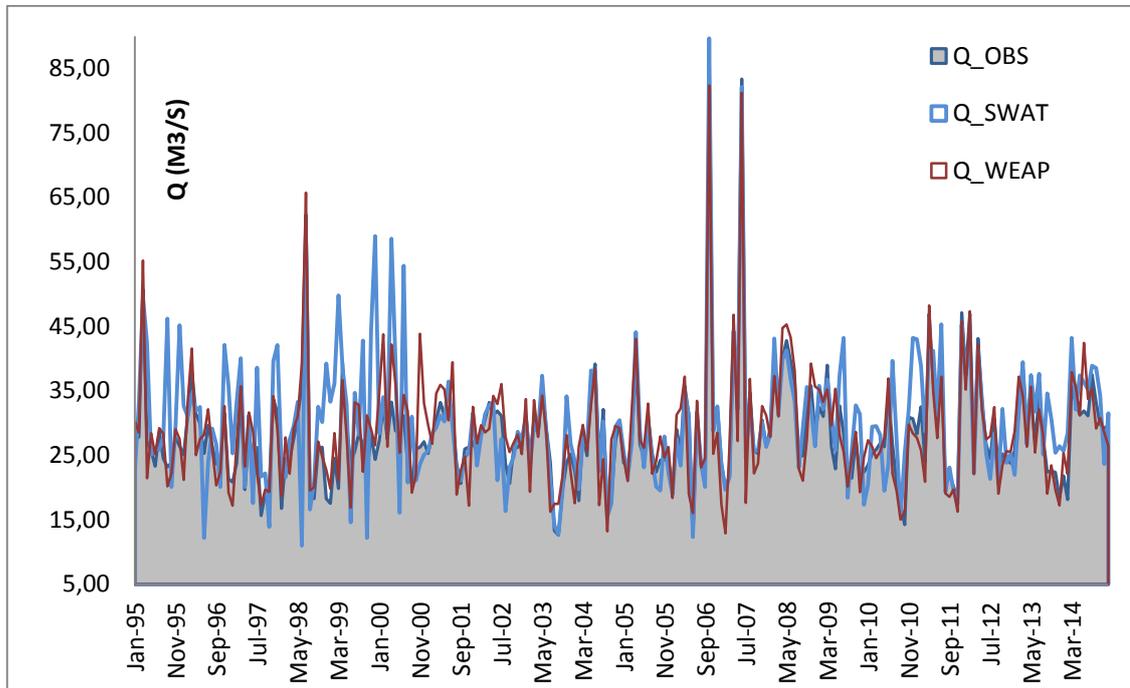


Figura 14. Calibración y validación de lo modelo SWAT y WEAP para la SbRP., (a) hidrograma para el periodo de (1995- 2014) con caudales observados y simulados



Elaborado por: Oña, C. (2018)

11. IMPACTOS (TÉCNICOS, SOCIALES, AMBIENTALES Y ECONÓMICOS):

11.1. Técnicos:

- Los modelos hidrológicos SWAT y WEAP permiten la obtención de datos de simulación en un periodo de tiempo mensual y ayudan en la predicción de los fenómenos físicos. De esta manera se puede obtener relaciones de causa-efecto, sin alterar los sistemas reales.
- Los modelos hidrológicos son una representación de la cuenca hidrográfica y los componentes del ciclo hidrológico. Para entender el comportamiento de la subcuenca de forma continua en el tiempo y en el espacio implica conocer el comportamiento del ciclo hidrológico para entender la respuesta, y poder tomar decisiones en el manejo de la subcuenca hidrográfica.
- El modelo WEAP ayuda a predecir los totales mensuales de esorrentía para la subcuenca del Río Patate.

11.2. Sociales:

- La simulación de caudales en una subcuenca son insumos que permite proponer proyectos hidroeléctricos, satisfacer la demanda de un proyecto de irrigación y de abastecimiento de agua potable e industrial.

11.3. Ambientales:

- La simulación de caudales en los cuerpos receptores de efluentes del sistema en las aguas urbanas e industriales permiten el análisis para conocer qué impacto genera sobre el medio ambiente, y de igual manera sobre los seres vivos.

11.4. Económicos:

- La simulación hidrológica permite realizar una cotización de los costos de proyectos de presas, regulación de cursos de agua, control de inundaciones y construcción de obras hidráulicas

12. PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO

Recursos	PRESUPUESTO PARA LA ELABORACIÓN DEL PROYECTO			
	Cantidad	Unidad	V. Unitario \$	Valor Total \$
Equipos (detallar)				
Computadora (uso)	1	1	800	800
Materiales y suministros (detallar)				
Cuaderno de campo	1		1.50	1.50
Lápiz	1		0.70	0.70
Material Bibliográfico y fotocopias. (detallar)				
Papel bond	2 paquetes		3.60	7,20
Impresiones	150		0,10	15
Anillado	4		1.50	6
Empastados	2	1	20	40
Gastos Varios (detallar)				
Instalada del software SWAT	1		10	10
Otros Recursos (detallar)				
			Sub Total	880.40
			12%	105.65
			TOTAL	986.05

13. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- * El Modelo Semidistribuido WEAP permite una simulación eficiente en la subcuenca del Río Patate, con un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.77 en la calibración para periodo 1995-2008 y 0.80 para la validación (2009-2014).

- * El modelo SWAT por el contrario presento una buena simulación, en calibración con un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.63 en la calibración para periodo 1995-2008 y 0.68 para la validación (2009-2014).

RECOMENDACIONES

- * No se recomienda el modelo semidistribuido SWAT para la subcuenca para el Río Patate

- * Para mayor eficiencia de los modelos semidistribuidos se recomienda la calibración y la validación con datos diarios

14. BIBLIOGRAFÍA

- Barrionuevo, M. (2009). Los Bosques Andinos y el agua. Obtenido de <http://www.asocam.org/biblioteca/files/original/b6a77b5786ffc08556b4861b514e76d6.pdf>
- Bladé, E. (2014). ESTIMACIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALIDA EN UNA CUENCA USANDO UN MODELO HIDROLÓGICO DISTRIBUIDO Y UN MODELO HIDRÁULICO BIDIMENSIONAL EN VOLÚMENES FINITOS. . Obtenido de <http://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/22709/informe%20propuesta%20de%20colaboraci%F3n%20internacional%20v%20final.pdf;jsessionid=E4573621A79DFF7074287122D3399D9D?sequence=1>
- Cabrera, J. (2012). Calibración de Modelos Hidrológicos. Obtenido de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Cacoango, J. (2014). MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO ILLANGAMA CON LA UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL “SWAT”. BOLÍVAR. Obtenido de [file:///C:/Users/Usuario/Documents/Downloads/T-UCE-0004-52%20\(1\).pdf](file:///C:/Users/Usuario/Documents/Downloads/T-UCE-0004-52%20(1).pdf)
- Cisneros, Y. (2016). Proyección de escenarios futuros utilizando el modelo hidrológico WEAP. Obtenido de <https://bdigital.zamorano.edu/bitstream/11036/5723/1/IAD-2016-T010.pdf>
- Duan, Gupta, & Sorooshian, &. (1993). Shuffled complex evolution approach for effective and efficient global minimization. Obtenido de <https://link.springer.com/article/10.1007/BF00939380>
- Espinoza. (2015). Evaluación de métodos hidrológicos para la completación de datos faltantes de precipitación en estaciones de la cuenca Jetepeque, Perú. Obtenido de <http://rte.espol.edu.ec/index.php/tecnologica/article/download/400/261>
- FAO. (2018). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Obtenido de <http://www.fao.org/soils-portal/about/definiciones/es/>
- Fernández, B. (2008). MODELO HIDROLOGICO DISTRIBUIDO PARA LA SIMULACION DE RECURSOS HIDRICOS. Obtenido de <https://repositorio.uc.cl/bitstream/handle/11534/1395/500517.pdf?sequence=1>
- Hidología. (2015). Obtenido de http://caminos.udc.es/info/asignaturas/grado_itop/415/pdfs/Capitulo%205.pdf

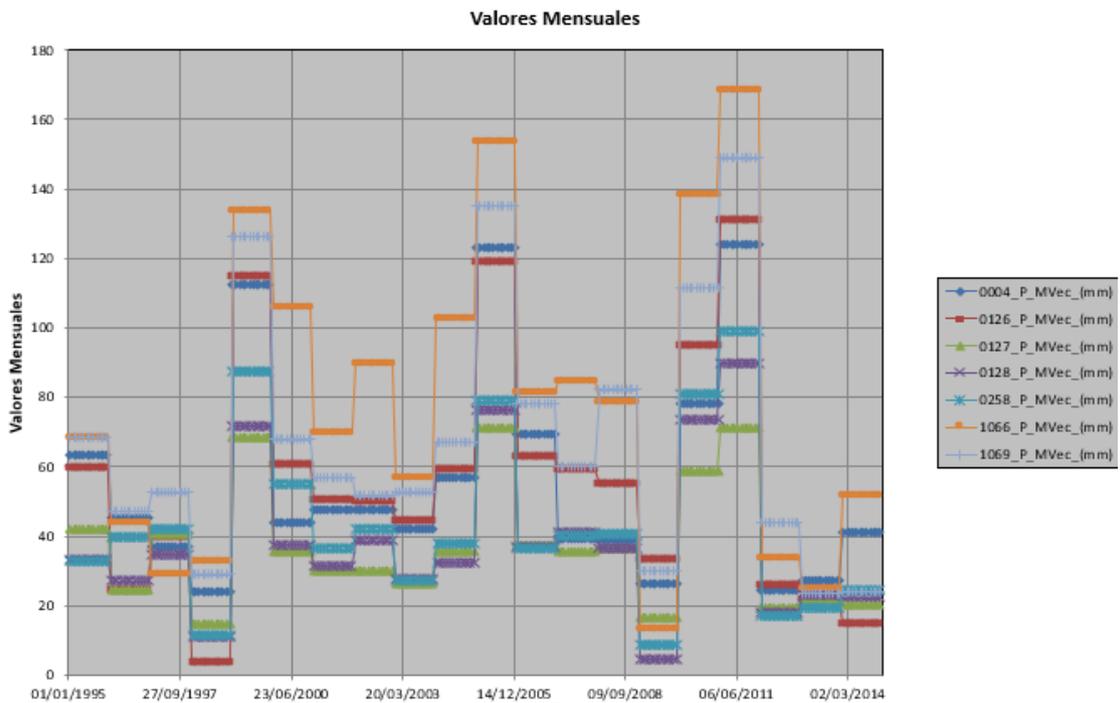
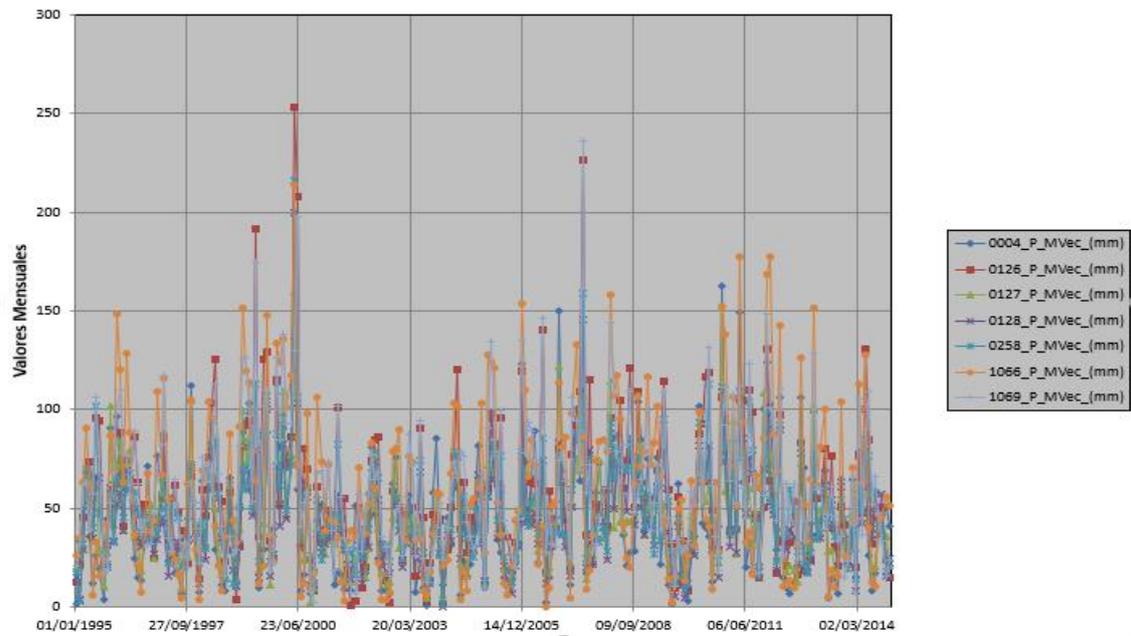
- Hidraulica. (2016). Obtenido de Significados: <https://www.significados.com/aforo/>
- Ibáñez, A. (2015). Métodos para la determinación del coeficiente de escorrentía. Obtenido de <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/10781/Coeficiente%20de%20escorrent%C3%ADa.pdf>
- INAMHI. (s.f.). Instituto Nacional de Meteorología y Hidrología. Obtenido de <http://www.serviciometeorologico.gob.ec/red-de-estaciones-meteorologicas/>
- INEGI. (2017). Instituto Nacional de Estadística y Geografía. Obtenido de <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/datosrelieve/continental/queesmde.aspx>
- Jiménez, F., Benegas, L., & Cervantes, J. F. (2009). Principios y criterios para la cogestión de cuencas Hidrográficas en América Tropical. Obtenido de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A4801E/A4801E.PDF>
- Knudsen, R. y. (1996). Validación de Modelos Hidrológicos. Obtenido de http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_3.pdf
- Lòpez, P. (2012). Calibraciòn del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jetepeque, Perú. Obtenido de <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2099.1/18380/Documento%20TFM.pdf>
- Lux, B. (2016). Conceptos básicos de Morfometría de Cuencas Hidrográficas. Obtenido de <http://www.repositorio.usac.edu.gt/4482/1/Conceptos%20b%C3%A1sicos%20de%20Morfometr%C3%ADa%20de%20Cuencas%20Hidrogr%C3%A1ficas.pdf>
- Mantovan, P., & Todini, E. (2006). Hydrological forecasting uncertainty assessment: Incoherence of the GLUE methodology. Obtenido de <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0022169406002162>
- Mena, S. (2010). Evolución de la Dinámica de los escurrimientos en zonas de Alta Montaña . Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/2503/1/CD-3253.pdf>
- Morán, C. (1996). Hidrología para estudiantes de Ingeniería Civil. Obtenido de CONCYTEC: <http://repositorio.pucp.edu.pe/index/bitstream/handle/123456789/28689/hidrologia.pdf>
- Ordoñez, J. (2011). SENAMHI. Obtenido de Sociedad Geográfica de Lima: http://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/cuenca_hidrologica.pdf

- Ramirez, J. (2015). Modelización de Recursos Hídricos con WEAP. Obtenido de http://www.cazalac.org/mwar_lac/fileadmin/imagenes2/Training_Andean_Hydrology/AndeanHydrology_presentations/PDF_modelo_WEAP_JRamirez.pdf
- Reitsma, R., Zigurs, I., Lewis, C., & Wilson, & V. (1996). Experiment with Simulation Models in Water-Resources Negotiations. Obtenido de <https://ascelibrary.org/doi/abs/10.1061/%28ASCE%290733-9496%281996%29122%3A1%2864%29>
- SARH. (2015). Secretaria de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Obtenido de <http://www.sagarpa.gob.mx/Delegaciones/jalisco/boletines/Paginas/2015B12009.aspx>
- USDA. (2014). Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Obtenido de https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs142p2_051546.pdf
- Vauchel, & Ilbay, &. (2017). Estimación de Datos faltantes de Precipitación en la Subcuenca del río Patate. Obtenido de <http://revistas.utm.edu.ec/index.php/Basedelaciencia/article/view/1079/976>
- Vicuña, Lema, & Plaza, &. (2009). Modelo WEAP. Obtenido de <http://bibdigital.epn.edu.ec/bitstream/15000/1780/1/CD-2366.pdf>
- Villon, M. (2002). CATIE. Obtenido de Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza: http://www.academia.edu/16705366/Calculos_hidrologicos_e_hidraulicos_Maximo_Villon
- Warnock. (2005). Calibración y Validación. Obtenido de https://www.researchgate.net/publication/48223873_Ajuste_de_la_produccion_de_agua_simulada_por_el_modelo_SWAT_y_analisis_de_sensibilidad_ante_caracteristicas_hidrologicas_del_suelo_en_una_cuenca_pequena_de_alta_pendiente
- Zuleta, C. (2013). Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Obtenido de <http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf>

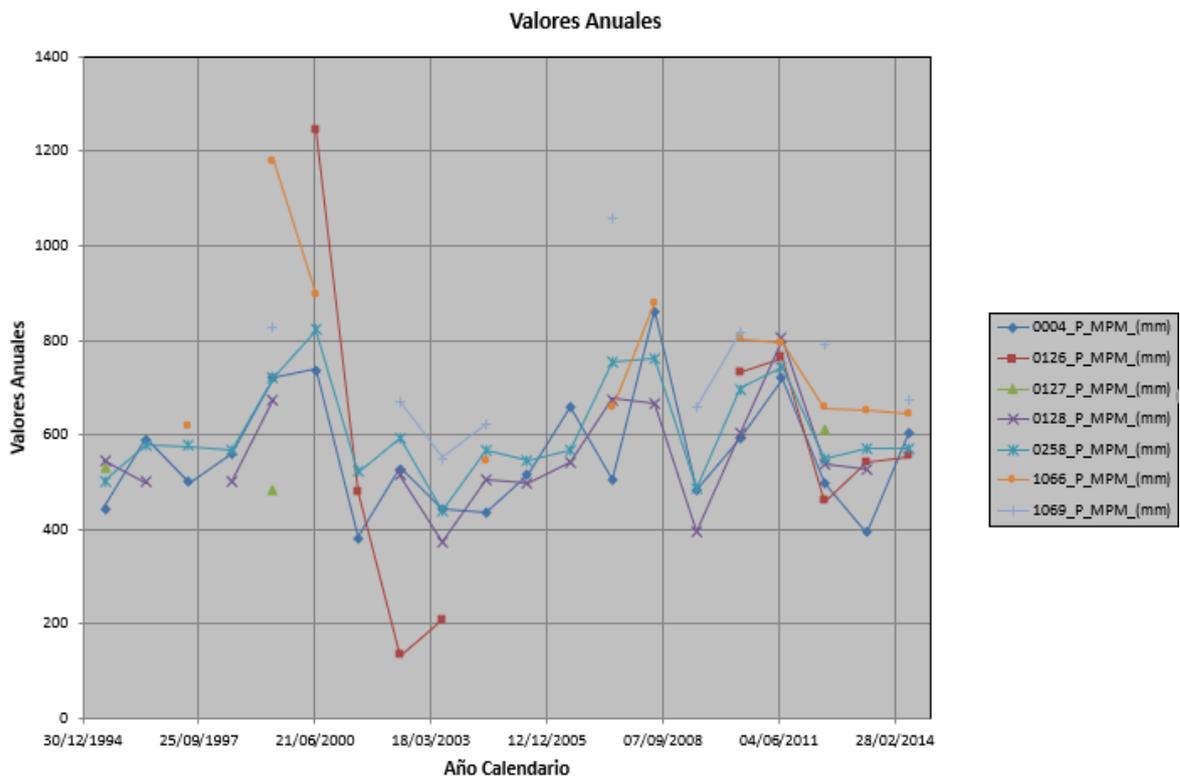
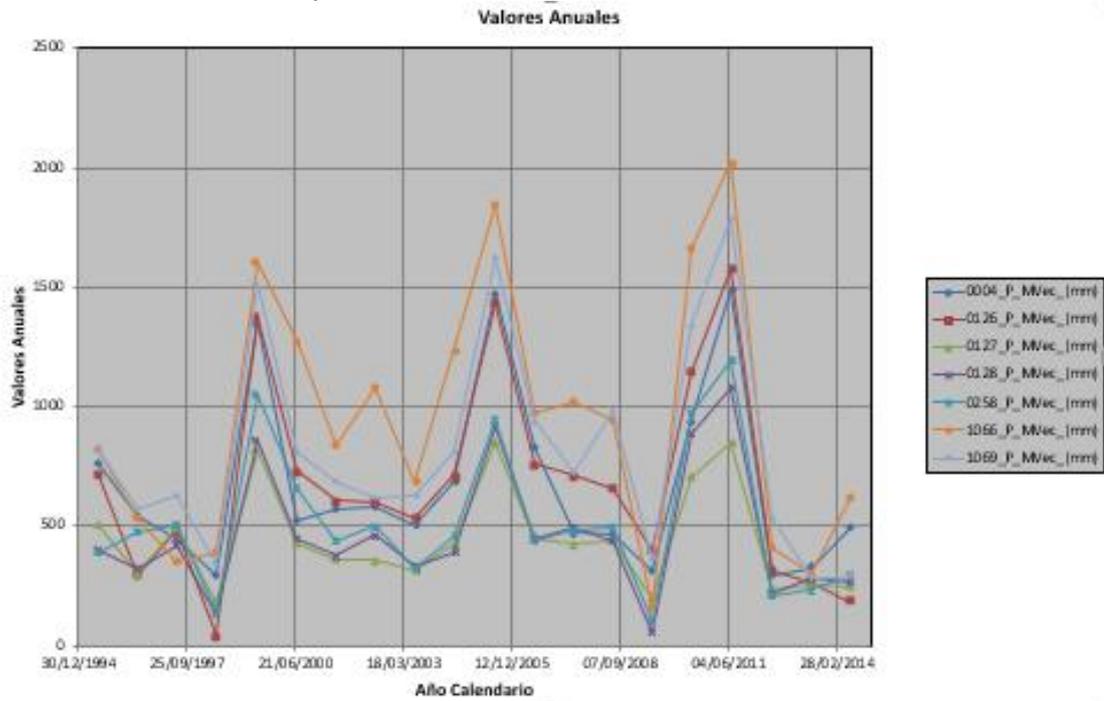
15. ANEXOS

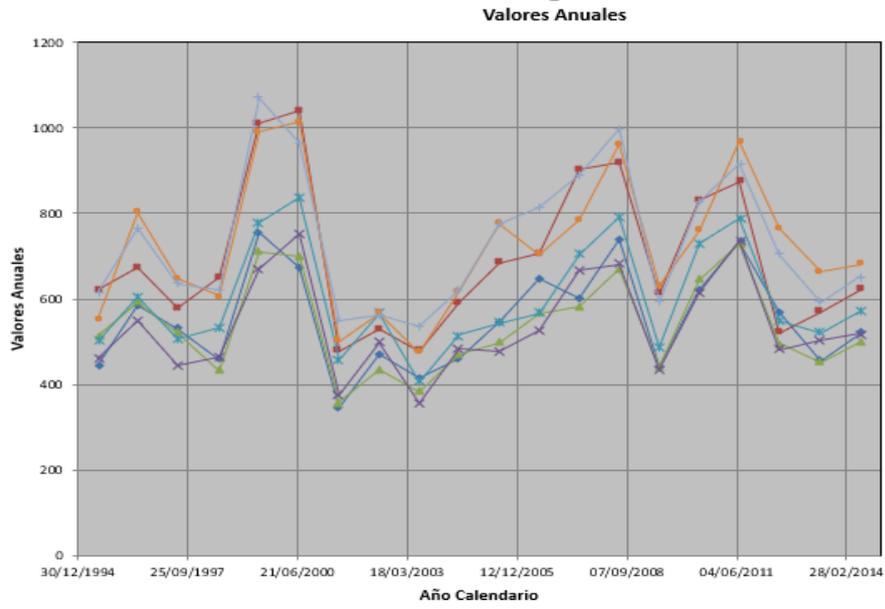
Anexo 1: Índices mensual y anual del Vector y de las estaciones (BrunetMoret)

Índices mensuales del Vector y de las Estaciones (BrunetMoret)



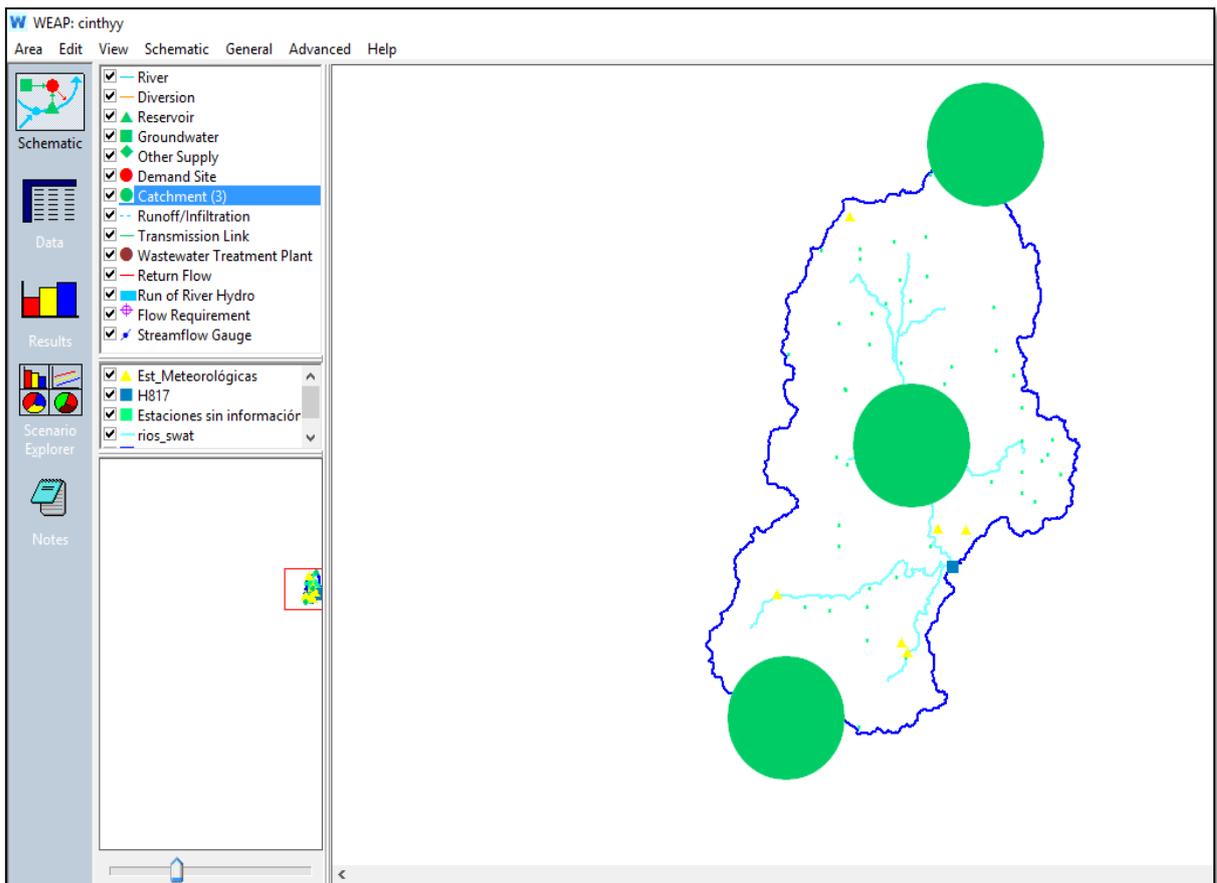
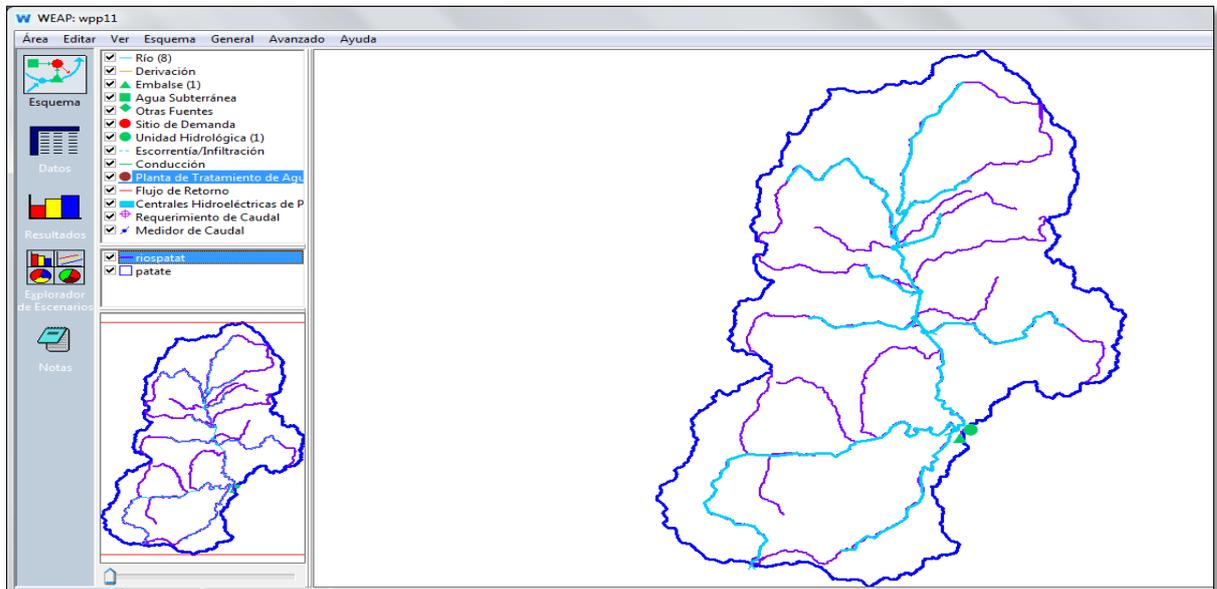
Índices anuales del Vector y de las Estaciones (BrunetMoret)





Anexo 2: Modelo Hidrológico WEAP

Modelo WEAP



Anexo 3: Hoja de vida**DATOS PERSONALES****APELLIDOS:** Oña Cando**NOMBRES:** Cinthya Gissela**ESTADO CIVIL:** Soltera**CÉDULA DE CIUDADANÍA:** 055001521-8**LUGAR Y FECHA DE NACIMIENTO:** Saquisilí, 15 de Marzo de 1995**DIRECCIÓN DOMICILIARIA:** Saquisilí**TELÉFONO CONVENCIONAL:** 2 721-456**CORREO ELECTRÓNICO:** cinthygissela@gmail.com**EN CASO DE EMERGENCIA CONTACTARSE CON:** Magdalena Oña**ESTUDIOS REALIZADOS Y TÍTULOS OBTENIDOS**

NIVEL	INSTITUCIÓN	FECHA
PRIMER	Escuela El vira Ortega	2001-2007
SEGUNDO	Instituto Tecnológico “Victoria Vásquez Cuvi”	2007-2012
TERCERO	Universidad Técnica de Cotopaxi	Actualmente

FORMACIONES ADICIONALES E INTERESES

2017: III Congreso Internacional de Ingeniería Ambiental, Forestal y Ecoturismo

Universidad Estatal de Quevedo

40 horas Académicas

2018: Manejo del SUIA

R&J Soluciones Ambientales

20 horas

.....

FIRMA