

**UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE CIENCIAS AGRÍCOLAS
CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**

**MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA
UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER
ASSESSMENT TOOL-SWAT-, BOLIVAR.**

**TESIS DE GRADO PREVIA A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO AGRÓNOMO**

CARLOS EDUARDO VILLACRÉS ROCHA

QUITO - ECUADOR

2015

DEDICATORIA

A Dios, mi madre, mi padre, mis hermanos,
sobrinos y toda mi familia.

AGRADECIMIENTO.

A Dios, que ha movido todo para que esto sea posible, a mi familia que ha apoyado y ha motivado la culminación de esta investigación. A Carlos Montúfar, tutor y amigo por su paciencia y ayuda, a mis amigos que siempre han estado pendientes, a los maestros de la Facultad y a la Universidad Central.

AUTORIZACIÓN DE LA AUTORÍA INTELECTUAL.

Yo, CARLOS EDUARDO VILLACRÉS ROCHA, en calidad de autor de la investigación de tesis realizada con el tema "MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSTENT TOOL – SWAT-. BOLÍVAR." "MODELING OF DEL ALUMBRE RIVER MICRO-BASIN WITH THE USE OF HYDROLOGICAL MODEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL –SWAT-, BOLIVAR PROVINCE, ECUADOR" autorizo hacer uso de todos los contenidos que me pertenecen o parte de los que contiene esta obra, con fines estrictamente académicos o de investigación.

Los derechos que como autor me corresponden, con excepción de la presente autorización seguirán vigentes a mi favor, de conformidad con lo establecido en los artículos 5, 6, 8, 19 y demás pertinentes de la ley de Propiedad Intelectual y su Reglamento.

Tumbaco, 7 de agosto de 2015



Villacrés Rocha Carlos Eduardo

C.C. 1714406145

Email: cevillacres@outlook.com

CERTIFICACIÓN

En calidad de tutor del trabajo de graduación cuyo título es: ““MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL –SWAT-. BOLÍVAR” presentado por el señor CARLOS EDUARDO VILLACRÉS ROCHA, certifico haber revisado y corregido, por lo que apruebo el mismo.

Tumbaco, 7 de agosto de 2015.



Ing. Agr. Carlos Montúfar M. Sc.

Tutor.

Tumbaco, 7 de agosto de 2015

Ingeniero

Carlos Ortega, M. Sc.

DIRECTOR DE CARRERA DE INGENIERÍA AGRONÓMICA.

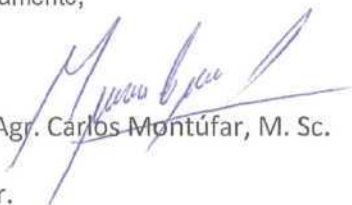
Presente.

Señor Director:

Luego de las revisiones técnicas realizadas por mi persona del trabajo de graduación MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL –SWAT- . BOLÍVAR, llevado a cabo por parte del señor Carlos Eduardo Villacrés de la carrera de Ingeniería Agronómica, ha concluido de manera exitosa consecuentemente el indicado estudiante podrá continuar con los trámites de graduación correspondiente, de acuerdo a lo que estipula las normativa y disposiciones legales.

Por la atención que se digne dar a la presente, reitero mi agradecimiento.

Atentamente,



Ing. Agr. Carlos Montúfar, M. Sc.

Tutor.

**MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA
UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SWAT. BOLÍVAR 2015.**

APROBADO POR:

Ing. Agr. Carlos Montúfar D., M. Sc
DIRECTOR DE TESIS



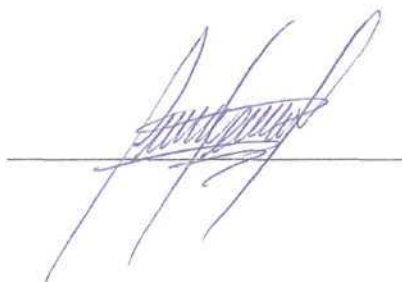
Lic. Diego Salazar
PRESIDENTE DEL TRIBUNAL



Ing. Agr. Gabriel Segovia
PRIMER VOCAL PRINCIPAL



Ing. Agr. Juan Pazmiño
SEGUNDO VOCAL PRINCIPAL



2015

CONTENIDO

CAPÍTULO	PÁGINAS
1	1
1.1	3
1.2	3
1.3	3
2.	4
2.1	4
2.2	5
2.2.1	7
2.2.2	8
2.3	8
2.4	11
2.5	13
2.6	16
2.7	17
3.	20
3.1	20
3.2	20
3.2.1	20
3.2.2	21
3.2.3	22
3.2.4	24
3.2.5	25
3.2.6	25
3.2.7	25
3.3	26
3.3.1	26
3.3.2	27
3.3.2.1	28
3.3.2.2	28
3.3.2.3	28
3.3.2.4	30
3.3.2.5	31

3.3.2.6	Correlación entre el sensor hidrométrico y los aforos	32
3.4	INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL TEMÁTICA (SIG)	32
3.4.1	Recopilación, análisis y selección de información secundaria	33
3.4.2	Parámetros cartográficos y sistema de referencia espacial	33
3.4.3	Procesamiento de la información	33
3.4.4	Trabajo de campo	33
3.4.5	Elaboración de cartografía definitiva	33
3.5	EL MODELO SWAT	33
3.5.1	Descripción	33
3.5.1.1	Escorrentía superficial (Qsurf)	36
3.5.1.2	Infiltración	41
3.5.1.3	Escorrentía subterránea	42
3.5.1.4	Evapotranspiración	47
3.5.1.5	Erosión	50
3.5.1.6	Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico	51
3.5.1.7	Enrutamiento en el Canal Principal o Alcance	51
3.5.1.8	Calibración y validación	52
3.6	PREPARANDO LOS DATOS DE ENTRADA	53
3.6.1	Delimitación de la Cuenca (Watershed Delineator)	54
3.6.2	Datos: Uso de la Tierra	56
3.6.3	Datos: suelos	56
3.6.4	Datos: Variables de clima	62
3.7	ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN	65
4.	PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS	71
4.1	CALIBRACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS	71
4.2	CAUDAL EN MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE	71
4.3	CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE.	72
4.3.1	Precipitación	72
4.3.2	Presión atmosférica	73
4.3.3	Temperatura del aire	74
4.3.4	Temperatura mínima	75
4.3.5	Temperatura promedio	76
4.3.6	Humedad relativa	77
4.3.7	Radiación solar	77
4.3.8	Velocidad del viento	79

4.3.9	Dirección del viento	79
4.4	MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE	80
4.4.1	Caudal	80
4.4.2	Generación de Escenarios	81
4.5	SEDIMENTOS	84
5.	CONCLUSIONES	86
6.	RECOMENDACIONES	87
7.	RESUMEN	88
8.	ABSTRACT	89
9.	REFERENCIAS	90
10.	ANEXOS	95

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO	PÁG.
1. Instalación del Levellogger	95
2. Programación del Levellogger	97
3. Compensación de información	102
4. Procedimiento para el aforo de caudales utilizando el método de disolución de sal.	105
5. Resumen de la rutina de trabajo de interfaz SWAT	112
6. Registro Fotográfico	119

ÍNDICE DE CUADROS

CUADRO	PÁG.
1. Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes tipos de Suelo, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2014.	23
2. Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes rangos de pendiente, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2012	26
3. Ubicación de las estaciones meteorológicas en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar. 2014.	26
4. Ubicación de las estaciones hidrométricas en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar. 2014.	28
5. Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes Usos y Cobertura de Tierra, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador	34
6. Asignación código SWAT para las coberturas del Suelo de la microcuenca del río Del Alumbre.	56
7. Características físico-químicas de los suelos en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2014.	63
8. Coeficiente de determinación de las estaciones en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	71
9. Distribución promedio mensual del Caudal (m ³ .s-1) durante el periodo enero 2008 – junio 2013, microcuenca del Río del Alumbre, Bolívar – Ecuador 2014.	71
10. Distribución promedio mensual de la Precipitación en (mm), durante el período enero 2008 – junio 2013, de la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	72
11. Distribución promedio mensual de la Presión en mbar, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	73
12. Distribución promedio mensual de la Temperatura Máxima en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	74
13. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima, en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	75
14. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima, en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	76

ÍNDICE DE GRÁFICOS

GRÁFICO	PÁG.
1. Distribución promedio mensual del Caudal ($m^3.s^{-1}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	72
2. Distribución promedio mensual de la Precipitación (mm), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	73
3. Distribución promedio mensual de la Presión en mbar, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	74
4. Distribución promedia mensual de la Temperatura Máxima en $^{\circ}C$, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	75
5. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima en $^{\circ}C$, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	76
6. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima en $^{\circ}C$, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	77
7. Distribución promedio mensual de la Humedad relativa (%), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	78
8. Distribución promedio mensual de la Radiación solar ($W \cdot m^{-2}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	78
9. Distribución promedio mensual de la Velocidad del viento ($m.s^{-1}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	79
10. Coeficiente de Determinación de los caudales observados y calculados de la estación hidrométrica Pacay (EC12), micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	80
11. Caudales observados y calculados de la estación hidrométrica Pacay (EC12), microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	81
12. Caudales modelados del cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	84
13. Producción de sedimentos en (t) del actual uso de la tierra y del escenario generado para la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.	85

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA	PÁG.
1. Estructura de la Cuenca Hidrográfica	6
2. Factores claves de interacción en el escenario de la Cuenca Hidrográfica	7
3. Proceso de erosión.	10
4. Componentes de un SIG.	12
5. Representación del modelo hidrológico	17
6. Esquema ilustrativo para aforo con el método del flotador.	29
7. Tramos en que se divide el ancho superior del río y profundidad de las verticales	31
8. Descripción gráfica del Modelo SWAT.	35
9. Esquema metodológico de Calibración y Validación	68
10. Relación entre la corriente y el agua subterránea.	69

ÍNDICE DE MAPAS

MAPA	PÁG.
1. Mapa base de la Microcuenca del Río del Alumbre	20
2. Modelo digital de elevación, unidades de respuesta hidrológica y drenajes de la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador, 2014.	55
3. Suelos clasificados por Subgrupo en la microcuenca del río Del Alumbre Bolívar - Ecuador, 2014.	66
4. Escenario 1, cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río del Alumbre. Bolívar – Ecuador. 2014.	82
5. Escenario 2, cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río del Alumbre. Bolívar – Ecuador. 2014	83

MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE CON LA UTILIZACIÓN DEL MODELO HIDROLÓGICO SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL-SWAT-, BOLIVAR, 2015

RESUMEN

El monitoreo hídrico y meteorológico de la microcuenca del río del Alumbre empezó en el año 2008, ésta se encuentra ubicada en el cantón Chillanes de la provincia de Bolívar, en el Ecuador. De los sensores hidrométricos se determinó que el caudal promedio mensual es de $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. De los datos de las estaciones meteorológicas y con la ayuda del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) se obtuvieron como resultado de los modelamientos, con una correlación de 0.7733 en la generación de caudales, lo que indica que la calibración y ajuste del modelo es adecuado para la zona. Esto nos permite generar escenarios y con los análisis de los resultados establecer prácticas de manejo de uso y conservación de la microcuenca en favor de la gestión del uso y aprovechamiento de los recursos suelo y agua.

PALABRAS CLAVES: MONITOREO HÍDRICO, MICROCUENCA, RÍO ILLANGAMA, MODELAMIENTO, ESCENARIOS, SWAT, BOLÍVAR.

MODELING OF EL ALUMBRE RIVER MICRO-BASIN WITH THE USE OF HYDROLOGICAL MODEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL “SWAT”. BOLIVAR PROVINCE, ECUADOR

SUMMARY

The hydrological and meteorological monitoring of del Alumbre river watershed began in 2008, it is located in the canton Chillanes in the province of Bolivar in Ecuador. Of the hydrometric sensors was determined that the average monthly flow is $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. From data of weather stations and with the help of hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) were obtained as a result of models with 0.7733 a correlation of flow rates to generate, indicating that the calibration and adjustment model is suitable for the area. This allows us to generate scenarios and the analysis of results establish management practices use and conservation of watershed management for the use and exploitation of soil and water resources.

KEYWORDS: WATER MONITORING, MICRO-BASIN, RIVER ILLANGAMA, MODELING, SCENES AND SWAT, BOLIVAR.

MODELING OF THE MICRO BASIN OF ALUMBRE RIVER, USING THE HYDROLOGICAL MODEL SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL-SWAT-, BOLIVAR 2015.

ABSTRACT

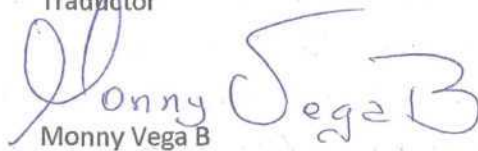
The hydrological and meteorological monitoring of the micro basin of the Alumbra River started in 2008, it is located in the canton called Chillanes of Bolivar Province in Ecuador. It was determined from hydrometric sensors that the monthly average of the level of water is 0,65 m³ s⁻¹. From the information of the meteorological stations and with the hydrological model soil and Water Assessment Tool (SWAT), as a result of modelings, a correlation of 0,7733 was obtained, in the generation of level of water, which indicates that calibration and settings of the model are adequate for the zone. This permits to generate sceneries, and with the analysis of the results, to establish practices of management of uses and conservation of the micro basin for administration of uses of soil and water.

KEY WORDS: HYDROLOGICAL MONITORING, MICROBASIN, ILLANGAMA RIVER MODELING, SCENERIES, SWAT, BOLIVAR.

El Centro Educacional de Idiomas y Especializaciones Administrativas CENDIA C.A certifica mediante la firma del traductor y sello de la institución, haber realizado la traducción del presente documento

Quito, 11 de agosto del 2015

Traductor


Monny Vega B



1 INTRODUCCIÓN

La problemática actual de abastecimiento, calidad y distribución del agua está relacionada con diversos ámbitos, como son el social, el ambiental y el político. Por ello, es necesario buscar mecanismos de gestión que permitan un aprovechamiento sustentable de este recurso, desde una perspectiva integradora (GWP, 2000).

La gestión del agua también es fundamental para la planificación y el manejo de los recursos naturales con fines de sostenibilidad (Brooks et al., 1991). El conocimiento de la hidrología es necesario para determinar reservas, demandas y suministros de agua, para predecir fenómenos de frecuencia extrema (inundaciones, desbordes y/o sequías, etc.) y para proteger la calidad del agua (Baker et al., 1995).

La erosión hídrica de los suelos es una forma importante de degradación de la tierra. Se estima que la sexta parte de los suelos del mundo son afectados por erosión hídrica. La degradación de los suelos provocada por el hombre es uno de los fenómenos más destructivos de los recursos naturales, siendo una temática clave a ser tratada (Reich et al., 2000). La erosión y los procesos de sedimentación son influenciados por una variedad de factores biofísicos y humanos. Sin embargo, se conoce poco de dichos procesos a diferentes escalas espaciales y temporales, colocando de esta manera al monitoreo y la evaluación de la erosión y deposición de sedimentos como una tarea compleja, con considerable grado de incertidumbre. Como consecuencia, existe la necesidad de mejorar el entendimiento de los procesos de erosión y deposición de sedimentos tanto a nivel de parcelas como a nivel de cuencas, bajo una perspectiva cuantitativa, para ser capaces de analizar su impacto sobre la calidad del suelo y el agua (Wickenkamp et al., 2000; Romero y Stroosnijder, 2002).

La forma de abordar un estudio hidrológico de una región debe ser a través de una cuenca, debido a que esta última constituye la unidad física completa donde la entrada es la precipitación y las salidas son el escurrimiento y el sedimento, incluyendo en el proceso la influencia de vegetación, suelo y topografía (Barrera, et al., 2005).

La evaluación de los recursos hídricos requiere la realización de balances en los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Para ello, las ecuaciones del balance deben normalmente resolverse utilizando programas de cálculo numérico. La estimación de la recarga de los acuíferos requiere utilizar métodos de balance. Los resultados de los balances deben ser contrastados y calibrados con datos de oscilaciones piezométricas y de aforos en los puntos de salida de la cuenca. También es recomendable comprobar su coherencia con los resultados obtenidos con

métodos hidroquímicos e isotópicos y con modelos numéricos de flujo en el acuífero (Custodio et al. 1997).

La Cuenca Hidrográfica se define como la unidad territorial natural que capta la precipitación, y es por donde transita el escurrimiento hasta un punto de salida en el cauce principal o sea es un área delimitada por una divisoria topográfica denominada parte-agua que drena a un cauce común (Brooks et al, 1991).

Las cuencas hidrográficas o de captación (las tierras situadas entre el nacimiento y la desembocadura de un río, incluidas las tierras drenadas por él) y los sistemas costeros y marinos afectados por las descargas de las cuencas son unidades geográficas importantes en la gestión de los humedales y los recursos hídricos. El desarrollo rápido y no sostenible de los humedales, así como de las cuencas hidrográficas en las que se hallan, ha perturbado los ciclos hidrológicos naturales. En muchos casos, ello se ha traducido en un agravamiento y multiplicación de las inundaciones y las sequías, así como en el aumento de la contaminación. La degradación y la pérdida de humedales y de su biodiversidad traen consigo pérdidas y costos sociales importantes para las poblaciones humanas asentadas en dichas cuencas. Unas asignaciones apropiadas de agua a los humedales y su protección son pues esenciales para que estos ecosistemas puedan sobrevivir y continuar suministrando importantes bienes y servicios las comunidades locales (SCR, 2004).

Uno de los resultados más importantes del estudio integrado de cuencas hídricas es la definición de estrategias y acciones para la utilización sustentable de los recursos naturales que están dentro de esta unidad geográfica. El análisis de las interacciones ambientales derivadas del uso de los recursos agua, suelo y vegetación dentro la cuenca hidrológica implicará la formulación de diferentes estrategias para su conservación, rehabilitación y el uso apropiado de sus recursos (INE, 2004).

El modelado hidrológico es a menudo el primer paso en el desarrollo de sistemas de decisión espacial para identificar áreas vulnerables a la contaminación por nutrientes, pesticidas así como también a contaminantes biológicos. En este sentido el SWAT, Traducción “Herramienta de Evaluación para el Suelo y Agua” por sus siglas en inglés (Soil and Water Assessment Tool) fue desarrollado para predecir impactos de las prácticas de manejo de las tierras, sedimentos y agroquímicos en cuencas hidrográficas con diferentes suelos, usos y prácticas en largos períodos de tiempo (Behrends, et al., 2006).

1.1 OBJETIVO GENERAL

Aplicar el modelo de simulación hídrica, Soil and Water Assessment Tool, “SWAT” en las condiciones existentes de la microcuenca del Río Del Alumbre en el periodo 2012 y 2013, para analizar los efectos de las diversas prácticas de uso de suelo sobre el comportamiento de caudales y producción de sedimentos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Calcular el balance hídrico de la microcuenca del Río Del Alumbre para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca hidrográfica bajo condiciones actuales, para el periodo enero de 2008 a junio de 2013.
2. Simular del comportamiento de caudales y producción de sedimentos bajo escenarios de cambio de manejo en el uso de la tierra para el periodo enero de 2008 a junio de 2013.
3. Calibrar los resultados obtenidos en el proceso de modelamiento de la microcuenca del río Del Alumbre.

1.3 HIPÓTESIS

Se plantean las siguientes hipótesis:

Ho: La aplicación del modelo hidrológico en la microcuenca del río Del Alumbre nos permitirá visualizar los efectos de los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo con el fin de analizar el mejor manejo para garantizar el suministro y calidad del agua en el periodo de enero de 2008 a junio de 2013.

Hi: La aplicación del modelo hidrológico en la microcuenca del río Del Alumbre no nos permitirá visualizar los efectos de los cambios en la cobertura vegetal y uso del suelo con el fin de analizar el mejor manejo para garantizar el suministro y calidad del agua en el periodo de enero de 2008 a junio de 2013.

2. MARCO TEÓRICO

2.1 SUSTENTABILIDAD

Se argumenta que en español es más pertinente utilizar la palabra sustentable que sostenible porque aquella tiene mayor similitud con *Sustainable*, que es su correspondiente en inglés, idioma en el que empezó a publicar masivamente el término; empero, ambas se usan a menudo indistintamente (López, 2006).

Gramaticalmente el uso de ambos adjetivos como calificativos del sustantivo “desarrollo” es válido. Visto así, se debe concluir que, situándose estrictamente en el ámbito del lenguaje, del léxico y la semántica, los adjetivos “sostenible” y “sustentable” son sinónimos, como lo son los verbos de que derivan, y por tanto su uso es indistinto, solo sobre la base del gusto del usuario, sin que el empleo de uno u otro obedezca a regla alguna (Porras, 2009).

Es ineludible referirse al concepto de sustentabilidad, antes de hacer referencia al concepto de desarrollo sustentable y establecer algunas diferencias de este concepto con el primero. La sustentabilidad, o sostenible, o soportable, se relaciona con la ecología o sociedad. Se consigue identificar con la actual generación como con las generaciones por venir. Ello sobreviene de un conjunto de preceptos vinculados a la gestión sustentable de los recursos naturales: el agotamiento y la degradación ambiental de los recursos renovables de la naturaleza (flora y fauna) no deben ser mayores que su reposición, la emisión de contaminantes y residuos peligrosos al agua, aire y suelos, no deben sobrepasar la capacidad de asimilación de los ecosistemas y los recursos no renovables (petróleo y recursos minerales) deben explotarse de una manera sustentable, condicionando la tasa de agotamiento a la tasa de generación de los correspondientes sustitutos (López, 2006).

El desarrollo sustentable no es simplemente un desarrollo que puede ser prolongado en el tiempo, sino el tipo de desarrollo que se requiere para tratar de alcanzar, a través de él, el estado de sustentabilidad. No se trata de una meta propiamente, sino un proceso para mantener un balance dinámico entre la demanda de equidad, prosperidad y una mejor calidad de vida. La sustentabilidad es un concepto más amplio que el desarrollo sustentable y puede ser aplicado a diferentes escalas, desde la sustentabilidad de una familia, de un proyecto o de una industria, pasando por el uso sustentable de recursos y de fuentes materiales, hasta la sustentabilidad sectorial y global (Porras, 2009).

Acerca de la sustentabilidad, Leff (2000) indica que la racionalidad que la producción ha afectado a la naturaleza y asocia la destrucción ecológica y la degradación ambiental al concepto de sustentabilidad reconociendo el papel que cumple la naturaleza como soporte, condición y potencial del proceso de producción.

El proceso de gestión de cuencas sustentables debe considerar los componentes: político – social, económico – social y natural – social. De manera general y de acuerdo a las características propias del país, el componente gobernabilidad democrática comprende la relación estado – sociedad civil. El componente desarrollo local, comprende la parte social e infraestructura en las agendas y planes de desarrollo. El componente de procesos productivos comprende a las diversas cadenas y/o sistemas de producción y mercado, áreas de especialización productiva y la relación cultural en los campos económico – productivo organizativo. El componente de manejo y conservación de recursos naturales comprende la zonificación de la cuenca en cuanto a la aptitud de uso (asentamiento humano, cultivos, conservación, etc.) y a su relación cultural como tierras comunales o centros ceremoniales (Dardón, J. J.; Morales, C. P., 2002)

2.2 CUENCA HIDROGRÁFICA

La cuenca no es solo un ámbito geográfico, ella acoge una población humana que aprovecha los recursos que hay en ella, ese uso genera a menudo conflictos en un escenario que es social y económico y que requiere también mecanismos de concertación. En este sentido, la cuenca debe ser considerada como una unidad de planificación, en ella los habitantes deben ser los actores protagónicos y sus organizaciones comunitarias deben constituirse en la base del desarrollo local (Zuri, 2004)

CATIE (2001), define el término de cuenca hidrográfica como una unidad territorial que está delimitada por la influencia de un sistema de drenaje superficial, que tiene como límite físico la divisoria de las aguas hasta la confluencia del río principal a otro río mayor, lago o mar, y en la que se interrelacionan sistemáticamente procesos biofísicos, socioeconómico y ambientales, como se detalla en la figura 1. Es un sistema integrado por elementos biológicos, físicos y socioeconómicos que se caracteriza por su dinámica y por la interacción de sus componentes o elementos.

Los Recursos Hídricos de la República del Ecuador están sujetos a una presión que es una función de la demanda del agua para satisfacer las múltiples necesidades que dependen de ella y de la desigual distribución del agua tanto en el espacio como en el tiempo. Muchas instituciones públicas y privadas nacionales tienen que ver con este cada vez más escaso recurso natural, lo cual perjudica su racional accionar al momento de servir a las comunidades y habitantes

asentados dentro de sus fronteras, los cuales en muchos de los casos, comparten y litigan con fronteras naturales, políticas y administrativas (Freire et al, 2011)

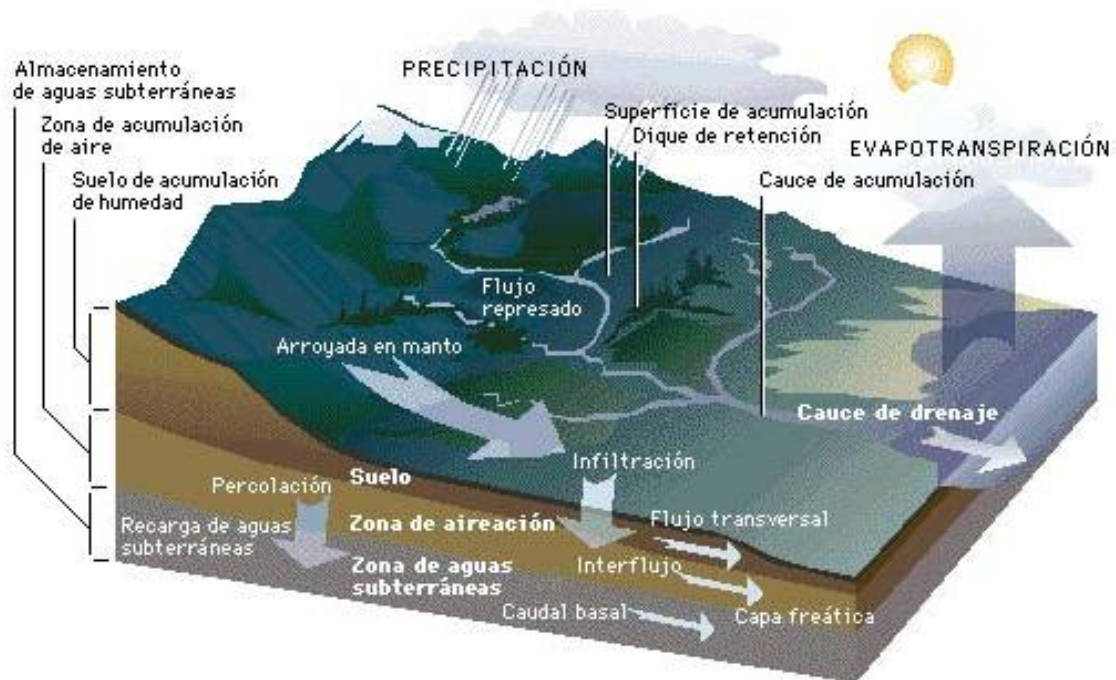


Figura 1. Estructura de la Cuenca Hidrográfica

Fuente: Proyecto Fineans

Según MAG-FOR (2000), una cuenca hidrográfica es:

Un medio natural geográficamente bien definido por que es el área de alimentación de una red natural de drenaje cuyas aguas son recogidas por un colector común.

Un medio biofísico complejo ya que es un medio natural compuesto por diferentes elementos: suelo, agua, vegetación, flora, fauna, subsuelos y clima; complejo por las interrelaciones e interacciones que dichos elementos mantienen en el dinámico equilibrio de la naturaleza.

Un medio natural morfodinámico. La génesis de la morfología de una cuenca es un proceso dinámico porque según el clima que prevalece en una cuenca, formaciones superficiales y el tipo de relieve se operan constantes modificaciones como decir, cambios en el patrón de drenaje, como eliminación de meandros, formación de brazos, creación de áreas de abrupción, de transporte y acumulación de sedimentos, etc.

Un medio humano en transformación, lo cual se refiere a la demografía, la tenencia de la tierra, la estructura social de los sistemas de producción, las condiciones de mercado y de crédito, etc.

2.2.1 La cuenca como sistema

La cuenca la conforman componentes biofísicos (agua, suelo), biológicos (flora, fauna) y antropogénicos (socioeconómicos, culturales, institucionales), que están todos interrelacionados y en equilibrio entre sí, de tal manera que al afectarse uno de ellos, se produce un desbalance que pone en peligro todo el sistema. (Ramakrishna, 1997)

Es importante visualizar que la cuenca funciona como un sistema, donde el manejo no debe concentrarse en partes específicas, sino que aborde todos los subsistemas en su conjunto; según Reyes (2004) los subsistemas que componen la cuenca son: el biológico, físico, económico y social. Estos subsistemas tienen por ejemplo, la degradación de los suelos se debe a la explotación agrícola que el hombre hace sobre suelos que no son de vocación agrícola. También existen las interacciones, por ejemplo, los efectos de las partes altas de la cuenca con respecto a la parte baja de la misma, evidenciando la necesidad absoluta de utilizar enfoques integrales.

Los beneficios que ofrecen las cuencas hidrográficas, graficado en la Figura 2, son únicos e irremplazables, pues no hay otro sistema que los proporcione, uno de los beneficios son el suministro de energía de agua, la obtención de energía eléctrica por las presas, producción forestal, cantidad, calidad y control del agua, y también la producción agrícola sostenible, si se utilizan tecnologías adecuadas (Carneiro et al. 2008). La principal función económica que realizan es cuando suministra los recursos naturales para el desarrollo de actividades productivas de las poblaciones que habitan alrededor de la cuenca (Jiménez. 2005).



Figura 2. Factores claves de interacción en el escenario de la Cuenca Hidrográfica

Fuente: Minutti Julio

Además de los beneficios económicos las cuencas también nos proporcionan bienes y servicios ambientales entre ellos está la contención de la erosión del suelo, fijación del carbono, conservación de la biodiversidad y mantenimiento del paisaje (Carneiro et al. 2008). Estos beneficios dependen del manejo que se proporcione al ecosistema, por eso el aprovechamiento de los recursos debe ser adecuado, la distribución de los recursos debe ser equitativa propiciando el equilibrio, con la participación de la sociedad en cuanto a gestión y sobre todo la conservación de la capacidad de reproducción, para que se pueda generar un desarrollo sostenible, sin comprometer a las generaciones futuras. Estos servicios son los más importantes porque de ello depende el funcionamiento tanto de las cuencas y la calidad del recurso que puedan percibir los usuarios.

2.2.2 La cuenca hidrográfica como unidad de planeación

La cuenca hidrográfica representa un marco apropiado para la planeación y aplicación de medidas destinadas a corregir Impactos Ambientales generados por un uso desordenado de los recursos naturales y donde se facilita la gestión ambiental; la importancia de aplicación de trabajos con enfoque de cuencas radica en que se pueden cuantificar y evaluar los efectos de las diferentes actividades del hombre tales como: erosión, sedimentación, escurrimiento e infiltración. Es vital considerar que el agua es el elemento unificador de la cuenca; muchos de los fenómenos que se cuantifican en ella, tienen que ver con el fenómeno hídrico. (SEMARNAT, 2006) El manejo de cuencas ayuda a prevención de desastres naturales ya que contribuye a mitigar y controlar todos los problemas que inciden en la vulnerabilidad de la cuenca; como son las inundaciones, sequías, deslizamientos, desertificaciones, etc. (Reyes, 2004).

2.3 EROSIÓN

En la década de los años 90, en el mundo, un 25% de las tierras en uso para la agricultura estaban seriamente degradados, poniendo en serio peligro la sobrevivencia de millones de familias, especialmente en países en vías de desarrollo. El efecto principal de la degradación del suelo es la reducción de la productividad, lo cual afecta a todos quienes dependen de ella. La forma más grave de degradación es la provocada por la erosión (Tayupanta & Córdova, 1990; Tayupanta, 1993). Esta situación se acentúa en la sierra ecuatoriana debido a diversos factores adversos como el minifundio, pendiente, dependencia total o parcial de insumos externos, cambios en los sistemas de producción de cultivos asociados y policultivos por monocultivos, reducción de la diversidad de especies cultivadas, deficientes prácticas de conservación de suelos, falta de políticas e incentivos para la conservación del ambiente (Monar, 2007).

La producción anual de sedimentos en una cuenca depende de muchos factores tales como el clima, el tipo de suelo, el estado de la cobertura vegetal, la topografía y la existencia de embalses. La lluvia como uno de los elementos que integran el clima, representa mucha energía, a mayor intensidad de lluvia, mayor es la energía que será transmitida al terreno. La lluvia tiene entonces según su intensidad y duración, una determinada capacidad erosiva. En cuanto a la topografía, la tasa de erosión es mayor en pendientes altas que en pendientes suaves. Mientras más pendiente tenga un talud, más efectiva será la acción del agua en erosionar y transportar el sedimento pendiente abajo. Las velocidades del flujo superficial es también mayor en taludes muy inclinados, y los movimientos masivos del suelo son igualmente más frecuentes en terrenos de taludes pronunciados (Linsley, 1986).

Otro de los factores que determina la tasa de producción de sedimentos en una cuenca es el suelo. Cuello (2003) considera que las condiciones de los suelos determinan su susceptibilidad a la erosión. El autor hace un enfoque desde el punto de vista de la textura y de la estructura del suelo, planteando que los suelos con alto contenido de limo son muy susceptibles a la erosión por motivo de la impermeabilización del limo en los poros del suelo, lo que hace que la capacidad de infiltración disminuya generando mayor escorrentía superficial y causando daños erosivos. Considera también que los suelos con alto contenido de arcilla, y por consiguiente baja capacidad de infiltración, son muy susceptibles a la erosión en caso de aguaceros intensos, mientras que los suelos arenosos, con gran capacidad de infiltración, absorben la mayor parte del agua que reciben, originando una menor escorrentía superficial y menor erosión, esto se ilustra en la Figura 3.

Desde el punto de vista de la estructura del suelo, considera que la estructura del tipo masiva y bloques grandes fuertes son las que ofrecen mayor resistencia al impacto de las gotas de lluvia y al arrastre de las partículas por la escorrentía superficial (Cubero, 1996 citado en Cuello, M, 2003). Su análisis incluye la cobertura del suelo; en ese sentido, considera que con la interceptación de la lluvia y la reducción de la velocidad del agua juegan un papel primordial en la protección del suelo contra la erosión. Distintas coberturas vegetales proveen distintos grados de protección, de tal manera que el hombre podría controlar en gran parte la erosión en las áreas forestales y agrícolas, escogiendo adecuadamente el uso y el manejo de la tierra (Cubero, 1996 citado en Cuello, M, 2003).

Los indicadores estadísticos del grado de erosión de las cuencas hidrográficas en la sierra ecuatoriana señalan que un 39.13% es crítica, 28.26% seria, 4.35 moderada, 26.09 potencial y 2,17% normal, dando como efectos graves la pérdida de la biodiversidad, degradación de los

suelos, alta sedimentación y de los principales reservorios, causas de los ríos de la parte baja de las cuencas y graves inundaciones (Espinosa, 1993).

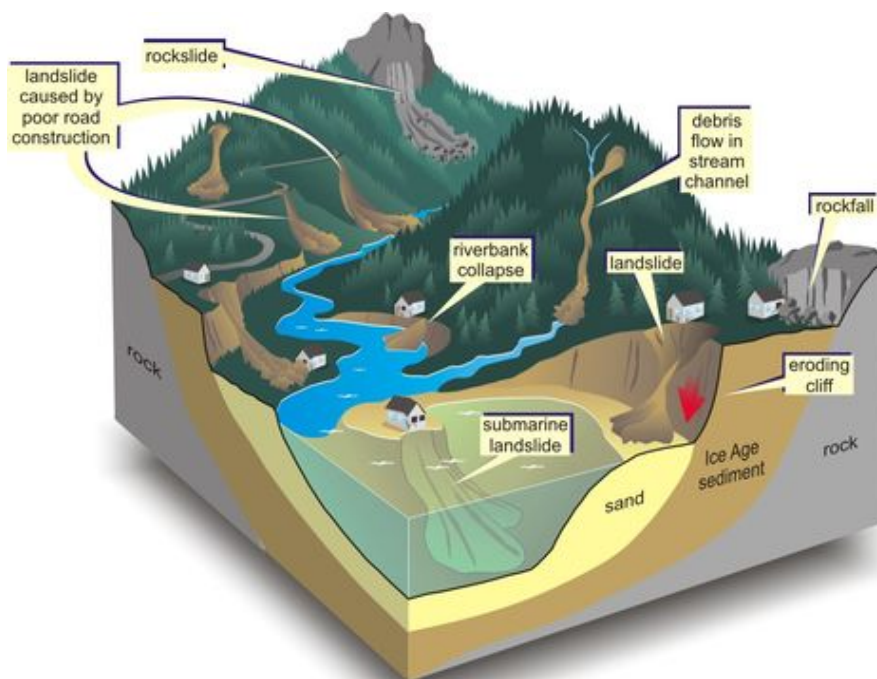


Figura 3. Proceso de erosión.

Fuente: ecologiahoy

Los procesos de erosión hídrica del suelo, dependen del diámetro, velocidad y energía cinética de las gotas de lluvia, cantidad, intensidad, duración de las precipitaciones, la cobertura vegetal presente entre otras (Hudson, 1971). Esta puede ser analizada comenzando por la desagregación de las partículas de suelo debido al impacto de las gotas de lluvia. La energía cinética de las gotas de lluvia puede lanzar las partículas del suelo al aire durante el impacto. En terrenos a nivel, las partículas se dispersan más o menos uniformemente en todas las direcciones, pero en un terreno con pendientes habrá un transporte neto hacia abajo. Si durante el proceso ocurre flujo superficial, las partículas removidas serán transportadas aún más abajo antes de ser depositadas de nuevo en la superficie (Linsley, 1986).

La degradación del suelo en la microcuenca del río Del Alumbre, tiene un proceso acelerado debido principalmente al avance de la frontera agrícola, deforestación y destrucción de la biodiversidad, las deficientes prácticas de conservación de los suelos, desarrollo de monocultivos, efectos del cambio climático, desconocimiento y falta de incentivos para la conservación del capital natural (Barrera et al., 2008; Monar, 2007).

En la microcuenca del río del Alumbre, no existen estudios actualizados sobre la cuantificación de la degradación del suelo ocasionada por erosión hídrica dentro de los principales sistemas de producción de esta zona. (Cruz, et al., 2010)

2.4 LOS SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Un Sistema de Información Geográfica (SIG o GIS, en su acrónimo inglés) es una integración organizada de *hardware*, *software* y datos geográficos diseñado para capturar, almacenar, manipular, analizar y desplegar en todas sus formas la información geográficamente referenciada, con el fin de resolver problemas complejos de planificación y gestión. También puede definirse como un modelo de una parte de la realidad referido a un sistema de coordenadas terrestres, construido para satisfacer unas necesidades concretas de información. En el sentido más estricto, es cualquier sistema de información capaz de integrar, almacenar, editar, analizar, compartir y mostrar la información geográficamente referenciada. En un sentido más genérico, los SIG son herramientas que permiten a los usuarios crear consultas interactivas, analizar la información espacial, editar datos, mapas y presentar los resultados de todas estas operaciones (Calvo, 2005).

Un Sistema de Información es un proceso que consta de un conjunto de etapas que tiene como fin servir para la toma de decisiones. El proceso comienza con el planeamiento, la recolección de datos y el almacenamiento de los mismos, para luego ser analizados y usados. Estos datos son procesados y arrojan determinados resultados que el usuario obtiene para seguir determinadas acciones (Barbedo, 2008).

Según F. J. Moldes (Moldes 1995) un SIG es un “conjunto de programas y aplicaciones informáticas que permiten la gestión de datos organizados en base de datos, referenciados espacialmente y que pueden ser visualizados mediante mapas”.

SIG es un sistema de hardware, software y procedimientos elaborados para facilitar la obtención, gestión, manipulación, análisis, modelado, representación y salida de datos espacialmente referenciados para resolver problemas complejos de planificación y gestión (NCGIA 1990). Además de la capacidad propia de los SIG, técnicas ajenas a éstos han sido integradas a los mismos, por ejemplo las técnicas de evaluación multicriterio y multiobjetivo, para resolver ciertos problemas de índole espacial o territorial (Barredo, 2006).

De acuerdo con Carmona y Monsalve (1999), un SIG está conformado por cinco componentes principales: Equipos, programas, datos, recurso humano y procedimientos. La Figura 4 representa esquemáticamente la descripción de los componentes de un SIG.

Equipos: El equipo es básicamente la computadora en donde está instalado el programa con el que se trabaja en el SIG, en este caso, es una computadora personal, en la actualidad cualquier computadora personal tiene la capacidad para manejar bases de datos, sin embargo, también son utilizados servidores conectados en red que manejan gran cantidad de datos al mismo tiempo. Los satélites que generan las imágenes, cámara fotográfica, sensores, gps.

Programas: Estos son los que proveen de las herramientas necesarias para que el usuario pueda ingresar, manipular, organizar, referenciar y analizar todos los datos, mapas, tablas, entre otros, que pueda contener el SIG, a través de un manejador de bases de datos, desde editores de texto hasta bases de datos relacionales como SQL y una interfaz gráfica que permita al usuario interactuar visualmente con los datos del programa. En la actualidad existen muchos programas desarrollados para cumplir estas funciones. Dentro de la industria empresas comerciales como ESRI, Intergraph, Mapinfo, Autodesk o Smallworld ofrecen un completo conjunto de aplicaciones (Chang, 2007).

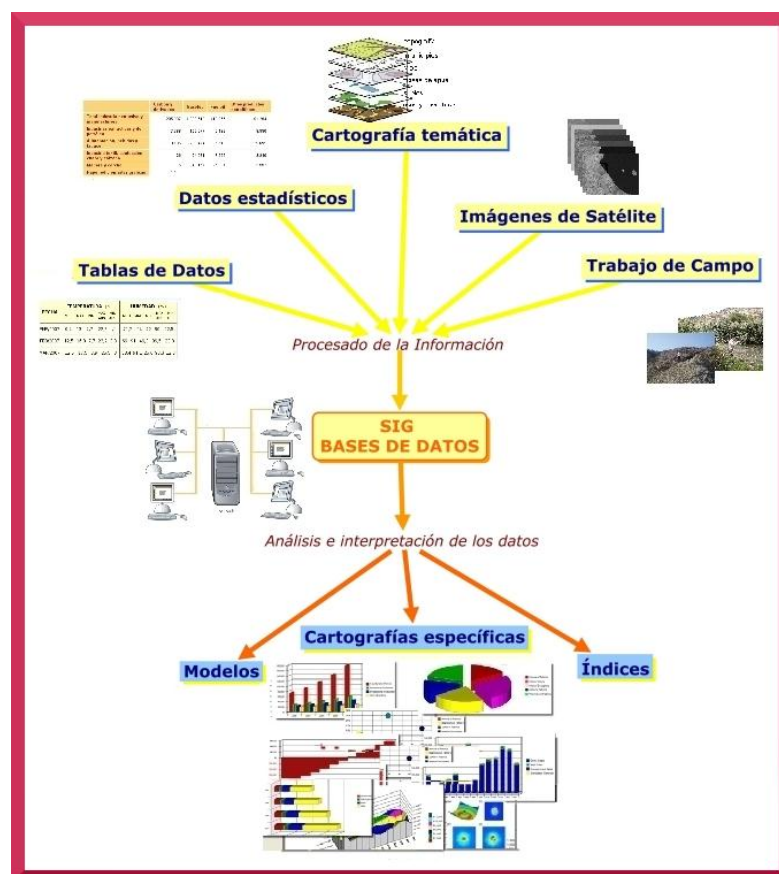


Figura 4. Componentes de un SIG.

Fuente: Trujillo Stallin

Datos: Los datos son la parte más importante de un SIG, dependiendo de su procedencia o contenido pueden ser geográficos, o de cualquier otro tipo y se integrarán adecuadamente utilizando las herramientas del sistema.

Recurso Humano: La funcionalidad de un SIG estará limitada por la capacidad del operador del sistema, es de suma importancia que tanto el individuo que diseña e implementa el sistema, como el usuario tengan conocimiento de las herramientas y capacidades del sistema, ya que su análisis e interpretación eficaz y eficiente dependerá de ello.

Procedimientos: Los SIG's tienen aplicaciones muy amplias, de tal manera que es esencial que se diseñe y empleen los métodos adecuados, el diseño del mismo dependerá del tipo de dato en empleo y el propósito del sistema.

2.5 LOS SIG Y LA MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la hidrología son dos campos de trabajo que comparten muchos intereses. Los SIG se han convertido a lo largo de esta década en una herramienta imprescindible para un gran número de estudios; así cada vez más investigadores se ayudan de los SIG para la construcción de modelos hidrológicos, especialmente cuando es necesaria la representación espacial de redes de drenaje (GRID/UNEP, 1993).

Desde un punto de vista global un SIG puede ser considerado un conjunto organizado de "hardware", "software", datos y técnicas eficientemente diseñadas para la captura, almacenamiento, actualización, manipulación, visualización y análisis de información georeferenciada (GRID/UNEP, 1993). Los SIG han sido desarrollados para gestionar y analizar la información espacial. Son muy adecuados para combinar información topográfica, edafológica, usos de la tierra y meteorológica de diferentes áreas, así como para visualizar escenarios pasados y simular escenarios futuros (Galván, 2011)

Dado que el uso de modelos está limitado por la necesidad de datos espaciales y los SIG son capaces de manipular este tipo de datos, la unión de estas técnicas ha mejorado el desarrollo de la modelización hidrológica. La integración de los SIG con los modelos hidrológicos y su aplicación en cuencas hidrográficas permiten la realización de un gran número de operaciones, proyectos, calibración, simulación y comparación entre modelos. (Galván, 2011)

Los modelos hidrológicos tratan fenómenos continuos y dinámicos, mientras que los SIG sólo datos estáticos. Las dificultades de integración de series temporales de datos en entornos SIG supusieron un obstáculo importante para su difusión entre los investigadores del campo de la

hidrología. Raper y Livingstone (1995) apuntan que el concepto de tiempo debe ser integrado en las modelizaciones y que este proceso siempre ha sido especialmente problemático en los SIG. Hoy día esta limitación se ha reducido considerablemente, hasta el punto en que los modelos espacialmente distribuidos y los sistemas con una componente temporal dinámica son elaboradas fácilmente.

Otras de las cualidades bien valoradas de los SIG son sus aportaciones para la mejor interpretación y análisis de modelos y sistemas. La estructura de datos en capas o estratos de información es intuitiva y posibilita que los modelos puedan ser interpretados con menor esfuerzo. Esta herramienta brinda al investigador la posibilidad de visualizar y entender con claridad las relaciones espaciales (Raper y Livingstone, 1995).

Maidment (1993) ha agrupado las aplicaciones de los SIG en hidrología de la siguiente manera:

1. Evaluación e inventarios hidrológicos
2. Determinación de parámetros hidrológicos
3. Construcción de modelos hidrológicos sencillos (sin análisis estadístico)
4. Construcción de modelos hidrológicos integrados

En el caso particular de las modelizaciones hidrológicas, la aplicación de estos sistemas ha ido aumentando en los últimos años, apreciándose actualmente una gran diversidad en los objetivos y en los resultados.

Los modelos de simulación pueden ser definidos, de forma general, como una representación a través de ecuaciones matemáticas; es decir, consisten en representar matemáticamente lo que acontece en la naturaleza a partir de un modelo conceptual, idealizado, de acuerdo con los datos observados en el sistema real. El objetivo de esta modelización es conocer mejor el sistema para prever situaciones futuras, reproducir el pasado y servir de soporte para la toma de decisiones (Maidment 1993).

Tal vez la propiedad más importante de un modelo hidrológico es el grado de representación de las variaciones espaciales y temporales de los parámetros de entrada y de salida. Se diferencia entre modelos hidrológicos concentrados o agregados y distribuidos. Los modelos concentrados asumen que los parámetros varían solamente en función del tiempo, mientras que en los distribuidos los parámetros varían tanto en el tiempo como en el espacio (Baldissera, 2005).

Los modelos hidrológicos distribuidos captan la variabilidad espacial de la cuenca hidrográfica, dividiéndola en áreas menores y homogéneas, o subcuencas, donde los parámetros son

uniformes. El fenómeno hidrológico es simulado dentro de cada subárea. Estos modelos requieren una gran cantidad de datos a fin de preparar los archivos de entrada. (Baldissera, 2005).

Dependiendo de la escala de tiempo, los modelos agregados y distribuidos pueden ser a su vez clasificados en continuos y discretos. Por ejemplo, un modelo agregado basado en eventos aislados, simula la respuesta del sistema físico para una sola entrada (precipitación) y asume que ambos parámetros, el de entrada y salida, no varían en el espacio-tiempo. Por otro lado, los modelos distribuidos continuos, simulan los procesos secuencialmente dentro de un sistema físico, en un intervalo de tiempo que puede variar de horas a días y abastece de series temporales de salida. (Baldissera, 2005).

Los modelos de parámetros distribuidos de tiempo continuo consideran la cuenca dividida en subcuencas, basándose en el relieve, suelos y usos de la tierra; de esa forma, preservan los parámetros distribuidos espacialmente y las características homogéneas dentro de la cuenca (Baldissera, 2005).

La aplicación de modelos hidrológicos distribuidos como base física, requiere una gran disponibilidad de parámetros relacionados con los suelos, vegetación, y aspectos topográficos. La principal ventaja de aplicación de modelos reside en la posibilidad de estudio de varios escenarios diferentes de forma rápida. (Galván, 2011)

Fedra, (2003) define los SIG como herramientas basados en sistemas de cómputo para capturar, procesar y desplegar datos espaciales o georeferenciados. Conteniendo datos geométricos (coordenadas e información topológica) y datos de atributos o información que describe las propiedades de objetos geométricos como puntos, líneas y áreas.

Desde el punto de vista hidrológico Maidment (1993), considera que los SIG proveen representaciones de las características espaciales de la tierra, que la modelación hidrológica se ocupa de los flujos de agua y sus constituyentes sobre la superficie terrestre y el ambiente subsuperficial; existe entonces, una obvia y cercana conexión entre ambos. En este contexto, el autor explica que los SIG proveen a los modelos hidrológicos el potencial de incrementar el grado de definición de las subunidades espaciales en número y detalle descriptivo. Así mismo, éste enlace permite la evaluación de procesos a escala regionales cuya hidrología no podría haberse modelado de otra forma.

Arguello, citado por Portilla (1994) no difiere al referirse a los modelos hidrológicos como un sistema matemático o físico que obedece a ciertas condiciones específicas y cuyo comportamiento es utilizado para entender un sistema físico. Mientras que los SIG proveen la

tecnología para almacenar y manipular la información espacial relacionada que es demandada por los modelos hidrológicos (Moore, citado por Portilla 1994).

2.6 CARACTERÍSTICAS DEL MODELO SWAT

SWAT (siglas en inglés: Soil and Water Assessment Tool) que se traduce como “Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua” es un modelo a nivel de cuencas hidrográficas desarrollado por el Departamento de Agricultura de Estados Unidos (USDA). SWAT fue desarrollado para cuantificar y predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas, producto de la actividad agrícola, en cuencas complejas de gran extensión espacial, con diferentes tipos de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo; a lo largo de largos períodos de tiempo. El modelo tiene una base física y es computacionalmente eficiente, requiere datos de entrada relativamente fáciles de disponer y permite estudiar los impactos a largo plazo (Neitsch et al., 2001). La página web para los usuarios del SWAT es: <http://www.brc.tamus.edu/swat/>

Los elementos principales del modelo SWAT son: (a) hidrología de la cuenca, producción de sedimentos y calidad del agua (Figura 5), (b) simulación del transporte y destino final de los nutrientes y pesticidas, (c) simulación de la erosión de suelos en las corrientes de agua y (d) prácticas agrícolas incluyendo la siembra del terreno, el laboreo, la irrigación, la fertilización, el pastoreo y la cosecha (Neitsch et al., 2002).

SWAT divide la cuenca en subcuencas. Posteriormente, cada subcuenca se divide a su vez en una serie de Unidades de Respuesta Hidrológica (URH). Cada URH es una combinación única de un tipo específico de suelo y uso de la tierra (tipo de vegetación, tipo de zona urbana, entre otros). SWAT simula la hidrología, el crecimiento de vegetación y las prácticas de manejo a nivel de URH, para cada subcuenca (Di Luzio et al., 2002).

Las ventajas del modelo SWAT son: (a) está constituido por una base física, existe numerosa documentación sobre las aplicaciones del mismo, (c) requiere datos de entrada relativamente fáciles de conseguir, (d) incluye una base de datos de cultivos para la modelización del crecimiento de los mismos, (e) incluye una base de datos de las características de diferentes coberturas de uso de la tierra, y (f) se pueden realizar estudios a nivel de cuencas.

Las limitaciones que presenta el modelo SWAT son: (a) no realiza la simulación de eventos subdiarios (por ejemplo, la ocurrencia de una tormenta) y (b) realiza la simulación del direccionamiento de pesticidas, uno por vez, a través de la red de corrientes.



Figura 5. Representación del modelo hidrológico

Fuente: Water Scienci Basics

2.7 ESTADO DEL ARTE

El Estado del Arte se refiere a trabajos similares que se han ejecutado en años recientes. Ciertas aplicaciones de la ingeniería hidrológica pueden requerir análisis complejos que involucren variaciones temporales y/o espaciales de precipitación, abstracciones hidrológicas y escurrimiento. Típicamente, estos análisis encierran un gran número de cálculos y por ello pueden realizarse con una computadora digital. El uso de computadoras en todos los aspectos de la ingeniería hidrológica ha llevado a incrementar el énfasis en la modelación de cuencas. La modelación de cuencas comprende la integración de los procesos hidrológicos en un ente modelo, por ejemplo, un modelo de cuenca, con propósitos de análisis, diseño, escurrimiento a largo plazo, predicción de volumen, predicción o pronóstico de flujo en tiempo real. Dentro de estas el uso del SWAT se ha visto incrementado en los últimos años.

En (2014), Cacuango, J., resume su trabajo de la siguiente manera:

Se estableció en el año 2008 un sistema de monitoreo hídrico y meteorológico en la microcuenca del río Illangama, ubicada en la provincia de Bolívar, en Ecuador. La microcuenca del río Illangama posee un caudal promedio mensual de $75.95 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ y un valor de sedimento

simulado por año de $8255.33 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$. Los datos hídricos y climáticos colectados, proveen importante información para cuantificar el recurso hídrico de la zona de estudio, que constituye un requisito fundamental en el proceso de planificación de la cuenca como unidad territorial; es así que estos datos junto con otra información referente a la descripción físico-química de suelos, pendiente, uso y cobertura de la tierra en la microcuenca sirven de insumos para la interpretación espacial y modelamiento del ciclo del agua, la herramienta utilizada para realizar esta investigación fue el modelo matemático SWAT, el cual presenta una correspondencia estadística para la microcuenca del río Illangama de $r^2 = 0.7517$ resultando satisfactorio para el modelamiento y la interpretación de los escenarios generados.

Vélez, D. (2013), resume su trabajo:

El objetivo principal de esta investigación fue el de “Determinar la producción de sedimentos en la cuenca del río Milagro, en diferentes escenarios de uso del suelo, mediante un modelo hidrológico SWAT” y de acuerdo a los métodos para calcular la producción de sedimentos en los ríos, se utilizó el modelo hidrológico SWAT, este modelo es una herramienta para la evaluación del agua y suelo fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para el USDA el Servicio Agrícola de Investigación (ARS) de los Estados Unidos, ha sido validado en diferentes países a nivel mundial, 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. La cuenca del río Milagro se encuentra ubicada en la región costa del Ecuador en la provincia del Guayas, entre las coordenadas 645 000, 9 769500 y 693 000, 9 753000 con un área de 350 km^2 y aproximadamente cuya orientación es de este a oeste, la longitud de su cauce es de aproximadamente de 55 kilómetros con una elevación mínima de 10 m, máxima de 131 m y promedio de 36 m. Se corrió el modelo para los años desde 1977 hasta 1987, para la obtención de caudales, utilizando los datos de aforo observados de la estación limnimétrica Ingenio Luz María para comparar y obteniéndose como resultado un coeficiente de Determinación $r^2 = 0.76$ y un coeficiente de Nash-Sutcliffe de 0.94 lo cual se consideran aceptables. En cuanto a sedimentos los resultados indican que la producción promedio anual para el uso actual del suelo es de 13.26 ton/ha/año , lo cual corresponde a $952 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$, con un grado de erosión mediana de 0.95 mm/año , para el escenario que corresponde a la vegetación original que pudo haber obtenido la cuenca del río Milagro es de 12.07 ton/ha lo cual corresponde a $873 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$, con un grado de erosión mediana de 0.87 mm/año para el escenario tres el de aptitud del suelo es de 14.93 ton/ha lo cual corresponde a $1084 \text{ m}^3/\text{km}^2/\text{año}$, con un grado de erosión alta de 1.08 mm/año , producción superior al de los otros escenarios, esto sería posible debido a que la gran mayoría del uso del suelo de la cuenca

del río Milagro está siendo subutilizada, lo cual concuerda con el mapa de conflictos de uso de la cuenca en estudio, finalmente se recomienda hacer una calibración y validación del modelo SWAT, en el futuro en la cuenca del río Milagro, y considerar la implementación de estaciones hidrométricas a lo largo del río Milagro y/o restaurando las existentes, tomando en cuenta las fuentes puntuales como el caudal que ingresa al sistema del río Chimbo mediante el estero Anapoyo por el Sistema de riego Milagro, en la época seca del año, fortalecer la investigación con el uso de modelos matemáticos en el país y continuar con la evaluación y validación del modelo SWAT en otras cuencas del país.

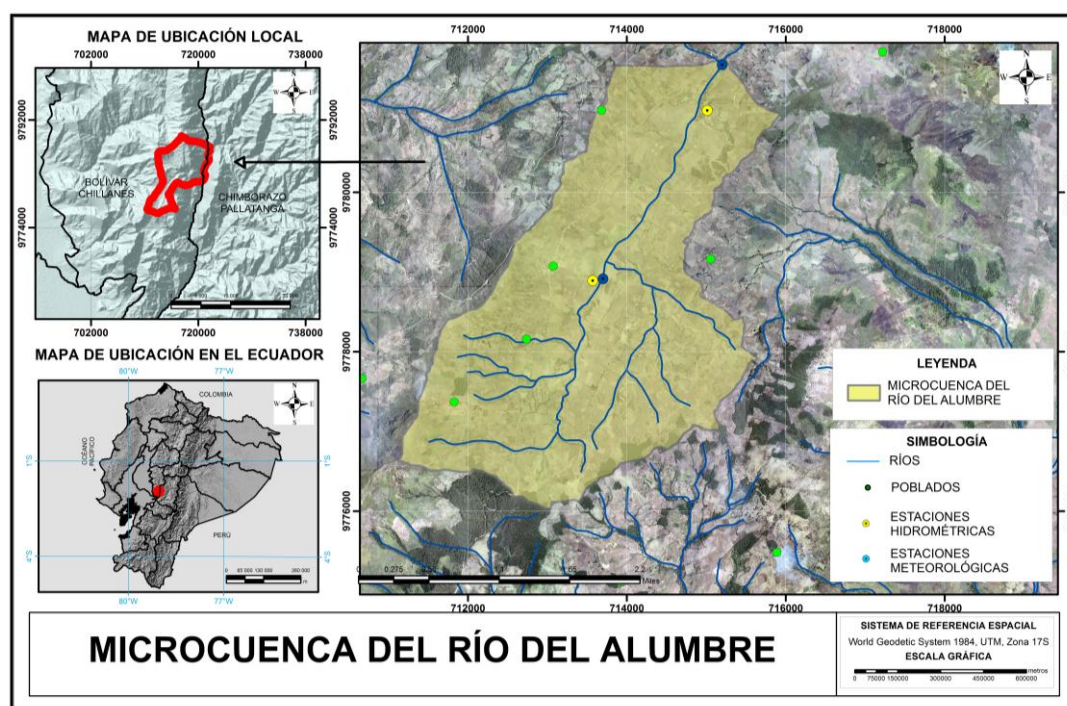
Proaño, M. (2013), resume su trabajo así:

Como una herramienta de apoyo a la gestión de la Subcuenca del Río Ambato, se decidió correr el modelo hídrico SWAT para determinar cómo las diferentes prácticas agrícolas afectan en la generación de caudales y sedimentos. Para ello, fue necesario contar con información física y climática la cual debe ser organizada, almacenada y procesada con la ayuda de los sistemas de información geográfica. Luego de su ejecución, el modelo permite ser calibrado tanto para caudales como para sedimentos, usando para ello datos reales de estas variables. Posteriormente es posible crear escenarios en los que se simulen diferentes situaciones planteadas por el usuario con la finalidad de predecir cómo estos cambios afectarían a la producción de agua en el área de estudio.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 UBICACIÓN, LÍMITES Y EXTENSIÓN

La microcuenca del río Del Alumbre se encuentra ubicada en la provincia de Bolívar, con una extensión de 1441.46 hectáreas, ubicada en el cantón Chillanes, al sureste de la provincia, su ubicación se observa en el Mapa 1. En la parte alta de la microcuenca ubicada a 2800 msnm se encuentra la zona de vida bosque montano alto y la parte baja de la microcuenca corresponde a la zona de vida bosque montano bajo a una cota de 1800 msnm aproximadamente.



Mapa 1. Mapa base de la Microcuenca del Río del Alumbre

Elaborado: Villacrés, C.

Fuente: Imagen Satelital, SINAGAP

3.2 DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

3.2.1 Paisajes Naturales

Las vertientes y estribaciones andinas externas, occidentales con cobertura de cenizas

Alcanzan hasta los 3 000 – 3 200 msnm alrededor de la cuenca de Guaranda. A pesar de las condiciones de alta humedad ambiental, es también posible de reconocer aquí las dos generaciones de piroclásticas que caracterizan los volcanes recientes. En las proximidades de los volcanes de la cordillera occidental, numerosas formas volcánicas vienen a sobreponerse al modelo preexistente; coladas de lava, lahares, corrientes lodosas de deshielo, flujos piroclásticos, etc. La presencia de numerosas paleo formaciones de vertientes como deslizamientos de masa,

fenómenos de gravedad o coluviones; están bien representadas sobre los flancos de los valles de vertiente occidental del pie de monte central. Constituidas por depósitos arcillo-pedregosas recubiertos de cenizas, colonizados y estabilizados por la vegetación, estas formas, actualmente no funcionales, constituyen un recurso agrícola no despreciable, razón por la cual comienza comúnmente aquí el desmonte agrícola. (Winckell, et al., 1993).

Las vertientes y estribaciones andinas externas, zonas deprimidas y los valles en garganta

Situada sobre la vertiente occidental. Esta disposición es excepcional en toda la cadena andina ecuatoriana, donde las cuencas están siempre ubicadas en posición central, encerradas entre las dos cordilleras meridianas y las altas tierras frías que les son asociadas.

La cuenca de Chillanes, al Sur, tiene una disposición simple. Se asemeja a un valle cuyo fondo, ondulado o moderadamente disectado, se alarga sobre una extensión de 15 km del Norte a Sur pero solo algunos kilómetros de ancho. Los afloramientos de la cuenca de Chillanes, menos disectada, son menos explícitos. Demuestran, sin embargo, una estratificación idéntica con una sedimentación lacustre horizontal conteniendo caídas piroclásticas eólicas con capas concordantes de toba y de areniscas finas, de gris a beige, localmente con estratificaciones entrecruzadas. Está recubierta por un episodio coluvio-aluvial con bloques y piedras angulosas, heterométricas y luego por los recubrimientos piroclásticos eólicas de cerca de 3 m de espesor. (Winckell, et al., 1993).

3.2.2 Paisajes Agrarios

Los paisajes agrarios que encontramos en la microcuenca son los que se detallan a continuación:

Cultivos Anuales predominio exclusivo del Maíz.

En todas estas zonas predomina ampliamente el maíz: las parcelas son muy fragmentadas y las tapias vivas numerosas. Estos elementos del paisaje reflejan estructuras comunes de crecimiento de la población, con una amplia mayoría indígena, y de tipo de propiedad exclusivamente minifundista. En realidad, es raro que haya solo maíz y fréjol en una parcela. Se puede igualmente encontrar haba, chocho, habilla, calabaza, zambo, alfalfa, arveja, cebada, papa. Lo que de lejos aparece como un campo fisonómicamente muy homogéneo, pues el maíz predomina a la vez en el volumen del material vegetal y en altura sobre las demás especies asociadas, es en realidad una parcela de cultivo de gran heterogeneidad. (Huttel. C, et al., 1999).

Vertientes desmontadas del sur del país – formaciones principalmente leñosas

Si bien el aspecto es comparable en toda la unidad, la composición florística varía. En las zonas más húmedas persisten reliquias de bosque siempre verde con (*Cedrela Cedrela odorata L*) y

Weinmannia (Weinmannia tomentosa L.). Las malezas comprenden especies secundarias, entre las cuales predominan las solanáceas altas, acompañadas de Lobeliáceas gigantes, Melastomáceas, Tiliáceas, Sambucus, Braccharis y Bocconia. En las pendientes más fuertes se encuentran formaciones densas de bambú (Bambu chusquea). Las partes más bajas, más secas y a menudo de pendientes más débiles son más intensamente utilizadas y, muchas veces, las reliquias de vegetación natural no se presentan sino bajo la forma de pies aislados. Los árboles son caducifolios con la presencia de Jacarandá (Jacaranda mimosifolia), Tabebuia (Tabebuia rosea) y una bombacácea (Bombax ellipticum). Los arbustos dispersos son Crotón (Codiaeum variegatum), Cantua (Cantua buxifolia) y Mimosa (Mimosa púdica). Aparecen especies secundarias propias del piso cálido como las de los géneros Ochoroma y Cecropia. (Huttel. C, et al., 1999).

Los principales productos agrícolas de la microcuenca del río del Alumbre son los cultivos de maíz (*Zea mays*), fréjol (*Phaseolus vulgaris*) y pasto naturalizado donde la especie predominante es el kikuyo (*Pennisetum clandestinum*). Además, en la zona todavía se pueden observar pequeños rodales de bosques intervenidos con la presencia de especies forestales arbóreas y arbustivas nativas. (Cruz, et al., 2010)

3.2.3 Suelos

La clasificación de suelos de la microcuenca del río Del Alumbre corresponde a un marco geológico regional muy complejo, de composición litológica diversa que ha dado origen a una variedad de tipos de suelos, cuya composición física-química y textura está caracterizada por los factores climáticos y por el relieve que presenta.

En la microcuenca del río Del Alumbre, de acuerdo a la clasificación taxonómica, son los siguientes: Inceptisol, que cubre una superficie de 73.37 hectáreas (5.23%), seguido por los suelos Inceptisol + Entisol con 467 hectáreas (32.43%) y finalmente el orden Mollisol con 898.63 hectáreas (62.43%) de los suelos de esta microcuenca.

El orden Inceptisol se caracteriza por estar formado por materiales líticos de naturaleza volcánica y sedimentaria. Son superficiales a moderadamente profundos y de topografía plana a quebrada.

El orden Entisol son suelos derivados de materiales aluviónicos como residuales de textura moderadamente gruesa a fina, de topografía variable entre plana a extremadamente empinada.

El orden Mollisol son suelos superficiales a moderadamente profundos, con epipedón mólico, desarrollados de materiales volcánicos y sedimentarios; tienen horizontes superficiales

oscurecidos, estructurados en gránulos bien desarrollados de consistencia friable y dotados suficientemente de bases, principalmente de Ca y Mg, presentan topografías que varían entre ligeramente inclinada a extremadamente empinada (Barrera, et al., 2007).

Suelos de la microcuenca del río del alumbre

En la microcuenca del río Del Alumbre la mayor superficie contiene suelos de tipo Andic HAPLUSTOLLS (IHFE), con 898.63 ha que representa el 62.34%, la menor ocupación es de Hydric HAPLUDANDS + Litic UDORTHENTS con 30.41 ha y el 2.11% como se observa en el Cuadro 3.1; los tipos de suelos que se detallan a continuación:

Andic HAPLUSTOLLS (IHFE)

Suelos con poca arcilla de 5 a 100 cm, con revestimientos menos del 30% de arcilla, con temperatura de 13° a 20-22 °C entre 50 a 100 cm de profundidad, durante todo el año con una variación muy débil. Generalmente altura de 1800 a 2600 msnm. Pendiente suave. (ORSTOM, 1978).

Hydric HAPLUDANDS - Litic UDORTHENTS (AAA4)

Suelos pseudo-limoso negro, con retención de agua a pF 3, 50 a 100% sobre muestras sin desecación, con temperatura de 13° a 20-22 °C entre 50 a 100 cm de profundidad, durante todo el año con una variación muy débil. Altura de 2000 a 3000 msnm, área muy húmeda con mucha lluvia. (ORSTOM, 1978).

Cuadro 1. Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes tipos de Suelo, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2014.

Sigla	Orden Taxonómico	Subgrupo Taxonómico	Superficie de ocupación (ha)	Porcentaje de ocupación
IHFE	MOLLISOL	Andic HAPLUSTOLLS	898.63	62.34
DHFU	INCEPTISOL	Typic HAPLUDANDS	75.37	5.23
AAA3	INCEPTISOL + ENTISOL	Typic HAPLUDANDS + Litic UDORTHENTS	437.04	30.32
AAA4	INCEPTISOL + ENTISOL	Hydric HAPLUDANDS + Litic UDORTHENTS	30.41	2.11
TOTAL			1441.46	100

Fuente: SINAGAP

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Typic HAPLUDANDS (DHFU)

Suelo pseudo-limoso negro, con retención de agua a pF 3, 20 a 50% sobre muestras sin desecación. Con temperatura de 13° a 20-22 °C entre 50 a 100 cm de profundidad, durante todo el año con una variación muy débil. Altura de 2000 a 3000 msnm, pendiente occidental, área menos húmeda o más arenosa. (ORSTOM, 1978).

3.2.4 Hidrología De Las Microcuencas Del Río Del Alumbre

En la provincia de Bolívar, todo su sistema hídrico vierte sus aguas al macro sistema hidrográfico de la cuenca del río Guayas, siendo estratégica y vital en la generación de recursos hídricos, por cuanto del 30 al 40% de aporte en caudal de los 36572 m³• año⁻¹ de agua que recibe el río Guayas, provienen de este sistema. Este sistema hidrográfico está conformado por la cordillera del Chimbo, la cual atraviesa longitudinalmente de norte a sur a la provincia de Bolívar casi por la mitad del territorio, siendo como una línea divisoria de aguas, formando dos secciones muy diferentes: el flujo hídrico de la sección oriental y el de la sección occidental.

El flujo hídrico de la sección oriental ha originado la formación del río Chimbo a la altura del cantón Guaranda, el cual recorre de norte a sur a la provincia, conformando la subcuenca del río Chimbo, que es el sistema hidrográfico más importante de Bolívar. En la sección occidental, en cambio, el flujo hídrico se dirige hacia dos sistemas de mayor magnitud ubicados en la costa ecuatoriana. (Barrera, et al, 2007).

El sistema de los afluentes del Zapotal y el sistema de afluentes del Catarama. El flujo hídrico hacia el sistema del río Guayas fluye a través del río Babahoyo. En el caso del sistema del río Chimbo, antes de llegar al del río Guayas este sistema se convierte en afluente del río Yaguachi. (Barrera, et al, 2007)

Las microcuencas de los ríos Illangama y Del Alumbre son afluentes del río Chimbo. La subcuenca del río Chimbo se ubica en la provincia de Bolívar, incluye los cantones Guaranda, Chimbo, San Miguel y Chillanes. Comprende cuatro zonas de vida: bosque húmedo subtropical, montaña templada baja, montaña templada y boreal (Cañadas, 1985).

Dentro del sistema de cuencas hidrográficas del país, esta subcuenca forma parte del sistema hidrográfico del río Yaguachi. La subcuenca del río Chimbo aporta entre el 30 y 40% del caudal total del río Guayas (36 572 m³/año). Este caudal, tanto en cantidad como calidad, es afectado por el alto flujo erosivo generado en la provincia de Bolívar (aproximadamente 8 000 000 t de sedimentos al año) (Barrera, et al, 2005).

3.2.5 Geomorfología

La geomorfología es el estudio de las diferentes formas del relieve, además de su pendiente, descripción, naturaleza, origen, evolución e interrelación; tiene que poner en evidencia los aspectos genéticos de los diferentes fenómenos que han intervenido o están interviniendo en la formación de los diferentes modelos del relieve. (Moreno, 2001).

El conocer las unidades geomorfológicas presentes en el área de estudio, y dentro de estas sus diferentes formas de relieve, permite saber su pendiente, dentro de cada uno de estos aspectos geográficos, guardan similitud en cuanto a sus características morfológicas, lo que determina que presenten similares potencialidades y se los pueda dotar de igual manejo. En muchos mapas de suelos o vegetación, parte de la información geomorfológica está incorporada en la descripción de formas de relieve, en las que ciertas unidades de suelos y formaciones vegetales se presentan asociadas en forma sistemática. (Couto, W., 1996).

3.2.6 Pendiente

El grado de elevación de un terreno con respecto a su longitud es la pendiente, esta determina limitaciones ya sea que definen dificultades para la mecanización y el riego o porque indica la mayor susceptibilidad a la erosión cuando ésta sobre pasa ciertos límites.

Este factor determina las medidas de conservación y las prácticas de manejo necesarias para la preservación del suelo y del agua. A medida que el terreno presenta más pendiente requiere de más manejo, incrementando los costos de mano de obra y equipo.

La pendiente para el presente estudio se la agrupó en clases, cuyos rangos y descripción se detallan en el Cuadro 3.2.

3.2.7 Uso y cobertura de la tierra

En lo relacionado a la microcuenca del río Del Alumbre la agricultura y ganadería son las principales fuentes de ingresos económicos para los habitantes de ésta microcuenca. Estas actividades se deben seguir efectuando en las áreas actuales. Sin embargo es necesario limitar el incremento de la frontera agrícola en la zona, y limitar su área de crecimiento (Barrera, et al., 2008).

De la fotointerpretación se determinó que la mayor superficie corresponde a cultivos anuales con 911.31 ha, correspondiente al 63.22%, la menor ocupación es el área destinada a Industria con 0.2 ha que corresponde al 0.01%, el Cuadro 3.3 detalla el uso del suelo en la microcuenca.

Cuadro 2 Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes rangos de pendiente, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2012

Clase	Rango (%)	Descripción	Superficie de Ocupación (ha)	Porcentaje de Ocupación
1	0 - 12 %	Pendiente muy suave o nula	266.57	19
2	12% - 25%	Pendiente suave, regular con ligera ondulación	478.91	34
3	25% -50%	Pendiente media, ondulacion media	536.31	37
4	50% - 75%	Pendiente Fuerte	129.38	9
5	> 75%	Pendiente escarpada	16.26	1
TOTAL			1427.43	100

Fuente: SIGAGRO

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

3.3 CARACTERIZACIÓN DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE

3.3.1 Caracterización climática

El clima de una cuenca provee de las entradas de agua y de energía que controlan el balance hídrico, y determina la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico (Neitsh et al., 2005). Por lo tanto, para realizar la modelización hidrológica es necesario disponer de series de datos espaciales y temporales completas de las variables relacionadas con los procesos hidrológicos (Aguilar, 2008). En última instancia, el éxito de la modelización hidrológica depende de la disponibilidad de datos climatológicos (Beven, 2005).

Cuadro 3 Ubicación de las estaciones meteorológicas en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar. 2014.

Estación	Microcuenca del río	Coordenadas		Sector
		S	W	
Guayabal (WS11)	Del Alumbre	1° 59' 55"	79° 04' 50"	Guayabal
Pacay (WS12)	Del Alumbre	1° 58' 45"	79° 03' 51"	Pacay

Fuente: Villacrés, C., 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Los datos más importantes en un estudio hidrológico son los relacionados con el volumen de agua que la cuenca recibe por la precipitación, y con la cantidad de agua devuelta a la atmósfera por evapotranspiración (Galván, 2011). Los registros de precipitación y temperatura fueron obtenidos

de las estaciones meteorológicas automáticas, los datos que poseen una frecuencia de 15 minutos, son procesados constantemente. Se ubicaron en función de la representatividad del lugar.

El escogimiento de los sitios se lo realizó luego del análisis de los factores diferenciables inducidos por el clima como son: zonas de vida, vegetación remanente predominante, génesis de los suelos, ecosistemas; esto busca, con el apoyo de los datos colectados, caracterizar de mejor manera los diferentes microclimas presentes en la zona de estudio; es así que se cuenta con información de precipitación (mm), temperaturas: máximas, mínimas y promedia ($^{\circ}\text{C}$), humedad relativa (%), velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), radiación solar ($\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$), dirección del viento ($\varnothing$) y presión atmosférica (mbar). En base a lo descrito y con el fin de preservar las estaciones, se las ubicó en las zonas denominadas Guayabal y Pacay, las coordenadas se las detalla en el Cuadro 3.4.

3.3.2 Caracterización hídrica

El monitoreo hídrico de la microcuenca se realizó mediante la recopilación de los datos de nivel grabados en las estaciones hidrométricas automáticas. Cada estación posee un sensor que registra los datos en su memoria cada 15 minutos, medidos por un sensor de presión. La información del nivel del río requiere ser transformada en información de caudal de los dos drenajes que se encuentran monitoreándose, para lo cual se requiere aforos periódicos.

El cálculo del caudal a partir de la información de nivel se la realiza al calibrar las estaciones mediante aforos, utilizando tres métodos dependiendo de las condiciones del drenaje: Micro molinete sección transversal, flotador y dilución de sal. Con la ayuda de observaciones de los colaboradores a la investigación, agricultores de la zona, la información generada en los aforos es reforzada por la lectura diaria del nivel del río mediante el uso de reglas fijadas a las estaciones.

El emplazamiento de las estaciones de flujo o de presión se la realizó en función del análisis de superficie que aporta el drenaje hacia ella, evaluando escenarios donde la agricultura ocupa la mayor superficie. Adicionalmente se consideró la importancia de contar con estaciones en la zona más baja de la cuenca, a fin de poder contar con información del sitio donde el drenaje recibe toda la escorrentía superficial de la cuenca, dato de crucial importancia en la calibración de modelos matemáticos de simulación hidrológica. La ubicación de los sensores se detalla en el cuadro 3.5.

El sensor hidrométrico utilizado es el Levelogger que está diseñado para medir con exactitud niveles de aguas subterráneas, de superficie y la temperatura de la misma. Las lecturas de nivel son compensadas por temperatura y presión barométrica, las cuales se graban en otro sensor

denominado Barologger que se lo coloca fuera de los drenajes, el Barologger tiene incorporados algoritmos matemáticos basados en presión atmosférica y cambios de presión de agua, lo cual ofrece mayor exactitud en las mediciones. La programación de los Levellogger se hace con una aplicación específica, proporcionada por el fabricante del sensor desde un PC o un computador portátil. El computador se comunica con el Levellogger o el Barologger a través de un cable lector óptico. Este cable utiliza un puerto lector de información infrarrojo conectado al sensor y un puerto de comunicación USB para transmitir los datos almacenados al computador. Todas las características del funcionamiento del sensor utilizado se anexan presente informe (Anexo 1).

Cuadro 4 Ubicación de las estaciones hidrométricas en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar. 2014.

Estación	Microcuenca del río	Coordenadas		Drenaje	Sector
		S	W		
Guayabal (EC11)	Del Alumbre	1° 59' 57"	79° 04' 43"	Río Guayabal	Guayabal
Pacay Bridge (EC12)	Del Alumbre	1° 58' 29"	79° 03' 54"	Río Guayabal	Pacay

Fuente: Villacrés, C., 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

3.3.2.1 Sensor hidrométrico levellogger solinst

3.3.2.2 Aforo de caudales

El conocimiento de la variación del caudal que fluye por una determinada sección de un cauce natural es de suma importancia en los estudios hidrológicos ya que nos sirve para calibrar el modelo y comparar los resultados obtenidos con los resultados simulados. De acuerdo con la calidad y la cantidad de los registros de caudales necesarios en un estudio hidrológico, las mediciones se pueden hacer de una manera permanente o instantánea, las mediciones continuas de caudales requieren de la instalación de una estación hidrométrica (limnimétrica) o de una estación Hidrográfica (limnigráfica). Las mediciones aisladas, puntuales o instantáneas, se realizan en determinados momentos en que se desee conocer la magnitud de una corriente en particular. (Marbello, 2008).

3.3.2.3 Método del flotador

Son los más sencillos de realizar, pero también son los más imprecisos; por lo tanto, su uso queda limitado a situaciones donde no se requiera mayor precisión. Con este método se pretende conocer la velocidad media de la sección para ser multiplicada por el área, y conocer el caudal, según la ecuación que se encuentra a continuación. (Marbello, 2008).

$$Q = \text{Velocidad} * \text{Área}$$

Para la ejecución del aforo se procede de la siguiente forma. Se ubica en la parte alta de la corriente de longitud L ; se mide el área A , de la sección, y se lanza un cuerpo que flote, aguas arriba del primer punto de control, y al paso del cuerpo por dicho punto se inicia la toma del tiempo que dura el viaje hasta el punto de control corriente abajo. Como se muestra en la figura 6. (Marbello, 2008).

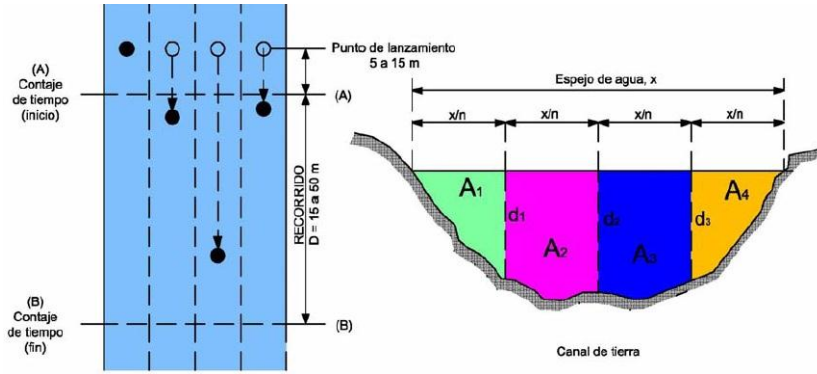


Figura 6 Esquema ilustrativo para aforo con el método del flotador.

Fuente: Cueva del civil.

La velocidad superficial de la corriente, V_s , se toma igual a la velocidad del cuerpo flotante y se calcula mediante la relación entre el espacio recorrido L , y el tiempo de viaje t . (Marbello, 2008)

$$V_s = \frac{L}{t}$$

Se considera que la velocidad media de la corriente, V_m , es del orden de $0.75V_s$ a $0.90V_s$, dónde el valor mayor se aplica a las corrientes de aguas más profundas y rápidas (con velocidades mayores de 2 m.s^{-1}). Habitualmente, se usa la siguiente ecuación para estimar la velocidad media de la corriente.

$$V_m = 0.85V_s.$$

Si se divide el área de la sección transversal del flujo en varias secciones, de área A_n , para las cuales se miden velocidades superficiales, V_{sn} , y se calculan velocidades medias, V_{mn} , el caudal total se podrá determinar como la sumatoria de los caudales parciales q_i , de la siguiente manera: (Marbello, 2008).

$$Q = \sum_{i=1}^n q_i = V_{m1} * A_1 + V_{m2} * A_2 + \dots + V_{mn} * A_n$$

Se pueden obtener resultados algo más precisos por medio de flotadores lastrados, de sumersión ajustable. Estos flotadores consisten en un tubo delgado de aluminio, de longitud L_{fl} , cerrado en

ambos extremos y con un lastre en su extremo inferior, para que pueda flotar en una posición próxima a la vertical, de tal manera que se sumerjan hasta una profundidad aproximadamente de 25 a 30 cm sobre el fondo, y emerjan unos 5 a 10 cm. (Marbello, 2008).

3.3.2.4 Método de molinete o correntómetro

En el río para determinar el caudal que pasa por una sección transversal, se midió la velocidad utilizando un molinete de lectura digital marca Flowmeter. Con este instrumento se mide la velocidad en un único punto, por lo que para el cálculo total de la sección se realizó un conjunto de mediciones. (Marbello, 2008). El procedimiento para determinar este caudal, se describe a continuación con la ayuda de la Figura 6, para registrar las observaciones y calcular las velocidades y caudales. (Marbello, 2008).

1. La sección transversal del río donde se va a realizar el aforo se divide en varias subsecciones, tal como se puede observar en la (Figura 6). El número de subsecciones depende del caudal estimado que podría pasar por la sección: En cada subsección, no debería pasar más del 10% del caudal estimado que pasaría por la sección. Otro criterio es que, en cauces grandes, el número de subsecciones no debe ser menor de 20.
2. El ancho superior de la sección transversal (superficie libre del agua) se divide en tramos iguales, cuya longitud es igual al ancho superior de la sección transversal dividido por el número de subsecciones calculadas.
3. En los límites de cada tramo del ancho superior del cauce, se trazan verticales, hasta alcanzar el lecho. La profundidad de cada vertical se puede medir con la misma varilla del correntómetro que está graduada. Las verticales se trazan en el mismo momento en que se van a medir las velocidades.
4. Con el correntómetro se mide la velocidad a dos profundidades en la misma vertical a 0.2 y a 0.8 de la profundidad, con una medida digital del instrumento.
5. Se obtiene la velocidad promedio del agua en cada vertical. La velocidad promedio del agua en cada subsección es el promedio de las velocidades promedio de las verticales, que encierran la subsección.
6. El área de cada subsección se calculará fácilmente considerándola como un paralelogramo cuya base (ancho del tramo) se multiplica por el promedio de las profundidades que delimitan dicha subsección.

7. El caudal de agua que pasa por una subsección se obtiene multiplicando su área por el promedio de las velocidades medias registradas, en cada extremo de dicha subsección. (Marbello, 2008).

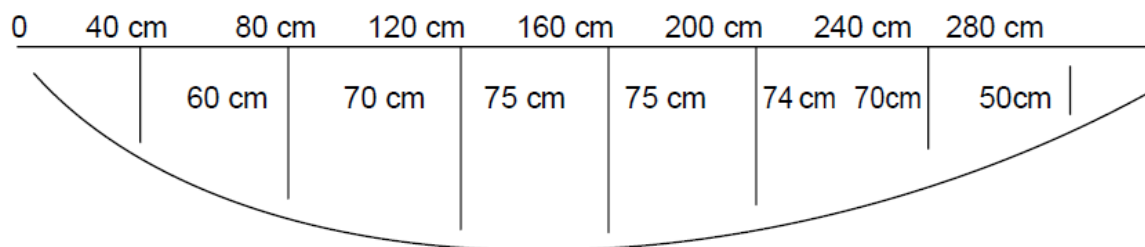


Figura 6. Tramos en que se divide el ancho superior del río, sub divisiones y profundidad de las verticales.

Fuente: (Marbello, 2008).

3.3.2.5 Método dilución de sal

El método de dilución de la sal es una técnica sencilla y práctica para medir el caudal de las corrientes de montaña donde la turbulencia es alta y la corriente no excede los $5 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La velocidad de flujo óptima para este método de medición es de $1-2 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La técnica se basa en el principio de que una determinada cantidad de sal se diluye más por una gran cantidad de agua que por una pequeña. Esto significa que cuanto más alto es el caudal más diluido será la sal que se vierte el río aguas arriba. El método consiste en la inyección o inserción de una cantidad conocida de sal en un arroyo. La sal actúa como un trazador para medir el caudal. La concentración de sal disuelta se mide aguas abajo en un punto donde se haya mezclado completamente con el flujo de agua (Merz, J; Doppmann, G; 2006).

La concentración de sal no se determina directamente, sino a través de la medición de la conductividad eléctrica de la corriente de agua. De ahí que la relación entre la concentración de sal y la conductividad eléctrica debe ser conocida. Esto se determina mediante la adopción de las medidas de calibración para determinar la relación entre la concentración de sal y la conductividad eléctrica (Merz, J; Doppmann, G; 2006). Las mediciones realizadas para la calibración, se muestran como puntos en forma de línea recta que se puede describir en forma de una regresión lineal:

$$y = ax + b$$

Donde,

y = concentración de sal [$\text{mg} \cdot \text{l}^{-1}$]

x = conductividad [$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$]

a = pendiente [sin dimensión]

b = intercepto

Hasta alrededor de $1000 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, la relación es lineal con una pendiente de alrededor de 0.45-0.6. Esta pendiente se denomina factor de calibración (Cal), y su valor exacto tiene que ser conocido para calcular la tasa del caudal. Esta varía con el tipo de sal, la conductividad natural de la corriente de agua, y el tipo de instrumento utilizado.

El resultado de las mediciones de conductividad eléctrica de campo es un diagrama de concentración-tiempo en el punto de medición (Merz, J; Doppmann, G; 2006). El caudal se determina integrando la zona por debajo de la curva mediante la siguiente ecuación:

$$Q = \frac{S}{\text{Cal} * \int (C_{(t)} - C_0) * dT}$$

Donde,

Q = Caudal [$\text{l}\cdot\text{s}^{-1}$]

S = cantidad de sal inyectada [mg]

Cal = factor de calibración [$(\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}) / (\text{mg}\cdot\text{l}^{-1})$]

C (t) = conductividad después de un lapso de tiempo t [$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$]

C0 = nivel base de conductividad [$\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$]

dT = intervalo de tiempo [s]

3.3.2.6 Correlación entre el sensor hidrométrico y los aforos

Para la calibración de las estaciones hidrométricas se desarrolló la correlación potencial, ecuación que presento el mejor r^2 , entre el nivel registrado de cada estación en dónde se encontraba nuestros sensores (Levellogger) y los aforos para obtener el caudal de los ríos con los métodos antes ya descritos.

Al presentar el nivel una correlación potencial positiva, es de gran utilidad cuantificar esa relación, pues de ese modo podríamos evaluar, aunque fuera de modo aproximado, el caudal de un lugar a partir del nivel registrado por los sensores.

3.4 INFORMACIÓN CARTOGRÁFICA DIGITAL TEMÁTICA (SIG)

El procedimiento para la recopilación y estructuración de la información temática digital bajo un ambiente SIG, contemplo básicamente las fases que se detallan a continuación:

3.4.1 Recopilación, análisis y selección de información secundaria

La información temática se obtuvo mayormente del SINAGAP (antiguo SIGAGRO), y para la información base se utilizó cartografía del Instituto Geográfico Militar.

3.4.2 Parámetros cartográficos y sistema de referencia espacial

Se estandarizó la información a ser utilizada en el modelamiento bajo los siguientes parámetros:

Escala detalle:	1:50000
Proyección Cartográfica:	Universal Transversa de Mercator
Zona Cartográfica:	17
Elipsoide:	World Geodetic system 1984
Datum Horizontal:	World Geodetic system 1984
Datum Vertical:	Medio Nivel Medio del Mar
Posición:	Sur
Formato:	Geodatabase Personal

3.4.3 Procesamiento de la información

El procesamiento de la información cartográfica consistió en:

- Estandarización de los datos
- Verificación de formatos
- Verificación y continuidad de detalles
- Asignación de atributos a las entidades geográficas

3.4.4 Trabajo de campo

El trabajo desarrollado en campo consistió en verificar los datos cartográficos obtenidos en función de la escala, así como la vigencia y actualización de la información.

3.4.5 Elaboración de cartografía definitiva

Se realizaron los ajustes y correcciones a los errores identificados en campo, a fin de que la información cartográfica digital esté correctamente estructurada.

3.5 EL MODELO SWAT

3.5.1 Descripción

SWAT corresponde al acrónimo de “Soil and Water Assessment Tool”. Es un programa de modelización hidrológica desarrollado por el Servicio de Investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Desde que el modelo SWAT fue creado a principio de los 90, ha estado en continua revisión y expansión de sus capacidades; la versión usada en este trabajo es la

2005 (Neitsch et al., 2005). También se han desarrollado extensiones para su uso dentro de los Sistemas de Información Geográfica como ArcView y ArcGIS.

Cuadro 5. Superficie y porcentaje de ocupación de los diferentes Usos y Cobertura de Tierra, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador

Uso	Superficie en (ha)	Superficie en (%)
Cultivo Semi perenne	8.11	0.56
Industria	0.2	0.01
Área Urbana	5.16	0.36
Bosque Intervenido	7.77	0.54
Bosque Natural	23.87	1.66
Bosque Plantado	14.78	1.03
Cultivo Anual	911.31	63.22
Cultivo Perenne	17.7	1.23
Pasto Cultivado	306.79	21.28
Pasto Natural	74.86	5.19
Vegetación Arbustiva	70.91	4.92
TOTAL	1441.46	100

Fuente: ORTOFOTO E INTERPRETACIÓN

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Para el desarrollo de esta Tesis utilizó la extensión creada para ArcGIS 10.0 denominada ArcSWAT 2012 10_0.9. El modelo SWAT, permite trazar las redes de drenaje y las subcuencas a partir del Modelo Digital de Elevaciones (MDE) y calcular el balance diario de agua a partir de datos meteorológicos, edafológicos y usos del suelo. Los procesos asociados al movimiento del agua son simulados por SWAT a partir de los datos de entrada. De esta manera el programa realiza una predicción del comportamiento de cuencas hidrográficas complejas a largo plazo. Para conseguir estos objetivos el modelo:

1. Tiene una base física.
2. Usa los registros de entrada reales disponibles para la cuenca.
3. Es eficiente a nivel computacional y realiza operaciones para grandes cuencas en un tiempo razonable.

4. Es continuo en el tiempo y capaz de simular largos periodos.

El modelo se compone de una serie de submodelos o módulos: meteorológico, hidrológico, sedimentario, crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, dinámica de pesticidas y gestión agrícola. SWAT permite la simulación de un gran número de procesos físicos en la cuenca. Para esta Tesis sólo ha sido necesario usar el módulo hidrológico para la obtención de caudales.

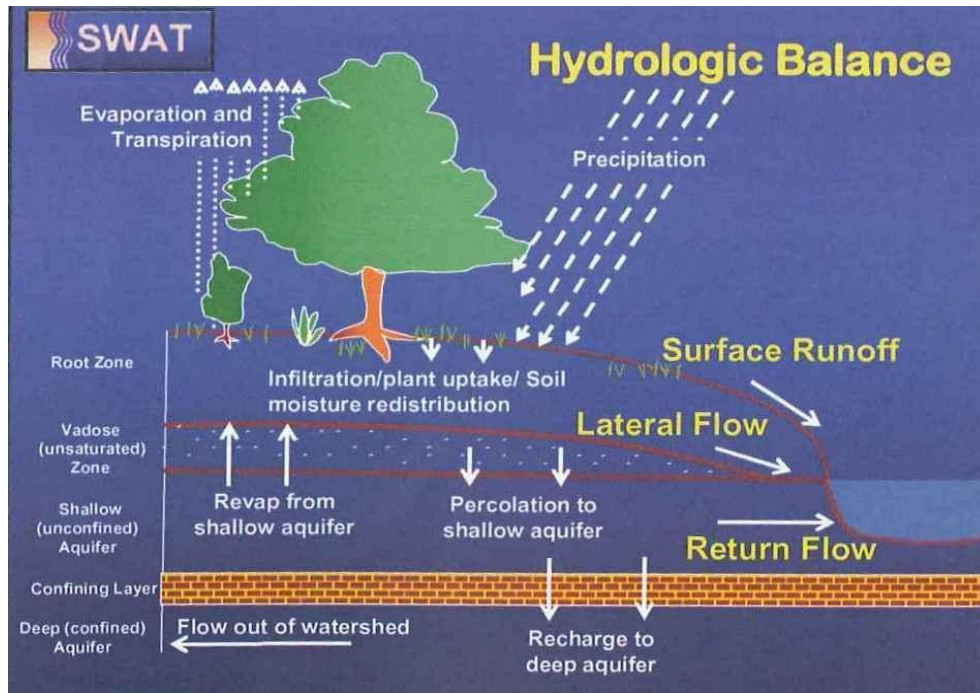


Figura 7. Descripción gráfica del Modelo SWAT.

Fuente: Uribe y Quintero, 2011.

La cuenca se compartimenta en varias subcuencas a través de un valor de área umbral, que dependerá del objetivo y de la exactitud del estudio; dichas subcuencas poseen una posición geográfica determinada, estando relacionadas con las vecinas. A su vez, las subcuencas se dividen en unidades de respuesta hidrológica (HRU) que engloban áreas con los mismos tipos de suelo, de usos y coberturas y pendientes, y que por lo tanto tendrán una similar respuesta a la precipitación. La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar diferencias en la evapotranspiración para los distintos tipos de suelos y coberturas vegetales. La escorrentía se predice separadamente para cada HRU y es canalizada en función del modelo digital del terreno para obtener el total en la cuenca; esto aporta una mayor precisión a la descripción física del balance de agua.

La simulación de la hidrología de la cuenca puede ser dividida en dos grandes componentes: la fase terrestre del ciclo hidrológico, que controla la cantidad de agua vertida al canal principal en cada subcuenca, y la fase de tránsito, que consiste en el movimiento del agua a través de la red de canales hasta su desembocadura o sección de cierre, como se ilustra en la Figura 7.

El modelo se basa en la ecuación general del balance hídrico:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw}) \quad (1)$$

donde SW_t es el contenido de agua en el suelo, SW_0 es el contenido inicial de agua en el suelo, t es el tiempo, R_{day} es la precipitación diaria, Q_{surf} es la escorrentía superficial, E_a es la evapotranspiración, W_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada y Q_{gw} es la cantidad de agua subterránea que retorna hacia los ríos como flujo base.

A continuación se describen brevemente los procesos físicos más importantes que tienen lugar en la cuenca y cómo los considera el programa SWAT.

3.5.1.1 Escorrentía superficial (Q_{surf})

La escorrentía superficial tiene lugar siempre que la intensidad de la precipitación que alcanza la superficie del suelo excede la tasa de infiltración. La infiltración disminuye cuando el suelo comienza a humedecerse y cuando el aporte de agua es mayor que la tasa de infiltración, entonces las depresiones superficiales se llenan. Si el aporte de agua continúa y las depresiones están llenas, comienza el movimiento del agua sobre la superficie del suelo o escorrentía superficial.

SWAT dispone de dos métodos para calcular la escorrentía superficial: el método del CN (Coeficiente de Escorrentía) del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS, 1972) y el modelo de infiltración de Green y Ampt (1911). Como sólo se dispone de la precipitación diaria para el periodo de estudio, se seleccionó el método del CN (Curve number) del SCS para el cálculo de la escorrentía superficial, y que es ampliamente utilizado en hidrología (Mishra et al., 2008; Chung et al., 2010).

Además, SWAT calcula individualmente para cada HRU y subcuenca el caudal máximo de avenida ("Peak runoff rate"), el tiempo de concentración del flujo sobre la superficie y del flujo canalizado, y el retraso ("lag") de la escorrentía superficial.

Método del CN (Curve Number o Coeficiente de Escorrentía) del SCS.

La ecuación del CN del SCS es (SCS, 1972):

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - I_a)^2}{(R_{day} - I_a + S)} \quad (2)$$

donde, Q_{surf} es la escorrentía o exceso de precipitación (mm), R_{day} es la precipitación diaria (mm), I_a son las abstracciones iniciales que incluyen el almacenamiento superficial, la interceptación y la infiltración previa a la escorrentía (mm) y S es la capacidad máxima de almacenamiento de agua por parte del suelo sin que se produzca escorrentía (mm).

La capacidad máxima de almacenamiento de agua varía espacialmente debido a cambios del suelo, uso y pendiente, y también temporalmente debido a cambios en el contenido de agua del suelo. La capacidad de retención se define como:

$$S = 25.4 \left(\frac{1000}{CN} - 10 \right) \quad (3)$$

donde CN es Curve Number (Coeficiente de Escurrimiento). Experimentalmente se ha encontrado que la abstracción inicial (o umbral de escorrentía I_a) es aproximadamente $0.2 S$ y la ecuación 2 se puede expresar como:

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2 \cdot S)^2}{(R_{day} + 0.8 \cdot S)} \quad (4)$$

Caudal máximo de avenida (“peak runoff rate”) o caudal punta.

Es el caudal máximo que se alcanza con un evento de precipitación determinado. SWAT estima este valor mediante una modificación del método racional (Neitsch et al., 2005a):

$$q_{peak} = \frac{\alpha_{tc} \cdot Q_{surf} \cdot A}{3.6 \cdot t_{conc}} \quad (5)$$

donde q_{peak} es el caudal máximo ($m^3 \cdot s^{-1}$), α_{tc} es la fracción de la precipitación diaria que tiene lugar durante el tiempo de concentración, Q_{surf} es la escorrentía superficial (mm), A es el área de la subcuenca (km^2), t_{conc} es el tiempo de concentración de la subcuenca (h) y 3.6 es un factor de conversión de unidades.

En el modelo SWAT, estos cálculos son realizados para la HRU y no a nivel de subcuenca por lo que SWAT realiza dos modificaciones en la estimación del caudal punta con el fin de adaptar la ecuación a la HRU. La primera consiste en reemplazar el área de la subcuenca por la de la HRU; en la segunda, la longitud del canal (L), usada en el cálculo del tiempo de concentración, es multiplicada por la fracción de área de la HRU en la subcuenca.

Tiempo de concentración

El tiempo de concentración es el tiempo desde que comienza la precipitación hasta que toda el área de la subcuenca contribuye al flujo en la sección de cierre. Así se puede redefinir el tiempo de concentración como el tiempo que tarda una gota de lluvia desde el punto más alejado de la subcuenca hasta la salida de la misma. El tiempo de concentración se obtiene sumando el tiempo de flujo sobre la superficie (el tiempo máximo que el agua de escorrentía tarda en alcanzar un cauce) y el tiempo de propagación del flujo canalizado (el tiempo que tarda el flujo ya canalizado en alcanzar la salida de la subcuenca):

$$t_{conc} = t_{ov} + t_{ch} \quad (6)$$

donde t_{conc} es el tiempo de concentración para la subcuenca, t_{ov} es el tiempo de concentración para el flujo superficial, y t_{ch} es el tiempo de concentración del flujo canalizado.

El tiempo de concentración para el flujo superficial t_{ov} se calcula usando la ecuación:

$$t_{ov} = \frac{L_{slp}^{0.6} \cdot n^{0.6}}{18 \cdot slp^{0.3}} \quad (7)$$

donde L_{slp} es la longitud de ladera de la subcuenca (m), n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional) y slp es la pendiente media (m/m).

El tiempo de concentración canalizado se obtiene mediante la ecuación:

$$t_{ch} = \frac{0.62 \cdot L \cdot n^{0.75}}{A^{0.25} \cdot slp_{ch}^{0.375}} \quad (8)$$

donde t_{ch} es el tiempo de concentración canalizado (h), L es la longitud del canal desde el punto más distante hasta la desembocadura (km), n es el coeficiente de rugosidad de Manning (adimensional), A es el área de la subcuenca (km²) y slp_{ch} es la pendiente media del canal (m/m).

Retraso ("lag") de la escorrentía superficial

En subcuencas de gran tamaño y con tiempos de concentración superiores a 1 día, sólo una fracción de la escorrentía superficial alcanzaría el canal principal el mismo día en el que fue generada, por lo que el modelo SWAT deberá incluir un retraso de la escorrentía superficial (Neitsch et al., 2005b).

Una vez calculada la escorrentía superficial, la cantidad descargada al canal viene dada por la ecuación (Neitsch et al., 2005b):

$$Q_{surf} = (Q'_{surf} + Q_{stor,i-1}) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-surlag}{t_{conc}}\right) \right] \quad (9)$$

donde Q_{surf} es la escorrentía superficial descargada al canal principal para un día determinado (mm), Q'_{surf} es la escorrentía superficial generada en la subcuenca (mm), $Q_{stor,i-1}$ es la escorrentía superficial almacenada o retrasada del día anterior (mm), $surlag$ es el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial y t_{conc} es el tiempo de concentración de la subcuenca (h).

Tránsito de avenidas

Una vez que la escorrentía superficial generada en las laderas alcanza la red de drenaje de la cuenca, ésta se convierte en un flujo confinado o canalizado, transformándose su comportamiento en función de la velocidad del flujo y de la morfología del cauce.

SWAT analiza el tránsito de avenidas o la propagación de caudales a través de la red hidrológica, usando dos métodos: el de Muskingum y el de propagación del almacenamiento variable ("variable storage routing method"), siendo este último el método por defecto (por lo que se explicará a continuación).

El método de propagación del almacenamiento variable fue desarrollado por Williams (1969) y es usado en los modelos HYMO (Williams y Hann, 1973) y ROTO (Arnold et al., 1995). Para un determinado segmento del río, la propagación del caudal ("storage routing") está basada en la ecuación de continuidad:

$$q_{in,ave} + \frac{V_{stored,1}}{\Delta t} - \frac{q_{out,1}}{2} = \frac{V_{stored,2}}{\Delta t} + \frac{q_{out,2}}{2} \quad (10)$$

donde $q_{in,ave}$ es el caudal medio de entrada durante el intervalo de tiempo, Δt es el incremento de tiempo (s), $q_{out,1}$ es el caudal de salida al comienzo del intervalo (m^3/s), $V_{stored,1}$ es el volumen almacenado al comienzo del intervalo (m^3), $q_{out,2}$ es el caudal de salida al final del intervalo (m^3/s) y $V_{stored,2}$ es el volumen almacenado al final del paso del intervalo (m^3).

El tiempo de tránsito se calcula dividiendo el volumen de agua del canal por el caudal:

$$TT = \frac{V_{stored}}{q_{out}} = \frac{V_{stored,1}}{q_{out,1}} = \frac{V_{stored,2}}{q_{out,2}} \quad (11)$$

donde TT es el tiempo de tránsito (s), V_{stored} es el volumen almacenado (m^3) y q_{out} es el caudal de salida (m^3/s).

Estableciendo una relación entre el tiempo de tránsito y el coeficiente de almacenamiento, se puede obtener la ecuación final:

$$q_{out,2} = SC \cdot q_{in,ave} + (1 - SC) \cdot q_{out,2} \quad (12)$$

donde SC es el coeficiente de almacenamiento.

Expresando todos los valores de la ecuación xii en unidades de volumen, se obtiene la ecuación xiii que es la base del método de propagación convexa ("convex routing method") del SCS (1964) y del método de Muskingum (Overton, 1966; Brakensiek, 1967).

$$V_{out,2} = SC \cdot (V_{in} + V_{stored,1}) \quad (13)$$

donde $V_{out,2}$ es el volumen de salida al final del intervalo (m^3), SC es el coeficiente de almacenamiento, V_{in} es el volumen de agua que entra en el cauce (m^3) y V_{stored} es el volumen al comienzo del intervalo (m^3).

El tránsito de avenidas es importante porque genera la laminación del hidrograma de escorrentía, al producirse un almacenamiento en el cauce de la escorrentía superficial a medida que los caudales se propagan por los cauces de la cuenca.

Balance de agua en el cauce

El agua almacenada en el cauce al final del incremento de tiempo se calcula como (Neitschet al., 2005b):

$$V_{stored,2} = V_{stored,1} + V_{in} - V_{out} - tloss - E_{ch} + div + V_{bnk} \quad (14)$$

donde $V_{stored,2}$ es el volumen de agua almacenada en el cauce al final del paso de tiempo (m^3), $V_{stored,1}$ es el volumen contenido en el cauce al comienzo del intervalo (m^3), V_{in} es el volumen de agua que entra en el cauce (m^3), V_{out} es el volumen de agua que sale del cauce (m^3), $tloss$ son las pérdidas por transmisión (m^3), E es la evaporación del canal (m^3), div es el volumen de agua añadido o retirado a través de derivaciones (m^3) y V_{bnk} es el volumen de agua añadido al río por el retorno del almacenamiento en la orilla (m^3).

El volumen de salida calculado con la ecuación xii es considerado por SWAT como la cantidad neta de agua retirada del río. Cuando las pérdidas por transmisión, la evaporación y otras pérdidas de agua para el segmento del río son calculadas, la cantidad de salida al siguiente segmento decrece

debido a estas salidas. El total de sumar las salidas y las pérdidas sería igual al valor obtenido a partir de la ecuación xii.

3.5.1.2 Infiltración

El agua que entra en el suelo puede seguir varios caminos: 1) ser extraída del suelo por absorción de la vegetación o por evaporación directa, 2) percolar más allá del perfil del suelo y constituir la recarga del acuífero y, 3) moverse lateralmente en el perfil del suelo y contribuir al caudal de los ríos.

El contenido de agua del suelo puede variar desde cero (la humedad del suelo secado en estufa), hasta el valor máximo cuando el suelo está saturado. Para interacciones suelo- vegetación se establecen dos estados intermedios: la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente. La capacidad de campo se define cualitativamente como el contenido de agua del suelo saturado cuando es drenado durante dos días aproximadamente. El punto de marchitamiento permanente es el grado de humedad del suelo cuando las plantas no pueden absorber más agua. Estos dos estados tienen que ser redefinidos en términos de succión para que puedan ser cuantificados más fácilmente.

La capacidad de campo (FC) es el contenido de agua retenido en el suelo a una succión de 0.033 MPa. El punto de marchitamiento permanente (WP) es la cantidad de agua retenida en el suelo a una tensión de 1.5 MPa. La cantidad de agua retenida en el suelo es la diferencia entre la capacidad de campo y el punto de marchitamiento permanente, y es considerada como el agua disponible para la vegetación (AWC):

$$AWC = FC - WP \quad (15)$$

Después de la infiltración, el agua que permanece en el suelo puede fluir bajo condiciones saturadas o no saturadas. En suelo saturado, el flujo se produce por gravedad y en dirección descendente. El flujo no saturado es causado por la aparición de gradientes debido a áreas adyacentes de mayor succión, y puede ocurrir en cualquier dirección.

Si el contenido de agua es superior a la capacidad de campo, SWAT simula directamente el flujo saturado. El modelo registra los contenidos de agua de los diferentes horizontes (mínimo 1 y máximo 10), pero asume que el agua se distribuye uniformemente dentro de cada uno. Esta suposición elimina la necesidad de modelar el flujo no saturado en la dirección horizontal. El flujo no saturado entre horizontes es indirectamente modelado por la distribución de la profundidad de la absorción de agua por la vegetación y de la evaporación.

El agua que supera en exceso el contenido de agua de la capacidad de campo estará disponible para la percolación o flujo lateral, salvo que la temperatura del suelo sea inferior a 0°C (en este caso no se calcula el movimiento del agua porque el suelo está helado).

La cantidad de agua que se mueve de un horizonte al inmediatamente inferior es calculada usando la metodología de propagación del almacenamiento ("storage routing methodology"). Así, la ecuación usada para calcular la cantidad de agua que percola hacia el horizonte subyacente es (Neistch et al., 2005b):

$$w_{perc,ly} = SW_{ly,excess} \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{-\Delta t}{TT_{perc}}\right]\right) \quad (16)$$

donde $w_{perc,ly}$ es la cantidad de agua que percola hacia el horizonte inferior en un día determinado (mm), $SW_{ly,excess}$ es el volumen de agua que se puede drenar en el horizonte (mm), Δt es la longitud del paso de tiempo y TT_{perc} es el tiempo de propagación de la percolación.

El tiempo de propagación de la percolación para cada horizonte se calcula según la ecuación (Neistch et al., 2005b):

$$TT_{perc} = \frac{SAT_{ly} - FC_{ly}}{K_{sat}} \quad (17)$$

donde TT_{perc} es el tiempo de propagación de la percolación, SAT_{ly} es la cantidad de agua en el horizonte completamente saturado (mm), FC_{ly} es el contenido de agua del horizonte a capacidad de campo (mm) y K_{sat} es la conductividad hidráulica saturada del horizonte (mm/h).

El agua que se infiltra más allá del horizonte inferior del suelo entra en la zona vadosa o zona no saturada (la comprendida entre la parte inferior del perfil del suelo y el nivel freático del acuífero).

3.5.1.3 Escorrentía subterránea

El agua subterránea es la que se encuentra en la zona saturada bajo una presión superior a la atmosférica. La entrada de agua en el sistema de almacenamiento subterráneo se produce por infiltración/percolación, aunque también puede darse la recarga por filtración ("seepage") desde las masas de agua superficiales. Normalmente, el agua abandona el sistema de almacenamiento subterráneo por descargas hacia ríos o lagos, pero también es posible que el agua se mueva hacia arriba por ascenso capilar, desde la superficie freática a la franja capilar.

SWAT simula dos sistemas de acuíferos en cada subcuenca: el acuífero superficial y el profundo. El acuífero superficial es un acuífero libre que contribuye al flujo hacia el cauce principal de la

subcuenca. El acuífero profundo es un acuífero confinado, y se asume que el agua que entra en el acuífero profundo contribuye al flujo de una corriente en algún sitio fuera de la cuenca (Arnold et al., 1993).

Acuífero superficial

El balance de agua para el acuífero superficial es (Neistch et al., 2005b):

$$aq_{sh,i} = aq_{sh,i-1} + w_{rchrg} - Q_{gw} - w_{revap} - w_{deep} - w_{pump,sh} \quad (18)$$

donde $aq_{sh,i}$ es el agua almacenada en el acuífero superficial el día i (mm), $aq_{sh,i-1}$ es el agua almacenada en el acuífero superficial el día $i-1$ (mm), w_{rchrg} es la recarga del acuífero (mm), Q_{gw} es el flujo de agua subterránea o flujo base hacia el canal principal (mm), w_{revap} es la cantidad de agua que entra en el suelo desde el acuífero en respuesta a deficiencias de agua (mm), w_{deep} es la cantidad de agua que percola desde el acuífero superficial hacia el profundo (mm) y $w_{pump,sh}$ es la cantidad de agua retirada del acuífero superficial por bombeo (mm).

Recarga

Es el agua que se mueve por percolación atravesando la parte inferior del perfil del suelo (o flujo preferencial) y fluyendo a través de la zona no saturada antes de convertirse en recarga del acuífero superficial. El retraso entre el momento en el que el agua se encuentra en el suelo y en el que entra en el acuífero, dependerá de la profundidad del nivel freático y de las propiedades hidráulicas de la zona no saturada.

Para contabilizar el tiempo de retraso en la recarga del acuífero una vez que el agua sale del perfil edáfico, SWAT utiliza la función exponencial ponderada empleada por Sangrey et al. (1984). La recarga del acuífero para un día determinado se calcula así (Neistch et al., 2005b):

$$w_{rchrg,i} = \left(1 - \exp\left[-1/\delta_{gw}\right]\right) \cdot w_{seep} + \exp\left[-1/\delta_{gw}\right] \cdot w_{rchrg,i-1} \quad (19)$$

donde $w_{rchrg,i}$ es la recarga que entra en el acuífero el día i (mm), δ_{gw} es el tiempo de retraso o de drenaje de la formación geológica superior (días), w_{seep} es el agua que sale del perfil del suelo el día i (mm) y $w_{rchrg,i-1}$ es la recarga del acuífero el día $i-1$ (mm).

El tiempo de retraso no se puede medir directamente. Sin embargo, puede ser estimado por simulación de la recarga del acuífero, usando diferentes valores para δ_{gw} y comparando las variaciones simuladas y las observadas del nivel freático (Sangrey et al., 1984).

Flujo base

El acuífero superficial contribuye al flujo base aportado hacia el cauce principal o tramo dentro de la subcuenca. El flujo base alcanza el río cuando la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral determinado por el usuario ($aq_{shthr,q}$).

La relación entre el nivel freático y el flujo en estado de equilibrio se puede expresar como (Neitsh et al., 2005b):

$$Q_{gw,i} = Q_{gw,i-1} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t] + w_{rchrq} \cdot [1 - \exp[-\alpha_{gw} \cdot \Delta t]] \quad (20)$$

donde $Q_{gw,i}$ es el flujo base hacia el canal principal el día i (mm), $Q_{gw,i-1}$ es el flujo base hacia el canal principal el día $i-1$ (mm), α_{gw} es el coeficiente de agotamiento, Δt es el incremento de tiempo (1 día) y w_{rchrq} es la recarga del acuífero (mm).

El coeficiente de agotamiento α_{gw} , es un índice que representa la respuesta del flujo base ante los cambios en la recarga (Smedema y Rycroft, 1983). Valores bajos (entre 0.1 y 0.3) indican la presencia de materiales con respuesta lenta a la recarga; por el contrario valores más altos (entre 0.9 y 1.0) se relacionan con terrenos de respuesta rápida. Este valor puede ser estimado en la cuenca analizando los caudales durante periodos sin recarga.

Cuando el acuífero superficial no recibe recarga, la ecuación xx se simplifica y queda así:

$$Q_{gw} = Q_{gw,0} \cdot \exp[-\alpha_{gw} \cdot t] \quad (21)$$

donde Q_{gw} es el flujo base en el canal principal en el tiempo t (mm), $Q_{gw,0}$ es el flujo base al comienzo de la recesión (tiempo = 0, mm), α_{gw} es el coeficiente de agotamiento y t es el tiempo desde el comienzo de la recesión (días). El coeficiente de agotamiento se obtiene reordenando la ecuación xxi:

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,0}} \right] \quad (22)$$

donde α_{gw} es el coeficiente de agotamiento, N es el tiempo desde que comienza la recesión (días), $Q_{gw,N}$ es el flujo base en el día N (mm) y $Q_{gw,0}$ es el flujo base al comienzo de la recesión (mm).

Se puede obtener el valor del coeficiente de agotamiento (α_{gw}) a partir del análisis de los datos registrados en las estaciones de aforo. Así, BFD es el número de días necesario para que el flujo base disminuya en un ciclo logarítmico:

$$\alpha_{gw} = \frac{1}{N} \cdot \ln \left[\frac{Q_{gw,N}}{Q_{gw,O}} \right] = \frac{1}{BFD} \cdot \ln[10] = \frac{2.3}{BFD} \quad (23)$$

Evaporación a partir del acuífero o “REVAP”

El agua puede moverse desde el acuífero superficial hacia la zona no saturada suprayacente. En periodos secos el agua de la franja capilar, que separa la zona saturada de la no saturada, se evaporaría y difundiría hacia arriba. A medida que el agua es retirada de la franja capilar por evaporación, ésta es reemplazada por el agua del acuífero. El agua del acuífero también puede ser retirada por plantas de raíces profundas.

SWAT modela el movimiento del agua en el acuífero hacia las capas superiores no saturadas como una función de la demanda de agua para evapotranspiración. Para evitar la confusión con la evaporación y transpiración desde el suelo, este proceso se denomina “REVAP”. La componente “REVAP” puede ser significativa en cuencas donde la zona saturada está cerca de la superficie o en donde crecen plantas de raíces profundas. Debido a que el tipo de cobertura vegetal influye en la importancia de “REVAP”, los parámetros que la controlan dependen de los usos del suelo. Este proceso solo se permite si la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede de un valor umbral especificado por el usuario ($aq_{shthr,rvp}$).

La cantidad máxima de agua que se retiraría del acuífero por el proceso de “REVAP” en un día determinado es (Neistch et al., 2005b):

$$w_{revap,mx} = \beta_{rev} \cdot E_0 \quad (24)$$

donde $w_{revap,mx}$ es la máxima cantidad de agua que asciende hacia el suelo en respuesta a deficiencias de agua (mm), β_{rev} es un coeficiente de “REVAP” y E_0 es la evapotranspiración potencial (mm). La cantidad real de “REVAP” que tendría lugar en un día determinado se calcula de la siguiente forma:

$$w_{revap} = 0 \quad si \quad aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad (25)$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad si \quad aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{deep,mx}) \quad (26)$$

$$w_{revap} = w_{revap,mx} \quad si \quad aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + w_{deep,mx}) \quad (27)$$

donde w_{revap} es el agua que entra en el suelo como respuesta a la deficiencia de agua (mm), $w_{revap,mx}$ es la cantidad máxima de agua que puede entrar en el suelo (mm), aq_{sh} es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial al comienzo del día i (mm) y $aq_{shthr,rvp}$ es el nivel umbral

de agua en el acuífero superficial para que se produzca “REVAP” o la percolación hacia el acuífero profundo (mm).

Acuífero profundo

Se puede destinar una fracción de la recarga diaria al acuífero profundo. La percolación hacia el acuífero profundo tiene lugar si la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial excede un valor umbral especificado por el usuario ($aq_{shthr,rvp}$).

La máxima cantidad de agua que se retiraría del acuífero superficial para recargar el acuífero profundo sería (Neistch et al., 2005b):

$$w_{deep,mx} = \beta_{deep} \cdot w_{rchrg} \quad (28)$$

donde $w_{deep,mx}$ es la máxima cantidad de agua que entra en el acuífero profundo el día i (mm), β_{deep} es un coeficiente de percolación y w_{rchrg} es la recarga del acuífero el día i (mm). La percolación real hacia el acuífero se calcula como:

$$w_{deep} = 0 \quad si \quad aq_{sh} \leq aq_{shthr,rvp} \quad (29)$$

$$w_{deep} = w_{deep,mx} - aq_{shthr,rvp} \quad si \quad aq_{shthr,rvp} < aq_{sh} < (aq_{shthr,rvp} + w_{deep,mx}) \quad (30)$$

$$w_{deep} = w_{deep,mx} \quad si \quad aq_{sh} \geq (aq_{shthr,rvp} + w_{deep,mx}) \quad (31)$$

donde w_{deep} es el agua que entra en el acuífero profundo el día i (mm), $w_{deep,mx}$ es la cantidad máxima de agua que puede entrar en el acuífero profundo el día i (mm), aq_{sh} es la cantidad de agua almacenada en el acuífero superficial al comienzo del día i (mm) y $aq_{shthr,rvp}$ es el nivel umbral de agua en el acuífero superficial para que se produzca “REVAP” o percolación hacia el acuífero profundo (mm).

El balance hídrico del acuífero profundo es:

$$aq_{dp,i} = aq_{dp,i-1} + w_{deep} - w_{pump,dp} \quad (32)$$

donde $aq_{dp,i}$ es el agua almacenada en el acuífero profundo el día i (mm), $aq_{dp,i-1}$ es el agua almacenada en el acuífero profundo el día $i-1$ (mm), w_{deep} es el agua que percola del acuífero superficial hacia el profundo el día i (mm) y $w_{pump,dp}$ es el agua retirada del acuífero profundo por bombeo el día i (mm). El agua que entra en el acuífero profundo se considera una pérdida del sistema.

3.5.1.4 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un término que incluye todos los procesos por los cuales el agua de la superficie terrestre se convierte en vapor de agua. Ésta incluye la evaporación a partir del dosel vegetal, la transpiración, la sublimación y la evaporación a partir del suelo. La evapotranspiración es el primer mecanismo de retirada de agua de la cuenca. Alrededor de un 62% de la precipitación que cae sobre los continentes se evapotranspira (Neitsch et al., 2005b).

La diferencia entre la precipitación y la evapotranspiración es el agua disponible para el uso y gestión del hombre. Una estimación fiable de la evapotranspiración es clave en el cálculo de los recursos hídricos.

Intercepción

El dosel vegetal puede afectar significativamente a la infiltración, a la escorrentía superficial y a la evapotranspiración. El dosel vegetal reduce la energía con la que impactan las gotas de agua sobre el suelo y retiene una fracción de la precipitación. La influencia que el dosel vegetal ejerce sobre estos procesos está en función de la densidad de la cobertura vegetal, de la morfología de las especies vegetales y de la intensidad de la precipitación.

Cuando se calcula la escorrentía superficial por el método del CN (Curve Number) o coeficiente de escorrentía del SCS, se agrupa la intercepción vegetal en el parámetro de las abstracciones iniciales. Esta variable incluye solamente el almacenamiento superficial y la infiltración previa a la escorrentía; se estima como el 20% del valor de la capacidad máxima de retención para un día determinado (Neitsch et al., 2005b).

SWAT permite calcular la cantidad de agua que retiene el dosel vegetal; ésta varía diariamente en función del índice del área foliar:

$$can_{day} = can_{mx} \cdot \frac{LAI}{LAI_{mx}} \quad (33)$$

donde can_{day} es la máxima cantidad de agua que puede quedar retenida en la vegetación (mm), can_{mx} es la máxima cantidad de agua que puede retener la vegetación cuando está totalmente desarrollada (mm), LAI es el índice del área foliar y LAI_{mx} es el máximo índice del área foliar para la planta.

Evapotranspiración potencial (ETP)

La ETP se define como la evapotranspiración que tendría lugar en un área uniformemente cubierta por vegetación en crecimiento y que tiene acceso ilimitado al agua del suelo. Se han desarrollado numerosos métodos para estimar la ETP. SWAT incorpora tres de ellos: el método de Penman-Monteith (Monteith, 1965; Allen, 1986; Allen et al., 1989), el método de Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972) y el método de Hargreaves (Hargreaves et al., 1985). Además si se prefiere aplicar otro método de cálculo, el modelo SWAT puede leer valores diarios de ETP.

Estos tres métodos incluidos en SWAT se diferencian en el número de datos de entrada requeridos. El método de Penman-Monteith necesita datos de radiación solar, de temperatura del aire, de humedad relativa y de velocidad del viento. El método de Priestley-Taylor requiere datos de radiación solar, de temperatura del aire y de humedad relativa. El método de Hargreaves demanda únicamente datos de temperatura.

Evapotranspiración real (ETR)

Después de determinar la evapotranspiración potencial, se puede calcular la evaporación real. En primer lugar SWAT retira por evaporación la precipitación interceptada por el dosel vegetal y calcula, usando una propuesta similar a la de Ritchie (1972), las máximas cantidades de agua transpirada y de agua retenida por sublimación/evaporación del suelo. Posteriormente calcula la cantidad real de sublimación (cuando hay nieve) y la evaporación de agua del suelo.

Evaporación de la precipitación almacenada en el dosel

El agua libre que se encuentra en el dosel vegetal está disponible para ser retirada por evapotranspiración. La cantidad de evaporación real de la precipitación interceptada es especialmente significativa en los bosques en los que, en ocasiones, la evaporación de la precipitación interceptada es superior a la transpiración.

Cuando SWAT calcula la evaporación real, elimina tanta agua como es posible del almacenamiento vegetal. Si la evapotranspiración potencial (E_0) es inferior a la cantidad de agua libre retenida en el dosel (R_{INT}) entonces (Neitsch et al., 2005b):

$$E_a = E_{can} = E_0 \quad (34)$$

$$R_{INT(f)} = R_{INT(i)} = E_{can} \quad (35)$$

donde E_a es la evapotranspiración real que tiene lugar en la cuenca (mm), E_{can} es la evaporación de agua libre del dosel (mm), E_0 es la evapotranspiración potencial (mm), $R_{INT(i)}$ es la cantidad

inicial de agua libre retenida en el dosel vegetal (mm) y $R_{INT(f)}$ es la cantidad final de agua retenida en el dosel vegetal (mm).

Si la evapotranspiración potencial (E_0) es mayor que la cantidad de agua libre retenida en el dosel (R_{INT}) entonces (Neitsch et al., 2005b):

$$E_{can} = E_{INT(i)} \quad (36)$$

$$R_{INT(f)} = 0 \quad (37)$$

Una vez que ha sido evaporada el agua libre del dosel, la demanda de evaporación de agua restante ($E_0' = E_0 - E_{can}$) se divide entre la vegetación y el suelo.

Transpiración

Para todos los métodos de cálculo de la evapotranspiración, excepto para el de Penman-Monteith, la transpiración se calcula como (Neistch et al., 2005b):

$$E_t = \frac{E_0' \cdot LAI}{3} \quad 0 \leq LAI \leq 3 \quad (38)$$

$$E_t = E_0' \quad LAI > 3 \quad (39)$$

donde E_t es la transpiración máxima para un día determinado (mm), E_0' es la evapotranspiración potencial ajustada con la evaporación del agua libre del dosel (mm) y LAI el índice del área foliar. El valor calculado por las ecuaciones xxxviii y xxxix es la transpiración que tendría lugar un día determinado, cuando la vegetación está en crecimiento bajo condiciones ideales. La cantidad de transpiración real puede ser menor que este valor debido a la falta de agua disponible en el suelo.

Evaporación a partir del suelo

Cuando existe demanda de evaporación de agua del suelo, SWAT divide la demanda de evaporación entre los diferentes horizontes. La ecuación usada para determinar la cantidad máxima permitida de agua para ser evaporada es:

$$E_{soil,z} = E_s'' \cdot \frac{z}{z + \exp(2.374 - 0.00713 \cdot z)} \quad (40)$$

donde $E_{soil,z}$ es la demanda de evaporación a la profundidad z (mm), E_s'' es la máxima evaporación de agua del suelo (mm) y z es la profundidad. Los coeficientes de esta ecuación han sido seleccionados para que el 50% de la demanda de evaporación fuera extraída de los primeros 10 mm del suelo y el 95% de los primeros 100 mm.

La demanda de evaporación de los horizontes se determina tomando la diferencia entre las demandas de evaporación de los límites superior e inferior. Además se incorpora un coeficiente para permitir al usuario modificar la distribución de los horizontes en función de la profundidad:

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot esco \quad (41)$$

donde $E_{soil,ly}$ es la demanda de evaporación del horizonte ly (mm), $E_{soil,zl}$ es la demanda de evaporación del límite inferior del horizonte (mm), $E_{soil,zu}$ es la demanda de evaporación del límite superior del horizonte (mm) y $esco$ es el coeficiente de compensación de la evaporación del suelo. Cuando el valor de $esco$ es pequeño, el modelo puede extraer de los niveles inferiores mucha demanda de evaporación.

Para limitar la cantidad de agua eliminada por evaporación en condiciones secas, SWAT define un valor máximo de agua que puede ser retirado para cualquier periodo. Este valor máximo representa el 80% del agua disponible para la vegetación en un día determinado. El agua disponible para la vegetación se define como el contenido total de agua en el horizonte, menos el contenido de agua en el punto de marchitamiento permanente (1.5 MPa).

3.5.1.5 Erosión

La producción de erosión y sedimento se estima para cada HRU con la ecuación modificada de pérdida universal de suelo (MUSLE). Mientras el USLE utiliza lluvia como un indicador de energía erosiva, MUSLE utiliza la cantidad de pérdidas para simular la producción de erosión y sedimento.

$$sed = 11.8 (Q_{surf} \cdot q_{peak} \cdot area_{hru})^{0.56} \cdot K_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

Dónde:

sed:	producción sedimentos en un día dado (Toneladas métricas)
Q_{surf} :	volumen de superficie de escorrentía
q_{peak} :	escorrentía máxima
$area_{hru}$:	área de HRU
K_{usle} :	factor de erodabilidad del suelo
C_{usle} :	factor de cobertura y gestión de USLE
P_{usle} :	factor de prácticas de conservación de USLE
LS_{usle} :	factor topográfico
CFRG:	factor fragmento macro

La sustitución tiene como resultado varios beneficios: la certeza de predicción del modelo se incrementa, la necesidad para una proporción de entrega se elimina, y una sola tormenta de producción de sedimento pueden ser calculadas. El modelo en la parte de la hidrología suministra estimaciones de volumen de escorrentía y una tasa máxima de escorrentía que con el área de la sub-cuenca se utiliza para calcular la energía variable erosiva de escorrentía.

3.5.1.6 Fase de Enrutamiento del Ciclo Hidrológico

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO (William y Hann, 1972). Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce. La (Figura 2.4) ilustra los diferentes procesos en-corriente modelados por SWAT

3.5.1.7 Enrutamiento en el Canal Principal o Alcance

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas.

Enrutamiento De Flujo

Cuando el agua fluye río abajo, una porción puede perderse debido a la evaporación y transmisión por la capa del canal. Otra pérdida potencial es la eliminación de agua del canal para el uso agrícola o humano. El flujo puede ser suplementado por la lluvia directamente en el canal y/o adicionado de agua de descargas del punto de la fuente. El flujo es dirigido por el canal que utiliza un método variable de coeficiente de almacenamiento desarrollado por William (1969) o el método de enrutamiento de Muskingum.

Enrutamiento Del Sedimento

El transporte del sedimento hacia el canal es controlado por la operación simultánea de dos procesos, deposición y degradación. Las versiones anteriores de SWAT usaron la fuerza de la corriente para estimar deposición/degradación en los canales (Arnold et Al, 1995). Bagnold (1977), definiendo la fuerza de la corriente como el producto de la densidad de agua proporcionada del flujo y pendiente de la superficie del agua. William (1980) usó la definición de Bagnold de la fuerza de la corriente para desarrollar un método para determinar la degradación como una función de la pendiente del canal y velocidad. En esta versión de SWAT, las ecuaciones han sido simplificadas y la cantidad máxima de sedimento que puede ser transportado de un segmento de alcance es una función de la velocidad máxima del canal.

3.5.1.8 Calibración y validación

La calibración del modelo SWAT consiste en lograr un ajuste satisfactorio entre el caudal observado y el simulado, mediante el cambio del valor de los parámetros con mayor influencia en la simulación. El proceso de validación es medir la capacidad predictiva del modelo mediante la comparación del caudal simulado y el observado, en un periodo diferente al de la calibración (Wagener et al., 2004).

Parámetros estadísticos

Con el fin de evaluar la eficiencia de las distintas simulaciones realizadas en la calibración, los hidrogramas resultantes se comparan visualmente con los observados. Por otro lado, se calculan los siguientes parámetros estadísticos empleados habitualmente en hidrología: coeficiente de correlación de Pearson (r), parámetro de eficiencia de Nash y Sutcliffe (NSE), error cuadrático medio (RMS) y desviación de los volúmenes de escurrimiento (DV):

Coeficiente de correlación de Pearson, r

$$r = \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}}) (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2 \sum_{t=1}^{nc} (Q_{sim} - \overline{Q_{sim}})^2}}$$

donde Q_{obs} es el caudal observado, $\overline{Q_{obs}}$ es el caudal medio observado, Q_{sim} es el caudal simulado, $\overline{Q_{sim}}$ es el caudal medio simulado y n es el número de datos.

Parámetro de eficiencia de Nash y Sutcliffe, NSE (Nash y Sutcliffe, 1970)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}{\sum_{t=1}^n (Q_{obs} - \overline{Q_{obs}})^2}$$

donde Q_{obs} es el caudal observado, $\overline{Q_{obs}}$ es el caudal medio observado, Q_{sim} es el caudal simulado y n es el número de datos.

Este parámetro adimensional está ampliamente aceptado en hidrología como un evaluador de la eficiencia de los modelos hidrológicos (Green y Stepehenson, 1986), con un significado similar a los valores obtenidos por el coeficiente de determinación (r^2). Los valores de NSE próximos a uno indican un ajuste excelente a la realidad, en cuanto a la forma de la curva que representa al hidrograma (Fernández de Villarán, 2006). Moriasi et al. (2007) consideran que un valor de NSE

para datos mensuales inferior a 0.50 es satisfactorio. También establece que valores del NSE entre 0.5 y 0.65 son satisfactorios, entre 0.65 y 0.75 buenos y entre 0.75 y 1.00 muy buenos.

Error cuadrático medio, RMS (Hogue et al., 2006)

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{t=1}^n (Q_{obs} - Q_{sim})^2}$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado y n es el número de datos.

Desviación del volumen de escorrentía, DV (Boyle, et al., 2000)

$$DV = \frac{\sum_{t=1}^n Q_{sim}}{\sum_{t=1}^n Q_{obs}}$$

Donde Q_{obs} es el caudal observado, Q_{sim} es el caudal simulado y n es el número de datos.

Durante el proceso de calibración, y en relación con los índices estadísticos anteriores, se pretende optimizar r y NSE, minimizar el RMS y llevar el parámetro DV hasta un valor próximo a 1.

La calibración y validación del modelo son un factor clave para la reducción de la incertidumbre y el incremento de la confianza del usuario en las capacidades predictivas del modelo (White y Chaubey, 2005).

El modelo SWAT posee una gran cantidad de parámetros con influencia en el proceso de calibración; además, los parámetros calibrados pueden afectar a diferentes procesos físicos, lo que dificulta enormemente el proceso de calibración. Mediante un análisis de sensibilidad se estudia cuáles de los parámetros de entrada tienen una mayor influencia en los resultados del modelo.

3.6 PREPARANDO LOS DATOS DE ENTRADA

Para utilizar la interface o conjunto de elementos de la pantalla que permiten al usuario realizar acciones sobre el programa como elementos de identificación, de navegación, de contenidos, de acción y de exploración de resultados, es necesario acceder a los temas de cada mapa en ArcGIS y los archivos de base de datos, los cuales proveen información de diferentes tipos dentro de la cuenca. Los mapas necesarios y los archivos de base de datos deben estar listos para correr la interface. A continuación se describe los diferentes tipos de mapas y tablas necesarias para los datos de entrada del modelo.

3.6.1 Delimitación de la Cuenca (Watershed Delineator)

GRID—Modelo Digital de Elevación (DEM)

La interface permite valores enteros o reales para las elevaciones del DEM. Las unidades usadas para definir la resolución y elevación del mapa no necesariamente deben ser iguales. La resolución del mapa debe estar definida en una de las siguientes unidades: metros, kilómetros, pies, yardas, millas, Grados decimales. La elevación debe ser definida en una de las siguientes unidades: metros, centímetros, yardas, pies, pulgadas. En caso de no poseer un DEM, se deben tener el tema de Curvas de Nivel con su respectiva altura en las unidades anteriormente mencionadas, para generar el modelo (Uribe, 2010). El DEM, se obtuvo a partir de las curvas de nivel cada 20 m, del Instituto Geográfico Militar (IGM), escala 1:50000.

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

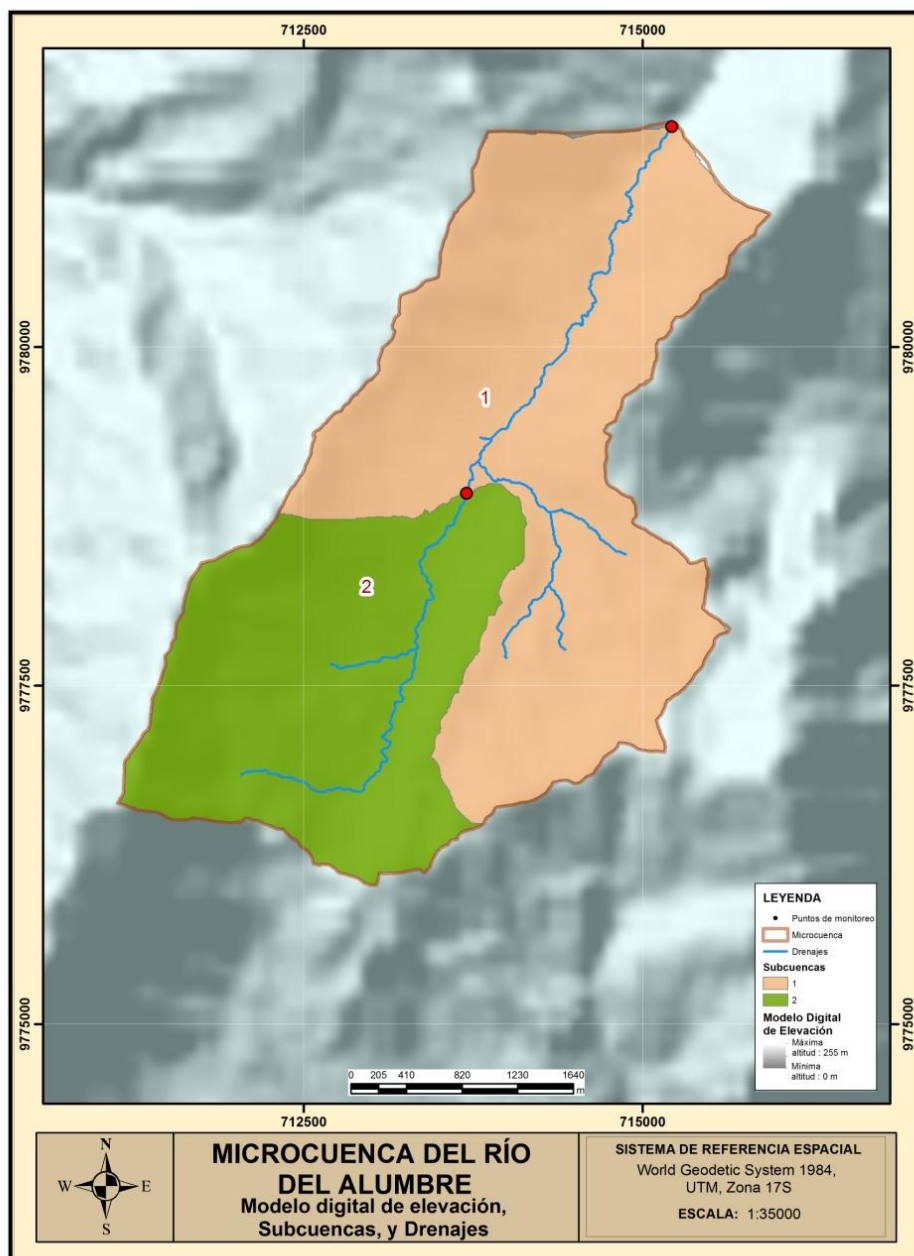
SWAT lo hace automáticamente. Una vez realizado se lo exportó a formato shapefile (.shp), para darle los respectivos atributos, para que la interfaz del modelo pueda reconocerlo, de igual manera los ríos.

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.
- TO_NODE: Este valor corresponde a la sub- vertiente (GRIDCODE) en la cual la corriente de agua drena.
- Subbasin: Es igual al valor de FROM_NODE
- SubbasinR: Es igual al valor de TO_NODE



Mapa 2. Modelo digital de elevación, unidades de respuesta hidrológica y drenajes de la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador, 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Realizado este proceso, como resultado se obtiene, las características topográficas detalladas de la microcuenca en estudio como se observa en el Mapa 2.

HRU Analysis (Análisis de las Unidades de Respuesta Hidrológica).

Para realizar el análisis de las Unidades de Respuestas Hidrológicas es necesario contar con datos de uso del suelo, suelo y pendientes.

3.6.2 Datos: Uso de la Tierra

Las categorías del uso de la tierra necesitan ser reclasificadas dentro de los tipos que el SWAT maneja, se lo puede hacer desde la interface ARCSWAT, una vez cargado el mapa usando el código interno SWAT.

A las coberturas de la tierra presentes en la microcuenca del río Del Alumbre y que se observan en el Mapa 3, se les realizó la relación de los códigos de las coberturas de la base de datos de SWAT, que se detallan en el Cuadro 3.6 y se modificaron los valores del CN (coeficiente de escorrentía) para cada uno de éstas de acuerdo a la experiencia obtenida en el comportamiento de las coberturas en la Región de los Andes.

Los valores de **CN**, de acuerdo al análisis del grupo de suelo hidrológico tenemos que la descripción es: suelos de bajas tasas de infiltración cuando están completamente mojados. Sobre todo en suelos con una capa que impide el movimiento superficial del agua en sentido gravitacional, o suelos con textura fina a moderadamente fina. Baja tasa de transmisión de agua ($0.15 - 0.40 \text{ cm} \cdot \text{h}^{-1}$). Posterior en el análisis de los suelos se hablará de los grupos hidrológicos.

Cuadro 6 Asignación código SWAT para las coberturas del Suelo de la microcuenca del río Del Alumbre.

Uso - Cobertura	Código SWAT	CN	n	Superficie en (ha)	Superficie en (%)
Cultivo Semi perenne	DWHT	62-73-81-84	0.14	8.11	0.56
Industria	UIDU	31-59-72-79	0.10	0.2	0.01
Área Urbana	URBN	31-59-72-79	0.10	5.16	0.36
Bosque Intervenido	FRST	36-60-73-79	0.10	7.77	0.54
Bosque Natural	FRSE	25-55-70-77	0.10	23.87	1.66
Bosque Plantado	AABA	45-66-77-83	0.10	14.78	1.03
Cultivo Anual	CORN	67-77-83-87	0.14	911.31	63.22
Cultivo Perenne	ALFA	31-59-72-79	0.06	17.7	1.23
Pasto Cultivado	PAST	49-69-79-84	0.15	306.79	21.28
Pasto Natural	RNGB	39-61-74-80	0.15	74.86	5.19
Vegetación Arbustiva	RNGE	49-69-79-84	0.15	70.91	4.92
TOTAL				1441.46	100

CN: Curve number; n: Coeficiente de Manning

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

3.6.3 Datos: suelos

La información de suelos fue obtenida de los mapas del Instituto Espacial Ecuatoriano escala 1: 25000 desarrollados en el proyecto: “Generación de Geoinformación para la Gestión del Territorio” y se los observa en el Mapa 4.

Para el modelo hidrológico SWAT, el archivo de entrada para el suelo (.sol), define las propiedades físicas y químicas del suelo. El archivo de entrada del suelo puede soportar hasta 25 capas del perfil del suelo. A continuación, una breve descripción en orden de las variables para los datos de entrada tomados del documento “Soil and Water Assessment Tool, Input/Output, Version 2012 por Arnold et al, 2010”.

TITLE/TEX: La primera línea del archivo (.sol) es reservada para comentarios de usuarios, no es procesado por el modelo y puede estar en blanco. Es opcional.

SNAM: Corresponde al nombre del suelo.

HYDGRP: Es el grupo hidrológico del suelo (A, B, C ó D). El Servicio de Conservación de los Recursos Naturales (NRCS, por sus siglas en inglés) clasifica a los suelos dentro de cuatro grupos hidrológicos, basados en las características de infiltración de los suelos. NRCS Soil Survey Staff (1996, en Arnold, et. Al., 2010) define un grupo hidrológico como un grupo de suelos que tienen condiciones similares de escurrimiento potencial bajo condiciones similares de tormenta y cobertura. Las definiciones para las diferentes clases son:

- A** Los suelos tienen una elevada tasa de infiltración inclusive cuando están totalmente húmedos. Consisten principalmente de grava y arena, profundos y bien drenados a excesivamente drenados. Tienen una tasa elevada de transmisión de agua. Tienen bajo potencial de escurrimiento.
- B** Los suelos tienen una moderada tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Son suelos moderadamente profundos a profundos, moderadamente bien drenados a bien drenados. Suelos con textura moderadamente fina a moderadamente áspera. Tienen una tasa moderada de transmisión de agua.
- C** Los suelos tienen una lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Presentan una capa que impide el movimiento de agua hacia abajo o tienen una textura moderadamente fina a fina. Tienen una tasa lenta de transmisión de agua.
- D** Los suelos tienen una muy lenta tasa de infiltración cuando están totalmente húmedos. Usualmente constan de suelos arcillosos que tienen un alto potencial de expansión. Suelos que tienen una capa permanente de agua, una capa de arcilla en (o cerca de) la superficie y suelos poco profundos que descansan sobre material impermeable. Tienen una tasa muy lenta de transmisión de agua y un elevado potencial de escurrimiento.

Los valores del grupo hidrológico del suelo se obtuvieron en función de la textura con ayuda del programa Number Curve, el mismo que es un programa de apoyo al modelo hidrológico MODIPÉ (Martínez et al., 2006).

SOL_ZMX: Es la profundidad máxima de enraizamiento en el perfil de suelo (mm). Si no se especifica la profundidad, el modelo asume que las raíces pueden desarrollarse completamente a lo largo de toda la profundidad del perfil de suelo.

Los datos de la profundidad de enraizamiento del perfil del suelo se tomó del mapa de suelos (IEE & SINAGAP, 2009), atributo: profundidad efectiva.

ANION_EXCL: Es una fracción de la porosidad (espacio vacío) donde los aniones son excluidos. La mayoría de los suelos minerales están cargados negativamente con un pH normal y la interacción neta con los aniones, tal como el nitrato, es una repulsión de las partículas superficiales. Dicha repulsión es un término de adsorción negativa o exclusión de aniones (Arnold J et al., 2010).

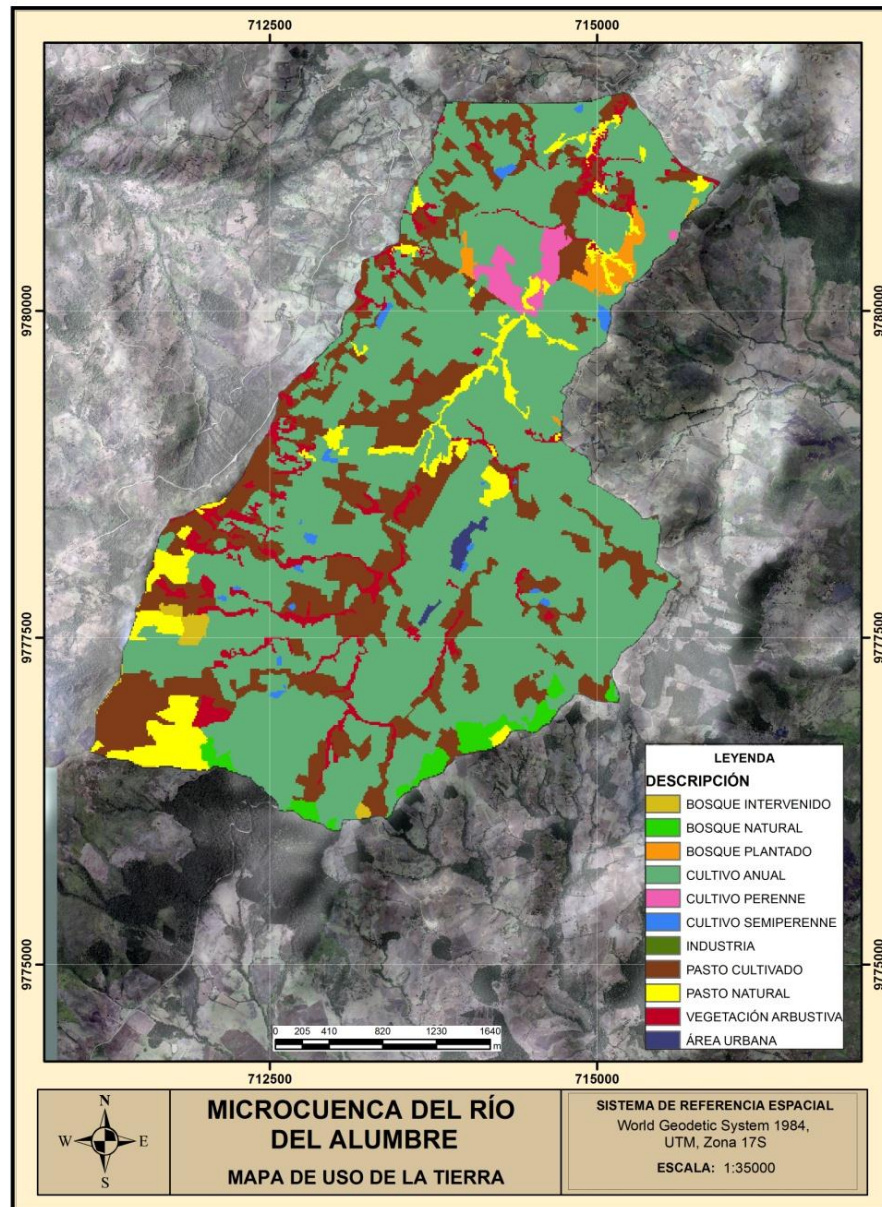
Los aniones son excluidos del área próxima inmediata a las superficies minerales, debido a la atracción preferencial de los cationes en éstos sitios. Este proceso tiene un impacto directo en el transporte de aniones a través del suelo. Para ello, efectivamente excluye los aniones de la porción más lenta que está en movimiento del volumen de suelo-agua, que se encuentra más cercano a las superficies de la partícula cargada (Jury et al., 1991) en (Arnold J et al., 2010). En efecto, la ruta neta del anión a través del suelo sería más corta si se usara toda el agua en el suelo (McMahon, 1972) en (Arnold J et al., 2010).

Si no se ingresa un valor para ANION_EXCL, el modelo puede asumir un valor de 0.50, en este caso, como no se encontraron valores de éste parámetro por lo tanto, el modelo SWAT asignó un valor para cada capa de suelo.

SOL_CRK: El volumen potencial o volumen máximo de ruptura del perfil del suelo se expresa como una fracción del volumen total de suelo. Es un dato opcional que puede o no ser ingresado a las características del suelo.

TEXTURE: La textura de la capa de suelo es un dato que no procesa el modelo y su espacio puede permanecer en blanco. Es un dato opcional.

SOL_Z (layer #): Es la profundidad desde la superficie del suelo hasta la parte inferior de cada capa (mm). Tomado de (IEE & SINAGAP, 2009).



Mapa 3. Uso de la tierra en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador, 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

SOL_BD (layer #): La densidad aparente del suelo ($\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$ o $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), expresa la relación de la masa de partículas sólidas respecto al volumen total de suelo, $p_b = M_s/V_t$. Para determinar la densidad aparente p_b , la masa del suelo húmedo es secado en el horno y el volumen total de suelo se determina cuando el suelo está a capacidad de campo o cercano a ésta. Los valores de la densidad aparente deben oscilar entre 1.1 y 1.9 $\text{Mg} \cdot \text{m}^{-3}$. Debido a la inexistencia de los datos de densidad aparente se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton et al., 2009).

SOL_AWC (layer #): El agua disponible por las plantas, también llamada capacidad de agua disponible AWC, se calcula al sustraer la fracción de agua presente a punto de marchitez permanente WP de la capacidad de campo presente FC, $AWC = FC - WP$.

El valor del contenido de agua disponible para las capas de los suelos, se calculó de acuerdo a la clase textural de los suelos presentes, los datos de FC y WP se obtuvieron con la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton et al., 2009).

SOL_K (layer #): La conductividad hidráulica saturada ($\text{mm} \cdot \text{h}^{-1}$), relaciona la proporción del flujo de agua (densidad del fluido) y el gradiente hidráulico. Es una medida de la facilidad del movimiento de agua a través del suelo. Los valores de la conductividad hidráulica saturada para cada una de las capas presentes en la microcuenca, se procedió a calcularlos utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool versión 6.02.70" (Saxton et al., 2009).

SOL_CBN (layer #): Es el contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) en el suelo. Se define como la porción de la muestra que pasa a través del tamiz de 2 mm. La concentración de carbón orgánico, es útil para calcular la relación carbón-nitrógeno a fin de determinar el grado de formación, la evolución de un suelo y la disponibilidad del nitrógeno para las plantas y los microorganismos. (ICA, 1992) y (USDA, 2006) en (IEE & SINAGAP, 2009).

Es conocido que la materia orgánica posee alrededor de un 58 % de carbono:

$\text{Materia orgánica} = C. \text{ orgánico} \times 100/58 = C. \text{ org.} \times 1.724$.

En este caso como no se dispone de datos de Carbono orgánico, se procedió a despejar la ecuación para obtener C.org quedando de la siguiente manera.

$$C. \text{ org} = \frac{\text{Materia orgánica}}{1.724}$$

CLAY (layer #): Es el contenido de arcilla (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo de diámetro equivalente menor a 0.002 mm.

SILT (layer #): Es el contenido de limo (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro equivalente entre 0.05 y 0.002 mm.

SAND (layer #): Es el contenido de arena (% del peso del suelo). Es el porcentaje de partículas de suelo que tienen un diámetro entre 2.0 y 0.05 mm.

El contenido en porcentaje de arcilla, limo y arena se obtuvieron de acuerdo al tipo de suelos obtenidos durante el estudio del (IEE & SINAGAP, 2009).

ROCK (layer #): Es el contenido de fragmento de roca (% del peso total). El porcentaje de la muestra que tiene un diámetro de la partícula mayor a 2 mm. Es decir, el porcentaje de la muestra que no pasa a través del tamiz de 2 mm. Este valor fue tomado de los mapas de suelo (IEE & SINAGAP, 2009).

SOL_ALB (top layer): El albedo del suelo es la relación de la cantidad de radiación solar reflejada por un cuerpo por la cantidad incidente sobre éste, expresado como una fracción. El valor para el albedo debería ser reportado cuando el suelo está a (o cerca de) capacidad de campo.

(Argota Quiroz, Durán Escamilla y Fragoso Sandoval 2011), indican que cuando no se cuenta con la suficiente información, se puede calcular mediante una sencilla ecuación.

Los mismos autores citan a (Baumer, 1990) que propone estimar el albedo en la superficie del suelo en función de la materia orgánica mediante la siguiente ecuación:

$$A = \frac{0.6}{\exp(0.4 \cdot OM)}$$

Dónde:

A es el albedo del suelo

OM es la materia orgánica del suelo (%).

USLE_K (top layer): Es el factor K de erodabilidad del suelo de la Ecuación Universal de la Pérdida de Suelo.

Arnold, et al, 2010 definen el factor de erodabilidad del suelo como la proporción de pérdida de suelo por unidad de índice de erosión para un suelo específico como medida en una parcela de 22.1 m de longitud, con una pendiente uniforme de 9 % en el sentido de la longitud, en barbecho continuo, cultivado hacia arriba y abajo de la pendiente. El barbecho continuo se define como la tierra que ha sido cultivada y mantenida libre de vegetación por más de dos años. También notaron que un tipo de suelo usualmente llega a ser menos susceptible a la erosión cuando disminuye la fracción de limo, aunque se incremente la fracción de arena o arcilla.

Wischmeier, et al., 1971, desarrollaron una ecuación general para calcular el factor de erodabilidad del suelo cuando el contenido de limo y arena muy fina llegan a ser menores que el 70 % de la distribución del tamaño de la partícula del suelo.

La ecuación es:

$$K_{USLE} = \frac{0.00021 \cdot M^{1.14} \cdot (12 - OM) + 3.25 \cdot (c_{soilstr} - 2) + 2.5 \cdot (c_{perm} - 3)}{100}$$

Donde K_{USLE} es el factor de erodabilidad del suelo, M es el parámetro del tamaño de las partículas, OM es el porcentaje de materia orgánica, $c_{soilstr}$ es el código de la estructura del suelo en la clasificación del suelo y c_{perm} es el perfil de las clases de permeabilidad.

El parámetro del tamaño de las partículas M , es calculado con la siguiente ecuación:

$$M = (m_{silt} + m_{vfs}) \cdot (100 - m_c)$$

Donde m_{silt} es el porcentaje del contenido de limo (diámetro de partículas: 0.002-0.05 mm), m_{vfs} es el porcentaje del contenido de arena muy fina (diámetro de partículas: (0.05-0.10mm) y m_c es el porcentaje del contenido de arcilla (diámetro de partículas < 0.002 mm).

Los códigos asignados para $c_{soilstr}$ son:

- 1 Estructura granular muy fina
- 2 Estructura granular fina
- 3 Estructura granular media o gruesa
- 4 Estructura en bloque, laminar o masiva

Los códigos asignados para c_{perm} son:

- 1 Permeabilidad rápida (> 150 mm•h⁻¹)
- 2 Permeabilidad moderada a rápida (50-150 mm•h⁻¹)
- 3 Permeabilidad moderada (15-50 mm•h⁻¹)
- 4 Permeabilidad lenta a moderada (5-15 mm•h⁻¹)
- 5 Permeabilidad lenta (1-5 mm•h⁻¹)
- 6 Permeabilidad muy lenta (<mm•h⁻¹)

SOL_EC (layer #): La conductividad eléctrica (ds•m⁻¹) no se encuentra actualmente activa.

Las características físico químicas de los suelos, así como los parámetros requeridos como datos de entrada para el modelamiento se observan en el Cuadro 3.7.

3.6.4 Datos: Variables de clima

Los parámetros de entrada para el generador del clima contienen datos estadísticos necesarios para generar datos climáticos diarios representativos para la microcuencia. A continuación una

breve descripción de las variables de entrada para el generador del clima del SWAT, (Arnold J et al., 2010):

TITLE: La primera línea del archivo .wgn es reservada para comentarios del usuario, no es procesada por el modelo, puede ser opcional.

WLATITUDE: La latitud de la estación a emplear en grados. Requerida.

W LONGITUD: La longitud de la estación en grados. Opcional.

Cuadro 7 Características físico-químicas de los suelos en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar – Ecuador 2014.

No.	SNAM	PERFIL	HYGDRP (Grupo Hidrológico)	SOL_ZMX (Max profundidad de las raíces) (mm)	ANION_EXCL (fracción de la porosidad)	SOL_CRK (volumen de grietas)	TEXTURA	SOL_Z (profundidad mm)	SOL_BD densidad aparente (g/cm ³)
1	E880	E880	B	600	0.5	0.5	F	200	1.43
			B	600	0.5	0.5	F	700	1.46
			B	600	0.5	0.5	F	1200	1.48
2	AAA3	AAA3	B	410	0.5	0.5	F	115	1.36
			B	410	0.5	0.5	F	410	1.51
			B	410	0.5	0.5	F	700	1.53
3	AAA4	AAA4	B	410	0.5	0.5	F	115	1.47
			B	410	0.5	0.5	F	410	1.51
			B	410	0.5	0.5	F	700	1.55
4	E518	E518	B	500	0.5	0.5	F	250	1.4
			B	500	0.5	0.5	FA	500	1.44
			B	500	0.5	0.5	F	1200	1.54
No.	SNAM	PERFIL	SOL_AWC disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	SOL_CBN carbono (%)	% ARCILLA (CLAY)	% LIMO (SILT)	% ARENA (SAND)	(K) USLE
1	E880	E880	0.15	18.11	1.45	18	42	40	0.00
			0.14	20.11	1.27	17	41	42	0.00
			0.14	20.05	1.00	16	40	44	0.00
2	AAA3	AAA3	0.15	22.76	2.00	18	42	40	0.00
			0.14	15.89	0.87	17	41	42	0.00
			0.13	15.89	0.58	16	40	44	0.00
3	AAA4	AAA4	0.14	16.04	1.00	18	42	40	0.00
			0.14	15.89	0.87	17	41	42	0.00
			0.13	15.89	0.58	16	40	44	0.00
4	E518	E518	0.13	20.65	2.00	20	30	50	0.00
			0.12	4.32	1.00	34	36	30	0.00
			0.14	10.58	0.58	20	40	40	0.00

Fuente: Instituto Espacial Ecuatoriano.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

WELEV: La elevación de la estación climática en (m). Requerida.

RAIN_YRS: El número de años máximo para la media hora de lluvia mensual usada para definir los valores de RAIN_HHMX(1) - RAIN_HHMX(12). Requerida.

TMPMX (mon): Promedio mensual de la temperatura máxima diaria (°C). Requerida.

TMPMN (mon): Promedio mensual de la temperatura mínima diaria (°C). Requerida.

TMPSTDMX (mon): Desviación estándar mensual de la temperatura máxima diaria (°C)

TMPSTDMN (mon): Desviación estándar mensual de la temperatura mínima diaria (°C)

Para calcular los valores referidos a la temperatura (TMPMX (mon), TMPMN (mon), TMPSTDMX (mon), TMPSTDMN (mon)) se los realizó mediante una hoja de cálculo de Excel.

PCPMM (mon): Promedio mensual de la precipitación diaria (mm H₂O).

PCPSTD (mon): Desviación estándar mensual de la precipitación diaria (mm H₂O/día).

PCPSKW (mon): Coeficiente de asimetría mensual de la precipitación diaria.

PR_W (1.mon): Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día seco (días).

PR_W (2, mon): Probabilidad mensual de ocurrencia de un día húmedo luego de un día húmedo (días).

PCPD (mon): Promedio mensual del número de días de lluvia.

Los valores de PCPMM (mon), PCPSTD (mon), PCPSKW (mon), PR_W (1.mon), PR_W (2,mon) y PCPD (mon) fueron calculados mediante el programa pcpsstat.exe de SWAT (Liersch 2003).

RAINHHMX (mon): Máxima lluvia de media hora por mes (mmH₂O). Para este parámetro se tomó en cuenta los valores históricos de lluvia máxima para 24 horas.

SOLARAV (mon): Promedio mensual de la radiación solar diaria (MJ/m²/ día). Los valores del promedio de radiación solar diaria fueron calculados mediante la fórmula de Angstrom que relaciona la radiación solar con la radiación extraterrestre y la duración relativa de la insolación (Allen, y otros 2006).

$$R_s = \left(a_s + b_s \frac{n}{N} \right) R_a$$

Dónde:

R_s: radiación solar o de onda corta [MJ m⁻² día⁻¹],

n : duración real de la insolación [horas],

N : duración máxima posible de la insolación [horas],

n/N : duración relativa de la insolación[-],

R_a : radiación extraterrestre [$\text{MJ m}^{-2} \text{ día}^{-1}$],

a_s : constante de regresión, que expresa la fracción radiación extraterrestre que llega a la tierra en días muy nublados ($n = 0$),

$a_s + b_s$ fracción de la radiación extraterrestre que llega a la tierra en días despejados ($n = N$).

En casos en que no disponga de datos reales de radiación solar y cuando no se han realizado calibraciones previas a la ecuación mencionada, se recomienda usar valores de $a_s = 0,25$ y de $b_s = 0,50$.

DEWPT (mon): Promedio mensual de la temperatura del punto de rocío ($^{\circ}\text{C}$), o la humedad relativa en fracción. Estos valores fueron tomados del registro histórico para cada estación.

WNDV (mon): Promedio mensual de la velocidad de viento diaria (m/s). Tomados del registro histórico para cada estación, las tablas 3 y 4 presentan el resumen de los datos estadísticos necesarios para ingresar al SWAT.

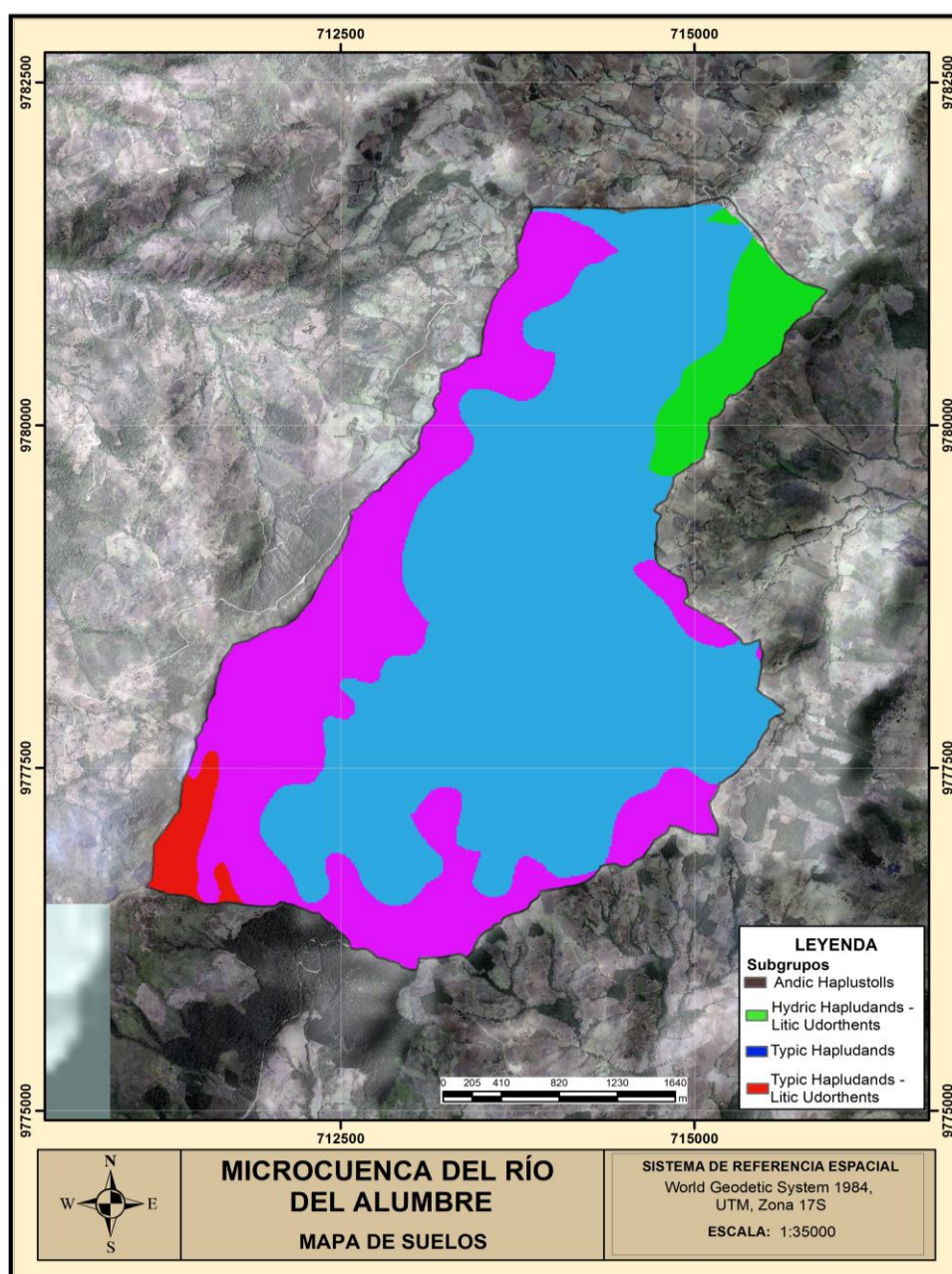
3.7 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, VALIDACIÓN Y CALIBRACIÓN

Para realizar un uso eficiente de los modelos, es necesario realizar un análisis de sensibilidad; el análisis de sensibilidad utilizado en SWAT2012 es el método LH-OAT, el cual combina el método de diseño OAT (One factor At a Time) y el método de muestreo LH (Latin Hypercube), tomando el muestreo de Latin Hypercube como puntos iniciales para el diseño OAT. El análisis de sensibilidad identifica los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales, el proceso se describe en la Figura 4.

La calibración de un modelo como SWAT consiste en realizar un test de los parámetros de salida (caudal, sedimentos, escorrentía, etc.) entre los caudales simulados y los observados o tomados en campo; con la finalidad de poder determinar cuáles parámetros de entrada deben ser ajustados en el modelo. En muchos casos el ajuste entre los caudales observados y simulados obtenidos durante la validación es menos satisfactorio que el obtenido en la calibración, pero es más representativo de la exactitud de las predicciones que se hagan con el modelo (Palacios, 1986).

El ajuste de parámetros se realizó de acuerdo con lo propuesto por el manual de SWAT, el cual indica los parámetros de entrada que más afectan las salidas del modelo y su orden de importancia; en el diagrama adjunto se presenta la metodología empleada para la calibración del

modelo.



Mapa 3. Suelos clasificados por Subgrupo en la microcuenca del río Del Alumbre Bolívar - Ecuador, 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

En la Tabla 1 se presenta los parámetros que corresponden o tienen influencia en la variable del caudal (Stream Flow) del modelo; para determinar el grado de sensibilidad de los parámetros evaluados, el modelo estadístico en SWAT2012 los clasifica en un rango (Rank) de prioridad de 1-20 (rango que varía dependiendo del número de parámetros evaluados); identificando cuáles parámetros tienen mayor influencia sobre los resultados de caudal en el modelo. El rango de clasificación de parámetros está dado por:

- 1 muy importante
- 2 – 9 importante
- 10 – 20 relativamente importante
- 21 no importante

Tabla 1. Ranking de Parámetros que influyen en los resultados del modelamiento.

PARAMETRO	RANK	COMENTARIO	PROCESO
Ch_K2	1	Channel effective hydraulic conductivity [mm/hr]	Enrutamiento
Gwqmn	2	Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	Flujo Base
Canmx	3	Maximum canopy storage [mm]	Escorrentia
Esco	4	Soil evaporation compensation factor	Suelos
Timp	5	Snow pack temperature lag factor	Nieve
Gw_Revap	6	Groundwater "revap" coefficient	Flujo Base
Blai	7	Maximum potential leaf area index	Cultivos
Cn2	8	Initial SCS CN II value	Escorrentia
Alpha_Bf	9	Baseflow alpha factor [days]	Flujo Base
Sol_Z	10	Soil depth [mm]	Suelos
Sol_K	11	Saturated hydraulic conductivity [mm/hr]	Suelos
Gw_Delay	12	Groundwater delay [days]	Flujo Base
Ch_N2	13	Manning's nvalue for main channel	Enrutamiento
Slope	14	Average slope steepness [m/m]	Geomorfologia
Sol_Awc	15	Available water capacity [mm H2O/mm soil]	Suelos
Surlag	16	Surface runoff lag time [days]	Escorrentia
Biomix	17	Biological mixing efficiency	Suelos
Epco	18	Plant uptake compensation factor	Evaporacion
Revapmn	21	Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap" [mm]	Flujo Base
Sol_Alb	21	Moist soil albedo	Suelos

Fuente: Uribe, 2010.

En los resultados del análisis de sensibilidad se identificó que de los 20 parámetros analizados hay un parámetro como el más sensible (sensibilidad global 1) que hace parte del proceso de enrutamiento en el cauce principal. Además, hay 8 parámetros importantes (sensibilidad global >2 y sensibilidad global <= de 9) relacionados a los procesos de Flujo Base, Escorrentía, Nieve y de movimiento de agua en el suelo. Por último, hay 9 parámetros "ligeramente importantes" (sensibilidad global >10 y sensibilidad global <=20), y 2 parámetros que no causan cambio a la salida del modelo (sensibilidad global de 21).

Este resultado permite identificar de manera más clara cuales son los parámetros que necesariamente deben ser tomados en cuenta en el momento de la calibración del modelo.

A manera de resumen se determina que el parámetro más sensible en el modelo corresponde al Conductividad Hidráulica Efectiva en el Canal (CH_K2) este parámetro se calcula para la corriente o canal principal; donde las corrientes en el Modelo SWAT2012 se pueden clasificar dependiendo de la relación que existe con el sistema de aguas subterráneas.

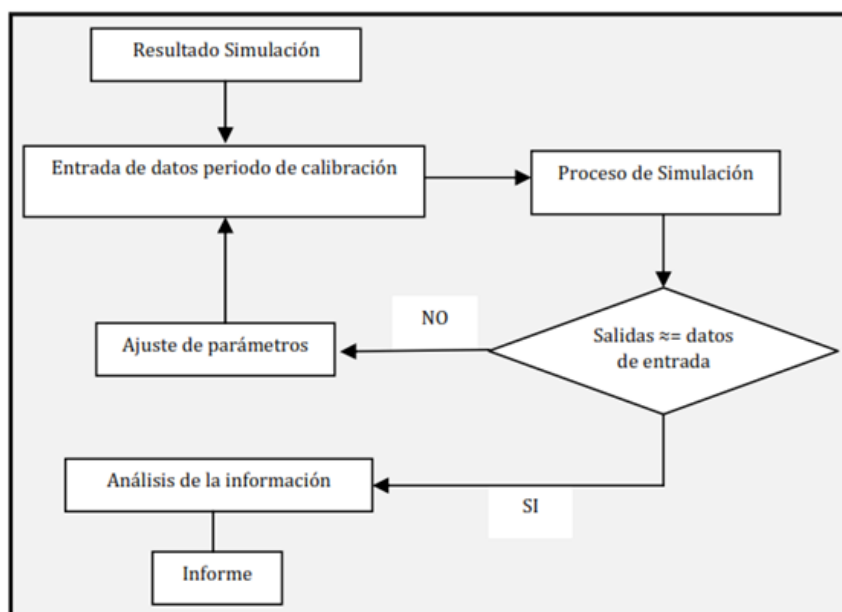


Figura 1 Esquema metodológico de Calibración y Validación

Fuente: Uribe, 2010.

Una corriente situada en un área de descarga que recibe el flujo de agua subterránea es una corriente que gana mayor flujo, como se observa en el Gráfico 5 sección a. Este tipo de corriente se caracteriza por un aumento en la descarga aguas abajo. Una corriente situada en un área de recarga es una corriente de pérdida de flujo. Este tipo de corriente se caracteriza por una disminución en la descarga aguas abajo. Una corriente de pérdida de flujo se puede conectar al flujo de aguas subterráneas de dos maneras, detalladas en el Gráfico 5 secciones b y c. Una corriente que a la vez recibe y pierde el flujo continuo se observa en el Gráfico 3.5 sección d. Para arroyos perennes con la contribución de las aguas subterráneas continua, la conductividad efectiva será igual a cero.

Dentro de los parámetros que tienen un nivel alto de importancia de sensibilidad, encontramos:

Umbral de profundidad de agua en el acuífero superficial (GWQMN): este es el umbral de la profundidad del agua requerida para que ocurra el flujo de retorno o aporte de aguas subterráneas al flujo del cauce principal, cuanto más alto sea este valor, los aportes de flujo base hacia la corriente son más restringidos, al contrario de si este valor es menor los aportes serán mayores.

Capacidad Máxima de Almacenamiento del Dosel (CANMX) el cual determina la máxima cantidad de agua que puede ser atrapada en el dosel cuando la cubierta está completamente desarrollada y que tiene influencia directa en el cálculo de la infiltración, escorrentía superficial y

la evapotranspiración; ya que la densidad de la cobertura del suelo y la morfología de las plantas ejercen una influencia sobre la intensidad de la precipitación que cae al suelo y por consiguiente en los cambios de cantidad de agua que alcanza el suelo. (*Manual Teórico SWAT, 2012.*)

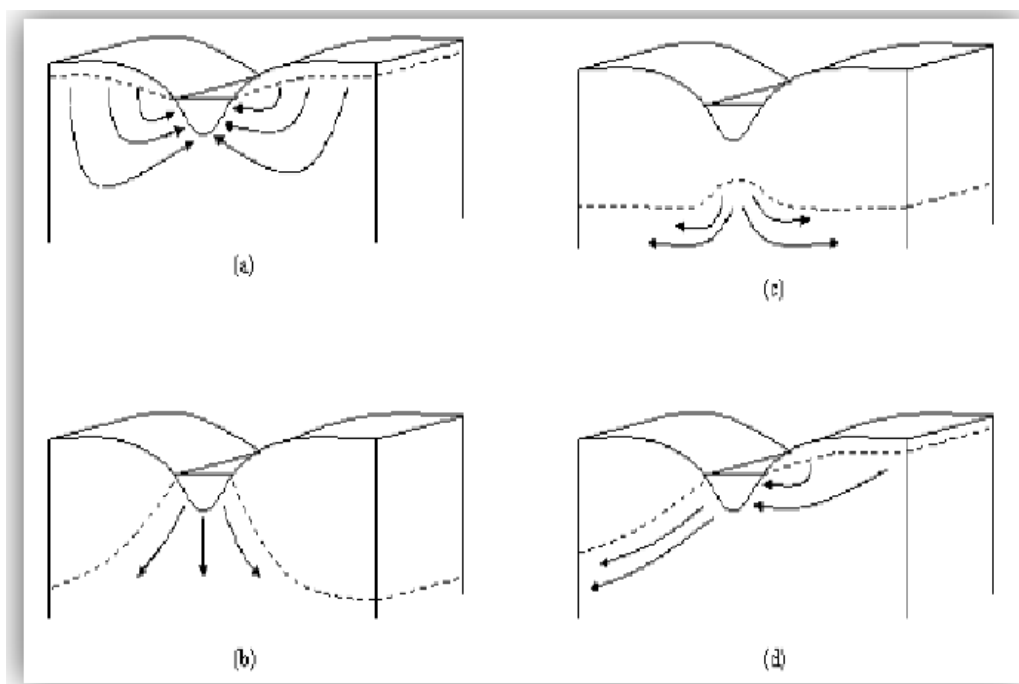


Figura 2. Relación entre la corriente y el agua subterránea.

Fuente: Manual Teórico SWAT, 2012.

Factor de compensación para la evaporación del suelo (ESCO), este parámetro permite al usuario modificar la profundidad del perfil del suelo a la cual la demanda de evaporación es permitida para satisfacer la demanda de evaporación del suelo en el efecto de la acción capilar; este parámetro varía entre (0.01 y 1); cuando este valor es reducido, “el modelo es capaz de extraer más de la demanda de evaporación de los niveles más bajos”. SWAT2012 supone que el 50% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 10 mm del suelo y el 95% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 100 mm del suelo. (*Manual Teórico SWAT, 2012.*)

Factor de retraso de la temperatura en el área de nieve (TIMP), la influencia de la temperatura del día anterior en el área de nieve en la temperatura del día actual de esta área es controlado por un factor de retraso. El factor de retraso representa la cantidad y densidad de la nieve, la profundidad de la capa de nieve, la exposición y otros factores que afectan la temperatura en el paquete de nieve. TIMP puede variar entre 0,01 y 1,0. Al acercarse a 1.0, la temperatura media del aire en el día actual ejerce una influencia cada vez mayor sobre la temperatura de la nieve y la temperatura de la capa de nieve del día anterior ejerce una influencia cada vez menor. Cuando TIMP tiende a cero, la temperatura de la capa de nieve será menos influenciado por la temperatura del aire del día actual.

Factor Alfa para el flujo base (ALPHA_BF), este es el umbral de la profundidad del agua requerida para que ocurra el flujo de retorno o aporte de aguas subterráneas al flujo del cauce principal, cuanto más alto sea este valor, los aportes de flujo base hacia la corriente son más restringidos, al contrario de si este valor es menor los aportes serán mayores.

Los valores adoptados para la calibración manual son los recomendados por SWAT-CUP.

4. PRESENTACIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Para los resultados que se presentan a continuación se utilizaron datos levantados los años 2008 al 2012 y los meses de enero a junio de 2013.

4.1 CALIBRACIÓN DE ESTACIONES HIDROMÉTRICAS

Para calibrar los valores obtenidos de las estaciones hidrométricas se realizaron aforos del caudal del río y se calculó la correlación de las dos estaciones obteniendo valores de $r^2 > 0.90$, altamente aceptado en estudios de hidrología. Los resultados se presentan en el Cuadro 8.

Cuadro 8 Coeficiente de determinación de las estaciones en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Estación	Tipo de Ecuación	Ecuación	r^2
Guayabal (EC11)	Potencial	$y = 1.2596x^{0.4751}$	0.9641
Pacay Bridge (EC12)	Potencial	$y = 0.6106x^{0.2183}$	0.9013

Elaborado: Villacrés, C. 2014.

4.2 CAUDAL EN MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE

En la microcuenca del río Del Alumbre contamos con los datos de nivel de las estaciones Guayabal (EC11) y Pacay (EC12), valores muy estables para el periodo 2008 – junio de 2013. Por medio de la correlación potencial con los diferentes métodos de aforos obtuvimos el caudal mensual para cada estación, el cual se puede observar en el Cuadro 9.

Cuadro 9 Distribución promedio mensual del Caudal (m³.s-1) durante el periodo enero 2008 – junio 2013, microcuenca del Río del Alumbre, Bolívar – Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
GUAYABAL (EC11)	0.33	1.86	1.92	1.39	0.68	0.18	0.12	0.07	0.04	0.03	0.02	0.04	6.67	0.56
PACAY (EC12)	0.18	2.44	2.72	1.79	0.94	0.25	0.19	0.13	0.09	0.08	0.06	0.06	8.92	0.74
SUMA	0.51	4.30	4.64	3.18	1.62	0.43	0.30	0.20	0.13	0.11	0.09	0.10	15.59	1.30
PROMEDIO	0.26	2.15	2.32	1.59	0.81	0.21	0.15	0.10	0.06	0.05	0.04	0.05	7.80	0.65

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Del Gráfico 1, se observan los caudales de las estaciones pertenecientes a la microcuenca del río Del Alumbre, se observa que las dos estaciones presentan similar distribución, Pacay (EC12), es la que tiene mayor superficie de drenaje en la microcuenca, la mayor producción de caudal se observa en los meses de Febrero a Mayo, que coinciden con los meses en donde existen altas precipitaciones, los meses siguientes en donde la Radiación Solar es alta y las precipitaciones bajas, el caudal generado es bajo, perdido en gran parte por la evaporación. La estación Guayabal (EC11), presenta una distribución promedia mensual del caudal muy definido, los meses de

Febrero a Mayo como los más caudalosos, presentando el dato más alto de $19.21 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ en el mes de Marzo. Se puede observar además que los meses restantes del año presentan valores de caudal bajos, siendo el mes de Noviembre el más bajo con $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. La estación Pacay (EC12), presenta una distribución promedia mensual del caudal muy similar a la anterior, los meses de Febrero a Mayo como los picos altos, presentando el mayor dato en marzo con $27.18 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$. Se puede observar además que los meses restantes del año presentan valores de caudal bajos, encontrando en noviembre y diciembre los mínimos valores con $0.62 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

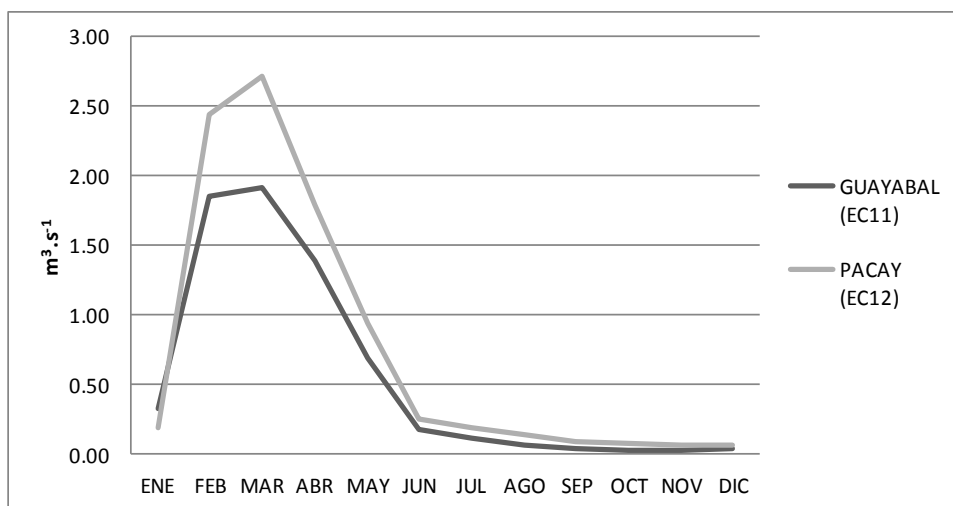


Gráfico 1. Distribución promedio mensual del Caudal ($\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3 CARACTERIZACIÓN CLIMÁTICA DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE.

4.3.1 Precipitación

Cuadro 10 Distribución promedio mensual de la Precipitación en (mm), durante el período enero 2008 – junio 2013, de la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA
Guayabal (WS11)	284.82	170.57	216.64	242.24	106.8	58.94	108.17	20.14	54.75	36.31	76.7	79.45	1455.53
Pacay (WS12)	156.34	198.74	162.12	157.1	56.2	24.97	22.6	9.25	11.83	13.43	10.53	72.77	895.88
SUMA	441.16	369.31	378.76	399.34	163	83.91	130.77	29.39	66.58	49.74	87.23	152.22	2351.41
PROMEDIO	220.58	184.655	189.38	199.67	81.5	41.955	65.385	14.695	33.29	24.87	43.615	76.11	1175.705

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

En la microcuenca del río Del Alumbre, como se observa en el cuadro 10, se presenta un régimen anual definido, con precipitaciones altas entre los meses de Diciembre a Mayo. Totalmente contrario son los meses de Junio a Noviembre que son literalmente secos, existiendo muy pocos

días con lluvias ligeras. Dicho régimen afecta altamente la producción agrícola en la zona, su distribución de lluvias se distingue en el Gráfico 2.

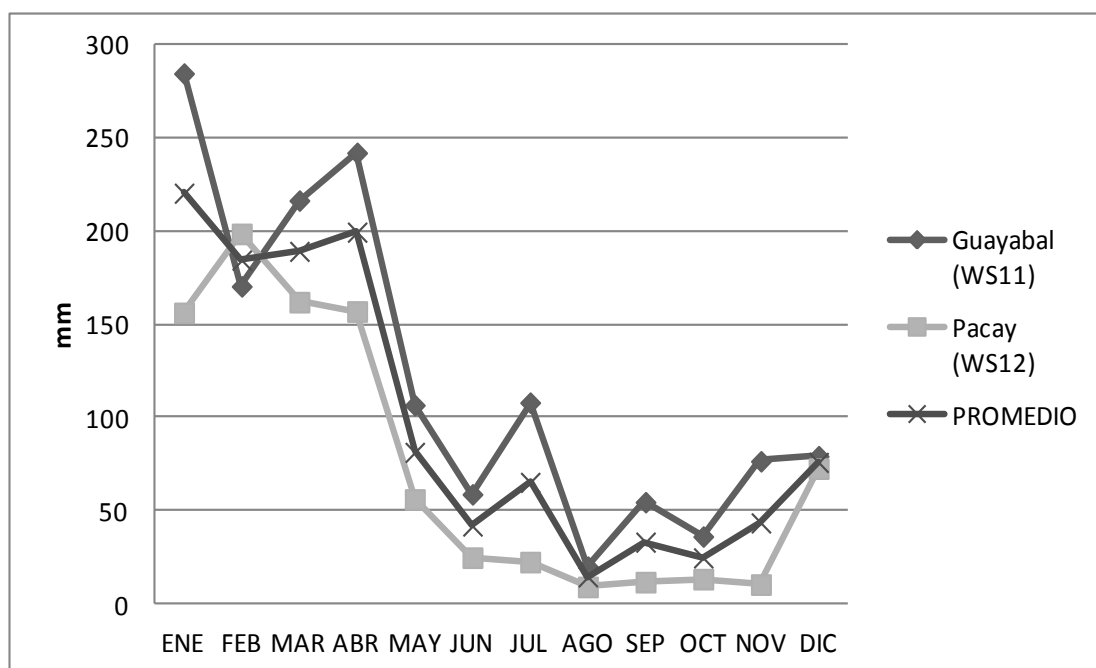


Gráfico 2. Distribución promedio mensual de la Precipitación (mm), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.2 Presión atmosférica

Del cuadro 4.4 se observa que los valores altos de presión están comprendidos entre los meses de Abril a Julio, siendo el mes de Junio (775.23 mbar) el que presenta el valor más alto. También se puede observar que los meses restantes los valores de presión son bajos, siendo el mes de Diciembre y Enero los más bajos con (774.25 mbar). No existe mucha diferencia entre sus extremos, lo cual se aprecia en el Gráfico 3.

Cuadro 11. Distribución promedio mensual de la Presión en mbar, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Pacay (WS12)	774.26	774.73	774.74	774.94	775.1	775.23	775.09	774.86	774.78	774.81	774.34	774.25	9297.13	774.76

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

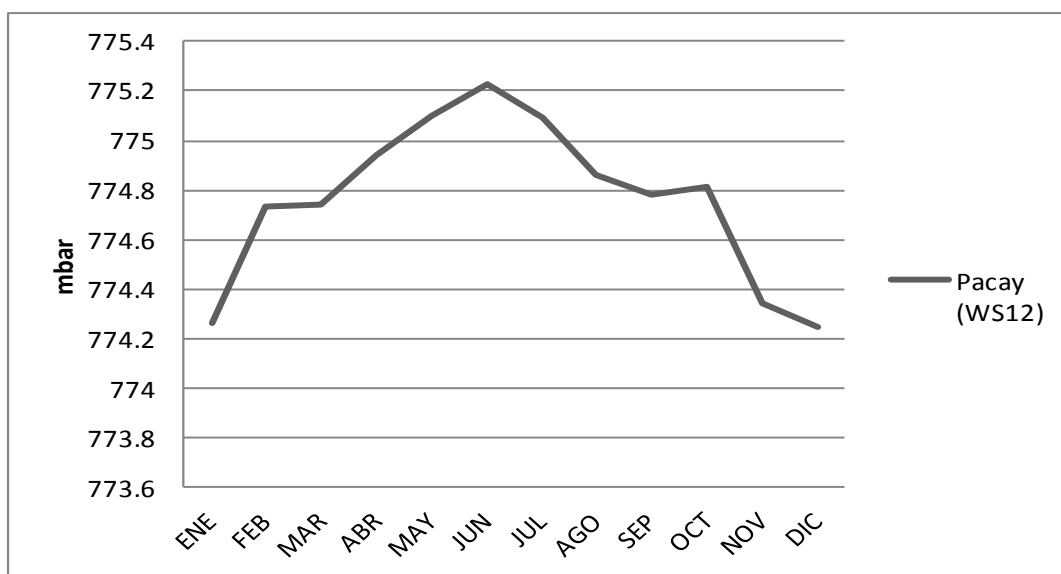


Gráfico 3. Distribución promedio mensual de la Presión en mbar, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.3 Temperatura del aire

En la microcuenca del río Del Alumbre se tiene temperaturas desde los 7 hasta 22 °C, en el Cuadro 12 se encuentran los registros de temperatura de las estaciones.

Cuadro 12. Distribución promedio mensual de la Temperatura Máxima en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Guayabal (WS11)	16.6	17.2	18.4	18.6	19.1	18.5	18.4	19.0	19.2	19.0	18.7	17.5	220.2	18.4
Pacay (WS12)	19.4	18.8	20.1	20.9	21.7	21.4	21.5	22.4	23.0	22.9	23.2	19.7	254.9	21.2
SUMA	36.0	35.9	38.5	39.4	40.8	39.9	39.8	41.4	42.2	42.0	41.9	37.2	475.0	57.8
PROMEDIO	18.0	18.0	19.3	19.7	20.4	20.0	19.9	20.7	21.1	21.0	21.0	18.6	19.8	19.8

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Del Gráfico 4, se observa que la estación de Pacay (WS12) presenta los valores más altos de distribución promedia mensual de la temperatura máxima y la estación Guayabal (WS11) registra los valores más bajos. Existe una mínima diferencia entre la temperatura de estas dos estaciones.

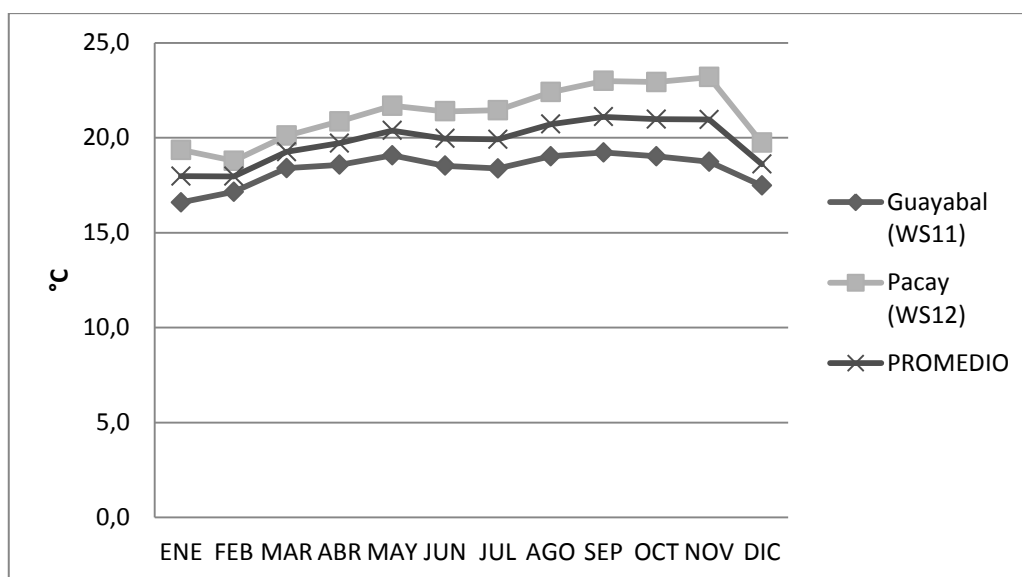


Gráfico 4. Distribución promedia mensual de la Temperatura Máxima en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.4 Temperatura mínima

Del cuadro 13 se observa que la estación de Guayabal (WS11) presenta los valores más bajos de distribución promedia mensual de la temperatura mínima, con un valor de 4.35 °C como el más frío. La estación de Pacay (WS12) es menos fría, registra temperaturas no menores a 6 °C durante las noches, lo cual se aprecia en el Gráfico 5.

Cuadro 13. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima, en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Guayabal (WS11)	12.61	11.66	11.85	10.90	8.43	7.06	5.73	4.35	4.36	6.52	8.65	11.20	103.32	8.61
Pacay (WS12)	11.51	11.99	11.55	11.11	9.54	8.14	7.36	6.19	6.01	7.42	6.99	9.21	107.01	8.92
SUMA	24.12	23.65	23.40	22.01	17.97	15.20	13.09	10.54	10.37	13.94	15.64	20.41	210.33	17.53
PROMEDIO	12.06	11.83	11.70	11.01	8.99	7.60	6.55	5.27	5.19	6.97	7.82	10.21	8.77	8.77

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

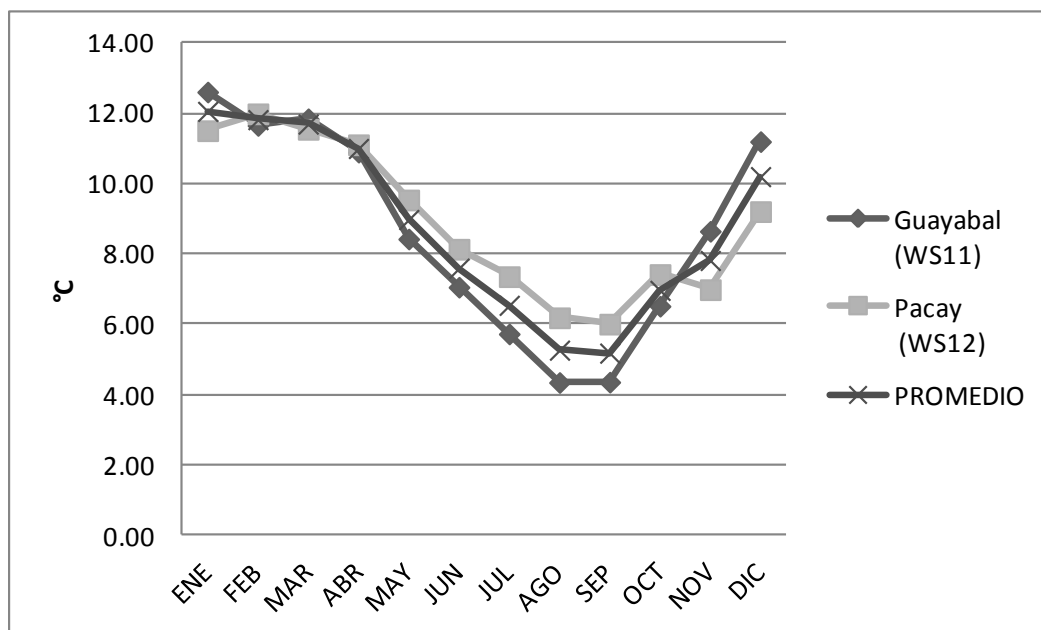


Gráfico 5. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.5 Temperatura promedio

Del cuadro 14 se observa que la estación del Pacay (WS12) presenta los valores más altos de distribución promedia mensual de la temperatura promedio, y el Guayabal representa los valores más bajos, como ya se mencionó antes esta temperatura es importante sobre todo para producción, en esta microcuenca se pueden observar valores muy similares entre las estaciones establecidas para la investigación. El gráfico 6 presenta una distribución bimodal, con dos picos altos en los meses de Marzo y Noviembre.

Cuadro 14 Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima, en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Guayabal (WS11)	14.17	14.16	14.56	14	13.48	12.63	12.09	11.72	12.03	12.77	13.58	13.91	159.088	13.257
Pacay (WS12)	14.03	14.23	14.84	14.07	14.01	13.7	13.06	13.88	14.39	14.56	14.81	13.68	169.26	14.105
SUMA	28.2	28.39	29.4	28.07	27.49	26.33	25.15	25.6	26.42	27.33	28.39	27.59	328.348	27.362
PROMEDIO	14.1	14.195	14.7	14.035	13.745	13.165	12.575	12.8	13.21	13.665	14.195	13.795	164.174	13.681

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

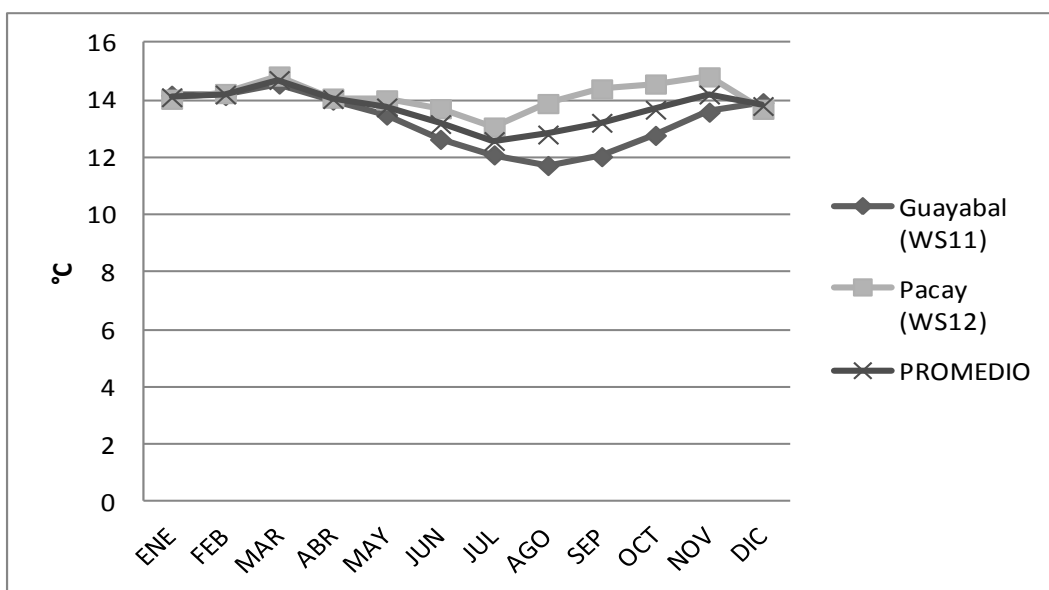


Gráfico 6. Distribución promedio mensual de la Temperatura Mínima en °C, durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.6 Humedad relativa

Del cuadro 15, para esta variable, la estación Pacay (WS12) registró valores de Humedad Relativa para toda la microcuenca, en donde la distribución definida en los meses de Enero a Mayo con el valor de 95.88% en el mes de Febrero y el mes que registro el valor más bajo de humedad relativa es el mes de Noviembre 85.60%. El gráfico 7 presenta forma similar y por lo tanto relación directa con la precipitación.

Cuadro 15.- Distribución promedio mensual de la Humedad relativa (%), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Pacay (WS12)	95.97	96.88	94.71	94.25	91.51	90.94	89.13	88.48	88.02	87.23	85.6	91.28	1094.01	91.17

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.7 Radiación solar

En el cuadro 16 se observa que la estación de Pacay (WS12) registró valores de radiación definiendo los meses de agosto a noviembre como los valores altos, siendo septiembre el mes que registró el valor promedio más alto ($242.05 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). Además observamos que el mes de enero registró el valor promedio más bajo con ($131.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$). El gráfico no ayuda a visualizar la curva de radiación.

Cuadro 16.- Distribución promedio mensual de la Radiación solar ($W \cdot m^{-2}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Pacay (WS12)	131.32	129.28	165.01	152.59	174.08	168.17	185.04	196.26	242.05	234.02	208.59	160.58	2146.97	178.91

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

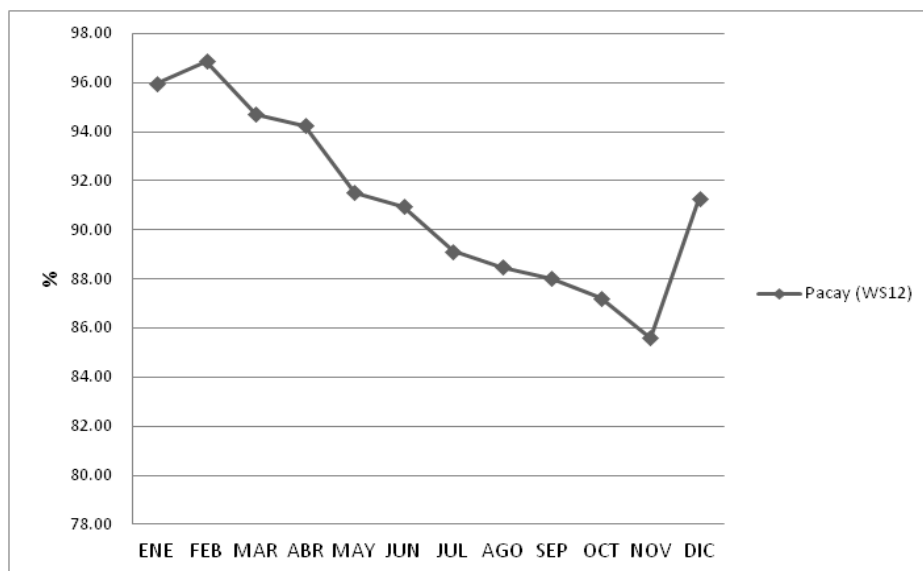


Gráfico 7. Distribución promedio mensual de la Humedad relativa (%), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

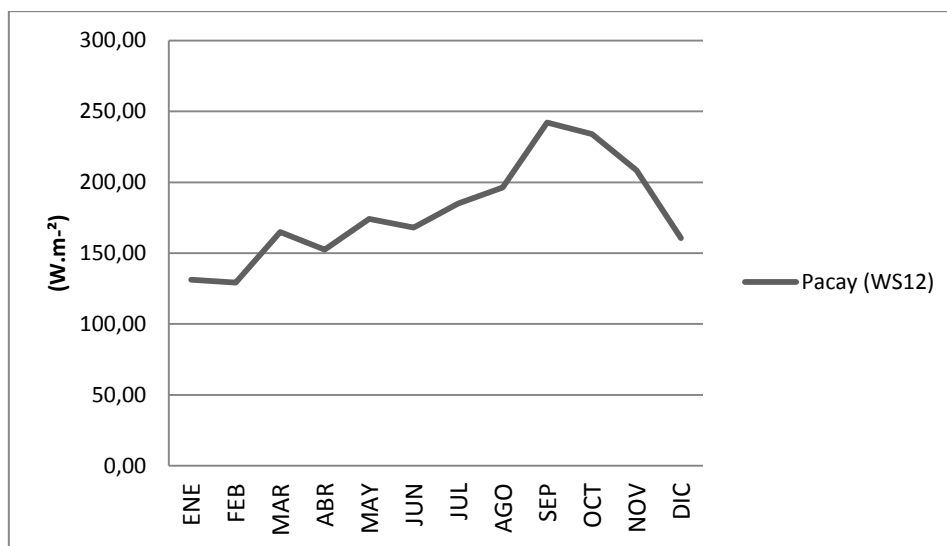


Gráfico 8. Distribución promedio mensual de la Radiación solar ($W \cdot m^{-2}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.8 Velocidad del viento

Del cuadro 17 se obtiene que la estación de Pacay (WS12) registró los valores de la Velocidad del viento, definiendo los meses de Junio a Octubre como los valores altos siendo Septiembre el mes que registró el valor promedio más alto ($0.78 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). También se puede observar que el mes de Febrero registró el valor promedio más bajo con ($0.35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). La curva se observa en el Gráfico 4.9.

Cuadro 17.- Distribución promedio mensual de la Velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Pacay (WS12)	0.36	0.35	0.36	0.38	0.41	0.52	0.59	0.68	0.78	0.69	0.58	0.51	6.22	0.52

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

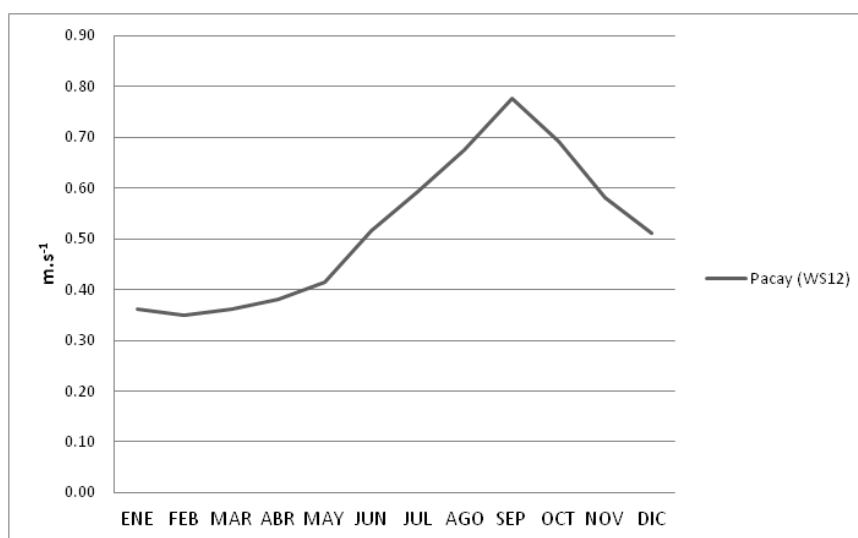


Gráfico 9. Distribución promedio mensual de la Velocidad del viento ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.3.9 Dirección del viento

Del cuadro 18 se observa que la estación de Pacay (WS12) registró los valores de la Dirección del viento, definiendo los meses de enero a octubre con los valores similares de su dirección, todos estos influenciados por los cambios meteorológicos que se dan en el Océano Pacífico. La estación de Pacay (WS12) representa a la microcuenca del río Del Alumbre, en esta estación ubicada con un Norte magnético nos permitió obtener datos de dirección del viento en ($\emptyset$).

Cuadro 18.- Distribución promedio mensual de la dirección del viento (ϕ), durante el período enero 2008 – junio 2013, micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

ESTACIÓN	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC	SUMA	PROMEDIO
Pacay (WS12)	208.46	201.85	199.44	194.87	191.11	189.39	189.45	186.25	190.49	189.31	171.25	138.58	2250.46	187.54

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.4 MODELAMIENTO DE LA MICROCUENCA DEL RÍO DEL ALUMBRE

4.4.1 Caudal

Tomando como base las recomendaciones sugeridas en este caso por los usuarios de SWAT Latinoamérica que presentan experiencia en la modelación de cuencas en la región Andina, se modificaron algunos parámetros del modelo según los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad como son características edafológicas, grupo hidrológico y coeficientes de cultivos, luego se realizó una nueva simulación. A continuación se presenta de forma gráfica el promedio mensual multianual del caudal calculado vs. el observado.

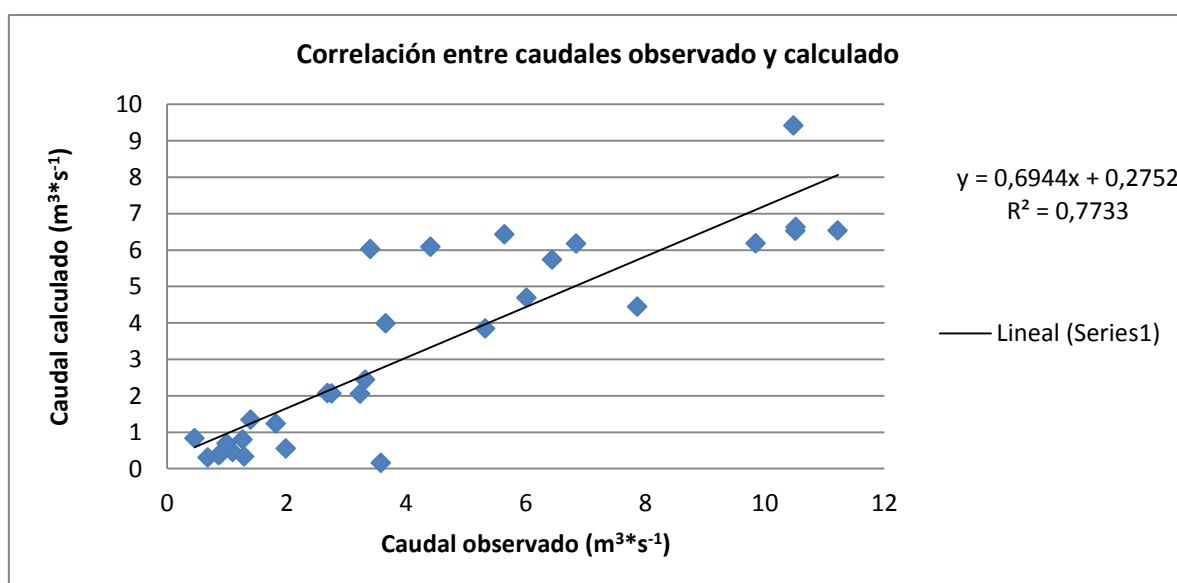


Gráfico 10. Coeficiente de Determinación de los caudales observados y calculados de la estación hidrométrica Pacay (EC12), micro cuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Pacay (EC12), al ser la estación que recoge todas las aguas de la microcuenca es la HRU más importante al momento de evaluar los resultados, porque es considerada como buena y aceptable. Otra prueba estadística importante que hemos tomado en cuenta es KGE, Kling-Gupta que mide la eficiencia entre los valores observados y los valores calculados, La función KGE es una mejora del índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe NSE (Nash y Sutcliffe, 1970), donde las

componentes de correlación, desviación y variabilidad están ponderados de manera equitativa, resolviendo problemas sistemáticos de subestimación en los valores máximos y de poca variabilidad identificados en la función NSE (Gupta et al., 2009). La estación Pacay presenta un valor de 0.7733 en esta prueba estadística, un valor cercano a 1.0, lo que representa un valor aceptable para esta investigación.

El gráfico 11 indica la evaluación del modelo:

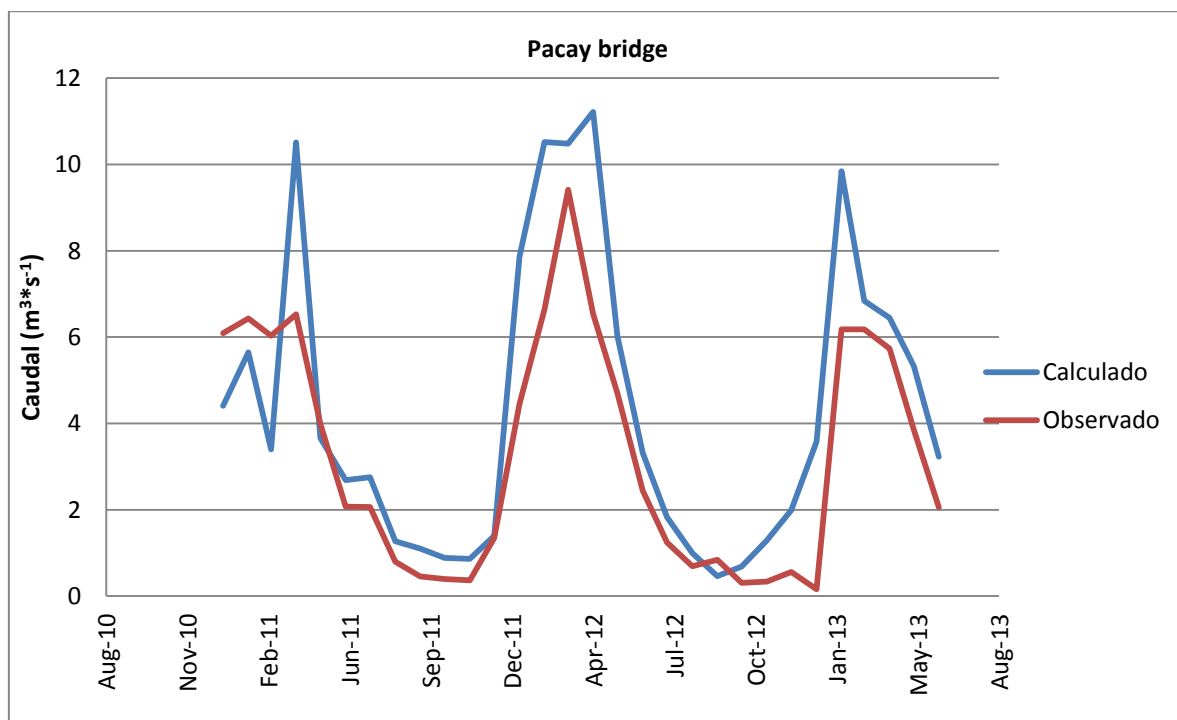


Gráfico 11. Caudales observados y calculados de la estación hidrométrica Pacay (EC12), microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

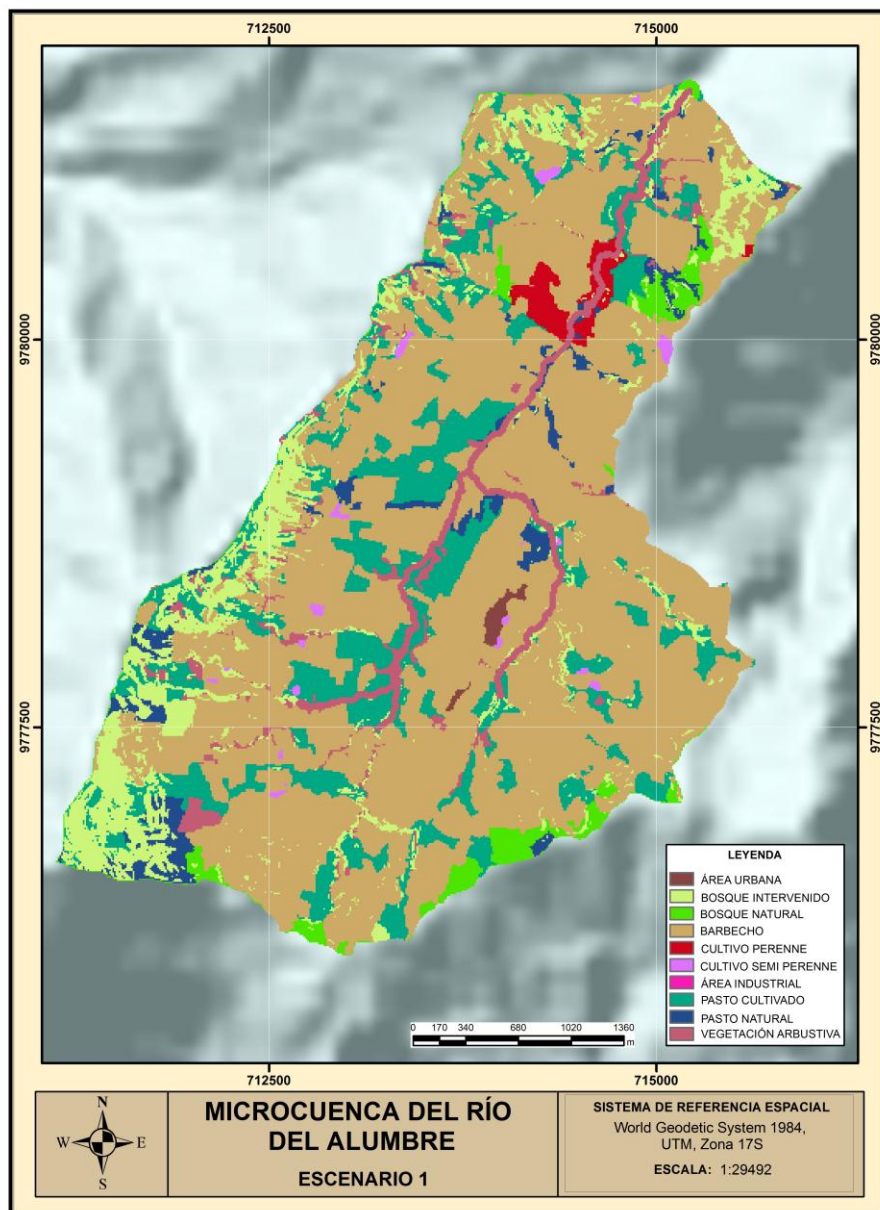
Elaborado: Villacrés, C., 2014.

Del gráfico 11 se puede observar los valores calculados y modelados de la estación hidrométrica de Pacay, donde se observa similar tendencia, los valores difieren, pero con resultados aceptados en hidrología.

4.4.2 Generación de Escenarios

Una vez calibrado el modelo es posible crear escenarios hipotéticos en los que se puede simular el comportamiento de la microcuenca frente a nuevas situaciones, permitiendo de esta manera comparar la situación actual con diferentes condiciones de uso de la tierra que podrían presentarse en un futuro. Considerando las políticas agropecuarias actuales, las tendencias de uso de la tierra y las condiciones en las que los campesinos viven en nuestros páramos se generaron estos posibles escenarios, que nos ayudarán a tomar decisiones, aumentar la investigación sobre

temas de recursos hídricos y la conservación de cuencas hidrográficas en el país. A continuación se presentan, los escenarios que fueron creados:



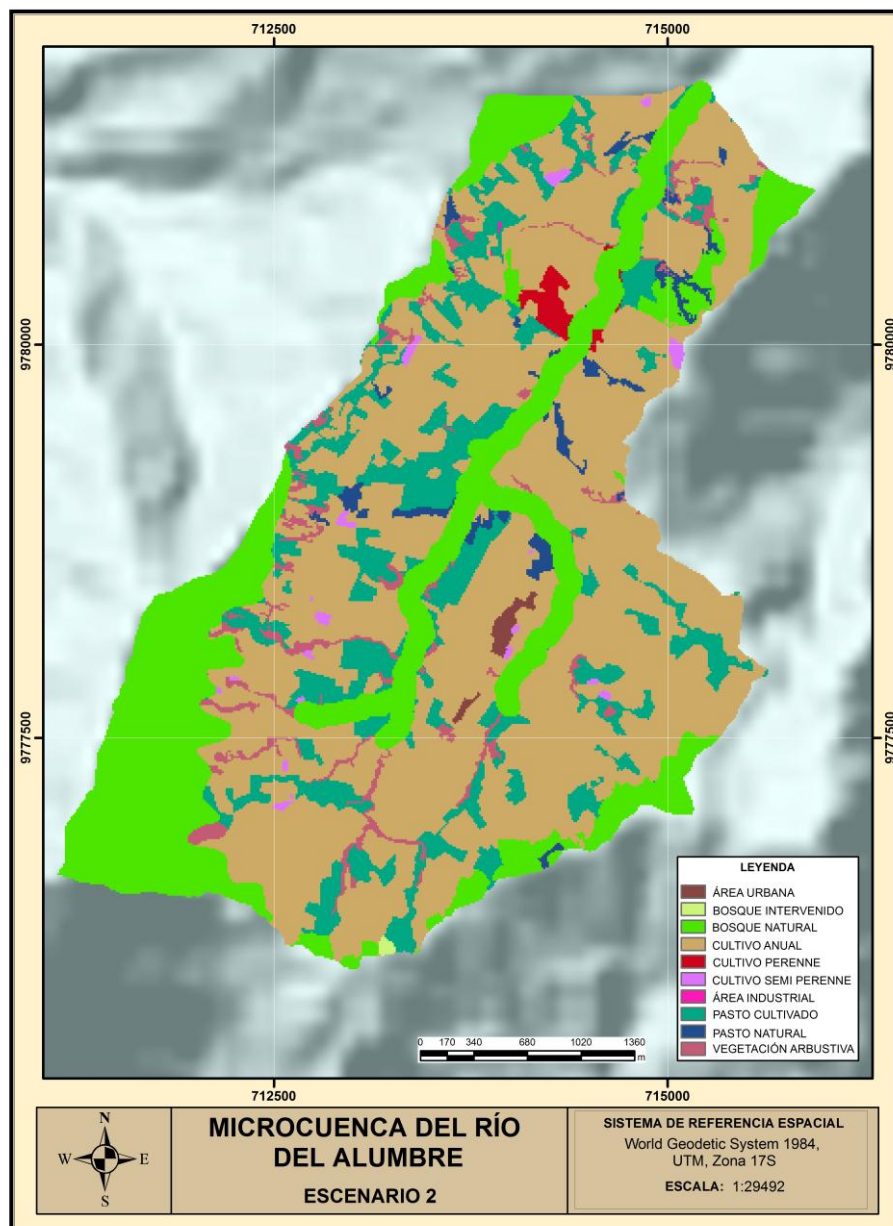
Mapa 4. Escenario 1, cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río del Alumbre. Bolívar – Ecuador. 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014

Para el escenario 1 se toma en cuenta la fase que se presenta al momento de preparar el suelo para la siembra del maíz y luego de la cosecha del mismo, es decir barbecho y suelo descubierto.

Del gráfico 12 se observa que la tendencia de la generación de caudal es adversa, ya que en épocas de lluvia se produce una rápida generación de caudal en los drenajes, arrastrando consigo grandes cantidades de suelo, no se retiene, lo que provoca que en épocas con menos

precipitaciones haya poca cantidad de caudal por un periodo más largo de tiempo, la curva indica caudales altos por poco tiempo y caudales bajos por más tiempo.



Mapa 5. Escenario 2, cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río del Alumbre. Bolívar – Ecuador. 2014

Elaborado: Villacrés, C., 2014

El mapa 5 nos muestra el escenario 2, se generó áreas de protección alrededor de los principales drenajes y se colocando su uso como bosque natural, además de las áreas con pendientes mayores al 50 % y en cotas mayores a los 2460 msnm, lo que ayuda en la protección del recurso suelo, evitando el arrastre excesivo de partículas del suelo. La generación de caudales es más

uniforme, es decir en épocas con bajas precipitaciones se observa que se retiene agua en el suelo y se libera de manera lenta, disminuyendo los periodos secos o de bajos caudales.

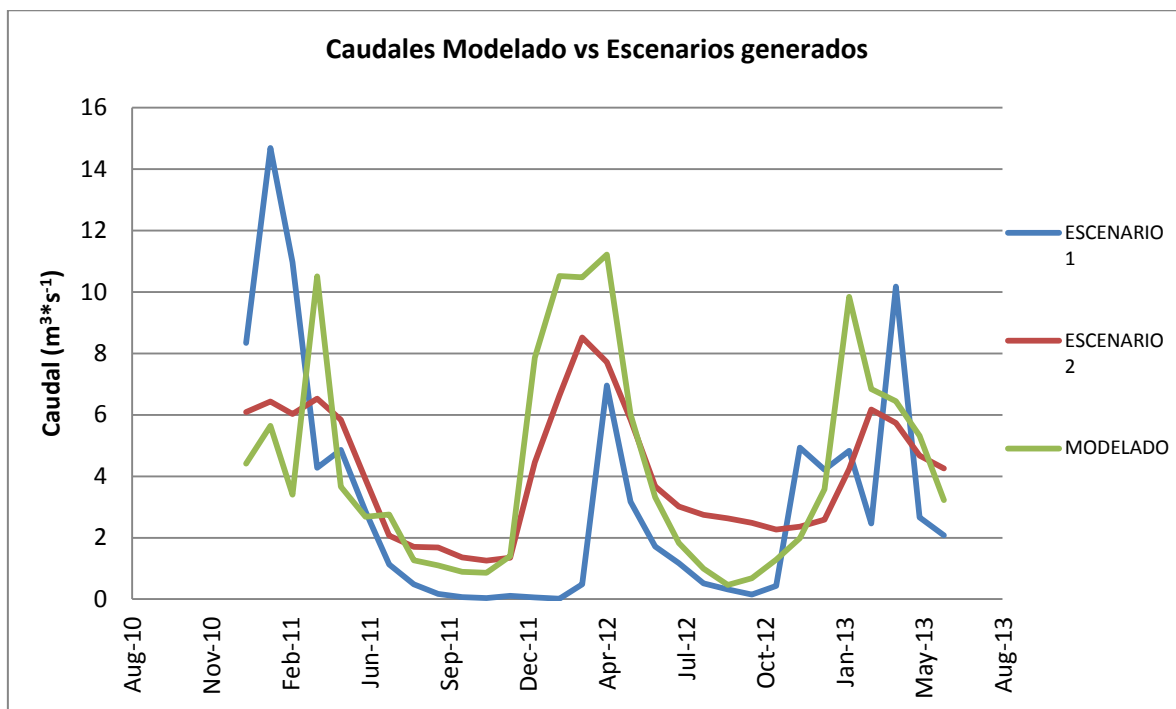


Gráfico 12. Caudales modelados del cambio de uso de la tierra en la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

4.5 SEDIMENTOS

La producción de sedimentos generada por el modelo hidrológico para la microcuenca del río Del Alumbre permite estimar el arrastre de sólidos totales por medio de mecanismos hídricos.

En el Gráfico 13, se muestra la producción de sedimentos, los mismos que no pudieron ser calibrados debido a que no existe información real de sedimentos en la microcuenca. Sin embargo, conociendo que éstos dependen de los caudales es posible afirmar que los datos simulados serán confiables considerando que los caudales del modelo han sido calibrados adecuadamente.

En la suma total de producción de sedimentos con el uso actual el modelo determinó aproximadamente una producción de sedimentos de 1670.60 (t/km²/año), con el modelamiento del primer escenario en el cual el suelo está sin cobertura vegetal se obtuvo una producción de sedimentos de 1708,03 (t/km²/año). Según (Corrales, 2002) “Los pastizales cultivados y la vegetación arbustiva en la que se incluye el bosque natural son el tipo de uso de suelo que evitan en gran manera la pérdida de suelo por erosión hídrica, porque cubren la mayor superficie de

suelo y las partes de suelo desnudo o descubierto son muy pocas, la vegetación arbustiva y el páramo funciona como el almacén de agua para las partes bajas de las cuencas hidrográficas, el tipo de vegetación que se encuentra ahí tiene esa función. Los pastizales cultivados ingresan como áreas poco erosionadas porque se emplean para su producción medidas de conservación como zanjas de infiltración y se las práctica en pendientes menores al 20%”.

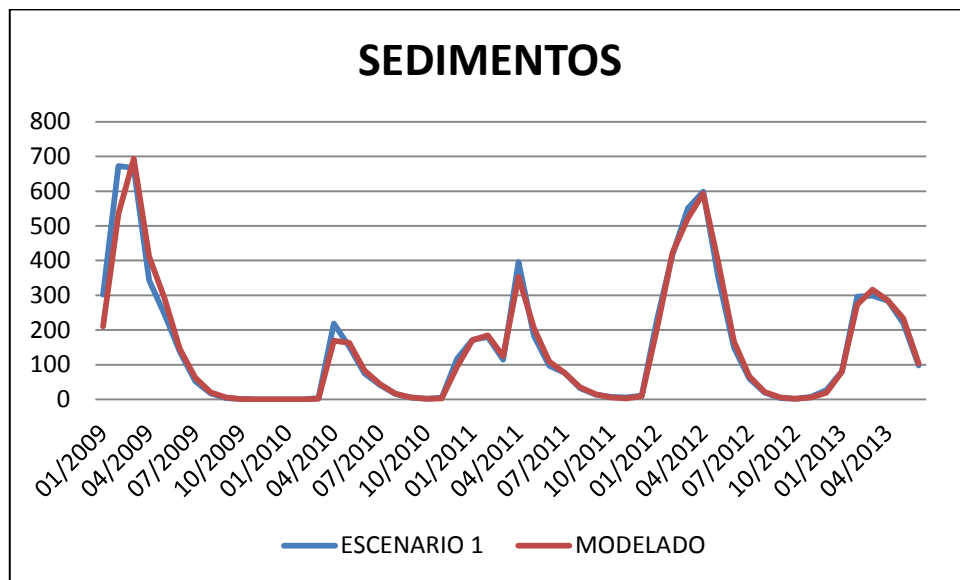


Gráfico 13. Producción de sedimentos en (t) del actual uso de la tierra y del escenario generado para la microcuenca del río Del Alumbre. Bolívar - Ecuador 2014.

Elaborado: Villacrés, C., 2014.

5. CONCLUSIONES

Se logró correr el modelo hidrológico SWAT en las condiciones existentes en la microcuenca del río Del Alumbre, durante el periodo de investigación SWAT permitió obtener caudales y sedimentos simulados, los valores de caudales simulados se compararon con los valores de caudales observados de la estación hidrométrica Pacay (EC12), que es la desembocadura de la microcuenca. La utilización de sensores barométricos junto con las campañas de aforo permitieron calibrar de forma exitosa las estaciones hidrométricas instaladas para llevar la presente investigación, pues todas ellas poseen una correlación de $r^2 = 0.9013$, que indica un valor muy aceptable para investigaciones hídricas.

Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros que influyen en el resultado del modelamiento, lo que nos permitió calibrar el modelo ajustando así los valores de caudales observados y calculados, las pruebas estadísticas establecen que existe una correlación lineal ($r^2 = 0.733$), considerada como buena y aceptable, además se realizó la prueba estadística de Nash-Sutcliffe con un valor de 0.7159, un valor muy cercano a 1.0, lo que representa un valor aceptable para investigaciones hidrológicas según (Noriasi et al, 2007)

Con los datos calibrados para la microcuenca del río Del Alumbre se generaron posibles escenarios de uso de la tierra, lo que nos permitió analizar los efectos sobre el caudal y generación de sedimentos. Se estableció que con el escenario generado, suelo descubierto, las condiciones son adversas para la microcuenca, ya que el caudal que llega a los drenajes naturales disminuyen pero la pérdida de suelo es mayor.

6. RECOMENDACIONES

Desarrollar investigaciones locales que permitan establecer índices y factores obtenidos in situ y no tener que ajustar los mismos desde literatura desarrollada bajo otras condiciones por investigaciones realizadas en otros países.

Que las autoridades de turno pongan en consideración el fortalecer la red de estaciones hidrométricas y meteorológicas en el país con información de libre acceso, ya que son importantes para hacer investigación de este tipo.

La modelación hidrológica puede convertirse en una herramienta que puede aportar en el manejo y planificación de Cuencas Hidrográficas. Esta información generada debe ser interpretada correctamente de manera que los investigadores tomen decisiones para el manejo adecuado de las variables que influyen en el recurso hídrico.

Continuar con el monitoreo de esta microcuenca, ya que cuatro años representa un tiempo importante para una caracterización básica de la microcuenca es poco tiempo para definir la serie hidrológica, pues se requiere establecer comportamientos del caudal a lo largo del tiempo y definir con certeza variaciones como el periodo de retorno.

7. RESUMEN

El sistema de monitoreo hídrico y meteorológico fue establecido en el año 2008 en la microcuenca del río Del Alumbre, ubicada en el cantón Chillanes de la provincia de Bolívar, en Ecuador. Para el monitoreo climático, se seleccionaron 2 lugares representativos de los microclimas de la microcuenca, de forma que sea posible la caracterización climatológica del área en estudio, las estaciones son automáticas y registran valores de los principales parámetros atmosféricos, los valores de precipitación media anual durante este periodo es de 1133.96 mm, la Temperatura promedio es de 13.55 °C.

El monitoreo hídrico de la microcuenca se realizó mediante la utilización de sensores de presión, los mismos que requieren de calibración, esta se obtuvo con los datos de aforos realizados en los drenajes donde se encuentran los sensores. Los aforos se realizan utilizando tres métodos: velocidad y sección transversal, flotador y sección transversal y dilución de sal. Adicionalmente colaboraron habitantes de la zona, con la observación diaria del nivel del agua en el río, mediante reglas que señalan la altura del agua. El caudal promedio mensual es de $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

La calibración de las estaciones barométricas con las campañas de aforo fueron exitosas obteniendo una correlación r^2 de 0.9013. De los datos de las estaciones meteorológicas y con la ayuda del modelo hidrológico Soil and Water Assessment Tool (SWAT) se obtuvieron como resultado modelamientos, con una correlación r^2 de 0.733 en la generación de caudales, considerada buena en estudios hidrológicos, lo cual indica que la calibración y ajuste del modelo es adecuado para la zona. Esto nos permite generar posibles escenarios y con los análisis de los resultados establecer prácticas de manejo de uso y conservación de la microcuenca en favor de la gestión y aprovechamiento de los recursos suelo y agua.

8. ABSTRACT

The system of water and weather monitoring was established in 2008 in the micro-basin of the del Alumbre river, located in the canton Chillanes, belonging to the Bolivar province in Ecuador. For the climate monitoring, two representative places of the microclimates of the micro-basin, so that possible climatologically characterization of the study area were selected. Stations are automatic and recorded values of key atmospheric parameters. The annual average value of precipitation during this period is 1133.96 mm, the average air temperature was 13.55 ° C.

The micro-basin water monitoring was performed using pressure sensors, which required calibration, this value was obtained from tariffs performed in the drainage where the sensors. The tariffs were established using three methods: velocity and cross section, cross section float and salt diluting method. Additionally they helped locals with daily observation of the water level in the river, using rules that indicate the water level. The average monthly flow is $0.65 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

The calibration of the barometric stations tariffs campaigns were successful, obtaining a correlation r^2 0.9013. By the results obtained from weather stations and using the hydrological model Soil and Water Assessment Tool (SWAT) were obtained modeling result, with r^2 correlation of 0.733 in generating flows, considered as a good result in hydrologic studies, indicating that calibration and adjustment of the model it is suitable for the study area. Our findings allow generate several new studies and to establish management practices, use and conservation of the micro-watershed, seeking to promote the use of soil and water resources.

9. REFERENCIAS

- Arnold, J., Williams, J. y Maidment, D. (1995). *Continuous-time water and sediments- routing model for large basins*. USA: Journal of Hydraulic Engineering, 121(2), pp. 171-183
- Baker, M., Benavides-Solorio, J. y Talavera-Zuñiga, E. 1995. *Relationship between precipitation and streamflow on El Carrizal watershed, Tapalpa, Jalisco*. Colorado, USA: Partnerships for sustainable forest ecosystem management.
- Baldissera, G., (2005). *Aplicación del modelo de simulación hidrológica SWAT (Soil and Water Assessment Tool), para la cuenca hidrográfica del río Cuiabá*. Trabajo de grado presentado como requerimiento parcial para obtener el título de Doctor en Hidrología, Cuiabá, Brasil: Universidad de Cuiabá, Facultad de Ciencias Hidrológicas.
- Barbedo, D., (2008). *Modelo sistémico para el manejo con SIG de indicadores de calidad de vida*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título en Doctor. La Plata, Argentina: Universidad Nacional de La Plata. Facultad de Informática.
- Barredo, C.J. & Gómez, D.M. (2006). *Sistemas de información geográfica y evaluación multicriterio en la ordenación del territorio. (2ª Edición)*. México D.F., México: Editorial Alfaomega-Ra.
- Barrera, V., Cárdenas, F. y Monar, C. (2005). *Diagnóstico Participativo con enfoque de género para la subcuenca hidrográfica del río Chimbo*. Guaranda, Ecuador.
- Barrera, V., Alwang, J. y CRUZ, E. (2008). *Manejo integrado de los recursos naturales para agricultura de pequeña escala en al subcuenca del río Chimbo-Ecuador: aprendizajes y enseñanzas*. Quito, Ecuador: INIAP. Boletín Divulgativo No. 339
- Behrends, F., Chagas, C., Vásquez, G., Palacin, A., Santanatoglia, O. y Castiglioni, M. (Enero – junio de 2011) *Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa ondulada*. La Plata, Argentina: Ciencia del Suelo
- Beven K.J. (2005). *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer*. Chichester: John Wiley and sons.
- Brooks, K.N., Folliot, P.F., Gregersen, H.M. y Easter, K.W. (1991). *Watershed management and upland conservation: Policy framework for sustainable development*. St. Paul, USA: College of Natural Resources, University of Minnesota.
- Calvo, M. (1992). *Sistemas de información geográfica digitales: sistemas geomáticos*. Barcelona, España: Instituto Vasco de Administración Pública.
- Cañadas, L. (1985). *El Mapa Bioclimático y Ecológico del Ecuador*. Quito, Ecuador: MAG
- Carmona, A. y Monsalve, J. (1999). *Sistemas De Información Geográfica*. Disponible en URL: <http://www.monografías.com/trabajos/gis/gis/.shtml>. [consulta: noviembre 20 del 2013]
- Carneiro, C., Jan, V., Cassaza, J. y URDANETA. (2008). *Gestión Integrada de las cuencas hidrográficas como parte de la mitigación de los cambios climáticos*. Comité editorial de la revista electrónica redlach. disponible en URL:

<http://faorlc.cgnet.com/es/tecnica/redlach/boletines/cuencgestion.pdf>. [consulta: 24 de octubre de 2013]

Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza CATIE. (2005). *Fundamentos sobre comités de cuencas*. Curso corto dirigido a los Comités de Cuencas en las subcuencas. Turrialba, Costa Rica. Autor.

Chang, K. (2007). *Introduction To Geographic Information System*. (4ª Edición). McGraw Hill.

Chung, W.H., Wang, I.T., Wang, R.Y. (December 2010). *Theory-based SCS-CN method and its applications*. Journal of Hydrologic Engineering, 15(12). pp. 1045-1058

Cuello, E.M. (2003). *Estimación de la Producción y Transporte de Sedimentos en la Cuenca Alta del Río Yaque del Norte y del Río Guanajuma*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de Magister Scientiae. República Dominicana: Centro Agrónomo Tropical de Investigación y Enseñanza.

Custodio, E., Llamas, M.R. y Samper, J. (1997). *La evaluación de la recarga a los acuíferos en la planificación hidrológica*. Madrid, España: Instituto Tecnológico Geominero de España.

Cruz, E., Chela, E., Monar, C., Valverde, F. y Cartagena, Y. (2010). *Evaluación de la pérdida productiva y económica por la erosión hídrica en tres sistemas de producción en la cuenca del río Alumbre, provincia Bolívar, Ecuador*. Santo Domingo, Ecuador: Artículo presentado en el XII Congreso Ecuatoriano de la Ciencia del Suelo.

Dardón, J.J., Morales, C.P. (2002). *La cuenca hidrográfica y su importancia para la gestión regional del desarrollo sustentable del altiplano occidental de Guatemala*. Quetzaltenango, Guatemala: s.n.

Di Luzio, M., Srinivasan, R., Arnold, J.G., Y Neitsch, S.L. (2002). *Soil and Water Assessment Tool, User's Guide*. Texas, USA: U.S. Department of Agriculture, Agricultural Research Service.

Espinosa, P. (1993). *Caracterización por erosión de las cuencas hidrográficas de la sierra ecuatoriana*. Primera edición. Quito, Ecuador: s.n.

Freire, V.F., Silva, T.D., Tovar, P.G. (2011). *Manejo de Cuencas Hidrográficas: Usuarios del Agua de la Cuenca del río Valdivia – California*. Tesina de Seminario. Guayaquil, Ecuador: Escuela Superior Politécnica del Litoral. Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción.

Galván, G.L. (2011). *Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas*. Trabajo de grado presentado como requerimiento parcial para obtener el título de Doctor. Huelva, México: Universidad de Huelva.

Global Water Partnership (2000). *Manejo Integrado de Recursos Hídricos*. Santiago de Chile, Chile: Autor.

Hernández, A. (2003). *Dinámica del uso de la tierra y de la oferta hídrica en la cuenca del Río Guacerinque, Tegucigalpa, Honduras*. Trabajo de grado presentado como requerimiento parcial para obtener el título de Magister Scientiae. Turrialba, Costa Rica: Centro Agrónomo Tropical de Investigación y Enseñanza.

Heywood, I., Cornelius, S. y Carver, S. (2006). *An Introduction To Geographical Information Systems*. (3° Edición). USA: Prentice Hall.

García, J.M. & Martínez, J.P. (1982/2006). *Conservación de suelos*. Barcelona, España: Editorial Reverté.

Huttel, C., Zebrowski, C. y Gondard P., (1999). *Paisajes Agrarios Del Ecuador. Geografía Básica del Ecuador*. Quito, Ecuador: Geografía Agraria. 2(5), pp. 150-240

Instituto Nacional de Ecología. (2004). *El establecimiento de Geoparques en México: un análisis geográfico para la conservación de la naturaleza en el contexto de manejo de cuencas hídricas*. México D.F., México: Autor.

Instituto Nacional de Ecología. (2004). *Documento electrónico sobre conceptos y definiciones*. Disponible en URL: <http://www.ine.gob.mx/dgoece/cuencas/conceptos.html>. [consulta 15 de octubre de 2014]

Jiménez, F. (2005). *Gestión integral de cuencas hidrográficas. Enfoques y estrategias actuales*. Turrialba, Costa Rica: CATIE Recursos, Ciencia y decisión. 2, pp. 15.

Linsley, R.K., Kohler, M.A. y Paulhus, J.L. (1986). *Hidrología para ingenieros*. Bogotá, Colombia: Universidad de los Angeles, 2, pp. 37.

López, V.M. (2006). *Sustentabilidad y Desarrollo Sustentable*. México, D. F, México: IPN

Maidment, D.R. (1993). *GIS and hydrological modeling*. In Goodchild. *Environmental modeling with GIS*. New York, USA: Oxford University Press. pp. 147-167.

Ministerio Agropecuario y Forestal MAG-FOR. (2000). *Manejo integrado de cuencas hidrográficas de la región de Las Segovias*. Managua, Nicaragua: Dirección de Estudios Territoriales.

Marbello, R. (2008). *Hidrometría y Aforo de Corrientes Naturales*. Bogotá, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Departamento de Ingeniería Civil.

Merz, J. & Doppmann, G. (2006).- *Medición de caudal de agua en zonas montañosas. Una guía práctica utilizando el método de dilución de sal*. Bern, USA: PARDYP/ICIMOD and Hydrology Group, University of Bern.

Mishra, S.K., Pandey, R.P., Jain, M.K. y Singh, V.P. (2008). *A rain duration and modified AMC-dependent SCS-CN procedure for long duration rainfall-runoff events*. *Water Resources Management*, 22(7). pp. 861-876.

Moldes, F J. (1995). *Tecnología de los sistemas de información geográfica*. Madrid, España: Ed. RA-MA.

Monar, C. (2007). *Informe anual*. UVTT/C. Guaranda, Ecuador: INIAP.

Moriasi, D.N., Arnold, J.G., Van Liew, M.W., Bingner, R.L., Harmel, R.D., Veith, T.L. (2007). *Model evaluation guideleines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. *Transactions of the ASABE*, 50(3), pp. 121-189

Neitsch, S. L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, Texas, USA: Version 2000.

Neitsch, S. L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2001). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Texas, USA: Version 2000.

Neitsch, S. L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R. (2005). *Soil and Water Assessment Tool. Theoretical documentation*. Version 2005. Texas, USA: Texas Water Resources Institute. pp. 191- 193

Office de la Recherche Scientifique et technique outre mer. (1978). - Mapa de suelos por Regionalización Ecuador, Edición preliminar. Martinique, Francia: Autor.

Overton, D.E. (1966). *Muskingum flood routing of upland streamflow*. Journal of Hydrology, 4, pp. 185-200.

Porras, S.J. (2009). *Desarrollo Sustentable y Políticas Ambientales en México: Un Análisis del Aire y el Agua*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de Doctor. México D. F, México: Instituto Politécnico Nacional. Escuela Superior de Economía.

Portilla, R. (1994). *Simulación hidrológica y de erosión de suelos utilizando el modelo distribuido ANSWERS: Aplicación en la cuenca del Río Pejibaye, Cartago, Costa Rica*. Trabajo de grado presentado como requisito parcial para obtener el título de Magister Scientiae. Turrialba, Costa Rica: Centro Agrónomo Tropical de Investigación y Enseñanza.

Ramakrishna, B. (1997). *Estrategias de extensión para el manejo integrado de cuencas hidrográficas: Conceptos y experiencias*. Ediciones Illustrated.

Raper, J., Livingstone, D. (1995). *Development of a geomorphological spatial model using object-orientated design*. International Journal of Geographical Information System, 9(4), 359-383

Reyes, W. (2004). *Manejo de cuencas hidrográficas*, (Archivo pdf), Catacamas, Honduras

Romero, C.C. y Stroosnijder, L. (2002). *A multiscale approach for erosion impact assessment for ecoregional research in the Andes*. Lima, Peru: Proceedings SAAD-III.

SEMARNAT. (2006). *Protección, restauración y conservación de suelos forestales*. México D.F., México: Manual de obras y prácticas. CONAFOR.

Secretaría de la Convención Ramsar, (2004). *Manuales Ramsar para el uso racional de los humedales*. Gland, Suiza: Secretaría de la Convención de Ramsar.

Tayupanta, J. (1993). *La erosión hídrica: procesos, factores y formas*. Quito, Ecuador.: INIAP. Boletín Divulgativo No. 229. pp. 12.

Tayupanta, J. Y Córdova, J. (1990). *Algunas alternativas agronómicas y mecánicas para evitar la pérdida de suelo*. Quito, Ecuador: Estación Experimental Santa Catalina, INIAP. Publicación miscelánea 54 pp.40.

Uribe N., Quintero M. (2011). *Aplicación del modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la cuenca del río Cañete (SWAT)*. Cali, Colombia. s.n.

Williams, J.R., (1969). *Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients*. Transactions of ASAE, 12(1), 100-103

Williams, J.R. & Hann, R.W. (1973). *HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models*. Water Resources Research, 8(1), 79-85

Winckell, A., Zebrowski, C. y Sourdat, M, (1997). *Los Paisajes Naturales del Ecuador*. Quito Ecuador: Centro Ecuatoriano de Investigación Geográfica. Geografía de la Población 1(2), pp. 11-59

Wickenkamp, V., Duttmann, R. y Mosimann, T. (2000). *A multiscale approach to predicting soil erosion on cropland using empirical and physically based soil erosion models in a geographic information system*. Berlin, Germany: s.n.

Zuri, O.W. (2004). *Manual de planificación y gestión participativa de cuencas y micro cuencas*. Roma, Italia: FAO.

10. ANEXOS

ANEXO 1. Instalación del Levellogger

Existen muchas opciones para la instalación del Levellogger, pero esencialmente los métodos de instalación se pueden clasificar en dos grandes categorías:

1. Instalaciones en las cuales el Levellogger se suspende con un alambre de acero o un Cable para Lectura Directa desde la cabeza del pozo.
2. Instalaciones fijas en las cuales el Levellogger se fija en un lugar, ya sea con un acople de compresión, sujetado con abrazaderas o con cinta metálica.

Debemos mencionar varios puntos generales relacionados a la forma como debe instalarse el Levellogger. Se recomienda la instalación en sentido vertical. Sin embargo, una instalación inclinada u horizontal es aceptable. El sensor de nivel del Levellogger se encuentra situado justo encima de la línea maquinada que queda arriba de los orificios de acceso en la parte inferior del instrumento. El transductor de presión está orientado en un plano normal al eje longitudinal del cuerpo y detecta la presión que se ejerce dirigida a lo largo del plano longitudinal del eje (Figura 10.1).

En sentido vertical, el sensor detecta la presión por encima de la línea del sensor, mientras que en instalaciones no verticales, el punto de presión cero es proporcional al ángulo de inclinación. Debe ejercerse cuidado de no golpear el instrumento contra una superficie dura. También debe ejercerse cuidado de no sobre presurizar el instrumento más allá del 150% del rango de presión. El Levellogger está garantizado para trabajar a presiones hasta del 150% del rango de presión.

Otras consideraciones de importancia que deben tenerse en cuenta cuando se va a instalar el Levellogger en sitios donde pueden existir ambientes presurizados o presurizados intermitentemente, tales como recipientes presurizados, tuberías presurizadas, condiciones donde el flujo es pulsante, caídas de agua, o instalaciones hidráulicas, son el efecto potencial del 'golpe de martillo' de agua o de vapor (water or steam hammer) y también el 'salto hidráulico' (hydraulic jump). El efecto 'golpe de martillo de agua' (water hammer) es causado por una abrupta alteración de la dirección del fluido y como resultante se crean picos de presión.

El efecto 'golpe de martillo de vapor' (steam hammer) es causado cuando el vapor entra a una tubería fría parcialmente llena con agua. El efecto 'golpe de martillo' tiene el efecto de

potencialmente aumentar la presión hidráulica y posiblemente dejar expuesto el sensor de presión del Levellogger a presiones más allá de su rango.

El 'salto hidráulico' (hydraulic jump), es un fenómeno que ocurre cuando el agua es 'levantada' o 'impulsada' por velocidades causadas por la obstrucción del flujo.

El 'salto hidráulico' causa turbulencia y crea niveles de agua no representativos en la columna de agua. Debe observarse cuidado y evitar la instalación del Levellogger en lugares susceptibles a la ocurrencia de 'salto hidráulico'. (Manual del Usuario del Levellogger)

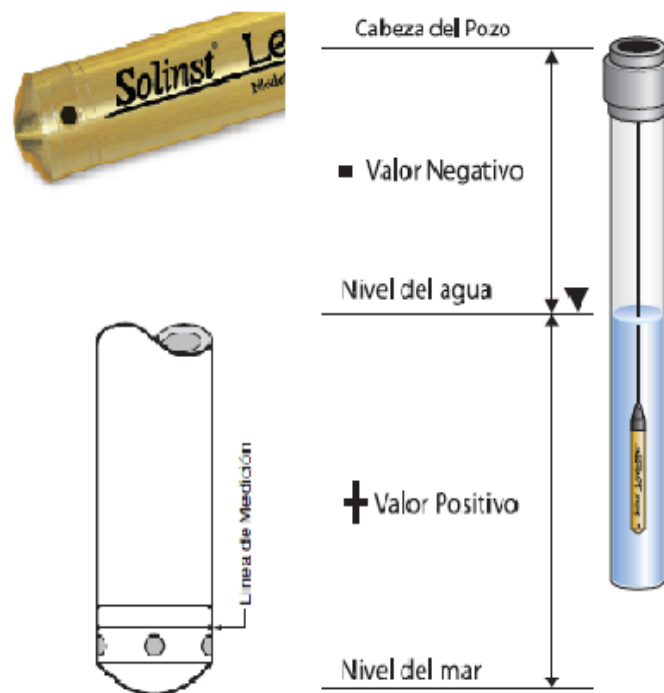


Figura 10. 1 Transductor del Levellogger Línea de medición y Dimensión.

Fuente: (Manual del Usuario del Levellogger).

ANEXO 2. Programación del Levellogger

Luego de iniciar el Software del Levellogger V3.2 o mayor se abre la ventana Levellogger Settings

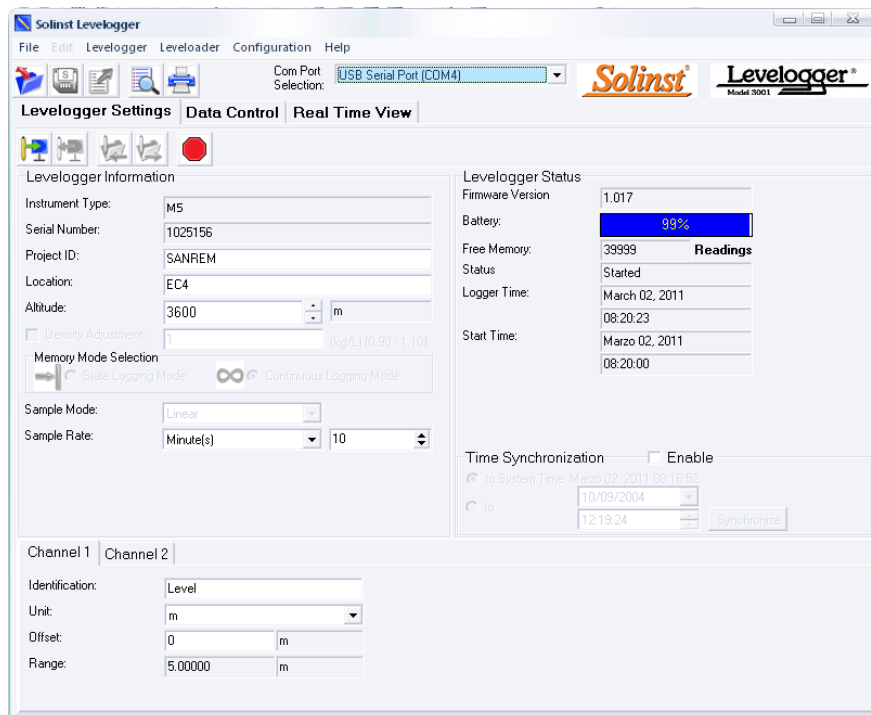


Figura 10. 2.- Ventana Levellogger Settings (Programación).

Clic el botón  para leer la configuración de Levellogger que está conectado.

Información sobre la Programación

La ventana de información de Levellogger Settings incluye los campos de Identificación del Levellogger, Project ID, Locación, Altitude, Density Adjustment, Memory Mode Selection, y otros campos más que a continuación se describen:

- Project ID, le permite identificar su proyecto. Puede ingresar hasta 32 caracteres.
 - Location, le permite ingresar el lugar del monitoreo. Puede ingresar hasta 32 caracteres.
 - Altitude o elevación en metros o pies sobre el nivel del mar del lugar donde se coloque el Levellogger. La presión equivalente de columna de agua disminuye con la elevación a un promedio de 1.2 por cada mil de elevación en la atmósfera inferior hasta una elevación de 5000 m. Esto se puede compensar ingresando un valor bajo el nivel del mar hasta de -300 m y hasta 5000 m sobre el nivel del mar. Las lecturas serán automáticamente compensadas por elevación.
- Density Adjustment (Ajuste de Densidad) se utiliza para ajustar el rango del Levellogger dependiendo en la densidad del fluido que se vaya a monitorear. El rango para ajuste de la

densidad es de 0.9 kg /L a 1.1 kg /L. El rango del Levellogger después del ajuste de densidad se basa en la siguiente fórmula:

$$\text{Rango Actual} \div \text{Densidad} = \text{Rango Corregido}$$

Ej. Para un M5 que monitoreará un líquido salobre
en un estudio sobre intrusión de agua salada

$$5.0 \text{ m} \div 1.02 = 4.90 \text{ m}$$

Deje el cuadro sin marcar de Density Adjustment para no activar esta función.

Sample Mode, permite escoger el tipo de muestreo. Las opciones son muestreo Lineal, Por Evento y Programable. (Manual del Usuario del Levellogger)

- Memory Mode Selection (Selección para el tipo de memoria) no estará disponible si el muestreo no está en Lineal (Linear). Cuando el Levellogger Gold está en muestreo Lineal, se puede escoger que la memoria tome registros continuos (Continuous Logging) o que los registros terminen al llenar la memoria (Slate Mode). En el modo Continuous Logging, el nuevo juego de registros que componen un archivo, comienza al final de cualquier archivo anterior y continuo registrando y eventualmente al llenarse la memoria, comienza a sobrescribir sobre archivos anteriores. Debido a que una de las opciones de descarga de información es 'Append Data', el Continuous Logging puede ser una de las formas preferidas de muestreo cuando se hace monitoreo a largo plazo. En la forma Slate Mode Logging, el nuevo archivo también empieza cuando termina el anterior, pero la sesión terminara al completarse 40,000 lecturas porque el Levellogger se detiene y no sobrescribirá sobre los registros anteriores. (Manual del Usuario del Levellogger)
- Linear (Lineal) se refiere a un intervalo de tiempo entre cada lectura. El intervalo se puede fijar e 0,5 segundos hasta 99 horas. La unidad de tiempo y el número de intervalos entre cada uno se fijan en Sample Mode. El Levellogger Gold y el Barologger Gold pueden acumular hasta 40,000 registros de nivel y temperatura con su fecha y hora. EL LTC Levellogger Gold puede acumular hasta 28,000 lecturas de nivel, temperatura y conductividad con su fecha y hora.
- Event-based Sample Collection (Muestreo Por Evento) es la manera más eficiente de tomar de registros para ahorro de memoria del instrumento, debido a que el Levellogger solamente se activara en cada intervalo fijado y verificara si la lectura ha variado con relación a la última lectura, de acuerdo al porcentaje de cambio fijado (0.1 – 25% de la Escala Total). Si ha habido cambio, el Levellogger tomara una lectura. Para el Levellogger Gold el parámetro que monitorea el cambio es el nivel. Para el LTC Levellogger, el parámetro que monitorea el cambio es la conductividad en el Muestreo Por Evento.

El Levellogger tomara un registro si ha habido cambio en el porcentaje fijado para el monitoreo. Tome nota que el Porcentaje de Cambio se inserta en el campo que queda al lado de Sampling

Mode y que el umbral de cambio es un porcentaje de la Escala Total del Levellogger para el parámetro escogido. Un punto importante para recordar es que aunque el uso de la memoria es bajo para monitoreo en aguas relativamente estables, el consumo de batería es parcialmente una función de la toma de lecturas y su intervalo. Por consiguiente, un intervalo corto de tiempo consumirá batería a un promedio más alto así sea que se registren o no se registren las lecturas. En modo de Muestreo por Evento, el Levellogger Gold dispone de una memoria para 25,000 lecturas de nivel y temperatura con su fecha y hora.

Schedule Sampling (Muestreo Programado). Seleccione Schedule y clic el botón 'Edit' para abrir la ventana Schedule Setup Window. En esta ventana hay botones para añadir y borrar líneas, actualizar, abrir y salvar archivos de extensión *.sci. El número máximo de líneas de programación que se puede ingresar es de 30, cada una con su propio intervalo de tiempo ya sea en segundos, minutos u horas y duración en segundos, minutos, horas, días o semanas.

En el campo denominado 'Readings Available' se mostrara el número de lecturas disponibles de un total posible de 40,000. Si el número de lecturas seleccionadas excede el total de 40,000, aparecerá un mensaje de error. El muestreo programado le permite al usuario seleccionar un estilo de muestreo logarítmico que se puede adaptar a las necesidades de cada aplicación.

Programación para cada Canal

En la parte inferior de la ventana de 'Levellogger Settings' se encuentran los parámetros para programar cada canal. El Software detectara los canales disponibles de acuerdo al Levellogger que se quiera programar. (Manual del Usuario del Levellogger).

Para el Canal 1: 'Level' (Nivel), se pueden seleccionar los siguientes parámetros:

- Identificación describe el parámetro de medición para el canal el cual ya ha sido configurado como el Canal de 'Nivel'. El canal de Nivel monitorea la presión equivalente en columna de agua. El campo de Identificación será la información que designe para la gráfica cuando se vea o descargue la información. La Identificación está limitada a 32 caracteres.
- Units (Unidades) se refiere a la unidad de medición de la lectura. El usuario puede seleccionar tres unidades de medición: cm, m o pies. Cuando el usuario cambia la unidad de medición, el valor del rango y altitud también cambiaran de acuerdo a la Formula de Conversión de Unidad. Tome nota que cuando se utiliza una unidad métrica, la altitud o elevación se mide en metros. Cuando se utilizan pies, la elevación se mide en pies. (Manual del Usuario del Levellogger)
- Offset (Compensación) se refiere a una corrección que se introduce, como por ejemplo la distancia entre el extremo inferior del Levellogger y la cabeza del pozo o el nivel del agua en un pozo. Se recomienda dejar el Offset en cero (0.00) para tener todas lecturas relativas al extremo inferior del Levellogger donde está localizado el transductor de presión. El rango de compensación para el Levellogger Gold o Barologger Gold está situado entre -1000 m y 5000 m.

- Range (Rango) se refiere a la escala total de fluctuación de la columna de agua para cada modelo. La lectura total de la escala de cualquier Levellogger se basa en el rango métrico. Por consiguiente, los rangos son: M5 – 5 metros, M10 – 10 metros, M20 – 20 metros, M30 – 30 metros, M100 – 100 metros.

Para el Canal 2: Temperatura, se incluyen los siguientes parámetros:

Identificación y unidades, Referencia y Rango

- El Canal de Temperatura ha sido pre configurado por Solinst en °C y no se puede modificar.

Levellogger Status (Estado del Levellogger)

Al lado derecho en la ventana de Levellogger Settings bajo el encabezamiento Levellogger Status, se puede observar la Versión de Firmware que tiene instalado el instrumento. El Levellogger Gold también indica con exactitud el nivel de la batería y numero de lecturas que restan por utilizar. También se puede observar la hora y fecha actual como también hora y fecha inicio del instrumento y de todos los instrumentos que hayan sido sincronizados. (Manual del Usuario del Levellogger)

Programación Horaria

La sección 'Time Synchronization' en la parte derecha de la ventana de Levellogger Settings tiene los controles para manipulación horaria. La programación por defecto es que el campo 'Enable' esta sin chequear. Si desea sincronizar el reloj del Levellogger active el campo 'Enable' y luego clic en el botón 'Synchronize' para sincronizar el reloj del Levellogger con el reloj del PC o laptop. Si usted inicia el Levellogger sin sincronizarlo y la diferencia entre los relojes del PC y el Levellogger es mas de 3 segundos, el Software le dará un mensaje que dice: 'Do you want to synchronize the clock?'. Clic 'Yes' para sincronizar. Resulta muy útil sincronizar los relojes de todos los Levellogger y Barologger antes de desplazarlos a campo o sitio donde trabajaran. (Manual del Usuario del Levellogger)

Configuración del Levellogger

En este punto usted ha completado la edición de la configuración y programación del instrumento; entonces haga clic en el icono  para enviar la configuración al instrumento y el Levellogger guardara la nueva configuración. Ahora se puede proceder a dar inicio al instrumento. (Manual del Usuario del Levellogger)

Inicio y Parada del Levellogger

Para iniciar el Levellogger clic el botón . Primero se abrirá una ventana de advertencia que dice: 'All data in the Levellogger will be erased. Continue?' (Toda la información en el Levellogger se borrara, continuar?). Normalmente, se dice que si (a no ser que no se haya salvado la

información). La segunda ventana de advertencia dice: 'Do you want to synchronize the logger time with the system time?' Por lo general se dice sí. Luego se abre la ventana de dialogo 'Start Levellogger'

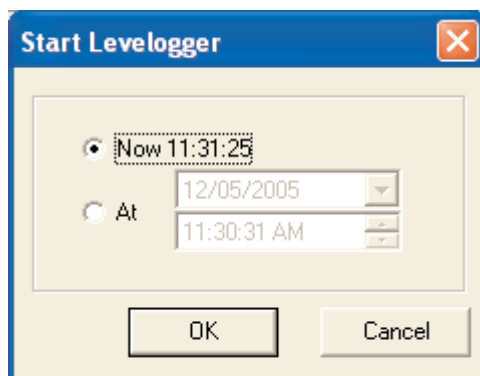
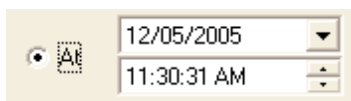


Figura 10. 3. Ventana Start Levellogger.

Fuente: (Manual del Usuario del Levellogger)

Hay dos maneras de iniciar los registros. Escoja 'Now' (ahora) para iniciar de inmediato. El campo de 'Status' mostrara que el Levellogger está tomando registros (Started) y se verá fecha y hora de inicio. El campo 'Free Memory' mostrara el número de registros que quedan en la memoria en el momento de establecer comunicación con el Levellogger. (Manual del Usuario del Levellogger)

Escoja 'At' para iniciar la toma de registros en el futuro e inserte la fecha y hora en la que desea que el Levellogger inicie los registros. (Manual del Usuario del Levellogger)



Confirme con clic en 'OK'. El icono  cambiara a  y el campo 'Status' a lado derecho de la ventana mostrara Future Started. (Manual del Usuario del Levellogger)

El Levellogger se puede detener en cualquier momento antes que llegue al máximo de lecturas. El re-inicio da comienzo a nueva sesión de registros y borra todos los registros anteriores. Es de anotar que las unidades LT y LTC Gold toman registros en 'Slate Mode', lo que quiere decir que ellas tomaran registros hasta que sean detenida o la memoria está copada. Cuando la memoria está copada, el Levellogger no tomara más registros y se detiene.

Por esta razón es importante determinar, basándose en el tiempo de inicio e intervalo de muestreo, la fecha y hora en que se cope la memoria y unidad se detenga. Los Levellogger Gold toman registros en 'Slate Mode' para muestreo Por Evento o muestreo Programado. (Manual del Usuario del Levellogger)

Para muestreo 'Linear' o Lineal, el Levellogger Gold se puede configurar para que tome registros en 'Slate Mode' o 'Continuous Logging'. Usted puede detener la toma de registros en la ventana

'Levellogger Settings' haciendo clic en el icono



ANEXO 3. Compensación de información



Clic el icono 'Data Compensation' para abrir el Compensador Automático de Presión Barométrica. El Compensador se puede apreciar en la (Figura 10.4).

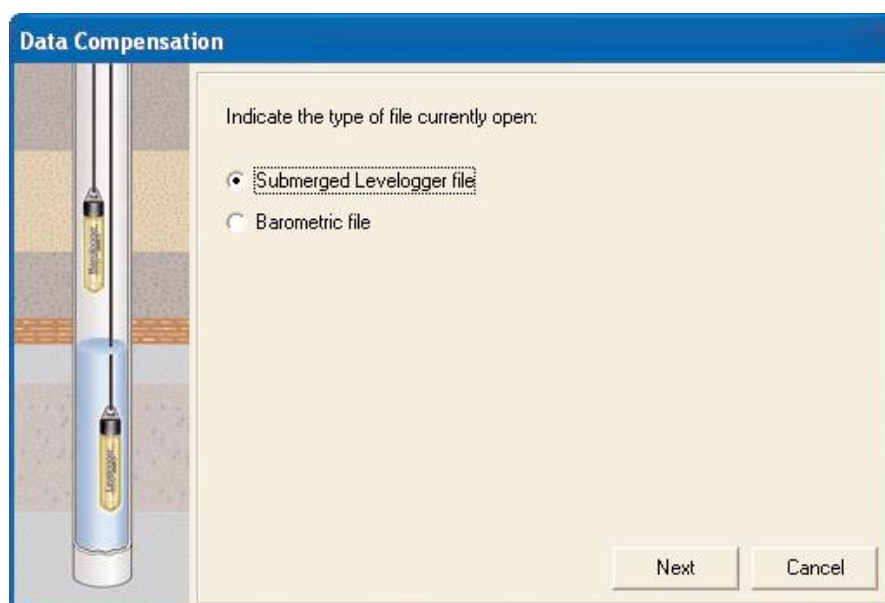


Figura 10. 4 Compensador Automático de Presión Barométrica.

Fuente: (Manual del Usuario del Levellogger).

En la primera ventana del Compensador, el usuario debe identificar cual es el archivo que tiene abierto. (Manual del Usuario del Levellogger)

Hay dos clases de archivo: archivos Barométricos (información que se toma de un Barologger) y el archivo 'Submerged Levellogger File' (archivos de Levellogger).

Una vez seleccionado el archivo, clic 'Next' y se abrirá la ventana de 'Data Compensation Selection'. Ver (Figura 10.5).

Hay cuatro opciones disponibles para efectuar la compensación: 'Barometric Compensation', 'Manual Data Adjustment', 'Density Adjustment', y 'Barometric Efficiency'.

Compensación Barométrica (Barometric Compensation) requiere el archivo barométrico y el archivo del Levellogger y simplemente el Software resta la lectura barométrica de la lectura del Levellogger. Si existe una inconsistencia horaria entre los dos archivos, el Software hará una aproximación lineal en el archivo barométrico. (Manual del Usuario del Levellogger)

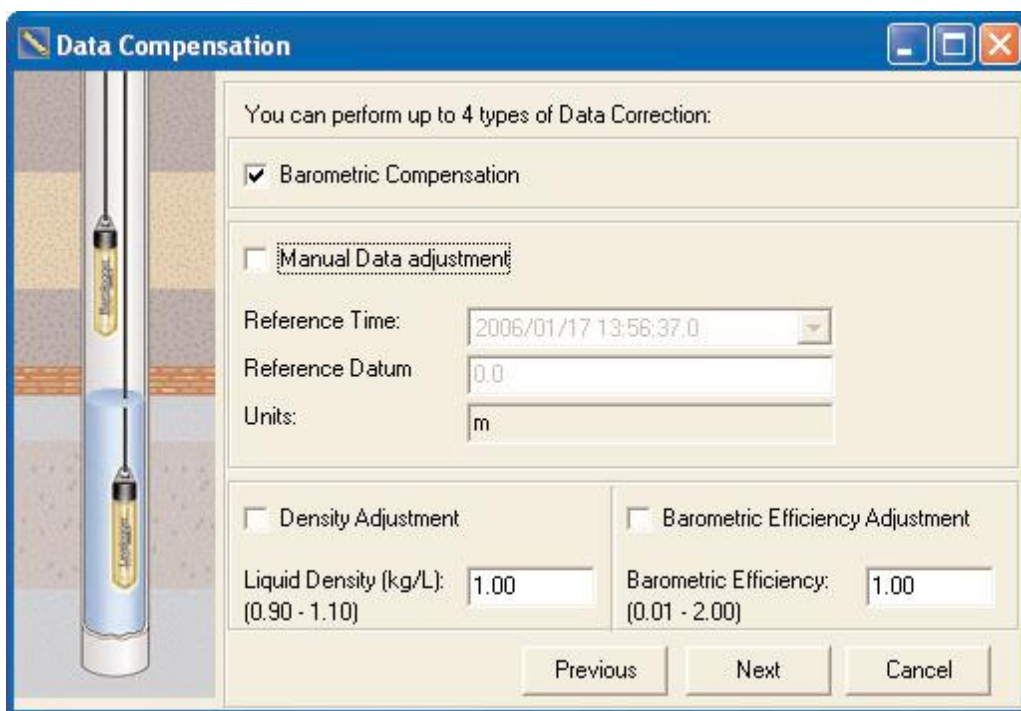


Figura 10. 5 Compensación de Información – Selección del tipo de Compensación.

***Fuente:** (Manual del Usuario del Levellogger).*

Ajuste Manual (Manual Data Adjustment)

Permite al usuario ingresar el valor de la lectura manual inicial como punto de referencia o lectura cero en campo, y a la cual se ajustarían todas las lecturas del Levellogger. Si el punto de referencia se toma por encima del nivel del agua, (por ejemplo la cabeza del pozo), el punto de referencia será negativo. Si el punto de referencia está por debajo del nivel del agua, (por ejemplo el nivel del mar), el punto de referencia será positivo. Se debe tomar nota de la fecha y hora del punto de referencia y esa información se ingresa en los campos de 'Reference Time' y 'Reference Datum'. El Software calcula un factor de corrección basándose en esa información y ajusta todos los registros en el archivo seleccionado después de llevar a cabo las compensaciones barométricas, por densidad y otras compensaciones de la información. (Manual del Usuario del Levellogger)

Ajuste de Densidad (Density Adjustment)

Corrige el rango del canal de nivel en el archivo de registros cuando el usuario hace un ajuste por cambio en la densidad del fluido. La fórmula para efectuar el ajuste está en la sección 3.1. El rango de ajuste de densidad está entre 0.90 y 1.10.

- **Ajuste de Eficiencia Barométrica (Barometric Efficiency Adjustment)** se utiliza para ajustar proporcionalmente las lecturas del Barologger en relación a un Levellogger en particular. La eficiencia barométrica se expresa a menudo como un porcentaje o proporción. El campo para ingreso es una proporción y tiene un valor por defecto de 1.00. Los registros compensados serán salvados en un nuevo archivo *.lev con la palabra <compensated> añadida al prefijo del nombre del archivo. El usuario puede colocar el nombre que desee al archivo pero no debe borrar o modificar la extensión *.lev. (Manual del Usuario del Levellogger)

ANEXO 4. Procedimiento para el aforo de caudales utilizando el método de disolución de sal.

Materiales.-

Para determinar el factor de calibración

- Matraz de medición de 500 ml.
- Pipeta de 1 ml.
- 1 jarra/vaso de 1 litro.
- Solución de sal de 3g de sal en 1000 ml de agua destilada.
- 1 litro de agua destilada.
- 1 conductímetro resistente y a prueba de campo.

Para medir el caudal

- 1 conductímetro resistente y a prueba de campo (preferiblemente dos para determinar la medición del intervalo), con baterías de repuesto
- Balde de 20 litros
- Cronómetro
- Número adecuado de las bolsas de sal (aproximadamente 50/100/500g, peso exacto escrito en la bolsa, de acuerdo a la corriente del río)
- Instrucciones de calibración y medición del caudal (3 hojas laminadas)
- Fichas de datos de entrada (laminada), uno por cada medición
- Bolígrafos/ marcadores indelebles

a) Procedimiento

1. Preparar la sal - Cloruro de sodio (NaCl) se utiliza generalmente porque es fácilmente disponible. Colocar 50, 100, y 500 g de sal en diferentes bolsas de plástico y pesar con una precisión de +/-1%. Marcar el peso en la bolsa con marcador indeleble. (Merz et al., 2006).

2. Preparación de la calibración - Prepare una solución de sal de 3g/l, añadiendo 3g de sal a 1000 ml de agua destilada. Esta solución debe contener el mismo tipo de sal que se inyectan en el torrente. (Merz et al., 2006).

3. Preparar los equipos y materiales - Reúna y prepare todo el equipo y los materiales que se detallaron. El conductímetro debe ser resistente y a prueba de campo. La ficha de datos de entrada debe ser laminada para evitar que se moje. Prepare el mayor número de fichas de datos de entrada como mediciones de caudal se vayan a realizar en el campo. (Merz et al., 2006).

LOS PREPARATIVOS EN EL CAMPO

4. Determinar el factor de calibración - Determine el factor de calibración a través de la medición de la conductividad de diez diferentes diluciones de la sal en el agua del río, tal como se describe a continuación.

Procedimiento de calibración

- 4.1. Preparar una solución de sal con 3g de sal por cada 1000 ml de agua destilada con la misma sal que se inyectara en el curso de agua.
- 4.2. Medir exactamente 500 ml de agua de corriente.
- 4.3. Ponga agua del flujo de en una jarra o vaso de precipitados limpio de 1 litro.
- 4.4. Encienda el conductímetro y poner el sensor en el vaso o jarra.
- 4.5. Medir la conductividad y anotar en la hoja de entrada de datos. Esta es la medición del agua sin sal.
- 4.6. Anadir 1 ml de la solución de sal preparada y mezclar completamente.
- 4.7. Tan pronto como el valor sea constante y no cambie, medir la conductividad y anotar de nuevo en el reverso de la hoja de entrada de datos.
- 4.8. Repita el procedimiento (pasos 4.6 y 4.7) hasta que el volumen de la jarra o vaso de precipitados sea 510 ml.

Una macro - Smacro.xls - está disponible en

<http://www.icimod.org/downloads/macros/smacro.xls>. Este macro se puede utilizar para calcular el factor de forma automática. El factor de calibración es normalmente entre 0,45 y 0,6 y debe determinarse antes de cada medición del caudal.

Apunte valores de la conductividad en el reverso de la hoja de entrada. (Merz et al., 2006).

En los momentos de mayor flujo por lo general no hay tiempo para determinar el factor de calibración porque la ola que necesita ser medida se mueve muy rápidamente a través de la sección de la corriente. En este caso, el último factor determinado o un valor de 0.5, deberá utilizarse.

Después de que el factor de calibración se ha calculado algunas de veces el valor se convierte estable, en cuyo caso solamente controles ocasionales deben ser realizados.

Tenga en cuenta que esto solo es así, si el mismo equipo y el mismo tipo de sal se utilizan durante todo el experimento.

5. Seleccione la longitud de la medición - El paso siguiente es identificar la parte de la corriente a lo largo de la cual el caudal será medido. La longitud del arroyo desde el punto de la inyección hasta el momento en que la sal es completamente mezclada a través del arroyo, se conoce como la longitud de mezcla. Es necesario identificar la longitud de la corriente que sea igual a la longitud de mezcla (como se muestra en la Figura 4) que no tenga corrientes remolinos o efectos de piscinas o estanques; sin extracciones de agua, y no sea influenciado por la vegetación circundante. También debe ser lo más corto posible (igual a la longitud de mezcla). Una simple regla de oro es tomar una longitud de 20-50 veces la anchura media de la corriente, o 100 veces el ancho de la parte más angosta de la corriente. (Merz et al., 2006).

La longitud de mezcla de una corriente varía con el caudal. Será más larga en los momentos de alto flujo, que en épocas de bajo flujo. Para determinar con exactitud la longitud correcta, el científico debe tener un buen conocimiento de las condiciones de flujo incluyendo la velocidad y forma del tramo. Esta condición se debe volver a determinar después de cada medición del caudal, mediante la evaluación de las mediciones y el resultado final. Información de las distancias pintadas sobre rocas en el arroyo o marcas en las orillas del río pueden ayudar en la elección de la adecuada longitud de mezcla y son especialmente útiles durante las eventos de máxima descarga, cuando las mediciones tienen que hacerse con mucha rapidez.

Es posible comprobar que la distancia seleccionada para la medición es por lo menos igual a la longitud de mezcla tomando mediciones de conductividad con dos conductivímetros al mismo tiempo en diferentes lugares del arroyo (Figura 7.6). Los medidores se pueden instalar en diferentes posiciones de la sección transversal si la corriente tiene más de 2 m de ancho (versión 1) o en diferentes posiciones en la misma línea de flujo (versión 2). El valor calculado del caudal en los dos puntos de medición debe ser el mismo, aun si la forma de la curva es diferente. Si los resultados son diferentes entonces la distancia elegida es más corta que la longitud de mezcla. (Merz et al., 2006).

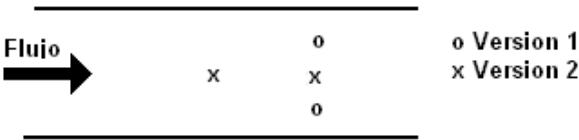


Figura 7. 6 Posición de los conductivímetro para verificar la distancia de mezcla.

Fuente: (Merz et al., 2006).

LA MEDICIÓN DEL CAUDAL

6. Equipo de configuración - Una vez que los preparativos iniciales se han hecho, transporte todos los equipos y materiales al sitio y ubíquelos en un lugar apropiado.

Ubique el punto de medición de conductividad lo más cerca posible al sitio donde el nivel del agua es medido, es decir, en dónde se encuentre la regla para medir el nivel de agua o medidores automáticos (sensores de presión) para garantizar que la misma cantidad de agua se mide. (Merz et al., 2006).

7. La colocación del detector - Coloque el sensor del conductivímetro donde se espera la velocidad flujo más rápida. Esto es, generalmente, al medio de la corriente, pero puede ser en otros lugares dependiendo de la forma de la sección transversal de la corriente. (Merz et al., 2006). Para corrientes anchas, coloque dos sensores, uno en cada borde del río, y compare los resultados finales para asegurarse de que la sal está completamente mezclada con la corriente de agua en la posición elegida. (Merz et al., 2006).

8. Registre la información preliminar - Antes de que la sal sea inyectada, complete la parte superior de la hoja de entrada de datos, anotando la información sobre la estación y la lectura. Cuando el flujo es alto, es suficiente registrar solo sal inyectada, el nivel de agua de la corriente y el nivel de base de conductividad antes de la inyección de la sal. El resto se registra después. (Merz et al., 2006).

9. Inyección de sal - Estimar aproximadamente el caudal. Calcule la cantidad adecuada de sal que se usa en base a la estimación del caudal de acuerdo a la regla de 2-5 kg por m³/s. (Es posible controlar si la cantidad utilizada fue apropiada después de que las mediciones se completan. Disolver la sal plenamente en un balde de agua (ver Fotografía 1), y de inmediato inyectar la mezcla en el torrente por:

- Verter suavemente el contenido aguas arriba en la corriente sin hacer salpicar como se muestra en la (Fotografía 2).
- Después levantando la cubeta con agua desde arriba del punto de inyección y verter su contenido aguas abajo. (Merz et al., 2006).

Es mejor tener a dos personas para hacer las mediciones, aunque es posible hacerlo con una sola persona. Con dos personas, una inyecta la sal, lee el tiempo e indica cuando las medidas tienen que ser tomadas, mientras que la segunda persona toma los valores de conductividad.

Precaución: 1) Para las corrientes de menos de 10 l/s inyectar la solución de sal con cuidado a fin de no crear un aumento repentino en el flujo. 2) En todo momento se debe tener cuidado en

garantizar la seguridad de la persona que toma las mediciones, en particularmente durante condiciones de flujo alto. (Merz et al., 2006).

10. Tomar lecturas - Es fácil de identificar cuando la nube sal llega al sensor ya que los valores de conductividad comienzan a elevarse. Inmediatamente después de que la nube llegue al sensor, anotar la lectura del conductivímetro en la ficha de datos de entrada y el tiempo que ha transcurrido desde que la sal se inyector. Anote la lectura del conductivímetro cada cinco segundos hasta que la conductividad del agua vuelve a su valor base (ver Fotografía 3). A continuación, anote las observaciones sobre la longitud de mezcla, uso de la sal, la calidad de las mediciones, y otras particularidades en la parte inferior de la ficha de datos de entrada. (Merz et al., 2006).

Precaución: 1) No se olvide de registrar el nivel de agua con la regla antes y después de la medición, y registrar el nivel base de la conductividad del agua. 2) En los días de alto flujo, varias mediciones podrán realizarse de forma consecutiva a diferentes niveles de agua, por ejemplo, en el ascenso y/o caída del hidrograma. (Merz et al., 2006).



Fotografía 1. Preparando la concentración de sal. Salida del Lago Tarina II (Butan). (Merz et al., 2006).



Fotografía 2. Primer balde lleno de solución de sal siendo vertido a la corriente, Butan. (Merz et al., 2006).



Fotografía 3. Tomando lecturas de conductividad cada cinco segundos. (Merz et al., 2006).

ANÁLISIS Y EVALUACIÓN

11. Calcular el caudal - Una vez que se han completado las mediciones, se debe calcular la integral del área debajo de la curva del diagrama de tiempo-conductividad. La cantidad de sal inyectada **S**, el factor de calibración **Cal**, la sumatoria de todos los valores de conductividad (**C (t)**), el número de valores de conductividad **N**, el nivel de base de conductividad **C₀**, y el intervalo de medición **T**, son todos los datos necesarios para el trabajo de la medición de la conductividad. El caudal **Q** en litros por segundo se puede determinar a partir de la siguiente ecuación. (Merz et al., 2006).

$$Q = \frac{S}{Cal * [\sum C_{(t)} (N * C_0)] * T} \quad (3)$$

Q puede ser calculado con una calculadora o con un macro en una hoja de cálculo de Excel. El macro simplifica mucho el cálculo.

Este macro - Smacro.xls - está disponible en el sitio Web de la ICIMOD

12. Evaluar las mediciones - Evaluar cada medición cuidadosamente a fin de que:

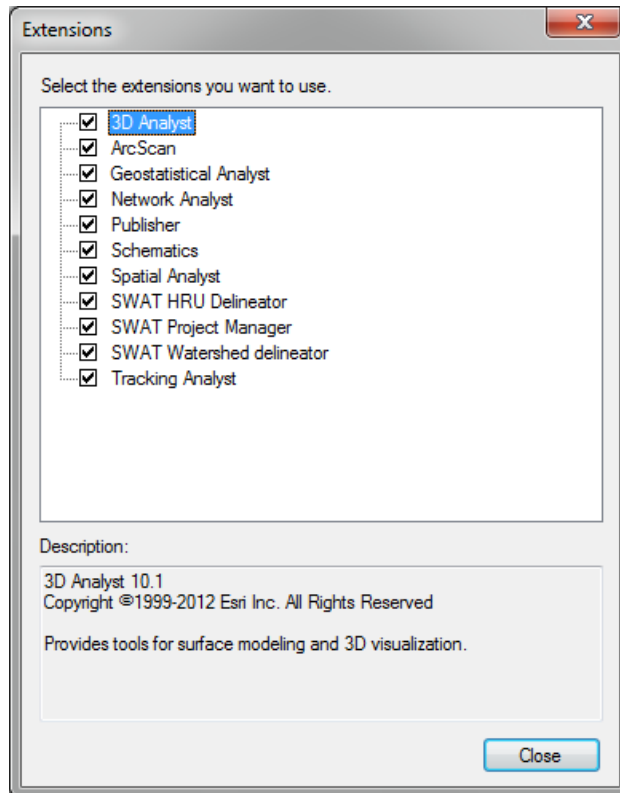
- Futuras mediciones pueden mejorarse, por ejemplo, mediante el ajuste de la cantidad de sal utilizada y/o la distancia adoptada para la medida (la longitud de mezcla).

Es útil registrar observaciones sobre la calidad de los datos. Para calificar las mediciones como buenas para su uso.

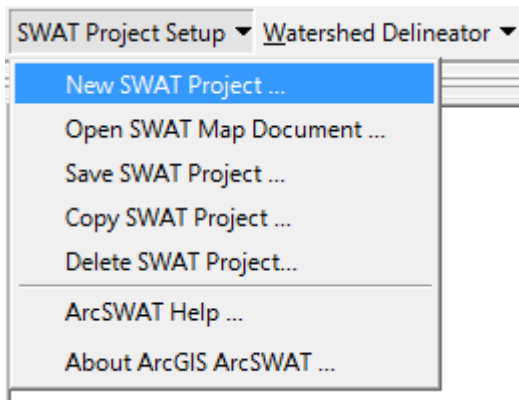
- La diferencia entre el nivel básico y el nivel máximo de conductividad debe ser entre 50 y 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Un menor o mayor rango indica que muy poca o demasiada sal ha sido utilizada;

La medición debe llevarse a cabo durante no más de 15 a 20 minutos. Más tiempo indicaría o bien que hay piscinas u otras características disturbantes o que la distancia elegida es demasiado larga. (Merz et al., 2006).

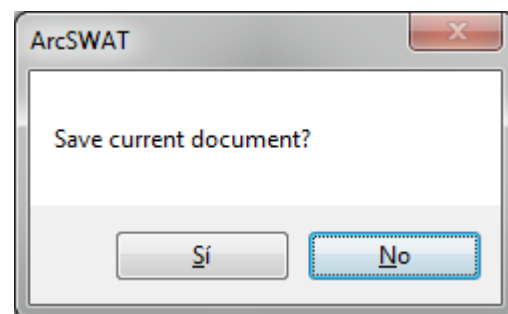
ANEXO 5. Resumen de la rutina de trabajo de interfaz SWAT



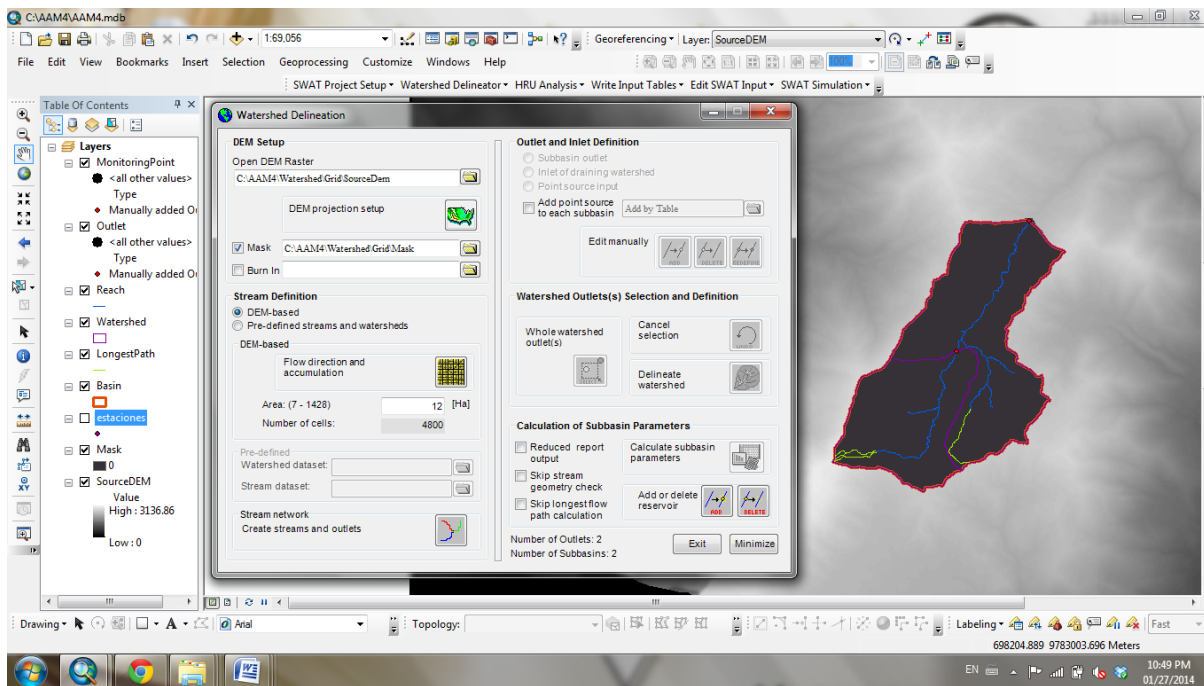
1.- Cargar todas las extensiones de ArcGIS, incluyendo las del modelo SWAT



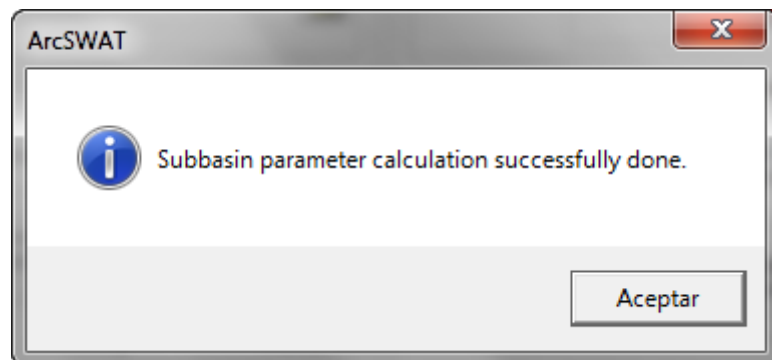
2.- Crear un nuevo proyecto



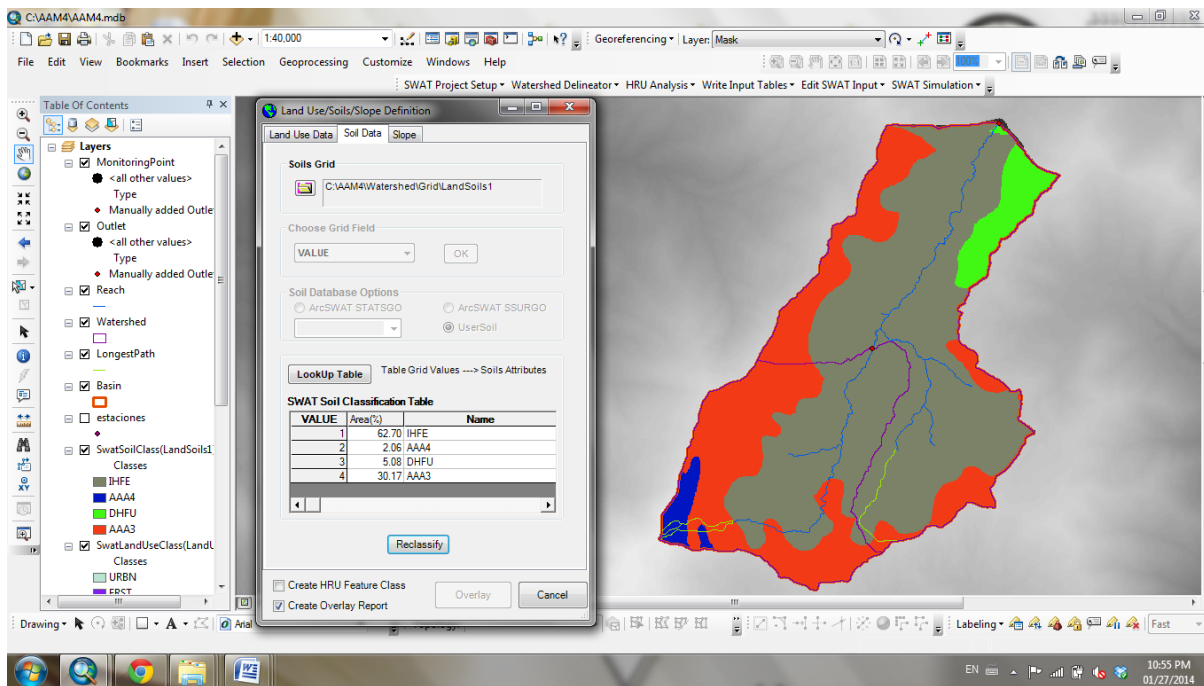
3.- Dar clic en No



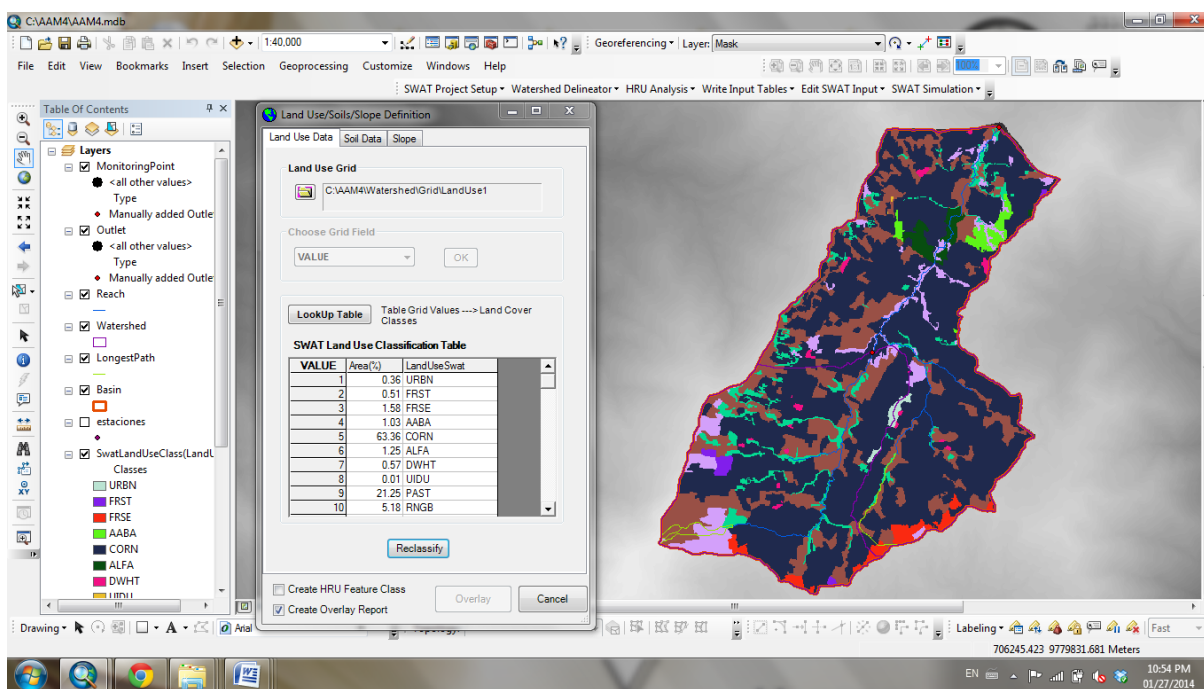
4.- Watershed Delineator (En esta fase se cargan los siguientes archivos: DEM, MASK, subbasins y stream de acuerdo a las necesidades del usuario, stream se lo puede calcular a partir del DEM)



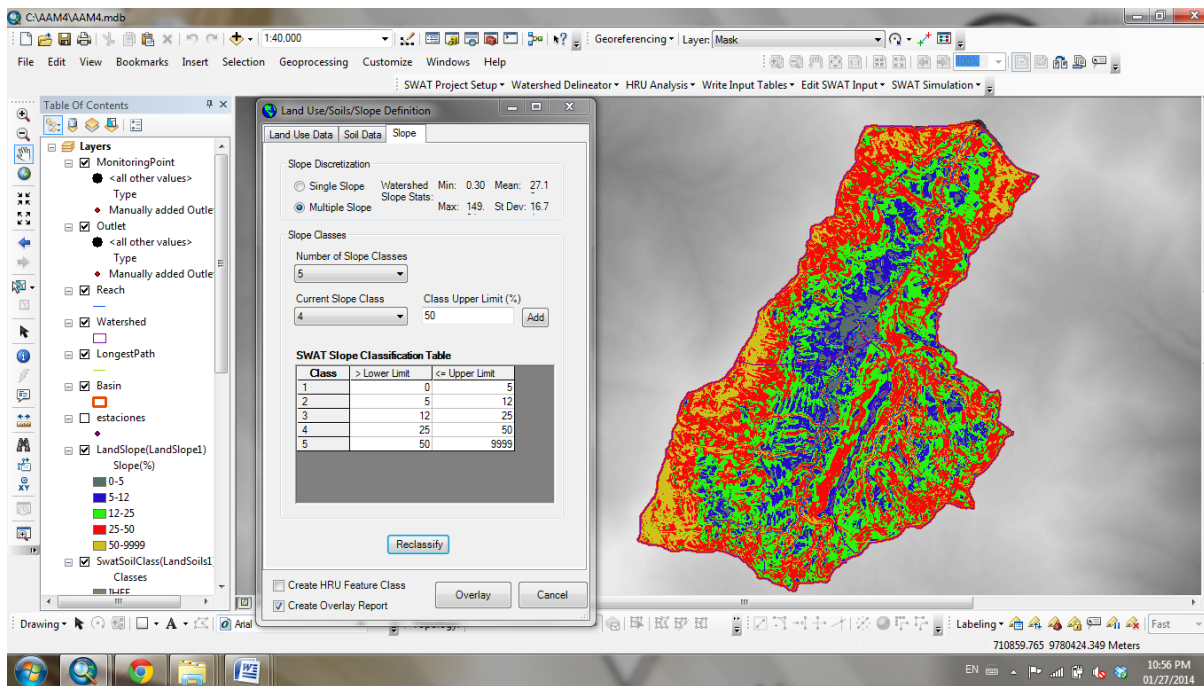
5.- Una vez realizado todos los pasos se da clic en “calcúlate subbasins parameters”, y aparece la imagen anterior indicando la delimitación de la cuenca exitosamente.



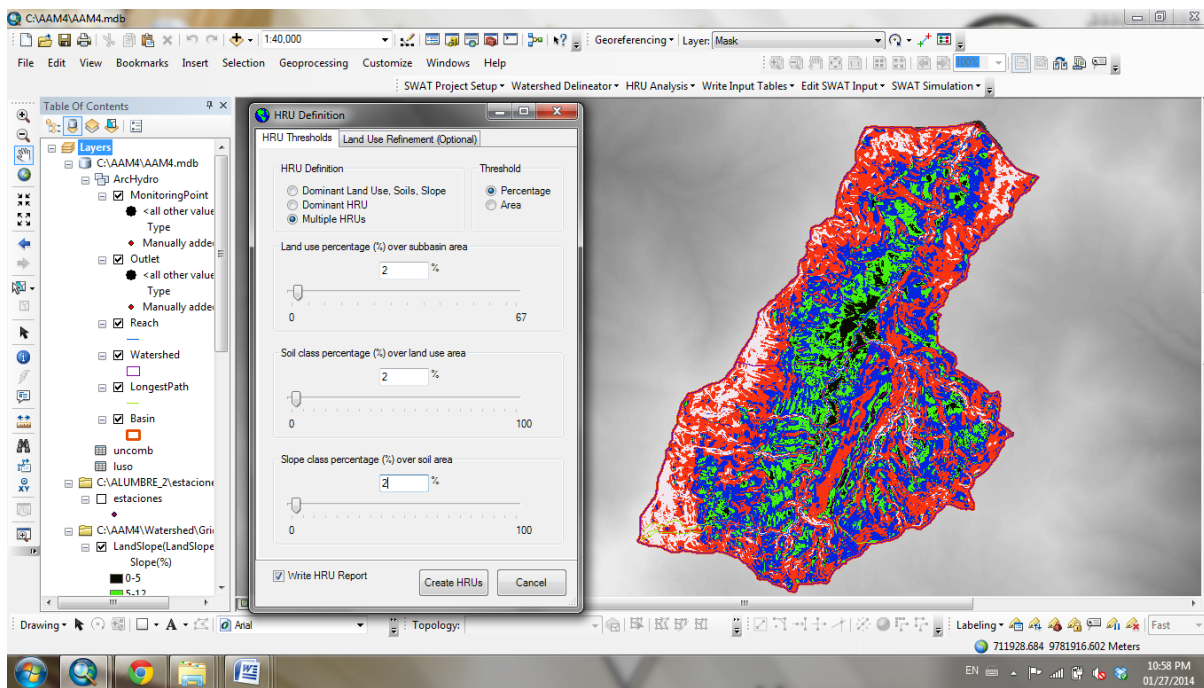
6.- Land Use/Soils/Slope Definition (Reclasificación del uso de la tierra con la base de datos del SWAT.)



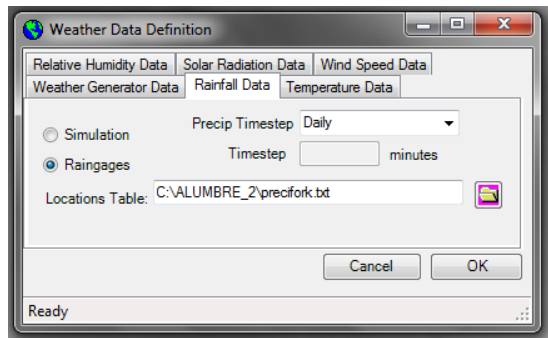
7.- Land Use/Soils/Slope Definition (Reclasificación del tipo de suelo con la base de datos del SWAT.)



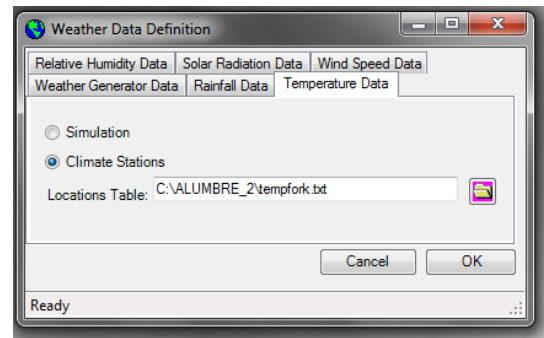
8.- Land Use/Soils/Slope Definition (Reclasificación de las clases de pendiente existentes en la microcuenca en estudio.)



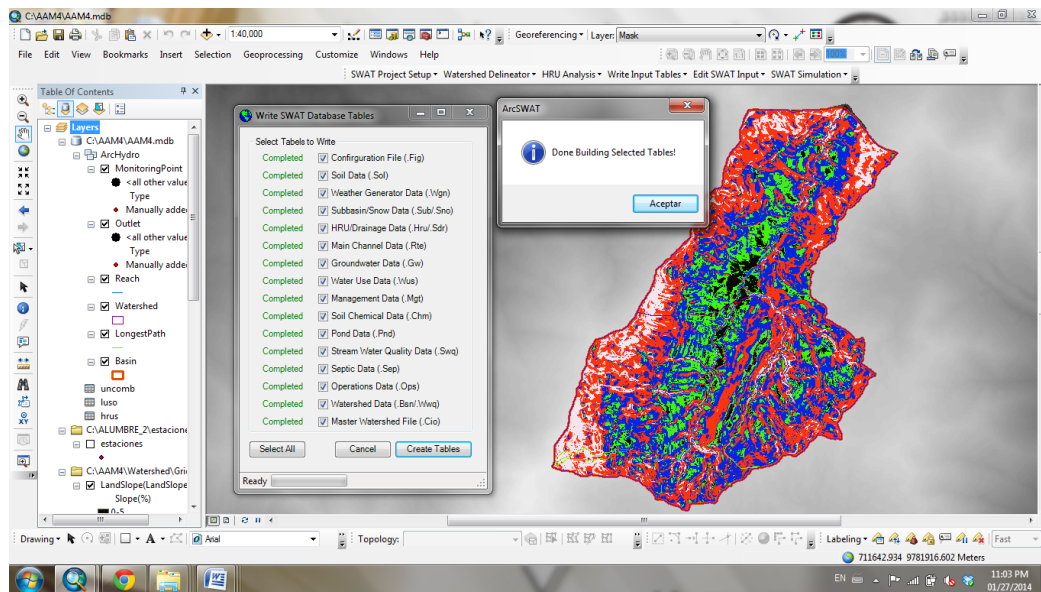
9. HRU Definition: En este caso se escogió la opción HRU Dominate.



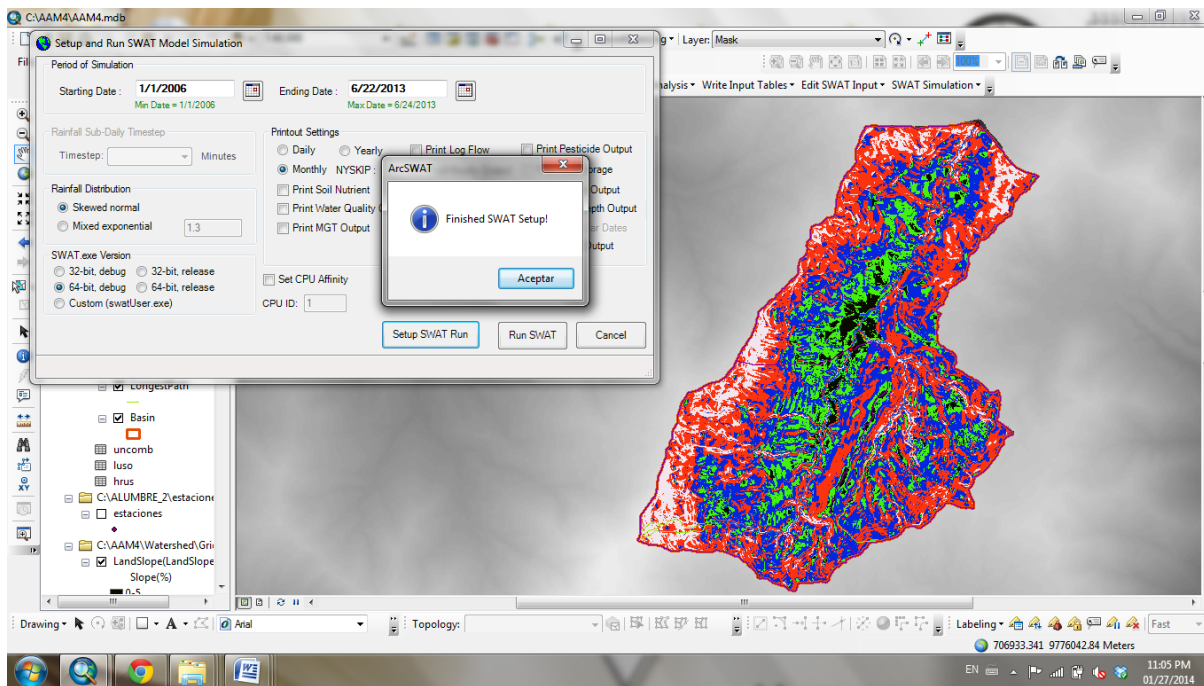
10. Definición del clima (tabla de localización)



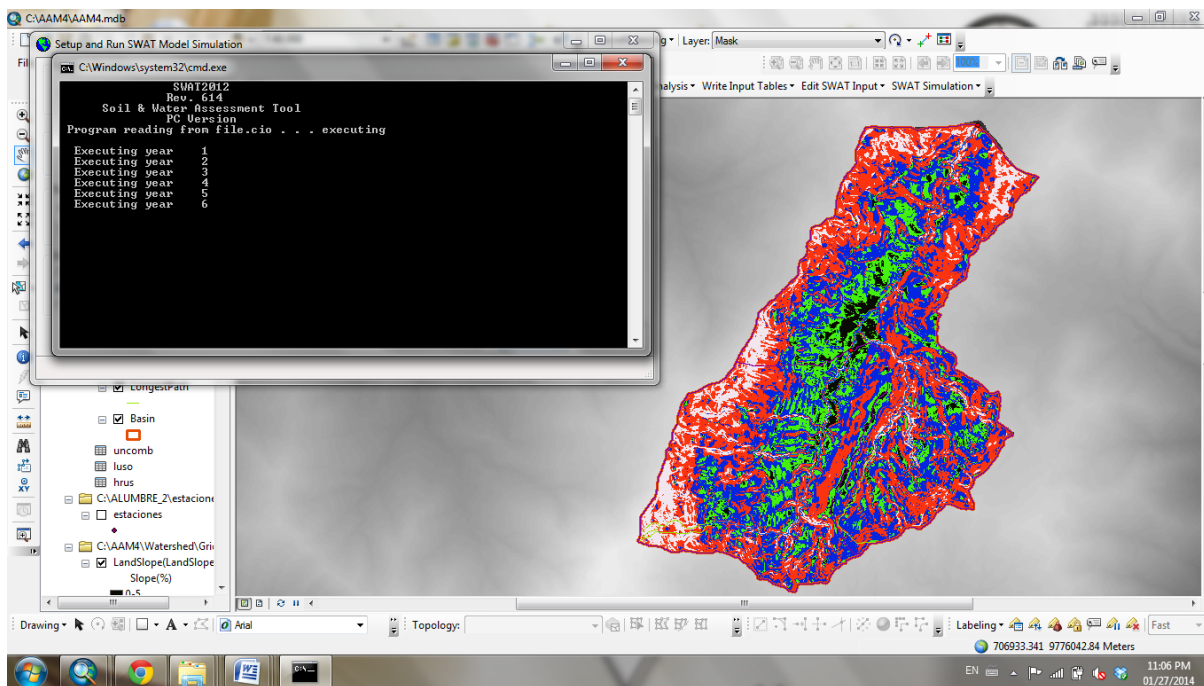
11. Definición del clima (tabla de localización precipitación) Se simulo el resto de parámetros



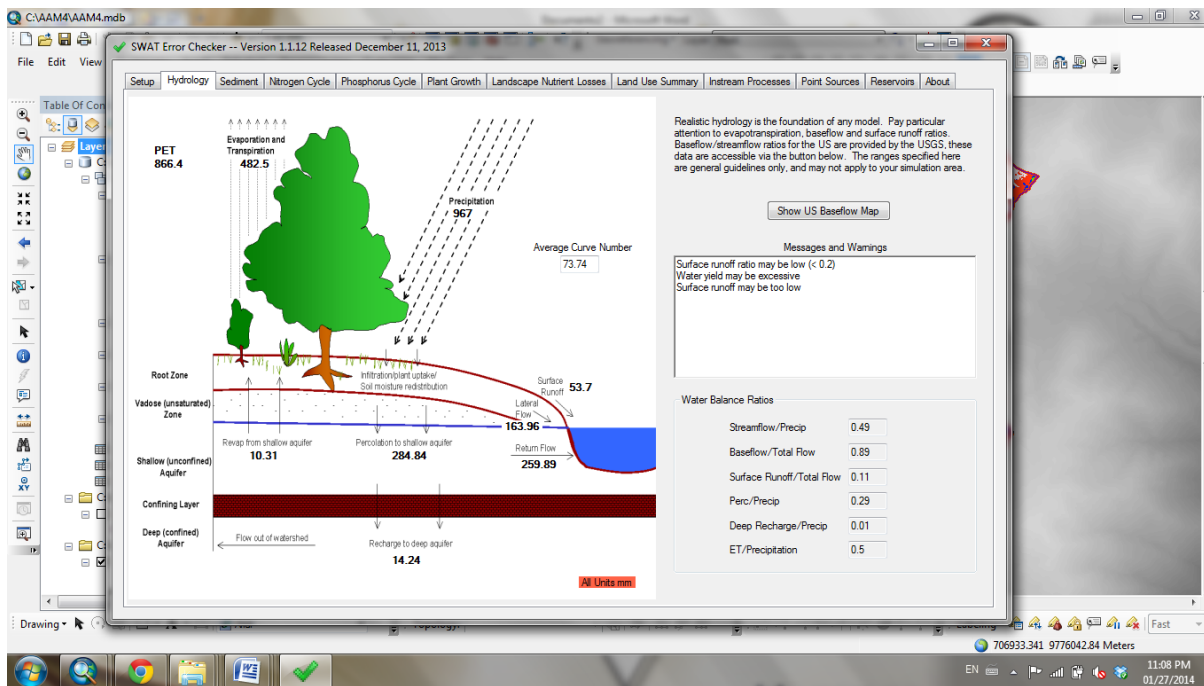
12. Definición de parámetros en los archivos de la Geodatabase



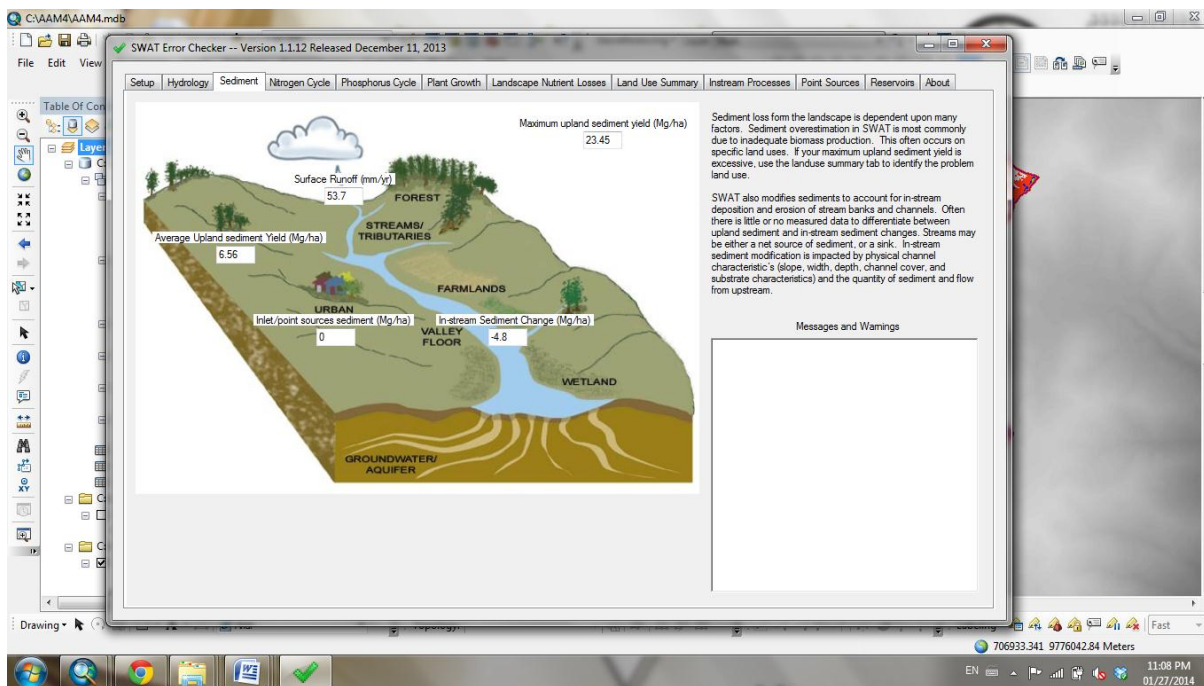
13.- Una vez realizado todos los pasos el modelo es corrido exitosamente



14.- Corriendo el modelo.



15.- Revisión de los datos obtenidos con SWAT CHEK, Hidrología.



16.- Revisión de los datos obtenidos con SWAT CHEK, Sedimentos.

ANEXO 6. REGISTRO FOTOGRÁFICO.



Reubicación de estación hidrométrica El Guayabal



Mantenimiento de las estaciones meteorológicas



Toma de datos, método de salinidad



Mantenimiento y toma de la estacione meteorológica Pacay.



Toma de datos estación hidrométrica.



Mantenimiento estación hidrométrica



Estción meteorológica Pacay.