



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

“APLICACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA MICROCUENCA DEL RÍO
BOBO EN TRES ESCENARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y
SEDIMENTOS, PROVINCIA DEL CARCHI”

AUTORA

GEOVANA ESTEFANÍA JÁCOME TERÁN

DIRECTOR

MSc. Oscar Rosales

ASESORES

PhD. James Rodríguez

MSc. Tatiana Grijalva

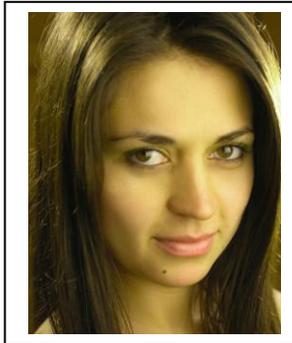
Ing. Elizabeth Velarde

**Ibarra – Ecuador
2016**

Lugar de investigación: Parroquia Tulcán, microcuenca del río Bobo

Carchi - Ecuador

HOJA DE VIDA



APELLIDOS: JÁCOME TERÁN

NOMBRES: GEOVANA ESTEFANÍA

C. CIUDADANIA: 100400822-1

TELÉFONO CONVENCIONAL: 0626533186

TELÉFONO CELULAR: 0979492031

E-mail: geovanajacome@hotmail.com

DIRECCIÓN:

Imbabura, Antonio Ante, Chaltura, calles Pablo Rivera y Obispo Mosquera.

FECHA DE DEFENSA DE TRABAJO DE GRADO: 20 de octubre del 2016

"APLICACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA MICROCUENCA DEL RÍO BOBO EN TRES ESCENARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS, PROVINCIA DEL CARCHI"

Formato de Registro Bibliográfico

JÁCOME TERÁN GEOVANA ESTEFANÍA "Aplicación del modelo SWAT en la microcuenca del río bobo en tres escenarios para la estimación de caudales y sedimentos, provincia del Carchi".

TRABAJO DE GRADO.

Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Universidad Técnica del Norte.
Carrera de Ingeniería en Recursos Naturales Renovables, Ibarra. EC. Noviembre del 2016.

DIRECTOR: MSc. Oscar Rosales

El modelo hidrológico SWAT fue diseñado por la Universidad de Texas y el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos para ser aplicado en cuencas hidrográficas cuyos fines son evaluar el efecto del uso y manejo del suelo sobre la calidad y régimen de las producciones de agua y sedimentos; en este estudio se empleó como una herramienta en la Interfaz de ArcGIS para estimar el caudal de agua y la producción de sedimentos en la microcuenca del río Bobo, provincia del Cachi para luego proponer proyectos de manejo del recurso hídrico, para el beneficio de la empresa EMELNORTE y los pobladores de dicha microcuenca.

Fecha: 20 de octubre del 2016


MSc. Oscar Rosales
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO


Jácome Terán Geovana Estefanía
AUTORA

APLICACIÓN DEL MODELO SWAT EN LA MICROCUENCA DEL RÍO BOBO EN TRES ESCENARIOS PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS, PROVINCIA DEL CARCHI

Geovana Jácome*¹, Oscar Rosales¹

¹Universidad Técnica del Norte

Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales Av. 17 de julio 5-21 y José Córdova, Ibarra-Ecuador Teléfono: 00593-6-2997800

*Autor correspondiente: e-mail: geovanajacome@hotmail.com

RESUMEN

En la microcuenca del río Bobo se evidencia en la parte alta se evidencia el aumento de la frontera agrícola y la disminución de la cobertura vegetal natural, en la parte media está ubicada la central hidroeléctrica San Miguel de Car y la Playa, en esta área hay presencia de bosque intervenido y bosque natural, el cual registra disminución en su superficie y en la parte baja se observa una extensión de cultivos como zanahoria, papa, haba, melloco y zonas semiurbanas. El objetivo de la presente investigación fue aplicar el modelo SWAT como una herramienta para el manejo del recurso hídrico en la microcuenca del río Bobo en la provincia del Carchi, mediante este modelo se compararon caudales y sedimentos en un periodo de 18 años, tomando en cuenta las variables tipo de suelo, pendientes, cobertura vegetal y clima, luego se proponen proyectos para el manejo del recurso hídrico. Los resultados obtenidos indicaron que para los sedimentos a medida que la cobertura vegetal disminuye a través del

tiempo, se observa que los sedimentos aumentan, siendo para el año 2002 de 0,06 Ton/ha/día, para el año 2015 de 0,45 Ton/ha/día, para el año 2020 de 0,55 Ton/ha/día, debido a que al no haber cobertura, las raíces de los árboles que son las que mantienen las partículas de suelo en su lugar, se desprenden y las tasas de pérdida de suelo aumentan significativamente. En cuanto a los caudales en el escenario actual (2015) se evidencia reducción de páramo, bosque y vegetación arbustiva, en comparación al escenario pasado (2002) y al no haber dicha cobertura, el agua de lluvia va directo al río, el caudal aumenta. Para el escenario futuro (2020) el caudal reducirá debido a que la precipitación será menor, e inclusive un estudio sobre calentamiento global, menciona que el aumento de temperatura en 1°C será igual a la reducción de caudal de agua en un 20%. Con los resultados obtenidos se plantea la propuesta de manejo del recurso hídrico para la microcuenca del río Bobo.

Palabras clave: Modelo SWAT, recurso hídrico.

SUMMARY

In the microbasin of the river Bobo is evidenced in the upper part evidences the increase of the agricultural frontier and the reduction of the natural vegetal cover, in the middle part is located the hydroelectric power station San Miguel de Car and the Beach, in this area there are Presence of intervened forest and natural forest, which shows decrease in its surface and in the lower part there is an extension of crops such as carrot, potato, bean, melloco and semi-urban areas. The objective of the present investigation was to apply the SWAT model as a tool for the management of the water resource in the microbasin of the Bobo River in the province of Carchi, using this model, comparing flows and sediments in a period of 18 years, taking into account The variables soil type, slopes, vegetation cover and climate, then propose projects for the management of the water resource. The results indicated that for sediments as the vegetation cover decreases over

time, it is observed that the sediments increase, being for the year 2002 of 0.06 Ton / ha / day, by the year 2015 of 0.45 Ton / ha / day, by 2020 of 0.55 Ton / ha / day, due to the lack of cover, the roots of the trees that hold the soil particles in place, Soil loss rates increase significantly. As for the flows in the current scenario (2015), there is a reduction of páramo, forest and shrub vegetation, compared to the past scenario (2002) and when there is no such cover, the rainwater goes directly to the river, the flow increases . For the future scenario (2020), the flow will reduce because the precipitation will be lower, including a study on global warming, mentions that the increase in temperature by 1 ° C will be equal to the reduction of water flow by 20%. With the results obtained is proposed the proposal of management of the water resource for the microbasin of the Bobo river.

Keywords: SWAT model, water resources.

INTRODUCCIÓN

Las centrales hidroeléctricas San Miguel de Car y La Playa, que generan energía eléctrica a la ciudad de Tulcán, incrementan los impactos antrópicos en la zona (Comunicación personal, 2015). Por lo tanto, solo mediante acciones pertinentes y eficaces se logrará reducir y mitigar los daños causados por procesos hidrológicos que se generan en

la microcuenca del río Bobo. Por otro lado, la empresa eléctrica EMELNORTE abastece de energía a gran parte de la población de Tulcán, con un alto predominio de consumidores residenciales, un alto porcentaje de usuarios comerciales y en menor grado de consumidores de tipo industrial (EMELNORTE, 1975). Debido a lo

anterior, la función de EMELNORTE es proteger el caudal de agua de los embalses, ya que si este se reduce la empresa tendría serios problemas con pérdidas de energía (EMELNORTE, 1975).

Actualmente, el deterioro de la microcuenca del río Bobo va en aumento, debido a que en los sitios aledaños al río se realizan actividades antrópicas como la agricultura y ganadería, las cuales generan efectos negativos (Com.pers, 2015). Dichas actividades ocasionan pérdida de suelo, acumulación de sedimentos en los embalses y captaciones de agua de las centrales San Miguel de Car y La Playa, que genera una disminución del caudal de agua.

En la parte alta de la microcuenca se evidencia el aumento de la frontera agrícola y la disminución de la cobertura vegetal natural (PDOT parroquia La Libertad, 2015). En la parte media de la microcuenca está ubicada la central hidroeléctrica San Miguel de Car y la Playa, en esta área hay presencia de bosque intervenido y bosque natural, el cual registra disminución en su superficie. En la parte baja se observa una extensión de cultivos como zanahoria, papa, haba, melloco y zonas semiurbanas (PDOT parroquia La Libertad, 2015). Esta actividad agrícola utiliza fertilizantes químicos que contienen nitrógeno y fósforo, los que provocan la eutrofización del agua. En síntesis, todos los factores anteriormente mencionados ocasionan la producción y acumulación gradual de sedimentos en la microcuenca (PDOT parroquia La Libertad, 2015).

En este contexto, se revisó literatura sobre investigaciones relacionadas al trabajo, la cual contribuyó en alcanzar los objetivos propuestos. Además, se realizaron salidas de campo que ayudaron a establecer puntos claves en donde se hicieron aforos de caudales y medición de infiltración de agua en el suelo, obteniendo datos que permitieron realizar la investigación. También, se empleó información proporcionada por el Gobierno Provincial del Carchi para conocer la vulnerabilidad y estado biofísico-ambiental del área de estudio.

Debido a la problemática anterior, el propósito de la investigación fue analizar el estado actual de la cobertura vegetal y caudales de la microcuenca del río Bobo, mediante la aplicación del modelo SWAT. Para ello se realizó una simulación hidrológica, lo que implicó analizar la escorrentía, precipitación y arrastre de sedimentos en la microcuenca durante un periodo de 18 años.

El estudio tuvo como objetivo calcular los caudales y sedimentos de la microcuenca del río Bobo, aplicando el modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA, por sus siglas en inglés) en conjunto con la Universidad de Texas (Arnold, *et al.*, 1998). De tal modo que esta investigación genera información clave, la cual contribuye en el mejoramiento de la calidad de vida de los habitantes de la microcuenca, ya que permite realizar acciones de protección del recurso hídrico, el cual ha registrado una progresiva disminución de su caudal y un incremento en el transporte de sedimentos.

El estudio permitió aportar información hidrológica clave desde aplicaciones técnicas hidrológicas para que entidades como el Gobierno Provincial del Carchi (GPC) y EMELNORTE cuenten con información actualizada de la microcuenca del río Bobo, la cual les permitirá realizar proyectos de manejo de la misma.

La propuesta de manejo del recurso hídrico se constituyó en una herramienta

de soporte para el Gobierno Provincial del Carchi, ya que las autoridades encargadas de la toma de decisiones podrán aplicar medidas ambientales para evitar que los sedimentos sigan en aumento y la disminución de caudales. Además el estudio es importante para los pobladores de la provincia del Carchi, ya que ellos se abastecen del recurso hídrico, ya sea para consumo, agricultura o uso de energía eléctrica.

MATERIALES

Caracterización del área de estudio

El área de estudio se localiza entre las parroquias de Tulcán, Tufiño, que pertenecen al cantón Tulcán, y las parroquias de San Gabriel, Chitan de Navarrete que pertenecen al cantón Montúfar de la provincia del Carchi. Tiene una superficie de 13068,72 hectáreas, altitudinalmente se ubica en el rango de 2880 a 3500 msnm. El mapa de ubicación de la microcuenca se observa en la figura 1.

Y

MÉTODOS

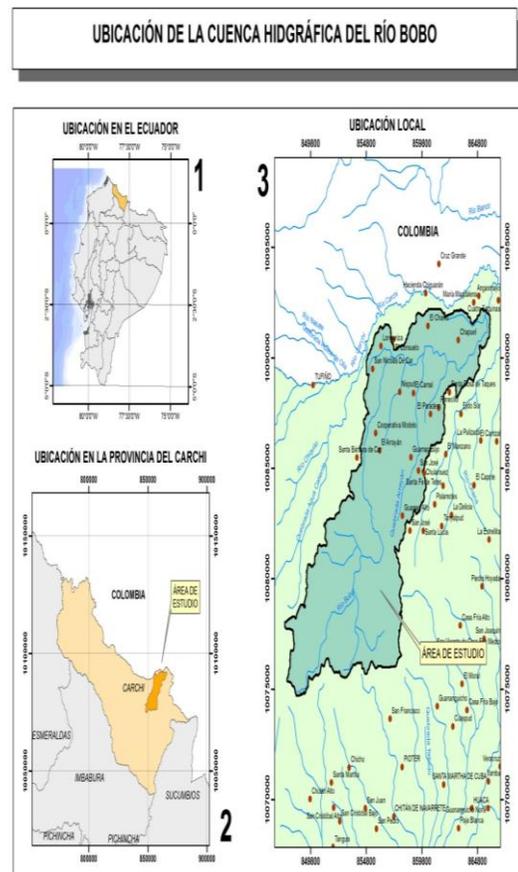


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Metodología

Se seleccionó información del Sistema Nacional de Información (SNI 2013), sobre los aspectos que influyen en la microcuenca como: clima, tipo de suelo y cobertura vegetal. En el análisis multitemporal se tomó en cuenta para el año 2002 (pasado) se usaron imágenes Landsat, para la cobertura vegetal 2015 (presente) se usó el shapefile (MAGAP, 2003), para la cobertura 2020 (futuro) se la hizo con algebra de mapas, en la cual se aplicó la herramienta raster calculator para sobreponer el mapa 2002, 2015, en el cual el criterio principal fue el predominio de las actividades antrópicas como cultivos y pastizal (Ponce, 2015); para la Aplicación del modelo SWAT se realizó lo siguiente: a) recopilar información cartográfica base como es de cobertura vegetal (2002, 2015, 2020), tipo de suelo, clima; b) estructurar y sistematizar la cartografía temática para el modelo, la cual consiste en cambiar a los códigos que requiere la base de datos del SWAT c) ingresar la información a la base de datos del SWAT, una vez realizado este procedimiento se procede a la simulación, posteriormente la calibración y validación con los datos de campo.

Para la calibración del modelo se utilizó los datos de la **Estación Hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán**, localizada dentro del área de estudio, con la finalidad de ajustar los datos hidrológicos de la microcuenca del río Bobo, para posteriormente comparar los datos simulados con los calibrados. Dicha

calibración se la hizo mediante SWAT Cup, el cual requirió datos de entrada como la ubicación de la estación hidrométrica dentro de la microcuenca (Watershed, Subbasin 3) es el número tres, además se ingresan los meses que tienen datos de caudal de la estación hidrométrica, el número total de subbasin en este caso son 17, luego calibramos el modelo y los datos de salida que nos da el SWAT Cup son Weather (Wgn), HRU (Hru), Groundwater (Gw), Management (Mgt) todas estas variables se las ingresa a Edit SWAT Input, Subbasins Data, en cada variable es necesario ingresar el número de Subbasin que es tres, la cobertura vegetal, tipo de suelo y la pendiente, una vez ingresadas estas variables se vuelve a correr el modelo. Además se realizó comparaciones entre caudales medidos y caudales modelados.

Para la validación se midieron en campo caudales y se midió la infiltración, para realizar esto fue necesario primero realizar la caracterización climática concediendo la época lluviosa y seca mediante el diagrama ombrotérmico, entonces se hizo la caracterización hídrica (Figura 2).



Figura 2. Medición de caudal

Para la propuesta de manejo del recurso hídrico se identificaron los aspectos físico, biológico y socioeconómico, que se detallaron en la caracterización biofísica e hídrica, luego se analizó esta información para identificar el problema en la microcuenca del río Bobo, de esta forma se realizó el árbol de problemas con efectos y causas, seguidamente se realizó el árbol de objetivos que es la transformación del árbol de problemas en aspectos positivos, luego se realizó el FODA (Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas), luego se elaboró la matriz de marco lógico que consistió en poner el programa, presupuesto referencial, Fuente de financiamiento, Tiempo de ejecución, Responsable de ejecución, y finalmente se añadió a cada programa una Justificación, Objetivo, Resultado, Actividades.

RESULTADOS

Caracterización del área

De acuerdo a los parámetros morfométricos de la microcuenca del río Bobo es de tamaño pequeña, tiene una longitud axial mediana, la microcuenca presenta una morfología escarpada, la forma es oval redonda a oval oblonga, el piso altitudinal premontano y subalpino.

Análisis Multitemporal

Los porcentajes obtenidos son con respecto al área de la microcuenca del río Bobo, el bosque se redujo entre el año 2002 y el 2015 en un 1,76%, entre el 2015 y el 2020 la disminución fue en un 0,03% fue reemplazado por pastizal y cultivos, el páramo disminuyó entre

los años 2002 y 2015 en un 13,94%, entre los años 2015 y 2020 la reducción fue de 2,38% sustituido por pastizal y cultivos, la vegetación arbustiva entre los años 2002 y 2015 se redujo en 4,23% en comparación a los años 2015 y 2020 que fue de 0,70%, esto se debe a que antes los cultivos fueron sembrados en sectores en donde había vegetación arbustiva, debido al crecimiento en expansión de los mismos, pero para el 2015 y 2020 se ve que los cultivos aumentan pero no drásticamente, debido a que a pesar de que la agricultura y ganadería son sus actividades centrales, muchos pobladores han emigrado a las ciudades, ya sea por estudio o por trabajo.

Los pastizales y cultivos aumentaron entre los años 2002 y 2015, siendo el porcentaje 3,70% y 2,79% respectivamente, y para los años 2015 y 2020 el aumento fue de 16,38% y 0,77%, estas coberturas aumentaron puesto que el ganado y los cultivos necesitaban más superficie, hasta alcanzar pendientes montañosas, el área poblada se mantuvo.

Aplicación del modelo SWAT

Se generaron tres escenarios pasado (2002), presente (2015), en este escenario se realizó la calibración y validación y futuro (2020), en cada uno se obtuvo caudales y sedimentos.

Calibración

Se la realizó para el escenario actual (2015), los datos simulados fueron calculados en SWAT, la calibración se la hizo usando los datos de la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán que se muestran en

el cuadro 1, se puede ver que en los meses de agosto, septiembre y octubre hubo una variación entre los caudales simulados y calibrados debido a que para la región interandina se provee probabilidades significativas de lluvias bajo las normales en la zona sur (Cañar, Azuay y Loja) y en el norte (Pichincha, Imbabura y Carchi). Según el VIII FORO CLIMÁTICO NACIONAL 2015 PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS TRIMESTRE AGOSTO – OCTUBRE 2015 (Indanza, 2015).

Mes	Caudal simulado (m ³ /s)	Caudal calibrado (m ³ /s)
Enero	4,67	2,71
Febrero	3,77	2,28
Marzo	3,11	2,43
Abril	2,73	2,40
Mayo	1,67	1,90
Junio	0,78	1,61
Julio	0,28	1,33
Agosto	0,21	1,14
Septiembre	0,06	0,88
Octubre	0,28	1,55
Noviembre	2,07	2,58
Diciembre	3,67	2,91

Cuadro 1. Caudales Simulados y Calibrados SWAT (2015)

Se compararon los caudales simulados con los medidos en la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán, cabe resaltar que los datos simulados se corrieron en el SWAT y se los calibraron en SWAT CUP, los valores simulados comparándolos con los calibrados se ajustan en un 82,28% a los valores reales, siendo éste el nivel de confiabilidad asignado en este estudio, además se realizó el modelo de regresión lineal en el cual se obtuvo R² igual a 0,8256 lo cual significa que la

confiabilidad es de un 82,56%, como se observa en el Figura 3.

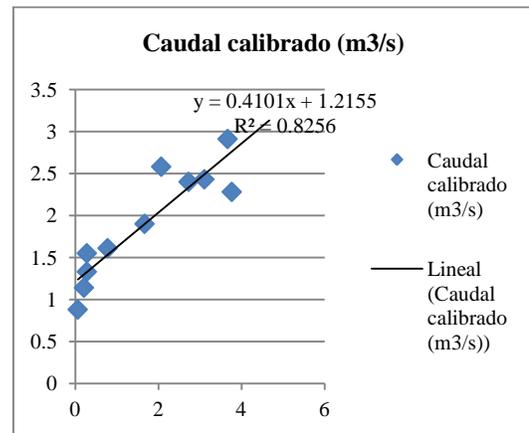


Figura 3. Regresión lineal para el caudal calibrado

Validación

Los aforos que se realizaron en cada punto fueron medidos dos veces tanto en la época lluviosa en el mes mayo y dos en la época seca en el mes de septiembre. En el cuadro 2 se observan los puntos de medición de caudales.

Puntos de Aforo	Método del flotador	Molinete	
	Época lluviosa	Época lluviosa	Época seca
P1 Captación Central Hidroeléctrica La Playa		3,31 m ³ /s	1,84m ³ /s
P2 Sección río Bobo Central Hidroeléctrica La Playa		2,33 m ³ /s	1,43m ³ /s
P3 Embalse San Miguel de Car	1,73 m ³ /s		1,33m ³ /s
P4 Captación Santa Bárbara de Car	0,75 m ³ /s		0,33m ³ /s
P5 Sección río Bobo Santa Bárbara de Car		1,26m ³ /s	0,50m ³ /s

Cuadro 2. Datos de caudales

Para la validación del modelo SWAT se usó la información de los datos tomados

en campo, estos puntos están dentro del área en donde se encuentra el punto de salida de la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán como se observa en el figura 4. Se comparan los datos de caudales de la Estación Hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán con los datos de caudales tomados en campo en cinco puntos, en el mes de Mayo correspondiente a la época lluviosa el caudal calibrado en la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán fue de $1,90 \text{ m}^3/\text{s}$ que se compara con el caudal medido en campo en el punto tres Embalse Central Hidroeléctrica San Miguel de Car el caudal es de $1,73 \text{ m}^3/\text{s}$, en el mes de Septiembre correspondiente a la época seca el caudal en el punto cinco fue de $0,50 \text{ m}^3/\text{s}$ y el calibrado en la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán fue de $0,88 \text{ m}^3/\text{s}$ y concluyendo que la eficacia del modelo SWAT es bastante confiable debido a que los datos obtenidos por el modelo se acercan bastante a la realidad.

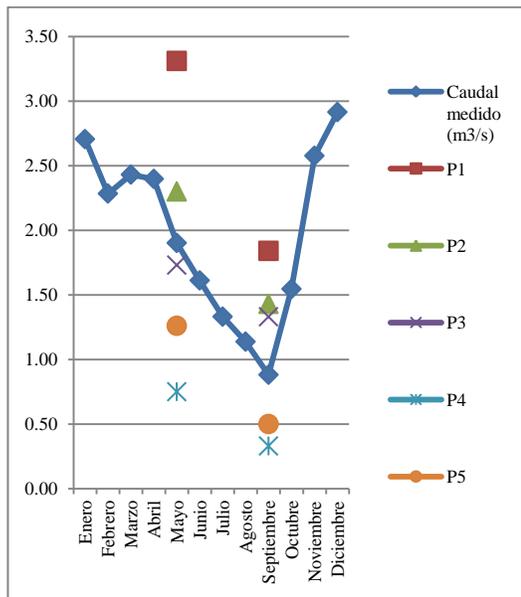


Figura 4. Validación del Modelo SWAT (2015)

Comparación de caudales

Se compararon los caudales de los años 2002, 2015, 2020, es decir, pasado, actual y futuro, en donde se aprecia que los caudales del 2002 fueron menores en comparación al 2015 y 2020, en el 2015 aumentaron y en el 2020 se fueron reduciendo, debido a que la cobertura vegetal tuvo mayor extensión en el año 2002, lo cual significa que el caudal fue menor en este año, ya que se infiltraba mayor agua en el suelo y la escorrentía era mucho menor, evitando que el agua vaya hacia el cauce. Como se observa en el cuadro 3.

Mes	Caudal (m³/s) 2002	Caudal (m³/s) 2015	Caudal (m³/s) 2020
Enero	1,67	2,71	2,37
Febrero	1,13	2,28	2,12
Marzo	1,71	2,43	2,16
Abril	1,71	2,40	2,12
Mayo	1,00	1,90	1,52
Junio	0,91	1,61	1,39
Julio	1,00	1,33	1,11
Agosto	0,55	1,14	0,93
Septiembre	0,65	0,88	0,69
Octubre	1,30	1,55	1,29
Noviembre	2,54	2,58	2,55
Diciembre	1,99	2,91	2,60
Promedio	1,35	1,98	1,74

Cuadro 3. Datos de Caudales para el año 2002, 2015, 2020

Al comparar los caudales del 2002 y 2015 se observa que a mayor caudal menor cobertura vegetal, debido a que en el año 2015 se evidencia reducción de páramo, bosque, vegetación arbustiva y al no haber dicha cobertura, el agua de lluvia va directo al río (Acuña, 2012).

Al comparar los años 2015 y 2020 se observa que a menor precipitación menor caudal, ya que a largo plazo el caudal reducirá pues la precipitación

será menor, además menciona un estudio sobre calentamiento global (Seris, 2016), que hasta el 2050 el aumento de temperatura en 1 °C será igual a la reducción de caudal de agua en un 20%. Como se indica en el cuadro 4.

Mes	Año 2015	Precipitación (mm)	Año 2020	Precipitación (mm)
Enero	2.71	92.06	2.37	85.2
Febrero	2.28	69.75	2.12	63.34
Marzo	2.43	96.68	2.16	92.01
Abril	2.40	113.31	2.12	93.21
Mayo	1.90	53.12	1.52	58.12
Junio	1.61	65.5	1.39	47.94
Julio	1.33	60.63	1.11	45.86
Agosto	1.14	36.66	0.93	27.75
Septiembre	0.88	16.92	0.69	22.92
Octubre	1.55	102.15	1.29	87.13
Noviembre	2.58	146.97	2.55	120.32
Diciembre	2.91	199.79	2.60	163.24
Promedio	1.98	87.80	1.74	75.59

Cuadro 4. Comparación de caudales

Comparación de sedimentos

Los sedimentos se calcularon para el año 2002, 2015 y 2020, observándose que en el mes de marzo, abril, noviembre, diciembre es en donde hay más precipitación y por ende mayor escorrentía existiendo mayor arrastre de sedimentos, a medida que la cobertura vegetal disminuye a través del tiempo, se observa que los sedimentos aumentan, debido a que al no haber cobertura, las raíces de los árboles que son las que mantienen las partículas de suelo en su lugar, se desprenden y las tasas de pérdida de suelo aumentan significativamente (Coppin & Richards, 1990), como se aprecia en el cuadro 5.

Mes	Sedimentos (Ton/ha) 2002	Sedimentos (Ton/ha) 2015	Sedimentos (Ton/ha) 2020
Enero	0.09	0.19	0.22
Febrero	0.07	0.09	0.13
Marzo	0.04	1.52	1.64
Abril	0.04	0.81	0.92
Mayo	0.04	0.06	0.14
Junio	0.01	0.03	0.08
Julio	0.01	0.07	0.17
Agosto	0.01	0.05	0.09
Septiembre	0.05	0.08	0.12
Octubre	0.04	0.06	0.15
Noviembre	0.22	0.92	1.21
Diciembre	0.08	1,55	1,76
Promedio	0.06	0.45	0.55

Cuadro 5. Datos de Sedimentos para los años 2002, 2015, 2020

En la microcuenca del río Bobo para el año 2002 tuvo una producción de sedimentos igual a 0,05833 Ton/ha/día. Transformando este valor a m³/km²/año, utilizando el valor de 1,3 gr/cm³ como la densidad aparente promedio de los suelos volcánicos, se obtiene que el aporte de sedimentos de la microcuenca del río Bobo es de 580,26 m³/km²/año, y de acuerdo a los datos del CIDIAT, 1995 esta microcuenca tiene una erosión mediana, para el año 2015 tiene una producción de sedimentos igual a 0,4525 Ton/ha/día y en m³/km²/año es de 4501,45 m³/km²/año, y de acuerdo a los datos del CIDIAT, 1995 esta microcuenca tiene una erosión muy alta, para el 2020 el promedio de sedimentos es de 0,5525 Ton/ha/día siendo 5496,25 m³/km²/año, representando una erosión muy alta, lo cual es preocupante ya que estos van aumentando y es necesario medidas de remediación.

Propuesta de manejo del recurso hídrico

6 se indican los proyectos que se proponen.

Para estructurar la propuesta de manejo se procedió a realizar el árbol de problemas para identificar el problema central que existe en la microcuenca del río Bobo, con sus respectivas causas en la parte superior y sus efectos en la parte inferior, luego se realizó el árbol de objetivos transformando el árbol de problemas en positivo, seguidamente se hizo un FODA, también una matriz con sus respectivos proyectos. En el cuadro

Variable	Programa	Proyecto	Nivel de ponderación	Priorización
Producción de agua y sedimentos	Programa de conservación del recurso hídrico	Proyecto de conservación del páramo y vegetación arbustiva	80	Primero
		Proyecto de conservación del recurso hídrico	74	Segundo
Socio-organizativo	Programa de participación activa a través de la parte social	Proyecto de educación ambiental	70	Tercero

Cuadro 6. Priorización de proyectos

CONCLUSIONES

- Dentro de la caracterización biofísica se generó información shapefile en formato compatible para Geodatabase a escala 1:50.000 y a escala 1:100.000 con información temática para cada mapa descrito en la metodología.
- Según el análisis multitemporal se evidenció que en las coberturas vegetales analizadas en el año 2002, 2015 y 2020, la cobertura vegetal que tuvo mayor cambio en área fue cultivos, siendo la superficie en el año 2002 fue de 612,02 ha y en el año 2015 fue de 2752,9 ha, en el año 2020 fue de 2852.9 ha, debido a que en el área de estudio de la microcuenca del río

Bobo la producción de papa, melloco, zanahoria, haba cada vez va en aumento.

- El bosque anualmente pierde 12,9 ha, el páramo fue la cobertura que más se perdió, al año se reduce 121,7 ha y la pérdida anual de vegetación arbustiva fue de 35,8 ha.
- Al ingresar las variables cobertura vegetal (2002, 2015, 2020), tipo de suelo y clima al SWAT, se obtuvo caudales para cada año, se observa que en el año 2002 el caudal de agua es menor $1,34\text{m}^3/\text{s}$, en comparación al año 2015, en el cual el caudal es de $1,98\text{m}^3/\text{s}$, en el 2020 el caudal será $1,74\text{m}^3/\text{s}$.
- El SWAT es un modelo que exige una información muy detallada para obtener resultados más exactos. Una de las variables de ingreso al SWAT en la que se puso mayor atención fue el clima debido a que no se cuenta con periodos históricos completos, esto obliga a duplicar esfuerzos y tiempo.
- Se generaron escenarios para el año 2002 en el que no se realizó calibración y validación debido a que no se tenía datos para este año en la estación hidrométrica Bobo planta eléctrica Tulcán, para el año 2015 se realizó la calibración y validación, la calibración se la hizo usando los datos de la estación hidrométrica Bobo Planta Eléctrica Tulcán, para la validación se tomaron en cuenta los datos medidos en campo, los calibrados se ajustan en un 82,28% a los valores reales, siendo éste el nivel de

confiabilidad asignado en este estudio, para el año 2020 se realizó la calibración pero no se hizo validación.

- Cuando las coberturas vegetales bosque, páramo, vegetación arbustiva van siendo remplazadas por cultivos, pastizales, a través del tiempo (2002, 2015, 2020), se concluye que la producción de sedimentos va aumentando, ya que el suelo pierde su capacidad de almacenar agua, produciendo mayor escorrentía, lo cual significa que existe arrastre de partículas del suelo.
- Los proyectos tienen presupuestos muy elevados, pero el más conveniente es el proyecto de educación ambiental, es por esto que se debe comprender que la comunidad es la parte más fuerte para la conservación del recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Arnold, J.G., S.L. Neitsch & Williams, J.R. (2010) *Soil and Water Assessment Tool User's Manual. Version 99.2.* lacklandResearch Center, Texas Agricultural Experimental Station. Temple, TX.
- Arnold, J., Srinivasin. R., Muttiah, R., & Williams J. (1998) *Large Area Hydrologic Modeling and Assessment: Part I. Model Development.* JAWRA 34 (1), pp.73-89.
- Aldás, J. (2013) *Estudio de variación de la cobertura vegetal y estado*

- actual del Cerro Imbabura aplicando herramientas GIS con fines de declaración de área protegida.* Universidad San Francisco de Quito, pp: 84-94.
- Arnold, J., Kiniry, J., Neitsch, S. (2010) *Conceptos básicos y guía para el usuario.* CIAT, p.11.
- Acuña, A. (2012) *Efectos de corto plazo de la restauración ecológica de bosques nativos en la provisión de los servicios ecosistémicos cantidad y calidad de agua, en cuencas forestales.* Universidad Austral de Chile. p.4.
- Brandizi, L., Labraga, J. (2000) *Calibración del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río salado, Provincia de buenos aires.* Centro Nacional Patagónico, p.4.
- Belmote, F., & Romero, A. (2006) *Medida de la evapotranspiración real en coberturas vegetales semiáridas (cuenca de Mula, Murcia), según las variaciones de humedad del suelo medidas mediante el procedimiento (TDR).* Papeles de Geografía, pp. 5-17.
- Burbano, N., Becerra, S., Gutiérrez, C. & Ramírez, J. (2003) *Estudio de Evaluación de Recurso Hídrico Superficial y Subterráneo del Cantón Tulcán.* INAMHI, MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS, pp. 5-53.
- Bakker, W. & Jansen, F. (2001) *Principles of Remote Sensing.* The Ntherlands.
- Boada, D., Moreno, R., Rojas, S. & Rendón, C. (2010) *Estudio para el Análisis Multitemporal y Prospectivo del Uso del Suelo de la Provincia del Carchi, para los periodos 1987, 2009 y 2030.* XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.
- Cisneros, C., Gavilanes, C., Valenzuela, P. & Proaño, M. (2006) *Aplicación del modelo Swat en la microcuenca del Río Ambato,* p. 26.
- Cadena, V. (2012) *Hablemos de riego.* Gobierno Autónomo Provincial del Carchi. Creadores Gráficos (1).
- Cacoango, J. (2014) *Modelamiento de la microcuenca del del Río Illangama con la utilización del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool “SWAT”, Provincia de Bolívar, Ecuador,* p.74.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe. (s/f). *Metodología Multicriterio para la Priorización y Evaluación de Proyectos.* Obtenido de https://www.google.com.ec/url?s a=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0CBwQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.cepa.org%2Ffiles%2Fnoticias%2Fpaginas%2F7%2F29837%2FMetodolog%25C3%25ADa_Multicriteriocompleta.ppt&ei=1uazVN6SBsiOsQTJtoCQDQ&usg=AFQjCNG6.
- Coppin, N. & Richards, I. (1990) *Use of vegetation in civil engineering.* CIRIA/Butterworths, London, p (64).
- EMELNORTE. (1975) *El Sistema Eléctrico de EMELNORTE S.A.*

- Fernández, I. (2000) *Análisis Visual de Imágenes obtenidas del sensor ETM+ Satélite Landsat*.
- FAO, 2005. *Situación Forestal en la Región de América Latina y el Caribe-2004*. Oficina. Regional para América latina y el Caribe. Santiago, Chile.
- Gómez, O. & Josuny, K. (2014) *Análisis Multitemporal en base a fotointerpretación de los movimientos de ladera en la ciudad de Loja*. Universidad Técnica Particular de Loja.
- Indanza, L. (2015) *VIII FORO CLIMÁTICO NACIONAL 2015 PERSPECTIVAS CLIMÁTICAS TRIMESTRE AGOSTO – OCTUBRE 2015*. INAMHI-Secretaría de Gestión de Riesgos.
- INIGEMM (2003) Realización de cartografía topográfica.
- INEC (2010) Instituto Nacional de Estadísticas y Censos.
- Jaramillo, D. (2002) *Introducción a la ciencia del suelo*. Universidad Nacional de Colombia, p.20.
- Jácome, D. & Narváez, F. (2012) *Propuesta De Plan De Manejo Del Recurso Hídrico En La Microcuenca Del Río Illangama, Subcuenca Del Río Chimbo, Provincia De Bolívar*. Universidad Técnica del Norte pp. (137-156).
- Lamprea, Y. (2011) *Estudio comparativo de modelos multiparamétricos de balance hídrico a nivel mensual en cuencas hidrográficas de Cundinamarca y Valle del Cauca*, p. 18.
- Linsley, Kohler & Paulhus. (1986) *Hydrology for Engineers*. 3rd ed. Cap.11.
- Leopold, L. B. & Maddock. T. (1953) *The Hydraulic Geometry of Stream Channels and Some Physiographic Implications*. U.S. Geol. Survey. Prof. Paper 282 – A. Denver, EUA.
- Livignstone, D. (1963) Chemical compositions of rivers and lakes. USGS Prof. p 440.
- Martínez, A., & Navarro. (1996) *Hidrología Forestal, El ciclo hidrológico*. Universidad de Valladolid. Valladolid, España, p (286).
- Marbello, R. (2008) *Hidrometría y Aforo de Corrientes Naturales*. Bogotá, p (20-80).
- MAGAP, (2003) *Plan Nacional de Riego y Drenaje 2012 -2027*. Subsecretaría de Riego y Drenaje, Quito- Ecuador.
- Nicks, A. (1974) *Generación estocástica de la ocurrencia, forma y localización de la cantidad máxima de lluvia diaria*. In: *Proc. Symp. Statistical Hydrology, Tucson, AZ. U.S. Gov. Print. Office, Washington, D.C.* pp: 154-171.
- PDOT parroquia La Libertad (2015) *Actualización del Plan de Desarrollo y Ordenamiento de la parroquia La Libertad*.
- Puyravaud, J. (2003) *Standardizing the calculation of the annual rate of*

- deforestation*. Forest Ecology and Management 177, 593-596.
- Pourrut, P. (1995) *El Agua en el Ecuador*. Instituto Nacional de Hidrología y Meteorología (INAMHI), Ministerio de Agricultura y Ganadería (MAG), p. 35.
- Ponce, M. (2015) *Influencia de la pérdida de cobertura vegetal en la vulnerabilidad y riesgos en el cantón Esmeraldas, provincia de Esmeraldas*. Universidad Técnica del Norte, pp:65-67.
- Proaño, M. (2006) *Aplicación del Modelo SWAT en la Subcuenca del Río Ambato*. Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN – GTZ. Ambato-Ecuador, p. 14.
- Pinilla, C. (1995) *Elementos de Teledetección*. Rama – Madrid.
- Proaño, M., Gavilanes, C., Cisneros, C. & Valenzuela, P. (2006) *Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del Río Ambato*. CODESAN. p.7.
- Palacios, V. (1986) *El uso de modelos en irrigación y áreas afines*, p (41-49).
- Pérez, K. (2007) *Estimación de la Oferta Hídrica en la cuenca alta del río Pita mediante el uso de herramientas Geoinformáticas*, ESPE. Ecuador. p.16.
- Ríos, N., Ibrahim, M., & Faustino, J. (2013) *Uso del modelo SWAT para estimar la producción de sedimentos en una cuenca dominada por Ganadería*. Costa Rica.
- Richardson, C., Bucks, D., & Sadlere (2008). *The Conservation Effects Assessment Project benchmark watersheds*. Synthesis of preliminary findings. Soil and Water Conservation Society. Pp. 590 – 604.
- Ritchie, J. (1972) *A model for predicting evaporation from a row crop with incomplete cover*. Water Resour. Res. 8: 1204- 1213.
- Rivas, G. (2001) *Abastecimiento de Agua Potable y Alcantarillados*. 2º Edición. Editorial Vegas, Caracas. p. 301.
- Rivadeneira, G. (2014) *Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento*. Asamblea Nacional de la República del Ecuador. Quito – Ecuador.
- Seris, A. (2016) *Calentamiento Global*. Universidad Georgia. México, p. 38.
- Sorooshian, S., H. V. Gupta, & L. A. Bastidas. (1998) *Calibration of hydrologic Model Using Multi-Objectives and Visualization Techniques*. Final Report on Project Proposal Number EAR-9418147. Department of Hydrology and Water Resources. University of Arizona, Tucson, p. 78.
- Syvitski, J.P., Morehead, M.D., Bahr, D.B. & Mulder, T.(2000) *Estimating fluvial sediment transport: The rating parameters*. Water Resources Research, 36 (9), pp. 2747-2760.
- Saxton, E. & Walter, R. (2009) *Soil Water Characteristics Hydraulic*

Properties. New York.
Disponible en:
[http://hydrolab.arsusda.gov/
soilwater/Index.htm](http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm).

- Valenzuela, P. (2005) *Aplicación del Modelo Hídrico Swat 99.2 para el análisis del impacto de la deforestación y del avance de la frontera agrícola en la producción y almacenamiento del recurso agua en las partes alta y media de la Subcuenca del Río San Pedro*. Escuela Politécnica del Ejército, pp. 28-106.
- Valencia, J., Zarate, H. (2012) *Secuencia de actividades para la construcción de una concepción cíclica y compleja del proceso: “ciclo del agua”*. Universidad del Valle, p. 18.
- Vélez, D. (2013) *Determinación de sedimentos en tres escenarios de uso del suelo en la Subcuenca del río Milagro, provincia del guayas, usando el modelo SWAT*. Tesis de Ingeniería Agrícola. Guayaquil. Universidad Agraria del Ecuador, Facultad de Ciencias Agrarias. p.90.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Dios que siempre me ha bendecido y me ha guiado para que esta meta se cumpla satisfactoriamente.

Al ingeniero Óscar Rosales, docente de la FICAYA y Director de esta investigación, con su colaboración continua mediante sus conocimientos ha

aportado certeramente para culminar con este trabajo.

A mis asesores la Ing. Elizabeth Velarde, MSc. Tatiana Grijalva y al PhD. James Rodríguez que con las respectivas recomendaciones encaminar a este trabajo a terminarlo adecuadamente.

A la Universidad Técnica del Norte que se constituyó en mi segundo hogar, durante mi periodo de estudio, brindando la oportunidad de enriquecerme de conocimientos.

A mis padres Tarquino y Mabel por todo su esfuerzo, amor, cuidado, apoyo incondicional y por encaminarme siempre por el camino del bien.