

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA  
MÁSTER EN INGENIERÍA AMBIENTAL

CALIBRACIÓN DEL MODELO PARA EL TRANSPORTE DE CONTAMINANTES EN  
LOS SEDIMENTOS EN LA CUENCA DE JEQUETEPEQUE, CAJAMARCA, PERÚ

---

TRABAJO DE FINAL DE MÁSTER

**Maria Paula López**  
**07/06/2012**

Tutores: Cristina Yacoub López  
Agustí Pérez-Foguet



## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCIÓN .....	3
2.	RESUMEN .....	4
3.	OBJETIVOS .....	4
4.	LA CUENCA DE JEQUETEPEQUE.....	5
4.1.	Discretización espacial de la cuenca .....	7
5.	CALIBRACIÓN.....	8
5.1.	Descripción de la metodología general de calibración .....	8
5.2.	Calibración de parámetros caudal .....	10
5.2.1.	Metodología de calibración automática en ArcSWAT .....	11
5.2.2.	Los parámetros de caudal .....	12
5.3.	Calibración de parámetros de sedimentos .....	14
5.3.1.	Metodología de calibración manual en ArcSWAT.....	14
5.3.2.	Los parámetros de sedimentos .....	14
6.	RESULTADOS .....	18
6.1.	Validación .....	26
7.	ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE.....	27
8.	CONCLUSIONES .....	35
9.	REFERENCIAS.....	36
I.	ANEXO .....	37

## 1. INTRODUCCIÓN

Este trabajo se centra en la aplicación de un modelo ambiental que facilita la gestión integrada del recurso hídrico en la Cuenca del Jequetepeque, situada en el Departamento de Cajamarca (Perú) cuya actividad principal es la minería y la agricultura y tiene un problema de contaminación por metales pesados que es lo que motiva a esta modelación ambiental.

El modelo ArcSWAT (Soil Water Assessment Tools) es un programa de modelización hidrológica desarrollado en Texas para el USDA (United States Department of Agriculture) y este es considerado como una herramienta que permite comprender y definir una cuenca tanto a nivel hidrológico como agrícola, incluyendo su posible afectación a la cuenca. ArcSWAT 2005 es un modelo a escala de cuenca, continuo y opera a escala diaria. El modelo está basado en ecuaciones físicas, utiliza datos de entrada que se pueden conseguir fácilmente y resulta computacionalmente eficiente para simulaciones a larga escala, especialmente en la determinación de prácticas de uso de suelo. Mediante su aplicación se pretende determinar los valores más adecuados y ajustados al comportamiento real de la cuenca en cuanto al transporte de sedimentos

El proyecto de investigación que se ha desarrollado en la cuenca de Jequetepeque en el departamento de Cajamarca, Perú y su comportamiento debido a la contaminación por la actividad minera en la zona, ha sido ampliado y profundizado con el tiempo, naciendo con el propósito de investigar el efecto de la actividad minera y su aportación de metales pesados en los diferentes distritos hidrográficos. Actualmente hay un modelo de la cuenca que busca simular el movimiento de los sedimentos portantes de metales pesados por toda la cuenca y que permite analizar las consecuencias de esta deposición en las diferentes subcuencas afectando los distintos usos de suelo en la zona. El presente trabajo está compuesto por tres fases bien diferenciadas, la calibración del modelo de caracterización hidrogeomorfológica en el transporte de sedimentos, el análisis de incertidumbre asociado a este y su evaluación.

El presente trabajo se concentra en la calibración de los parámetros de sedimentos de dicho modelo desarrollado en ArcSWAT 2005 con interface en ArcGIS 9.3, partiendo de intervalos conocidos para cada uno de los parámetros estudiados. Esta calibración empezó con los parámetros que describían el caudal y una vez adecuados a valores de aceptabilidad (Moriasi D. N., Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith, 2007) tras una previa selección de los mismos de la bibliografía y con un análisis de sensibilidad, la calibración continuó para los parámetros de sedimentos hasta obtener los mismos resultados aceptables según los criterios estadísticos mencionados. Dichos criterios giran, básicamente, en torno a tres estadísticos, el PBIAS, NSE y RSR que indican la tendencia promedio de la data simulada a ser más grande o más pequeña que la

observada, la magnitud relativa de la varianza residual comparada con la varianza de los datos observados y el error ajustado con escala y normalización, correspondientemente.

## 2. RESUMEN

El modelo para la cuenca de Jequetepeque en ArcSWAT aún está siendo construido hoy en día, la cuenca ha sido representada y discretizada en subcuencas y HRU'S como lo requiere el programa, con bases de datos que la describen morfológica, hidrológica y climatológicamente. A partir de este punto se ha realizado la calibración automática para los parámetros de caudal que a su vez fueron escogidos mediante un análisis de sensibilidad, la calibración manual de los parámetros que describen el transporte de sedimentos y el análisis de incertidumbre para estos frente a la sensibilidad al variar los parámetros ya calibrados de caudal.

Con el conjunto de parámetros de caudal con mejor desempeño, arrojado por el programa usado, ParaSol, se inició la calibración manual de los parámetros de sedimentos, al cabo de 13 simulaciones se obtuvo un desempeño ideal en cuanto a sus resultados estadísticos para el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe, el porcentaje BIAS y el radio de la desviación estándar de los datos observados, además de los gráficos comparativos con los datos observados en campo.

Finalmente el análisis de incertidumbre se basó en el análisis de la variación de los parámetros con buen desempeño para el caudal, un conjunto de 110 sets de parámetros arrojados por el programa usado para la calibración automática de estos ParaSol, y con combinaciones de dichos sets se evaluó tanto estadística como gráficamente la respuesta de los parámetros de sedimentos escogidos en la calibración manual.

## 3. OBJETIVOS

El estudio que se ha llevado a cabo en la cuenca de Jequetepeque responde a un interés social por proteger el recurso hídrico, enfrentado a la actividad económica realizada por una empresa minera en la zona; en este marco el presente trabajo se enfoca en la calibración del modelo desarrollado de caracterización hidrográfica, la capacidad de simular el transporte de sedimentos de este y las repercusiones que tendría esto en la zona estudiada. Específicamente los objetivos son:

- Calibración manual del modelo para los parámetros de sedimentos en ArcSWAT 2005 para la cuenca de Jequetepeque, según criterios estadísticos que comparan los datos obtenidos en muestreos hechos en la cuenca y las simulaciones del modelo.

- Análisis de la incertidumbre asociada al transporte de sedimentos en la cuenca en el modelo, contrastando la calibración automática hecha para los parámetros de caudal con la manual para sedimentos.

#### **4. LA CUENCA DE JEQUETEPEQUE**

La cuenca de Jequetepeque (4 372.5 km<sup>2</sup>) está ubicada en el norte del Perú (ver Imagen 1), el río desemboca en el Pacífico fluyendo en dirección oriente – occidente. La precipitación anual promedio está entre los 0 y los 1100 mm, la altitud de los 0 a los 4188 msnm. El embalse “El Gallito ciego” (400 msnm) separa la parte alta de la baja de la cuenca, y su función principal es almacenar agua para el consumo de las grandes ciudades costeras y para riego de cultivos extensivos.

La parte alta de la cuenca cubre 3564.8 km<sup>2</sup>, está entre los 400 y 4188 msnm y con alrededor de 80 km con pendientes de hasta el 20%. Las actividades económicas principales son la agricultura, ganado y minería, mientras que el 80% de la población es rural. Las temperaturas pueden llegar a los 25.4 °C en el embalse a menos de 4°C en las partes más altas. Es también en la parte más alta de la cuenca donde hay mayor variabilidad en la precipitación. La erosión producida por eventos extremos como el de del fenómeno de “El Niño” en 1997/98 están colmatando el embalse más rápido de lo esperado, junto con las actividades antropogénicas como la agricultura extensiva y la minería.

La composición geológica andina es rica en metales pesados, y la actividad minera contribuye a aumentar la cantidad total es por eso que los estudios realizados en torno a la presencia de estos en la cuenca deben tener en cuenta este aspecto, contando con que no hay estudios sobre la presencia de metales pesados en el agua o los sedimentos ni su afectación a la zona.

Debido a lo anterior es que la cuenca de Jequetepeque ha sido objeto de varios estudios gubernamentales y por parte de ONG’s. En particular el estudio CESA (desarrollado por las ONG’s WWF, CARE y IIED en 2007) constituye el primer gran esfuerzo para hacer un modelo del comportamiento hidrológico de la cuenca. Este incluye una compilación de los datos usados para correr el modelo en SWAT y un análisis de los primeros resultados que se usarán para mejorarse con la aplicación de un método de calibración correcto.

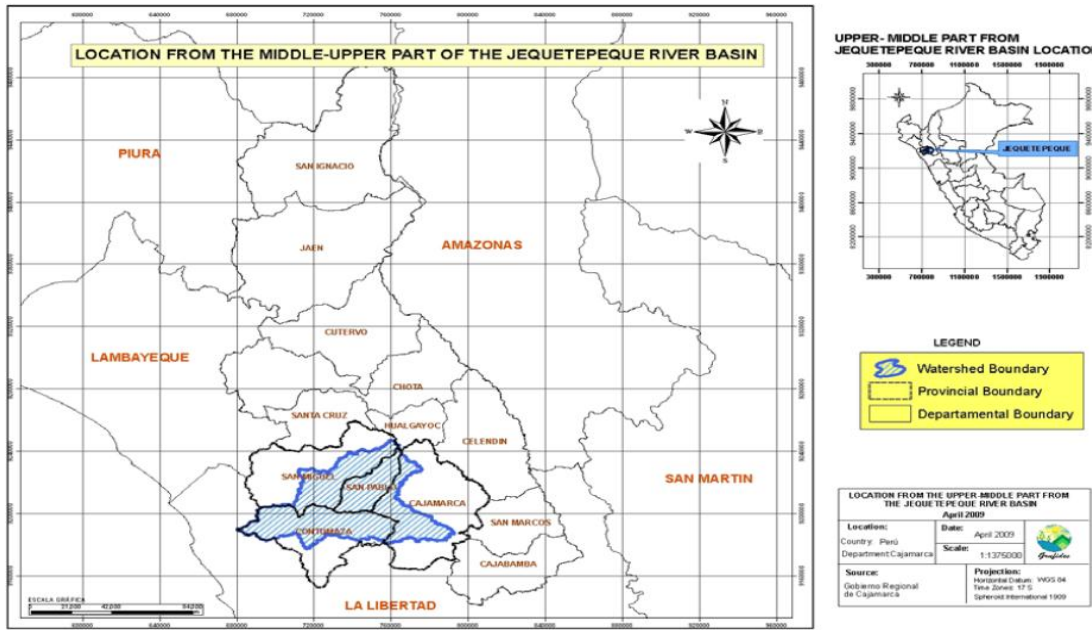


Imagen 1. Mapa de la cuenca Jequetepeque. Fuente: Grufides

### Características de la base de datos disponible

Los datos sobre la calidad del agua de la cuenca en cuanto a su composición de sedimentos y metales pesados, se obtuvieron tras una compleja metodología de muestreo ambiental en puntos de la cuenca donde se asumió que habría altas concentraciones de metales pesados debida a la explotación minera o la composición característica de las montañas andinas. Se delimitó la metodología fijando límites geográficos, definiendo los elementos a estudiar, periodicidad y frecuencia. Se definieron los siguientes parámetros:

- Metales y metaloides analizados: Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Al, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Fe, Mn, Pb, Ni, Zn, Sb and Sn.
- Números de muestras.
- Periodicidad: Dos veces al año, al final de la temporada húmeda y al final de la temporada seca.
- Frecuencia: Duplicado en cada temporada
- Zonas específicas

La selección de los metales y metaloides a analizar se basó en conceptos como su toxicidad, su disponibilidad en el ambiente y en organismos acuáticos, incluyendo su capacidad de movilización; la posibilidad de formar solventes como hidróxidos de hierro, aluminio y óxidos de magnesio; otros compuestos que estén presentes en concentraciones que superan los niveles máximos establecidos para la calidad del agua debido a actividades antrópicas.

#### **4.1. Discretización espacial de la cuenca**

ArcSWAT realiza los cálculos de las distintas dinámicas que ocurren en una cuenca incluyendo la opción de discretizarla espacialmente en partes más pequeñas llamadas subcuencas, esto con el objetivo de realizar cálculos más exactos y precisos del caudal y sedimentos transportados; las subcuencas se pueden dividir a su vez en unidades de respuesta hidrológica HRU's las cuales surgen de hacer diferentes combinaciones entre tipos de suelo y usos de suelo, también se ha estudiado el efecto de incluir la pendiente en esta división espacial y se encontró que para un número de subcuencas inferior al que el programa pone por defecto la inclusión de la pendiente como factor para la discretización mejora las simulaciones (Yacoub & Pérez Foguet, 2011) y se les asigna a cada una de estas combinaciones un número. La dinámica del agua en la cuenca está determinada básicamente por estas dos características, el uso de suelo y tipo de suelo ya que la primera influye drásticamente en la producción de escorrentía y suelo erosionado.

En la modelación hidrológica y de calidad de agua, las unidades espaciales únicas en las que se divide una cuenca son de gran importancia ya que son la unidad geográfica más pequeña en donde se puede caracterizar la cuenca. La división de la cuenca en pequeñísimas partes no es sinónimo de buenos resultados necesariamente y el costo computacional aumenta con la cantidad de subdivisiones de la cuenca (Yacoub & Pérez Foguet, 2011). La cantidad de parámetros a calibrar aumenta a medida que hay más subdivisiones en la cuenca, lo que puede ocasionar efectos impredecibles cuando hay múltiples parámetros siendo ajustados (Muleta, Nicklow, & Bekele, 2007). Las cuencas grandes con pequeños conjuntos de datos pueden ser un reto por lo que a la hora de modelar se debe tener compaginar la cantidad de unidades computacionales, los datos disponibles y la cantidad de parámetros a calibrar.

Para cada subcuenca el programa requiere información que la describa, dividiéndola y almacenándola en 7 grupos: topografía de la cuenca, suelos, uso de suelo, precipitación, clima (temperatura, viento, radiación solar), lagunas o reservorios y aguas subterráneas (Torres).



## 5. CALIBRACIÓN

### 5.1. Descripción de la metodología general de calibración

Como todo proceso de modelización se debe seguir ciertos pasos principales para llevar a cabo un buen modelo, estos son: selección de los datos a usar, establecer la escala y correr el modelo, calibración y validación.

- a. Selección de los datos a usar: Los requerimientos de modelo son bastante exhaustivos, pero se cuenta con datos esenciales de topografía, usos del suelo, tipos de suelo y datos hidrometeorológicos específicamente temperatura, precipitación y caudal en promedios diarios. La selección de los datos se hizo a partir de la base de datos del estudio CESAH y tomó 6 meses para su finalización.
- b. Establecer la escala y correr el modelo: La escala utilizada es una subdivisión básica de la cuenca en subcuencas diferenciadas por el tipo de suelo y sus usos; éstas subcuencas están divididas a su vez en unidades de respuesta hidrológica HRU (Hydrological Response Units) que son el producto de la superposición de pendientes, suelos y usos de suelo, estas HRU's son las unidades de cálculo del modelo y su correcta definición es relevante para el modelo y los resultados que se obtendrán al final de la modelización. Se tienen 4 años de datos.
- c. La calibración de un modelo es la estimación de los parámetros comparando los datos observados y los predichos por el modelo bajo unas condiciones determinadas (Moriasi, Arnold, Van Liew, & Bingner, 2007). Para realizar este proceso es importante contar con una base de datos que cubran los años promedio, húmedos y secos cubriendo los diferentes eventos hidrológicos de la ubicación estudiada, esto sería una base de datos de 3 a 5 años de mediciones (Gan, Dlamini, & Biftu, 1997).

Es posible hacer calibración de forma manual o automática, esto depende del modelador, el modelo y la complejidad de la cuenca a modelar. La calibración automática envuelve la predicción del error del modelo usando una ecuación llamada la función objetivo y un algoritmo de búsqueda que hace el procedimiento de optimización automática, buscando los parámetros que cumplan con la optimización de la función objetivo. En el caso de modelos con un gran número de parámetros que explique su complejo funcionamiento, como es el caso de los modelos hidrológicos, es más apropiado optar por la calibración automática.

Duan et. al (1992) (1993) presentaron un modelo de optimización global conocido como el método SCE, el cual es un resumen de las mejores características de varios métodos de optimización existentes, incluye el algoritmo genético e introduce el concepto de aleatoriedad compleja. El modelo SCE está específicamente creado para lidiar con las

peculiaridades conceptuales encontradas en la calibración de modelos de cuencas hidrográficas. Dichas características vuelven al SCE un modelo robusto, efectivo, flexible y eficiente.

La calibración se llevará a cabo siguiendo los siguientes pasos: especificación paramétrica (análisis de sensibilidad con LH-OAT), estimación paramétrica (método SCE), análisis de incertidumbre y evaluación del modelo.

El análisis de incertidumbre se hace con el fin de optimizar el ajuste entre los datos observados a los predichos. Es tanto posible como importante independizar los valores de parámetros para cada subunidad espacial en SWAT, permitiéndole al usuario con esto y el análisis de sensibilidad crear limitaciones e interdependencias de los parámetros del modelo. La optimización de los parámetros permite que el modelo prediga la realidad con más certeza.

Esta aproximación está basada en el método LH-OAT dispuesto para ARCSWAT 2005, combinando el método de muestreo por Hipercubo Latino con el de *one-factor-a-time* desarrollado por Griensven et. al (Griensven, Francos, & Bauwens, 2002) para SWAT.

Posterior al análisis de sensibilidad esta la calibración, que es uno de los objetivos fundamentales de este trabajo, inicialmente se hará de forma manual y luego de forma automática como se vio que era más apropiado. Tras la calibración manual, comparación entre los datos medidos y los predichos, usando histogramas como una herramienta gráfica y estadísticos como lo son Nash-Suttcliffe Efficiency NSE (técnica adimensional), Porcentaje Bias PBIAS y observaciones del ratio de la desviación estándar RSR (Moriasi D. N., Arnold, Van Liew, Bingner, Harmel, & Veith, 2007).

- d. El proceso de validación consiste en correr el modelo con los valores de los parámetros determinados en la etapa previa de la calibración, se presentan los mismos pasos que en la calibración a diferencia de que se usan periodos de datos y datos climatológicos diferentes. Su objetivo es probar el modelo en otros periodos de tiempo a los calibrados, dándole robustez al modelo y garantizando que puede usarse bajo cualquier escenario.

Los parámetros del caudal fueron automáticamente calibrados por ArcSWAT mientras que los de sedimentos fueron manualmente calibrados con la finalidad de alcanzar un nivel aceptable de desempeño estadístico de acuerdo a Moriasi et.al (2007) para los estadísticos aplicados NSE, RSR y PBIAS, buscando obtener un desempeño *Bueno* o *Muy Bueno* ( Ver Tabla 5-1).

NSE por sus siglas en inglés The Nash-Sutcliffe Efficiency determina la magnitud relativa de la varianza residual “el ruido” comparado con la varianza de los datos medidos “la información”. Indica que tan bien se adapta la curva de datos observados vs. Simulados a la línea con pendiente 1:1 (45°). Su rango es  $-\infty < NSE \leq 1.0$ , siendo el valor óptimo  $NSE=1.0$ .

$$NSE = 1 - \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2} \right]$$

RSR por RMSE-observations standard deviation ratio incluye los beneficios de los índices estadísticos de error (RMSE) incluyendo el ajuste de escala/normalización (al dividir por la desviación estándar  $\sigma$ ). Su valor óptimo es RSR=0 que implica una simulación perfecta del modelo o cero variación residual. Entre menor sea su valor, mejor el desempeño del modelo.

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV_{obs}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}{\sqrt{(Y_i^{obs} - Y_i^{sim})^2}}$$

PBIAS del inglés Percent BIAS mide la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o pequeña que su contraparte (datos observados). El valor óptimo es PBIAS=0, valores positivos PBIAS>0 indican subestimación del modelo, valores negativos PBIAS<0 indican sobrestimación del BIAS en el modelo, en el sentido de que tan ancha es la campana en las curvas comparativas Simulación vs. Observación.

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i^{obs} - Y_i^{sim}) \cdot 100}{\sum_{i=1}^n Y_i^{obs}}$$

Nivel de desempeño	RSR	NSE	PBIAS (%)		
			Caudal	Sedimentos	N,P
Muy bueno	0.00≤RSR≤0.50	0.75≤NSE≤1.00	PBIAS≤±10	PBIAS<±15	PBIAS<±25
Bueno	0.50≤RSR≤0.60	0.65≤NSE≤0.75	±10≤PBIAS≤±15	±15≤PBIAS<±30	±25≤PBIAS<±40
Satisfactorio	0.60≤RSR≤0.70	0.50≤NSE≤0.65	±15≤PBIAS≤±25	±30≤PBIAS<±55	±40≤PBIAS<±70
Insatisfactorio	RSR≥0.70	NSE≤0.50	PBIAS≥±25	PBIAS≥±55	PBIAS≥±70

Tabla 5-1. Niveles de desempeño estadístico (Moriassi, et. al. 2007)

## 5.2. Calibración de parámetros caudal

Antes de la calibración de los parámetros de caudal, se hizo un análisis de sensibilidad que permitió identificar cuales parámetros debían ser calibrados, esto se hace con el fin de optimizar tiempo computacional y aprovechar los parámetros más sensibles e independientes (Yacoub & Pérez Foguet, 2011). El análisis de sensibilidad midiendo el ratio de cambio en los *outputs* del modelo frente a una variación en los *inputs* y así reducir la cantidad de parámetros a ser optimizados en la calibración. El análisis de sensibilidad se hizo con la combinación de los métodos de muestreo disponibles en SWAT2005, el Hipercubo Latino y el Un Factor Al Tiempo (LH-OAT) desarrollados por van Griensven et. al (2002) y Francos et. al. (2003).

Además del análisis de sensibilidad también se midió el error asociado a las simulaciones; el ajuste de los *outputs* se midió con la función objetivo de la suma de los cuadrados de los residuos SSQ. La

cantidad de parámetros a ser sometidos al análisis de sensibilidad fue de 28 y sus rangos fueron establecidos según bibliografía y a juicio del modelador.

La calibración de los parámetros para el caudal se hizo de manera manual y automática, en la primera no se obtuvo resultados buenos estadística y gráficamente debido a que la serie de datos no era temporalmente adecuada (muy corta) y no permitió que el algoritmo convergiera a una buena solución; posteriormente se corrió ArcSWAT para la calibración automática de los mismos parámetros que fueron seleccionados tras el análisis de sensibilidad anteriormente explicado.

Los parámetros calibrados para el caudal puede que sean independientes de las características de las subcuencas o no; en el caso de los parámetros que describen el suelo (extensión .sol) están bastante correlacionados con las demás características, por lo que para diferentes tipos de suelo sus valores varían, esto también sucede con el parámetro Cn2, con extensión .mgt el cual da información sobre las tierras cultivables siembra, cosecha, sistemas de riego, adición de nutrientes, pesticidas y labranza

### 5.2.1. Metodología de calibración automática en ArcSWAT

La calibración automática realizada en SWAT consiste en la combinación de un método de optimización global llamado método aleatorio de evolución compleja (Shuffle Complex Evolution Method) SCE que está basado en un algoritmo genético especialmente diseñado para lidiar con las peculiaridades encontradas en la calibración del modelo de una cuenca y un análisis de incertidumbre UA como procedimiento de optimización automática, llamado el método ParaSol (Parameter Solutions) (Griensven et. al 2002; 2006; 2008).

Los parámetros resultantes del análisis de sensibilidad para el caudal que ParaSol arrojó se muestran en la Tabla 5-2.

Parámetros	
Caudal	Extensión
Alpha_Bf	.gw
Canmx	.hru
Ch_K2	.rte
Ch_N2	.rte
Cn2	.mgt
Epc0	.bsn.hru
Esco	.bsn.hru
Gwqmn	.gw
Revapmn	.gw
Slope	.hru
Sol_Awc	.sol
Sol_K	.sol
Sol_Z	.sol
Surlag	.bsn

Tabla 5-2. Parámetros de caudal calibrados automáticamente

### 5.2.2. Los parámetros de caudal

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

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

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

- *Gwqmn (.gw)*: La profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que el flujo de retorno ocurra. Para que el agua subterránea fluya debe cumplirse que la altura del acuífero superficial sea igual o mayor que Gwqmn. Se da en mm H<sub>2</sub>O.
- *Canmx (.hru)*: Es el máximo almacenamiento por retención (mm H<sub>2</sub>O), debido a la cobertura vegetal puede haber retención de la lluvia. Esto puede afectar la erosión y depende de la densidad de la capa vegetal y su morfología. ArcSWAT permite la mayor retención de lluvia debida a la cobertura vegetal cuando está totalmente desarrollada (mediante el índice de área de hoja).
- *Ch\_K2 (.rte)*: Es la conductividad hidráulica del canal principal (mm/hr). Los caudales de un canal deben ser caracterizados por su relación con el agua subterránea pueden ser canales recargables o recargantes. Dependiendo del material del lecho del canal los valores de la conductividad K<sub>r</sub> pueden variar entre 127 mm/hr para un material con tasas de pérdida altas (arenas y gravas) a 0.025 mm/hr para materiales con tasas de pérdida muy bajas (arcillas y limos).
- *Ch\_N2 (.rte)*: Es el coeficiente de rugosidad *n* de Manning para el canal
- *CN2 (.mgt)*: El número que proviene de la curva SCS de lluvia para la condición de humedad II. Esta curva es función de la permeabilidad del suelo, del uso del suelo y de condiciones antecedentes de la humedad del suelo. Los valores para el numero de la curva SCS pueden ser encontrados en tablas para tipos de suelo y diferentes capas superficiales del suelo para pendientes del 5%; este parámetro es dependiente de CNOP, en caso de que el ultimo sea necesario en alguna operación el programa tomará este último como valor para el numero de la curva SCS con humedad II. Dependiendo de los diferentes usos agrícolas que puedan tener suelos rurales, existen tablas con el numero así como para áreas urbanas (Neitsch, Arnold, Kiniry, Srinivasan, & Williams, Septiembre 2004).
- *Esco (.bsn .hru)*: Es el factor de compensación por evaporación en el suelo. Este factor tiene la finalidad de facilitarle al usuario ajustar la distribución de la profundidad para la demanda evaporativa del suelo por capilaridad, agrietamiento y formación de costras. Dicha distribución varía con los valores de Esco.

$$E_{soil,ly} = E_{soil,zl} - E_{soil,zu} \cdot ESCO$$

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

- *Revapmn (.gw)*: La profundidad umbral del acuífero superficial requerida para que ocurra percolación en el acuífero inferior (mm H<sub>2</sub>O). El movimiento de agua desde el acuífero superficial a las zonas insaturadas solo se dará si la lámina de agua es mayor a Revapmn.
- *HRU\_slp (.hru)*: Es la pendiente o inclinación del canal dada en m/m. En los cálculos del modelo aparece en las ecuaciones para calcular la velocidad del caudal en la fórmula de Manning.
- *Sol\_AWC (.sol)*: Es la capacidad de cada capa de suelo para almacenar agua. Aparece en la ecuación de la capacidad de campo.

$$AWC = FC - WP$$

Donde FC es la capacidad de campo y WP es el punto de marchitamiento.

- *Sol\_K (.sol)*: Es la conductividad hidráulica saturada (mm/hr). Representa la resistencia de la matriz del suelo al flujo del agua; es una medida de la capacidad del flujo de agua a moverse en el suelo. Está presente en las ecuaciones de cálculo de la conductividad hidráulica efectiva y el tiempo de viaje de la percolación.
- *Sol\_Z (.sol)*: Es la distancia entre la superficie del suelo y la parte inferior de la capa de suelo (mm).
- *Surlag (.bsn)*: Coeficiente de retraso del agua lluvia en la superficie. En las cuencas grandes donde hay tiempos de concentración mayores a 1 día, solo una parte del agua caída en la precipitación alcanzará el caudal principal en el mismo día de la precipitación. Este parámetro controla la fracción de agua de lluvia que entrará eventualmente a la cuenca. El coeficiente está presente en la ecuación para calcular el caudal de lluvia que alcanzará la cuenca, así como los sedimentos que serán llevados por este:

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

Donde  $Q'_{surf}$  es el caudal de precipitación generado en una cuenca un día dado (i),  $Q_{stor,i-1}$  es el caudal de precipitación almacenado o retrasado del día anterior (i-1) y  $t_{conc}$  es el tiempo de concentración para la cuenca.

$$sed = (sed' + sed_{stor,j-1}) \cdot \left(1 - \exp\left[\frac{-surlag}{t_{conc}}\right]\right)$$

Donde  $sed'$  en toneladas es la cantidad de sedimentos liberadas a la cuenca en un evento de lluvia en un día (j),  $sed_{stor,j-1}$  es la cantidad de sedimentos acumulada del día anterior (j-1) y  $t_{conc}$  es el tiempo de concentración para el HRU (hr).

### 5.3. Calibración de parámetros de sedimentos

Los parámetros calibrados para el transporte de sedimentos fueron calibrados manualmente, después de haber sido seleccionados tras un análisis de sensibilidad igual al explicado para caudal y de haber sido filtrados por relevancia partiendo de documentación bibliográfica. Estos parámetros no varían con las diferentes características de la subcuenca, como tipo de suelo, pendiente, uso de suelo, etc. por lo que sus valores son los mismos para las diferentes subcuencas y HRU's.

#### 5.3.1. Metodología de calibración manual en ArcSWAT

Partiendo de los parámetros que describen el modelo de transporte de sedimentos y con el análisis de sensibilidad y recopilación bibliográfica se procedió a escoger los parámetros relevantes. Los parámetros escogidos, junto con sus extensiones según el código de ArcSWAT, son los siguientes:

Parámetros	
Sedimentos	Extensión
<b>prf</b>	.bsn
<b>adj_pkr (=amp)</b>	.bsn
<b>ch_erod</b>	.rte
<b>ch_cov</b>	.rte
<b>spcon</b>	.bsn
<b>spexp</b>	.bsn
<b>ffcb</b>	.bsn
<b>Usle_P</b>	.mgt

Tabla 5-3. Parámetros a calibrar en ArcSWAT 2005

#### 5.3.2. Los parámetros de sedimentos

- *prf (.bsn)*: Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en el canal principal. El enrutamiento de los sedimentos está en función del caudal pico y el caudal medio diario. Este factor influye en la degradación del canal. El parámetro está presente en la ecuación del caudal pico del canal y a su vez en la expresión de la velocidad pico del mismo que es el caudal pico dividido entre el área del canal.

$$v_{ch,pk} = \frac{q_{ch,pk}}{A_{ch}} \qquad q_{ch,pk} = prf \cdot q_{ch}$$

- *adj-pkr (.bsn)*: Factor de ajuste a la tasa pico del enrutamiento de sedimentos en la subcuenca (canales tributarios). Esta variable fue añadida para incorporar el efecto del caudal pico en el enrutamiento de los sedimentos e impacta la cantidad de erosión

generada por los sedimentos en la subcuenca. El parámetro aparece en las ecuaciones como  $adj_{0.5\alpha}$  como factor de ajuste para calcular la máxima media hora de lluvia expresada como fracción de la precipitación diaria ( $\alpha_{0.5\ mon}$ ), esta a su vez es usada para calcular la máxima intensidad de 30 minutos  $I_{30}$  multiplicado por la precipitación de un día en mm de agua ( $R_{day}$ ).

$$\alpha_{0.5\ mon} = adj_{0.5\alpha} \cdot \left[ 1 - \exp\left(\frac{R_{0.5sm(mon)}}{\mu_{mon} \cdot \ln\left(\frac{0.5}{yrs \cdot days_{wet}}\right)}\right)\right]$$

$$I_{30} = 2 \cdot \alpha_{0.5} \cdot R_{day}$$

- *spexp (.bsn)*: Exponente del parámetro que calcula la cantidad de sedimentos reencausados en el enrutamiento de sedimentos del caudal. En especial es el exponente de la velocidad del agua en el canal ( $v_{ch,pk}$ ) cuando el caudal es pico, en la expresión para determinar la máxima cantidad de sedimentos que puede ser transportada en un segmento del río:

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} \cdot v_{ch,pk}^{spexp}$$

- *spcon (.bsn)*: Parámetro lineal para calcular la máxima cantidad de sedimentos que puede ser reencausada en el enrutamiento de sedimentos del flujo. También está presente en la expresión anterior como el coeficiente  $c_{sp}$  que multiplica la velocidad pico del canal.

$$conc_{sed,ch,mx} = c_{sp} \cdot v_{ch,pk}^{spexp}$$

- *ffcb (.bsn)*: Almacenamiento de agua inicial expresado como fracción de la capacidad de campo en contenido de agua. En los cálculos teóricos del programa aparece como FC, la capacidad de campo en contenido de agua, en varias ecuaciones: para calcular el contenido de agua del perfil en un día determinado ( $SW$ ), el factor del agua del suelo ( $f_{sw}$ ), la capacidad disponible de agua en las diferentes capas del suelo  $ly$  ( $AWC_{ly}$ ), también es usado para calcular el ciclo de los nutrientes en las diferentes capas del suelo ( $v_{sw,ly}$ ), el factor de nitrificación en una capa de suelo para un día dado ( $\eta_{sw,ly}$ ), para calcular el grosor de la lámina de agua que puede ser variable debido a la estacionalidad del tiempo y quedar confinada entre capas de suelo ( $h_{wtbl}$ ), el volumen de la grieta que se puede formar en una capa de suelo ( $crk_{ly}$ ) también es función de FC, el tiempo de viaje por percolación del agua que pasa de una capa de suelo a otra ( $TT_{perc}$ ), la demanda evaporativa de agua en una capa de suelo, ajustada por contenido de agua ( $E'_{soil,ly}$ ), el cambio volumétrico de la humedad en el área mojada ( $\Delta\theta$ ), finalmente la capacidad de campo FC aparece directamente en las ecuación para los coeficientes de forma del suelo ( $w_1$  y  $w_2$ ). En todas las anteriores ecuaciones mencionadas la FC está expresada en unidades de profundidad de agua  $mm_{H_2O}$  y como se puede ver está principalmente jugando un papel importante en la modelación del suelo y su mecánica cuando interactúa con un medio acuoso, como lo es en el estudio presente, el de un río.



- *usle-p (.mgt)*: Predice la erosión gruesa media anual en función de la energía de la precipitación. Factor de práctica de soporte, está definido como el radio de pérdida de suelo con una práctica de soporte específica a la correspondiente pendiente del terreno de la pérdida. Las prácticas de soporte pueden ser labranza en el contorno y sistemas de terrazas. La disposición del exceso de aguas lluvias en canales de agua es una medida necesaria en las anteriores prácticas de soporte. SWAT parte de una comparación entre valores de carga de sedimentos calculadas con USLE pero estos valores no son usados en el modelo, únicamente son usados comparativamente. La ecuación universal de pérdida de suelos es

$$sed = 1.202 \cdot EI_{USLE} \cdot K_{usle} \cdot C_{USLE} \cdot P_{USLE} \cdot LS_{USLE} \cdot CFRG$$

De la anterior expresión el coeficiente relacionado con USLE es  $EI_{USLE}$  que está definido como el índice de erodabilidad por lluvia

$$EI_{USLE} = E_{storm} \cdot I_{30}$$

Donde  $E_{storm}$  es la energía de una tormenta e  $I_{30}$  es la máxima intensidad de 30 minutos.

- *ch\_erod (.rte)*: Factor de erodabilidad del canal, es función de las propiedades de los materiales del banco o del fondo. Es medida con un aparato que impulsa un chorro afectando el lecho vegetal local debajo de este (ver Ilustración 1). Las variables importantes en esta medición son el volumen de material removido, la elevación del chorro sobre la superficie de fondo, diámetro de la boquilla del propulsor del chorro, velocidad del chorro, tiempo, densidad de la masa del fluido y coeficiente de erodabilidad.

$$k_{CH} = 0.003 \cdot \exp[385 \cdot J_i]$$

Siendo  $J_i$  el índice del Jet o chorro definido por Hanson (1991) para relacionar la erodabilidad con el desgaste creado por el chorro sumergido y el procedimiento para determinarlo está dado por la ASTM estándar D 5852-95.

En los cálculos teóricos del programa este parámetro aparece como  $k_{CH}$  que es la conductividad hidráulica efectiva del aluvión, relacionada en el cálculo del coeficiente de decaimiento  $k_r$  que representa la pendiente de regresión para el canal unitario necesario para calcular las pérdidas de transmisión del agua lluvia en un canal.

$$k_r = -2.22 \cdot \ln \left[ 1 - 2.6466 \cdot \frac{K_{ch} \cdot dur_{flw}}{vol_{Qsurf,i}} \right]$$

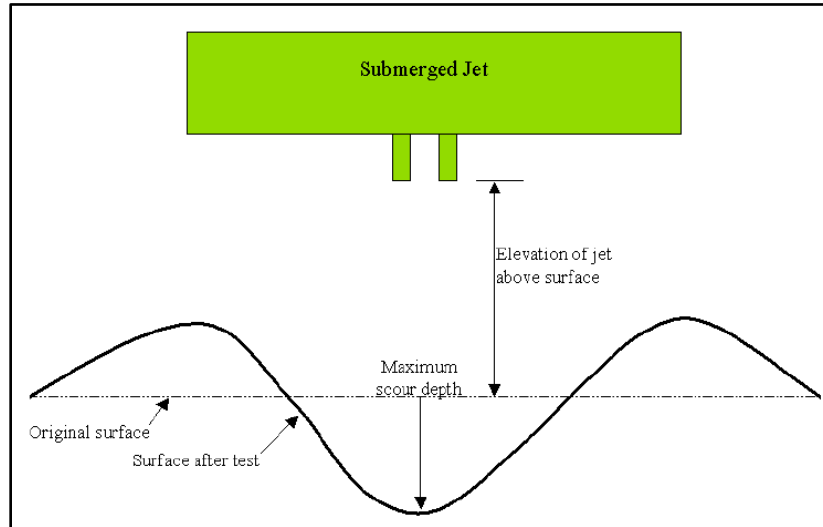


Ilustración 1. Medición del factor de erodabilidad de un canal. Obtenido de *SWAT Theoretical Documentation, 2005*

- $ch\_cov$  (.rte): Factor de cubrimiento del factor se define como el radio entre la degradación de un canal con cierta cobertura vegetal y un canal sin ninguna cobertura vegetal. La vegetación afecta la degradación reduciendo la velocidad de la corriente y consecuentemente su capacidad de erodabilidad cerca del lecho superficial. En las ecuaciones figura como  $C_{CH}$  y está presente en la expresión para la cantidad de sedimentos reencausados en el segmento de canal analizado ( $sed_{deg}$ ).

$$sed_{deg} = (conc_{sed,ch,mx} - conc_{sed,ch,l}) \cdot V_{ch} \cdot K_{CH} \cdot C_{CH}$$

La Tabla 5-4 muestra los rangos en los que varían los valores de los parámetros calibrados antes descritos.

	Valor mínimo	Valor máximo	
prf	0	2	.bsn
adj_pkr (=amp)	0.5	2	.bsn
ch_erod	-0.05	0.6	.rte
ch_cov	-0.001	1	.rte
spcon	0.0001	0.01	.bsn
spexp	1	1.5	.bsn
ffcb	0	1	.bsn
Usle_P	0	1	.mgt

Tabla 5-4. Rangos de valores de los parámetros calibrados

## 6. RESULTADOS

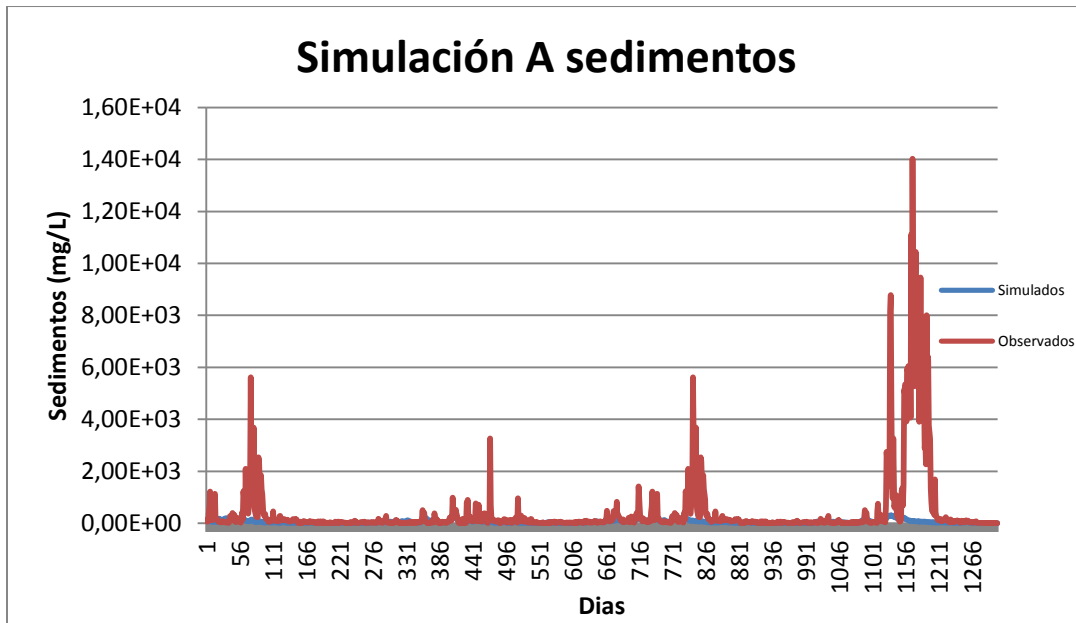
Se realizaron 19 simulaciones variando los valores de los parámetros manualmente, lo que al principio fue puramente aleatorio, al final terminó siendo una variación más intuitiva entre los rangos establecidos por ArcSWAT obteniendo los siguientes estadísticos en cada una de dichas simulaciones (ver Tabla 6-1).

En la simulación S se obtuvieron los mejores resultados para los tres estadísticos analizados teniendo en cuenta los criterios de Moriasi para el desempeño de un modelo de cuencas hidrológicas; el máximo y valor óptimo para el NSE 1.00 y valores de 0.0038 y 0.0011 para los estadísticos RSR y PBIAS para ambos el valor óptimo es 0.00. Como se mencionó anteriormente el criterio de variación de los parámetros fue aleatorio únicamente obedeciendo valores dentro del rango estipulado por el programa. Las últimas 6 simulaciones (M, N, O, P, Q y R) tuvieron desempeños estadísticos *muy buenos* para los tres estadísticos estudiados.

	Parámetro								NSE	RSR	PBIAS
	prf	adj-pkr	spexp	spcon	ffcb	usle-p	ch_erod	ch_cov			
Sim A	0.6000	0.5000	1.0000	0.0060	0.2500	0.5000	-0.0500	-0.0010	-0.0546	1.0269	0.8546
Sim B	0.7000	1.0000	1.0010	0.0070	0.5000	0.7500	-0.0100	-0.0001	-0.0331	1.0164	0.7899
Sim C	0.8000	1.5000	1.0100	0.0090	0.7500	0.9000	0.3000	0.5000	0.0678	0.9655	0.5539
Sim D	0.9000	2.0000	1.1000	0.0099	0.8000	1.0000	0.6000	1.0000	0.1372	0.9289	0.4572
Sim E	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	1.0000	0.6000	1.0000	0.3667	0.7958	-0.0516
Sim F	1.5000	1.0000	1.5000	0.0099	1.0000	1.0000	0.6000	1.0000	0.2550	0.8631	0.3161
Sim G	1.0000	1.5000	1.3000	0.0099	0.9000	0.9000	0.3000	0.5000	0.0906	0.9536	0.5692
Sim H	1.0000	2.0000	1.3000	0.0099	0.9000	1.0000	0.6000	1.0000	0.1388	0.9280	0.5252
Sim I	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.7500	0.6000	1.0000	0.3666	0.7958	-0.0515
Sim J	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.3000	0.6000	1.0000	0.3666	0.7959	-0.0514
Sim K	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.0000	0.6000	1.0000	0.3665	0.7959	-0.0513
Sim L	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	1.0000	0.1000	1.0000	0.5526	0.6689	-0.2875
Sim M	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.8500	0.1000	1.0000	<b>0.9988</b>	<b>0.0349</b>	<b>0.0159</b>
Sim N	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.8000	0.1000	1.0000	<b>0.9978</b>	<b>0.0471</b>	<b>0.0215</b>
Sim O	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.8500	0.2000	1.0000	<b>0.8382</b>	<b>0.4022</b>	<b>-0.1894</b>
Sim P	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.8700	0.1000	1.0000	<b>0.9991</b>	<b>0.0305</b>	<b>0.0138</b>
Sim Q	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.8800	0.1000	1.0000	<b>0.9992</b>	<b>0.0278</b>	<b>0.0127</b>
Sim R	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.9500	0.1000	1.0000	<b>0.9998</b>	<b>0.0123</b>	<b>0.0053</b>
Sim S	2.0000	2.0000	1.5000	0.0099	1.0000	0.9900	0.1000	1.0000	<b>1.0000</b>	<b>0.0038</b>	<b>0.0011</b>

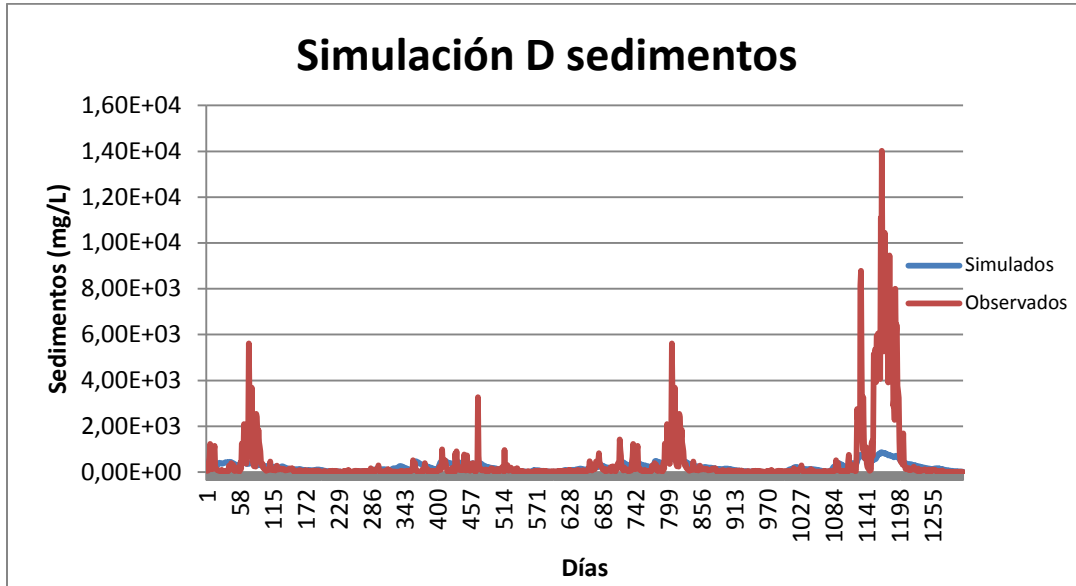
Tabla 6-1. Simulaciones para parámetros de sedimentos con resultados estadísticos.

Para cada una de las simulaciones se obtuvo un diagrama comparativo entre los datos simulados y los observados en campo, como se verá en las siguientes gráficas, estas permiten observar claramente cómo la curva de sedimentos medidos y la de sedimentos simulados se van asemejando poco a poco con cada simulación.



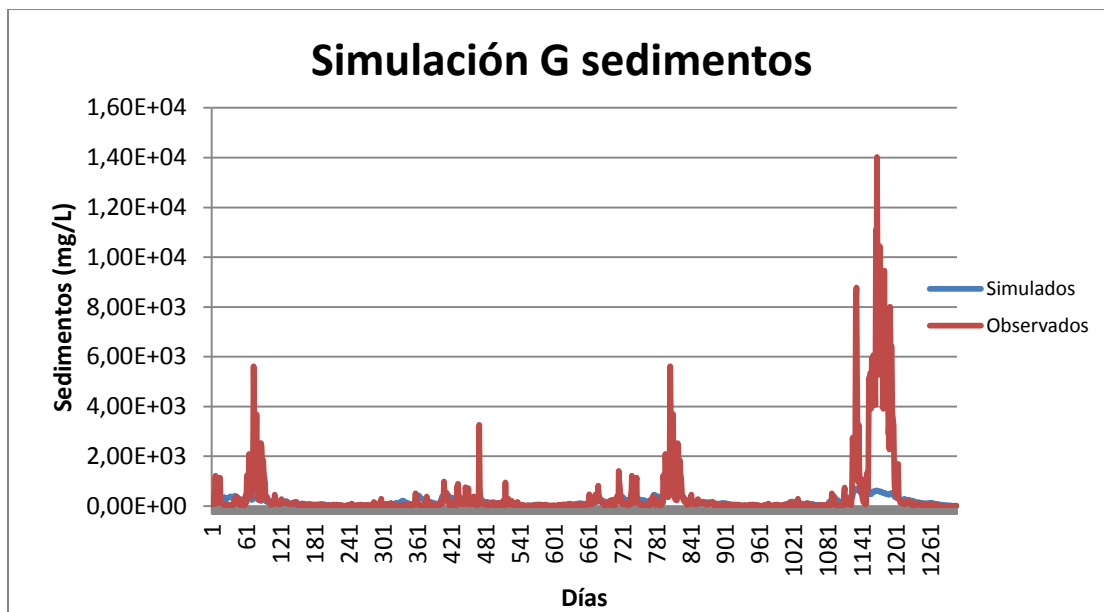
Gráfica 1. Simulación A de sedimentos

En la simulación A la curva de los datos simulados por el modelo está muy alejada de la curva de los datos medidos, es casi imperceptible pues está muy unida al eje de las abscisas. En esta simulación los valores de los parámetros están más cercanos a sus límites inferiores, con valores negativos en los parámetros  $ch_{erod}$  y  $ch_{cov}$ , el primero relacionado con erodibilidad del canal y el segundo con la cobertura vegetal del canal, ambos parámetros importantes para la estimación de los sedimentos transportados.



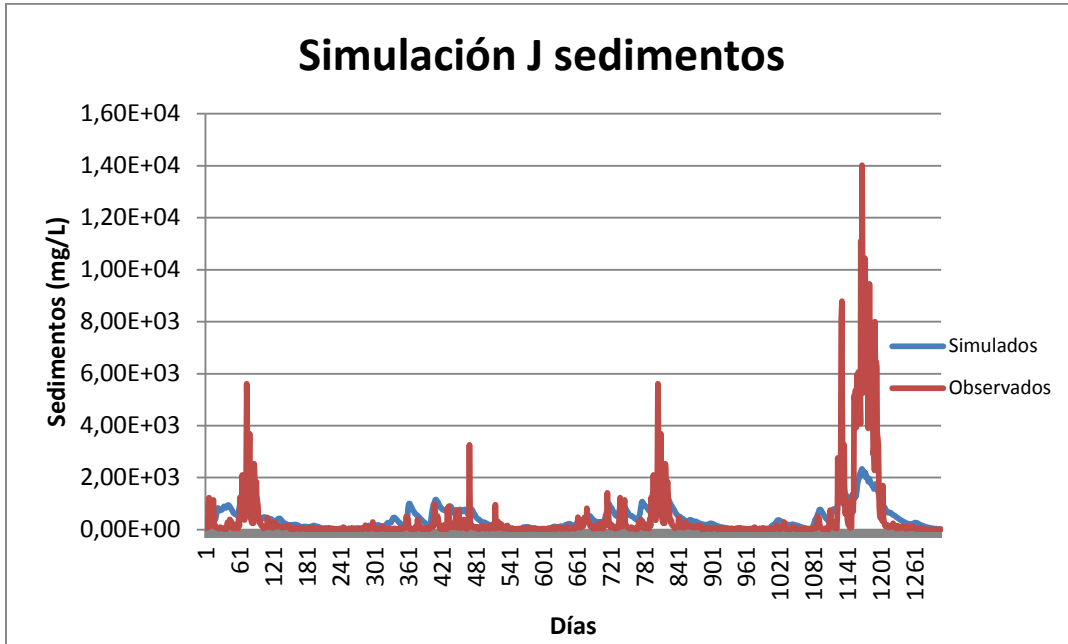
Gráfica 2. Simulación de sedimentos D

De la simulación A a la D los cambios consistieron en aumentar el valor de todos los parámetros, en especial los valores de  $ch_{erod}$  y  $ch_{cov}$  que fueron aumentados a valores positivos ( $>0$ ). Aun así la simulación obtuvo desempeños estadísticos *insatisfactorios*.



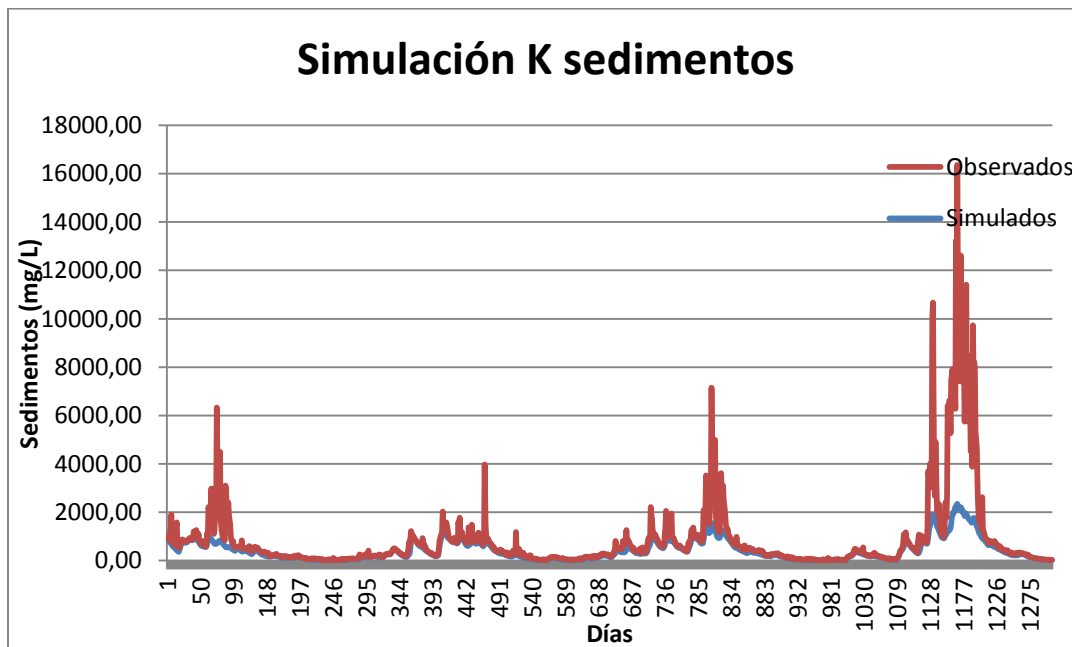
Gráfica 3. Simulación G de sedimentos

En la gráfica de la simulación G la curva de los datos simulados se levanta un poco en los puntos donde los datos observados tienen máximos, pero aun así su tendencia es muy horizontal y no se considera una simulación aceptable dado a que los estadísticos NSE y RSR son insatisfactorios y el PBIAS es apenas satisfactorio.



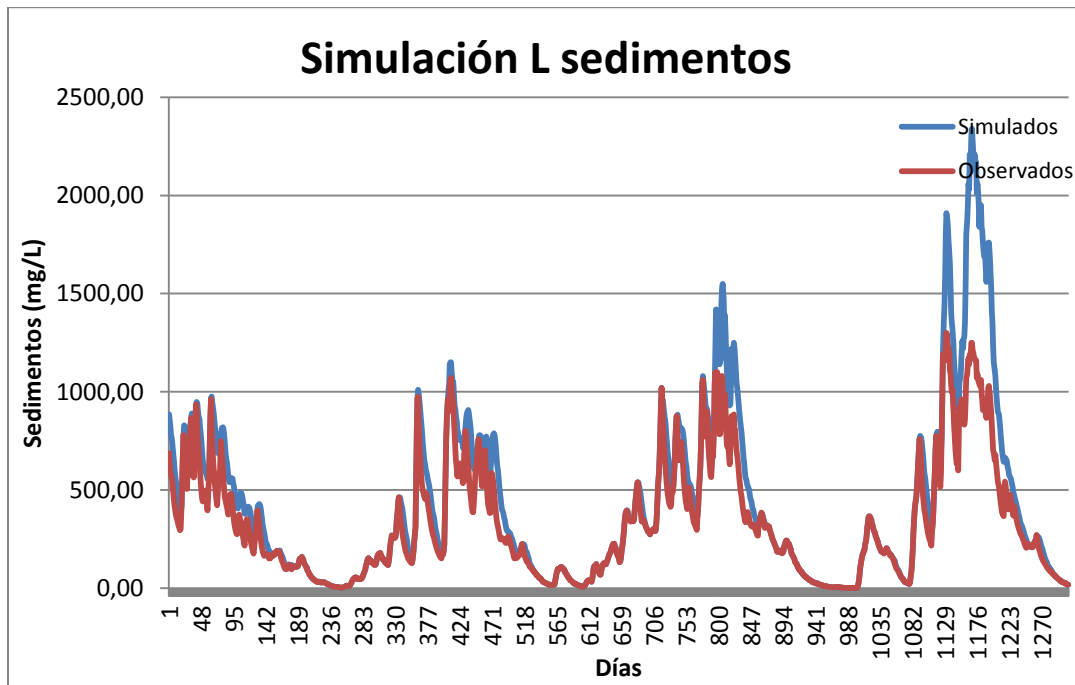
Gráfica 4. Simulación J de sedimentos

La Gráfica 4 de la simulación J muestra un mejor ajuste de los datos simulados a los observados, especialmente a los algunos máximos locales, sus estadísticos NSE y RSR son insatisfactorios aunque el PBIAS tuvo un desempeño muy bueno, lo que explica el buen ajuste en los máximos, ya que este estadístico indica la tendencia promedio de los datos simulados a ser más grande o más pequeña que su contraparte, los datos observados. La diferencia esencial entre los valores de los parámetros de la simulación G y la J fue duplicar el valor de los parámetros  $prf$ ,  $ch_{erod}$  y  $ch_{cov}$ .



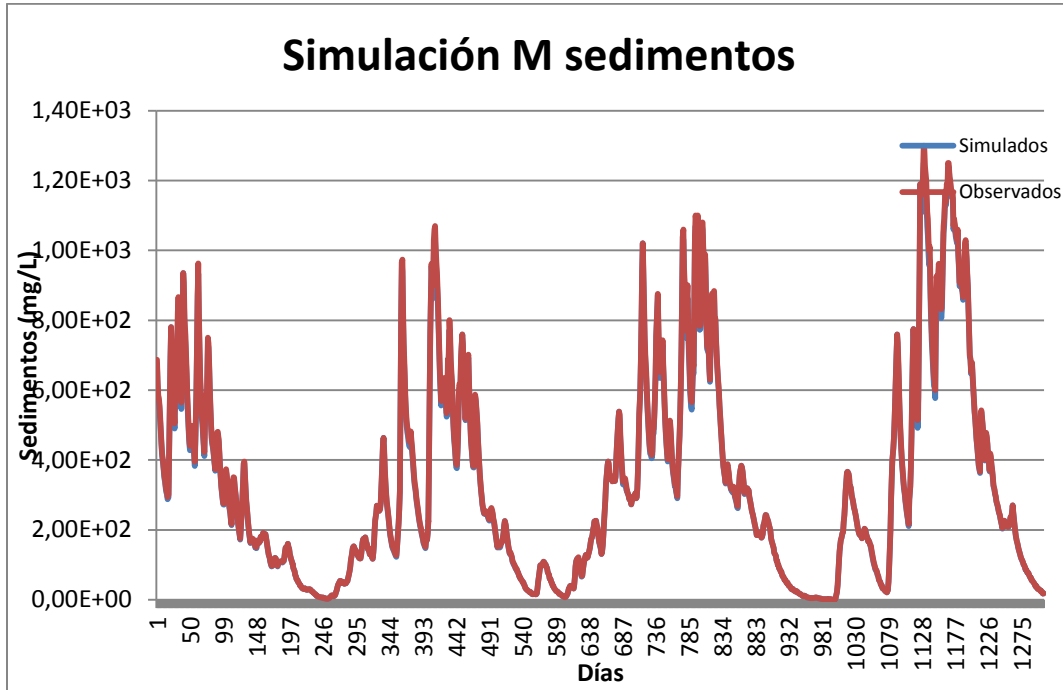
Gráfica 5. Simulación K de sedimentos

El propósito de mostrar la gráfica de la simulación K, que es la intermedia entre la simulación J y la L donde hubo un salto abrupto en la curva de los datos simulados, es evidenciar que la variación al disminuir de 0.3 a 0.00 el valor del parámetro *usle-p* no generó ninguna variación sustancial ni en los estadísticos (que siguen teniendo los mismos desempeños que en la simulación J) ni en la curva, cuya forma y ajuste no varía visiblemente.



Gráfica 6. Simulación L de sedimentos

En la simulación L hay un gran cambio del comportamiento del modelo comparativamente con las simulaciones anteriores, este abrupto cambio es debido al aumento en el valor del parámetro *usle-p* de 0.0-0.3 a 1.0 y la disminución en el de *ch\_erod* de 0.6 a 0.1, lo que puede dar a entender que estos parámetros son muy sensibles y alguna modificación en su valor afecta en mayor medida el desempeño del modelo frente a la de otros parámetros.

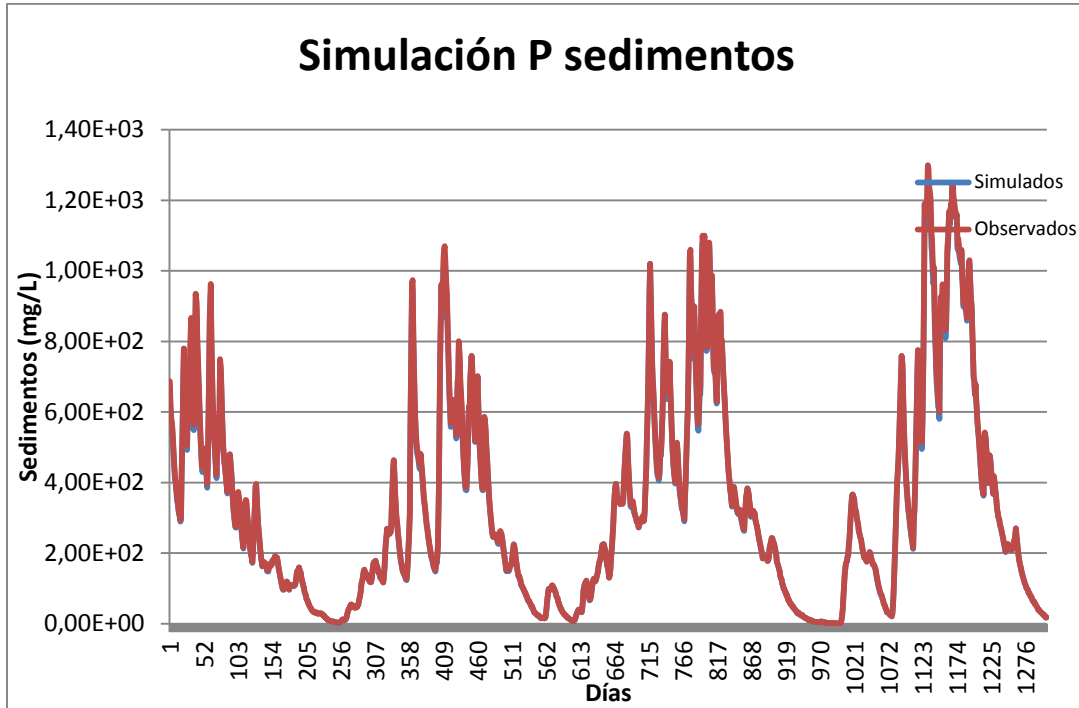


Gráfica 7. Simulación M de sedimentos

En la simulación M se ve un muy buen ajuste de la curva de los datos simulados y los observados, (a simple vista es imperceptible la diferencia entre ambas curvas) los estadísticos PBIAS, NSE y RSR tienen un desempeño *muy bueno* es la primera simulación en la que se alcanzó este nivel y es de resaltar que se consiguió con cambios básicamente en dos parámetros, el *usle-p* y *ch\_erod* ambos relacionados con la erodabilidad del canal, el primero como un factor que predice la erosión media anual en función de la intensidad de la precipitación y el segundo como el factor directo de erosión del canal siendo función de las propiedades de los materiales del fondo del canal.

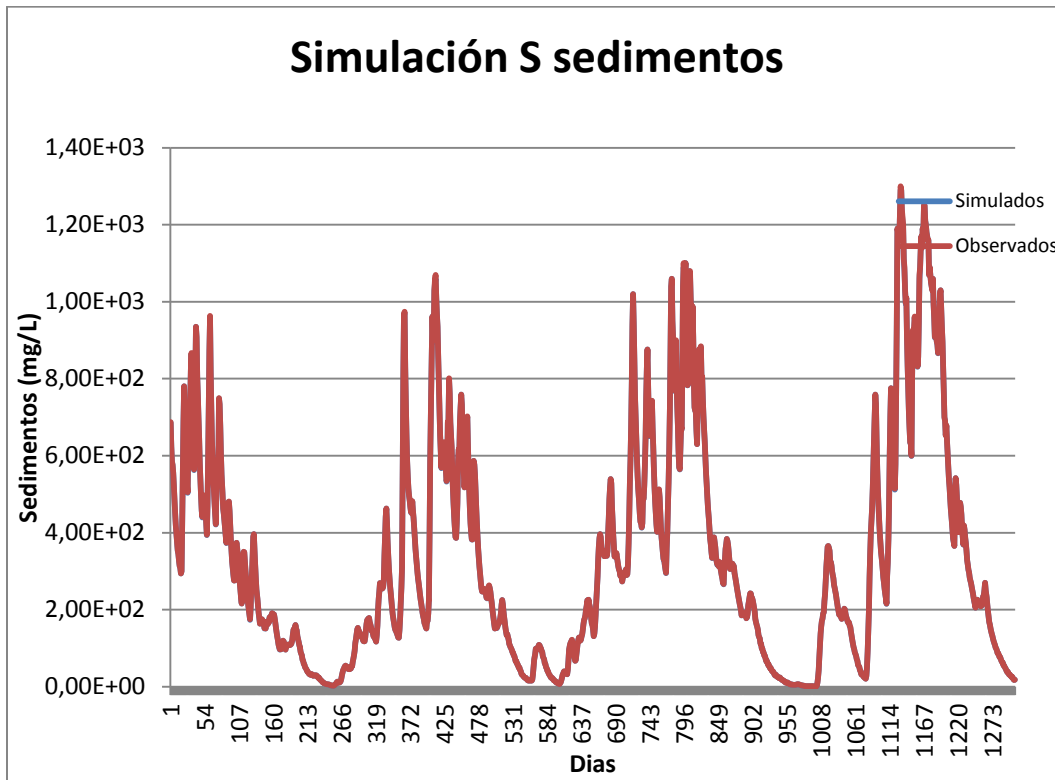
Todas las simulaciones a partir de la M obtuvieron desempeños *muy buenos* y esto radicó en que todos los parámetros fueron calibrados para tomar sus máximos valores excepto por el parámetro *ch\_erod* que fue ajustado para tener su valor mínimo así obtener buenos resultados. Las siguientes gráficas corresponden a las simulaciones P y S, en las que se evidencia el ajuste casi perfecto entre las curvas de simulación y datos observados las cuales no son diferenciables a la vista.





Gráfica 8. Simulación P de sedimentos

Los cambios hechos entre la simulación M y la P se reducen a pequeñas variaciones de los parámetros *usle-p* y *ch\_erod* para optimizar el desempeño de los estadísticos, llevándolos cada vez más cerca de su valor ideal. El valor de la variable *usle-p* fue aumentado de 0.85 a 0.87 y *ch\_erod* no fue modificada pues en la simulación O al haber aumentado su valor a 0.2 el estadístico PBIAS decayó en desempeño, de *muy bueno* a *bueno* por lo que se dejó en 0.1.



Gráfica 9. Simulación S de sedimentos

Tras obtener los resultados de la simulación S el proceso de calibración concluyó, es decir que los valores de los parámetros en dicha simulación se dejan como definitivos al haber arrojado estadísticos con valores muy cercanos a los óptimos, todos con desempeño muy bueno. También se debe resaltar que los valores de los parámetros que arrojaron los mejores estadísticos son los valores máximos dentro de los rangos para cada parámetro.

### 6.1. Validación

Según (Baldasano, 2010) la validación de un modelo significa extrapolar el alcance de este y en consecuencia sus resultados; esto se logra cambiando algunas de las condiciones básicas del modelado estudiado. La validación realizada consistió en evaluar el modelo con los 3 primeros años del periodo de datos disponibles y no con el periodo de 4 años como se estuvo haciendo hasta este punto para la calibración. Se obtuvo una diferencia de  $-0.0005$  en el RSR, pero ninguna en el PBIAS o NSE (todos expresados con 4 cifras significativas) considerándolos todos como muy buenos estadísticos para la validación. Esta fase de la modelación se hace con la finalidad de darle robustez al modelo y es una forma de evaluarlo como proceso previo al análisis cuantitativo de la incertidumbre.



Gráfica 10. Validación para sedimentos

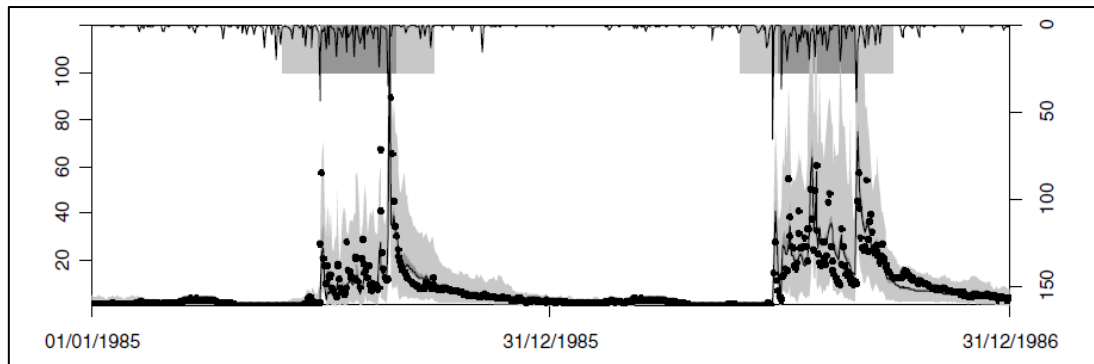
Se puede concluir que se llevó la calibración del modelo para transporte de sedimentos a un muy buen desempeño de los estadísticos tras simular 19 casos diferentes, encontrando valores adecuados para los parámetros básicos que se evaluaron cuantitativamente mediante estadísticos que resultaron apropiados para los objetivos del proyecto. El anterior procedimiento se hizo manualmente.

## 7. ANÁLISIS DE INCERTIDUMBRE

La incertidumbre es el grado de ajuste que existe entre la realidad y los datos simulados por un modelo, lo cual da una medida de cómo simula el mundo real el modelo. Para determinar lo anterior la forma más usada es comparar los datos simulados por el modelo con medidas reales del sistema estudiado y esto se puede hacer con varias técnicas gráficas y estadísticas.

Los análisis de incertidumbre se llevan a cabo básicamente a tres niveles:

- Análisis cualitativo (gráfico): Define la magnitud y fuente del error.



**Ilustración 2.** Incertidumbre representada por área sombreada debida a inputs y outputs de un modelo (Jing Yang, Reichert, Abbaspuor, Jun Xia, & Hong Yang, 2008)

Existen diversas formas de representar gráficamente el ajuste del modelo, la más común es en una gráfica de los valores simulados vs. Valores observados pero también hay diagramas de dispersión con línea 1:1 y  $FA_2$ , análisis temporales, frecuencia acumulada, Scatter plots o diagramas de dispersión y box plots que muestran la distribución de los percentiles.

- Análisis semicuantitativo: Ratios, indicadores relativos.
- Análisis cuantitativo (estadístico): Para este tipo de análisis lo más importante es tener los objetivos específicos del trabajo bien establecidos al igual que las hipótesis a comprobar. Algunos de los estadísticos que se pueden calcular son: la tendencia central, el error relativo, la varianza, el error cuadrático medio normalizado (ECMN), Bias o sesgo, sesgo fraccional (SF) y sigma fraccional (GF), media relativa del sesgo (FD),  $FA_x$ , Precisión del valor máximo, Coeficiente de correlación ( $r$ ), Regresión lineal, Test de significancia de la pendiente de la recta y la ordenada de origen,

Además de estos análisis es necesario dotar al modelo con una completa documentación en donde estén todas las bases teóricas, es decir ecuaciones y suposiciones que respalden su funcionamiento. También debe haber una explicación de los parámetros o variables usadas junto con sus rangos de funcionamiento y limitaciones.

Para el presente estudio se hizo un análisis de incertidumbre cualitativo (gráfico) y cuantitativo (análisis estadístico). Consistió en analizar un conjunto (110 combinaciones diferentes) de parámetros de caudal con buenos resultados estadísticos, arrojado por el programa Parasol, de calibración automática para ArcSWAT, determinados dentro de un intervalo de confianza del 95% para una función de distribución  $\chi^2$  y con ellos se determinó la sensibilidad a esta calibración, de los parámetros de sedimentos escogidos en la calibración manual hecha.

Se partió de las simulaciones arrojadas tras la optimización automática de ParaSol para la predicción de la incertidumbre, ya que estas simulaciones junto con las muestras del algoritmo son de gran valor al estar en todo el espacio del parámetro concentrándose en los valores óptimos de estos. El procedimiento de ParaSol se resume esencialmente en dos pasos:

1. Tras la aplicación del algoritmo SCE-UA mejorado en su aleatoriedad (lo que ayuda a moverse a través de todo el espacio del parámetro) se dividen las simulaciones presentadas entre “buenas” y “no buenas” simulaciones a partir de un valor umbral para la función objetivo del programa SSQ, obteniendo sets bueno y sets no buenos de simulaciones.
2. Se construye la predicción de la incertidumbre dándole el mismo peso a las simulaciones “buenas”.

La función objetivo usada por Parasol es la suma de los cuadrados de los residuos (SSQ):

$$SSQ = \sum_{ti=1}^n (y_{ti}^M(\theta) - y_{ti})^2$$

Como el valor umbral de la función objetivo está basado en una distribución  $\chi^2$  se hace la suposición de medidas independientes de los errores.

Sabiendo el funcionamiento de ParaSol descrito anteriormente, se presentan (Ver ANEXO) las 110 simulaciones del conjunto de “buenas simulaciones” o sets de parámetros, obtenidas para los parámetros de caudal Alpha\_Bf, Canmx, Ch\_K2, Ch\_N2, Cn2, Esco, Gwqmn, Revapmn, Slope, Sol\_Awc, Sol\_K, Sol\_Z y Surlag. De estas, los conjuntos de parámetros con valores mínimos, máximos e intermedios fueron:

	Alpha_Bf	Canmx	Ch_K2	Ch_N2	Cn2	Esco	Gwqmn	Revapmn	Slope	Sol_Awc	Sol_K	Sol_Z	Surlag
<b>MIN</b>	0.11	0.00	46.04	0.06	11.48	0.97	0.00	13.80	21.79	-16.78	-8.14	19.49	0.05
<b>MAX</b>	0.16	0.55	77.90	0.19	19.92	1.00	20.44	308.48	25.00	13.68	25.00	25.00	0.10

**Tabla 7-1. Set de valores máximos y mínimos de los parámetros de caudal**

Se debe tener en cuenta que los valores de los parámetros Cn2, Sol\_Awc, Sol\_K y Sol\_Z no son reemplazados en el programa sino que deben ser multiplicados por el valor mostrado en la Tabla 7-1 para estos parámetros; los factores son porcentajes que varían entre -25% y 25%.

Con estos valores máximos, mínimos e intermedios se generaron 27 simulaciones a partir de combinaciones de estas para obtener casos intermedios y así abarcar con mayor amplitud el espacio de los parámetros, es decir todo el espectro de buenos parámetros para el caudal según ParaSol; la metodología para crear las combinaciones con los valores máximos y mínimos fue la siguiente:

Q MIN: TODOS LOS PARÁMETROS MÍNIMOS

C1: P1(MAX) P2(MIN) P3(MIN) P4(MIN) P5(MIN) P6(MIN) P7(MIN)...P13(MIN)

C2: P1(MAX) P2(MAX) P3(MIN) P4(MIN) P5(MIN) P6(MIN) P7(MIN)... P13(MIN)

C3: P1(MAX) P2(MAX) P3(MAX) P4(MIN) P5(MIN) P6(MIN) P7(MIN)... P13(MIN)

C4: P1(MAX) P2(MAX) P3(MAX) P4(MAX) P5(MIN) P6(MIN) P7(MIN)... P13(MIN)

C5: P1(MAX) P2(MAX) P3(MAX) P4(MAX) P5(MAX) P6(MIN) P7(MIN)... P13(MIN)

... C12: P1(MAX) P2(MAX) P3(MAX) P4(MAX) P5(MAX) P6(MAX) P7(MAX)... P13(MAX)

Y a partir de la simulación 13 se hizo el mismo procedimiento pero en la dirección contraria (empezando desde el parámetro 13):

C13: P1(MIN)... P7(MIN) P8(MIN) P9(MIN) P10(MIN) P11(MIN) P12(MIN) P13(MAX)

C14: P1(MIN)... P7(MIN) P8(MIN) P9(MIN) P10(MIN) P11(MIN) P12(MAX) P13(MAX)

C15: P1(MIN)... P7(MIN) P8(MIN) P9(MIN) P10(MIN) P11(MAX) P12(MAX) P13(MAX)

C16: P1(MIN)... P7(MIN) P8(MIN) P9(MIN) P10(MAX) P11(MAX) P12(MAX) P13(MAX)

C17: P1(MIN)... P7(MIN) P8(MIN) P9(MAX) P10(MAX) P11(MAX) P12(MAX) P13(MAX)

... C25 = C12

Además de las anteriores combinaciones también se crearon 5 más, con los valores intermedios de la siguiente manera:

VAL. INTERMEDIOS: TODOS LOS PARÁMETROS CON VALORES INTERMEDIOS.

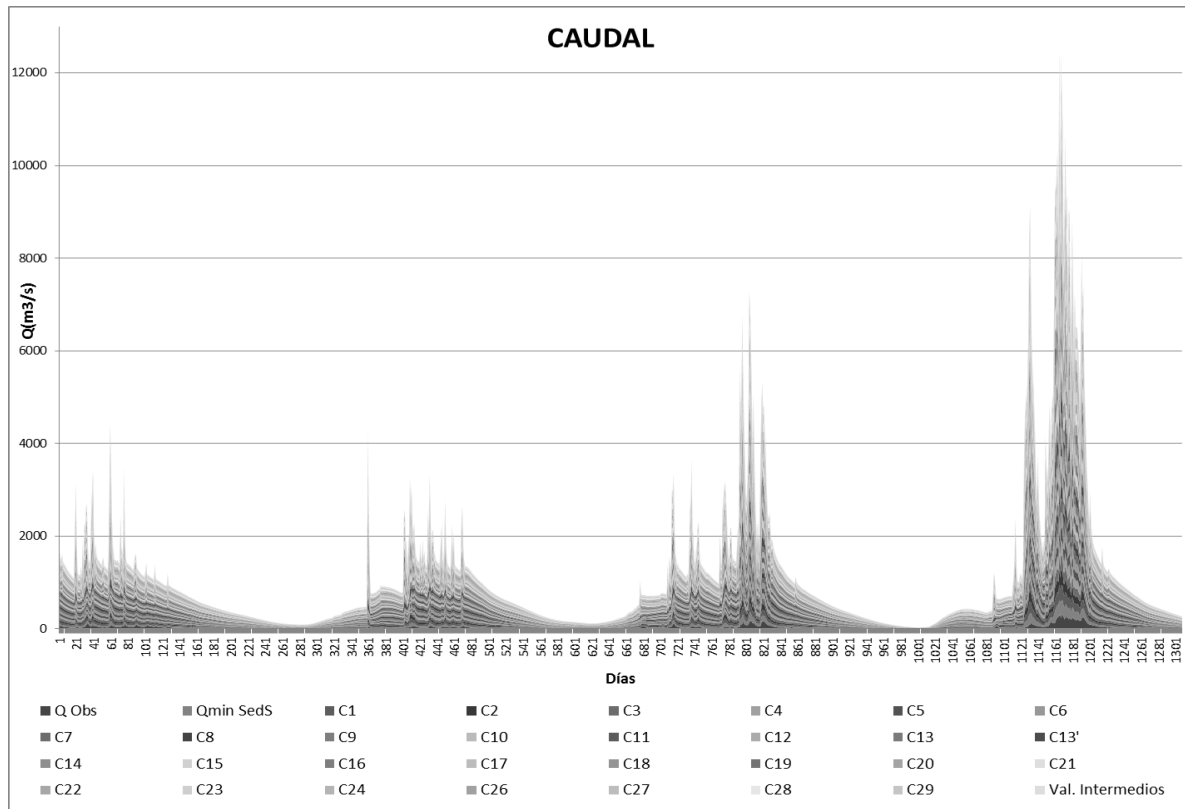
C26: P1(MAX) P2(MAX) P3(MAX) P4(MAX) P5(MAX) P6(MAX) P7(V.INT) P8(V.INT) P9(V.INT) P10(V.INT) P11(V.INT) P12(V.INT) P13(V.INT)

C27: P1(V.INT) P2(V.INT) P3(V.INT) P4(V.INT) P5(V.INT) P6(V.INT) P7(MAX) P8(MAX) P9(MAX) P10(MAX) P11(MAX) P12(MAX) P13(MAX)

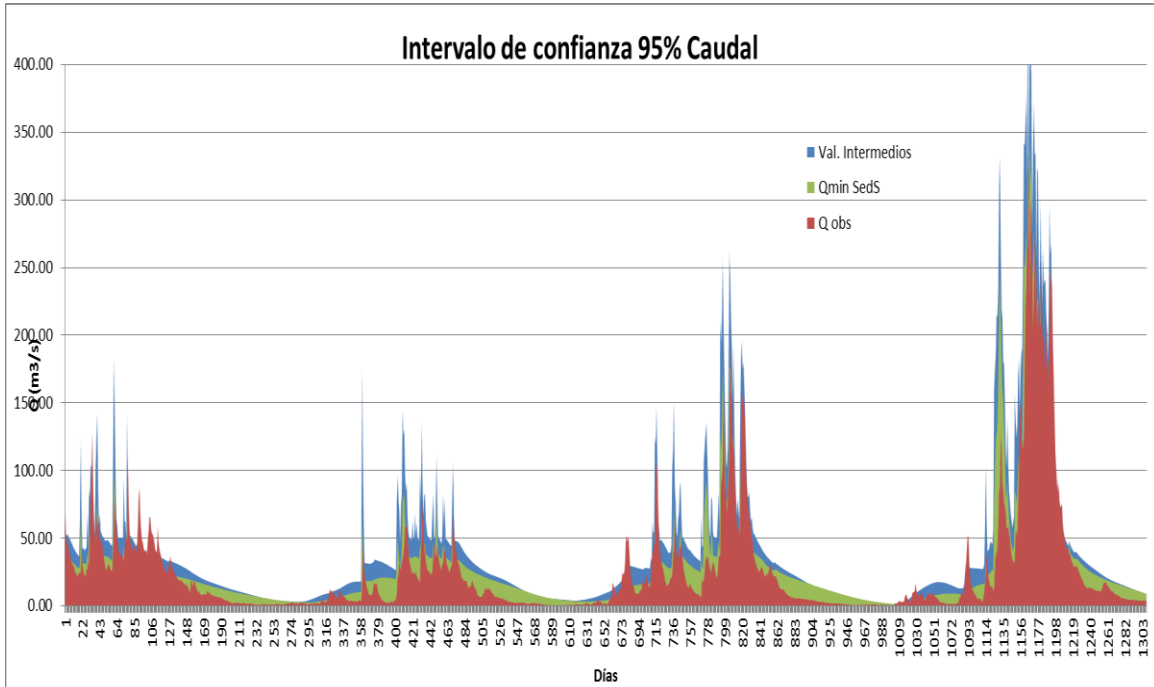
C28: P1(V.INT) P2(V.INT) P3(V.INT) P4(V.INT) P5(V.INT) P6(V.INT) P7(MIN) P8(MIN) P9(MIN) P10(MIN) P11(MIN) P12(MIN) P13(MIN)

C29: P1(MIN) P2(MIN) P3(MIN) P4(MIN) P5(MIN) P6(MIN) P7(V.INT) P8(V.INT) P9(V.INT) P10(V.INT) P11(V.INT) P12(V.INT) P13(V.INT)

Con las anteriores simulaciones (Ver ANEXO) corridas en SWAT, se obtuvieron las gráficas para el caudal y para los sedimentos (Ver Gráfica 11 y Gráfica 13 ) en la cuenca durante los 4 años estudiados, así como los estadísticos (NSE, RSR y PBIAS) para todas las simulaciones:

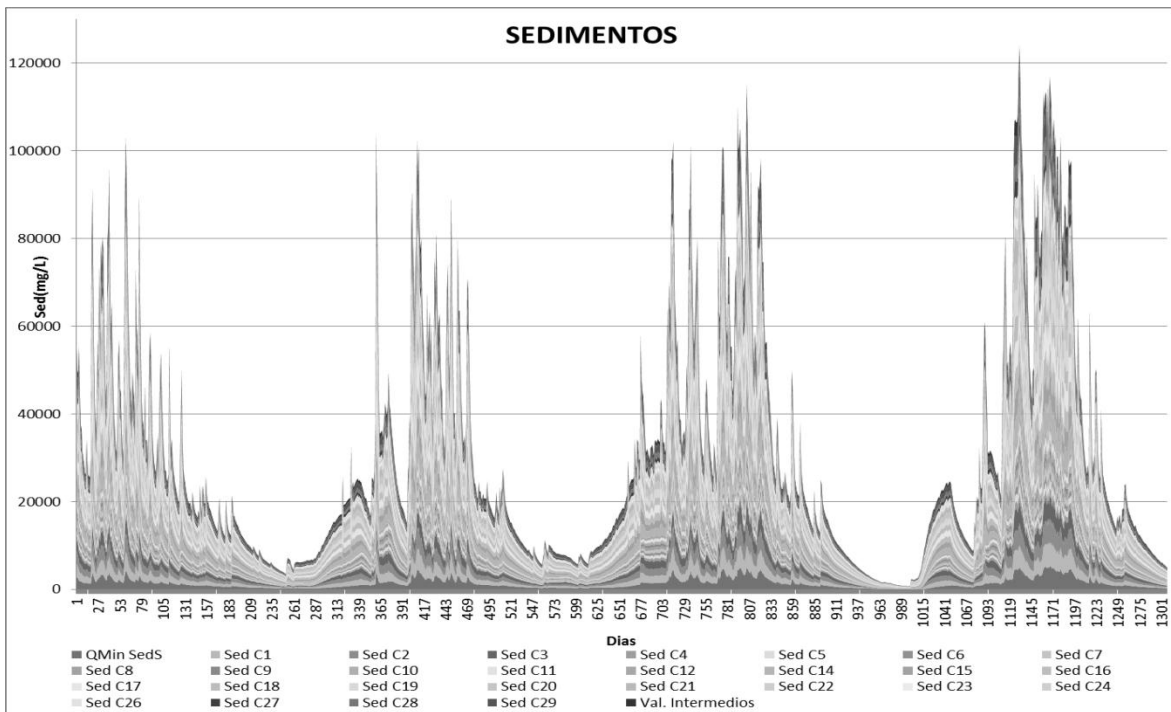


**Gráfica 11. 32 simulaciones buenas para caudal**



Gráfica 12. Intervalo de confianza 95% para caudal

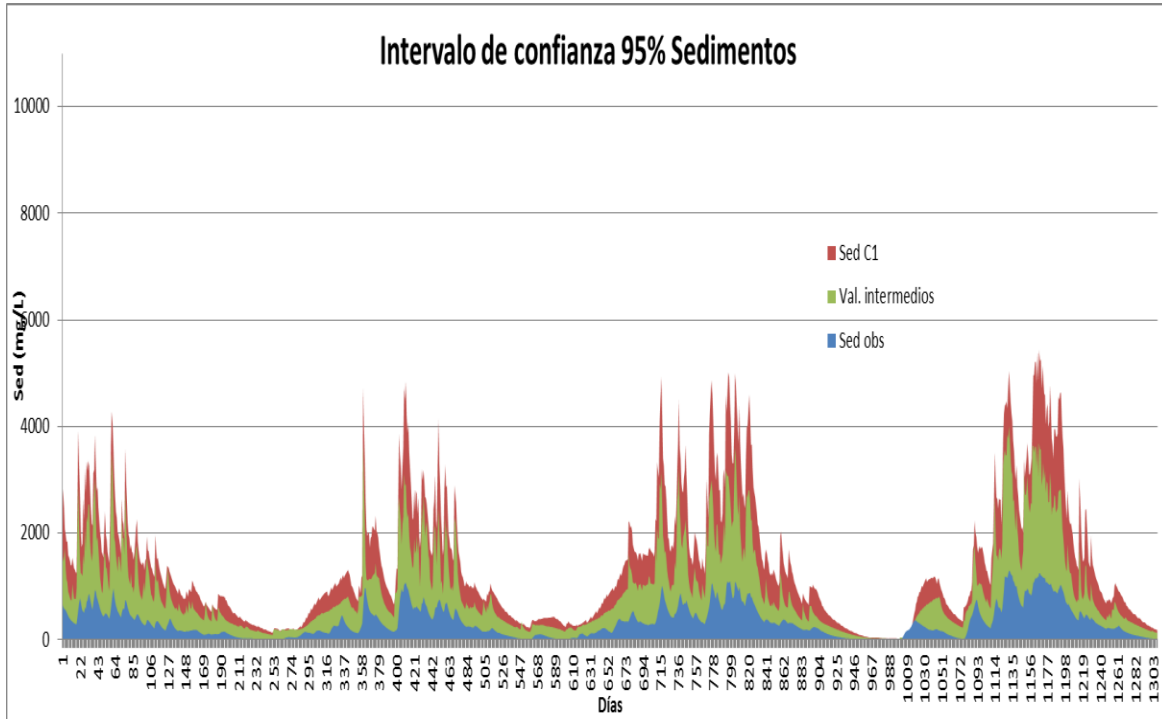
En la gráfica anterior se puede ver el límite inferior y superior del intervalo de confianza para las simulaciones hechas de caudal en contraste con los datos observados.



Gráfica 13. 32 simulaciones para sedimentos



Al comparar las gráficas de caudal y sedimentos para las 32 simulaciones diferentes, se observa mayor uniformidad para el caudal y mayor dispersión alrededor del valor observado en la gráfica de sedimentos, es un resultado esperado ya que los conjuntos de buenos parámetros correspondían al caudal y no a sedimentos por lo que los buenos resultados deben verse en la gráfica de caudal y no en la de sedimentos, esto se verá con mayor claridad al analizar los estadísticos para ambos casos.



Gráfica 14. Intervalo de confianza 95% para sedimentos

En la Gráfica 14 se pueden observar los límites inferior y superior para sedimentos que resultaron de las combinaciones hechas con los parámetros de caudal, obviando las simulaciones intermedias o contenidas en el intervalo de confianza, los datos observados están por debajo de ambos límites, es decir que las mediciones no están contenidas en el intervalo.

	CAUDAL			SEDIMENTOS		
	NSE	RSR	PBIAS	NSE	RSR	PBIAS
<b>MIN</b>	0.8438	0.3952	-0.1622	-20.9937	4.6897	-3.1675
<b>VAL. INTERMEDIOS</b>	0.4919	0.7128	-0.6545	-6.5559	2.7488	-1.7785
<b>MAX</b>	0.8603	0.3738	-0.2806	0.2839	0.8462	-0.5668
<b>C1</b>	0.8317	0.4103	-0.1691	-22.0770	4.8039	-3.2557
<b>C2</b>	0.8317	0.4103	-0.1691	-21.9985	4.7957	-3.2501
<b>C3</b>	0.8549	0.3809	-0.2348	0.9524	0.2182	-0.0109
<b>C4</b>	0.8703	0.3602	-0.2344	-8.1016	3.0169	-1.8271
<b>C5</b>	0.8703	0.3602	-0.2344	0.4294	0.7554	-0.5033
<b>C6</b>	0.8699	0.3607	-0.2365	0.4284	0.7560	-0.5037
<b>C7</b>	0.8724	0.3572	-0.2187	0.4497	0.7418	-0.4868
<b>C8</b>	0.8705	0.3599	-0.2320	0.4319	0.7537	-0.5016
<b>C9</b>	0.8693	0.3615	-0.2346	0.3521	0.8049	-0.5289
<b>C10</b>	0.8693	0.3615	-0.2346	0.3521	0.8049	-0.5289
<b>C11</b>	0.8678	0.3636	-0.2394	0.3477	0.8076	-0.5313
<b>C12</b>	0.8603	0.3738	-0.2806	0.2839	0.8462	-0.5668
<b>C13</b>	0.2543	0.8635	-0.6195	-36.9004	6.1563	-3.9937
<b>C14</b>	0.2545	0.8634	-0.6194	-37.1027	6.1727	-4.0063
<b>C15</b>	0.2516	0.8651	-0.6210	-37.1588	6.1773	-4.0090
<b>C16</b>	0.2516	0.8651	-0.6210	-37.1588	6.1773	-4.0090
<b>C17</b>	0.2366	0.8738	-0.6223	-38.9485	6.3205	-4.0753
<b>C18</b>	0.2366	0.8738	-0.6223	-38.9485	6.3205	-4.0753
<b>C19</b>	0.2399	0.8718	-0.6180	-38.8738	6.3146	-4.0678
<b>C20</b>	0.2399	0.8718	-0.6180	-38.8738	6.3146	-4.0678
<b>C21</b>	0.2399	0.8718	-0.6180	-38.8738	6.3146	-4.0678
<b>C22</b>	0.5144	0.6969	-0.6090	-1.2241	1.4914	-0.9031
<b>C23</b>	0.6196	0.6167	-0.6872	-0.9226	1.3866	-0.8802
<b>C24</b>	0.6203	0.6162	-0.6857	-0.9359	1.3914	-0.8808
<b>C26</b>	0.5800	0.6492	-0.6788	-1.2911	1.5136	-0.9672
<b>C27</b>	0.4042	0.7719	-0.6587	-7.3816	2.8951	-1.8023
<b>C28</b>	0.5728	0.6536	-0.6567	-7.3158	2.8837	-1.9126
<b>C29</b>	0.3220	0.8234	-0.6302	-44.5657	6.7502	-4.3831

Tabla 7-2. Estadísticos para análisis de incertidumbre para Caudal y Sedimentos.

En general los estadísticos para las simulaciones de caudal tuvieron un mejor desempeño que los de sedimentos y para la primera parte (de la simulación C1 a la C12) los valores fueron mucho mejores (*Muy buenos* y *buenos*) que para la segunda parte (de la simulación 13 a la 25) donde los valores fueron principalmente *Insatisfactorios*, la simulación con mejores resultados estadísticos fue la C3 en donde la única modificación hecha frente a la simulación C2 fue cambiar el valor del parámetro  $CH\_k2$  de mínimo a máximo. Para sedimentos tanto en la primera como en la segunda

parte los resultados estadísticos fueron mayoritariamente *Insatisfactorios*. En las simulaciones C26, C27, C28 y C29 los resultados estadísticos fueron *Satisfactorios* e *Insatisfactorios* para caudal e *Insatisfactorios* para sedimentos.

Para cuantificar la incertidumbre del modelo se usará el factor *r-factor* (Jing Yang, Reichert, Abbaspuor, Jun Xia, & Hong Yang, 2008):

$$r - factor = \frac{\frac{1}{n} \sum_{ti=1}^n (Y_{97,5\%}^M - Y_{2,5\%}^M)}{\sigma_{Obs}}$$

Donde n es la cantidad de datos observados o simulados,  $Y_{97,5\%}^M - Y_{2,5\%}^M$  es la diferencia entre los límites del intervalo del 95% ó 95PPU determinado por el programa ParaSol en donde los parámetros de caudal son *buenos* (110 sets) siendo  $Y_{97,5\%}^M$  el máximo o límite superior y  $Y_{2,5\%}^M$  el mínimo o límite inferior, M es la cantidad de veces que ParaSol corrió (2952 número total de observaciones) y  $\sigma_{Obs}$  es la desviación estándar de los datos medidos.

	r-factor Q	r-factor Sed
$\sum_{ti=1}^n (Y_{97,5\%}^M - Y_{2,5\%}^M)$	32920	1789159
$\frac{1}{n} \sum_{ti=1}^n (Y_{97,5\%}^M - Y_{2,5\%}^M)$	25	1368
$\sigma_{Obs}$	43	298
$\frac{\frac{1}{n} \sum_{ti=1}^n (Y_{97,5\%}^M - Y_{2,5\%}^M)}{\sigma_{Obs}}$	<b>1</b>	<b>5</b>

**Tabla 7-3. r-factor para caudal y sedimentos**

La bondad y ajuste del modelo se puede evaluar con el anterior factor según la cercanía de su valor a 1, lo que significa que el grosor del rango de confianza es igual a la desviación estándar de los datos observados, también se puede interpretar como que el área que encierra a todos los valores buenos de parámetros coincide con la dispersión de los datos observados, ya sea de caudal o sedimentos. Como se muestra en la Tabla 7-3 el r-factor para sedimentos es mayor que el de caudal, y mientras el de caudal es el valor ideal (1.0) el de sedimentos es 5.0, esto se esperaba pues se trabajó con los parámetros buenos que estaban dentro del 95% de intervalo de confianza, es decir que todos estos están contenidos en el área de confianza y así es como coincide con la desviación estándar de las mediciones. A pesar de que se trabajó con un intervalo de confianza del 95% para los parámetros de caudal, la respuesta en sedimentos no fue igual es decir que al tener una calibración correcta en caudal con un único set de datos buenos para el transporte de sedimentos, los resultados para sedimentos no son necesariamente tan buenos como los de caudal, su dispersión no está relacionada.

## 8. CONCLUSIONES

Del modelo hecho para la cuenca de Jequetepeque, discretizado espacialmente en subcuencas y unidades de respuesta hidráulica (HRU's) que permitieron un cálculo más exacto y preciso del caudal y sedimentos, teniendo en cuenta los dos aspectos más influyentes que son el tipo y uso de suelo y de la cual se obtuvo un conjunto de parámetros que caracterizaban el caudal y el transporte de sedimentos en la cuenca, se calibraron los parámetros.

A partir de la calibración automática hecha para los parámetros de caudal usando el software Parasol, y no a la manual que resultó no ser viable computacionalmente debido al set de datos insuficiente para los requerimientos del programa, se escogió el conjunto de parámetros de caudal que presentaron mejor desempeño estadístico de un conjunto de 110 buenas soluciones. Con los parámetros de caudal escogidos se hizo la calibración manual de parámetros de sedimentos.

La calibración manual de los parámetros relacionados al transporte de sedimentos para el modelo de la cuenca de Jequetepeque en ArcSWAT, después de 19 simulaciones, dio resultados muy buenos para los tres estadísticos que evaluaban el desempeño de estas, los cuales son el coeficiente de eficiencia Nash-Sutcliffe (NSE), el porcentaje BIAS (PBIAS) y el radio de la desviación estándar (RSR) de los datos observados, graficando para cada una de las simulaciones hechas los datos contrastados de las mediciones observadas en campo con los resultados del modelo.

Un análisis de incertidumbre se hizo para la respuesta del modelo a la variación entre los valores buenos arrojados por la calibración automática en ParaSol de caudal, un conjunto de 110 sets de los cuales se determinó el mínimo y máximo valor de cada parámetro y se crearon 32 combinaciones intermedias con estos valores. Con cada una de las 32 combinaciones y manteniendo el mejor conjunto de parámetros de sedimentos escogido en la calibración manual, se cuantificó la incertidumbre con r-factor (el cual resultó ser 1 para el caudal valor ideal) y 5 para sedimentos; además se graficó el intervalo de confianza o área de confianza para ambos casos. Este análisis permitió medir la robustez y rango de respuesta del modelo.

## 9. REFERENCIAS

- Baldasano, J. M. (2010). Curso de Modelización Ambiental. Barcelona, España.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1993). A shuffled complex evolution approach for effective and efficient optimization. *J. Optimization Theory Appl.* 76(3), 501-521.
- Duan, Q., Sorooshian, S., & Gupta, V. K. (1992). Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff model. *Water resource res.* 28(4), 1015-1031.
- Gan, T. Y., Dlamini, E. M., & Biftu, G. F. (1997). Effects of model complexity and structure, data quality, and objective functions on hydrologic modelling. *J. Hydrology* 192(1), 81-103.
- Gibbs, R. J. (1977). Transport phases of transition metals in the Amazonas and Yukon rivers. *Bulletin Geological Society of America*, 88, 829-843.
- Griensven, A., Francos, A., & Bauwens, W. (2002). Sensitivity analysis and autocalibration of an integral dynamic model for a river water quality. *Water Science and technology* 45(5), 321-328.
- Jing Yang, Reichert, P., Abbaspuor, K., Jun Xia, & Hong Yang. (2008). Comparing uncertainty analysis techniques for a SWAT application to the Chaohe basin in China. *Journal of hydrology*, 1-23.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE* 50(39), 885-900.
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M., & Bingner, R. L. (2007). Model Evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the ASABE*, 885-900.
- Muleta, M., Nicklow, J., & Bekele, E. (2007). Sensitivity of a distributed watershed simulation model to spatial scale. *Journal of Hydrological engrg.*, 163-172.
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (Septiembre 2004). *Soil and water assessment tool Input/Output documentation version 2005*. Temple, TX.
- Torres, E. A. (s.f.). *Algunas bases teóricas SWAT*. Bogotá.
- Yacoub, C., & Pérez Foguet, A. (2011). Slope effects on SWAT modeling in a mountainous basin.

## I. ANEXO

# SIM	Alpha_Bf	Canmx	Ch_K2	Ch_N2	Cn2	Esco	Gwqmn	Revapmn	Slope	Sol_Awc	Sol_K	Sol_Z	Surlag
1	0.12797E	0.22504E	0.56114E	0.12303E	0.14427E	0.98589E	0.51791E	0.10274E	0.24932E	0.12854E	0.11769E	0.21685E	0.0583
2	0.1449	0.1497	68.5880	0.1931	14.5690	0.9813	7.6355	203.1200	24.3310	-15.9680	18.0700	20.5450	0.1016
3	0.1379	0.1403	62.3220	0.1444	18.6000	0.9867	13.3570	120.8800	25.0000	-12.4750	9.5399	24.4700	0.0641
4	0.1241	0.2381	64.2460	0.0995	13.3140	0.9817	0.0000	186.0300	22.4030	0.4129	-2.2155	20.1970	0.0653
5	0.1372	0.3213	64.1680	0.1253	15.9150	0.9871	11.8590	204.2800	23.9490	-4.3190	2.0468	21.2580	0.0637
6	0.1056	0.2512	50.5990	0.1221	18.3180	0.9855	13.2400	160.2300	21.7860	-9.5858	5.5631	20.0200	0.0582
7	0.1059	0.2137	57.1620	0.1257	15.0270	0.9890	1.8918	167.1500	22.6050	1.2721	-5.9015	19.4930	0.0682
8	0.1232	0.3765	51.4930	0.1119	15.9020	0.9830	8.5184	182.9000	25.0000	1.4809	-1.8791	21.7020	0.0565
9	0.1519	0.3015	59.6050	0.1404	14.3140	0.9869	9.7783	229.5500	22.7510	-11.5780	13.5300	20.9990	0.0577
10	0.1374	0.3612	64.4620	0.1283	15.2800	0.9817	12.2240	141.7800	25.0000	1.9876	8.2026	22.7210	0.0619
11	0.1362	0.2706	68.6130	0.1448	12.2730	0.9832	11.2350	132.5200	25.0000	-1.7192	16.1680	23.8980	0.0779
12	0.1375	0.2322	63.6380	0.1343	14.6950	0.9787	9.8639	124.4500	24.8640	2.4244	11.4020	24.3760	0.0602
13	0.1235	0.2980	57.5270	0.1581	14.4730	0.9775	5.1728	109.4600	23.7510	1.2051	11.0130	22.4570	0.0723
14	0.1160	0.1812	60.6670	0.1279	13.2130	0.9808	2.0440	181.9200	24.5870	0.2877	8.3429	22.6930	0.0578
15	0.1168	0.4354	53.1600	0.1210	14.5550	0.9804	7.2370	133.7500	24.7300	13.6140	6.8471	24.3130	0.0645
16	0.1232	0.3301	57.2580	0.1085	15.2030	0.9806	3.9826	198.7500	25.0000	13.6820	3.3426	24.7270	0.0640
17	0.1542	0.4006	63.2210	0.1809	13.4930	0.9850	14.4380	95.3230	24.2730	4.6302	15.7290	25.0000	0.0825
18	0.1311	0.3623	51.9110	0.1414	12.2980	0.9871	10.2730	64.9420	23.9000	-3.0846	20.6710	25.0000	0.0628
19	0.1290	0.3801	48.6100	0.1370	12.6520	0.9884	9.7871	48.5260	24.6220	-4.3390	21.2930	24.3680	0.0621
20	0.1453	0.2802	69.6570	0.1457	14.5830	0.9891	11.5180	72.6340	21.8710	-6.5508	16.8900	23.1800	0.0758
21	0.1523	0.3070	69.2400	0.1226	13.5010	0.9901	13.2630	95.2990	25.0000	-1.9257	19.5580	22.4080	0.0598
22	0.1303	0.2395	65.0620	0.1373	15.1900	0.9772	11.1080	239.7000	25.0000	0.4677	8.4028	23.7220	0.0668
23	0.1284	0.2589	56.7310	0.1165	14.1670	0.9784	11.6160	271.1900	25.0000	-6.3959	15.1320	23.1620	0.0648
24	0.1138	0.4137	59.2570	0.1200	14.0750	0.9906	19.3860	238.2300	23.2720	-3.2404	16.2550	25.0000	0.0654
25	0.1074	0.1746	52.6500	0.1382	16.6590	0.9742	9.3374	308.4800	23.4050	-1.6921	1.6962	21.7270	0.0626
26	0.1209	0.3152	48.9310	0.1303	14.9800	0.9772	6.5492	197.8800	25.0000	4.4837	3.0290	22.3070	0.0597
27	0.1178	0.2698	47.2050	0.1382	13.7190	0.9785	9.3532	220.9000	25.0000	6.2642	8.8733	23.6660	0.0622
28	0.1425	0.1988	66.7510	0.1427	14.8080	0.9788	5.6043	192.3000	25.0000	4.0933	14.4280	24.6340	0.0606
29	0.1279	0.2369	55.7610	0.1428	14.7240	0.9758	4.7875	169.2300	24.6420	7.0566	8.9970	24.1040	0.0576
30	0.1376	0.2135	71.5950	0.1242	14.8870	0.9868	11.3100	147.7200	24.2740	-0.7158	11.1710	23.8730	0.0663
31	0.1212	0.3324	67.8020	0.1149	12.3440	0.9907	9.2761	174.1400	24.3660	8.1068	10.9960	24.6490	0.0657
32	0.1261	0.2506	61.9070	0.1312	14.6000	0.9820	7.7314	177.7200	24.4540	1.4413	11.1640	23.3770	0.0670
33	0.1314	0.2697	64.5930	0.1307	14.5490	0.9816	7.0489	180.0600	24.1690	3.9028	9.3165	24.1000	0.0676
34	0.1125	0.3580	57.5650	0.1211	13.9570	0.9784	4.2839	205.1700	25.0000	5.6687	5.3026	22.7500	0.0570
35	0.1165	0.2422	60.8260	0.1351	15.4840	0.9791	3.6531	245.1700	24.6930	8.9559	2.3233	23.9030	0.0699
36	0.1358	0.2768	64.1790	0.1337	15.4550	0.9831	9.6196	146.6900	23.8310	-2.6969	10.4850	22.8590	0.0705

Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú

38

37	0.1251	0.3001	54.8620	0.1382	15.1600	0.9784	11.2250	178.7900	23.4120	-3.4832	11.5550	23.6380	0.0588
38	0.1420	0.2131	68.8340	0.1331	15.5340	0.9850	8.3774	145.3800	23.7930	-9.0436	13.3540	22.3900	0.0766
39	0.1309	0.3613	51.1860	0.1301	14.8480	0.9825	11.4570	164.7800	24.5380	-3.8626	11.7170	22.5880	0.0520
40	0.1275	0.3176	52.2560	0.1384	13.2110	0.9821	8.6633	120.1400	24.4100	-2.4523	16.5410	22.5750	0.0631
41	0.1378	0.3057	68.6780	0.1204	14.5970	0.9871	10.9110	180.8100	24.2460	-3.6351	12.4080	22.4860	0.0744
42	0.1271	0.3386	56.1180	0.1243	14.0030	0.9859	10.7480	151.8300	24.5830	-2.7315	12.7770	23.1120	0.0541
43	0.1320	0.2700	64.8990	0.1316	14.1720	0.9819	10.7080	156.0200	24.2330	2.7214	7.0702	23.5490	0.0707
44	0.1420	0.2489	64.3490	0.1342	15.4580	0.9826	9.4821	144.5800	24.1910	-2.7270	9.8555	23.0470	0.0726
45	0.1428	0.2116	70.2560	0.1242	15.9290	0.9884	14.0340	137.8900	24.6430	-2.6534	7.7349	23.7800	0.0607
46	0.1084	0.4305	52.6030	0.1290	12.3290	0.9814	16.5900	106.5300	23.0470	4.6488	7.7581	24.5520	0.0599
47	0.1262	0.3181	62.1080	0.1130	14.4660	0.9789	14.3240	206.3200	23.8430	4.5505	-0.2896	23.5190	0.0591
48	0.1251	0.3010	60.9220	0.1263	13.6160	0.9839	12.6150	167.4800	23.7020	2.8472	5.8230	23.1460	0.0721
49	0.1315	0.3366	60.7560	0.1243	14.5300	0.9870	12.4010	102.0700	23.7130	2.6910	8.3069	24.7040	0.0576
50	0.1308	0.3895	58.4900	0.1065	11.8120	0.9812	14.7940	69.7650	24.1230	-3.7449	13.9210	23.9660	0.0559
51	0.1265	0.3353	56.0880	0.1266	13.8990	0.9861	14.9830	127.1100	23.8150	-6.1306	12.9720	22.3340	0.0676
52	0.1339	0.5521	59.1250	0.0806	11.4840	0.9893	14.8940	53.5190	22.6030	-3.8623	11.9760	24.4720	0.0607
53	0.1267	0.3200	59.0920	0.1321	13.7000	0.9826	13.5550	128.3600	23.8390	-0.5018	9.5820	23.5110	0.0683
54	0.1417	0.3017	62.7730	0.1379	15.2180	0.9889	11.5630	151.9400	22.7310	2.1337	12.1370	24.3780	0.0579
55	0.1231	0.1808	70.6560	0.0584	19.9200	0.9973	13.2870	241.2400	23.0810	-13.0240	17.2100	25.0000	0.0593
56	0.1375	0.1826	62.7640	0.1205	16.4870	0.9860	12.5550	127.5900	23.2880	-5.5750	18.2800	24.6610	0.0550
57	0.1326	0.0201	63.5520	0.1029	17.7880	0.9892	10.6120	13.7980	21.8200	-16.1760	25.0000	25.0000	0.0550
58	0.1238	0.2896	52.9530	0.1295	17.9900	0.9823	14.8240	161.7800	23.2640	-3.3105	15.9460	24.0410	0.0633
59	0.1295	0.2341	62.6440	0.1329	17.4520	0.9850	11.1050	133.3600	23.2290	-7.1364	16.1320	23.4880	0.0707
60	0.1079	0.3659	56.3740	0.0960	15.1390	0.9961	20.4430	82.4040	22.1420	-6.2351	25.0000	25.0000	0.0683
61	0.1289	0.2634	51.9570	0.1310	15.4870	0.9836	12.5550	73.8030	23.7720	-5.5868	20.4140	24.2940	0.0650
62	0.1464	0.2352	68.9440	0.1299	14.0050	0.9861	12.4960	124.9500	23.5580	-3.1777	16.9290	23.2380	0.0632
63	0.1254	0.1994	60.4140	0.1316	15.8280	0.9891	11.3570	118.2700	23.2660	-2.0301	8.7359	23.8370	0.0605
64	0.1223	0.2113	52.6840	0.1332	16.8580	0.9856	11.7540	111.7300	22.7470	-5.8700	13.0970	21.7450	0.0687
65	0.1280	0.2250	56.1140	0.1230	14.4270	0.9859	5.1791	102.7400	24.9320	-1.2854	11.7690	21.6850	0.0583
66	0.1407	0.2719	57.2630	0.1349	13.3260	0.9878	7.9271	102.7100	24.1060	-6.0557	20.4910	22.2750	0.0685
67	0.1296	0.2076	55.3000	0.1369	15.2150	0.9850	11.8640	132.0300	24.4200	-0.5502	11.4760	23.4570	0.0587
68	0.1233	0.1928	56.0340	0.1324	15.1610	0.9846	11.9350	105.0100	23.5740	-4.1600	15.1490	22.9430	0.0569
69	0.1276	0.2261	48.5540	0.1408	14.5030	0.9898	9.3280	121.6700	22.9280	-7.3573	16.0300	21.3900	0.0559
70	0.1203	0.1425	59.2140	0.1165	16.8380	0.9891	3.4752	145.7700	24.6880	0.5807	1.0461	23.4350	0.0586
71	0.1387	0.2484	63.6780	0.1296	15.4670	0.9866	8.3770	107.2700	23.7520	-2.2790	12.7150	22.7970	0.0670
72	0.1437	0.1814	64.2980	0.1207	15.5410	0.9804	6.6784	210.8900	24.1860	3.1880	1.3560	23.8160	0.0596
73	0.1287	0.4766	53.8260	0.1210	14.9420	0.9846	2.6564	185.8000	22.2420	8.6117	0.5169	24.7840	0.0558
74	0.1264	0.2128	54.0850	0.1289	15.2020	0.9807	9.5083	180.4700	23.8630	2.8540	7.8334	21.6150	0.0556
75	0.1306	0.2786	67.0310	0.0872	15.0650	0.9809	6.3768	147.3500	22.0000	7.2395	-8.1351	23.1650	0.0600
76	0.1398	0.2621	63.2780	0.1371	14.8290	0.9846	7.3044	137.1200	23.8390	1.4008	9.4075	22.0100	0.0692
77	0.1091	0.3655	56.7980	0.1279	14.1970	0.9746	0.6928	202.1800	23.0620	8.1813	4.7770	20.1460	0.0633
78	0.1207	0.3000	63.5350	0.1213	14.9350	0.9851	10.2750	56.9690	24.3340	5.4314	6.5403	21.3910	0.0635
79	0.1148	0.3443	56.7800	0.1183	13.4550	0.9816	8.6689	129.3800	23.7760	7.6947	8.0124	22.6290	0.0703

Calibración del modelo para el transporte de contaminantes en los sedimentos en la cuenca de Jequetepeque, Cajamarca, Perú

39

80	0.1171	0.2506	58.1050	0.1249	15.1330	0.9852	11.7550	108.1400	23.0810	-5.8077	9.2779	20.7020	0.0705
81	0.1081	0.2953	57.5550	0.1205	14.1850	0.9785	6.2394	169.4900	24.0800	2.3204	3.9340	22.3590	0.0612
82	0.1108	0.2737	58.9850	0.1120	13.9450	0.9853	8.7292	120.7500	24.3660	4.1404	4.8253	21.1400	0.0596
83	0.1295	0.2553	52.4590	0.1399	14.2230	0.9846	8.8335	183.4400	25.0000	-0.8928	16.5930	25.0000	0.0525
84	0.1321	0.2840	54.2180	0.1451	14.0520	0.9838	9.6949	95.0320	24.8750	-1.7975	13.6170	23.2420	0.0648
85	0.1307	0.2880	46.0570	0.1443	14.2610	0.9851	9.4857	112.2500	24.9410	-1.5363	11.9040	22.7710	0.0571
86	0.1237	0.2854	48.6190	0.1368	16.0090	0.9846	11.8470	165.9300	22.9790	-2.6069	4.6176	22.1390	0.0625
87	0.1207	0.2601	51.2440	0.1235	12.4590	0.9765	6.1534	179.0300	24.2390	0.4403	7.9072	23.6750	0.0608
88	0.1268	0.2447	70.3590	0.1201	14.7410	0.9907	9.7519	156.5600	22.8620	-6.8415	12.0790	23.5560	0.0744
89	0.1312	0.2340	59.4750	0.1334	14.3990	0.9843	9.2387	133.6000	24.2870	-0.9640	9.2373	23.5200	0.0652
90	0.1419	0.2214	51.2700	0.1401	13.9610	0.9861	10.7080	114.9300	25.0000	-13.8770	19.3850	23.1360	0.0546
91	0.1393	0.3057	59.8670	0.1271	14.1920	0.9891	11.5080	110.6500	24.2880	-2.6217	8.6189	23.1390	0.0539
92	0.1329	0.2616	65.6510	0.1237	15.7160	0.9870	11.0070	138.4100	23.2690	-3.2368	10.5280	23.2790	0.0704
93	0.1304	0.3119	64.7770	0.1224	15.4760	0.9847	9.1130	123.3000	24.5120	-1.6645	9.3462	23.6010	0.0738
94	0.1237	0.2186	52.7390	0.1227	15.6440	0.9896	10.0690	167.4700	23.5970	-7.4672	10.1470	22.9930	0.0521
95	0.1204	0.2918	50.1550	0.1242	14.0150	0.9851	9.0744	140.3900	24.0200	-5.4900	12.5330	23.0850	0.0625
96	0.1123	0.2631	46.0380	0.1079	15.0190	0.9766	10.3520	214.7800	24.6130	-4.4944	8.2480	22.0270	0.0564
97	0.1097	0.2944	47.5980	0.1245	15.2120	0.9837	12.8990	94.8290	23.7740	-3.9617	15.1460	23.1210	0.0606
98	0.1359	0.2490	58.7640	0.1393	16.4620	0.9808	12.1870	148.6900	23.7460	-5.0818	12.5050	22.6700	0.0640
99	0.1266	0.3445	50.1160	0.1324	13.5930	0.9827	7.5508	140.6500	24.9740	-5.2049	17.4810	24.5020	0.0646
100	0.1399	0.2614	63.8930	0.1762	15.7570	0.9894	15.2380	98.5560	22.7900	-13.5570	25.0000	21.5120	0.1007
101	0.1356	0.2828	66.1940	0.1429	14.7400	0.9837	10.4130	155.4900	23.9420	1.0553	12.3170	22.9710	0.0744
102	0.1372	0.2759	61.5490	0.1813	15.3830	0.9804	6.9011	199.0200	24.6840	1.4608	13.7080	21.3020	0.0897
103	0.1642	0.2550	77.9000	0.1827	17.7170	0.9935	4.1053	125.0900	23.7810	-14.7280	25.0000	19.6190	0.0896
104	0.1452	0.0000	58.9480	0.1348	17.2820	1.0000	0.0000	105.5100	25.0000	-4.5474	17.1030	24.7220	0.0525
105	0.1453	0.2225	66.5680	0.1864	14.8380	0.9929	8.9040	101.2100	24.2130	-16.7820	25.0000	22.5010	0.1016
106	0.1317	0.2825	63.5030	0.1534	15.3010	0.9859	9.1707	143.4100	23.9850	-1.0960	14.2090	22.8820	0.0773
107	0.1588	0.2069	77.5950	0.1837	15.7560	0.9942	1.4836	190.6300	23.7850	-7.8462	16.7500	19.8190	0.0886
108	0.1445	0.2440	64.0960	0.1752	13.9350	0.9924	2.6288	179.9700	24.5910	-2.6484	14.9400	21.4440	0.0804
109	0.1359	0.2387	63.8450	0.1375	14.2080	0.9855	1.4906	157.6500	24.8320	-6.2460	5.6367	22.4970	0.0599
110	0.1235	0.3379	56.6960	0.1390	14.8030	0.9855	12.6070	137.8400	23.8280	-6.0658	12.8750	22.5370	0.0652
111	0.1398	0.3226	69.4760	0.1321	12.5680	0.9872	9.6579	170.5300	24.4650	0.0336	9.1676	22.5480	0.0728

Tabla I-1. 110 sets de parámetros *buenos* arrojados por ParaSol para caudal.



	Alpha_Bf	Canmx	Ch_K2	Ch_N2	Cn2	Esco	Gwqmn	Revapmn	Slope	Sol_Awc	Sol_K	Sol_Z	Surlag
	MAX -->												
<b>C1</b>	0.1642	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C2</b>	0.1642	0.5521	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C3</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C4</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C5</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C6</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C7</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C8</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C9</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	0.8322	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C10</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	0.9186	1.1949	0.0520
<b>C11</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.1949	0.0520
<b>C12</b>	0.1642	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016

**Tabla I-2. Combinaciones de parámetros caudal**

	Alpha_Bf	Canmx	Ch_K2	Ch_N2	Cn2	Esco	Gwqmn	Revapmn	Slope	Sol_Awc	Sol_K	Sol_Z	Surlag
	<-- MAX												
<b>C13</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.1949	0.1016
<b>C14</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	0.9186	1.2500	0.1016
<b>C15</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	0.8322	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C16</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2179	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C17</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	13.7980	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C18</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	0.0000	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C19</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	0.9742	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C20</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1148	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C21</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.0584	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C22</b>	0.1056	0.0000	46.0380	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C23</b>	0.1056	0.0000	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016
<b>C24</b>	0.1056	0.5521	77.9000	0.1931	1.1992	1.0000	20.4430	308.4800	1.2500	1.1368	1.2500	1.2500	0.1016

**Tabla I-3. Combinaciones de parámetros caudal**