



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS AGROPECUARIAS Y AMBIENTALES

CARRERA DE INGENIERÍA EN RECURSOS NATURALES RENOVABLES

IDENTIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS DE CONSUMO HUMANO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO IRUBÍ, MEDIANTE EL MODELO SWAT Y PROPUESTA DE MANEJO DEL RECURSO

AUTORA

ELIANA REBECA PANTOJA IMBAQUINGO

DIRECTOR

Ing. Oscar Rosales, M.Sc.

ASESORES

Ing. Lourdes Yépez, M.Sc.
Ing. Tania Oña, M.Sc.
Biol. Renato Oquendo M.Sc.

**Ibarra – Ecuador
2016**

Lugar de investigación: Parroquia Apuela, microcuenca del río Irubí
Imbabura - Ecuador

HOJA DE VIDA



APELLIDOS: PANTOJA IMBAQUINGO

NOMBRES: ELIANA REBECA

C. CIUDADANIA: 040187049-8

TELÉFONO CONVENCIONAL: 062631043

TELÉFONO CELULAR: 0989961623

E-mail: elipantoja7@gmail.com

DIRECCIÓN:

Imbabura, Ibarra, Ciudadela Zoila Galarraga, calles Jorge Subía y Bayardo Tobar.

FECHA DE DEFENSA DE TRABAJO DE GRADO: 05 de julio del 2016

Formato de Registro Bibliográfico

PANTOJA IMBAQUINGO ELIANA REBECA "Identificación de los servicios ecosistémicos hídricos de consumo humano en la microcuenca del río Irubí, mediante el modelo SWAT y propuesta de manejo del recurso"

TRABAJO DE GRADO.


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

DIRECTOR: Ing. Oscar Rosales Ms.C.

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 con fines de 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 analizar la producción de agua de consumo humano, necesaria para abastecer a la comunidad de Irubí del cantón Cotacachi, provincia de Imbabura; y proponer las medidas más adecuadas para la conservación y manejo del recurso agua para el beneficio de los pobladores de la microcuenca del río Irubí.

Fecha: 05 de julio 2016


Msc. Oscar Rosales
DIRECTOR DE TRABAJO DE GRADO


Pantoja Imbaquingo Eliana Rebeca
AUTORA

IDENTIFICACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS HÍDRICOS DE CONSUMO HUMANO EN LA MICROCUENCA DEL RÍO IRUBÍ, MEDIANTE EL MODELO SWAT Y PROPUESTA DE MANEJO DEL RECURSO

Eliana Pantoja*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: elipantoja7@gmail.com

RESUMEN

El manejo adecuado del recurso hídrico es un tema que con el pasar del tiempo se ha hecho importante debido a que el agua es un elemento indispensable para la vida y subsistencia del ser humano. La microcuenca del río Irubí, forma parte de la Reserva Ecológica Cotacachi-Cayapas (RECC), esta es una zona altamente diversa y brinda muchos servicios ecosistémicos a la población, uno de ellos es el agua para consumo humano. A pesar de estar en un estado aceptable de conservación, ha presentado algunos impactos negativos que afectan al ecosistema; los más notorios son la disminución de la cobertura vegetal, erosión del suelo, disminución del caudal del río y arrastre de sedimentos; esto se da por las diferentes actividades antrópicas que se llevan a cabo en el área. Al conocer la problemática ambiental y social existente en la microcuenca, se aplicó la metodología basada principalmente en identificar los servicios ecosistémicos hídricos, y realizar una caracterización general de la zona tomando en cuenta los componentes bióticos, abióticos y socioeconómicos. Se procedió a realizar el modelo hidrológico SWAT que permite evaluar el efecto del uso y manejo del suelo sobre la calidad y régimen de la producción de

agua y sedimento, el que permitió analizar las variables que influyen en el recurso hídrico principalmente la simulación de caudales dentro de la microcuenca los mismos que fueron validados con los datos tomados en campo tanto para la época seca como para la época lluviosa. El modelo SWAT mostró un coeficiente de eficiencia de $R^2 = 0.75$ aplicando la fórmula de correlación y regresión lineal lo que indica ser aceptable y eficiente. Los resultados de caudales obtenidos en campo fueron para época seca con una cantidad de 1.58 m³/s y en época lluviosa con 2.48 m³/s. con gran similitud a los caudales simulados con el modelo. Se demostró que los caudales simulados son diferentes para el año 2009 que existe menor cantidad de caudal con una cantidad promedio de 0.77 m³/s en comparación con el año 2013 que registró un caudal promedio de 1.09 m³/s. Además, se obtuvo información climática, hidrológica y de cobertura vegetal de la microcuenca ayudando así a la generación de las estrategias, proyectos y actividades necesarias para un manejo adecuado del agua enfocado a conservación, mitigación y protección del recurso hídrico enfocado en cumplir el marco legal vigente.

Palabras clave: Modelo SWAT, recurso hídrico, Agua de consumo humano, servicios ecosistémicos.

SUMMARY

Proper management of water resources is an issue that over time has become important because water is essential for life and human subsistence element. Irubi the watershed of the river, is part of the Cotacachi-Cayapas Ecological Reserve (CCER), this is a highly diverse area and provides many ecosystem services to the population, one of them is water for human consumption. Despite being in an acceptable condition, it has presented some negative impacts affecting the ecosystem; the most notorious are the reduction of vegetation cover, soil erosion, reduced river flow and sediment transport; this is given by the various anthropic activities carried out in the area. By knowing the existing environmental and social problems in the watershed, mainly based methodology to identify ecosystem services was applied, and an overall characterization of the area taking into account the biotic, abiotic and socioeconomic components. He proceeded to make the SWAT hydrological model to evaluate the effect of the use and soil management on the

quality and rate of production of water and sediment, which allowed the analysis of the variables that influence water resources mainly simulating flows in microwatershed the same as were validated with field data taken in both the dry season to the rainy season. The SWAT model showed efficiency coefficient $R^2 = 0.75$ applying the formula of correlation and linear regression indicating acceptable and efficient. The results obtained in the field of flow were to dry season with an amount of $1.58 \text{ m}^3 / \text{s}$ and in the rainy season with $2.48 \text{ m}^3 / \text{s}$. with great similarity to the flow simulated with the model. It was shown that the simulated flows are different for 2009 there is less amount of flow with an average amount of $0.77 \text{ m}^3 / \text{s}$ compared to 2013 which recorded an average flow of $1.09 \text{ m}^3 / \text{s}$. Besides climate, water and vegetation cover of the watershed information it was obtained thereby helping the generation of strategies, projects and activities necessary for proper water management focused on conservation, mitigation and protection of water resources focused on meeting the current legal framework.

Keywords: SWAT model, water resources, water for human consumption, ecosystem services.

INTRODUCCIÓN

El estudio sobre servicios ecosistémicos se ha ido fortaleciendo en los últimos años y según (Guerrero, De Keizer, & Córdoba, 2006) “Se lo ha tomado como una estrategia para mejorar la gestión del recurso, promoviendo así la conservación y el uso sustentable” en este caso conlleva a un enfoque de gestión del agua, que

implica el uso adecuado del recurso sin afectar el bienestar social.

En la presente investigación se realizó una identificación y modelamiento hidrológico de los servicios ecosistémicos, relacionados con el agua de consumo

humano en la microcuenca del río Irubí, que se encuentra ubicada en la zona de Intag, en la parroquia Apuela, perteneciente al cantón Cotacachi. Este trabajo forma parte del proyecto de investigación “Valoración ecológico-económica de los servicios ecosistémicos hídricos en condiciones de cambio climático en los ecosistemas tropicales andinos y amazónicos del Ecuador” (V5E), ejecutado en su primera fase en el Cantón Cotacachi bajo un acuerdo inter-institucional entre la Universidad Técnica del Norte y el Gobierno Autónomo Descentralizado del Cantón Cotacachi y con el apoyo financiero del Proyecto Prometeo de la Secretaría de Educación Superior, Ciencia, Tecnología e Innovación (SENESCYT).

Tomando en cuenta la problemática existente, después de identificar y analizar dichos servicios y obtener los resultados de caudal y sedimentos por medio del modelamiento hidrológico SWAT, se elaboró una propuesta para el manejo adecuado del recurso agua encaminada a la conservación del mismo. La microcuenca del río Irubí posee un gran valor ecológico al encontrarse en la zona de Intag “La cual se extiende por dos de las 34 áreas biológicas más importantes del mundo” (Kocian, Batker, & Harrison-Cox, 2011) estos son hot spots del Chocó y Andes Tropicales. La finalidad del presente estudio es generar información básica de la microcuenca, para beneficiarse así de los servicios ecosistémicos que abastece a la población.

Con el pasar de los años se ha ido desarrollando una conciencia de que el planeta es un ecosistema único, en el cual, cualquier acción o impacto que los seres humanos generan, conlleva a formar un deterioro y repercute en la Tierra, uno de los temas que más se ha tomado en cuenta es el aumento de la temperatura media del

planeta estos, abarca muchos aspectos relevantes que afectan directamente a la humanidad, como lo es el deterioro de los recursos naturales muy indispensables para la supervivencia de la especie humana. De aquí entonces, se puede señalar que el recurso natural hídrico es un factor indispensable para diversas actividades socio-económicas y sobre todo para el consumo humano.

La parte alta del río Irubí, se encuentra dentro de la Reserva Ecológica Cotacachi Cayapas (RECC), esta es una zona con alta diversidad biológica que brinda muchos servicios a la población, uno de ellos es el agua para consumo, que a pesar de ser abundante en este tipo de ecosistemas no está siendo manejado adecuadamente, algunos de los impactos más notorios de la zona se presentan con la disminución de la cobertura vegetal causada por la deforestación y extracción de madera. “En la región Vertiente Occidental Andina la tasa de deforestación es de 7574.8 has/año” (SIMCE, 2011)

En la microcuenca media se realizan varias actividades económicas, entre ellas las más sobresaliente son la agricultura y ganadería que están afectando en gran magnitud por la existencia de sobrepastoreo y monocultivos que provocan la erosión del suelo. En esta zona, se encuentran también áreas rurales, que están creciendo rápidamente, esto implica una mayor demanda de agua de calidad en dichos asentamientos; además, el avance de la frontera agrícola, el arrastre de sedimentos y la variación del caudal del agua en la zona, afecta directamente la disponibilidad del recurso hídrico, y en si a la población que lo utiliza.

Manejar adecuadamente el recurso hídrico es un tema que se ha hecho importante con el pasar de los años, dada la gran problemática que la degradación de este

recurso representa para la humanidad, es por esta razón que el manejo de los recursos hídricos constituye una vía eficaz para aprovechar sustentablemente estos recursos y los servicios ecosistémicos. Tomando en cuenta el avance científico sobre el conocimiento de ecosistemas y servicios ecosistémicos en general, se puede afirmar la importancia de estos estudios en cuencas hidrográficas, referentes al agua de consumo humano. No obstante, dichos estudios en el área de bosque andino son casi inexistentes.

Al conocer la problemática ambiental y social existente en la microcuenca del río Irubí, se aplicó un modelamiento hidrológico con el fin de evaluar el efecto

del uso y manejo del suelo sobre la calidad y cantidad de la producción de agua y sedimento, el que permitió analizar las variables principales como son caudales y aporte de sedimentos que influyen en gran magnitud en el recurso hídrico para consumo humano; además al identificar los servicios ecosistémicos, y realizar una caracterización general de la zona se logró realizar una propuesta de manejo que contiene las principales alternativas y soluciones para el uso adecuado de los recursos hídricos utilizados para consumo humano, ayudando así a mejorar la calidad de vida de la población que se encuentra dentro del área de estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Caracterización del área de estudio

La microcuenca del río Irubí políticamente se encuentra en la provincia de Imbabura, cantón Cotacachi, parroquia Apuela (Figura 1). Las microcuencas altitudinalmente se encuentra en el rango

de 1 960-4 880 msnm, la superficie total es de 7 738,61 hectáreas, la principal vía de acceso es por la parroquia Apuela con un tiempo estimado de 1 hora. Existen dos poblados el de Guamirla y el más conocido el poblado de Irubí.

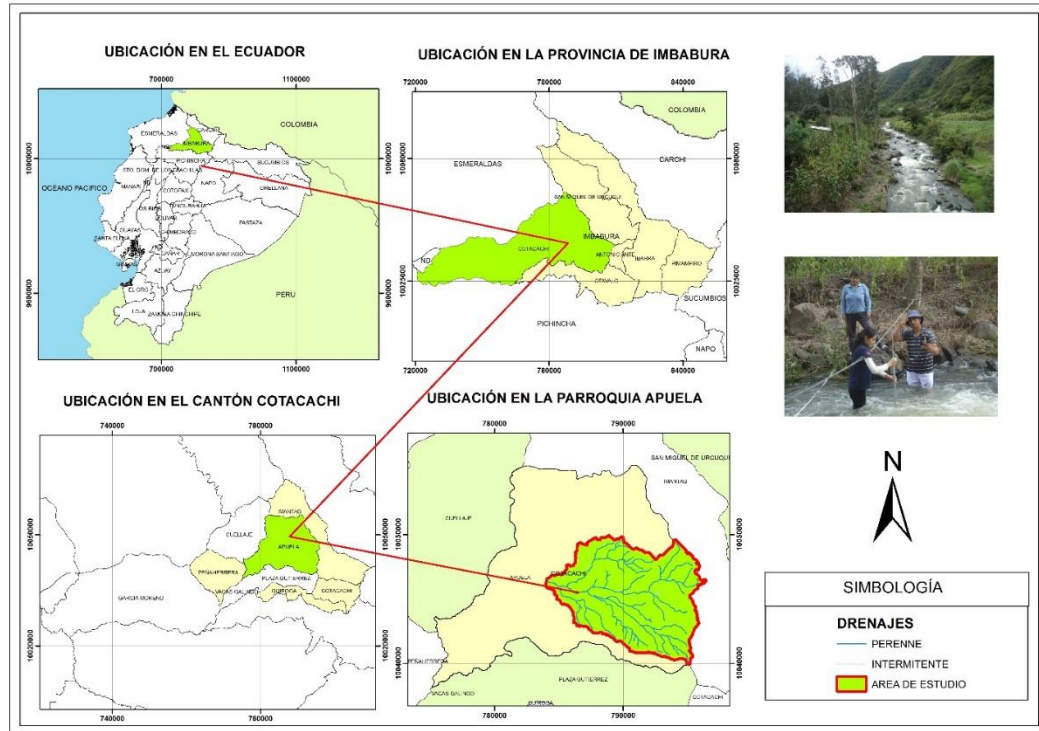


Figura 1. Ubicación del área de estudio

Metodología

Se recopiló información del Sistema Nacional de Información (SNI 2013), estudios e investigaciones realizadas en el área de estudio sobre los aspectos que influyen en la microcuenca como: clima, hidrología y cobertura vegetal. Para el clima se obtuvo datos de las estaciones de Apuela, Inguincho y Otavalo; del Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología (INAMHI 2013), para identificar los aspectos hidrológicos se utilizó cartografía temática, y se realizó un análisis de cantidad de agua, oferta y demanda; la cobertura vegetal fue caracterizada por medio de salidas de campo y con el uso de cartografía temática obtenida del (SIN, 2013). Además, se realizó una recopilación y digitalización de cartografía temática.

Luego de obtenida la información se aplicó el modelo hidrológico SWAT, que permite evaluar cómo afecta el uso del suelo sobre la producción de agua y sedimentos. Este modelo requiere información de uso del suelo, tipos de suelo, pendientes y datos climáticos. Se ingresó variables climáticas de las estaciones de Apuela, Otavalo e Inguincho que se encuentran cerca al área de estudio; igualmente se ingresó información sobre texturas del suelo; para la reclasificación del uso del suelo se utilizó la base de datos del modelo.

Para la calibración del modelo se utilizó la interface SWAT-CUP mediante el algoritmo SUFI-2; la validación se la realizó por medio de la utilización de las fórmulas de correlación y regresión lineal en la cual la R^2 que debe acercarse

a la unidad para mostrar una mayor efectividad. La validación y calibración se la realiza utilizando datos tomados en campo, para obtener estos datos se realizó aforos durante siete meses tomando en cuenta la época seca y la época lluviosa para obtener información real sobre caudales (Figura 2).



Figura 2. Medición de caudal

La propuesta de manejo del recurso hídrico presentada en este trabajo se la realiza en base a los resultados obtenidos de la caracterización del área, de los resultados obtenidos mediante el modelo SWAT, y a la priorización de Fortalezas, Oportunidades, Debilidades y Amenazas que se determinó en el FODA, considerando estos datos como una fotografía de la situación actual de la microcuenca; permitiendo así realizar comparaciones posteriores se procedió a elaborar una propuesta de manejo para el mantenimiento de los servicios ecosistémicos en la microcuenca, en base al uso del agua, oferta y disponibilidad del recurso. Esta propuesta está orientada a prevención, mitigación, protección y conservación del agua.

La elaboración de esta propuesta para un uso sustentable del agua fue dirigida hacia las comunidades que se encuentran dentro del área de estudio las cuales se

abastecen del recurso, también para las entidades responsables y encargadas de su conservación y control. La propuesta fue elaborada en el siguiente proceso esquemático:

- a) Se definió los datos generales de la propuesta, su cobertura y localización.
- b) Se realizó un diagnóstico general de los problemas y conflictos actuales en la calidad y cantidad de agua para consumo humano en la microcuenca del río Irubí.
- c) Por medio de una matriz FODA se definió las estrategias.
- d) Se identificó a los implicados en el manejo del recurso hídrico, tanto los beneficiarios, como los agentes contaminantes y las entidades responsables y encargadas de su conservación y control.
- e) Se enlistó las estrategias de ejecución que contienen los proyectos que serán elaborados en relación a los impactos negativos ya determinados.
- f) Con el objetivo planteado se definieron las actividades que den soluciones en cada proyecto, considerando medidas de protección, conservación y prevención, que con el apoyo de los beneficiarios y los responsables del cumplimiento puedan ser alcanzados.

RESULTADOS

Caracterización del área

Los aspectos que influyeron en los resultados del estudio fueron: clima, hidrología y cobertura vegetal.

Aspectos climáticos

Los factores climáticos que influyen en la microcuenca son la temperatura y la precipitación. Los datos de la estación Apuela-Intag muestran que el mes con mayor precipitación es febrero con una cantidad de 287.10 mm y el mes con menor precipitación es agosto con 6.78 mm. De la estación de Inguincho se obtuvo que la mayor cantidad de precipitaciones se muestran en el mes de marzo; con una cantidad de 174.05 mm y la más baja en el mes de julio con 20.83 mm; mientras que la temperatura media es de 10.34 °C. De la estación de Otavalo, se encontró que la cantidad más alta de precipitación fue de 120.60 mm en el mes de enero, la más baja en el mes de mayo con 19.28 y la temperatura media fue de 14 °C.

Se encontró dos tipos de clima en el área de estudio, ecuatorial de alta montaña que ocupa un área de 6379.54 hectáreas con un porcentaje de 82.44% y ecuatorial mesotérmico semi-húmedo con un área de 1359.07 con un porcentaje de 17.56%

Aspectos hidrológicos

La microcuenca cuenta con 11 drenajes menores y en promedio genera una cantidad de escorrentía superficial de 2.22 m³/s (2226.01 l/s) Para definir la oferta de agua se debe considerar la época seca y la época lluviosa. Para la época seca se obtuvo un caudal de 1,58 m³/s; la microcuenca cuenta con un caudal ecológico de 1,49 m³/s; esto quiere decir que en esta época se puede aprovechar un caudal de 0,079 m³/s (6825,6 m³/d).

Para la época lluviosa el caudal medio es de 2.48 m³/s (214272 m³/d), considerando el caudal ecológico antes mencionado, se cuenta con un caudal aprovechable de 0,99 m³/s (85536 m³/d). Dentro de la microcuenca se encuentran dos comunidades que son Irubí y Guamirla con un total de 240 personas. Según la encuesta Nacional de empleo, desempleo y subempleo realizada por el (INEC, 2012) en la provincia de Imbabura cada persona consume diariamente una cantidad de 170 litros de agua; es así que en la microcuenca del río Irubí se consume diariamente la cantidad de 42500 l/día (42,5 m³/d).

Para definir la demanda de agua dentro de la microcuenca en época seca se tomó el caudal aprovechable menos el caudal a ser consumido obteniendo un caudal sobrante de 6738,1 m³/d. Para la época lluviosa se encontró un excedente de 85493,5 m³/d.

Cobertura vegetal

De acuerdo al análisis de vegetación se identificaron cinco clases que son bosque con un área de 2755.55 has, tierra agropecuaria con 1870.32 has, vegetación arbustiva con 3046.97 has, cuerpos de agua con 4.30 has y otras áreas con 61.45 hectáreas.

Modelamiento hidrológico SWAT

Resultados de caudales

La cantidad de caudal es un servicio ecosistémico de aprovisionamiento y al ser el tema principal la cantidad de agua para consumo humano, el presente trabajo se enfocó en profundizar el análisis del parámetro caudal; este

parámetro se lo simuló para el periodo 2009-2013 como se muestra en el (cuadro 1)

MES	2009	2010	2011	2012	2013
ENE	0.64	3.94	0.55	1.66	0.64
FEB	2.12	3.13	0.90	1.97	0.74
MAR	1.43	1.98	1.32	1.24	1.59
ABR	1.01	1.71	3.43	0.91	1.71
MAY	0.60	1.22	2.68	0.52	1.75
JUN	0.28	0.58	1.47	0.21	0.90
JUL	0.18	0.53	0.74	0.16	0.45
AGO	0.13	0.33	0.16	0.07	0.26
SEP	0.14	0.13	0.17	0.13	0.96
OCT	0.14	0.07	0.07	0.25	0.61
NOV	0.34	0.02	0.04	0.32	0.39
DIC	1.26	0.87	0.30	1.21	0.54

Cuadro 1. Caudales simulados con SWAT

Los modelos hidrológicos están sujetos a errores, los cuales pueden ser aleatorios o sistemáticos, y que los análisis de la media, desviación estándar y coeficiente de determinación no son suficientes para poder detectarlos (Aitken, 1973). Para definir la eficiencia del modelo se utilizó la fórmula de regresión y correlación R^2 que muestra que tan eficaces pueden llegar a ser los resultados de un modelamiento. Después de aplicar el análisis de correlación, entre los caudales simulados y observados, se obtuvo un $R^2=0.35$ con lo cual se encuentra que no existe una correlación suficiente entre los caudales observados y caudales simulados (ver figura 3).

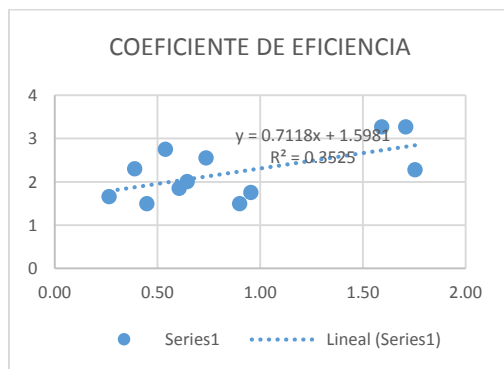


Figura 3. Coeficiente de eficiencia de caudales simulados por SWAT

Autores como (Galván, et al, 2007) sostienen que el modelo SWAT constituye una buena herramienta para representar registros históricos de caudal y simular resultados, aunque lógicamente la exactitud dependerá de la calidad de la información de ingreso. En el presente estudio se tuvo un limitado acceso a información sobre todo climática, ya que el modelo requiere que por lo menos una estación meteorológica se encuentre dentro del área de estudio, en este caso ninguna de las estaciones cumple con este requerimiento, es por esta razón que la eficiencia del modelo sin calibración fue baja, dando un $R^2= 0.35$; por lo tanto, este estudio está de acuerdo con la afirmación realizada por Galván.

Calibración y validación

Para (Wagener, Wheeler, & Gupta, 2004) la calibración de un modelo como SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre los datos observados y simulados, mediante el cambio de los parámetros de mayor influencia; mientras que la validación consiste en medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación de caudales calculados y observados para un período determinado. Tomando en cuenta lo que sostienen los autores antes mencionados se procedió a realizar la calibración y validación del modelo a través de los escurrimientos medidos in situ; los mismos que se registraron por medio de aforos en el área de estudio, dicha calibración ayudó a mejorar el ajuste de los datos simulados y se aproximaron a la realidad de la microcuenca.

La calibración se realizó utilizando la interface SWAT-CUP, se ejecutaron 100 simulaciones de las cuales la que se

ajustó a la realidad fue la simulación número 18. Luego de reemplazar los datos iniciales de SWAT por los datos calibrados se obtuvo los resultados en (m^3/s) que se muestran a continuación en el cuadro 2.

MES	2009	2010	2011	2012	2013
ENE	1.77	0.69	0.47	2.25	1.70
FEB	2.15	0.80	1.98	2.12	1.88
MAR	1.26	1.72	3.08	2.30	2.19
ABR	0.96	1.85	2.34	1.51	1.63
MAY	0.54	1.89	2.21	1.28	1.42
JUN	0.21	0.97	0.92	0.44	0.62
JUL	0.18	0.48	0.43	0.25	0.41
AGO	0.08	0.28	0.12	0.14	0.25
SEP	0.14	1.03	0.06	0.13	0.29
OCT	0.29	0.65	0.51	0.10	0.43
NOV	0.33	0.42	0.65	1.70	0.70
DIC	1.31	0.58	1.66	1.39	1.54

Cuadro 2. Caudales calibrados en m^3/s

Una vez obtenidos los datos de caudales ya calibrados, se procedió a analizar las variaciones y cambios que ha existido para los diferentes años de estudio. Poniendo énfasis en la pregunta de investigación planteada en este estudio, el análisis se enfocó en los años 2009 y 2013. Los servicios ecosistémicos hídricos simulados por el modelo son diferentes en el año 2009 que en promedio mostró un caudal total de $0.77 m^3/s$ en comparación con el año 2013 que mostró un caudal promedio de $1.09 m^3/s$.

La diferenciación en los caudales simulados por el modelo para los años antes mencionados se da, porque al momento de realizar la calibración se utilizó datos reales, obtenidos mediante aforos en el área de estudio, estos caudales reales fueron tomados en el año 2014, es por esta razón que los caudales simulados para el año 2013 son mayores y se encuentran más cercanos a la

realidad a comparación con los resultados del año 2009 ya que tiene mayores años de diferencia.

Medición de caudales

Para realizar la validación del modelo se procedió a utilizar los datos de aforos realizados en campo para ser comparados con los datos simulados y definir qué tan correlacionados se encuentran. Para definir los caudales de la microcuenca realizó la medición de caudales de los meses de enero, febrero, marzo, julio agosto, octubre y diciembre.

Para la época seca se realizó las mediciones en los meses de julio y agosto obteniendo un caudal de $1.49 m^3/s$ y $1.65 m^3/s$ respectivamente con una velocidad media de $0.50 m/s$ para el mes de julio y $0.60 m/s$ en el mes de agosto. Para la época con mayor cantidad de lluvia se tomó los meses de octubre, diciembre, enero, febrero y marzo; y se pudo observar que los meses con mayor caudal son marzo con una cantidad de $3.26 m^3/s$ seguido de diciembre con un caudal de $2.75 m^3/s$ con una velocidad media de $0.62 m/s$ y $0.69 m/s$ respectivamente.

Después de obtener los datos aforados con ayuda de molinete electrónico se procedió de la misma manera que con los resultados obtenidos por el modelo sin calibración, se realizó el análisis de eficiencia de los caudales ya calibrados y se obtuvo un $R^2 = 0.75$ como indica la figura 4; lo que mostró que los resultados del modelo mejoran considerablemente después de aplicar el método de calibración.

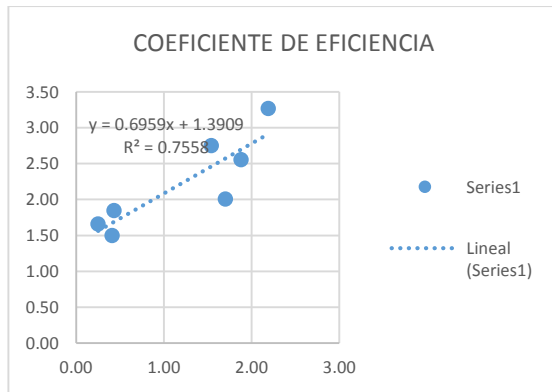


Figura 4. Coeficiente de eficiencia de caudales calibrados.

Resultados de sedimentos

En la microcuenca del río Irubí se pudo observar los siguientes resultados en la producción de sedimentos. En el cuadro 3, se observa el aporte de sedimentos en la microcuenca en t/has. Los meses con mayor cantidad de sedimentos son enero, febrero, marzo y abril; mientras que los meses de junio, julio, agosto y octubre muestran una producción baja; esto se debe a la variación en la cantidad de lluvias dentro de la microcuenca.

Mes	Sedimentos (t/has)
Ene	1.02
Feb	2.39
Mar	2.74
Abr	3.53
May	0.81
Jun	0
Jul	0.01
Ago	0.01
Sep	1.51
Oct	0.01
Nov	0.04
Dic	0.12

Cuadro 3. Producción de sedimentos.

La microcuenca del río Irubí, en promedio genera un total de 0.99 t/has según la modelación realizada por

SWAT. La FAO ha definido criterios para la valoración de los riesgos de erosión y se indican en el cuadro 4.

Clase	Riesgos de erosión	Riesgo de erosión actual t/ha
1	Baja	0-12
2	Moderada	12-24
3	Alta	24-50
4	Muy alta	>50

Cuadro 4. Criterios para la valoración de los riesgos de erosión

Fuente: (FAO , 1985)

Analizando dichos criterios se determinó que la microcuenca del río Irubí muestra una erosión ecológica normal, ya que se encuentra en el rango de 0-12 con un riesgo de erosión bajo.

Propuesta de manejo del recurso hídrico

Una vez obtenidos los resultados de la caracterización del área de estudio y la aplicación del modelo SWAT, se ha determinado las estrategias para el correcto desarrollo sostenible del agua dentro de la microcuenca.

El área de estudio se encuentra ubicada en la provincia de Imbabura, cantón Cotacachi, parroquia Apuela. La mayor parte de la microcuenca del río Irubí ha sido intervenida para diferentes actividades como agricultura y ganadería, por esta razón la vegetación nativa fue desplazada por cultivos anuales, de ciclo corto y pastizales generando un cambio en la cobertura vegetal y a su vez alterando el ciclo hidrológico. Las estrategias establecidas se muestran en el cuadro 5.

Estrategias	Proyectos	Actividades	Normativa Vigente
Estrategia 1: Prevención y mitigación.	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de recuperación de espacios degradados. 	<ul style="list-style-type: none"> Forestación y reforestación. Protección de espacios en proceso de regeneración. 	<ul style="list-style-type: none"> Plan Nacional Forestal 2012. Acuerdo ministerial O65 del Ministerio del Ambiente.
	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de Conservación de la cobertura vegetal 	<ul style="list-style-type: none"> Protección de áreas en buen estado de conservación. 	<ul style="list-style-type: none"> Constitución Política del Ecuador. Objetivo 7 del Plan Nacional del Buen Vivir.
	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de uso y aprovechamiento adecuado del agua. 	<ul style="list-style-type: none"> Protección física del área de las fuentes principales de abastecimiento de agua. 	<ul style="list-style-type: none"> Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente
Estrategia 2: Educación ambiental.	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de Señalización de la fuente de captación de agua de consumo. 	<ul style="list-style-type: none"> Obtención de señalización Señalizar las áreas prioritarias de donde se obtiene el agua para consumo humano. 	<ul style="list-style-type: none"> Artículo 12 de la Ley orgánica de recursos hídricos, usos y aprovechamiento del agua
	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de buenas prácticas ambientales. 	<ul style="list-style-type: none"> Talleres de capacitación. 	<ul style="list-style-type: none"> Art. 209 de la Reforma del Libro VI del Texto Unificado de Legislación Secundaria de Medio Ambiente
	<ul style="list-style-type: none"> Proyecto de socialización de la propuesta de manejo del recurso Hídrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Taller de socialización de propuesta de manejo del recurso hídrico. 	<ul style="list-style-type: none"> Constitución Política de la República del Ecuador

Cuadro 5. Propuesta de manejo del recurso hídrico

CONCLUSIONES

- El área de estudio tiene un rango de precipitación media anual de 1000-1100 mm, la temperatura media es de 10 °C, cuenta con 11 drenajes de tipo perenne y la cobertura vegetal predominante corresponde a vegetación arbustiva.
- Los servicios ecosistémicos hídricos simulados por el modelo son diferentes en el año 2009 que en promedio registró un caudal total de 0.77 m³/s en comparación con el año 2013 que registró un caudal promedio de 1.09 m³/s.
- El modelo mostró un ajuste del coeficiente de eficiencia satisfactorio para la microcuenca del río Irubí, graficando los datos simulados y medidos y aplicando la fórmula de correlación y regresión lineal con un valor de 0,75; concluyendo que no se presentaron errores sistemáticos y que se obtuvo un buen ajuste entre datos simulados y medidos.
- La calibración del modelo es esencial como herramienta de trabajo para la obtención de resultados cercanos a la realidad sobre todo para caudales que sirvieron para la generación de la propuesta de manejo de la microcuenca.
- Después de tomar en cuenta la cantidad de agua para consumo humano, la microcuenca genera un caudal excedente de 6738,1 m³/d en época seca y para la época lluviosa se encontró un caudal de 85493,5 m³/d que puede ser aprovechado en diferentes proyectos del recurso hídrico.

BIBLIOGRAFÍA

- Abbaspour, K., Johnson, C., & M, V. G. (2004). Estimating uncertain flow and transport parameters using a sequential uncertainty fitting procedure. *Vadose Zone*, 1340-1352.
- Achinelli, M., Perucca, R., & Ligier, H. (2010). Valoración de servicios ecosistémicos. Evaluación multicriterio para la zonificación del servicio ecosistémico en el macrosistema Iberá: Amortiguación hídrica. Argentina: Instituto Nacional de Tecnología Agraria.
- Aitken, A. (1973). Assessing systematic errors in rainfall-runoff. *J. Hydrology*, 20: 121-136.
- Balvanera, P., & Cotler, H. (2009). Estado y tendencias de los servicios ecosistémicos, en *Capital natural de México*, vol. II: Estado de conservación y tendencias de cambio. CONABIO, 185-245.
- Benites, A., Campos, J., Faustino, J., Villalobos, R., & Madrigal, R. (2007). Identificación de servicios ecosistémicos como base para el manejo participativo de los recursos naturales en la cuenca del río Otún. *Recursos Naturales y Ambiente*, (55), 83-90.
- CIAT. (2010). SWAT. Conceptos básicos y guía rápida para el usuario.
- FAO. (2009). Monitoreo y Evaluación de los Recursos Forestales Nacionales – Manual para la

- recolección integrada de datos de campo. Versión 2.2. Documento de Trabajo de Monitoreo y Evaluación de los recursos Forestales Nacionales, NFMA 37/S. Roma.
- Fernández, A., & Mortier, C. (2005). Evaluación de la condición del agua para consumo humano en Latinoamérica. Universidad de Buenos Aires. Buenos Aires.
- Galván, L., Olías, M., Fernández de Villarán, R., & Domingo-Santos, J. (2007). Aplicación del modelo hidrológico SWAT a la cuenca del río Meca (Huelva, España). *Geogaceta*, 63-66.
- Guerrero, E., De Keizer, O., & Córdoba, R. (2006). La Aplicación del Enfoque Ecosistémico en la Gestión de los recursos Hídricos. Quito, Ecuador: Editorial Fraga.
- Hurtado, J. (2012). Informe preliminar de avances en la modelación Hidrológica de balance década 2002 - 2012 en Torno al proyecto de geodinámica. Secretaría de Gestión de Riesgos. Ecuador.
- Imbach, P., Molina, L., Locatelli, B., Poupard, O., Ciais, P., Corrales, L., & Mahe, G. (2010). Climatology- based regional modeling of potential vegetation and average annual long-term runoff for Mesoamerica . *Hydrology and Earth System Sciences*, 1-17.
- INEC. (2012). Encuesta Nacional de Empleo, Desempleo y Subempleo – ENEMDU, Módulo de Información Ambiental en Hogares. Ecuador.
- Kocian, M., Batker, D., & Harrison-Cox, J. (2011). Estudio ecológico de la región de Intag, Ecuador: Impactos ambientales y recompensas potenciales de la minería. *Earth Economics*, Tacoma, WA, Estados Unidos.
- Millennium Ecosystem Assessment. (2005). *Ecosystems and Human Well-being: Biodiversity Synthesis*. Washington, DC.
- Ministerio de Medio Ambiente y Recursos Naturales. (2010). *Conceptos básicos de cuencas*. El Salvador.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., & Williams, J. (2005). *Soil Water Assesment Tool (SWAT)*. Documentación teórica. Texas, Usa.
- Oñate, F., & Aguilar, G. (2010). *APLICACIÓN DEL MODELO SWAT PARA LA ESTIMACIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS EN LA CUENCA ALTA DEL RIO CATAMAYO*. Universidad Técnica Particular de Loja. Loja, Ecuador.
- Plan Nacional del Buen Vivir. (2013). *Plan Nacional del Buen Vivir 2013 - 2017*. Quito, Ecuador.
- Pourrut, P., Róvere, O., Romo, I., & Villacrés, H. (1992). *CLIMAS DE ECUADOR*. Ecuador.
- PRESIDENCIA DE LA REPÚBLICA DEL ECUADOR. (2003). *Texto unificado de legislación secundaria del Ministerio del Ambiente*. Quito.

- Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., & Cisneros, C. (2006). Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. . Ecuador.
- Quesada, R. (2007). Los Bosques de Costa Rica. IX Congreso Nacional de Ciencias. Cartago, Costa Rica : . Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Saxton, Keith, E., & Rauls, W. (14 de Noviembre de 2009). Obtenido de Soil Water Characteristics, Hydraulic Properties: <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>
- SGR. (2012). INFORME PRELIMINAR DE AVANCES EN LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA DE BALANCE (DÉCADA 2002 - 2012) EN TORNO AL PROYECTO DE GEODINÁMICA. Quito, Ecuador.
- Silva, O. (2002). Evaluación de los componentes de erosión de los modelos EPIC y WEPP y de producción de agua del modelo SWAT en condiciones de sabana y altas pendientes. Universidad Central de Venezuela. Maracay.
- SIMCE. (26 de Abril de 2011). Obtenido de <http://simce.ambiente.gob.ec>
- Tapia, J. (2012). MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA DE UN ÁREA EXPERIMENTAL EN LA CEUNCA DEL RÍO GUAYAS EN LA PRODUCCIÓN DE CAUDALES Y SEDIMENTOS: UNIVERSIDAD NACIONAL DE LA PLATA. La Plata, Argentina.
- Torres, E., Mejía, E., Cortés, J., Palacios, E., & Exebio, A. (2005). Adaptación de un modelo de simulación hidrológica a la cuenca del río Laja, Guanajuato, México. . Agrociencia, 481-490.
- Torres, E; Fernández, D; Oropeza, J; Mejía, E. (2004). CALIBRACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT EN LA CUENCA "EL TEJOCOTE" ATLACOMULCO, ESTADO DE MÉXICO. TERRA Latinoamericana, 437-444.
- Umaña, E. (2002). Educación ambiental con enfoque en manejo cuencas y prevención de desastres. Universidad Nacional Agraria. Facultad de Recursos Naturales y del Ambiente. Nicaragua.
- 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. Quito, Ecuador.
- Villegas, J. (2004). Análisis del conocimiento en la relación agua-suelo-vegetación para el departamento de Antioquia. Revista EIA, 73-79.
- Wagener, T., Wheeler, H., & Gupta, H. (2004). Rainfall-Runoff

Modelling in Gauged and Ungauged Cathment, Imperial College Press. Londres.

tropicales andinos y amazónicos del Ecuador (V5E), especialmente a la Dra. Leonith Hinojosa que aportado en gran magnitud a mi investigación con sus conocimientos y consejos.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer a mi director de trabajo de grado el Ing. Oscar Rosales que me guió con paciencia y dedicación, a mis asesores Ing. Tania Oña, Ing. Lourdes Yépez y Biol. Renato Oquendo; que siempre estuvieron prestos a colaborar con su tiempo y conocimientos en todas las etapas de mi trabajo.

De igual manera agradezco al equipo del Proyecto Prometeo Valoración ecológico- económica de los servicios ecosistemicos hídricos en condiciones de cambio climático en los ecosistemas

Agradezco también a mi compañero Jonathan, por haber sido mi mano derecha durante todo este tiempo, por su ayuda desinteresada, por darme una palabra de aliento cuando la necesité, por colaborar en cada etapa de este trabajo; agradezco no solo la ayuda brindada sino el tiempo compartido y su entrañable cariño.

Quiero agradecer al Ing. Paul Arias por su aporte en la realización del modelo hidrológico. A todos quienes de una u otra forma colaboraron en la culminación de este trabajo, muchas gracias.