

EFEECTO DE LA ESCALA DE LA INFORMACION SOBRE EL DESEMPEÑO DEL MODELO SWAT EN UNA MICROCUENCA DE MONTAÑA

P. Crespo^{1*}, F. Cisneros¹, P. Torres¹, R. Cèlleri¹, J. Feyen^{1,2}

ABSTRACT

In order to understand hydrological processes it is necessary to have adequate information. Unfortunately in Ecuador this information is not enough to be applied at a scientific level. On the other hand there is no research that supports a sound management of the natural resources. More over, agencies are implementing management programs without success and with a high cost. In this context, the present research contributes to quantify the effect of the input information on the performance of the selected model. When using models the scale of input information is one of the most essential factors to obtain optimal results, because it plays an important role in the outputs of the model that will be used in practice in water management. This research was done in the frame of the project Evidence-Based Policy for Integrated Control of Forested River Catchments in Extreme Rainfall and Snowmelt (EPIC FORCE). The research was carried out in the Lise microcatchment (2.34 km²) which belongs to the Chanchan river basin.

The information used to perform the hydrological analysis has been collected in the following terms: (1) research scale data (< 10 km²) which was obtained in the field and laboratory, (2) regional scale data based on improved existing information of the country.

To reach the proposed objectives the semi-distributed SWAT model was implemented; the results are shown to be highly dependent on the rainfall input date. The most influencing data was rainfall, since soils and land cover information was aggregated internally, minimizing the individual effect of each one. The simulations showed that acceptable results can be obtained with a single rain gauge if it is correctly located. The results of simulations with this information were similar to the results obtained with a complete network of 6 rain gauges. However, this does not mean that one single rain gauge is enough to characterize the spatial variability of the rainfall. The parameters obtained at research scale are able to simulate in a better way the water flow output, while the regional available information was insufficient to simulate the hydrological processes in a microcatchment level because it gives inconsistent results. The study revealed that it is not possible to adequately simulate hydrological processes at a small scale with regional scale information and therefore, it is not possible to make good decisions on water management without obtaining information at higher detail.

RESUMEN

En el país no existe información y peor aún investigación que nos lleve al entendimiento de los procesos hidrológicos que son indispensables para un adecuado manejo de los recursos naturales, sin embargo se vienen implementando programas de manejo sin éxito y con un alto costo económico. En este contexto, la presente investigación contribuye a cuantificar el

¹ Programa para el Manejo del Agua y del Suelo, PROMAS, Universidad de Cuenca. Cuenca-Ecuador.

² Department of Land Management and Economics, Katholieke Universiteit Leuven. Heverlee-Belgium.

* E-mail: pcrespos@yahoo.com

efecto de la información de entrada sobre el desempeño del modelo. La escala de la información de entrada a un modelo es de crucial importancia ya que la misma tiene un efecto directo sobre los resultados y parámetros de un modelo, los cuales son comúnmente usados en el manejo de los recursos hídricos. Esta investigación se llevó a cabo dentro del proyecto Políticas para el Control Integrado de Cuencas Forestadas ante Eventos Extremos (EPIC-FORCE) en Ecuador en la microcuenca del río Lise (2.34 Km²) perteneciente a la cuenca del río Chanchán.

La información para el análisis ha sido recopilada en los siguientes términos: (1) escala de investigación (< 10 Km²), cuyos datos fueron levantados en campo y laboratorio, y (2) escala disponible basada en la información existente en el país, mejorada con inspecciones visuales y recopilación bibliográfica.

Para cumplir los objetivos propuestos se implementó el modelo semi-distribuido SWAT; los resultados obtenidos mostraron ser altamente dependientes de la escala de los datos de entrada. El dato de entrada (variable) más influyente fue la precipitación, ya que el efecto de los suelos y cobertura fue minimizado o eliminado por la agregación interna del modelo la misma que generaliza los sistemas a base de patrones dominantes en las subunidades; las simulaciones demostraron que se pueden obtener resultados aceptables con un solo pluviógrafo siempre y cuando este tenga una ubicación correcta, los mismos que fueron iguales a los resultados encontrados con la red completa. Sin embargo, esto no significa que un solo pluviógrafo caracterice la variabilidad espacial de la precipitación. Los parámetros a escala de investigación mostraron ser capaces de simular de mejor manera los caudales de salida, mientras la información disponible mostró ser insuficiente para simular los procesos a nivel de microcuenca. El presente estudio demuestra que no es posible utilizar información levantada para otros propósitos para simular los procesos a diferente escala (microcuenca), es así que no es posible tomar decisiones acertadas en el manejo de los recursos hídricos si no se obtiene información de mayor detalle.

1 INTRODUCCION

1.1 Antecedentes y justificación

El entendimiento de los procesos hidrológicos es indispensable para el adecuado manejo de los recursos hídricos; el proceso de lluvia-escorrentía es complejo considerando el alto grado de variabilidad espacial de la precipitación, a menudo atribuido a la interacción entre los ecosistemas y sus características como son la precipitación, vegetación, uso de la tierra, topografía, etc. Los modelos matemáticos son herramientas importantes utilizadas para el entendimiento de estos procesos; desarrollados para prácticas de manejo, evaluar riesgos y beneficios sobre largos periodos de tiempo (Refsgaard y Knudsen, 1996). El problema principal en hidrología es la obtención y la transferencia de la información para poder analizar la respuesta hidrológica de uno y otro lugar (Woods, 2004).

En la actualidad se han desarrollado varios tipos de modelos hidrológicos y se los clasifica de acuerdo a dos criterios de simplificación (Merz y Bárdossy, 1998). El primero de acuerdo a la descripción de sus procesos físicos como: empíricos, conceptuales y basados en procesos y el segundo según la descripción espacial de los procesos de la cuenca como: agregados y distribuidos. Los modelos empíricos y conceptuales no usan parámetros que pueden ser

medibles o que tienen significado físico, mientras los modelos basados en procesos usan únicamente parámetros con significado físico. (Rouhani et al., 2005; Ndiritu y Daniell, 2001; Refsgaard, 1996; Refsgaard y Knudsen, 1996; Singh, 1995).

Para implementar un modelo se debe tener en cuenta dos consideraciones: (1) Seleccionar un modelo compatible con la aplicación, ya que las estructuras de los modelos son diferentes (Wagener y McIntyre, 2005; Ndiritu y Daniell, 2001), (2) Seleccionar la escala y los valores adecuados para los parámetros del modelo de acuerdo con las características de la zona en estudio. El proceso por el cual los parámetros son seleccionados y sus valores son ajustados es llamado calibración (Sorooshian y Gupta, 1995). Debido a que la implementación de un modelo distribuido tiene un alto costo; muchos parámetros no pueden ser medidos según su heterogeneidad e incertidumbre, de tal manera que necesariamente deben ser calibrados.

Una pregunta común es: ¿Cuál es la escala apropiada para modelar los más importantes factores del manejo integrado de cuencas hidrográficas?. De manera que es importante definir los términos que serán utilizados durante el presente estudio para definir las escalas. Al hablar de escala de investigación, tenemos que precisar si es a nivel de cuenca o de ladera. Quinn et al., 2004 define a la ladera con un tamaño menor a 1 ha y a una microcuenca menor a 10 Km²; la presente investigación define como escala de investigación (pequeña) a ésta última. En los proyectos de ingeniería se definen dos escalas: de cuenca (hasta 1000 Km²) y regional (mayor a 1000 Km²). Cabe mencionar que el manejo a una escala de cuenca formará parte de un plan de manejo a escala regional. En el Ecuador la información existente no se ajusta a ninguna de las escalas antes especificadas especialmente al describir la precipitación por cuanto hablaremos de escala regional refiriéndose a la información disponible mas no a como se encuentra levantada originalmente la misma.

En la actualidad es necesario utilizar una herramienta diferente para una determinada escala de estudio. La escala apropiada debe ser escogida diferenciando entre los propósitos de ingeniería e investigación. Es decir las necesidades de información de una cuenca son muy diferentes a las de una microcuenca, la información debe ser levantada según la escala escogida (Quinn et al., 2004). En el Ecuador la mayor parte de información existente no cumple éste propósito ya que en su mayoría ha sido levantada sin considerar la escala. Sin embargo, se viene utilizando ésta información en forma generalizada para cualquier escala de estudio (temporal y espacial) lo cual induce errores en los resultados, siendo propósito del presente estudio demostrarlo.

La variación espacial y temporal de los parámetros de entrada y salida de un modelo son medidos mediante ubicaciones puntuales que discretizan la información. Desafortunadamente estas no representan la distribución real; al usar técnicas de distribución de la información se introduce errores al modelo (Beven, 2000; Refsgaard y Storm, 1996; Melching, 1995; Singh, 1995), primero por usar una inadecuada distribución espacial y temporal de la información y segundo porque se producen errores al momento de la medición de los parámetros, obteniéndose así resultados aproximados (Refsgaard y Storm, 1996).

Al analizar esta variabilidad surgen las siguientes inquietudes: (1) ¿Son los parámetros dependientes de la escala?, (2) ¿Es un set de parámetros válido para condiciones similares?, (3) ¿Son los parámetros válidos para las diferentes subcuencas dentro de una calibración multi

sitio? (Seibert et al., 2000). La respuesta a éstas inquietudes están siendo estudiadas en la hidrología.

La variabilidad temporal ha sido muy estudiada a nivel mundial, pero la espacial es un campo de muy reciente interés (Vaes et al., 2001). La distribución espacial ha tomado importancia en los últimos veinte años, particularmente con el desarrollo de datos digitales y métodos de distribución desarrollados en bases computacionales (p.e. Sistemas de Información Geográfica) con aplicaciones en modelos distribuidos, los cuales se basan en la generación de información a escala espacial de varios parámetros relacionados con el clima, suelos, vegetación, topografía y geología. (Woods, 2004).

A escala de cuenca la importancia de la variabilidad espacial es generalmente admitida, en el caso de microcuencas generalmente se asumen la uniformidad de los diferentes parámetros (Goodrich et al., 1995); sin embargo en la actualidad ésta hipótesis necesita ser demostrada en especial para cuencas tropicales de montaña donde la variabilidad de los parámetros es alta.

Estudios han demostrado que la escurrimiento es sensible a las variaciones espaciales en las propiedades de los suelos (Dooge y Bruen, 1997), escalas de tiempo y espacio de la precipitación (Goodrich et al., 1997) y topografía (Hanneland et al., 2002; Beven and Kirkby, 1979). Avaniadou y Paleologos en el 2002 enfatizan que un pequeño número de muestras de suelo no pueden representar la variabilidad espacial de manera adecuada, por lo que la interpretación espacial de los parámetros del suelo no es adecuado porque no considera la interdependencia y heterogeneidad. Es muy conocido que en Ecuador su variabilidad es muy alta.

La precipitación es el dato de entrada más importante en los modelos hidrológicos (Vaes et al., 2001; Melching, 1995). Es fundamental definir adecuadamente su distribución espacial y temporal para modelar la respuesta hidrológica de una cuenca. La importancia de la distribución de la lluvia es crucial en zonas montañosas donde interactúa con varios factores de la topografía, resultando altamente variable sobre un área de estudio. (Torres, 2004; Loukas y Quick, 1996). Sin embargo debido al alto costo de implementación y mantenimiento de las redes de recolección de información tanto de caudales como de lluvia, es muy difícil caracterizar su variabilidad espacial (Gupta, 2004).

Si consideramos la variabilidad en los parámetros de entrada, un modelo distribuido es muy difícil de implementar por sus requerimientos de información. La aplicación de los modelos semi-distribuidos (p.e. SWAT) han sido recientemente adoptados, ya que los mismos distribuyen espacialmente la información mediante sub unidades, las que agregan la información y los procesos, teniendo un efecto directo en la cantidad de información y costo necesario para su implementación (Wagner y McIntyre, 2005; Onyando et al., 2003; Paturel et al., 2003; Beven et al, 1995; Singh, 1995).

En lo que respecta al Ecuador no existe investigación que lleve al entendimiento de los procesos hidrológicos que son indispensables para un adecuado manejo de los recursos, sin embargo se vienen implementando programas de manejo sin éxito y con un alto costo económico.

La presente investigación contribuye a éste conocimiento, enfocándose en generar experiencia en el uso del modelo SWAT (semi-distribuido) en cuencas de montaña, para lo cual es necesario realizar el análisis del efecto de la escala espacial de los parámetros de entrada sobre la respuesta y desempeño. En tal virtud es importante provocar conciencia a nivel nacional de la importancia de los procesos hidrológicos, para lo cual SWAT se convierte en una herramienta muy útil al momento de cumplir éste objetivo.

SWAT es un modelo utilizado principalmente en los Estados Unidos para el manejo del agua y del suelo; en cuencas de montaña su aplicación es limitada y no existen antecedentes exitosos de su implementación en el Ecuador. La UMACPA (Unidad de Manejo de la Cuenca del Paute) intentó calibrar el modelo sin éxito en la cuenca del río Tabacay en el Ecuador (Cisneros, 1996). SWAT requiere largos periodos de información (Zárate, 2004) que en nuestro caso es muy difícil conseguir, por lo que es apropiado realizar validaciones del modelo para las condiciones existentes en nuestro país.

Al ser un modelo concebido en otras condiciones es necesario analizar la validez de sus parámetros. En lo que respecta a la precipitación, la técnica utilizada para la generación espacial de lluvia fue desarrollada para zonas relativamente planas; el modelo utiliza la estación mas cercana al centro de gravedad de la subcuenca (subunidad dentro de la microcuenca) para distribuir la lluvia (Zarate, 2004); nos preguntamos si es un método aplicable para generación espacial en zonas montañosas ya que no considera las influencias orográficas (Linsley et.al., 1988); una mala estimación de la distribución espacial de la lluvia puede conducir a errores muy significativos, una posible solución a éste problema sería presentar la densidad y ubicación apropiada de pluviógrafos para tener una adecuada caracterización de la precipitación en la cuenca hidrográfica (Torres, 2004).

En el Ecuador la red disponible instalada es muy deficitaria en número, calidad y cantidad de información recolectada y en muy pocas ocasiones se logra obtener datos de un mismo periodo; por lo que el análisis de los efectos o errores que se podrían cometer al momento de utilizar ésta información en la simulación de caudales mediante un modelo hidrológico es indispensable. Esto no quiere decir que una red implementada para investigación sea adecuada para caracterizar la variabilidad. Los mapas de suelos y uso del suelo levantados a escala regional, podrían dar como resultado una respuesta muy diferente del modelo al comparar los mismos con la información levantada a escala de investigación (Wagner y McIntyre, 2005).

El desconocimiento de la respuesta hidrológica aumenta el grado de incertidumbre que tiene un modelo, ya que al utilizar una estructura determinada para distintos usos, se desconoce las habilidades del mismo para simular los procesos hidrológicos por separado. En la mayoría de aplicaciones de los modelos hidrológicos se evalúa su comportamiento de manera general y se desconoce si los valores de los parámetros tienen significado físico, así como también el detalle de los subflujos existentes (base, sub superficial y superficial) (Willems, 2005(a)), siendo importante evaluar los resultados por separado.

1.2 Objetivos

Objetivo General: Analizar el efecto de la escala de la información de entrada sobre el desempeño del modelo SWAT en una microcuenca de montaña

1.2.1 Objetivos Específicos:

1. Analizar la sensibilidad de los parámetros de calibración del modelo SWAT para cuencas de montaña.
2. Analizar el efecto de las escalas regional disponible en el Ecuador y de investigación sobre el comportamiento y parámetros del modelo.
3. Analizar el efecto de la distribución espacial de la lluvia sobre el desempeño del modelo.

1.2.2 Hipótesis del Proyecto:

Las suposiciones del proyecto son: (1) Existe influencia sobre el comportamiento y parámetros del modelo de las escalas analizadas (Regional y de Investigación) y (2) Existen diferencias sobre el comportamiento del modelo debido a la distribución espacial de la precipitación.

2 METODOS

El presente capítulo tiene como objetivo dar a conocer las investigaciones a nivel nacional e internacional relacionadas directamente con el tema en desarrollo. También explicar los métodos y fundamentos teóricos a seguir para cumplir con los diferentes objetivos propuestos.

2.1 Revisión Bibliográfica

En un modelo semi-distribuido o distribuido basado en procesos físicos la precisión depende del grado de incertidumbre resultante de la calibración sobre los resultados, esta incertidumbre puede ser debido a la complejidad estructural y a la medición de la información de entrada. (Rozos et al., 2004; Refsgaard, 1996; Refsgaard y Knudsen, 1996; Singh, 1995)

La incertidumbre debida a la información de entrada depende en gran manera de la variabilidad espacial de parámetros relacionados con la topografía, uso del suelo, precipitación entre otros. La importancia de la escala escogida para cada uno de estos parámetros es estudiada en la actualidad por múltiples investigadores.

La producción de esorrentía es un proceso espacialmente distribuido. La variabilidad espacial en las características superficiales del terreno contribuye críticamente en la forma del hidrograma (Merz y Bárdossy, 1998). Así la esorrentía superficial puede ocurrir por exceso de saturación o cuando la intensidad de lluvia es mayor a la infiltración, es por esto que los investigadores desde décadas vienen estudiando los procesos de esorrentía centrados en los procesos de infiltración y por consiguiente la determinación de la precipitación efectiva, para lo que se necesita una elevada resolución en tiempo y espacio. Los modelos semi-distribuidos utilizan simplificaciones para definir una escala de agregación espacial apropiada de la información, como son el REA (Area Elemental Representativa, “Representative Elemental Area”) o HRU (Unidad de Respuesta Hidrológica, “Hydrologic Response Unit”) como en el caso de SWAT (Pietroniro et al., 2004; Woods, 2004). El tamaño de éstas unidades y los parámetros depende de la variabilidad y principalmente de la escala de estudio.

Wood et al. (1990) discuten la caracterización de las variables hidrológicas con dependencia de escala y sugiere que para escalas pequeñas (microcuenca) características específicas de un sitio tienen que ser incluidas en un modelo; no así para escalas grandes (cuenca) para las cuales una representación estadística puede ser suficiente.

Hanneland et al. (2002) estudiaron la influencia de la resolución espacial de los parámetros de entrada sobre la respuesta de un modelo semi - distribuido en Estados Unidos donde encontraron que: (1) la resolución del DEM influye significativamente en la generación de la red de ríos y por lo tanto del tránsito de agua, (2) existe cambios en la resolución espacial de la precipitación debido al método de agregación interna, (3) el caudal de salida disminuye conforme se incrementa la agregación de la información y la escorrentía directa es más sensible a los cambios de escala que el flujo base y (4) Los parámetros de suelo causaron una significativa sensibilidad en el caudal; así como la agregación de la vegetación no resultó importante.

La agregación interna y externa de la información de entrada es tan importante como el tamaño de celda de una grilla, escala de los mapas de suelo y cobertura vegetal y la distribución de la precipitación (Refsgaard, 1997).

En la agregación interna de un modelo, juega un papel muy importante el tamaño de la celda del DEM, la misma que es la base del detalle de generación de la red de cauces, la cual influye directamente sobre el tamaño de la subcuenca en la cual se distribuye la precipitación de manera uniforme.

Un DEM apropiado disminuye la incertidumbre en la generación de las subcuencas, en cada una de éstas se generan los HRUs en los cuales tiene mucha influencia la escala de los mapas de suelo y cobertura vegetal. Chaplot (2005), estudió en Iowa el efecto de la escala del mapa de suelos sobre la respuesta del modelo SWAT en una cuenca de 21.8 Km², los resultados mostraron que se obtuvo mayor precisión en la respuesta del modelo con una escala de 1/25,000 que con otras de 1/250,000 y 1/500,000.

Refsgaard (1997) tomó en consideración diferentes tamaños de celda para una cuenca de 440 Km², encontrando problemas al momento de trazar los cauces de ríos. El uso de una celda muy grande implicó significantes ajustes en los parámetros y en la calibración. No obtuvo en los análisis buenos resultados para celdas mayores a 1000m, sin embargo los resultados con una celda menor a 500 m no fueron mejores. Esto lo corroboran Wainwright y Parsons (2002); quienes indican que el uso de una mayor resolución no necesariamente mejora los resultados del modelo.

En un modelo la escala de los mapas influye en la distribución espacial; mientras que los parámetros influyen en los procesos del modelo. Los parámetros del suelo son muy influyentes ya que éstos dan la característica de infiltración, almacenamiento, etc. que a su vez dan la forma y volumen de los hidrogramas de salida conjuntamente con las características de la cobertura vegetal.

Merz y Bárdossy (1998), estudiaron en Alemania sobre una área de 6.3 Km² el efecto de la distribución de los parámetros del suelo y encontraron similares resultados cuando se consideró una distribución diferente de los mismos, éste caso muestra que no basta con la

comparación entre los datos observados y simulados para calibración y verificación, sino que puede tener mucha influencia el estudio de la estructura del modelo.

La precipitación es un parámetro de entrada muy importante en un modelo. Gupta (2004) resalta la importancia de tener una adecuada densidad de pluviógrafos para evaluar la variabilidad espacial de la lluvia y poder realizar predicciones a una escala determinada; sin embargo la mayoría de cuencas en el mundo no posee una adecuada medición de la precipitación (Refsgaard, 1997).

Para grandes cuencas la importancia de la variabilidad espacial de la lluvia es admitida, en el caso de microcuencas generalmente se asume precipitaciones uniformes (Goodrich et al., 1995), esto lo contraponen muchos estudios en áreas muy pequeñas menores a 2 Km² donde se encontró grandes diferencias en las respuestas de los modelos debido a la alta variabilidad de la lluvia (Woods, 2004; Faures et al., 1995; Osborn, 1984); de tal forma que nos preguntamos si es correcto asumir o no, una precipitación uniforme, y a que escala o desde cual área?. Es conocido que la variabilidad de la precipitación tiene relación con la dirección del viento y las características de la topografía como son la altitud y pendiente (Seed, 2004; Collier, 1996; Goodrich et al., 1995), Ambroise y Gerard (1989), investigaron la importancia de estos factores en una red muy densa de pluviógrafos encontrando una fuerte influencia de la altitud sobre la variación de la lluvia en cuencas de montaña.

Goodrich (1990) experimentó que dos pluviógrafos separados 300 m dieron significantes errores en las estimaciones de cantidad e intensidad de la precipitación, cuando estos fueron usados en tres microcuencas (de 0.4 a 4.4 ha) se encontró una significativa sensibilidad del modelo a la variabilidad espacial.

Lopes (1996), estudió la incertidumbre de la variabilidad espacial de la lluvia sobre las predicciones de volúmenes de escorrentía y picos de caudales sobre un área de 6.73 Km² en Arizona con una densa red de pluviógrafos. Los resultados arrojaron la importancia de la ubicación espacial de los pluviógrafos; además si se reduce la densidad de 5 a 1 pluviógrafos los errores en la predicción de caudal son de 130% en volumen y de 98% en picos. El error aumenta un 30% conforme se reduce la densidad. El autor manifiesta que una red de cinco pluviógrafos tampoco fué óptima.

Badas et al. (2003) estudiaron con SWAT una cuenca de montaña de 125 Km² en Sardinia Italia concluyendo que la resolución espacial de la lluvia tuvo una fuerte influencia en la respuesta del modelo, existiendo una diferencia significativa entre las simulaciones con diferente densidad de pluviógrafos; encontraron que al reducir la densidad, se reducía también la aproximación en los caudales de salida.

Braud et al. (1999), estudiaron en Argentina la variabilidad espacial de la precipitación para una cuenca de 600 Km², encontrando una alta variabilidad de la lluvia, en mas del 100%. Los autores concluyeron que la escorrentía también lo hace en similar magnitud.

Torres (2004) estudió en el Ecuador la variabilidad de la lluvia en la cuenca del río Paute, encontrando que es importante delimitar las zonas que tienen una fuerte influencia de las regiones costa y oriente para efectuar una adecuada distribución espacial de la lluvia dentro de la cuenca. Determinó que la distancia a la cual las estaciones deben ser ubicadas para la

región con influencia del sector costanero no debe ser menor a una estación por cada 12 y 52 Km en las escalas diaria y mensual respectivamente con un desnivel entre estaciones no mayor a 300 y 100 m respectivamente y en la zona con influencia del régimen oriental la distancia mínima para las escalas diaria y mensual no debe ser menor a una estación por cada 18 y 45 Km respectivamente con desniveles máximos para la escala diaria de 400 m y para la mensual de 850 m.

El equipo del PROMAS con financiamiento del DIUC (PROMAS/DIUC, 2006) estudió la variabilidad espacial de la lluvia en microcuencas de montaña en el Ecuador determinando: (1) Que la variabilidad espacial se encuentra altamente influenciada por la orografía y la cercanía al oriente y (2) que una escala micro (1-10 Km²) implementada con información de una red de estaciones adaptada para una escala meso o macro (> 500 Km²) nos lleva a una sobrestimación de hasta un 80% de la cantidad de lluvia presente en la microcuenca.

Los resultados de los estudios recopilados muestran que el conocimiento de una escala adecuada es crucial para llegar a predecir la esorrentía y que en Ecuador no existen estudios que lleven a éste entendimiento. Los diferentes parámetros del modelo tienen una fuerte influencia sobre los resultados de un modelo; pero de ninguna manera podemos dejar de lado la escala de los mapas de entrada, es decir la distribución espacial de las características de la cuenca. No quiere decir que se deba tener una exagerada precisión en la escala y parámetros; esto únicamente incrementa el trabajo de recolección de la información, calibración y los requerimientos computacionales, en consecuencia el costo de implementación. (Hanneland et al., 2002).

2.2 Análisis de la precipitación

Es muy difícil caracterizar adecuadamente la distribución espacial de la precipitación. En Ecuador no existe una red que permita obtener escalas apropiadas para utilizar un modelo determinado. Un análisis de la similitud de los pluviógrafos en el régimen de lluvias es muy importante al momento de analizar la respuesta hidrológica de un modelo, sin embargo es también importante la cantidad de lluvia caída; este análisis nos entrega una idea de las estaciones que pueden dar resultados aproximados en la modelación (Seed, 2004).

Para éste análisis se considerará la distancia de las estaciones a la microcuenca, la correlación entre ellas y las diferencias entre precipitaciones acumuladas.

(1) La distancia es muy importante debido a que el modelo SWAT distribuye la lluvia considerando la estación más cercana a la subcuenca. El análisis servirá para entender la relación correlación – distancia.

(2) La correlación (ρ) es usada para analizar la similitud o diferencias del régimen de precipitación entre pluviógrafos. “La correlación toma valores entre -1 y 1; valores cercanos a la unidad significa una perfecta relación, mientras valores cercanos a 0 indica la no existencia de correlación”. ρ , se considerará como la covarianza de dos variables normalizadas.

La covarianza ($Cov(X,Y)$) determina la medida en la que dos variables varían en forma conjunta, es decir si la variable X aumenta también lo hará Y o viceversa, esto nos indicará una covarianza positiva; cuando la variable X y Y varían de forma inversa es decir la una

aumenta y la otra disminuye el producto resultante será negativo por lo tanto la covarianza también lo será (Bacchi y Kottegoda, 1995).

$$\rho = Cov(X,Y)/\sigma_x\sigma_y$$
$$Cov(X,Y) = \frac{1}{N} \sum_i (X_i - \mu_x)(Y_i - \mu_y) \quad (1)$$

Donde: N es número total de observaciones, μ_x, μ_y son la media de los valores de X e Y y σ es la desviación estándar.

(3) La correlación nos indica la similitud de régimen de precipitación más no compara la similitud de la cantidad de lluvia caída, en un modelo hidrológico la cantidad de precipitación es muy importante para realizar el balance de agua en la cuenca. La comparación entre pluviógrafos se efectuará mediante gráficos de precipitación acumulada.

El análisis propuesto permitirá encontrar los pluviógrafos que podrían generar los mejores resultados en la predicción de caudales y analizar la importancia de un análisis previo a la utilización de un modelo, ya que éste no es más que una aplicación matemática.

2.3 Descripción del modelo

La Herramienta para el Manejo del Agua y el Suelo (Soil and Water Assessment Tool “SWAT”) es un modelo determinístico semi - distribuido (Zárate, 2004) tipo “caja gris” - Físicamente basado (Rouhani et al., 2005), el cual está integrado a Arc View – GIS como extensión. Fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para la USDA Agricultural Research Service (ARS) en los 90’s y fue una combinación de los modelos EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams, 1995) y GLEAMS (Grounwater Loading Effects of Agricultural Management System) (Knisel y Williams, 1995), el modelo actual incluye una nueva estructura para tránsito, flexibilidad en la configuración de la cuenca, irrigación, flujo lateral y un componente de aguas subterráneas (Arnold et al., 1993). Desarrollado para predecir los impactos debido al manejo del agua, sedimentos, química agrícola en grandes y complejas cuencas hidrográficas con variación espacial en suelos, uso de tierra, condiciones de manejo sobre largos períodos de tiempo (Luzio et al., 2002), sin embargo utiliza conceptos para cuencas pequeñas como es el caso del numero de curva (Mockus, 1972). SWAT es un modelo computacionalmente eficiente que puede ser usado en una PC con facilidad; la versión actual esta corregida para zona tropicales, debido a que utiliza bandas para precipitación y temperatura; éstas se basan en un aumento constante respecto a la altura (Neitsch et al., 2002(a)). Para una descripción general de los módulos que simulan los procesos hidrológicos ver el Anexo A.

En definitiva SWAT es un modelo a escala de cuenca y multi evento característica que lo hace uno de los pocos modelos con esta particularidad. Para simular el ciclo hidrológico SWAT está basado en la ecuación de balance de agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (PPT - SURQ - PET - PERC - GWQ)$$

Donde SW_t es el contenido de agua final (mm H₂O), SW₀ es el contenido inicial de agua en el día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), PPT es la cantidad de precipitación en el día i (mm

H₂O), SURQ es la cantidad de escorrentía superficial en el día *i* (mm H₂O), PET es la cantidad de evapotranspiración en el día *i* (mm H₂O), PERC es la cantidad de percolación (mm H₂O) y GWQ es la fracción de aguas subterráneas (Neitsch et al., 2002(b)).

2.4 Implementación del modelo

Debido a la variabilidad, los parámetros de entrada de los modelos siempre contienen incertidumbres; el mayor problema es escoger los parámetros y sus valores de entrada, éste proceso se denomina parametrización. Los valores deben ser ajustados de acuerdo a criterios físicos y al conocimiento de la zona; esto implica que el modelador tenga un claro conocimiento del modelo y de los procesos que son representados en el mismo (Lenhart et al., 2002).

La variabilidad espacial es muy importante al momento de caracterizar los diferentes parámetros que describen el proceso de lluvia-escorrentía; esto es debido a que las diferencias espaciales se dan por desigualdad de las propiedades geométricas, hidráulicas y biofísicas, a éstas diferencias se les conoce como grados de libertad los mismos que incrementan con el área de drenaje; estos grados pueden disminuir con una adecuada parametrización ya que algunos parámetros no son sensibles o no son importantes para una determinada aplicación; de tal forma que son insensibles a detalles físicos de un modelo (Gupta, 2004)

La variabilidad en SWAT es considerada mediante submódulos como son: aguas subterráneas, cuenca, subcuencas, HRUs, canales principales, suelos y manejo, y otros. El modelo ha sido implementado con información durante el periodo de 05/03/2005 a 17/11/2005.

Los parámetros de aguas subterráneas no han sido medidos en campo, por lo que fueron calibrados. Las cuencas pequeñas tienen una fase dominante en el suelo y flujo superficial (Woods, 2004; Lenhart et al., 2002), y tiene relativamente menor importancia la fase de los cauces y canales por lo que se ha dado mayor importancia a la fase de la superficie de suelo, en la misma que es muy importante la calibración de la humedad inicial. Las microcuencas son altamente sensibles a las precipitaciones de corta duración y de alta intensidad (Singh, 1995) por lo que puede ser muy influyente el paso de tiempo “time step” al momento de predecir los picos.

Los resultados del modelo SWAT son extremadamente sensibles a la calidad de los datos del DEM, suelos y cobertura. Los resultados son afectados por el proceso de preparación de la información de entrada y por la agregación interna del modelo. Comúnmente se tiende a tratar de eliminar el efecto del tamaño de la celda, cargando al modelo el menor posible; esto no mejora el detalle de la resolución sino más bien incrementa el requerimiento computacional complicando así la estructura del modelo (Schumann et al., 2000). Para el caso de estudio se ha escogido un tamaño de celda de 25 x 25 m, el error debido al tamaño de la celda ha sido controlado visualmente previo a la modelación durante la preparación de la información.

Dentro de la agregación interna es importante definir adecuadamente el valor del tamaño mínimo de generación de una subcuenca (CSTV “Catchment Size Threshold Value”) (Romanowicz et al., 2005) y el valor dominante de la formación de los HRUs; éstos factores tienen un impacto considerable sobre el proceso de lluvia-escorrentía.

Los efectos de la selección del CSTV son: (1) un valor pequeño, implican una baja agregación de los datos de entrada y un aumento de los requerimientos computacionales, (2) El valor propuesto por el modelo depende de los requerimientos computacionales y el tamaño de las cuencas (3) un valor intermedio, implica un nivel de agregación intermedio y (4) un valor máximo implica un alto grado de agregación o de simplificación de los procesos. El nivel de agregación interna tiene efecto porque algunas clases de suelos y cobertura pueden desaparecer. En este punto toma importancia el porcentaje mínimo de superficie considerado dentro de cada HRU ya que en este proceso también se pueden omitir clases de suelo y cobertura (Romanowicz et al., 2005; Smithers y Ángel, 1996)

En el estudio fue usado un valor mínimo para delinear los ríos de 7 ha y una combinación dominante para creación de los HRUs en cada subcuenca. Al incrementar o disminuir el tamaño y el porcentaje mínimo de combinación de suelos y cobertura pueden causar cambios en los resultados de los estudios por lo que deberá formar parte de próximas investigaciones.

El proceso de lluvia-escorrentía se ha modelado con el número de curva. Para calcular los parámetros de la evapotranspiración durante el periodo faltante se ha utilizado el generador de eventos de clima de SWAT, la misma que se ha calculado mediante el método de Penman-Monteith (Neitsch et al., 2002(b); Raes, 1996). No se ha considerado el modulo de grietas y de dimensión de cauces.

2.5 Calibración del modelo

Resolver el problema de la cantidad y valor de los parámetros es el primer paso en una aplicación óptima para del complejo proceso de simulación (White et al., 2003).

Las diferencias entre la información medida y simulada se ve incrementada según cuatro factores: (1) Errores al azar y sistemáticos de la información de entrada; (2) Errores al azar y sistemáticos de la información con la cual se esta comparando p.e. caudales; (3) Errores debido a un escogitamiento inadecuado de los parámetros y valor de los mismos y (4) error debido a la estructura del modelo. Solamente el error (3) puede ser reducido durante la calibración, por consiguiente el objetivo de la calibración es minimizar el mismo hasta que los errores (1) y (2) sean insignificantes (Beven, 2000; Refsgaard y Storm, 1996; Melching, 1995; Singh, 1995).

Los modelos hidrológicos a menudo contienen parámetros que no pueden ser medidos directamente para lo cual son inferidos de calibraciones y del conocimiento de su significado físico de acuerdo a la respuesta del modelo. El objetivo de estas calibraciones es reducir la incertidumbre escogiendo un set de parámetros adecuados que acompañado con una reducción en la incertidumbre de la estructura del modelo y la adquisición de información de entrada ayudan a entregar mejores resultados producto de la aplicación del modelo (Vrugt et al., 2002).

El set de parámetros del modelo para una aplicación puntual contiene las siguientes características: (1) parámetros sin sensibilidad física, (2) no existen parámetros adecuados en la estructura del modelo para reproducir las series observadas, (3) mala reproducción de las series observadas, es decir realizar la evaluación sin calibrar los mismos (Rozos et al., 2004).

La parametrización de un modelo es el escoger los mejores parámetros que tienen significado acorde a la aplicación y adecuado valor de los mismos. Esto no significa que el grupo de parámetros escogidos considere las características de otras zonas u otras aplicaciones (Wagener y McIntyre, 2005). En los modelos distribuidos se considera comúnmente dos o tres veces mayor cantidad de parámetros que en el caso de un modelo agregado (Refsgaard, 1996); esto fue abordado en 1996 por Beven, como un problema de los modelos de ese tipo, conocido como “sobre parametrización”,

Es sabido que la estimación de un parámetro basado en una sola medición es inadecuada para simular todas las importantes características de un sistema físico, es decir un grupo de parámetros óptimos proveen una mejor respuesta y los procesos modelados resultan en la obtención de mejores resultados (Gupta et al., 1998). Lenhart et al., 2002 recomiendan que el análisis de tres a cinco parámetros es suficiente para reproducir la respuesta hidrológica en una determinada cuenca.

La adecuada identificación de los parámetros así como sus valores reduce el costo de obtención de información para implementar un modelo, se tiene que decir también que se buscará obtener información inferida en datos adquiridos con anterioridad; la información recolectada no representa la real distribución espacial, por lo cual es considerada dentro de los parámetros de calibración (Vrugt et al., 2002; Beven, 2000, 1996).

La calibración puede ser manual a prueba y error, automática y combinada (Refsgaard y Storm, 1996), la calibración manual requiere una cierta experiencia del modelador, sin la misma se podría consumir demasiado tiempo a más de obtener resultados no tan óptimos (Vrugt et al., 2002; Sorooshian y Gupta, 1995), la calibración manual será usada en esta investigación.

En términos generales se puede concluir que la precisión de los resultados del modelo es dependiente de la calidad de los datos de entrada, estructura del modelo y calibración. En muchas ocasiones la precisión en los resultados del modelo es atribuida a la experiencia del modelador, sin la cual los resultados podrían ser erróneos, además del tiempo consumido (Wagener y McIntyre, 2005; Lidén y Harlin, 2000). Para solucionar el problema se ha realizado un análisis de sensibilidad (Lenhart et al., 2002).

Para analizar el efecto de las escalas se realizarán dos calibraciones: la primera con la información a escala de investigación y la segunda con información disponible o de escala regional.

2.6 Análisis de Sensibilidad

El entendimiento de la sensibilidad de los parámetros de entrada es beneficioso para el desarrollo de un modelo y sus aplicaciones dentro del manejo de los recursos hídricos. Esto puede incrementar el conocimiento y mejorar la destreza del modelador, que permite mejorar la estimación de los valores de los parámetros y reducir la incertidumbre. Entonces el análisis de sensibilidad es un instrumento para comprender el impacto que tienen los diferentes parámetros sobre el comportamiento del modelo para una particular aplicación (Lenhart et al., 2002).

Es importante realizar este trabajo por cuanto el modelo fue creado para otras condiciones, por lo que los valores de defecto y la sensibilidad de los parámetros no son los mismos para cuencas de montaña.

Un gran número de parámetros controlan el comportamiento de una cuenca hidrográfica, los mismos que necesitan ser estimados. Con la calibración se debe tratar de reducir el número de parámetros, lo cual depende de la escala y la aplicación requerida (Yu et al., 2001; Refsgaard, 1997; Beven, 1996; Refsgaard et al., 1996; Singh, 1995; Warrick y Nielsen, 1980). No es posible encontrar un único set de parámetros ya que algunas agrupaciones de los mismos pueden causar similares simulaciones, éste efecto es llamado equifinalidad. (White et al., 2003; Lidén y Harlin, 2000).

Duan et al., 1994, observó que la precisión en la predicción de un modelo es afectada por: la estructura del mismo y los parámetros de estimación; a pesar de 20 años de investigación pocos son los progresos encontrados en resolver el problema de estimación de los parámetros en los modelos conceptuales. Esto nos indica que intentar eliminar los problemas de escala y de heterogeneidad de los parámetros de un modelo puede llevar a una compleja parametrización lo cual complica e introduce nuevos problemas a los modelos (Beven, 2000; Refsgaard et al., 1996). Nandakumar y Mein, 1997 indica que el error debido a los parámetros es similar a los errores debido al cambio de uso de tierras.

El análisis de la sensibilidad de los parámetros se ha realizado sin considerar las interacciones entre los mismos, desde el punto de vista cualitativo y cuantitativo; en efecto:

- (1) El análisis cualitativo resuelve las inquietudes de la influencia de los parámetros sobre cada uno de los subflujos. Esto nos permite escoger un determinado parámetro si se necesita calibrar un determinado flujo.
- (2) El análisis cuantitativo se ha realizado mediante los estadísticos R^2 “Coeficiente de correlación” (Sincich et al., 1999) y EF “Eficiencia de Nash & Sutcliffe” (Nash & Sutcliffe, 1970).

Es importante mencionar que el análisis cuantitativo entrega una idea de sensibilidad global mientras el análisis cualitativo indica el efecto puntual.

2.7 Evaluación del modelo

Para evaluar el modelo se hará uso de herramientas cualitativas y cuantitativas (Rouhani et al., 2005). Gráficos cualitativos son usados para obtener una visión global del comportamiento y habilidad del modelo. Los gráficos también son usados para analizar la sincronización entre los datos observados y simulados, importantes para analizar los caudales máximos, ya que no es incorrecto predecir los mismos con una pequeña diferencia en tiempo lo cual no es reflejado en los análisis cuantitativos. Nos indican también la sobre o subestimación del modelo. Sin embargo un análisis cuantitativo facilita el trabajo ya que en el caso de manejar grandes cantidades de información no es posible apreciar la tendencia global de los datos analizados de forma gráfica (Coffey et al., 1999; Refsgaard y Storm, 1996).

Los métodos cuantitativos necesitan cumplir ciertas hipótesis las mismas que no deben ser ignoradas; es también importante escoger los estadísticos apropiados dependiendo de la

evaluación requerida ya que, cada uno tiene un significado diferente. Los estadísticos más comúnmente usados asumen una distribución normal de los datos lo cual en hidrología raramente ocurre (Coffey et al., 1999).

El desconocimiento de la respuesta hidrológica aumenta el grado de incertidumbre que tiene un modelo, ya que al utilizar una estructura determinada para distintos usos, se evalúa el comportamiento del modelo en forma general y se desconoce el detalle de los subflujos (base, subsuperficial y superficial) (Willems, 2005(a)); la precisión necesaria esperada en un modelo puede variar según la aplicación que se desee.

La separación de los flujos se realizará usando técnicas numéricas de filtrado, la interpretación física de los mismos está basada en reservorios lineales. El modelo utilizado para éste propósito fue desarrollado por Willems en el 2004 y es conocido como WETSPRO (Water Engineering Time Series PROcessing tool), depende de la entrada de caudales, la calibración de las constantes de recesión para cada uno de los flujos y el parámetro “w” el mismo que es considerado como una fracción que simula la variabilidad en tiempo de la acumulación de las series de caudal para cada uno de los subflujos, este valor es desconocido por lo que necesita ser calibrado; es considerado como una variable de tiempo discreta.

Las predicciones globales y las separaciones de flujo se evaluarán cuantitativamente mediante tres estadísticos: el coeficiente de correlación (R^2), la eficiencia de Nash & Sutcliffe (EF) y la raíz del error medio cuadrático (RMSE)

2.7.1 Coeficiente de Correlación (R^2)

El coeficiente de correlación (R^2) (Sincich et al., 1999) es una medida relativa que indica si los datos observados y simulados se ajustan a una línea recta. Una línea con una pendiente = 1 y una intercepción = 0 indica una relación lineal perfecta entre los datos analizados es decir la relación de los datos simulados y observados es de 1:1. Un valor de $R^2 = 1$ nos indica una tendencia lineal perfecta entre los datos pero no significa que sea de 1: 1 (Coffey et al., 1999), por ejemplo valores de R^2 cercanos a 1.0 pueden ser obtenidos aun cuando las series comparadas estén significativamente alejadas de ser iguales en valor (Willems, 2005(b); Timbe, 2004).

$$R^2 = \rho^2$$

$$\text{Donde: } \rho = \frac{\text{Cov}(Q_o, Q_m)}{\sigma_o \times \sigma_m}$$

$\text{Cov}(Q_o, Q_m)$ es el covarianza de las series de tiempo observadas y modeladas (Ecuación (1)), σ_o es la desviación estándar de los caudales observados y σ_m es la desviación estándar de los caudales modelados

2.7.2 Coeficiente de eficiencia de Nash & Sutcliffe (EF)

Coeficiente de eficiencia EF de Nash & Sutcliffe (Nash & Sutcliffe , 1970) es la mejor opción al evaluar la relación existente en una serie de datos (Willems, 2005(b)); éste indica que tanto se pueden relacionar 1:1 los datos en análisis (Rouhani et al., 2005)

La eficiencia de Nash & Sutcliffe (EF) es adimensional. La EF es una suma de cuadrados que proveen un índice relativo del comportamiento del modelo. Se pueden obtener valores menores o iguales a 1, valores de 1 indican un ajuste perfecto. Un valor de cero indica que las predicciones del modelo no son mejores que tomar los valores medios de los datos observados y un valor negativo se puede interpretar como una mala aproximación es decir los resultados son peores que utilizar los valores medios de los datos observados (Coffey et al., 1999). El proceso de optimización de la calibración termina cuando no existe un cambio significativo en la eficiencia EF (Onyando et al., 2003).

$$EF = 1 - \frac{\sum_{i=1}^i (Q_o(i) - Q_m(i))^2}{\sum_{i=1}^i (Q_o(i) - \bar{Q}_o)^2}$$

Donde: Q_o es el caudal observado y Q_m es el caudal modelado.

2.7.3 Raíz del error medio cuadrático (RMSE)

La raíz del error medio cuadrático (RMSE “root mean square error”) son usadas para comparar como se ajustan los datos modelados a los observados. Este coeficiente comúnmente está en las mismas unidades de los datos analizados. El uso de valores absolutos es recomendado para cancelar los errores debido a la combinación de diferencias positivas y negativas (Coffey et al., 1999). Valores de RMSE = 0 son óptimos ya que los errores no existirían y la relación sería perfecta, pueden darse cualquier valor positivo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Q_o(i) - Q_m(i))^2}{n}}$$

Donde n es el número de observaciones

3 MATERIALES

3.1 Ubicación y Descripción de la zona de estudio

La zona de estudio se encuentra en el centro sur del Ecuador en la provincia de Chimborazo, pertenece a la cuenca de río Chanchán. El río Lise es uno de sus afluentes de la margen izquierda. La microcuenca de Lise está localizada entre las coordenadas UTM 9744957 N - 9742480 N, 726823 E – 725099 O (Gráfico 3.1)

El clima tiene dos estaciones perfectamente marcadas de invierno (diciembre – mayo) y verano (junio – noviembre), los suelos son ricos en materia orgánica que provienen de formaciones extrusivas (formación Puñay) con una alta retención de agua que permiten soportar el largo verano con un caudal casi constante. La vegetación es predominantemente chaparro aunque en verano la cobertura prácticamente es perdida. Su topografía es bastante escarpada con pendientes fuertes predominantemente (Tabla 3.1)

Tabla 3.1. Características de la microcuenca de estudio.

Característica	Lise
Área	234.2 ha
Perímetro	6845 m
Cota máxima	3240 m s.n.m.
Cota mínima	1680 m s.n.m.
Desnivel	1560 m

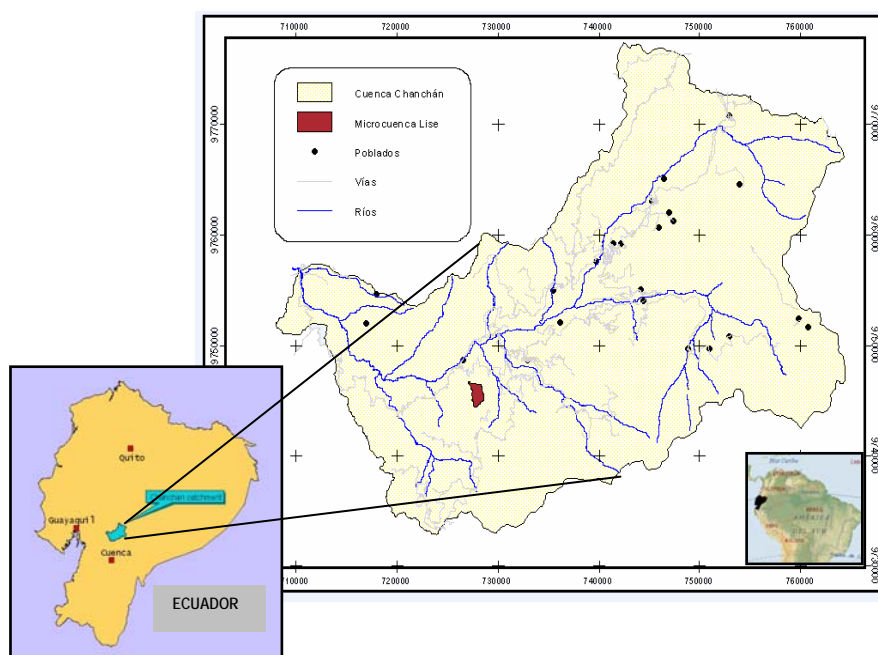


Gráfico 3.1. Ubicación de la microcuenca de Lise.

3.2 Equipamiento y medición

La información histórica en la zona de estudio es casi nula; por lo cual con financiamiento del DIUC y EPIC FORCE se ha provisto a la zona de seis pluviógrafos de tipo automático con sistema de funcionamiento de bascula con una precisión de 0.2 mm, una estación climática que permite medir: lluvia, humedad relativa, temperatura, velocidad y dirección de viento, punto de rocío, presión barométrica, radiación solar y un sensor de niveles “Global water instrument, USA” para medir las alturas mediante un vertedero triangular de cresta delgada, del cual en base a una calibración se han calculado los caudales.

En la Tabla 3.2 se establece el listado de los equipos instalados y su ubicación geográfica y en el Gráfico 3.2 se aprecia el mapa de ubicación de los distintos equipos. El pluviógrafo de Joyagshi es el considerado para la escala regional de simulación.

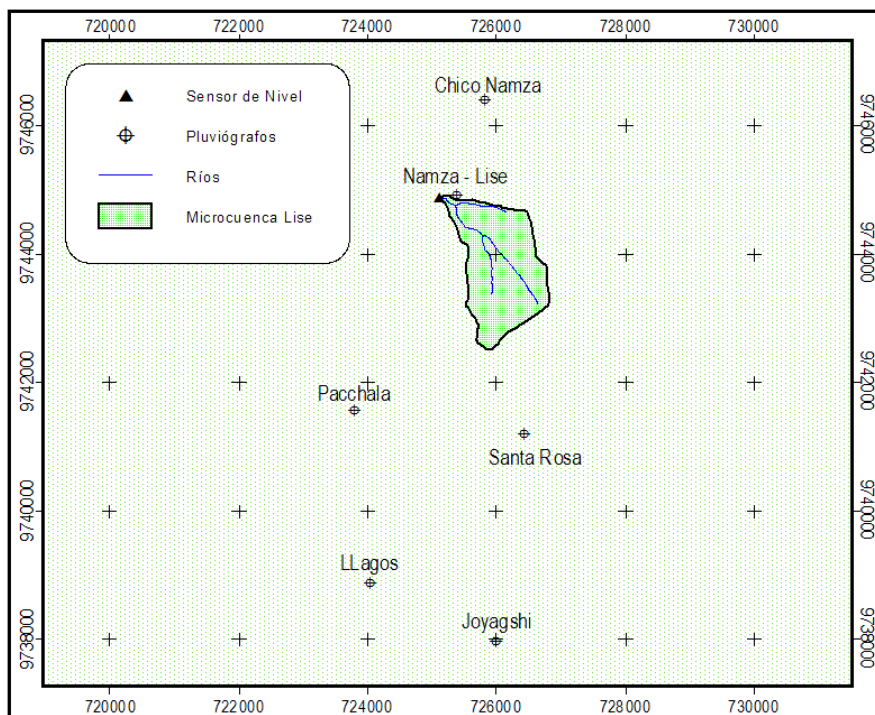


Gráfico 3.2. Ubicación de las estaciones de medida.

Tabla 3.2. Equipos Instalados.

Nombre	UTMx	UTMy	Altura (m s.n.m.)	Tipo	Serie Disponible
Santa Rosa	726452	9741199	2578.6	Pluviógrafo	12/02 – 17/11
LLagos	724044	9738880	2666.4	Pluviógrafo	04/03 – 17/ 11
Joyagshi	726012	9737960	2811.0	Pluviógrafo	11/02 – 17/ 11
Pacchala	723821	9741564	2129.5	Pluviógrafo	11/02 – 17/ 11
Chico Namza	725840	9746397	1887.4	Pluviógrafo	12/02 – 17/ 11
Namza - Lise	725404	9744935	1856.1	Pluviógrafo	05/03 – 17/ 11
Namza	725665	9746066	1850.0	Est. Climática	03/06 – 17/ 11
Lise	725120	9744907	1695.6	Est. Caudales	03/03 – 17/ 11

3.3 Análisis de la información

Se ha recopilado información existente según dos escalas: la regional con información disponible en el Ecuador y una a detalle como es la de investigación, las mismas que serán usadas para implementar el modelo y resolver los objetivos propuestos. El modelo SWAT requiere información de precipitación, clima, caudales, topográfica, suelos y uso del suelo; el resto de parámetros serán únicamente calibrados.

3.3.1 Precipitación

Es muy difícil caracterizar adecuadamente la distribución espacial de la precipitación, en Ecuador no existe una red que permita obtener escalas apropiadas para utilizar un modelo determinado. La estación mas cercana a la microcuenca de Lise según la red nacional del

INAMHI (Instituto Nacional de Meteorología e Hidrología) fué la de Joyagshi. Sin embargo ésta no permite obtener información cercana a la microcuenca, esto es un problema especialmente por la gran variabilidad espacial encontrada en la zona (PROMAS/DIUC, 2006). La información obtenida por la red instalada a escala de investigación ha sido agregada a un día; se ha efectuado un procesamiento previo a la modelación el mismo que permitió efectuar un control de calidad.

3.3.2 Caudales

Se ha realizado la medición de los niveles de agua a la salida de la microcuenca de estudio, mediante la calibración de un vertedero de cresta delgada se ha calculado los caudales, los mismos que han sido medidos de manera automática con un intervalo fijo de 5 minutos. SWAT es un modelo de “time step” diario, por lo que los caudales han sido agregados. Se ha realizado un control de calidad mediante gráficos de lluvia-escorrentía y control del ruido en los hidrogramas. La Tabla 3.2 muestra el rango de información disponible.

3.3.3 Evapotranspiración

Para el cálculo de la evapotranspiración se ha hecho uso de una estación climatológica instalada cerca de la microcuenca (Chico Namza) cuya disponibilidad de información se muestra en la Tabla 3.3 y para la época faltante de información (05/03/2005 – 02/06/2005) se ha usado el generador de eventos de clima de SWAT. Los requerimientos de información para el generador de clima son de carácter histórico mensual para lo cual se ha usado la estación más cercana considerando la similitud en las condiciones climáticas; la misma que está instalada en el sector de Cañar. Con la información existente se ha realizado la comparación de los valores medios mensuales entre estaciones, para disminuir las pequeñas diferencias encontradas se ha realizado una corrección a la información de la estación de Cañar principalmente en lo que corresponde a la temperatura. La estación de Chico Namza no caracteriza la variabilidad espacial de la evapotranspiración en la microcuenca, la misma que varía conforme aumenta la altura, de tal manera que se debe buscar la forma de distribuir la evapotranspiración, debido a que éste es un parámetro muy importante dentro del balance de agua

Para producir una mejor distribución espacial de la evapotranspiración se ha creado estaciones ficticias en las ubicaciones mostradas en la Tabla 3.4 variando principalmente la temperatura según las ecuaciones existentes para la estación Cañar afectadas por el valor de corrección (Dercon et al., 1998)

Tabla 3.3. Información diaria climática disponible, Estación Chico Namza.

Descripción	Rango
Temperatura	03/06/2005 - 17/11/2005
Humedad Relativa	03/06/2005 - 17/11/2005
Radiación Solar	03/06/2005 - 17/11/2005
Velocidad del Viento	03/06/2005 - 17/11/2005

Tabla 3.4. Coordenadas de las estaciones ficticias de Evapotranspiración.

Estación	Coordenadas UTM		Cota
	X	Y	m s.n.m.
1850	725410	9744700	1850
2280	726029	9743990	2280
2880	726066	9743130	2880
3240	725741	9742580	3240

3.3.4 Modelo de Elevación Digital (DEM)

Se ha recopilado información topográfica la misma que es producto una restitución aerofotogramétrica a escala 1: 25,000. Se ha usado interfase de ArcView como herramienta para calcular el DEM en la microcuenca en estudio. El tamaño de la celda escogido fue de 25 x 25 m. El DEM no es analizado en el efecto a escala de investigación y regional del presente estudio por lo que se considera igual para ambos casos. El Gráfico 3.3 muestra el DEM para la microcuenca de Lise

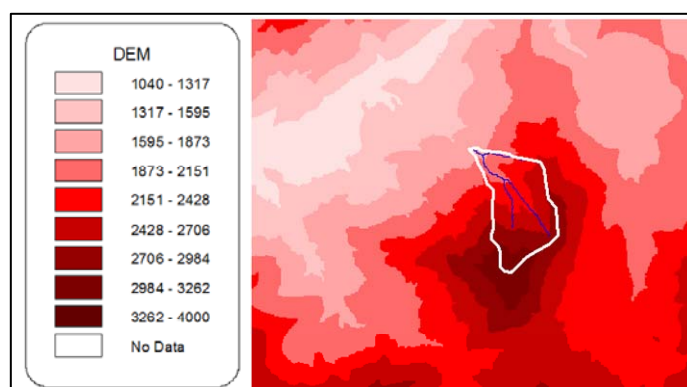


Gráfico 3.3. Modelo de elevación digital (DEM) para la microcuenca de Lise.

3.3.5 Suelos

La información existente es escasa o nula en la zona, por lo que se ha levantado información mediante la descripción de 4 calicatas y la comprobación vía transectos. Se ha tomado muestras alteradas e inalteradas (anillos de Kopecky) para los análisis de laboratorio en cada uno de los sitios. Los suelos se han clasificado mediante el World Referente Base for Soil Resources (WRB) (FAO/ISRIC/ISSS, 1998). Para implementar adecuadamente el modelo se ha agregado la información, es decir no se ha dividido los suelos por sus características químicas sino más bien físicas.

Los parámetros necesarios en SWAT que han sido medidos en campo y laboratorio son: número de horizontes (NLAYERS), profundidad máxima de raíces (SOL_ZMX), profundidad del horizonte desde la superficie del suelo (SOL_Z), densidad aparente (SOL_BD), capacidad de agua disponible en el suelo (SOL_AWC), conductividad hidráulica saturada (SOL_K), contenido de carbono orgánico (SOL_CBN), contenido de arcilla (CLAY), limo (SILT), y arena (SAND).

La profundidad de los horizontes y raíces fueron medidos en campo al momento de describir las calicatas. La conductividad hidráulica saturada (K_s) fue medida en campo mediante el método del pozo invertido (Timbe et al., 2004; Coello, 2005).

La prueba de pozo invertido consiste en llenar con agua un agujero hasta una profundidad dada del perfil del suelo, y medir la tasa de caída del nivel de agua. Si el suelo está saturado, el gradiente hidráulico puede ser supuesto igual a la unidad. De una combinación de la ecuación del balance de masas y la de Darcy la K_s puede ser calculada:

$$K_s = 1.15 \times r \times s$$

Donde K_s es la conductividad hidráulica saturada (cm h^{-1}), r el radio del agujero (cm), s la pendiente de la línea $\log(h + r/2)$ versus el tiempo y h la altura de la columna de agua en el agujero (cm). Las mediciones con el pozo invertido corresponden a la K_s horizontal (Coello, 2005; Timbe et al, 2004; Mejia y Minchala, 2003)

Tabla 3.5. Resumen de la información de suelos, escala de investigación.

Parámetro	Suelo					
	Umbrisol		Andosol		Cambisol	
Horizonte	A	Ac	O	A	Ap	Ac
HYDGRP	C		C		C	
SOL_ZMX (mm)	900		900		500	
SOL_K (mm h^{-1})	8.20	3.98	47.18	40.06	3.52	26.16
FC (pF=2) (%)	0.54	0.47	0.57	0.66	0.48	0.54
WP (pF=4.2) (%)	0.24	0.33	0.43	0.15	0.30	0.40
SOL_AWC (mm)	0.30	0.14	0.14	0.51	0.18	0.14
SAND (%)	38.0	44.0	28.0	46.0	35.0	30.0
SILT (%)	36.0	28.0	52.0	38.0	33.0	40.0
CLAY (%)	26.0	28.0	20.0	16.0	32.0	30.0
SOL_BD (gr cm^{-3})	1.21	1.57	1.29	0.77	1.57	1.18
SOL_CBN =	3.19	0.754	5.568	0.232	1.972	0.812
SOL_Z (mm)	600.0	1000.0	600.0	1000.0	500	1000

La SOL_AWC fue determinada a partir de las curvas de pF obtenidas para cada tipo de suelo y horizonte (Neitsch et al., 2002(a)). La retención de agua de las muestras de Kopecky para presiones de 0 a -50 KPa fueron obtenidas con el método del multistep; para presiones de -300 y -1500 KPa mediante el aparato de membranas porosas (Mejia y Minchala, 2003). Las curvas de retención de agua fueron modeladas con el modelo de Mualem-Van Genuchten (Mejia, 2003; Van Genuchten, 1978) basado en los caudales de salida de los aparatos utilizados. La densidad aparente “bulk density” fue determinado después de secar las muestras inalteradas durante 24 h a 105 °C. La textura ha sido obtenida en laboratorio mediante el sistema de clasificación de suelos de la Soil Taxonomy. El resumen de los parámetros utilizados en el modelo se presenta en la Tabla 3.5

Donde HYDGRP es el Grupo Hidrológico (Neitsch et al, 2002(a), Mockus, 1972), FC es la capacidad de campo, WP es el punto de marchitez. Mediante inspección visual se ha

encontrado una relación de la categoría de suelos respecto a la pendiente. Según el criterio anterior se procedió a delimitar el mapa (Gráfico 3.4) según las categorías antes encontradas (Tabla 3.5).

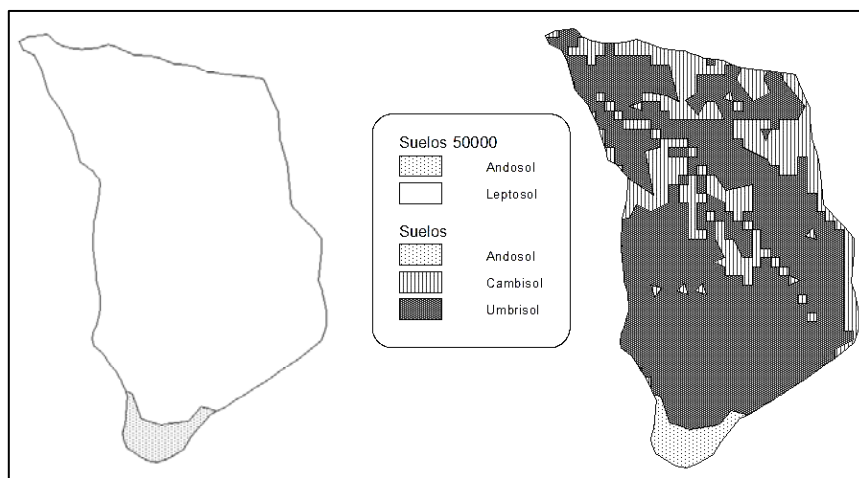


Gráfico 3.4. Mapas de Suelos, izq: escala regional, der: escala de investigación.

Se ha procedido a recopilar la información regional a escala 1: 50000 realizado por la ORSTOM, sin embargo no existe información para esta zona por lo cual, en consecuencia para lograr aplicar el modelo se realizó un mapa mediante inspección visual (Gráfico 3.4), de esta manera se obtuvo las categorías de suelo a utilizar; posterior a la realización del mapa se utilizó la información de la ORSTOM para obtener la textura de los grupos de suelo identificados (Tabla 3.6). Los parámetros adicionales fueron recopilados de la bibliografía, basados en la textura predominante (Tabla 3.6) (Raes, 1996; Digman, 1994).

Tabla 3.6. Resumen de la información de suelos, escala regional.

Parámetro	Suelo	
	Andosol	Leptosol
HYDGRP	C	B
SOL_ZMX (mm)	30	20
SOL_K (mm h ⁻¹)	25.9	124.9
FC (pF=2)	0.31	0.21
WP (pF=4.2)	0.1	0.06
SOL_AWC (mm)	0.21	0.15
SAND (%)	65	60
SILT (%)	20	30
CLAY (%)	15	10
SOL_BD (gr cm ⁻³)	0.8	1
SOL_CBN =	9	5
SOL_Z (mm)	300	200

La Tabla 3.7 y el Gráfico 3.4 muestran una diferencia existente en los datos de la literatura vs. los obtenidos en campo, principalmente en sus características de almacenamiento (retención de agua y profundidad) lo que tiene influencia al momento de simular el flujo base; cabe

recalcar que los Andosoles no muestran diferencia en los mapas debido a que en ambos casos se usó el mismo criterio para delimitarlos (> 3500 m s.n.m.).

Tabla 3.7. Distribución de las categorías de suelo utilizadas.

Suelo	Mapa Investigación Area (%)	Mapa Regional Area (%)	Diferencia (%)
Andosol	3.8	3.8	0.0
Umbrisol	72.6	0.0	72.6
Cambisol	23.5	0.0	23.5
Leptosol	0.0	96.2	-96.2
TOTAL	100.0	100.0	

3.3.6 Uso del Suelo

Se ha recopilado la información mediante los criterios: (1) información a escala regional: En el mapa existente a escala 1: 250,000 realizado por un convenio entre el IGM, SIG-AGRO y el CLIRSEN no existe clase de cobertura en la zona, por lo cual se ha levantado información mediante inspección visual, (2) información a escala de investigación: se ha realizado el levantamiento mediante puntos de GPS. (Gráfico 3.5)

Los parámetros de uso del suelo fueron asumidos por la similitud existente con la base de datos de SWAT los mismos que han sido variados en la calibración. La Tabla 3.8 muestra las clases que han sido asumidas en la calibración definitiva. En este caso las dos escalas estudiadas tienen las mismas clases con diferencia de la superficie.

Tabla 3.8. Clases de Uso del suelo.

Denominación de uso de suelo original	Denominación de uso de suelos SWAT	Código SWAT
Pajonal	Cobertura baja	RNGB
Chaparro	Bosque pequeño mixto	FRST

En la Tabla 3.9 se observa una diferencia únicamente para el caso del pajonal (RNGB). Se puede apreciar que la microcuenca se encuentra en buen estado de conservación ya que en su mayoría se encuentra cubierta de la vegetación natural.

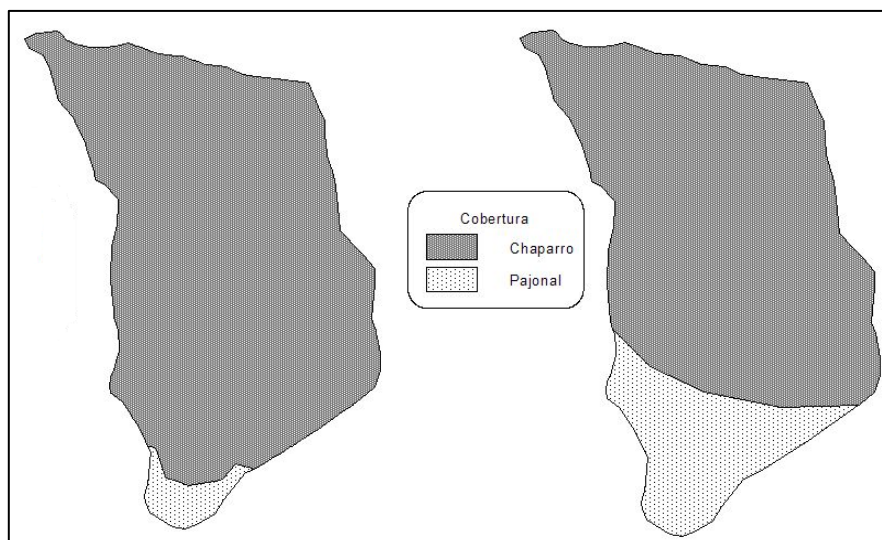


Gráfico 3.5. Mapas de cobertura, izq: escala regional; der: escala de investigación.

Tabla 3.9. Distribución de las categorías de cobertura utilizadas.

Código SWAT	Mapa Investigación Area (%)	Mapa regional Area (%)	Diferencia (%)
RNGB	18.8	3.4	15.4
FRST	81.2	96.6	-15.4
TOTAL	100.0	100.0	

Si realizamos un análisis de los mapas de suelos y cobertura concluiremos que no existe una diferencia significativa en la distribución debido a que SWAT agrega la información en HRUs dominantes. Los Cambisoles y parte de los Andosoles desaparecen en la agregación por lo que los mapas de suelos resultarían iguales. En el caso de la cobertura puede haber mayor diferencia ya que para el caso de la información regional el pajonal desaparece en mayor cantidad comparado con la escala de investigación. En este punto toma importancia la distribución espacial de la lluvia, por lo cual el análisis se centrará mayormente en ese punto.

RESULTADOS Y DISCUSION

3.4 Análisis previo a la calibración

3.4.1 Precipitación

Para el análisis se consideró la distancia de las estaciones a la microcuenca, la correlación entre ellas y las diferencias en la cantidad de precipitación.

(1) La distancia de la estación a la microcuenca es importante ya que el modelo SWAT toma en consideración la misma para distribuir la precipitación. La Tabla 4.1 muestra el orden en que el modelo escogería las estaciones, siendo Namza Lise la más cercana (Gráfico 3.2). Sin embargo la distancia debe ser escogida según la cercanía a la subcuenca de distribución por lo

cual la información del pluviógrafo de Santa Rosa puede ser tomada para las subunidades de la parte alta de la microcuenca

Tabla 4.10. Distancia de los pluviógrafos respecto a la microcuenca.

Pluviógrafos	Distancia (Km)
Namza Lise	1.2
Chico Namza	2.6
Santa Rosa	2.7
Pacchala	3.2
Llagos	5.4
Joyagshi	6.0

(2) La Tabla 4.2 resume los valores de la correlación entre estaciones, se tiene que puntualizar que para el análisis han sido eliminados los días sin precipitación. Debido a que la estación de Namza Lise es la más cercana a la microcuenca regirá como punto de comparación para analizar la similitud de la lluvia. Las estaciones de Chico Namza, Santa Rosa y Pacchala poseen series de precipitación con correlaciones altas (> 0.70) (Bacchi y Kottegoda, 1995), lo cual nos indica similitud en la forma del hietograma.

Tabla 4.11. Valores de correlación de la precipitación entre pluviógrafos.

Pluviógrafos	Llagos	Joyagshi	Pacchala	Santa Rosa	Chico Namza	Namza Lise
Llagos	1.00	0.88	0.69	0.76	0.66	0.62
Joyagshi	0.88	1.00	0.56	0.75	0.55	0.50
Pacchala	0.69	0.56	1.00	0.74	0.84	0.86
Santa Rosa	0.76	0.75	0.74	1.00	0.74	0.74
Chico	0.66	0.55	0.84	0.74	1.00	0.95
Namza Lise	0.62	0.50	0.86	0.74	0.95	1.00

(3) El Gráfico 4.1 indica que existe gran diferencia en la cantidad de precipitación de las distintas estaciones respecto a Namza Lise (entre - 19 y 105%), la información de la estación de Chico Namza posee la menor diferencia (- 19%), mientras la precipitación medida en la estación de Joyagshi posee la mayor diferencia (105%).

Debido a que la cantidad de lluvia depende de la orografía, cercanía al litoral y al oriente las barreras podrían hacer ascender las masas de aire y por lo tanto disminuir la cantidad de precipitación, en consecuencia es importante la adecuada ubicación de las estaciones, los pluviógrafos de Llagos y Joyagshi tienen una fuerte influencia de las lluvias orientales, es por esto que presentan precipitaciones mayores respecto a la zona de estudio (PROMAS/DIUC, 2006).

Como conclusión se puede decir que los pluviógrafos de Namza Lise y Chico Namza presentan semejanza en las precipitaciones, de tal manera que si los mismos son usados en simulaciones del modelo puede no haber diferencia en los resultados. La distancia es un factor importante para correlacionar la precipitación entre estaciones ya que cuando ésta aumenta la

correlación disminuye. El análisis propuesto muestra que no es suficiente utilizar la correlación para analizar la semejanza de la precipitación, esto es apreciable en el caso de los pluviógrafos de Santa Rosa y Pacchala; ya que la precipitación medida presenta una alta correlación sin embargo existe una gran diferencia en cantidad respecto a la estación de Namza Lise. En cuanto a una escala regional, sería muy difícil obtener buenos resultados al momento de la simulación ya que no se tiene similitud de forma en los hietogramas y peor aún en cantidad de lluvia respecto a lo medido en la zona de estudio.

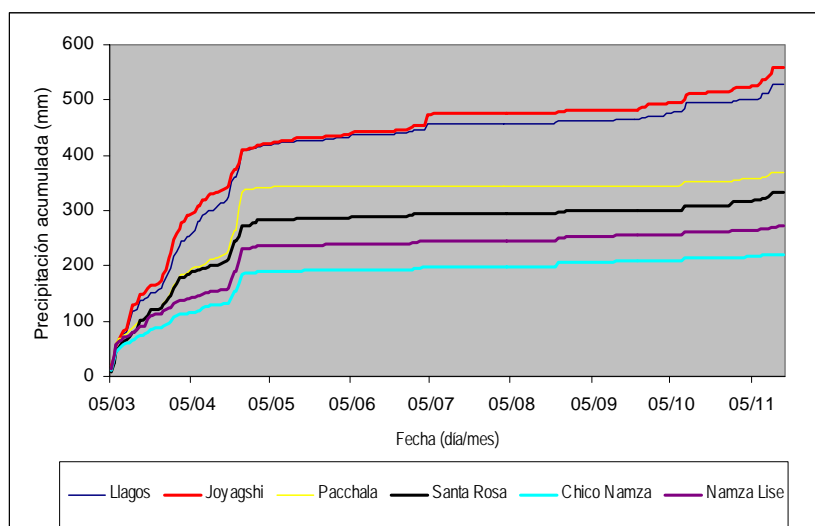


Gráfico 4.1. Precipitación acumulada.

Este análisis muestra los errores que se podrían cometer al escoger una estación que aparentemente es cercana a la zona de estudio; sin embargo esto se desconoce al momento de aplicar un modelo con la información regional o disponible en una zona en particular, induciendo errores en los resultados del modelo, para resolver la inquietud se efectuará un análisis del efecto sobre el comportamiento de los parámetros del modelo.

3.4.2 Caudales

La agregación de la información a caudales diarios subestima los picos, debido a que el tiempo de concentración de la microcuenca es menor a un día, esto lo demuestra la información medida a una resolución de 5 minutos y los gráficos de lluvia-escorrentía realizados; es así que la utilización del modelo se ve limitada dependiendo de la escala de estudio y la aplicación.

En el Gráfico 4.2 se aprecia la separación de los flujos; para lo cual se ha utilizado el modelo WETSPRO, las constantes de recesión fueron de 450 y 10 días para flujo base y subsuperficial respectivamente y el parámetro “w” fue calibrado en 0.6 y 0.11 para flujo base y subsuperficial respectivamente. Debido a que existe muy poco flujo superficial se ha considerado únicamente dos tipos de flujos: base y rápidos (superficial + subsuperficial)

Existe un 40% de flujo base el mismo que es dominante, especialmente durante la época de verano. Durante ese periodo los suelos juegan un papel importante ya que son los responsables del almacenamiento y regulación del caudal.

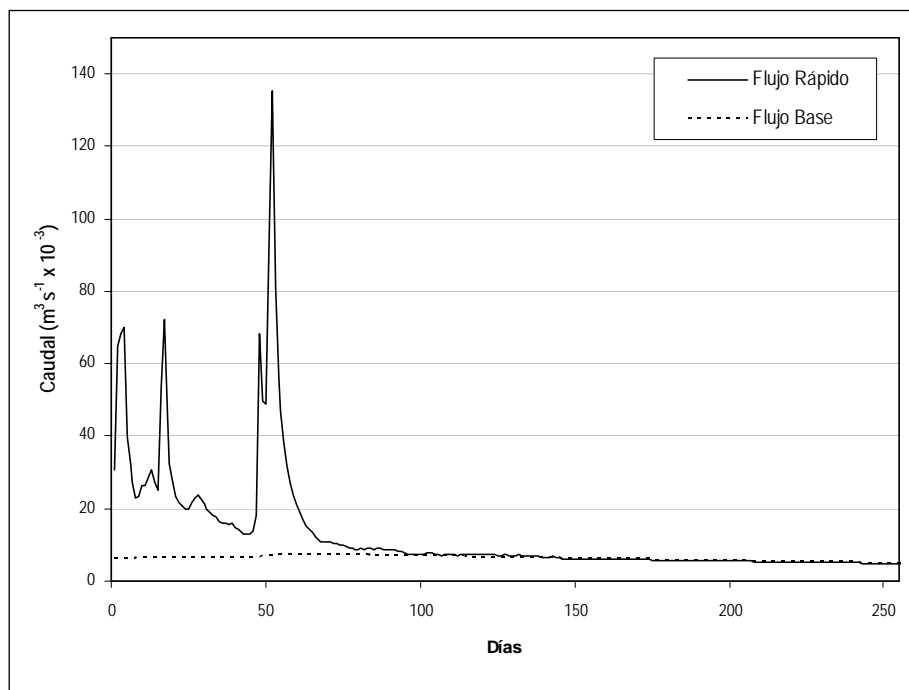


Gráfico 4.2. Separación de flujos durante el periodo de simulación (05/03/2005 a 17/11/2005).

3.4.3 Análisis de Sensibilidad

El análisis cualitativo resuelve las inquietudes de la influencia sobre los diferentes subflujos que tienen cada uno de los parámetros (Tabla 4.3). El Gráfico 4.3 muestra el análisis de la variabilidad cuantitativa mediante estadísticos.

El problema del análisis de sensibilidad es que al ir variando parámetro por parámetro no se considera las interacciones entre los mismos; pero en general durante la calibración del modelo se pudo observar que el comportamiento de los parámetros es similar a lo expresado en la Tabla 4.3.

La Tabla 4.3 muestra la variación en tres escalas (baja, media, alta), la misma que ha sido analizada como positiva cuando al aumentar el valor del parámetro, también lo hacen cada uno de los ítems en análisis (flujo superficial, subsuperficial, base, constantes de recesión y caudal total) y como negativa cuando el efecto es inverso.

El análisis cuantitativo se ha realizado mediante los estadísticos R^2 “coeficiente de correlación” (Sincich et al., 1999) y EF “eficiencia de Nash & Sutcliffe” (Nash & Sutcliffe, 1970). Existe mucha discusión de cual es mejor, del análisis realizado se demuestra que es adecuado una combinación de los dos, ya que en algunas ocasiones no se tiene variación significativa de uno mientras que el otro demuestra lo contrario (p.e. SOL_Z) (Gráfico 4.3). Es importante mencionar que el análisis cuantitativo entrega una idea de sensibilidad global mientras el cualitativo indica el efecto puntual.

Del análisis efectuado (Gráfico 4.3) se concluye que los parámetros considerados sensibles son: longitud media de la pendiente (SLSUBBSN), tiempo de viaje del flujo lateral (LAT_TIME), longitud del canal principal (CH_L2), profundidad del horizonte del suelo (SOL_Z) y almacenamiento inicial de agua en el suelo (FFCB). Sin embargo, existen otros que son importantes cuando se considera la interacción como son: tiempo de desfase de las aguas subterráneas (GW_DELAY), capacidad de agua disponible en el horizonte del suelo (SOL_AWC), conductividad hidráulica saturada (SOL_K) y número de curva (CN2). Los parámetros antes mencionados forman el set de calibración.

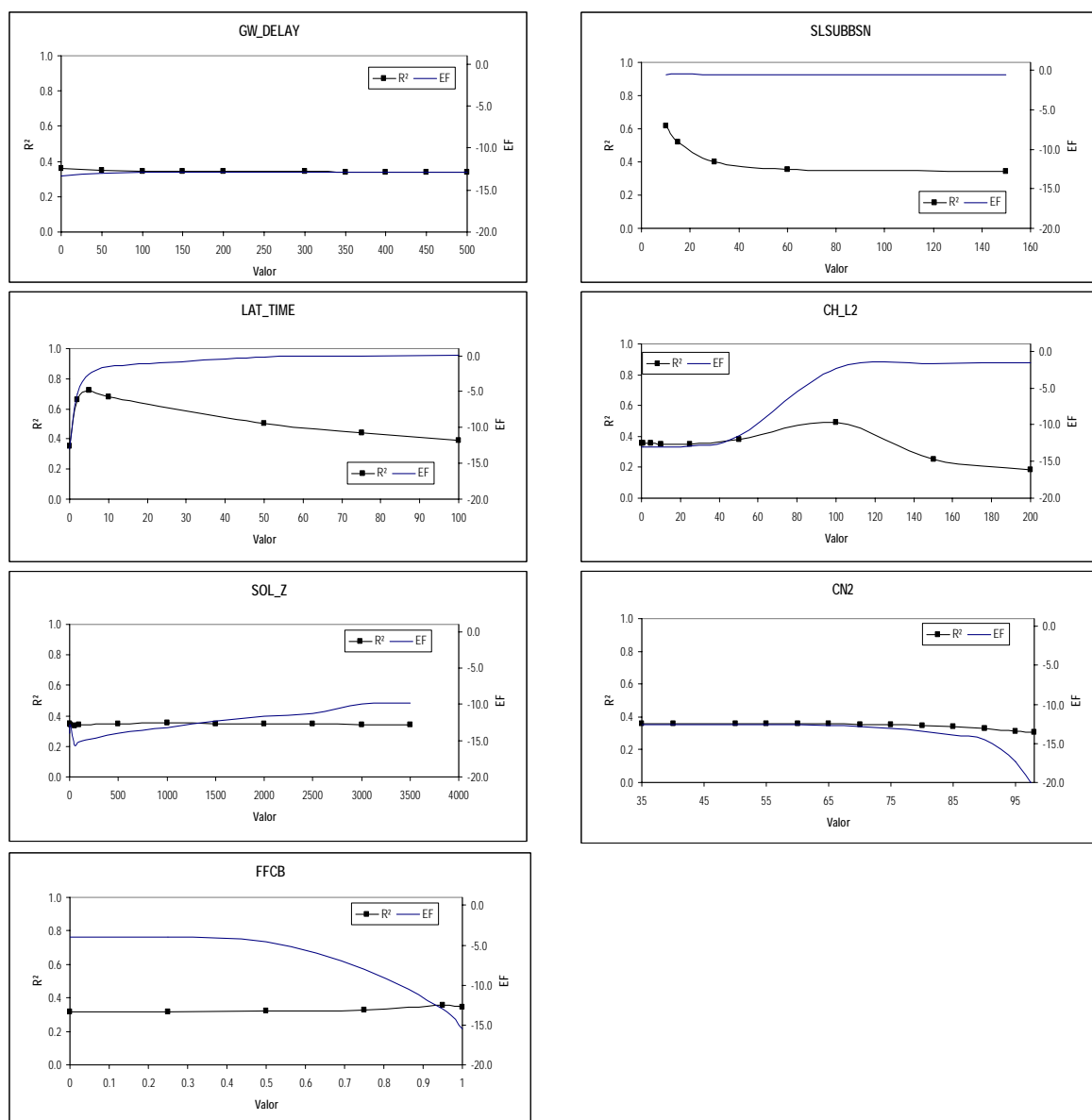


Gráfico 4.3. Análisis de sensibilidad cuantitativo; eje izq. R^2 , eje der. EF.

Tabla 4.12. Análisis de sensibilidad cualitativo.

Grupo	Variable	Definición	Unidad	Rango	VD	VO	INFLUENCIA**							
							Qb	Kb	Qs	Ks	Qp	Kp	Qt	
*.Gw	GW_DELAY	Groundwater delay time	Dias	0 - 500	31	0	- -	+ +						
*.Gw	ALPHA_BF	Baseflow alpha factor	Dias	0 - 1	0.048	1								
*.Gw	GWOMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer required for return flow to occur	mm H ₂ O	0 - 5000	0									
*.Gw	GW_REVAP	Groundwater "revap" coefficient	-----	0.02 - 0.2	0.02									
*.Gw	REVAPMN	Threshold depth of water in the shallow aquifer for revap or percolation to the deep aquifer to occur	mm H ₂ O	0 - 500	1									
*.Gw	RCHRG_DP	Deep aquifer percolation fraction.	-----	0 - 1	0.05									
*.Gw	GWHT	Initial groundwater height	m	0 - 25	1									
*.Gw	GW_SPYLD	Specific yield of the shallow aquifer	m ³ m ⁻³	0 - 0.4	0.003									
*.Hru	SLSUBBSN	Average slope length	m	10 - 150	0.05	10	+ + +	- - -	- - -	- - -	-			- -
*.Hru	SLOPE	Average slope steepness	m m ⁻¹	0 - 0.6	0.78									
*.Hru	OV_N	Manning's "n" value for overland flow	-----	0.01 - 30	0.1									
*.Hru	LAT_TTIME	Lateral flow travel time	Dias	0 - 180	0	5	+ + +	- - -	- - -	+ + +	- - -	+ +		- -
*.Hru	SLSOIL	Slope length for lateral subsurface flow	m	0 - 0.6	0	0.6			+	+	- -			
*.Hru	CANMX	Maximum canopy storage	mm H ₂ O	0 - 100	0									
*.Hru	ESCO	Soil evaporation compensation factor	-----	0 - 1	0									
*.Hru	EPCO	Plant uptake compensation factor	-----	0 - 1	0									
*.Sub	CH_L1	Longest "tributary" channel length in subbasin	Km	0.05 - 200	1.71	200							- -	
*.Sub	CH_K1	Effective hydraulic conductivity in tributary channel alluvium	mm h ⁻¹	0 - 150	0.5	150							- -	
*.Sub	CH_N1	Manning's "n" value for the tributary channels	-----	0.01 - 30	0.014	10		- -					- -	
*.Rte	CH_W2	Average width of main channel at top of bank	m	0 - 1000	0.653	0	- -							- -
*.Rte	CH_D	Depth of main channel from top of bank to bottom	m	0 - 30	0.083									
*.Rte	CH_S2	Average slope of main channel along the channel length	m m ⁻¹	0 - 10	0.01									
*.Rte	CH_L2	Length of main channel	Km	0 - 200	1.034	100	- - -		+ + +	- - -	- - -	+ + +		- - -
*.Rte	CH_N2	Manning's "n" value for the main channel	-----	0 - 0.3	0.014									
*.Rte	CH_K2	Effective hydraulic conductivity in main channel alluvium	mm h ⁻¹	0 - 150	0									
*.Rte	CH_COV	Channel cover factor	-----	0 - 1	0									
*.Rte	ALPHA_BNK	Baseflow alpha factor for bank storage	Dias	0 - 1	0									
.Sol	SOL_Z	Depth from soil surface to bottom of layer	mm	0 - 3500	M	1000	- - -	+ +	- -			- -		- - -
.Sol	SOL_AWC	Available water capacity of the soil layer	mm H ₂ O/mm suelo	0 - 1	M	0.4			-			- -		
.Sol	SOL_K	Saturated hydraulic conductivity	mm h ⁻¹	0 - 2000	M	50	+		+ +			-		+
*.Mgt	CN2	Curve number	-----	35 - 98	73, 74**	75	- -		+			+ +		+
*.Bsn	SURLAG	Surface runoff lag coefficient	-----	1 - 24	4									
*.Bsn	FFCB	Initial soil water storage expressed as a fraction of field capacity water content	-----	0 - 1	0.95	0.95	+ +		+ +			+ + +		+ +

VD Valor por defecto
 VO Valor óptimo
 Qb Flujo Base (m³/s)
 Kb Constante de recesión del flujo base (días)
 Qs Flujo Sub Superficial (m³/s)
 Ks Constante de recesión del flujo sub superficial (días)
 Qp Flujo Superficial (m³/s)
 Kp Constante de recesión del flujo superficial (días)
 Qt Caudal total
 - Valor obtenido de mediciones en campo
 ** Valores correspondientes a los diferentes tipos de cobertura existente
 *** La influencia es analizada siempre en sentido ascendente del valor (min a max)

	Alta
	Media
	Baja

En la Tabla 4.3 se muestra que los parámetros importantes al momento de simular el flujo base son: GW_DELAY, SLSUBBSN, LAT_TIME, CH_L2 y SOL_Z, mientras que al momento de simular los flujos rápidos los parámetros en consideración son: SLSUBBSN, LAT_TIME, CH_L2, CN2, FFCB; ésta separación es importante al momento de la calibración ya que se conoce el efecto de cada uno de los parámetros de calibración. Los valores óptimos listados no pueden ser considerados como los valores que tomarán los parámetros en el modelo al momento de la calibración ya que los mismos no consideran las

interacciones; estos valores cambian según el estadístico escogido, por ejemplo SOL_Z y CH_L2 tienen distinto valor óptimo según el R^2 y EF, los Gráficos 4.3 son importantes únicamente desde el punto de vista de la sensibilidad y no de valor.

El análisis de sensibilidad del presente trabajo no puede ser extrapolado a otras ubicaciones ya que el mismo representa únicamente las características particulares de la zona y de la escala de microcuencia. Para otras ubicaciones deberá repetirse el trabajo realizado.

3.5 Evaluación del modelo

Se realizó dos calibraciones para analizar los objetivos propuestos. La primera con la información de investigación y la segunda con la información regional. La calibración en el caso de las dos escalas de análisis se ha realizado únicamente con los parámetros considerados en el set de calibración. La evaluación cuantitativa del desempeño del modelo se considerará aceptable para valores de R^2 y EF mayores a 0.70 (Zarate, 2004; Bacchi y Kottegoda, 1995).

3.5.1 Escala de Investigación

La calibración efectuada durante el periodo de análisis (05/03/2005 – 17/11/2005) muestra en forma general que el modelo simula adecuadamente los caudales de salida. La calibración se ha efectuado desde el punto de vista global es decir no se ha puesto énfasis en un punto específico como: máximos, mínimos o volumen, esto no quiere decir que el modelo sea incapaz de simular de mejor manera uno de los puntos antes expuestos.

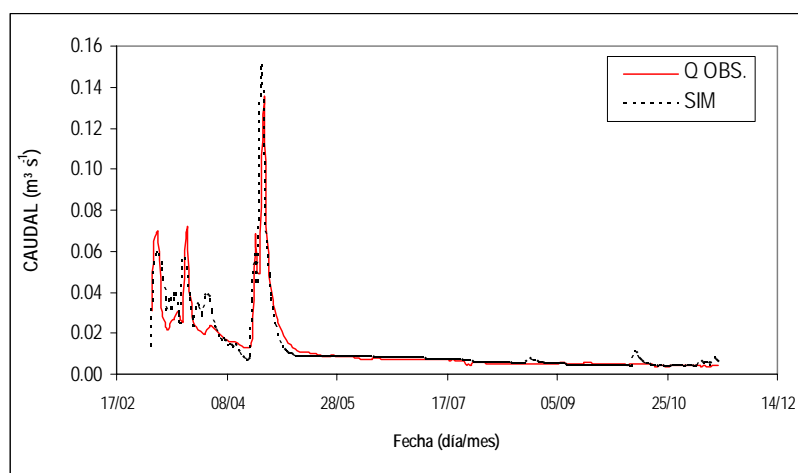


Gráfico 4.4. Comparación de los datos observados y simulados vs el tiempo.

En el Gráfico 4.4 se aprecia que el modelo predice el flujo base de una manera casi perfecta; cabe recalcar que únicamente se consideró el almacenamiento de agua en el suelo y no el módulo de acuíferos profundos, por lo cual es importante que se haya podido simular ese flujo. Los caudales picos se han predecido con un día de anticipación, esto se debe a la inhabilidad del modelo para predecir las interacciones subsuperficiales y superficiales ya que el “time step” es diario. El volumen ha sido simulado adecuadamente ya que la variación es únicamente de un 6.2% (Tabla 4.4), pero generalmente se encuentran sobrestimados (Gráfico 4.5). Como se manifestó anteriormente el “time step” debe ser menor al tiempo de

concentración y en el caso de la microcuenca de Lise esto no ocurre debido a la topografía y principalmente por la escala de estudio (Spruill et al., 2001). Se tiene que recalcar que los resultados del modelo deben ser corroborados en la etapa de verificación (Yu et al., 2001), ya que la misma no ha sido efectuada por tener un limitado set de datos históricos como entrada.

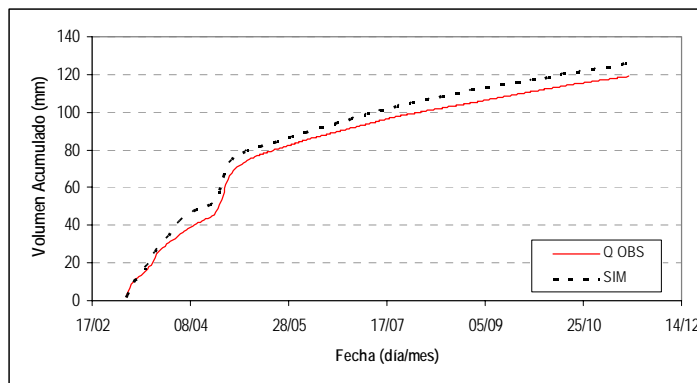


Gráfico 4.5. Flujos acumulados.

Los errores encontrados son mayores durante la época de invierno, como ya se dijo antes la época de verano es simulada de mejor manera (Gráfico 4.6) lo cual lo corrobora los valores de RMSE encontrados (Tabla 4.4). En la Tabla 4.4 se muestran los valores de los parámetros estadísticos donde se determina valores de 0.76, 0.96 y 0.76 para los flujos total, base y rápidos respectivamente, los mismos que muestran la casi perfecta simulación del flujo base, y la aceptable predicción de los flujos rápidos.

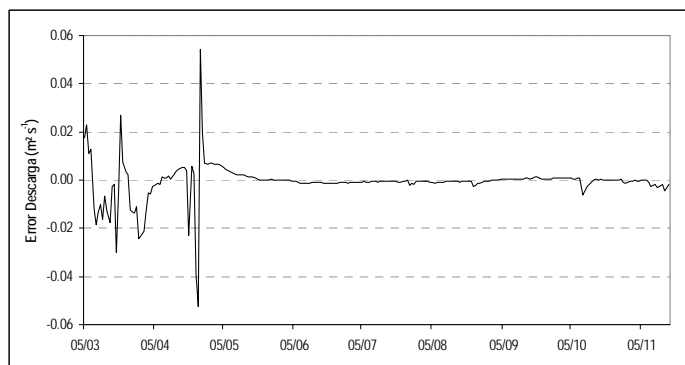


Gráfico 4.6. Residuales.

Tabla 4.13. Parámetros estadísticos y variación del volumen de salida.

	R²	RMSE	EF	Δ	Vol
Flujo Total	0.781	0.008	0.757	6.2	
Flujo Base	0.994	0.148	0.96	2.2	
Flujos	0.781	7.688	0.758	10.1	

3.5.2 Escala Regional (Información disponible en el Ecuador)

El análisis de los resultados de la escala regional muestra problemas durante todo el periodo de simulación debido principalmente a las diferencias existentes en la precipitación; el pluviógrafo de Joyagshi tiene una influencia debido a las lluvias orográficas de la costa por estar en el piso de las nubes y del oriente por su cercanía, por lo cual registra mayores precipitaciones las mismas que no son representativas de la zona de estudio (PROMAS/DIUC, 2006).

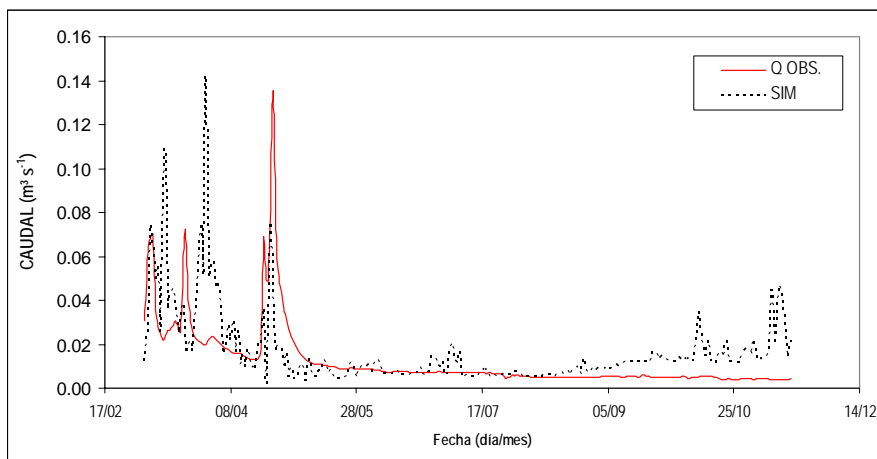


Gráfico 4.7. Comparación de los datos observados y simulados vs el tiempo. Escala Regional.

En el Gráfico 4.7 se presenta el problema antes mencionado, se observa que los picos son precedidos en distinta posición a los observados, esto es debido a que las precipitaciones existentes en Joyagshi no tienen respuesta de caudal medida por lo que el modelo no tiene resultados aceptables como es de esperarse. El flujo base es en general sobreestimado, ya que en la microcuenca no existen lluvias durante ese periodo mientras que las lluvias del oriente tienen influencia en el pluviógrafo a escala regional.

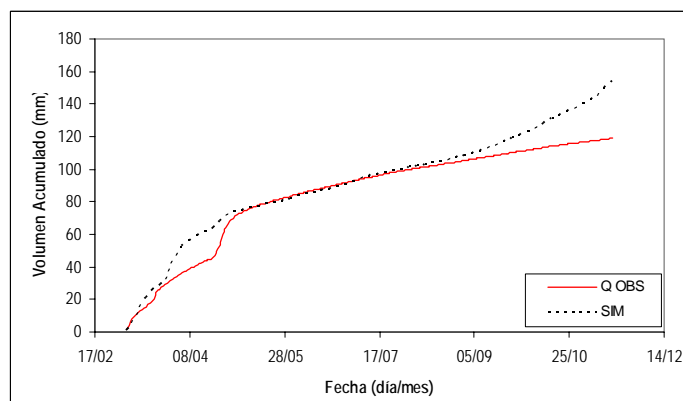


Gráfico 4.8. Flujos acumulados. Escala regional.

Las diferencias en volumen son muy altas, en general se tiene una diferencia de 29%, el problema se encuentra al final del periodo donde la influencia del oriente en la lluvia es mayor (Gráfico 4.8). Los residuales muestran valores muy altos, hasta de un 95% respecto al caudal pico y hasta de un 250% respecto al caudal medido en el día respectivo (Gráfico 4.9).

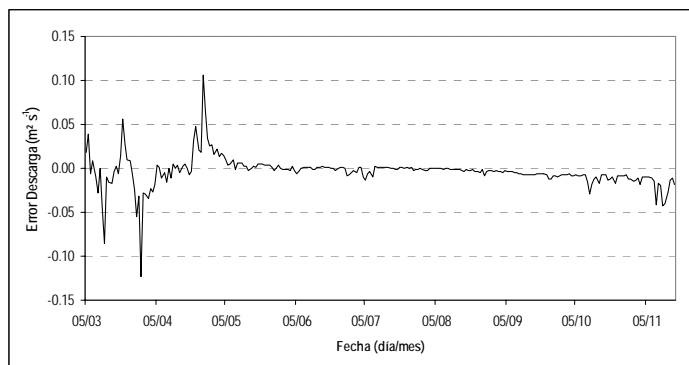


Gráfico 4.9. Residuales. Escala regional.

Tabla 4.14. Parámetros estadísticos y variación del volumen de salida. Escala Regional.

	R²	RMSE	EF	Δ Vol
Flujo Total	0.183	0.018	-0.167	29.204
Flujo Base	0.775	1.276	-1.975	18.970
Flujos	0.186	15.519	-1.717	104.556

Los parámetros estadísticos demuestran que un valor alto de R² no necesariamente es un indicativo de una buena predicción ya que en el caso del flujo base se tiene un valor de 0.78 respecto a una EF = -1.98 que es un parámetro que se ajusta más a la realidad (Tabla 4.5). En general los flujos simulados son de muy mala calidad. Recordemos que la influencia de escala de los suelos y cobertura no es tan influyente como la precipitación en el caso de estudio ya que la agregación interna prácticamente redujo o eliminó ésta posibilidad; es por esto que se ha puesto más énfasis en la lluvia.

3.6 Análisis del efecto de escala

Este efecto ha sido analizado desde dos puntos de vista: (1) sobre el comportamiento del modelo; cuyo objetivo es analizar el efecto de la variabilidad espacial de la lluvia sobre los resultados del modelo, se ha utilizado la calibración realizada con la información de investigación para este efecto y únicamente se ha cambiado los pluviógrafos de entrada realizando la evaluación de forma individual. (2) sobre los parámetros del modelo; se analiza el efecto de calibrar un modelo con las diferentes escalas de información existentes.

3.6.1 Sobre el comportamiento del modelo

Cuando hablamos de zonas montañosas y de lluvia orográfica la no estacionalidad en tiempo y espacio de la lluvia, se ve aumentada; es decir la precipitación es de carácter tri-dimensional (Seed, 2004; Collier, 1996). Es fundamental analizar los efectos de la inadecuada medición de

la variabilidad espacial de la lluvia. Los efectos pueden ser diferentes según la aplicación que se desee.

El Gráfico 4.10 muestra la variación de los parámetros estadísticos utilizados para analizar el comportamiento del modelo. Los valores encontrados de R² para las simulaciones de flujo base con la información de precipitación de los diferentes pluviógrafos mostraron ser aceptables sin importancia de la variabilidad de la lluvia; sin embargo, los valores de EF muestran lo contrario, es decir que la precipitación es altamente influyente en los resultados del modelo. Las simulaciones efectuadas con los pluviógrafos mas cercanos (Lise y Chico Namza) arrojaron valores aceptables de EF, esto significa que los caudales simulados se asemejan a los observados.

Los valores de RMSE muestran que los flujos rápidos presentan mayor error, pero los menores valores corresponden a las simulaciones con las precipitaciones de los pluviógrafos de Lise y Chico Namza. Los mismos resultados se obtienen en la variación de los volúmenes. Los valores exactos se aprecian en la Tabla 4.6.

Tabla 4.15. Parámetros estadísticos y variación del volumen de salida para las diferentes simulaciones.

	Pluviógrafos	R ²	RMSE	EF	Δ	Vol
Flujo Total	Calibración	0.781	0.008	0.757	6.2	
	Lise**	0.793	0.008	0.773	2.2	
	Chico	0.782	0.008	0.758	6.3	
	Santa Rosa	0.576	0.013	0.350	34.2	
	Pacchala	0.521	0.025	-1.540	75.3	
	Llagos	0.439	0.029	-2.418	132.2	
	Joyagshi***	0.323	0.031	-2.912	139.5	
Flujo Base	Calibración	0.994	0.148	0.960	2.2	
	Lise	0.996	0.065	0.992	0.7	
	Chico	0.980	0.502	0.540	7.8	
	Santa Rosa	0.923	2.952	-	39.3	
	Pacchala	0.860	4.830	-	69.8	
	Llagos	0.864	8.785	-	130.2	
	Joyagshi	0.897	10.082	-	150.6	
Flujos Rápidos	Calibración	0.781	7.688	0.758	10.0	
	Lise	0.793	7.424	0.774	4.8	
	Chico	0.782	7.670	0.759	10.1	
	Santa Rosa	0.550	12.217	0.388	24.7	
	Pacchala	0.510	23.862	-1.336	72.9	
	Llagos	0.445	25.379	-1.64	125.3	
	Joyagshi	0.297	27.053	-2.00	120.7	

* Calibración = Pluviógrafos (Lise + Santa Rosa)

** El modelo ha sido corrido únicamente con el pluviógrafo indicado

*** Pluviógrafo ha escala regional

En resumen se puede decir que el modelo es altamente afectado por la variabilidad espacial de la lluvia; las simulaciones con los pluviógrafos de Lise y Chico Namza arrojaron resultados

iguales o mejores a los encontrados en la calibración con la información a escala de investigación, se concluye que con un solo pluviógrafo los resultados encontrados fueron aceptables, por lo cual éste puede ser suficiente siempre que se encuentre en la ubicación correcta. La ubicación de los pluviógrafos es de suma importancia ya que la influencia orográfica y la cercanía al oriente tienen fuerte influencia en la variabilidad de la lluvia.

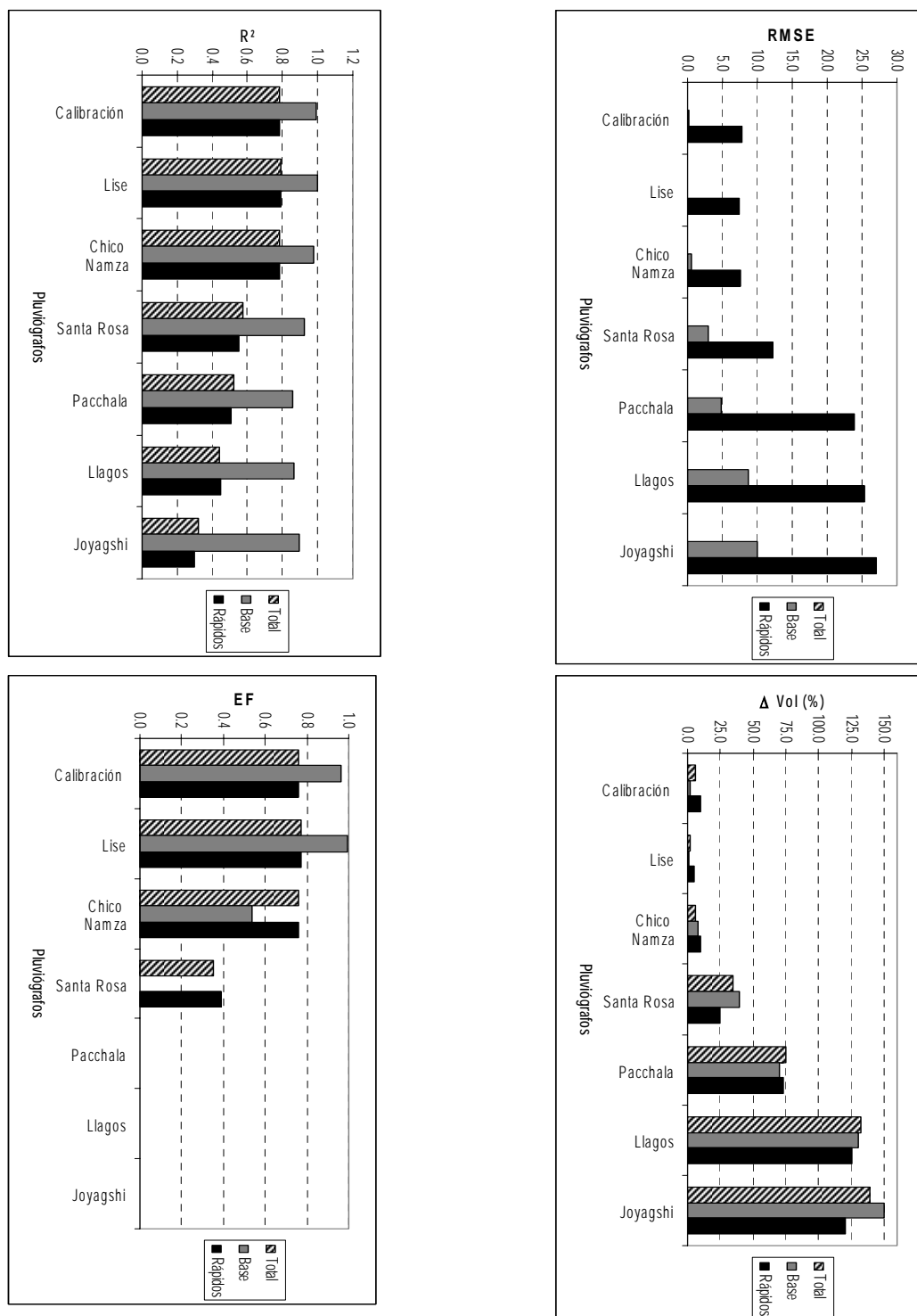


Gráfico 4.10. Variación de los parámetros estadísticos respecto a los pluviógrafos analizados.

El pluviógrafo de Joyagshi muestra éste efecto ya que en 6 Km de distancia la precipitación es totalmente diferente a la medida en la zona de estudio; esto pone en evidencia el error que se comete al utilizar la información del mismo en la simulación de caudales.

La influencia de la topografía como en el caso del cerro Puñay juega un papel importante en la cantidad de lluvia caída en el pluviógrafo de Santa Rosa (PROMAS/DIUC, 2006) que aunque se encuentra a una distancia de 2.7 Km los resultados de la simulación mostraron ser inadecuados; cabe decir que la estación de Chico Namza presenta la misma distancia a la microcuenca; esto nos indica que no podemos hablar de una distancia apropiada para caracterizar la variabilidad espacial de la lluvia adecuadamente, sino mas bien de la ubicación del pluviógrafo respecto al efecto orográfico (piso de nubes y barreras topográficas) y sobre todo la cercanía al oriente.

3.6.2 Sobre los parámetros del modelo

En muchas aplicaciones los valores de los parámetros no corresponden a la realidad, es más, es común que se busque únicamente predecir de manera adecuada los caudales; por lo que la presente investigación analiza los valores producto de las calibraciones.

Los parámetros calibrados son en su mayoría resultantes del análisis de sensibilidad, más algunos que son importantes al momento de las interacciones entre los mismos. La Tabla 4.7 muestra que los valores de defecto difieren mucho de los calibrados, esto es debido a que el modelo fue creado para otras situaciones.

El GW_DELAY es el tiempo requerido para que el agua pase de la parte baja de la zona de raíces a la zona saturada, esto depende de la fluctuación del nivel freático; los valores obtenidos en las calibraciones son elevados si consideramos que los suelos de la zona son poco profundos.

Tabla 4.16. Valores de los parámetros producto de las calibraciones.

Grupo	Variable	Unidad	Rango	VD	VC	VCR
*.Gw	GW_DELAY	Días	0 - 500	31	170	450
*.Hru	SLSUBBSN	M	10 - 150	0.05	20.05	83.05
*.Hru	LAT_TTIME	Días	0 - 180	0	3.3	0.5
*.Rte	CH_L2	Km	0 - 200	1.034		50
.Sol	SOL_Z	mm	0 - 3500	T		700
.Sol	SOL_AWC	mm mm ⁻¹	0 - 1	T	+0.037	0.04
.Sol	SOL_K	mm h ⁻¹	0 - 2000	T		124.9
*.Mgt	CN2	-----	35 - 98	73,	65, 66	65
*.Bsn	FFCB	-----	0 - 1	0.95	0.78	0

VD Valor por defecto

VC Valor Calibración a escala de Investigación

VCR Valor Calibración a escala Regional

***** Valor obtenido de tablas

****** Valores correspondientes a los diferentes clases existente

La longitud de la pendiente (SLUBBSN) tiene valores dentro del rango; sin embargo, los de escala regional son más aproximados a la realidad, la variación entre los valores calibrados es mayor al 400%. El tiempo de viaje del flujo lateral (LAT_TIME) es de difícil análisis ya que es un parámetro que no puede ser medido y debe ser calibrado; sin embargo, ese parámetro es de suma importancia para el flujo base.

La longitud del cauce principal (CH_L2) es un parámetro que no debería ser calibrado ya que el mismo es independiente de la escala de la información de entrada; sin embargo, es preciso ajustarlo en el caso de la información a escala regional ya que es necesario atenuar los picos de escorrentía, si analizamos esto se debe a que el parámetro es usado durante la fase de tránsito de los caudales; el valor obtenido a ésta escala es sobreestimado ya que en ningún caso la microcuenca tiene una distancia de 50 Km, en el caso de la escala de investigación el valor es subestimado ya que el valor obtenido en los mapas es de 1.2 Km aproximadamente, éste parámetro es el de mayor variación del set con un 500% aproximadamente.

Los parámetros del suelo como son la profundidad del estrato (SOL_Z) y la cantidad de agua disponible (SOL_AWC) no presentan diferencia ya que las calibraciones han llegado prácticamente a los mismos valores, la conductividad hidráulica saturada (SOL_K) tiene una fuerte diferencia ya que el exceso de precipitación existente en la información a escala regional necesita ser almacenada para así atenuar los caudales.

Debido a que los mapas de cobertura por la agregación interna resultaron ser iguales, los valores de los números de curva (CN2) no cambian o no son influyentes en el efecto de escala. Un parámetro muy importante el contenido inicial de humedad (FFCB); la fecha de inicio de las simulaciones corresponde a la época de invierno por lo que el suelo está casi saturado; si analizamos que ese parámetro es una fracción de la capacidad de campo ambas escalas de análisis subestiman el valor real. La variación de los valores calibrados es alta debido a que para atenuar el exceso de precipitación existente en el pluviógrafo de Joyagshi el suelo debe encontrarse sin humedad para así almacenar la mayor cantidad de agua posible.

Como se observa los valores de los parámetros son altamente dependientes de la escala, sin embargo no significa que una escala precisa tenga valores que representen la realidad. Este es un problema que debe ser analizado a fondo sin embargo aquí se pone en manifiesto la incertidumbre producto de la inadecuada caracterización de los parámetros de entrada y principalmente de la precipitación.

Muchos autores han estudiado la solución al problema y coinciden que es posible obtener valores adecuados con una calibración y verificación multi sitio y multi variable (Cao et al., 2003; Refsgaard, 1997), ya que de este modo se elimina la dependencia de un solo tipo de análisis, por lo que futuros trabajos deben ser encaminados hacia el estudio del problema. Queda sin embargo la inquietud de los valores reales de los parámetros calibrados.

3.6.3 Sobre el balance interno

Es importante que los resultados arrojados por el modelo además de predecir los caudales u otras variables de manera aceptable cumplan con las consideraciones de balances propuestos en la estructura del mismo. Es así que el balance propuesto anteriormente debe ser cumplido para que un modelo sea aplicable en una determinada área de estudio.

La Tabla 4.8 muestra los valores de los diferentes parámetros que intervienen en el balance para el caso de las dos calibraciones propuestas en el estudio. Los resultados muestran que en el caso de la escala de investigación el error es de 191 mm el mismo que se debe a la incertidumbre existente en la calibración pero que en general puede ser aceptable; no así para el caso de la escala regional donde el error existente es de 504 mm lo cual es demasiado alto, el error promedio diario encontrado es de 1.82 mm. Se aprecia además que el parámetro dominante es el contenido de agua en el suelo (SW) ya que el almacenamiento de agua es debido a la capacidad de retención existente en los suelos de la microcuenca.

Se puede decir que los resultados del balance interno son una herramienta indispensable al momento de la implementación de un modelo, los mismos que permiten identificar los errores debido a la mala caracterización de los parámetros utilizados en el balance del agua.

Tabla 4.17. Balance del ciclo hidrológico de SWAT.

Parámetro	Investigación	Regional	Unidad
SWt	51357.168	9344.094	mm
PPT	280.571	558.877	mm
SURQ	2.232	0.937	mm
PET	156.930	191.949	mm
PERC	77.076	612.956	mm
GWQ	51.588	199.154	mm
SW _o	51547.962	9848.142	mm
Diferencia	-190.794	-504.048	mm
Error promedio	0.078	-1.815	mm
Coef. Escorrentía	0.45	0.28	

4 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

En términos generales se puede concluir que la precisión de los resultados del modelo son dependientes de la calidad de los datos de entrada, estructura del modelo y calibración. La experiencia que adquiera el modelador y el conocimiento del modelo es básica para simular las diferencias entre picos y flujo base.

Los resultados del modelo son afectados por el proceso de preparación de la información de entrada y por la agregación interna del modelo. Debido a que los parámetros de entrada son calibrados no es necesario levantarlos de forma precisa, esto no mejora el detalle de la resolución sino más bien incrementa el requerimiento computacional y principalmente el costo de implementación del modelo.

El análisis de sensibilidad es una herramienta muy importante para reducir la sobreparametrización y especialmente identificar el efecto puntual de los parámetros. Los resultados del análisis de sensibilidad del presente trabajo no pueden ser extrapolado a otras ubicaciones ya que los mismos representan únicamente las características particulares de la zona y de la escala de microcuenca; para otras ubicaciones deberá repetirse el trabajo realizado. Cabe recalcar que el análisis cuantitativo entrega una idea de sensibilidad global

mientras el cualitativo indica el efecto puntual de los parámetros de análisis sobre los resultados.

Los resultados obtenidos en la modelación fueron favorables en el caso de la escala de investigación, no así para la escala regional donde los mismos fueron de mala calidad. Se observó que el parámetro más importante en los resultados es la precipitación ya que una mala estimación de la misma no permite una adecuada calibración del modelo y principalmente dificulta encontrar los valores adecuados de los parámetros. Esta aplicación en particular fue insensible a la escala de los suelos y cobertura ya que debido a la agregación interna, los mismos no influyeron en los resultados; sin embargo para una cuenca con mayor variabilidad estos pueden ser altamente influyentes.

El comportamiento del modelo fue altamente afectado por la variabilidad espacial de la lluvia; las simulaciones con los pluviógrafos de Lise y Chico Namza arrojaron resultados iguales o mejores a los encontrados en la calibración a escala de investigación, por lo que se concluye que un solo pluviógrafo es suficiente para obtener resultados iguales a los logrados con la red completa siempre que el mismo se encuentre ubicado correctamente. La ubicación de los pluviógrafos es de suma importancia ya que la influencia orográfica y la cercanía al oriente tienen fuerte influencia en la variabilidad de la lluvia como fue en el caso del pluviógrafo de Joyagshi.

Los valores de los parámetros son altamente dependientes de la escala, sin embargo no significa que una escala más densa entregue simulaciones más precisas. Del análisis se concluye que la escala de investigación arrojó valores con un significado más real que los obtenidos a una escala regional; este análisis es importante ya que en ocasiones se pueden obtener resultados de caudales satisfactorios con valores irreales de los parámetros. De ahí que la parametrización del modelo es más importante que los resultados obtenidos, ya que la misma evalúa la habilidad de la estructura del modelo para predecir una variable de salida.

El balance interno del modelo fue también afectado por la escala de los parámetros de entrada ya que se observó que para el caso de la escala de investigación el error fue de 191 mm mientras que para la escala regional el mismo fue de 504 mm. El balance interno es una herramienta indispensable al momento de la implementación de un modelo, ya que nos permite identificar los errores debido a la mala caracterización de los parámetros utilizados en el balance del agua.

Por las condiciones económicas y de ubicación del Ecuador, es muy difícil cubrir las necesidades de información para la adecuada implementación de modelos hidrológicos, por lo que la aplicación de un modelo semi – distribuido disminuye el costo de implementación del mismo y es una herramienta útil para el manejo de los recursos hídricos y por ende de los recursos naturales.

Con la información existente en el Ecuador no es posible realizar simulaciones a escala de microcuenca y de ninguna manera se puede utilizar la misma en planes de manejo de cuencas a esta escala, ya que los resultados obtenidos tendrían errores similares a los encontrados en la investigación. En el caso de la información de suelos y cobertura la inspección visual de los mismos arrojó mejores resultados que los levantados a escala regional. Esta investigación no está encaminada a criticar la información existente en el Ecuador ya que la misma ha sido

obtenida con propósito regional o de país, pero sí su aplicación sin el entendimiento de las escalas de simulación y peor aún si ésta sirve para tomar decisiones sobre el manejo de los recursos naturales.

Finalmente podemos decir que los modelos hidrológicos como SWAT son una herramienta importante en el manejo de los recursos; sin embargo, su uso no está encaminado a solucionar los problemas en el manejo sino más bien a identificar los mismos y principalmente a conocer los procesos que dominan una zona de estudio.

4.2 RECOMENDACIONES

Es recomendable realizar una agregación previa a la implementación del modelo ya que esto reduce los requerimientos computacionales así como el tiempo invertido en la calibración. La agregación se la puede efectuar en los mapas y en los parámetros; en los primeros se lo debe realizar mediante inspección visual y en los segundos según las diferencias hidrológicas existentes en los parámetros, por ejemplo si dos suelos tienen diferentes características químicas no significa que sean hidrológicamente diferentes.

Se recomienda realizar investigaciones que permitan definir adecuadamente el CSTV, nivel de agregación de los HRUs y el tamaño de celda del DEM. Estos influyen en la agregación interna del modelo teniendo efecto significativo en los resultados, ya que algunas clases de suelos y cobertura desaparecen, eliminándose con ellas el detalle de la escala.

Es recomendable realizar un análisis de la distribución de los pluviógrafos realizado por SWAT ya que la técnica que se usa actualmente no es adecuada en las condiciones de montaña debido a que toma en consideración únicamente la distancia; es mejor eliminar de la red de pluviógrafos alguna estación que muestren diferencias significativas y que se encuentre geográficamente cerca, que afectar la calidad de los resultados producto de la simulación.

Antes de utilizar el modelo se recomienda efectuar el análisis de la aplicación y la escala sin olvidarse que estas van de la mano, ya que al ser SWAT un modelo de tiempo de paso “time step” diario se podría cometer errores para una aplicación determinada (p.e. análisis de eventos extremos a escala de microcuenca (Lise)).

Se tiene que recalcar que los resultados del modelo deben ser ratificados en la etapa de verificación ya que no se lo ha podido realizar por el limitado set de datos históricos de entrada; debido a que la verificación es indispensable para analizar las virtudes del modelo fuera del periodo de información con el cual se efectuó la calibración (Refsgaard y Knudsen, 1996).

En la presente investigación queda la inquietud de si los valores de los parámetros de calibración son reales o no. Para intentar resolver la misma se recomienda realizar una calibración y verificación multi sitio y multi variable, ya que de la manera se elimina la dependencia de los resultados hacia una sola variable (Cao et al., 2003; Refsgaard, 1997).

Es necesario definir la relación entre escala y tipo de estudio, por lo cual es indispensable contar con la información adecuada. La investigación pone en evidencia la falta de recolección de información en el Ecuador a una escala apropiada; por lo que es recomendable

realizar la obtención de la misma a una escala que permita utilizar herramientas como modelos hidrológicos, que son útiles para el manejo de los recursos hídricos.

5 REFERENCIAS

- Ambroise, B. y Aduizian-Gerard, J., 1989. Test of a trigonometrical model of slope rainfall in a small rengenbach catchment, Swiss Federal Institute of Technology, 81-85
- Arnold, J. G., Allen, P. M., y Bernhardt, G. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.* 142(1/4); 47
- Avanidou, T. y Paleologos, E., 2002. Infiltration in stratified, heterogeneous soil: Relative importance of parameters and model variations, *Water Resour. Res.*, 38(11), 1232
- Badas, M. G., Sulis, M., Deidda, D., Piga, E., Marrocu, M. y Paniconi, C., 2003. Evaluation of SWAT Streamflow Components for the Araxisi Catchment (Sardinia, Italy) En: 2nd International SWAT Conference, TWRI Technical Report 266, Bari – Italy, 36-41
- Bacchi, B. y Kottegoda, N. T., 1995. Identification and calibration of spatial correlation patterns of rainfall, *J. Hydrol.* 165, 311-348
- Beven, K. J. y Kirkby, M. J., 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology, *Hydrol. Sci. Bull.* 24, 43-69
- Beven, K. J., Lamb, R., Quinn, P. F. y Romanowicz, R., Freer, J., 1995. TOPMODEL. En: *Computer Models of Watershed Hydrology* (ed. Por Singh, V. P.). Water Resources Publications, USA. 627-668
- Beven, K.J., 1996. A Discussion of Distributed Hydrological Modelling, In: *Distributed Hydrological Modelling*, Science and Technology Library, 255-278.
- Beven K.J., 2000. On the future of distributed modeling in hydrology, *Hydrol. Process.*(14), 3183 - 3184.
- Braud, I., Fernandez, P. y Bouraoui, F., 1999. Study of the rainfall-runoff process in the Andes region using a continuous distributed model, *J. Hydrol.* 216, 155-171
- Cisneros, 1996. Implementación del modelo matemático de simulación del proceso de erosión (SWAT) en la cuenca del río paute, aplicación a la minicuenca del río tabacay, Primer Seminario Taller Latinoamericano sobre Modelos de Ecodesarrollo Cuenca - Ciudad con Aplicación de Enfoque Sistémico y SIG, Cali Colombia
- Cao, W., Bowden, W. B., Davie, T. y Fenemor, A., 2003. Application of SWAT in A Large Mountainous Catchment with High Spatial Variability En: 2nd International SWAT Conference, TWRI Technical Report 266, Bari – Italy, 48-63
- Chaplot, 2005. Impact of DEM mesh size and soil map scale on SWAT runoff, sediment, and NO₃-N loads predictions, *J. Hydrol.* xx, 1-16
- Coello, C., 2005- Análisis de métodos de estimación de la conductividad hidráulica saturada en suelos degradados, Tesis MSc, PROMAS, Universidad Cuenca, Ecuador
- Coffey, M. E., Workman, S. R., Taraba, J. L. y Fogle, A. W., 1999. Procedures for evaluating daily streamflow predictions with the SWAT model, ASAE. 992104
- Collier, C. G., 1996. Construction Weather radar precipitation data and their use in hydrological modelling, En: *Distributed Hydrological Modelling*, Science and Technology Library, 143-163.
- Dercon G., Bossuyt B., De Bièvre B., Cisneros F. y Deckers J. (Editores), 1998. Zonificación Agroecológica del Austro Ecuatoriano, U. Ediciones, Universidad de Cuenca – Ecuador
- Dingman, S. L., 1994. *Physical Hydrology*, Macmillan College Publishing Company, 222
- PROMAS/DIUC, 2006. Medición y análisis de la variabilidad espacial de la precipitación en microcuencas de montaña, Universidad de Cuenca – Ecuador, No Publicado
- Dooge, J. C. y Bruen, M., 1997. Scaling effects on moisture fluxes at un-vegetated land surfaces, *Water Resour. Res.* 33(12), 2923-2927
- Duan, Q, Sorooshian, S. y Gupta, V. K., 1994. Optimal use of the SCE-UA global optimization method for calibrating watershed models. *J. Hydrol.* 158, 265–84.

- Faures, J. M., Goodrich, D. C., Woolhiser, D. A. y Sorooshian, S., 1995. Impact of small-scale spatial rainfall variability on runoff modeling, *J. Hydrol.* 173, 309-326
- FAO/ISRIC/ISSS, 1998. World Referente Base for Soil Resources, World Soil Resources Report Nr. 84, FAO: Rome; 88
- Goodrich, D.C., 1990. Geometric simplification of a distributed rainfall-runoff model over a range of basin scales. *J. Hydrol* (173) 283-308
- Goodrich, D. C., Faures, J. M., Woolhiser, D. A., Lane, L. J. y Sorooshian, S., 1995. Measurement and analysis of small-scale convective storm rainfall variability, *J. Hydrol.* (173), 283-308
- Goodrich, D. C., Lane, L. J., Shillito, R. M., Miller, S., Syed, K. H. y Woolhiser, D. A., 1997. Linearity of basin response as a function of scale in a semiarid watershed, *Water Resour. Res.* 33(12), 2951-2965
- Gupta, H. V., Sorooshian, S. y Yapo, P. O., 1998. Toward improved calibration of hydrologic models: multiple and non commensurable measures of information, *Water Resour. Res.* 34(4), 751-763
- Gupta, V. K., 2004. Prediction of statistical scaling in peak flows for rainfall-runoff events: a new framework for testing physical hypotheses, *Hydrol. Sci. J.* 287, 97-111
- Hanneland, I., Matheussen, B. V. y Lettenmaier, D. P., 2002. Influence of spatial resolution on simulated streamflow in a macroscale hydrologic model, *Water Resour. Res.* 38(7), 29(1-10)
- Knisel, W. G. y Williams, J. R., 1995. Hydrology components of CREAMS and GLEAMS models, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. 1069-1114
- Lidén, R. y Harlin, J., 2000. Analysis of conceptual rainfall-runoff modelling performance in different climates, *J. Hydrol.* 238, 231-247
- Linsley R., Koheler M. y Paulhus J., 1988. *Hidrología para Ingenieros*, McGraw-Hill Segunda Edición, 66-68.
- Lenhart T., Eckhardt K., Fohrer N. y Frede H., 2002. Comparison of two different approaches of sensitivity analysis, *Physics and Chemistry of the Earth.* 27, 645-654
- Lopes, V. L., 1996. On the effect of uncertainty in spatial distribution of rainfall on catchment modeling, *Catena.* 28, 107-119
- Loukas, A. y Quick, M. C., 1996. Spatial and temporal distribution of storm precipitation in southwestern British Columbia, *J. Hydrol.* 174, 37-56
- Luzio M. D., 2002. *Arc View Interface for SWAT2000 User's Guide*, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA.
- Mejía S., y Minchala, M., 2003. *Manual de laboratorio de hidrofísica de suelos. PROMAS. Cuenca-Ecuador* (No publicado)
- Melching C. S., 1995. Reliability estimation, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. 69-118
- Merz, B y Bárdossy, A, 1998. Effects of spatial variability on the rainfall runoff process in a small loess catchment, *J. Hydrol.* 212-213, 304-317
- Mockus V, 1972. *National Engineering Handbook*, U.S. department of Agriculture Soil Conservation Service
- Nandakumar, N. y Mein, R. G., 1997. Uncertainty in rainfall-runoff model simulations and the implications for predicting the hydrologic effects of land-use change, *J. Hydrol.* 192, 211-232
- Nash, J.E. & Sutcliffe. J.V.. 1970. River flow forecasting through conceptual models. I. A discussion of principles. *J. Hydrol.* 10: 282-290.
- Ndiritu, J. G. y Daniell, T. M., 2001. An Improved Genetic Algorithm for Rainfall-Runoff Model Calibration and Function Optimization, *Mathematical and Computer Modelling.* 33, 696-706
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. y Williams, J.R., 2002(a). *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R. y Williams, J.R., 2002(b). *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation*, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA
- Onyando, J. O., Schumann, A. H. y Schultz, G. A., 2003. Simulation of flood hydrographs based on lumped and semi-distributed models for two tropical catchments in Kenya, *Hydrol. Sci. J.* 48(4), 511-524

- Osborn, H.B., 1984. Storm-cell properties influencing runoff from small watersheds. Transportation Research Board. Transportation Research Record 922. National Research Council. National Academy of Sciences. Washington, DC.
- Paturel, J. E., Ouedraogo, M. y Mahe, G., 2003. The influence of distributed input data on the hydrological modeling of monthly river flow regimes in West Africa, *Hydrol. Sci. J.* 48(6), 881-890
- Pietroniro, A., Soulis, E. y Kouwen, N.; 2004. Scaling soil moisture for hydrological models, *Hydrol. Sci. J.* (287), 77- 95
- Quinn, P. F., Hewett, C., Doyle A., 2004. Scale appropriate modelling: from mechanisms to management. 287, 17-36
- Raes, D., 1996. Irrigation agronomy, IUPWARE – lecture notes, Leuven – Belgica
- Refsgaard, J. C., 1996. Terminology, modeling protocol and classification of hydrological model codes, En: *Distributed Hydrological Modelling, Science and Technology Library*, 5-38.
- Refsgaard, J. C. y Knudsen, J., 1996. Operational validation and intercomparison of different types of hydrological models, *Water Resour. Res.* 32(7), 2189-2202
- Refsgaard, J. C. y Storm B., 1996. Construction and validation of hydrological models, En: *Distributed Hydrological Modelling, Science and Technology Library*, 47-54.
- Refsgaard, J. C., Storm, B. y Abbott, M. B., 1996. Comment on ‘a discussion of distributed hydrological modelling’ by K. Beven, In: *Distributed Hydrological Modelling, Science and Technology Library*, 279-287.
- Refsgaard J. C., 1997. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models, *J. Hydrol.* 198, 69-97
- Romanowicz, A. A., Vanclooster, M., Rounsevell, M. y La Junesse, I., 2005. Sensitivity of the SWAT model to the soil and land use data parametrisation: a case study in the Thyle catchment, Belgium, *Ecological Modelling.* 187, 27–39
- Rouhani H., Willems P. y Feyen J., 2005. Evaluation of SWAT stream flow components for the Grote Nete River basin (Flanders, Belgium), No Publicado.
- Rozos, E., Efstathiadis, A., Nalbantis, I. y Koutsoyiannis, D., 2004. Calibration of semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrol. Sci. J.* 49(5), 819-842
- Schumann, A. H., R. Funke, R., G.A. y Schultz, G. A., 2000. Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *J. Hydrol.* 240, 45-61
- Seed, A., 2004. Modelling and forecasting rainfall in space and time, *Hydrol. Sci. J.* 287, 137-152
- Seibert, J., Uhlenbrook, S., Leibundgut, C. y Halldin, S., 2000. Multiscale Calibration and Validation of a Conceptual Rainfall-Runoff Model, *Phys. Chem. Earth.* 25, 59-64
- Singh, V. P., 1995. Watershed modeling, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. 1-22
- Sincich, T., Levine, D. M. y Stephan, D., 1999. *Practical statistics by using Microsoft excel*, Prentice hall
- Smithers, J. C., y B. A. Angel. 1996. An initial assessment of SWAT as a hydrological modelling tool for the midwest USA. ASAE Paper No. 96-2065. St. Joseph, Mich.: ASAE.
- Sorooshian S. y Gupta V. K., 1995. Model Calibration, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. 23-68
- Spruill, C. A., Workman, S. R. y Taraba, J. L., 2001. Simulation of daily and monthly stream discharge from smallwatersheds using the SWAT model, En: [www. Bcr.tamus .edu/swat](http://www.Bcr.tamus.edu/swat)
- Timbe, L., De Bièvre, B., Feyen, J. y Jacques, D., 2004. Hydraulic characterisation of hill slope soils, *Rev. Anales.* 57-66
- Torres P., 2004. Análisis de la distribución espacial de lluvia en la cuenca del río Paute, Tesis MSc, PROMAS – U. Cuenca
- Vaes, G., Willems, P. y Berlamont, J., 2001. Rainfall input requeriments for hydrological calculations, *Urban Water.* 3, 107-112
- Van Genuchten, M. T., 1978. A closed-form equation for predicting the hydraulic properties of unsaturated soils, *Soil Sci. American J.* 44, 892-898

- Vrugt, J. A., Bouten, W., Gupta, H. V. y Sorooshian, S., 2002. Toward improved identifiability of hydrologic model parameters: The information content of experimental data, *Water Resour. Res.* 38(12), 48(1-13)
- Wagner, T. y McIntyre, N., 2005. Identification of rainfall-runoff models for operational applications, *Hydrol. Sci. J.* 50(5), 735-751
- Wainwright, J. y Parsons, A. J., 2002. The effect of temporal variations in rainfall dependency in runoff coefficients, *Water Resour. Res.* 38(12), 7(1-10)
- Warrick, A.W. y Nielsen, D.R., 1980. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel, D. (Ed.), *Application of Soil Physics*. Academic Press, New York, 319-344.
- White, L. W., Vieux, B., Armand, D. y LeDimet, F. X., 2003. Estimation of optimal parameters for a surface hydrology model. *Advances in Water Resources.* 26, 337-348
- Willems, P., 2004. WETSPRO water engineering time series processing tool, K.U. Leuven, Hydraulics Laboratory, Belgium.
- Willems, P., 2005(a). General introduction to mathematical hydrological modelling, Course of Advanced hydrology, Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS), Cuenca – Ecuador.
- Willems, P., 2005(b). Calibration and verification of rainfall-runoff models, Course of Advanced hydrology, Programa para el Manejo del Agua y el Suelo (PROMAS), Cuenca – Ecuador.
- Williams, J. R., 1995. The EPIC model, In: *Computer Models of Watershed Hydrology*, Water Resources Publications. 909-1000
- Woods, R., 2004. The impact of spatial scale on spatial variability in hydrologic response: Experiments and ideas, *Hydrol. Sci. J.* 287, 153-167
- Wood, E. F., Sivapalan M. y Beven K., 1990. Similarity and scale in catchment storm response, *Rev. Geophys.*, 28(1), 1-18
- Yu, P. S., Yang, T. C. y Chen, S. J., 2001. Comparison of uncertainty analysis methods for a distributed rainfall-runoff model. *J. Hydrol.* 244, 43-59
- Zárate O., 2004. Analysis of the hydrology of a mountainous catchment with limited and low quality hydrological data, MSc Dissertation, K.U. Leuven Bélgica.

ANEXO A

Descripción del modelo

SWAT es un modelo determinístico semi - distribuido (Zárate, 2004) tipo “caja gris” - Físicamente basado (Rouhani et al., 2005), el cual está integrado a Arc View – GIS como extensión. Fue desarrollado por el Dr. Jeff Arnold para la USDA Agricultural Research Service (ARS) en los 90’s y fue una combinación de los modelos EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) (Williams, 1995) y GLEAMS (Grounwater Loading Effects of Agricultural Management System) (Knisel y Williams, 1995), el modelo actual incluye una nueva estructura para transito, flexibilidad en la configuración de la cuenca, irrigación, flujo lateral y un componente de aguas subterráneas (Arnold et al., 1993). Desarrollado para predecir los impactos debido al manejo del agua, sedimentos, química agrícola en grandes y complejas cuencas hidrográficas con variación espacial en suelos, uso de tierra, condiciones de manejo sobre largos periodos de tiempo (Luzio et al., 2002), sin embargo utiliza conceptos para cuencas pequeñas como es el caso del numero de curva (Mockus, 1972). SWAT es un modelo computacionalmente eficiente que puede ser usado en una PC con facilidad; la versión actual esta corregida para zona tropicales, debido a que utiliza bandas para precipitación y temperatura; éstas se basan en un aumento constante respecto a la altura (Neitsch et al., 2002(a)).

Al ser un modelo integrado a GIS nos permite modelar áreas heterogéneas mediante la subdivisión en subcuencas que representan áreas hidrológicamente homogéneas con similares características hidrológicas y morfológicas, ha éstas se les conoce como HRU “Unidades de Respuesta Hidrológica” que no necesariamente son sub unidades físicas ya que son elementos conceptuales (Rouhani et al., 2005; Rozos et al., 2004; Schumann et al., 2000; Singh, 1995).

SWAT también incorpora flujo de acuíferos superficiales, pérdidas debido al transido de agua, transporte de sedimentos, transporte químico, reservorios y pantanos. Existen tres componentes principales en SWAT: (1) Subcuencas, (2) Transito en Reservorios, (3) Transito a través de los cauces. El componente de subcuencas consiste en ocho divisiones principales como son: hidrología, clima, sedimentos, temperatura del suelo, crecimiento de cultivos, nutrientes, prácticas de manejo de la agricultura y pesticidas. El componente de hidrología está compuesto de escorrentía superficial, percolación, flujo lateral subsuperficial, flujo de aguas subterráneas, evaporación y otros.

La escorrentía superficial es simulada usando un modelo similar al CREAMS “Chemicals Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems” (Knisel y Williams, 1995). El volumen de escorrentía es estimado con un método modificado del número de curva (Mockus, 1972). Los picos de escorrentía son calculados basados en el método racional modificado. El tiempo de concentración de una cuenca es calculado con la fórmula de Manning considerando el flujo superficial y el de los cauces. El componente de percolación usa la técnica de almacenamiento “storage routing” para predecir el flujo en cada horizonte del suelo en la zona de raíces; el flujo lateral es calculado simultáneamente con la percolación.

Los datos de precipitación y la ubicación de las estaciones tiene una relevante influencia en los resultados obtenidos con SWAT, leves modificaciones de éste parámetro puede tener cambios significantes en los resultados. SWAT calcula el centroide de cada sub-cuenca y asume la estación de lluvia mas cercana a éste para distribuir la precipitación, es decir asume en cada sub unidad la precipitación uniforme. Al ser un modelo concebido para zonas relativamente planas es necesario realizar un análisis del efecto de la generación espacial de lluvia como se mencionó anteriormente (Zarate, 2004).

Para simular el ciclo hidrológico SWAT está basado en la ecuación de balance de agua:

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

Donde SW_t es el contenido de agua final (mm H₂O), SW_0 es el contenido inicial de agua en el día i (mm H₂O), t es el tiempo (días), R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mm H₂O), Q_{surf} es la cantidad de escorrentía superficial en el día i (mm H₂O), E_a es la cantidad de evapotranspiración en el día i (mm H₂O), W_{seep} es la cantidad de agua que ingresa desde la zona vadoza del perfil del suelo en el día i (mm H₂O) y Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno.

SWAT simula el volumen de escorrentía superficial y el pico de escorrentía para cada HRU. La escorrentía es después transitada para obtener el total de escorrentía a la salida de la cuenca de estudio. El agua que no infiltra se convierte en escorrentía superficial la misma que corre a través de las laderas. El coeficiente de escorrentía es la relación entre el total caudal salido y la cantidad de lluvia caída durante el periodo.

$$C = Q_{surf} / R_{day}$$

Donde R_{day} es la lluvia para el día i (mm H₂O) y Q_{surf} es el acumulado de escorrentía (mm H₂O), estimada usando la ecuación del número de curva:

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

Donde I_a es una abstracción inicial la cual incluye el almacenamiento superficial, intercepción e infiltración previo a la escorrentía (mm H₂O) y S es el parámetro de retención (mm H₂O) que varía espacialmente debido a los cambios en el suelo, uso del suelo, manejo y pendiente y temporalmente debido al cambio en el contenido de agua en el suelo. El pico de escorrentía es calculado usando una versión modificada de la ecuación racional (Neitsch et al., 2002(b))

$$q_{peak} = (C \times i \times Area) / 3.6$$

Donde q_{peak} es el pico de escorrentía (m³ s⁻¹), C es el coeficiente de escorrentía, i es la intensidad de lluvia (mm h⁻¹), $Area$ es el área de la subcuenca y 3.6 es un factor de conversión de unidades.

El tiempo de concentración del flujo superficial t_{ov} puede ser calculado usando la ecuación

$$t_{OV} = (L_{slp} / (3600 \times V_{OV}))$$

Donde L_{slp} es la longitud de la pendiente de la subcuenca (m), V_{OV} es la velocidad del flujo superficial ($m\ s^{-1}$) y 3600 es un factor de conversión de unidades.

La velocidad del flujo superficial puede ser estimada de la ecuación de Manning considerando una franja de 1 m de ancho con la pendiente de la superficie.

$$V_{OV} = (q_{OV}^{0.4} \times slp^{0.3}) / n^{0.6}$$

Donde q_{ov} es el flujo superficial promedio ($m^3\ s^{-1}$), slp es la pendiente media en la subcuenca ($m\ m^{-1}$), y n es el coeficiente de rugosidad de Manning.

SWAT para estimar el flujo lateral utiliza el modelo de aproximaciones de onda cinemática “kinematic wave” descrita por Sloan y Moore, 1984, y es inversamente proporcional a la longitud de la pendiente (L_{hill}).

El acuífero superficial “shallow aquifer” se recarga por la percolación de la parte baja de la zona de raíces. El aporte al flujo base solamente ocurre si la cantidad de agua almacenada excede un valor mínimo el mismo que es calibrado (Cao et al., 2003).

REFERENCIAS

- Arnold, J. G., P. M. Allen, and G. Bernhardt. 1993. A comprehensive surface-groundwater flow model. *J. Hydrol.* 142(1/4); 47
- Knisel, W. G., Williams, J. R., 1995, Hydrology components of CREAMS and GLEAMS models, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 1069-1114
- Luzio M. D., 2002, Arc View Interface for SWAT2000 User's Guide, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA.
- Mockus V, 1972, National Engineering Handbook, U.S. department of Agriculture Soil Conservation Service
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2002(a), Soil and Water Assessment Tool User's Manual, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA.
- Neitsch, S.L., Arnold, J.G., Kiniry, J.R., Williams, J.R., 2002(b), Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation, USDA, Agriculture Research Service, Temple, Texas, USA
- Rouhani H., Willems P. and Feyen J., 2005, Evaluation of SWAT stream flow components for the Grote Nete River basin (Flanders, Belgium), No Publicado.
- Rozos, E., Efstratiadis, A., Nalbantis, I., Koutsoyiannis, D., 2004, Calibration of semi-distributed model for conjunctive simulation of surface and groundwater flows, *Hydrol. Sci. J.* 49(5), 819-842
- Schumann, A. H., R. Funke, R., G.A. Schultz, G. A., 2000, Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling. *J. Hydrol.* 240, 45-61
- Singh V. P., 1995, Watershed modeling, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 1-22
- Williams, J. R., 1995, The EPIC model, In: Computer Models of Watershed Hydrology, Water Resources Publications. 909-1000
- Zárate O., 2004, Analysis of the hydrology of a mountainous catchment with limited and low quality hydrological data, MSc Dissertation, K.U. Leuven Bélgica.

