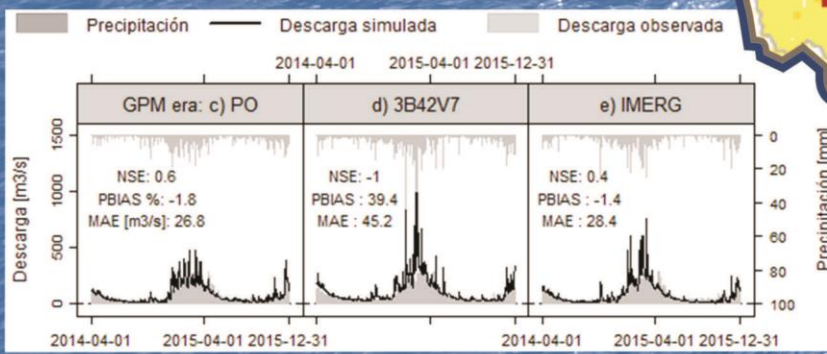
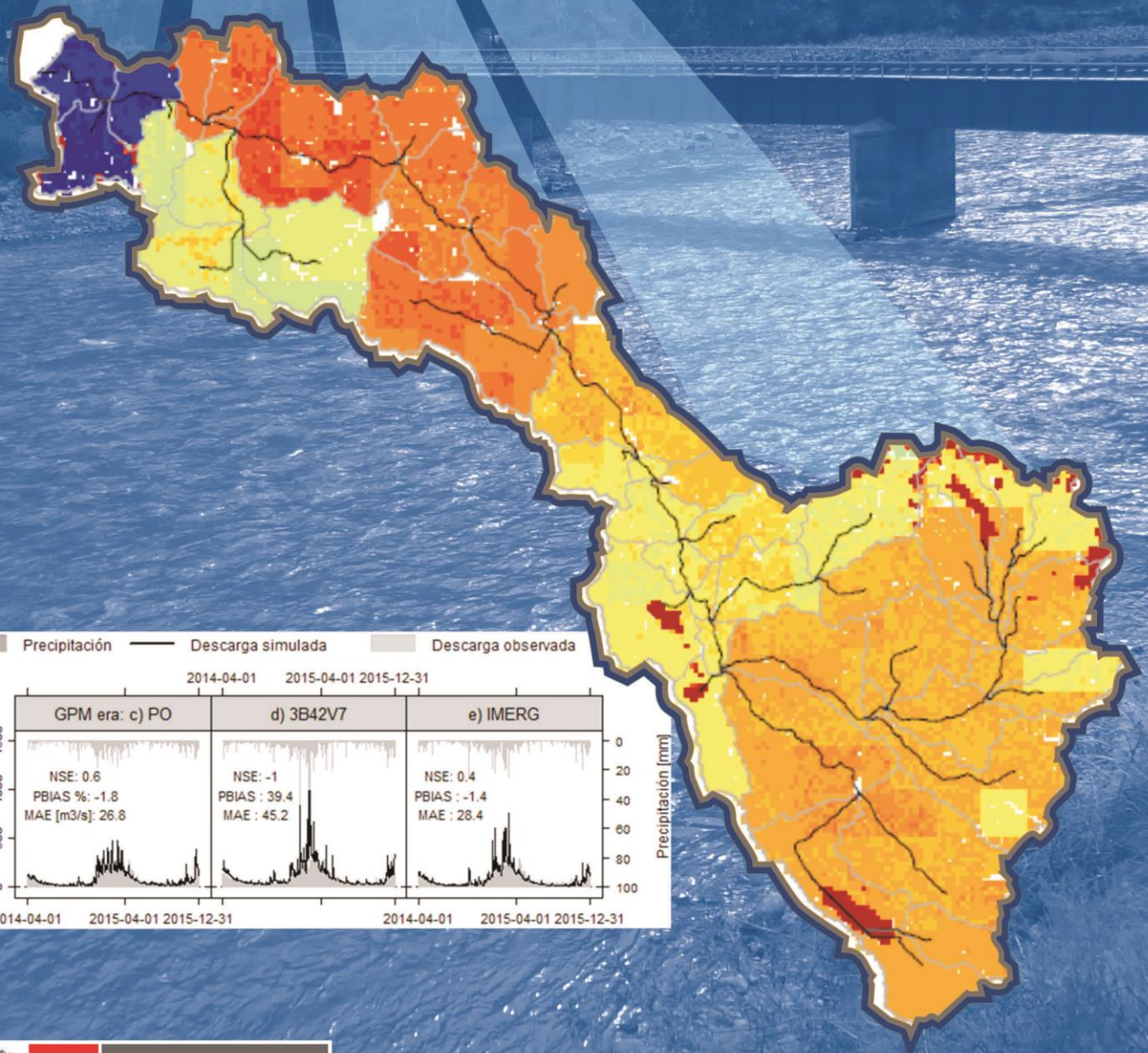


# ASIMILACIÓN Y EVALUACIÓN DE DATOS DE PRECIPITACIÓN EN BASE A SATÉLITE EN EL MODELAMIENTO HIDROLÓGICO DE LA CUENCA DEL RÍO VILCANOTA





DIRECTORIO

**Ing. Amelia Díaz Pabló**  
*Presidenta Ejecutiva del SENAMHI*

**Ing. Oscar G. Felipe Obando**  
*Director de la Dirección de Hidrología del SENAMHI*

**Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte**  
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI*

REVISOR DEL ESTUDIO

**Mg. Sc. Julia Y. Acuña Azarte**  
*Subdirectora de Estudios e Investigaciones Hidrológicas del  
SENAMHI*

RESPONSABLE DEL ESTUDIO

**Mg. Sc. Carlos Fernández Palomino**  
*Especialista en Hidrología del SENAMHI*

Lima-Perú  
Noviembre - 2016

---



## ÍNDICE

RESUMEN .....	1
1. INTRODUCCIÓN .....	3
1.1 Modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota .....	3
1.2 Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico .....	5
2. EL MARCO TEÓRICO .....	6
2.1 Modelamiento hidrológico .....	6
2.1.1 Ciclo hidrológico .....	6
2.1.1.1 Precipitación .....	7
2.1.1.2 Evapotranspiración .....	8
2.1.1.3 Infiltración y percolación .....	8
2.1.1.4 Escorrentía superficial .....	8
2.1.1.5 Escorrentía sub-superficial.....	9
2.1.2 Manejo integral de cuencas .....	9
2.1.2.1 La cuenca como unidad territorial de manejo .....	10
2.1.3 Modelo SWAT.....	11
2.1.3.1 Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT .....	11
2.1.3.2 Componentes del modelo SWAT .....	11
2.1.3.3 Enfoque del modelo SWAT .....	12
2.1.4 Etapas de implementación de un modelo hidrológico SWAT .....	19
2.2 Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico .....	19
2.2.1 Precipitación estimada por satélite.....	19
3. MARCO METODOLÓGICO.....	20
3.1 Área de estudio .....	20
3.2 Datos.....	21
3.2.1 Modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota .....	21
3.2.2 Evaluación de la utilidad de la precipitación estimada por satélite (PPES) .....	22
3.2.2.1 Datos pluviométricos .....	22
3.2.2.2 Producto TMPA-3B42 V7 .....	22
3.2.2.3 Producto IMERG.....	23
3.3 Metodología para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota .....	23
3.3.1 Configuración y parametrización del modelo SWAT.....	24
3.3.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT .....	25
3.3.2.1 Análisis de sensibilidad de parámetros.....	25
3.3.2.2 Análisis de incertidumbre y evaluación del desempeño de modelo SWAT en la calibración y validación .....	26
3.4 Metodología para la evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico.....	27
3.4.1 Evaluación estadística de PPES.....	27
3.4.2 Evaluación hidrológica de PPES.....	29
4. RESULTADOS .....	30

4.1	Modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota .....	30
4.1.1	Configuración y simulación inicial del modelo SWAT .....	30
4.1.1.1	Configuración del modelo SWAT .....	30
4.1.1.2	Separación de flujo base .....	31
4.1.1.3	Simulación inicial del modelo .....	32
4.1.2	Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT .....	33
4.1.2.1	Análisis de sensibilidad de los parámetros .....	33
4.1.2.2	Análisis de incertidumbre y evaluación del desempeño del modelo SWAT en la calibración y validación .....	37
4.1.3	Balace hídrico de la cuenca .....	40
4.2	Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico .....	44
4.2.1	Evaluación estadística de PPES.....	44
4.2.2	Evaluación hidrológica de PPES.....	48
4.2.2.1	Análisis de parámetros calibrados .....	48
4.2.2.2	Escenario 1: descargas simuladas en base a parámetros_1 .....	49
4.2.2.3	Escenario 2: descargas simuladas en base a parámetros_2 .....	51
5.	CONCLUSIONES .....	54
5.1	Sobre el modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota.....	54
5.2	Sobre la evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico.....	54
6.	REFERENCIAS BILIOGRÁFICAS.....	56

## LISTA DE TABLAS

Tabla 3-1: Tipo de dato, resolución y fuente de datos.....	22
Tabla 3-2: Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT .....	27
Tabla 3-3: Estadísticas de comparación por pares con $G$ = precipitación pluviométrica, $G_m$ = media de la precipitación pluviométrica, $S$ = precipitación estimada por satélite, $S_m$ = media de la precipitación estimada por satélite, y $N$ = número de pares de datos.....	28
Tabla 3-4: Comparacion de mediciones de pluviómetros y estimaciones de por satélite.....	29
Tabla 3-5: Estadísticos de validación categórica, dónde $A$ representan el número de aciertos, $B$ (falsas alarmas), $C$ (pérdidas) y $D$ (negativos correctos) .....	29
Tabla 4-1: Características de la CRV reclasificado de acuerdo a la superposición y combinación única de un tipo particular del uso de suelo, tipo de suelos y pendientes con cobertura no menor al 5% en cada sub-cuenca. ..	31
Tabla 4-2: Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue: sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo). .....	37
Tabla 4-3: Balance de masa anual del rendimiento hídrico de la cuenca. IBF es el índice de base flujo de referencia estimado de acuerdo a la técnica de separación de flujo base automatizado (Arnold et al. 1995a) (ver sección 4.1.2). IBFswat es el índice de base flujo estimado por el modelo SWAT.....	40
Tabla 4-4: Promedio anual del balance hídrico (periodo 2004 – 2015) de la cuenca del río Vilcanota.....	42
Tabla 4-5: Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro inicial fue: sustituido por un valor fijo (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo). Parámetros_1 (Parámetros_2) es el conjunto de parámetros calibrados del modelo SWAT utilizando como entrada los datos de lluvia observada (3B42V7). Valores sombreados en gris indica que fueron los únicos parámetros recalibrados en el escenario 2 en referencia al escenario 1.....	49

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1: Ciclo Hidrológico. ....	7
Figura 2-2: Tipos de Formación de Escorrentía Superficial. ....	9
Fuente: www.meted.ucar.edu. ....	9
Figura 2-3: Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados. ....	12
Figura 2-4: Componentes del modelo SWAT. ....	12
Figura 2-5: Representación del ciclo hidrológico en SWAT. ....	13
Figura 2-6: Representación de movimientos del agua en SWAT. ....	14
Figura 3-1: Ubicación del área de estudio y la red de estaciones hidrometeorológicas. ....	21
Figura 3-3: Diagrama de flujo de la metodología. Parámetros_1 (Parámetros_2) es el conjunto de parámetros calibrados del modelo SWAT utilizando como entrada los datos de lluvia observada (3B42V7). ....	27
Figura 4-1: Distribución espacial de los parámetros discretizados de la VCR. Mapa de pendientes (a). Mapa de uso de suelo de acuerdo al producto Globeland30 (b). Mapa de tipo de suelo (c). Modelo digital de elevación, sub-cuencas y red de drenaje del modelo hidrológico SWAT (inferior derecha). ....	30
Tabla 4-1: Características de la CRV reclasificado de acuerdo a la superposición y combinación única de un tipo particular del uso de suelo, tipo de suelos y pendientes con cobertura no menor al 5% en cada sub-cuenca. ...	31
Figura 4-2: Comparación de hidrogramas de la descarga media diaria entre el observado y el simulado del modelo inicial de SWAT en el periodo de calibración (2004-2011) ....	32
Figura 4-3: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT que son variables por cada unidad de respuesta homogénea (HRU). Así se tiene el impacto de cada parámetro (CN2, SOL BD, SOL K y SOL AWC) sobre la cuantificación de la escorrentía superficial (Qsurf) (a), el flujo lateral (Qlat) (b) y el flujo de agua subterránea (Qgw) (c). Impacto de cada parámetro sobre el índice de flujo base (d). Impacto de cada parámetro en el desempeño del modelo SWAT dados por el estadístico de Nash–Sutcliffe (NSE) (e) y el porcentaje de bias (PBIAS) (f). Por otro lado en la figura “g” y “h” se muestra el impacto sobre el desempeño del modelo de los parámetros que son constantes en los HRUs. Así se tiene impacto de SURLAG (g) sobre el NSE y GWQMN (h) sobre el PBIAS. ....	34
Tabla 4-2: Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue: sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo). ....	37
Figura 4-4: Arriba (Abajo) se muestra los hidrogramas de descarga media diaria (mensual) tanto observada como el mejor simulado y su respectivo banda de incertidumbre dado por el intervalo de predicción al 95% [95PPU] para el periodo de calibración y validación. ....	39
Tabla 4-3: Balance de masa anual del rendimiento hídrico de la cuenca. IBF es el índice de base flujo de referencia estimado de acuerdo a la técnica de separación de flujo base automatizado (Arnold et al. 1995a) (ver sección 4.1.2). IBFswat es el índice de base flujo estimado por el modelo SWAT. ....	40
Tabla 4-4: Promedio anual del balance hídrico (periodo 2004 – 2015) de la cuenca del río Vilcanota. ....	42
Figura 4-5: Distribución espacial a nivel de HRUs de: rendimiento hídrico (WYLD en mm) (Izquierda), contribución de flujo base (derecha superior) y contribución de la escorrentía superficial (derecha inferior) ...	43
Figura 4-6: Distribución espacial del parámetro número de curva (CN2) para eventos extremos definido como la media de los valores de CN2 mayores al percentil 95% del periodo 2000-2015 para cada HRU. ....	43
Figura 4-7: Evolución temporal promedio diario para la cuenca de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial, contribución de flujo base y el parámetro del número de curva. ....	44

Figura 4-8: Dispersión de los valores diarios de precipitación de los diferentes productos de precipitación estimado por satélite versus sus correspondientes valores observados para todo el conjunto de datos de las celdas que contienen al menos una estación pluviométrica para la era de TMPA (periodo enero 2000 – Marzo 2014) y la era de GPM (Abril 2014 – diciembre 2015). La línea discontinua oblicua de color gris representa la relación 1:1. .... 45

Figura 4-9: Métricas de contingencia de probabilidad de detección (POD), ratios de falsa alarma (FAR) y Threat Score (TS) para la precipitación en la cuenca del río Vilcanota para la era de TMPA (periodo enero 2000 – Marzo 2014) y la era de GPM (Abril 2014 – diciembre 2015)..... 46

Figura 4-10: Función de densidad de probabilidad de la ocurrencia de eventos (en %) de la lluvia diaria para diferentes intensidades (mm/d). .... 47

Figura 4-11: Distribución espacial de coeficiente de correlación (CC, arriba) y de porcentaje de bias (PBIAS, Abajo)..... 47

Figura 4-12: Escenario1: Calibración del modelo SWAT utilizando la precipitación observada (PO) ..... 50

Figura 4-13: Escenario1: Arriba (Abajo) Validación del modelo SWAT en la era TMPA (GPM) utilizando PO [a] y 3B42V7 [b] (PO [c], 3B42V7 [d] e IMERG [e])..... 51

Figura 4-14: Escenario 2: Calibración (a) y validación (b) de SWAT utilizando 3B42V7 en la era TMPA. Validación de SWAT para 3B42V7 (c) e IMERG (d) en la era GPM..... 52

Figura 4-15: Escenario 3: Validación del modelo SWAT para IMERG. Para esta simulación el modelo SWAT del escenario 1 fue recalibrado cambiando únicamente el valor de SURLAG a 0.05 donde este valor fue adoptado del escenario 2. .... 53

## RESUMEN

La cuenca del río Vilcanota (CRV), localizada en los Andes del sur del Perú, en los últimos años está experimentando cambios en su comportamiento hidrológico producto de las inundaciones, las sequías, la erosión del suelo y entre otros, procesos que afectan las actividades socioeconómicas de su población por lo que es imprescindible la modelización de los componentes del ciclo hidrológico para una mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos hídricos, también útil para los tomadores de decisiones y así mismo contribuirá a la planificación de los recursos hídricos.

Es así que el presente estudio se enfocó en dos ejes. El primero consiste en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota (CRV) utilizando el modelo SWAT y el segundo consiste en evaluar la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico de la CRV.

Como parte del modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota, se evalúa por primera vez el desempeño y la incertidumbre de la predicción hidrológica utilizando el modelo SWAT (Soil Water Assessment Tool). El análisis comprende una minuciosa evaluación en la identificación y comprensión de los parámetros más sensibles del modelo SWAT durante la fase de calibración, realizado principalmente con el objetivo de ver el impacto de los parámetros en la respuesta hidrológica y en los componentes del proceso hidrológico cuyo propósito final de nuestro enfoque es calibrar el modelo SWAT de tal manera que este sea capaz de caracterizar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base.

Los resultados muestran que se ha identificado de manera objetiva a 5 parámetros sensibles que influyen en el proceso hidrológico de la CRV. Así, el parámetro SURLAG tuvo mayor influencia en la respuesta de la escorrentía superficial. SOL\_BD y SOL\_AWC fueron los parámetros de suelo más sensibles y que tienen mayor influencia sobre la cuantificación y la respuesta del flujo lateral. GWQMN y RCHRG\_DP fueron los más importantes en la cuantificación y respuesta del flujo de retorno desde los acuíferos para mejorar las descargas simuladas en el periodo de bajas descargas.

Por otro lado se observó que el parámetro del número de curva (CN2) es un caso de equifinalidad en el modelamiento hidrológico de la CRV. Así, en este estudio se demuestra que se debe tener cuidado al calibrar CN2 ya que su inclusión en la calibración automática puede conducir a la obtención de buenos desempeños pero a expensas de la pérdida del sentido físico del modelo SWAT.

En cuanto al sentido físico, desempeño e incertidumbre del modelo, los resultados nos muestran que SWAT fue capaz de reproducir las descargas observadas (diarias y mensuales), la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base de CRV; con muy buenos desempeños (Nash-Sutcliffe  $NSE > 0.75$ , porcentaje de bias PBIAS  $< 10\%$ ) y con una estrecha banda de incertidumbre tanto en la etapa de calibración y validación del modelo.

Los buenos resultados del desempeño del modelo SWAT en la simulación de descargas diarias y mensuales de CRV, sugiere que el modelo puede ser utilizado para el pronóstico de inundaciones y sequías, un análisis más detallado de los efectos del clima, el cambio del uso del suelo, análisis de la producción de sedimentos y entre otros. También se demuestra que SWAT puede ser aplicado en



otras cuencas de los Andes. Finalmente, el enfoque metodológico desarrollado en este estudio proporcionará información de gran utilidad para los usuarios del modelo hidrológico SWAT, así como para su comprensión del modelo y su aplicación sin que esta pierda el sentido físico.

Como parte de la evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico se ha evaluado tanto estadísticamente e hidrológicamente la utilidad en el modelamiento hidrológico de dos productos de precipitación estimada por satélite (PPES) como es el producto 3B42 Versión 7 (3B42V7) de la misión TMPA (Tropical Rainfall Measuring Mission [TRMM] Multi-satellite Precipitation Analysis) y su sucesor de la misión GPM (Global Precipitation Measurement) el producto IMERG (Integrated Multisatellite Retrievals for GPM) en una cuenca con escasa información como es el caso de la cuenca del río Vilcanota (CRV). Las evaluaciones se realizaron para los periodos definidos por la era TMPA (2000 marzo - diciembre 2014) y la era GPM (abril 2014 – diciembre 2015).

Los resultados de la evaluación estadística de la comparación de PPES versus la precipitación observada (PO) indican que el producto 3B42V7 es mejor en la era TMPA que GPM; particularmente debido a que en la era GPM el producto 3B42V7 sobrestima más la precipitación observada. Mientras tanto en la era de GPM en general el producto IMERG ha demostrado sustanciales mejoras respecto a 3B42V7 como en la reducción de bias y los errores absolutos y asimismo IMERG mejora en la detección de eventos de precipitación y la reducción de falsas alarmas.

En la evaluación hidrológica con el modelo hidrológico SWAT se ha realizado bajo diferentes escenarios de calibración y validación. Así, en un primer (segundo) escenario el modelo SWAT fue calibrado utilizando PO (3B42V7) y este modelo calibrado se utilizó para validar PO, 3B42V7 e IMERG (3B42V7 e IMERG) tanto en la era TMPA y GPM y los resultados encontrados revelan que bajo ambos escenarios el producto 3B42V7 es mejor en la era de TMPA que GPM siendo así válido su utilidad en el modelamiento hidrológico solamente para la era TMPA. Asimismo en concordancia a la evaluación estadística se encontró que en la era de GPM el modelo SWAT tiene los mejores estadísticos de desempeño utilizando IMERG que 3B42V7; inclusive el producto IMERG fue comparable a la precipitación observada. Por lo que en este estudio encontramos que IMERG es adecuado para el modelamiento hidrológico de CRV. Sin embargo son necesarios más estudios para explorar la utilidad de IMERG en otras cuencas de los Andes.

## 1. INTRODUCCIÓN

El presente estudio está dividido en dos ejes principales. El primero consiste en el **modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota** – CRV, utilizando el modelo SWAT, teniendo como forzante los datos observados de la red de estaciones meteorológicas del SENAMHI. El segundo consiste en **evaluar la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico** de la cuenca del río Vilcanota. En este estudio específicamente se evalúa el producto IMERG (Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM) el cual es un producto de lluvia recientemente liberado y es el sucesor del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission).

Cabe mencionar que el estudio contiene ítems de introducción, marco teórico, metodología, resultados y conclusiones desagregados para cada uno de los dos ejes planteados.

### 1.1 Modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota

En los últimos años, el comportamiento hidrológico de las cuencas hidrográficas localizadas en los Andes tropicales se están enfrentando a diversos cambios ambientales (Vegas et al. 2015). Estos cambios tienen un impacto directo sobre la disponibilidad de los recursos hídricos, especialmente durante la época de estiaje; es decir, tiene un efecto directo en el abastecimiento de agua para millones de personas que viven en estas regiones (Vuille et al. 2008). Asimismo los Andes tropicales son una de las regiones del mundo más vulnerables al cambio climático (Viviroli et al. 2007). Las consecuencias del cambio climático en los Andes tropicales son especialmente preocupantes debido a la diversidad de sus ecosistemas y a los efectos que esos cambios en los ecosistemas, tendrán en la numerosa población humana que depende de sus servicios (Vuille et al. 2008).

Por ello en este estudio, nos enfocamos a la CRV ubicado en los Andes del sur del Perú, debido principalmente que en los últimos años el comportamiento hidrológico de la CRV está cambiando debido a factores antropogénicos y climáticos. Las evidencias de esto son el aumento de la erosión del suelo (Gonzales-Inca 2009). Las inundaciones en la temporada lluviosa del 2010 (enero-marzo), debido a una secuencia de días seguidos con lluvia (Lavado-Casimiro et al. 2010; Huggel et al. 2015) cuyo daño económico total fue estimado alrededor de 635 millones de nuevos soles equivalente a 220 millones de dólares (INDECI 2012; Huggel et al. 2015). Así, también las sequías generadas por el ENSO (Kane 1999; Kane 2000) y la influencia de las temperaturas cálidas de la superficie del mar en el Atlántico tropical norte que ha causado sequías en las cuencas del sur de los Andes (Lavado Casimiro et al. 2012). El derretimiento y retroceso del área glaciar ubicado en la parte alta de la CRV en los últimos años (Salzmann et al. 2013; Suarez et al. 2015). Asimismo, cabe mencionar el estudio realizado por Lavado W. et al. (2011) y Andres et al. (2014) realizaron la evaluación de los impactos del cambio climático donde muestran que CRV experimentará más escorrentía total durante la temporada de lluvias (enero-marzo) pero de acuerdo al balance hídrico en el tiempo indican que habrá menor disponibilidad del agua en CRV, la cual tendrá impactos sobre el abastecimiento de agua especialmente durante la temporada seca.

Es así, que para hacer frente a las adversidades anteriormente mencionadas la modelización del ciclo hidrológico es imprescindible para un mejor conocimiento de la disponibilidad de los recursos

hídricos. En este sentido, de los diferentes modelos hidrológicos distribuidos capaces de simular el balance de agua de manera espacial considerando condiciones de tipo de suelo, uso de suelo, topografía y clima; fue seleccionado el modelo SWAT (Arnold et al. 1998). SWAT ha ganado la aceptación internacional como una herramienta robusta de modelización interdisciplinaria de cuencas como se evidencia por las conferencias internacionales de SWAT y centenares de artículos científicos revisados por expertos en las revistas de SWAT (Gassman et al. 2007). SWAT ha sido aplicado y evaluado en diversos climas del mundo desde las regiones áridas y semiáridas (Perrin et al. 2012; Emam et al. 2014) hasta en áreas húmedas y tropicales (Zheng-qing et al.; Alansi et al. 2009). Sin embargo para que SWAT tenga la capacidad de simular con precisión el proceso hidrológico se requiere de un cuidadoso análisis de calibración e incertidumbre (Yesuf et al. 2016). Donde usualmente las principales fuentes de incertidumbre son los datos de entrada asociados a errores de medición, la estructura del modelo debido a la asunción y la simplificación; y los parámetros del modelo relacionados a las aproximaciones (Lindenschmidt et al. 2007; Xue et al. 2014). Shen et al. (2012) describen detalladamente las incertidumbres mencionadas y enfatizan que se debe llevar a cabo la evaluación de la incertidumbre de los parámetros antes de la predicción del modelo.

Al respecto, para hacer frente a la incertidumbre en los parámetros de SWAT una serie de algoritmos se han desarrollado como GLUE (Generalized Likelihood Uncertainty Estimation) (Beven and Binley 1992), PSO (Particle Swarm Optimization) (Eberhart and Kennedy 1995), ParaSol (Parameter Solution) (van Griensven and Meixner 2006) y SUFI-2 (Sequential Uncertainty Fitting) (Abbaspour et al. 2007) los cuales están implementados en el programa SWAT-CUP (SWAT Calibration and Uncertainty Procedure) (Abbaspour *et al.*, 2007). Al respecto, existen numerosos estudios que han utilizado estos algoritmos para identificar los parámetros sensibles que gobiernan la respuesta hidrológica y el rango óptimo de los mismos para las simulaciones del modelo (p.e. Khoi and Thom 2015; Yesuf et al. 2016). Esto es debido a que las técnicas de auto calibración simplifican en gran medida la selección de los parámetros de manera más práctica y rápida debido a la alta capacidad de ejecución de los ordenadores (Veith et al. 2010). Sin embargo enfatizamos que la identificación de los parámetros adecuados mediante las técnicas automáticas están sujetos únicamente a la optimización de la función objetivo (p.e. maximización de NSE) en base a la comparación de los hidrogramas de descargas simuladas y observadas. Por lo que de esta manera debido a la posible presencia de equifinalidad de parámetros en un modelo complejo como el SWAT (Shen et al. 2012; Ficklin and Barnhart 2014) el procedimiento automático no garantiza necesariamente que el modelo calibrado con los parámetros óptimos tenga la capacidad de caracterizar de manera real la respuesta hidrológica desde los diferentes componentes del proceso hidrológico (p.e. respuesta de la cuenca debido a la contribución de la escorrentía superficial o el flujo base), donde el fenómeno de equifinalidad se refiere a que la configuración de diferentes juegos de parámetros en la calibración del modelo puede resultar en predicciones similares (Beven and Binley, 1992).

Es así que en este estudio destacamos que es de gran importancia evaluar minuciosamente la incertidumbre de los parámetros del modelo en la respuesta hidrológica de los diferentes componentes del proceso hidrológico: escorrentía en la superficie del suelo, flujo lateral desde el perfil del suelo y el flujo de retorno desde los acuíferos (superficial y profundo); con el propósito de entender el modelo y realizar una adecuada calibración del mismo de tal manera que SWAT tenga la capacidad de reproducir con sentido físico los diferentes procesos hidrológicos de la cuenca.

Así uno de los objetivos de este estudio fue evaluar la aplicación del modelo SWAT en la simulación de las descargas medias diarias y mensuales en la cuenca del río Vilcanota; con énfasis en:

- La identificación de los parámetros más sensibles del modelo.
- Análisis del impacto de los parámetros sensibles en la respuesta hidrológica en los diferentes componentes del proceso hidrológico.
- Calibración de SWAT de tal manera que este sea capaz de caracterizar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base.

Los resultados de este eje proporcionan una referencia científica para la aplicación adecuada del modelo SWAT en el modelamiento hidrológico en base al análisis de incertidumbre lo cual es útil para los tomadores de decisiones con el fin de promover la planificación de los recursos hídricos.

## **1.2 Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico**

La precipitación es uno de los factores más importantes que afectan el balance global de agua y energía (Futrell et al. 2005; Kidd and Huffman 2011). En regiones con escasa disponibilidad de datos de precipitación, los investigadores difícilmente pueden llevar a cabo optimas simulaciones del ciclo del agua (Xue et al. 2013).

Tradicionalmente, hay tres maneras de medir la precipitación, es decir, pluviómetros, radares meteorológicos y sensores basados en satélites (Li et al. 2013). El pluviómetro es una forma convencional de proporcionar las observaciones más directas de la precipitación en la superficie en base a mediciones puntuales. Sin embargo, la red de estaciones pluviométricas son escasas en la mayor parte de los continentes y muy pocas estaciones están ubicados sobre el océano (Huffman et al 2001;. Kidd y Huffman 2011; Mishra y Coulibaly 2009). El radar meteorológico puede monitorear la precipitación con resoluciones temporales y espaciales relativamente más altos, pero a menudo está sujeto a la baja calidad de los datos en terrenos complejos, sobre todo debido a la obstrucción de señal, la atenuación por la lluvia, y la variabilidad vertical de reflectividad (Dinku et al 2002;. Tian y Peters-Lidard 2010).

Actualmente, la única forma práctica de lograr una estimación completa de precipitación a nivel mundial proviene de los satélites de observación de la Tierra (Hong et al 2012;.. Hou et al 2014; Villarini y Witold 2008). Es así que a la fecha, una serie de productos de precipitación estimada por satélite han sido liberados para el público con varias resoluciones temporales y espaciales, tales como PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Cloud Classification System, Hong et al. 2004), CMORPH (Climate Prediction Center morphing algorithm; Joyce et al. 2004; Joyce and Xie 2011), GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation; Kubota et al. 2007; Kachi et al. 2014), y TMPA (TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis; Huffman et al. 2007). Estos conjuntos de datos de precipitación grillada difieren en sus fuentes de datos y en sus algoritmos, así como en sus resoluciones y cobertura temporal; y han sido ampliamente comparados con los datos de lluvia medidos en las estaciones pluviométricas y los radares en tierra, sobre diferentes regiones del mundo.

Por tanto, en el este estudio evaluamos uno de los productos de GPM (Global Precipitation Measurement), específicamente el producto IMERG (Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM) desarrollado por Huffman et al. (2015) el cual es el sucesor de TRMM.

## **2. EL MARCO TEÓRICO**

### **2.1 Modelamiento hidrológico**

En el presente ítem se ha preparado una descripción general de las bases teóricas para entender los principales procesos del ciclo hidrológico a escala de una cuenca hidrográfica y se describe como estos procesos son modelizadas mediante el modelo hidrológico semi-distribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool).

#### **2.1.1 Ciclo hidrológico**

El ciclo hidrológico no tiene ni principio ni fin y sus procesos ocurren en forma continua (Chow et al. 1988), es descrito como el conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido y gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea entre otros). El ciclo hidrológico es completamente irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el ser humano. Una muestra de ello son los periodos de satisfacción con los requerimientos del agua para las diferentes actividades, otros periodos de sequías y otros de inundaciones (Villón 2004). Los principales componentes del ciclo hidrológico son: la precipitación, evapotranspiración, infiltración y percolación, escorrentía superficial, flujo sub-superficial y el flujo subterráneo y se muestran en la Figura 2.1.



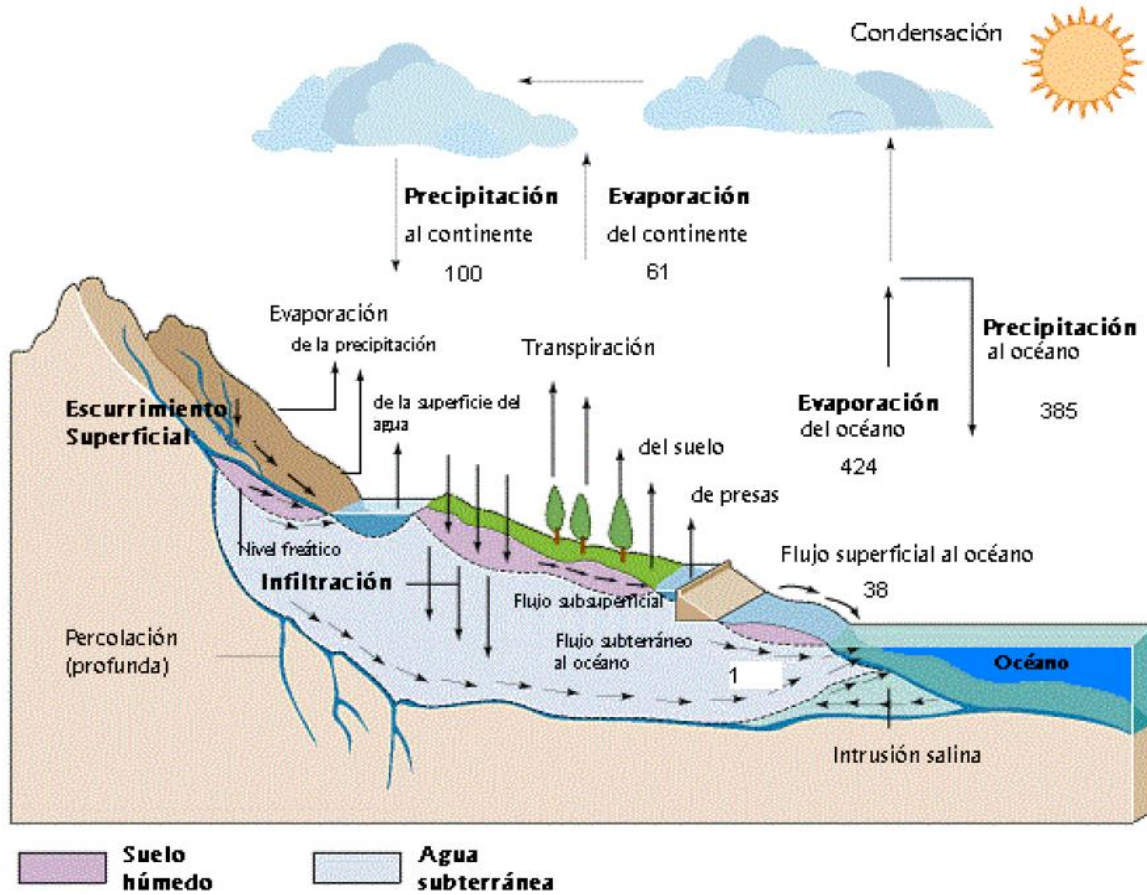


Figura 2-1: Ciclo Hidrológico.

Fuente: Modificado de Chow et al., 1988

### 2.1.1.1 Precipitación

La precipitación es el término general para toda el agua que proviene de las nubes y cae a la tierra en cualquiera de sus estados físicos. Existen varias formas de precipitación dependiendo de las condiciones meteorológicas existentes, en latitudes medias se pueden distinguir la llovizna, lluvia, granizo, rocío y escarcha (Linsley et al. 1990).

El tipo y la cantidad de precipitación dependen enormemente del tipo y cantidad de enfriamiento y de la humedad existente en el aire, pudiendo encontrar precipitaciones de tipo ciclónica, convectiva, orográfica, por choques de masas de aire y por radiación.

Sin embargo, independientemente de la forma y tipo de precipitación, una vez que el agua de lluvia llega al suelo, la altura de precipitación, ocurrida en un tiempo, se distribuye, dependiendo de la forma de distribución de las condiciones imperantes en el momento y en el sitio en que ocurre la precipitación.

Una parte es interceptada por las plantas, otra se deposita en almacenamientos superficiales, una más se infiltra incrementando las corrientes subterráneas, saturando primero el suelo y la restante escurre superficialmente hacia los cauces naturales de drenaje, formando así las corrientes.

### 2.1.1.2 Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es un fenómeno combinado de pérdida de agua por transpiración y evaporación directa del agua del suelo. Corresponde al fenómeno físico del pasaje de agua del estado líquido al gaseoso en condiciones naturales, dependiendo de la disponibilidad de agua para la vegetación y necesitando una importante cantidad de energía para que el proceso ocurra (Del Carmen 2001).

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares, F. J. y Mijares 1989). La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda.

### 2.1.1.3 Infiltración y percolación

La infiltración se define como el movimiento del agua, a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares (Aparicio Mijares, F. J. y Mijares 1989).

La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar sino cuando tiene lugar la segunda.

### 2.1.1.4 Escorrentía superficial

Se entiende por escorrentía a la lámina de agua que circula libremente sobre la superficie terrestre. La literatura menciona la posibilidad de producirse dos tipos de escorrentía.

- **Escorrentía por exceso de infiltración:** Se produce en los suelos que no están saturados. De hecho, el suelo puede estar muy seco, pero debido a las propiedades del suelo o de la cubierta del suelo el proceso de infiltración no puede absorber el agua producida por un aguacero o un deshielo rápido.
- **Escorrentía por exceso de saturación:** Se produce cuando el suelo está saturado y no queda espacio para que se infiltre más agua. Esto puede ocurrir incluso en suelos que normalmente, en condiciones sub-saturadas, permiten la infiltración de grandes cantidades de agua. (www.meted.ucar.edu, Figura 2.2)

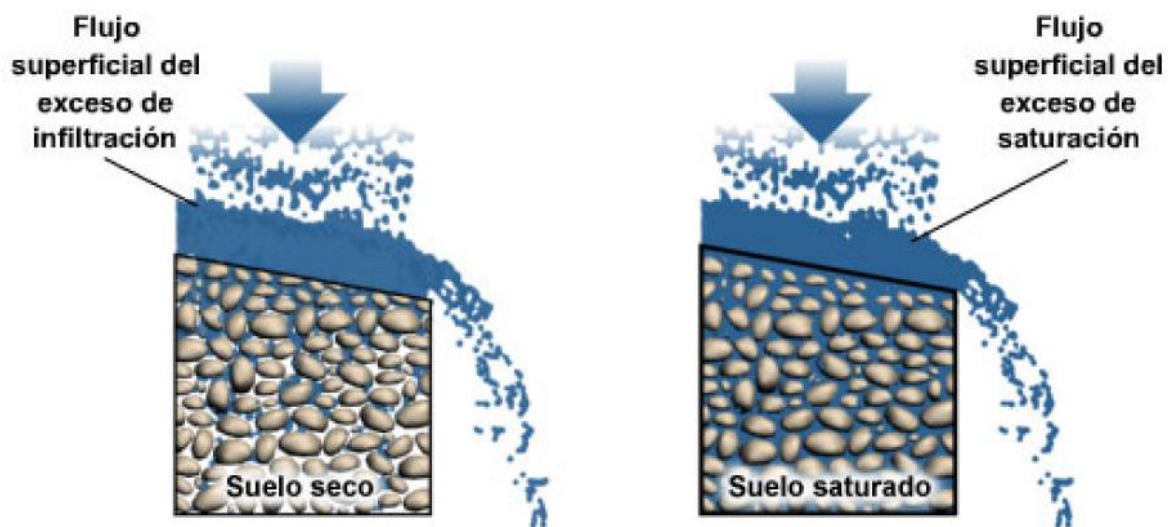


Figura 2-2: Tipos de Formación de Escorrentía Superficial.

Fuente: [www.meted.ucar.edu](http://www.meted.ucar.edu).

#### 2.1.1.5 Escorrentía sub-superficial

También conocido como flujo sub-superficial o interflujo. Dado a la porción de la precipitación que se infiltra en el terreno, una parte de ésta se mueve lateralmente en los horizontes superiores del suelo hacia las corrientes y otra parte recarga los acuíferos a través del proceso de percolación y cuya descarga producirá el escurrimiento subterráneo.

#### 2.1.2 Manejo integral de cuencas

En la búsqueda de instrumentos de gestión que posibiliten la transversalidad de políticas sectoriales, diversos países han encontrado en el manejo integral de cuencas un instrumento de planeación y de gestión adecuado, que no sólo permite la gestión equilibrada de los recursos naturales, sino también la integración de los actores involucrados en una sola problemática en lugar de atender varios problemas sectoriales dispersos (Cruz 2014). La elaboración de un enfoque integrado, que supere la fragmentada visión sectorial, es determinante para la optimización del recurso hídrico. Las discusiones realizadas en los distintos foros, a partir de la creación de la Red Latinoamericana de Cooperación Técnica en Manejo de Cuencas Hidrográficas (REDLACH) en 1980, constituyen una clara expresión de la evolución de los conceptos, de las técnicas y la identificación de obstáculos para el manejo de cuencas.

Para la Fundación Gonzalo Río Arronte (FGRA-WWF 2003), el Manejo Integrado de Cuencas Hidrográficas (MICH), es el proceso que coordina las acciones de conservación, manejo y desarrollo del agua, territorio, y recursos relacionados presentes en una cuenca, para maximizar de manera equitativa los beneficios económicos y sociales derivados de los recursos hídricos, preservando y, en su caso, restaurando los ecosistemas acuáticos.

El manejo de cuencas es el proceso complejo que le da orden a un conjunto de acciones dentro de la Cuenca Hidrológica Superficial (Hidrográfica) o Cuenca Hidrológica Subterránea, encaminado a lograr

un desarrollo social y económico sostenibles en el tiempo, además de la protección del medio ambiente (González 2000).

Para Dourojeanni (1992), citado por Cotler, (2004); el manejo de cuencas “Es el arte y la ciencia de manejar los recursos naturales de una cuenca, con el fin de controlar la descarga de agua de la misma en calidad, cantidad y tiempo de ocurrencia”.

#### 2.1.2.1 La cuenca como unidad territorial de manejo

La cuenca es el espacio del territorio en el cual naturalmente discurren todas las aguas (aguas provenientes de precipitaciones, de deshielos, de acuíferos, etc., que discurren por cursos superficiales o ríos) hacia un único lugar o punto de descarga (que usualmente es un cuerpo de agua importante tal como un río, un lago o un océano). El ámbito de la cuenca hidrográfica es un espacio territorial natural independiente de las fronteras político-administrativas internas de un país o de fronteras internacionales.

La cuenca, sea en forma independiente o interconectada con otras, es la unidad territorial más aceptada para la gestión integrada de los recursos hídricos. Las políticas para utilizar el territorio de una cuenca como base para la gestión del agua han tenido diferentes enfoques y una desigual evolución en los países de América Latina y el Caribe. Desde fines de los años treinta, en muchos de ellos se ha tratado de adoptar los modelos de gestión del agua a nivel de cuencas.

A pesar de los obstáculos existentes, se observa un interés generalizado por crear y operar organismos de cuenca para mejorar la gestión integrada del agua. El tema ha recobrado vigencia en los años recientes, debido a que los países de la región están tratando de lograr metas de gestión integrada de los recursos hídricos y de desarrollo sustentable. A su vez, las autoridades ambientales y los defensores del medio ambiente coinciden en que la cuenca es un posible punto de partida para coordinar acciones tendientes a la gestión ambiental – sobre todo si ya existen organizaciones de gestión del agua a nivel de cuencas–, aún cuando ello es causa de severas controversias, ya que no es adecuado combinar ambas funciones bajo una misma autoridad (Dourojeanni, 2002; citado por Cruz, (2014)).

Cuencas hidrográficas y el manejo holístico e integrado son compatibles debido a que:

- Las fronteras de cuencas son generalmente fáciles de definir topográficamente.
- Los límites de las cuencas tienden a delimitar muchos procesos ecosistémicos importantes.
- La relación entre subcuencas es sistemática y jerárquica y permite trabajar intuitivamente en diferentes escalas.
- A diferencia de otros conceptos ecológicos, las cuencas son entendidas por el público.

La cuenca se considera la unidad territorial adecuada para la gestión integrada del agua porque es la principal forma terrestre dentro del ciclo hidrológico que capta y concentra la oferta del agua proveniente de la precipitación. Además de esta condición física y biológica básica, en la cuenca se genera una interrelación e interdependencia (externalidades) entre los usos y usuarios de agua.

### 2.1.3 Modelo SWAT

Soil and Water Assessment Tool (SWAT) es un modelo de cuenca desarrollado en Texas por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) a través del Servicio de Investigación Agrícola (ARS) (Arnold et al. 1998).

Este modelo permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas de gran escala, fisiografía compleja, con diferentes suelos, diversos usos del terreno y condiciones de manejo variables en periodos de tiempo mayores de un año, también simula el efecto de la calidad del agua sobre las practicas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Neitsch et al., 2001).

#### 2.1.3.1 Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT

Arnold y otros, (2012), mencionan que desde su creación el modelo ha incluido componentes de los modelos de las USDA-ARS, además de algunos otros sobre transporte de plaguicidas, hidrología y crecimiento de los cultivos. Entre ellos se encuentra el modelo GLEAMS sobre los efectos de las aguas subterráneas a los sistemas de gestión agrícola, el modelo CREAMS sobre químicos, la escorrentía y la erosión de los sistemas de gestión agrícola y, el modelo integrado de Política Ambiental Climático; estos componentes fueron incorporados por primera vez en el Simulador de Recursos Hídricos en Cuencas Rurales (SWRRB).

En la actualidad se ha sumado el enrutamiento ampliado y el transporte de contaminantes incluyendo depósitos, estanques, humedales, fuentes puntuales, y efectos de tanques sépticos, así como las rutinas de enrutamiento de sedimentos y rutinas de transmisión cinéticas del modelo QUAL2E. Las modificaciones adicionales que se han incorporado en SWAT incluyen una mejor rutina del ciclo del carbono basado en el modelo CFARM, las rutinas diarias de hidrología incluyendo el método de infiltración de Green-Ampt, las acciones temporales de las prácticas de gestión y cambio de uso del suelo y, las mejoras en el drenaje en el subsuelo, franjas filtrantes, vías fluviales con césped, riego, y otras representaciones mejoradas de las prácticas de conservación y de gestión; todo ello se aprecia en la Figura 2-3.

Con la agrupación de dichos modelos, el SWAT permite simular la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas, así como el efecto que en la calidad del agua tienen las prácticas agronómicas por el uso de pesticidas y fertilizantes (Oñate and Aguilar 2003).

#### 2.1.3.2 Componentes del modelo SWAT

Los componente que integran el modelo SWAT son todos aquellos elementos y procesos que se desarrollan dentro de la cuenca de manera natural y a causa de las actividades antropogénicas, entre los cuales se encuentran: el componente hidrológico, el clima, la sedimentación, los nutrientes, el manejo de los cultivos, los componentes del transporte y el tránsito de agua y sedimentos en el almacenamiento. Dichos componentes se pueden apreciar en la Figura 2-4 y posteriormente se analiza solamente el componente hidrológico ya que en este estudio solo nos enfocamos en ello.



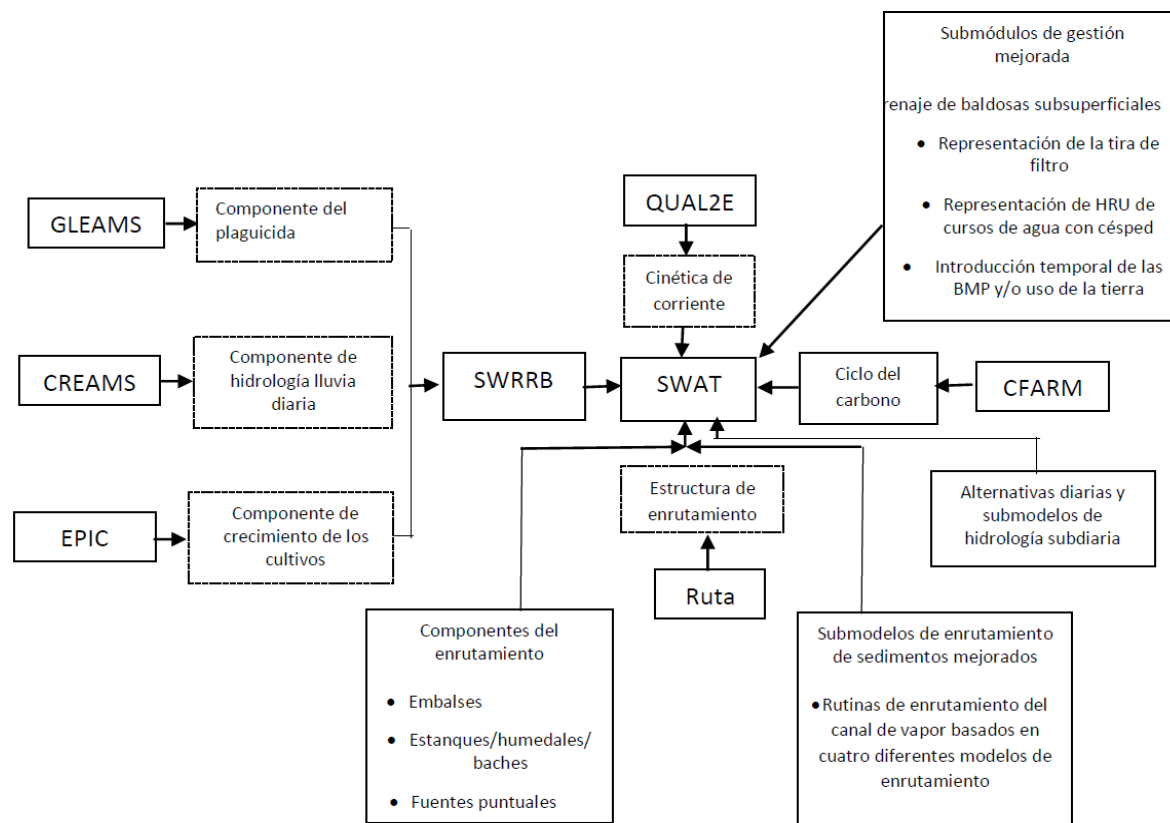


Figura 2-3: Esquema del desarrollo histórico del SWAT y modelos adoptados.



Figura 2-4: Componentes del modelo SWAT.

### 2.1.3.3 Enfoque del modelo SWAT

En SWAT, una cuenca se divide en sub-cuencas utilizando el DEM, que a su vez se subdividen en HRUs (unidades de respuesta hidrológica y su término en inglés *Hydrological Response Units*) con características homogéneas de tipo de suelo, uso del suelo y pendiente. Los HRUs son la base para el cálculo del balance de agua. El agua en cada HRU se puede almacenar en cuatro niveles: nieve, perfil del suelo (0-2m), acuífero superficial (0-2m) y el acuífero profundo (2-20m).

Es recomendable utilizar múltiples HRUs para el análisis de sub-cuencas debido que un solo HRU no podría mostrar las características de una sub-cuenca (Vilaysane et al. 2015).

En SWAT, el cálculo del balance de agua es simulada en dos componentes separados del ciclo hidrológico: la fase terrestre y la fase de enrutamiento. La fase terrestre controla las cargas de cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal en cada sub-cuenca, mientras que la fase de enrutamiento define el movimiento del agua, sedimentos y nutrientes desde la red de canales hacia la salida de la cuenca (Arnold et al. 1998; Neitsch et al. 2011).

Las rutinas hidrológicas dentro de SWAT permiten simular los procesos de flujo superficial y del subsuelo, la infiltración, la evaporación y evapotranspiración de las plantas, el flujo lateral, percolación y producción de sedimentos. Estas rutinas se aplican a todas las subcuencas generadas por el modelo, permitiendo que las diferencias en sus características hidrológicas sean consideradas de forma independiente (Minoti 2006).

a. Fase terrestre del ciclo hidrológico

Uno de los componentes del modelo SWAT corresponde a la simulación de todos los procesos que constituyen el ciclo hidrológico, lo cual permite realizar un balance hídrico en toda la cuenca; este ciclo controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen a través de las microcuencas hacia las redes de drenaje, dicho proceso se observa en la Figura 2-5.

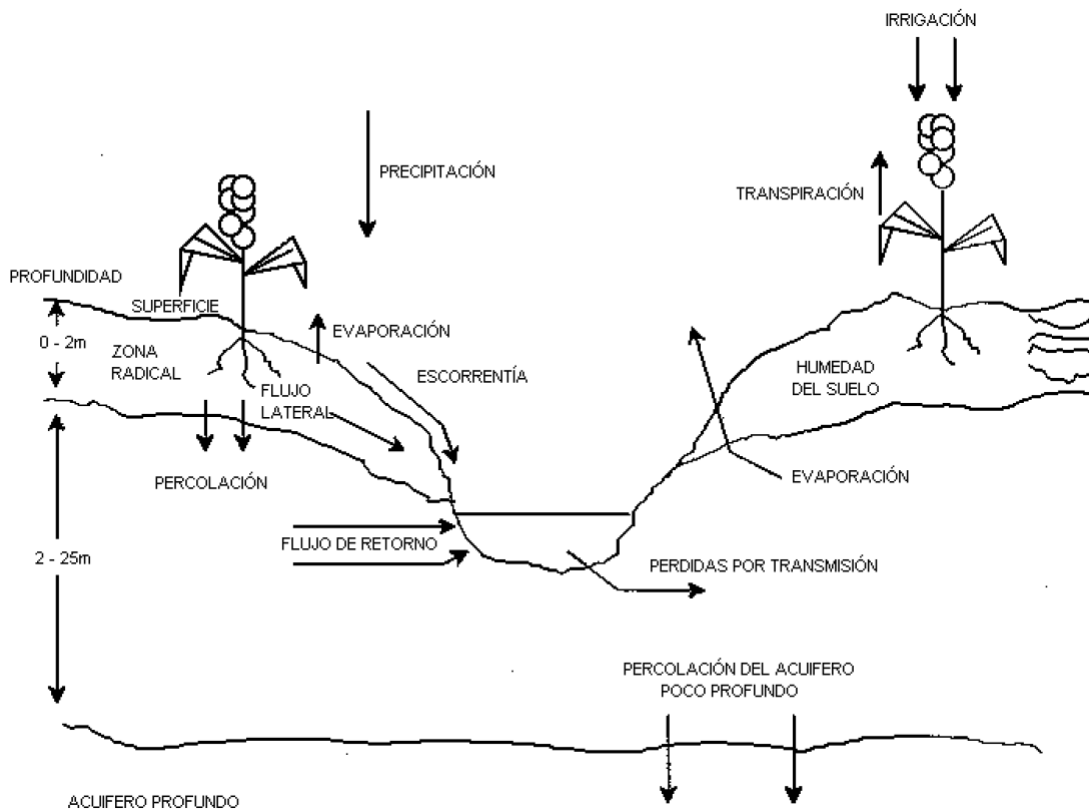


Figura 2-5: Representación del ciclo hidrológico en SWAT.

El balance hídrico de la cuenca en la fase terrestre está dado por la ecuación de balance de agua en el suelo para cada día de simulación (ecuación 1) (Neitsch et al. 2011):

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

Donde:

- $SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo en mm de  $H_2O$ ,
- $SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo,
- $R_{day}$  es la cantidad de precipitación,
- $Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie,
- $ET_a$  es la cantidad de evapotranspiración real,

$W_{seep}$  es la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo y  $Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno.

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias en la evapotranspiración para varias cosechas y suelos. Las esorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las esorrentías totales para la cuenca. Esto aumenta la certeza y da una mejor descripción física del equilibrio del agua. Las diferentes entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico, son resumidos en las secciones siguientes:

b. Clima

El clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad y energía, que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo hidrológico. Las variables climáticas necesarias por SWAT consisten en precipitación diaria, temperatura aérea máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa.

**Hidrología**

Cuando la precipitación desciende, puede ser interceptada y puede ser contenida en el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se infiltrará en el perfil de la tierra o fluirá sobre el terreno como esorrentía. La esorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo en la corriente. El agua infiltrada puede ser contenida en el suelo y evapotranspirada posteriormente o puede avanzar lentamente al sistema de agua-superficie a través de pasos subterráneos. Las conductos potenciales de movimiento de agua simulados por SWAT en las HRU son ilustradas en la Figura 2-6.

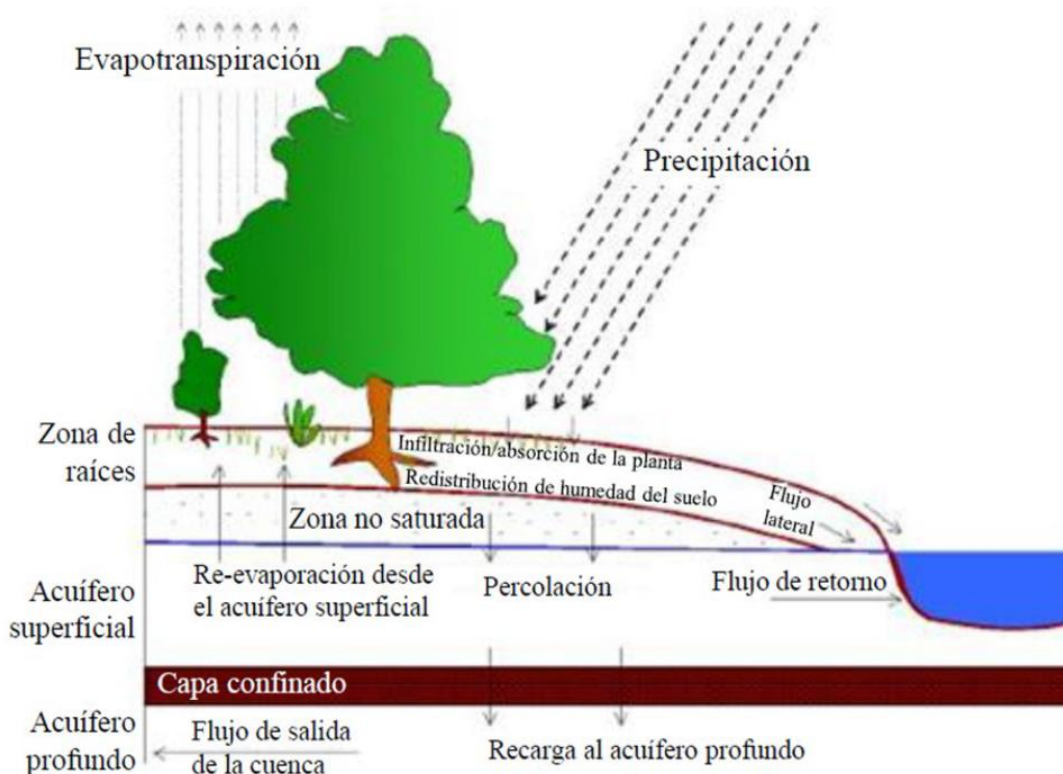


Figura 2-6: Representación de movimientos del agua en SWAT.

### **Almacenamiento de dosel**

El almacenamiento del dosel es el agua interceptada por superficies vegetativas (el dosel) donde se mantiene y se hace disponible para la evaporación. Cuando se usa el método de curva numérica CN para computar escorrentía de superficie, el almacenamiento de dosel se toma en cuenta en los cálculos de superficie de escorrentía. Sin embargo, si los métodos como Green & Ampt se usan para modelar infiltración y escorrentías, el almacenamiento de dosel debe ser modelado separadamente. SWAT permite al usuario a ingresar la cantidad máxima de agua que puede ser almacenada en el dosel en el índice máximo de área de hoja para la cobertura de tierra. Este valor y el índice del área de la hoja son utilizados por el modelo para computar el almacenamiento máximo en tiempo en el ciclo de desarrollo de la cobertura de tierra/cosecha. Cuando la evaporación es computada, el agua primero se remueve del almacenamiento de dosel.

### **Evapotranspiración.**

La evapotranspiración es un término colectivo para todos procesos en el que agua en fase líquida o sólida o cerca de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico. La evapotranspiración incluye evaporación de ríos y lagos, suelo descubierto, y superficies vegetativas; evaporación de dentro de las hojas de plantas (transpiración); y la sublimación de superficies de hielo y nieve. El modelo computa la evaporación de suelos y plantas separadamente descrito por Ritchie (1972). La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima utilizando funciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área de hoja.

### **Evapotranspiración potencial**

La evapotranspiración potencial es la proporción en la cual la evapotranspiración ocurriría en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre. Esta proporción se asume para ser no afectada por efectos micro-climáticos de procesos como advección o calor de almacenamiento. El modelo SWAT ofrece tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves (Hargreaves et Al., 1985), Priestley-Taylor (Priestley y Taylor, 1972), y Penman-Monteith (Monteith, 1965).

### **Escurrimiento superficial**

Las escorrentías en la superficie, o flujo terrestre, es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada. Utilizando las cantidades diarias o sub-diarias de lluvia, el SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de escorrentías para cada HRU. Este es computado utilizando una modificación del método de curva numérica del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1972) o el método de infiltración de Green & Ampt (Green y Ampt, 1911). En el método de curva numérica, la curva varía no-linealmente con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica baja si la tierra se acerca el punto de marchitez y aumenta hasta cerca de 100 al acercarse el suelo a la saturación.

El método de Gree & Ampt requiere los datos sub-diarios de precipitación y calcula la infiltración como una función del frente potencial mátrico húmedo anterior y conductividad hidráulica efectiva. El agua que no se infiltra se convierte en escorrentía de superficie. El SWAT incluye una provisión

para estimar escorrentías de suelo congelado donde un suelo se define como congelado si la temperatura en la primera capa es menos de 0°C.

El escurrimiento superficial en base al método de número de curva propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (USDA-SCS, 1972) se representa en la ecuación 2, 3 y 4.

$$Q_{surf} = \frac{(P - 0.2S)^2}{P + (0.8S)} \dots\dots\dots(2)$$

$$Q_{surf} > 0 \quad Si \quad 0.2S \leq P \dots\dots\dots(3)$$

Dónde:

Q = Escurrimiento medio (mm) ,

P = Precipitación por evento (mm) y

S = Retención máxima potencial (mm)

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \dots\dots\dots(4)$$

Donde:

S = Potencial máximo de retención (mm) y

CN = Curvas numéricas (adimensional)

El uso de datos de precipitación diarios es particularmente importante para la técnica de las curvas numéricas debido a que en muchas localidades, los datos de precipitación con incremento en tiempo de menos de un día no existen. También, el manejo de los datos de precipitación y los cálculos de escurrimiento superficial son más eficientes para datos diarios que en intervalos más cortos.

**Infiltración**

La infiltración se refiere a la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre. Cuando la infiltración continúa, la tierra llega a ser cada vez más húmeda, causando que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa inicial de infiltración depende del contenido de humedad de la tierra antes de la introducción de agua en la superficie terrestre. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra. La cantidad de agua que entra el perfil de tierra se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie. El método de infiltración Green & Ampt modela directamente la infiltración, pero requiere los datos de precipitación en incrementos más pequeños de tiempo.

**Redistribución**

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua por un perfil de tierra después de la entrada del agua (a través de precipitación o irrigación). La redistribución es causada por diferencias en el contenido de agua en el perfil. Una vez que el contenido de agua a través del perfil entero es uniforme, la redistribución cesará. El componente de la redistribución de SWAT usa un almacenamiento que dirige la técnica para predecir el flujo por cada capa de tierra en la zona principal. El flujo hacia abajo, o la filtración, ocurre cuándo la capacidad de espacio de una capa de tierra es excedida y la capa debajo no está saturada. La tasa del flujo es gobernada por la conductividad saturada de la capa de tierra. La redistribución es afectada por la temperatura del



suelo. Si la temperatura en una capa particular es de 0°C o debajo, ninguna redistribución es permitida en esta capa.

### **Percolación.**

El componente de percolación del SWAT usa una técnica de almacenamiento que predice el flujo a través de cada capa de suelo en la zona de raíces. El flujo hacia abajo se presenta cuando se excede la capacidad de campo (CC) de una capa de suelo y si la capa inferior no está saturada. La tasa de flujo hacia abajo está gobernada por la conductividad a saturación en la capa del suelo. El flujo hacia arriba puede ocurrir cuando una capa inferior excede la CC. El movimiento de agua de una capa inferior hacia una capa inferior adyacente es regulado por el coeficiente de agua del suelo CC de las dos capas.

### **Flujo lateral subsuperficial**

El flujo, o inter-flujo subterráneo lateral, es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie pero por encima de la zona donde las piedras están saturadas con agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2m) se calcula simultáneamente con redistribución. Un modelo cinemático del almacenamiento se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de tierra.

### **Flujo de retorno**

El flujo del retorno, o flujo de base, es el volumen de agua subterránea originado en el manto freático. El SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas de acuíferos: un acuífero superficial y libre, que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo y limitado que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Arnold et Al., 1993). El agua que filtra más allá del fondo de la zona de raíz se divide en dos fracciones—cada fracción se convierte en recarga para cada uno de los acuíferos. Además de retornar al flujo, el agua almacenada en el acuífero superficial puede abastecer de nuevo humedad en el perfil del suelo en condiciones muy secas o es absorbido directamente por la planta.

Una constante de recesión derivada a partir de datos diarios de flujo se usa para retardar el flujo del acuífero a la corriente de agua.

### **Pérdidas por transmisión**

Las pérdidas de transmisión son pérdidas de flujo de superficie a través de la lixiviación por el cauce. Este tipo de pérdida ocurre en corrientes efímeras o intermitentes donde la contribución del agua subterránea ocurre sólo en cierto tiempo del año, o del todo en absoluto. El SWAT utiliza el método de Lane descrito en el Capítulo 19 de la Guía de la Hidrología del SCS (Servicio de Conservación de Suelo del USDA, 1983) para estimar la transmisión de pérdidas. Las pérdidas de agua del canal son una función del ancho del canal y la duración de longitud y flujo. Tanto la proporción de volumen como la proporción máxima se ajustan cuándo las pérdidas de transmisión ocurren en canales tributarios.

### **Deshielo de nieve.**

El componente de derretimiento de hielo del modelo SWAT es similar al del modelo CREAMS, si hay nieve esta se derrite en días cuando la temperatura máxima excede los 0°C usando una función lineal

de la temperatura, la nieve derretida es transferida en la misma forma que la lluvia para estimar el escurrimiento y la precipitación. Sin embargo, la energía de la lluvia es considerada como cero y la tasa del escurrimiento pico se estima asumiendo una distribución uniforme de la lluvia para una duración de 24 horas.

### Estanques y/o Reservorios

Los estanques son estructuras de almacenamiento de agua situados dentro de una sub-cuenca que intercepta escorrentías de superficie. El almacenamiento del agua del estanque es una función de la capacidad del estanque, afluencias y desagües diarios, la infiltración y la evaporación. Se asume que en los almacenamientos se tienen solamente vertedores de emergencia. Las entradas necesarias son la capacidad de almacenaje y el área del estanque cuando se llena a su capacidad. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal de almacenamiento.

#### a. Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Una vez que SWAT determina las cargas de agua, sedimento, nutrientes y pesticidas hacia el canal principal, las cargas son dirigidas por la red de corriente de la cuenca usando una estructura de orden semejante a la HYMO (Williams and Hann 1972). Adicionalmente al seguimiento del flujo masivo en el canal, SWAT modela la transformación de sustancias químicas en la corriente y cauce. La Figura 2-7 ilustra los diferentes procesos en-corriente modelados por SWAT.

El enrutamiento en el canal principal puede ser dividido en cuatro componentes: agua, sedimento, nutrientes y sustancias químicas orgánicas. En este estudio solo se describe el enrutamiento de flujo de agua.

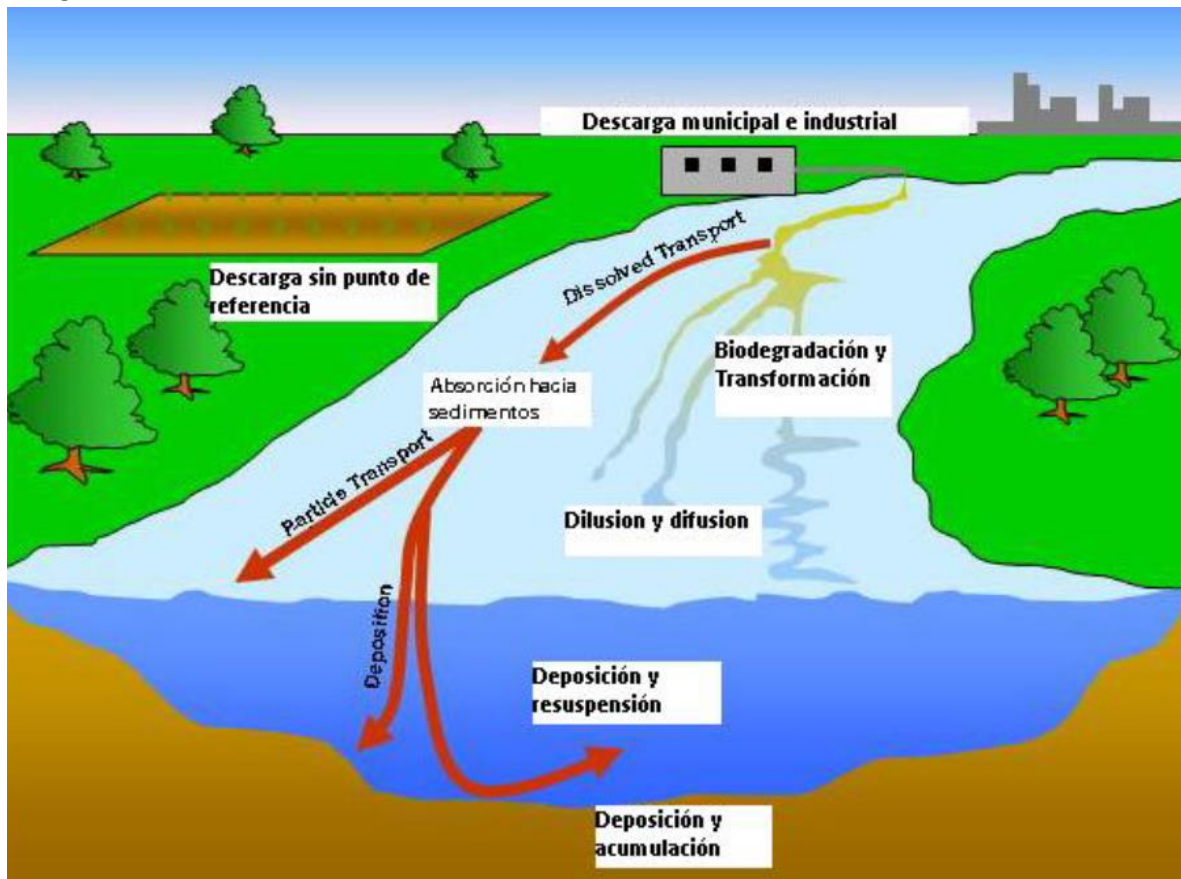


Figura 2-7: Procesos de corriente modelados por SWAT

### b.1. Enrutamiento De Flujo

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

### 2.1.4 Etapas de implementación de un modelo hidrológico SWAT

La implementación del modelo hidrológico SWAT requiere de las siguientes etapas bien definidas y se describen detalladamente en la sección de metodología:

- Recopilación de información.
- Construcción del modelo
- Calibración
- Validación
- Y análisis de las salidas del modelo

## 2.2 Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico

En este capítulo se describen la estimación de la lluvia a partir de satélite del producto IMERG (Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM)

### 2.2.1 Precipitación estimada por satélite

Precipitación estimada por satélite es de vital importancia debido a la ausencia de mediciones en el terreno en muchas partes del mundo, incluyendo los océanos, las regiones montañosas y zonas escasamente pobladas. Es así, que numerosos productos de lluvia grillada han sido producidos mediante la combinación de productos de microondas y los productos de infrarrojos de baja órbita terrestre y los satélites geoestacionarios. Entre los productos grillados de precipitación se tiene el PERSIANN-CCS (Precipitation Estimation from Remotely Sensed Information using Artificial Neural Networks Cloud Classification System, Hong et al. 2004), CMORPH (Climate Prediction Center morphing algorithm; Joyce et al. 2004), GSMaP (Global Satellite Mapping of Precipitation; Kubota et al., 2007), y TMPA (TRMM Multi-Satellite Precipitation Analysis; Huffman et al. 2007). Estos conjuntos de datos de precipitación grillada difieren en sus fuentes de datos y en sus algoritmos, así como en sus resoluciones y cobertura y han sido ampliamente comparados con los datos de lluvia medidos en las estaciones pluviométricas y los radares en tierra sobre diferentes regiones del mundo.

Sin embargo recientemente una de las metas de la misión de GPM (Global Precipitation Measurement) es "proporcionar productos uniformes de precipitación global dentro de un marco coherente a partir de una constelación heterogénea de sensores de microondas." Para éste fin, el algoritmo IMERG (Integrated Multi-SatellitE Retrievals for GPM) fue desarrollado (Huffman et al. 2015).

IMERG integra los algoritmos de TMPA, CMORPH y PERSIANN para producir estimaciones de precipitación a 0.1° de resolución cada 30 minutos entre las latitudes de 60°N y 60°S. Actualmente, IMERG se extiende desde abril 2014 al presente y está disponible en tres versiones definidas por tres diferentes períodos de latencia para atender a una amplia gama de necesidades de los usuarios. Así, se tiene el producto IMERG que está disponible en tiempo real con una latencia o retraso de 6 horas denominado (IMERG Early Run), con retraso de 18 horas (IMERG Late Run) y con 4 meses de retraso (IMERG Final Run).

El producto “IMERG Early Run” disponible en tiempo real desde abril del 2015 con un retraso de 6 horas sirve para aplicaciones en tiempo real, como en la predicción de inundaciones repentinas. El producto “IMERG Late Run” también está disponible desde abril del 2015 con un retraso de 18 horas puede ser útil para los propósitos tales como la previsión de cosechas. Mientras el producto “IMERG Final Run” está disponible desde abril del 2014 con un retraso de 4 meses para aplicaciones de investigación y este producto tiene calibración climatológica con las estaciones terrenas.

Finalmente, el procesamiento de IMERG está proyectado para ser extendido hacia atrás a la era de TRMM (1998 en adelante).

En este estudio, se ha evaluado el producto final de IMERG (IMERG Final Run) comparando con las precipitaciones medidas en estaciones pluviométricas ubicadas en la cuenca del río Vilcanota y luego evaluamos su utilidad en el modelamiento hidrológico utilizando el modelo hidrológico SWAT.

### 3. MARCO METODOLÓGICO

#### 3.1 Área de estudio

El área de nuestra investigación es la cuenca del río Vilcanota (CRV), que se encuentra ubicada en los Andes del sur de Perú y es un tributario del sistema fluvial del Amazonas, se encuentra situada dentro de la región administrativa del departamento de Cuzco.

El área de la CRV es de 9613 km<sup>2</sup> lo cual se caracteriza por la presencia de pequeños glaciares, terrenos con pendientes pronunciados y de gran altitud con un rango de elevación entre 2124 y 6309 m s.n.m., ecosistemas como páramos y punas (Sánchez-Vega and Dillon 2006) los cuales tienen un rol importante en la dinámica de los sistemas hídricos de montaña. Los tipos de suelos predominantes en el área de estudio son principalmente los Litosoles y Kastanozems (FAO-UNESCO 1988). El tipo de uso de suelo predominante es el pasto natural, seguida de bosques y matorrales, tierras agrícolas y entre otros como áreas urbanas y zonas desérticas. Asimismo, CRV se caracteriza por presentar varias lagunas naturales sin embargo desde 1996 la laguna Sibinaccocha (Figura 1) fue represada con el propósito de almacenar agua en la época de avenida y permitir una disponibilidad adicional en los meses de Junio a Octubre para satisfacer los requerimientos hídricos de la central Hidroeléctrica Machupicchu de la compañía hidroeléctrica (EGEMSA). La represa tiene un volumen útil de 120 Hm<sup>3</sup> y controla una cuenca de 137 km<sup>2</sup>.

Climáticamente, la cuenca se caracteriza por el movimiento de las masas de aire que están asociados con la zona de convergencia Inter-Tropical (ITCZ), donde la precipitación en los Andes es estacional que ocurre predominantemente durante el verano austral (octubre – marzo), vinculado a la fase de madurez del sistema del monzón de América del Sur (SAMS), la cual alimenta a la zona de

convergencia del atlántico sur (en inglés: South Atlantic Convergence Zone - SACZ) (Kodama, 1992; Lenters et al., 1995; Liebmann et al., 1999) y la alta de Bolivia (Garreaud, 2000; Garreaud et al., 2003). Por el contrario, entre abril y setiembre hay una estación seca, que es particularmente intensa sobre los Andes vinculados al debilitamiento del transporte de la humedad y de la aparición de un jet del oeste en la tropósfera superior (por ejemplo, Garreaud et al., 2003; Espinoza et al., 2009). En la CRV la precipitación media anual para el periodo comprendido entre 2000 - 2015 es de 808.2 mm/año. La ubicación de la CRV se muestra en la Figura 3-1.

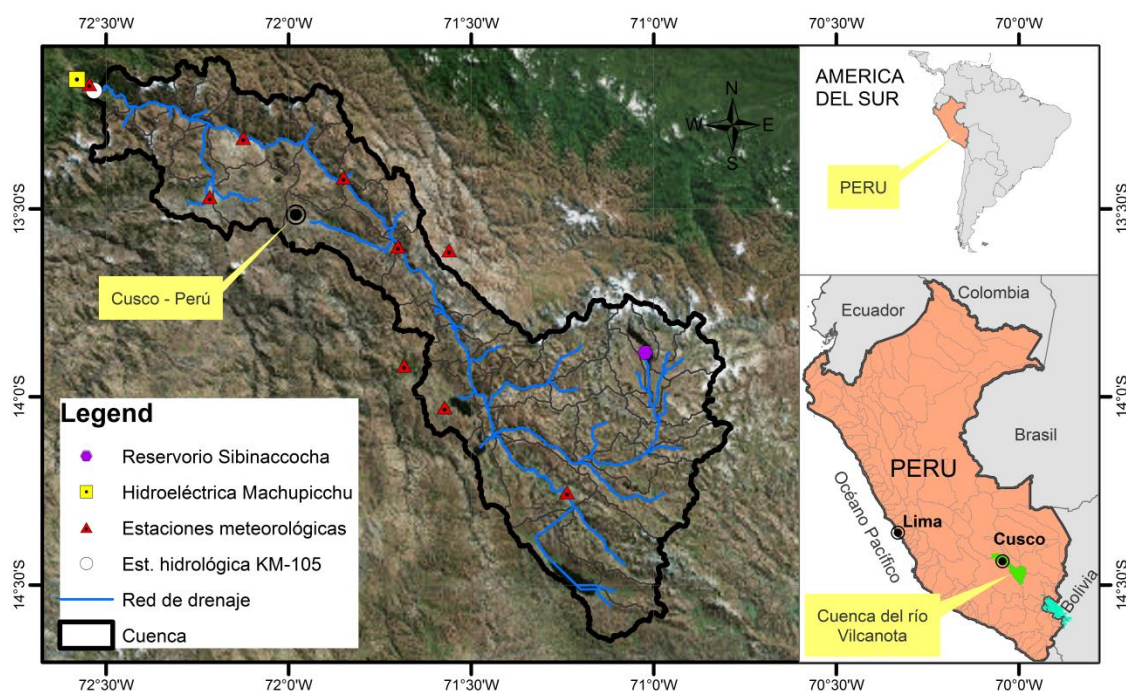


Figura 3-1: Ubicación del área de estudio y la red de estaciones hidrometeorológicas

## 3.2 Datos

### 3.2.1 Modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota

La Tabla 3-1, resume el tipo, la resolución y la fuente de datos empleados para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota. Así, los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima) con control de calidad y con más del 90% de datos completos que cubren el periodo 2000-2015 fueron obtenidas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), en total fue utilizado los datos de 09 estaciones meteorológicas emplazadas en la cuenca del río Vilcanota y en las cuencas vecinas (Figura 3-1).

Los datos de descarga media diaria disponibles desde 1958 hasta la fecha corresponden a la estación Km-105 perteneciente a la compañía hidroeléctrica (EGEMSA) el cual se encuentra aguas arriba de la central Hidroeléctrica Machupicchu (Figura 3-1). Entre los datos grillados que fueron utilizados en este estudio se tiene el modelo digital de elevación (DEM) del producto SRTM v4.1 de 90 m de resolución (Shuttle Radar Topography Mission: SRTM v4.1) debido que tiene buena información y ha sido evaluado su uso en el modelamiento hidrológico utilizando el modelo SWAT (Tan et al. 2015); este producto está disponible en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research). Debido a la escasa información de



datos de suelo y uso de suelo en la región, datos globales fueron utilizados. Así, el mapa de suelos digitalizada del mundo que incluye las propiedades del suelo corresponden a FAO-1995, (2003) y el mapa de cobertura vegetal (global) a una resolución espacial de 300 m y representativo para el periodo 2008-2012 se ha obtenido del proyecto ESA CCI-LC (European Space Agency and Climate Change Initiative-Land Cover).

Para la evaluación de la utilidad de los datos grillados de precipitación en el modelamiento hidrológico, los datos de precipitación estimada por satélite del GPM y específicamente el producto final (IMERG Final Run) se han obtenido de la NASA para el periodo de abril 2014 a diciembre 2015.

Tabla 3-1: Tipo de dato, resolución y fuente de datos

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Enlace
Datos hidrometeorológicos	Diaria (2000-2015)	SENAMHI y EGEMSA	<a href="http://www.senamhi.gob.pe/">http://www.senamhi.gob.pe/</a>
DEM	90 m	CGIAR-CSI	<a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a>
Cobertura vegetal	300 m	ESA CCI-LC	<a href="http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/">http://maps.elie.ucl.ac.be/CCI/viewer/</a>
Mapa de suelo	1:5 000 000	FAO-1995, 2003	<a href="http://www.waterbase.org/download_data.html">http://www.waterbase.org/download_data.html</a>
Lluvia satélite (IMERG Final Run)	30 min, 0.1° (Abril 2014-2015)	NASA	<a href="https://pmm.nasa.gov/data-access">https://pmm.nasa.gov/data-access</a>
Lluvia satélite (TMPA-3B42 V7)	3Horas, 0.25° (1998-2015)	NASA	<a href="https://pmm.nasa.gov/data-access">https://pmm.nasa.gov/data-access</a>

### 3.2.2 Evaluación de la utilidad de la precipitación estimada por satélite (PPES)

Los datos de lluvia observados en las estaciones pluviométricas fueron utilizados como referencia para evaluar los PPES (3B42V7 e IMERG).

#### 3.2.2.1 Datos pluviométricos

Los datos de precipitación observada corresponden a la red de estaciones del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). El periodo en la que las estaciones cuentan con información completa es de 2000 a 2015 y en total se utilizaron los datos de 9 estaciones meteorológicas emplazadas en la cuenca del río Vilcanota (7 estaciones) y en las cuencas vecinas (2) (Figura 3-1).

#### 3.2.2.2 Producto TMPA-3B42 V7

Con el propósito de proporcionar datos de precipitación grillada en tiempo real, el satélite TRMM fue lanzado al espacio en los finales de 1997 y esto proporciona estimaciones de precipitación cada 3 horas desde 1998 hasta la actualidad con una cobertura cuasi global (50° N-S) y a una resolución espacial de 0.25° (Huffman et al. 2007). La última versión del producto TMPA (TRMM multi-satellite precipitation analysis) es la versión 7 y está disponible en dos variantes, un producto en tiempo real (TMPA-3B42 RT) disponible con 3-6 horas de retraso y el producto de investigación (TMPA-3B42 V7) que es disponible con una latencia de 2 meses. El primer producto se obtiene combinando e intercalibrando las estimaciones de lluvia a partir de las observaciones de los múltiples sensores localizados en satélites de baja órbita terrestre como el microonda (MW: microwave) y el infrarrojo

(IR: infra-red). Mientras el segundo producto resulta del ajuste de TMPA-3B42 RT con los datos de lluvia observado de GPCC. Mayor detalle acerca de los algoritmos de TMPA se encuentra en Huffman et al., (2007). De acuerdo a Huffman et al., (2015), a pesar de que el satélite TRMM haya iniciado su fase terminal en Octubre del 2014, este no afectará sustancialmente la producción de TMPA-3B42 V7 lo cual se producirá hasta los mediados del 2017. De aquí, el producto TMPA-3B42 V7 (3B42 V7 de aquí en adelante) se consideró como un punto de referencia adecuado para la evaluación de IMERG en la era de GPM.

### 3.2.2.3 Producto IMERG

Debido al gran éxito de la misión TMPA, como el sucesor de TRMM fue lanzado en 27 de febrero del 2014 el GPM (Global Precipitation Measurement); iniciándose así la era de la misión del GPM. La misión GPM está proporcionando productos de precipitación de alta resolución que son estimados utilizando el algoritmo IMERG (The Integrated Multi-satellitE Retrievals for GPM) lo cual combina los datos de TMPA, PERSIANN, CMORPH y NASA PPS (Precipitation Processing System). Los productos del sistema IMERG están disponibles en 3 variantes de los cuales dos variantes están disponibles casi en tiempo real: “Early run” (~6 horas de latencia) y “Late run” (~12 horas de latencia). Mientras el tercer variante que requiere del ajuste de las estimaciones de satélite en base a datos de lluvia observada es “Final run” (2-4 meses de latencia). Este último exhibe la mejor precisión y calidad y es considerado como el producto del grado de investigación y que está disponible desde marzo de 2014 (Huffman et al. 2015). Descripción detallada del algoritmo y los productos de IMERG se encuentra en Hou et al., (2014) y Huffman et al., (2015). En este estudio utilizamos el producto “Final run” de IMERG (de aquí en adelante IMERG) que está disponible a una resolución temporal de 30 minutos y 0.1° de resolución espacial

### 3.3 Metodología para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota

El enfoque metodológico utilizado en este estudio se muestra en la Figura 3-2 y a continuación se detalla cada de las dos etapas: a) configuración y parametrización del modelo y b) Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT.

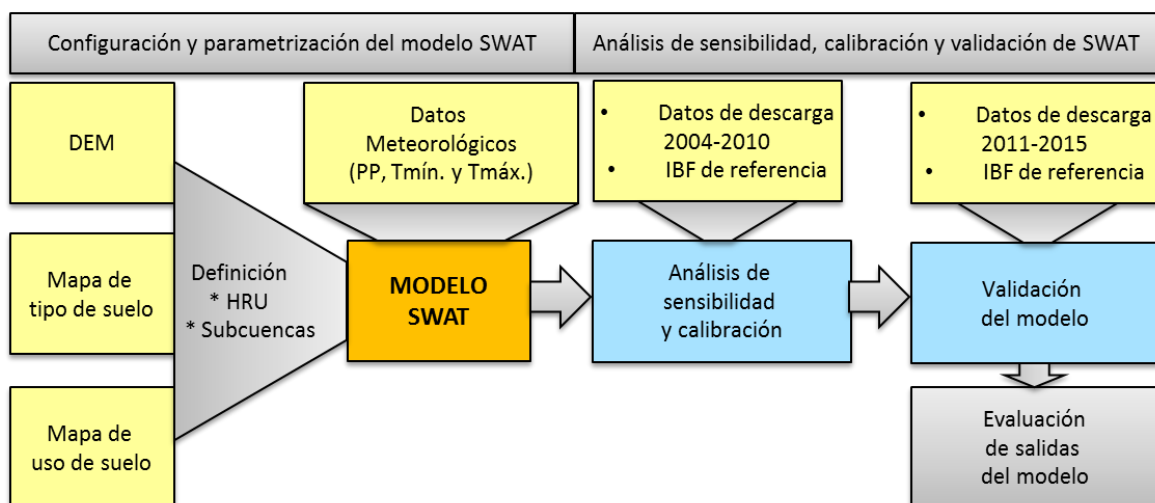


Figura 3-2: Diagrama de flujo de la metodología

### 3.3.1 Configuración y parametrización del modelo SWAT

El modelo hidrológico para la cuenca del río Vilcanota fue desarrollado usando el SWAT 2012. Así la delimitación de la cuenca de estudio y la red de la corriente se llevó a cabo utilizando la herramienta de la delimitación automática de cuencas del Arc-SWAT en base al DEM y de acuerdo a los procedimientos utilizados por Neitsch *et al.*, (2002).

Para considerar los efectos de la represa Sibinaccocha y la representatividad espacial de los datos meteorológicos la cuenca se ha dividido en 53 sub-cuencas (con umbral del área mínima de drenaje de 10 000 Has). Asimismo debido a la alta heterogeneidad espacial de la pendiente en la cuenca; esta se ha disgregado en cinco clases (<10%, 10 - 20%, 20 – 30%, 30 – 45% y > 45%). Luego se realizó la definición de HRU mediante un análisis de superposición y una combinación única de un particular tipo de suelo, uso de suelo y pendiente. Donde los tipos de suelo, usos de suelo o pendientes que cubran menor al 5% del área de la sub-cuenca fueron eliminados para evitar el exceso de parametrización del modelo. Debido a la escasa información de la regla de operación y las descargas tanto a la entrada y salida de la represa Sibinaccocha, en este estudio la represa se ha simulado como un reservorio con la opción de *descargas de salida controlado en el reservorio* (Simulated Controlled Outflow-Target Release) de tal manera que el agua es almacenado en la época de avenida y se descarga (5-6 m<sup>3</sup>/s) en los meses de estiaje (Junio-Octubre) con el propósito de abastecer las necesidades de la central hidroeléctrica de Machupicchu. Esta opción de configuración de reservorio de un total de cuatro métodos que existe en SWAT es muy útil en reservorios con escasa disponibilidad de datos de aforo y ha dado buenos resultados en el modelamiento hidrológico (Kim and Parajuli 2012; Kim and Parajuli 2014).

La configuración de los componentes del modelo SWAT relacionados con la simulación de descargas se describe brevemente en este estudio, para mayor información ver Neitsch *et al.*, (2011). En este estudio la evapotranspiración potencial (ETP) fue estimada por el método de Hargreaves (Hargreaves and Samani 1985) debido a la limitada y escasa disponibilidad de variables meteorológicas como la humedad relativa, velocidad de viento y radiación solar. El uso de este método es suportada también por Aouissi *et al.*, (2016), quienes en una cuenca semiárida en Tunisia han evaluado la influencia del método de estimación de ETP (Penman-Monteith [PM], Hargreaves [HA] y Priestly-Taylor [PT]) en la predicción de descargas utilizando SWAT y han reportado que PM es el mejor para el cálculo de ETP sin embargo utilizando HA para la estimación de ETP han obtenido excelente desempeño (NSE=0.90) del modelo SWAT en la predicción de descargas mensuales.

La escorrentía superficial fue estimada utilizando el método del número de curva del SCS (USDA Soil Conservation Service 1972). El flujo lateral desde el perfil de suelo no saturado fue estimado mediante el modelo de almacenamiento cinemático (Sloan and Moore 1984) mientras tanto el flujo de retorno desde el acuífero superficial y profundo fue simulado de acuerdo a Arnold *et al.* (1998). En SWAT el flujo lateral y el flujo de retorno conforman el flujo base. El método de Lane se utilizó para calcular las pérdidas de transmisión (USDA-SCS 1983). El método de almacenamiento variable (Williams 1969a) fue utilizado para el enrutamiento de agua a través de la red de canales. El balance hídrico de la cuenca en la fase terrestre está dado por la ecuación de balance de agua en el suelo para cada día de simulación (ecuación 5) (Neitsch *et al.* 2011). Mientras tanto la cantidad de agua que sale cada día del HRU y entra al canal para ser enrutado a través del sistema de canales hacia la

salida de la cuenca está dado por la ecuación 6 (Luo et al. 2012; Arnold et al. 2013). De acuerdo a la ecuación 2 en este estudio el flujo de sistemas de drenaje (TQ) no fue considerado debido a la limitada información de sistemas de drenaje.

$$SW_t = SW_0 + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - ET_a - W_{seep} - Q_{gw}) \dots\dots\dots(5)$$

Donde

$SW_t$  es el contenido final de agua en el suelo en mm de  $H_2O$ ,  $SW_0$  es el contenido inicial de agua del suelo,

$R_{day}$  es la cantidad de precipitación,

$Q_{surf}$  es la cantidad de escorrentía de la superficie,

$ET_a$  es la cantidad de evapotranspiración real,

$W_{seep}$  es la cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo y

$Q_{gw}$  es la cantidad de flujo de retorno.

$$WYLD_t = Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw} + TQ \dots\dots\dots(6)$$

Donde

WYLD es el rendimiento hídrico en mm de  $H_2O$  y está dado por la contribución de: escorrentía superficial ( $Q_{surf}$ ), flujo Lateral ( $Q_{lat}$ ), flujo de retorno desde los acuíferos (superficial y profundo) ( $Q_{gw}$ ) y el flujo desde sistemas de drenaje (TQ).

Considerando que la mayor disponibilidad de los datos meteorológicos es a partir del año 2000. Se estableció el periodo de simulación del modelo SWAT para el periodo 2000-2015 donde los primeros cuatro años (2000-2003) fueron utilizados como periodo de calentamiento del modelo para mitigar las condiciones iniciales no conocidas. Por otro lado los registros de la descarga media diaria de la estación hidrológica “KM 105” fueron utilizados como referencia para el proceso de calibración (2004-2010) y validación (2011-2015) del modelo.

### 3.3.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT

#### 3.3.2.1 Análisis de sensibilidad de parámetros

El modelo hidrológico que caracteriza los diversos procesos físicos que ocurren en la cuenca hidrográfica está influenciado por un gran número de parámetros. Así, los parámetros de entrada de SWAT se basan en procesos reales y deben mantenerse dentro de un rango de incertidumbre realista, por lo que el primer paso en el proceso de calibración y validación en SWAT es la determinación de los parámetros más sensibles del modelo hidrológico de una cuenca y sub-cuenca (Arnold et al. 2012).

Usualmente el Análisis de sensibilidad de parámetros (AS) de los parámetros del modelo SWAT fue llevado a cabo mediante técnicas automáticas sin embargo mediante este procedimiento es posible encontrarse con la equifinalidad de los parámetros (Shen et al. 2012; Ficklin and Barnhart 2014) es por ello que en este estudio realizamos el AS de las variables de entrada de manera manual. El AS manual se llevó cabo cambiando el valor de una variable y manteniendo constantes todas las demás variables. A diferencia de otros estudios una novedad en este estudio es que mediante el AS manual

intentamos a identificar los parámetros sensibles y analizamos de cómo es el impacto de estos parámetros sobre la respuesta hidrológica desde los diferentes componentes del proceso hidrológico.

Finalmente identificamos el rango de búsqueda de cada parámetro sensible con el propósito de que el modelo SWAT sea capaz de cuantificar los flujos contribuidos por la escorrentía superficial y el flujo base. Para tal propósito el flujo base estimado por SWAT comparamos con el flujo base de referencia donde esta última fue estimado utilizando la técnica automatizada de separación de flujo base de Arnold et al. (1995a) en base a los datos de descarga observado en la estación hidrológica “KM 105”.

### 3.3.2.2 Análisis de incertidumbre y evaluación del desempeño de modelo SWAT en la calibración y validación

Debido que muchos estudios sugieren que SUFI-2 es el más adecuado para el análisis de incertidumbre en el modelamiento hidrológico con SWAT (Khoi and Thom 2015; Yesuf et al. 2016). En este estudio llevamos a cabo la calibración del modelo SWAT utilizando el procedimiento SUFI-2 (Abbaspour 2012) dentro de SWAT-CUP, en la cual se ha optimizado los parámetros más sensibles que fueron identificados en el AS. Tanto en la etapa de calibración y validación se han ejecutado 500 simulaciones estableciéndose el NSE como la función objetivo y fueron derivados dos factores estadísticos (*P-factor* y *R-factor*) para la cuantificación del grado de incertidumbre del modelo de predicción y además de las medidas estadísticas como el NSE (ecuación 7) y el porcentaje de bias (PBIAS, ecuación 8) para evaluar el desempeño del mejor modelo simulado. De acuerdo a SUFI-2 *P-factor* representa el porcentaje de los datos medidos que son contenidos dentro del 95% de intervalo de predicción (95PPU) y *R-factor* es la relación del espesor medio de 95PPU respecto a la desviación estándar de los datos medidos. Por lo que el modelo óptimo debe intentar de contener la mayor parte de los datos observados (*P-factor* = 1) dentro de una banda estrecha (*R-factor* = 0); ya que teóricamente el valor de *P-factor* (*R-factor*) varía en el rango de 0-1 (0-∞).

Por otro lado en la Tabla 3-2 se muestra los criterios utilizados para la valoración del desempeño del modelo SWAT el cual se basa en el esquema de Moriasi et al., (2007), quienes han derivado estos criterios en base a una extensa revisión de literatura de los reportes de valoración de desempeño utilizados en el modelamiento hidrológico. También utilizada por estudios recientes (Ficklin and Barnhart 2014; Khoi and Thom 2015; Me et al. 2015; Yesuf et al. 2016)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - O_p)^2} \dots\dots\dots(7)$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - S_i) \times 100}{\sum_{i=1}^n O_i} \dots\dots\dots(8)$$

Donde;

$O_i$  es la variable observada,

$S_i$  es la variable simulada,

$O_p$  es el promedio de la variable observada,

$n$  es el número de observaciones bajo consideración.



Tabla 3-2: Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT

Performance del indicador	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno
NSE	< 0.50	0.50 – 0.65	0.65 – 0.75	> 0.75
± PBIAS (%)	> 25	15 – 25	10 – 15	< 10

### 3.4 Metodología para la evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico

En esta etapa el enfoque de los procedimientos de la metodología utilizada se divide en dos etapas (Figura 3-3). El primero corresponde a la evaluación estadística de PPES; donde se compara los productos de PPES respecto a los datos de precipitación observada en los pluviómetros tanto en la era de TMPA como de GPM. La segunda etapa consiste en la evaluación hidrológica de PPES; para ello se ha utilizado el modelo hidrológico SWAT bajo diferentes escenarios de calibración y validación del modelo como se muestra en la Figura 3-3 el cual se basa en el enfoque utilizado por Tang et al., (2016) y Li et al., (2017) debido al corto periodo de disponibilidad de los datos de IMERG.

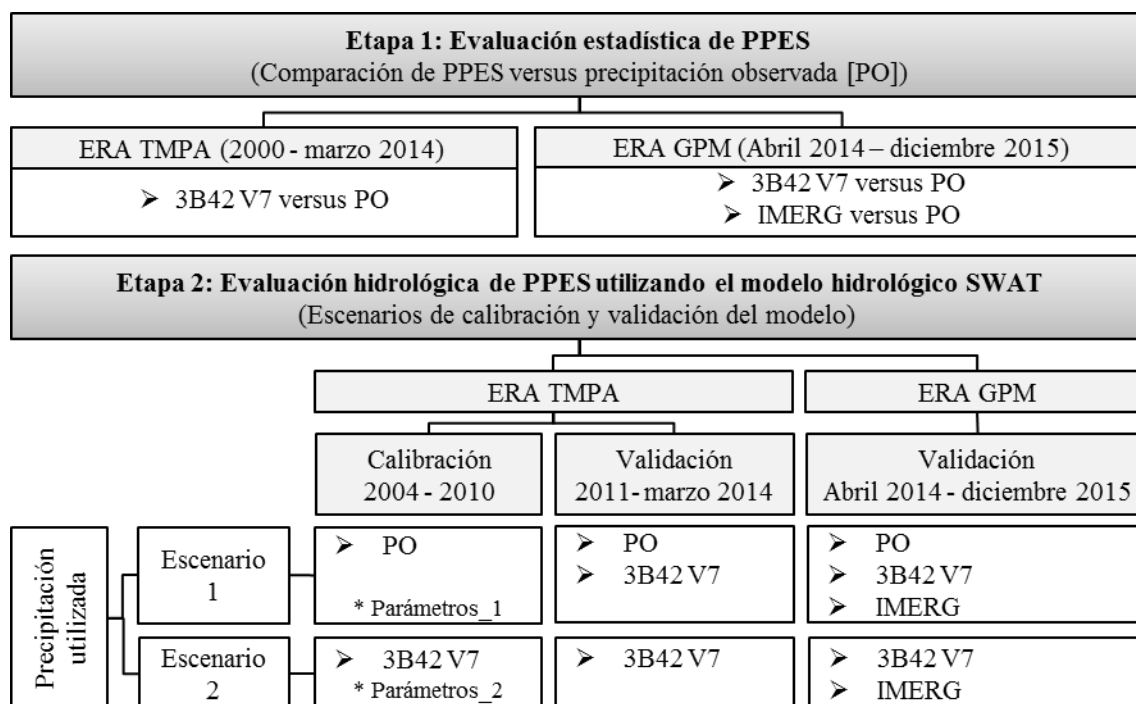


Figura 3-3: Diagrama de flujo de la metodología. Parámetros\_1 (Parámetros\_2) es el conjunto de parámetros calibrados del modelo SWAT utilizando como entrada los datos de lluvia observada (3B42V7).

#### 3.4.1 Evaluación estadística de PPES

La comparación de los datos de precipitación pluviométrica versus los datos de productos de precipitación estimada por satélite (PPES) se realiza en los pixeles del producto 3B42V7 (resolución espacial de 0.25°) donde se tuvo al menos 1 estación pluviométrica. Para ello en los pixeles donde se tuvo más de 1 estación pluviométrica, las observaciones de estas estaciones fueron promediadas para generar un único valor medio para cada día y por pixel. En este estudio no se interpola los datos debido que la interpolación de escasa e irregular distribución espacial de la red de estaciones pluviométricas podrían generar estimaciones no reales (Li and Heap, 2008; Scheel et al., 2011; Satgé

et al., 2016). Por otro lado para que IMERG sea comparable con 3B42V7, se ha agregado las estimaciones de lluvia de IMERG de 0.1° a 0.25° de resolución; para ello primero se ha resampleado IMERG de 0.1° a 0.05° usando el método de interpolación de vecino más cercano y luego los valores de lluvia de las celdas de 0.05° contenidas por las celdas de 3B42V7 (0.25°) fueron promediados para estimar la lluvia de IMERG a 0.25° de resolución espacial. Asimismo para que la lluvia de los PPES sea comparable con la precipitación pluviométrica; la agregación diaria de los PPES fue realizada de 12:00 a 12:00 UTC para coincidir con la hora local (7:00 AM a 7:00 AM) de las mediciones pluviométricas en Perú.

Para la evaluación estadística de PPES en referencia a la lluvia observada se utilizaron dos grupos de estadísticos. En el primer grupo utilizamos las estadísticas de comparación por pares que evalúan el desempeño de los productos satelitales en la estimación de la cantidad de lluvia y está dado por los índices tradicionales (Tabla 3-3) como el coeficiente de correlación de Pearson (CC) que se utiliza para evaluar qué tan bien las estimaciones corresponden a los valores observados. El error medio absoluto (MAE) para conocer el error de estimación promedio en milímetros. El porcentaje de bias (PBIAS) se utiliza para medir la tendencia media (positivo o negativo) de los valores de la precipitación estimada por satélite con respecto a los valores de precipitación pluviométrica. Donde, PBIAS positivo (negativo) indica sobrestimación (subestimación).

Tabla 3-3: Estadísticas de comparación por pares con G = precipitación pluviométrica, Gm = media de la precipitación pluviométrica, S = precipitación estimada por satélite, Sm = media de la precipitación estimada por satélite, y N = número de pares de datos.

Nombre	Fórmula	Score perfecto
Coeficiente de correlación de Pearson	$CC = \frac{\sum(G - Gm)(S - Sm)}{\sqrt{\sum(G - Gm)^2} \sqrt{\sum(S - Sm)^2}}$	1
Error absoluto medio	$MAE = 1/N \times \sum (S - G) $	0
Porcentaje de bias	$PBIAS = 100 \times (\sum(S - G) / \sum G)$	0

El segundo grupo de estadísticas se basa en una tabla de contingencia para comparar las mediciones pluviométricas y estimaciones de precipitación por satélite (Tabla 3-4), donde A, B, C, y D representan el número de aciertos, falsas alarmas, pérdidas y de no eventos, respectivamente.

Las estadísticas de validación categóricas se resumen en la Tabla 3-5. La probabilidad de detección (POD) y Ratio de falsas alarmas (FAR) indican respectivamente qué fracción de los eventos observados se pronosticó correctamente y qué fracción de los eventos reportados por el satélite no ocurrió. Threat score (TS) es la fracción de evento de precipitación estimadas correctamente por el satélite. Las ecuaciones para calcular los índices antes mencionados y las explicaciones complementarias se pueden encontrar en el sitio web del International Precipitation Working Group (IPWG, <http://www.isac.cnr.it/~ipwg/validation.html>) y en Wilks, (2006).

En este estudio un umbral de 1,0 mm/d se utiliza para definir evento de lluvia o no-lluvia, la cual fue adoptada por Dai, (2006) para el estudio global de la precipitación diaria, también utilizado por Mantas et al., (2014) en la validación del TRMM en los andes del Perú.

Tabla 3-4: Comparación de mediciones de pluviómetros y estimaciones de por satélite

	Observado $\geq$ umbral	Observado $<$ umbral
Satélite $\geq$ umbral	A (acierto)	B (falsa alarma)
Satélite $<$ umbral	C (pérdida)	D (no evento)

Tabla 3-5: Estadísticos de validación categórica, donde A representan el número de aciertos, B (falsas alarmas), C (pérdidas) y D (negativos correctos)

Nombre	Fórmula	Score perfecto
Probabilidad de detección	$POD = A / (A + C)$	1
Ratio de falsa alarma	$FAR = B / (A + B)$	0
Threat score (Critical success index)	$TS = A / (A + B + C)$	1

### 3.4.2 Evaluación hidrológica de PPES

Para evaluar la utilidad de los PPES en el modelamiento hidrológico se ha planteado 2 escenarios de calibración y validación del modelo.

En el escenario 1, en la era de TMPA el modelo SWAT fue calibrado (2004-2010) utilizando los datos de precipitación observada (PO) y validado (2011-marzo 2014) para PO y 3B42 V7. Adicionalmente este modelo calibrado con PO es validado (abril 2014 – diciembre 2015) en la era de GPM para PO, 3B43V7 e IMERG.

En el escenario 2, en la era de TMPA el modelo SWAT fue calibrado (2004-2010) utilizando los datos de precipitación 3B42 V7 y validado (2011-marzo 2014) para 3B42 V7 y finalmente este modelo es validado (abril 2014 – diciembre 2015) en la era de GPM para 3B43 V7 e IMERG. Cabe señalar que de acuerdo a Tuo et al., (2016) se ha estimado la precipitación media areal para cada subcuenca y cada PPES para utilizar estos como entrada en SWAT.

Para evaluar el desempeño del modelo en la calibración y validación utilizamos tres índices estadísticos (NSE, PBIAS y MAE) y la valoración del desempeño del modelo SWAT se basa en el esquema de valoración de Moriasi et al., (2007). Así se tiene: modelo insatisfactorio (NSE  $<$  0.50, |PBIAS|  $>$  25%), modelo satisfactorio (NSE entre 0.50 – 0.65, |PBIAS| entre 15 – 25), modelo bueno (NSE: 0.65 – 0.75, |PBIAS|: 10 – 15) y modelo muy bueno (NSE  $>$  0.75, |PBIAS|  $<$  10). Por otro lado MAE es óptimo cuando el error es 0.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 Modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota

#### 4.1.1 Configuración y simulación inicial del modelo SWAT

##### 4.1.1.1 Configuración del modelo SWAT

La configuración del modelo hidrológico SWAT para la CRV tiene las siguientes características: a) el área total de la cuenca es de 9613.41 km<sup>2</sup>, b) la cuenca se ha discretizado en 53 sub-cuencas con un total de 1204 HRUs lo cual fue definida en base a la combinación única de un tipo particular del uso de suelo, suelo y pendiente, c) el rango de elevación varía entre 2124 y 6309 m s.n.m. con una media de 4193 m s.n.m. y una desviación estándar de 552 m.

Las características de la cuenca delimitada con respecto al tipo de suelo, uso de suelo y pendiente se resumen en la Figura 4-1 y Tabla 4-1.

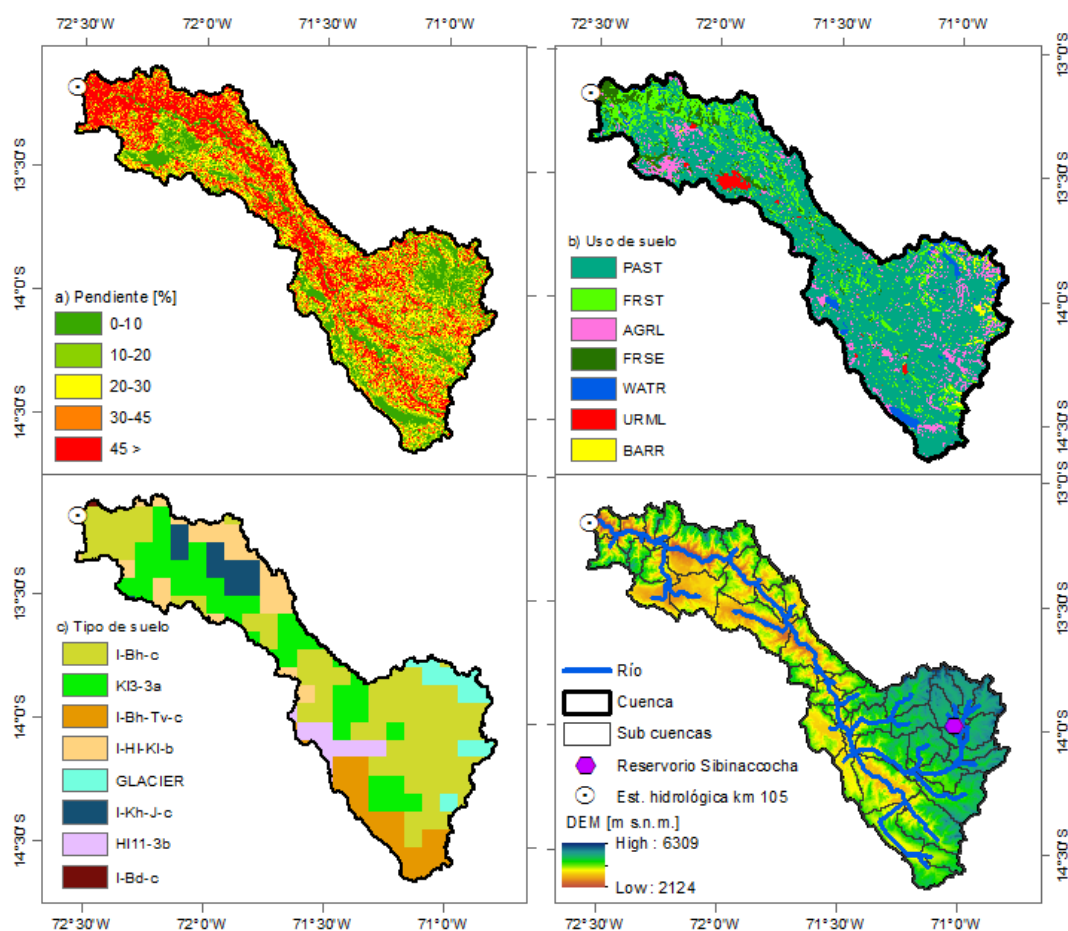


Figura 4-1: Distribución espacial de los parámetros discretizados de la VCR. Mapa de pendientes (a). Mapa de uso de suelo de acuerdo al producto Globeland30 (b). Mapa de tipo de suelo (c). Modelo digital de elevación, sub-cuencas y red de drenaje del modelo hidrológico SWAT (inferior derecha).

La caracterización del uso de suelo en base al producto ESA CCI-LC la CRV comprende pajonales (70.1%), Bosques y matorrales (13.5%), agricultura (8.1%), Bosques de hoja perenne (3.6%), Cuerpos de agua (3%), urbano (0.9%) y zonas áridas (0.8%). La distribución de tipos de suelo esta predominantemente dado por litosoles (67.2%), seguida por Kastanozems (23.3%) y Luvisoles (4.1%).

La clasificación de pendientes nos muestra que 25.4% del área de la cuenca presenta pendientes muy fuertes (>45%) mientras el resto del área se distribuye como sigue 15% en el rango 0-10%, 18.5% (10-20%), 19.4% (20-30%) y 21.7% (30-45%).

#### 4.1.1.2 Separación de flujo base

En consideración de las dificultades que existe en la medición del flujo base, en este estudio se utilizó la técnica automatizada de Arnold et al. (1995a) para separar el flujo base a partir de registros de descargas diarias del periodo 1964-1995. Este periodo fue considerado debido a que corresponde al periodo de descargas naturales y con registros completos; Así, este periodo no considera los efectos de la represa Sibinacocha para la estimación del flujo base.

Tabla 4-1: Características de la CRV reclasificado de acuerdo a la superposición y combinación única de un tipo particular del uso de suelo, tipo de suelos y pendientes con cobertura no menor al 5% en cada sub-cuenca.

Parámetro / Código	Descripción	Área [km <sup>2</sup> ]	% del área de la cuenca
Cuenca	Área de la cuenca del río Vilcanota	9613.41	100.0
Uso de suelo			
PAST	Pajonales	6736.62	70.1
FRST	Bosques y matorrales	1300.36	13.5
AGRL	Agricultura	775.88	8.1
FRSE	Bosques de hoja perenne	347.44	3.6
WATR	Cuerpos de agua	285.70	3.0
URML	Urbano	86.19	0.9
BARR	Árido	81.22	0.8
Tipo de suelo:			
I-Bh-c	Litosoles (50%) y Cambisoles húmicos (50%)	4021.68	41.8
KI3-3a	Kastanozems lúvico (40%), Gleysoles calcáricos (20%), Kastanozems cálcicos (20%), Gleysoles éutricos (10%) y Fluvisoles (10%)	2235.52	23.3
I-Bh-Tv-c	Litosoles (34%), Cambisoles húmicos (33%) y Andosoles vítricos (33%)	980.31	10.2
I-HI-KI-b	Litosoles (34%), Phaeozems lúvicos (33%) y Kastanozems lúvicos (33%)	954.99	9.9
GLACIER	Glaciar	520.70	5.4
I-Kh-J-c	Litosoles (34%), Fluvisoles (33%) y Kastanozems háplicos (33%)	490.81	5.1
HI11-3b	Luvisoles férricos (70%) y Acrisoles órticos (30%)	396.24	4.1
I-Bd-c	Litosoles (50%) y Cambisol dístrico (50%)	13.16	0.1
Pendiente (%):			
0-10		1444.37	15.0
10-20		1777.71	18.5
20-30		1862.97	19.4
30-45		2082.50	21.7
>45		2445.86	25.4

De acuerdo a la técnica se pasó el filtro tres veces sobre las descargas observadas y se encontró que la contribución del flujo base al flujo total en cada filtro fue Baseflow Fr1 (0.83), Baseflow Fr2 (0.73) y Baseflow Fr3 (0.66). De acuerdo a Arnold et al. (1995b) y seguida por Yesuf et al. (2016) el valor promedio de la fracción contribuida por el flujo base en el primer y segundo filtro fue considerado como el índice de flujo base (IFB). IFB (0.78) y la constante de recesión de flujo desde el acuífero superficial ( $\text{ALPHA\_BF}=0.0646$ ) fueron generados. Donde IFB nos indica que 78% (22%) del flujo total es contribuida por el flujo base (escorrentía superficial). En este estudio consideramos como referencia el IFB (0.78) para calibrar el modelo SWAT de tal manera que este sea capaz de reproducir muy bien la contribución de flujo base y la escorrentía superficial. Por el otro lado el valor de ALPHA\_BF generado fue establecido para las simulaciones del modelo.

#### 4.1.1.3 Simulación inicial del modelo

En base a la configuración y parametrización del modelo SWAT una simulación del modelo inicial fue llevada a cabo para el período de calibración 2004-2010 con cuatro de años (2000-2003) de periodo de calentamiento. La Figura 4-1 nos muestra que por defecto el modelo SWAT (descarga simulada) reproduce relativamente bien los patrones de las descargas observadas pero con pobre desempeño a paso diario ( $\text{NSE} = 0.26$ ), donde las descargas altas (bajas) fueron sobrestimadas (subestimadas). Por otro lado de acuerdo a PBIAS (-17.1%) el modelo SWAT subestima las descargas observadas. De acuerdo a los resultados iniciales debido al pobre desempeño del modelo fue necesario realizar la calibración del modelo para lograr una adecuada estimación de los parámetros y un mejor desempeño del modelo SWAT. Así, fueron considerados en el análisis de sensibilidad los parámetros que tienen influencia en el flujo superficial (escorrentía directa) y en el flujo base (agua en el subsuelo) y la evapotranspiración (Sección 4.1.2).

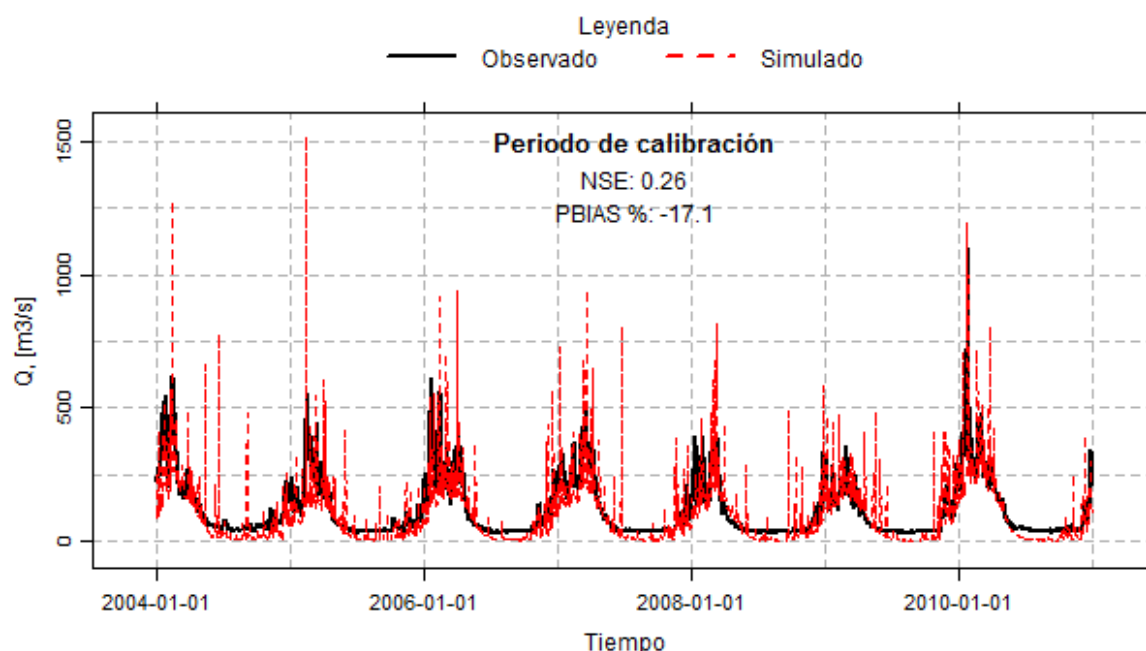


Figura 4-2: Comparación de hidrogramas de la descarga media diaria entre el observado y el simulado del modelo inicial de SWAT en el periodo de calibración (2004-2011)



## 4.1.2 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT

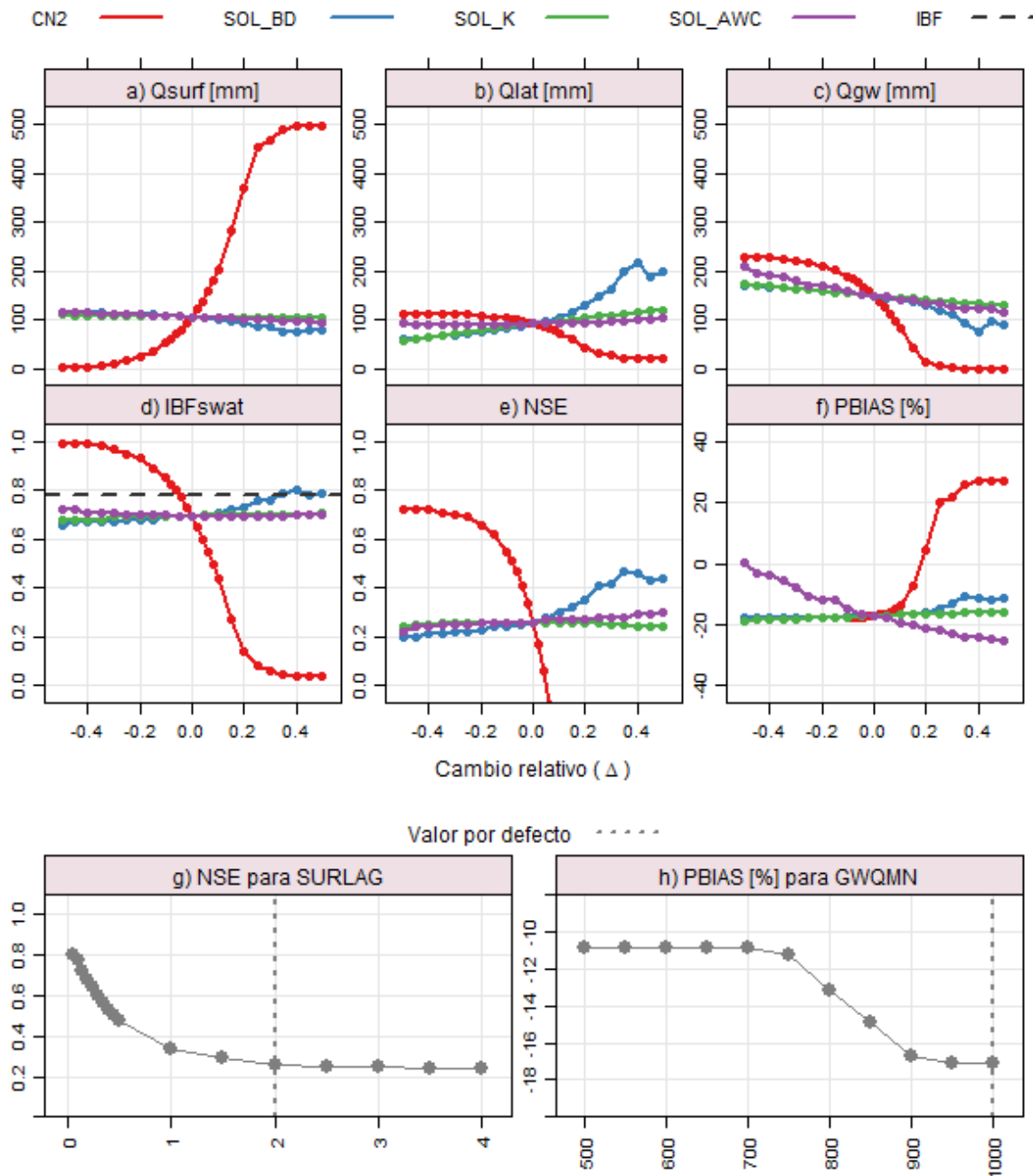
### 4.1.2.1 Análisis de sensibilidad de los parámetros

Mediante el Análisis de sensibilidad (AS) manual (Figura 4-3) hemos analizado los principales parámetros del modelo SWAT que tienen impacto en la cuantificación y la respuesta hidrológica de la contribución de flujos hacia al canal (río) desde los diferentes caminos que sigue el agua que llega al suelo por aporte de la precipitación.

Así, fue evaluado el impacto sobre la contribución media hacia el canal del flujo de escorrentía superficial ( $Q_{surf}$ ), el flujo lateral ( $Q_{lat}$ ) desde el perfil de suelo no saturado y el flujo del agua subterránea ( $Q_{gw} = Q_{gws} + Q_{gwd}$ ) la cual está dado por la contribución del flujo desde el acuífero superficial ( $Q_{gws}$ ) y el acuífero profundo ( $Q_{gwd}$ ). Asimismo, se ha evaluado la sensibilidad del índice de flujo base estimado por SWAT (IBF<sub>swat</sub>) considerando el IBF como referencia. Actualmente el IBF<sub>swat</sub> es calculado por el programa SWAT Check (<http://swat.tamu.edu/>) donde el IBF<sub>swat</sub> es estimada como la contribución de  $Q_{lat}$  y  $Q_{gws}$  considerando así que la recarga al acuífero profundo ( $Q_{gwd}$ ) se pierde del sistema (Neitsch et al. 2011). Sin embargo, Luo et al. (2012) han demostrado que agregando la contribución de  $Q_{gwd}$  hacia el canal en la conceptualización de SWAT se puede mejorar las subestimaciones de las descargas simuladas con respecto a los observados en el periodo de bajas descargas (estiaje) en las montañas de Tianshan (China). Es así que en base a la revisión del código fuente de SWAT2012 (liberado en setiembre del 2016, <http://swat.tamu.edu/>), encontramos que la contribución de  $Q_{gwd}$  hacia el canal ya es considerado en SWAT. Por lo que en este estudio, se estima el IBF<sub>swat</sub> como  $IBF_{swat} = [Q_{lat} + Q_{gw}] / [Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gw}]$ . De acuerdo a esta fórmula; consideramos como flujo base a la contribución hacia el canal de  $Q_{lat}$ ,  $Q_{gws}$  y  $Q_{gwd}$  el cual es congruente con la definición de flujo base dado por Price (2011), donde el flujo base es la porción de descarga que es retenido entre los eventos de precipitación y contribuyen a los canales por diferentes caminos (sub-superficiales).

#### **Parámetros que tienen mayor impacto sobre $Q_{surf}$**

De acuerdo a Arnold et al. (2012) el parámetro del número de curva (CN2) directamente impacta la escorrentía superficial y el cambio de CN2 altera todos los componentes del balance hidrológico el cual es congruente con nuestros resultados (Figura 4-3), donde apreciamos que uno de los parámetros muy sensibles que gobierna la cuantificación y la respuesta de la escorrentía superficial fue CN2. Así, la disminución (incremento) de los valores de CN2 conlleva a que se reduzca (incremente) el  $Q_{surf}$  e incremente (reduzca) más el  $Q_{gw}$  que  $Q_{lat}$ . Por lo que la reducción (incremento) de CN2 puede incrementar (reducir) considerablemente el IBF<sub>swat</sub> (Figura 4-3d). Asimismo se aprecia que cuando se reduce CN2, mejora el desempeño del modelo a expensas de la drástica reducción de  $Q_{surf}$  (NSE = 0.72 para  $Q_{surf} \approx 0$  mm). De aquí enfatizamos en este estudio que antes de la calibración del modelo SWAT es muy importante conocer si es o no es necesario el cambio de CN2 y en caso fuese necesario es importante estimar de hasta cuanto se debe reducir o incrementar los valores de CN2 de tal forma que el modelo cuantifique correctamente el IBF.



El valor por defecto del parámetro fue sustituido por un cierto valor

Figura 4-3: Análisis de sensibilidad de los parámetros del modelo SWAT que son variables por cada unidad de respuesta homogénea (HRU). Así se tiene el impacto de cada parámetro (CN2, SOL BD, SOL K y SOL AWC) sobre la cuantificación de la escorrentía superficial ( $Q_{surf}$ ) (a), el flujo lateral ( $Q_{lat}$ ) (b) y el flujo de agua subterránea ( $Q_{gw}$ ) (c). Impacto de cada parámetro sobre el índice de flujo base (d). Impacto de cada parámetro en el desempeño del modelo SWAT dados por el estadístico de Nash-Sutcliffe (NSE) (e) y el porcentaje de bias (PBIAS) (f). Por otro lado en la figura “g” y “h” se muestra el impacto sobre el desempeño del modelo de los parámetros que son constantes en los HRUs. Así se tiene impacto de SURLAG (g) sobre el NSE y GWQMN (h) sobre el PBIAS.

En nuestro caso de estudio si nos enfocamos en el desempeño del modelo una ligera reducción de los valores de CN2 conlleva a que se sobrestime el IBF de referencia. La restricción en la reducción de CN2 nos ha llevado a identificar otro parámetro que tenga influencia sobre la respuesta de  $Q_{surf}$  sin

afectar la cuantificación de la contribución de  $Q_{surf}$ . Tal parámetro fue SURLAG, que es el coeficiente de retraso de la  $Q_{surf}$  donde el retraso en la liberación de la  $Q_{surf}$  suaviza el hidrograma de descargas simuladas en el río (Neitsch et al. 2011). Su impacto de este parámetro se refleja en la mejora del desempeño del modelo cuando se reduce SURLAG (Figura 4-3g). Sin embargo enfatizamos que valores muy bajos de SURLAG pueden suavizar demasiado el hidrograma lo cual conlleva a la subestimación de eventos de altas descargas. Es así que en este estudio en referencia a los eventos extremos registrados entre enero y marzo del 2010 (Lavado-Casimiro et al. 2010; Huggel et al. 2015), identificamos que el valor de SURLAG debe ser mayor a 0.2 para que el modelo tenga la capacidad de reproducir las descargas altas.

### **Parámetros del suelo que tienen impacto sobre $Q_{surf}$ , $Q_{lat}$ y $Q_{gw}$**

Con el propósito de entender mejor el modelo fue evaluado los principales parámetros de suelo que son más influyentes en la cuantificación y respuesta de  $Q_{surf}$ ,  $Q_{lat}$  y  $Q_{gw}$ . Los parámetros de suelo considerados en el análisis fueron la densidad aparente húmeda (SOL\_BD), la conductividad hidráulica a saturación (SOL\_K) y la capacidad de agua disponible (SOL\_AWC). De estos tres parámetros SOL\_BD ha sido la más influyente en la cuantificación y la respuesta hidrológica como se aprecia en la Figura 4-3 donde el incremento de SOL\_BD conlleva al aumento de IBFswat (Figura 5d) lo cual es debido a mayor aumento en  $Q_{lat}$  (Figura 4-3b) y la ligera reducción de  $Q_{surf}$  (Figura 4-3a) y el  $Q_{gw}$  (Figura 5c). Asimismo en el caso de este estudio encontramos que el insatisfactorio desempeño del modelo inicial (NSE = 0.26 para  $\Delta = 0$ , Figura 5e) se debe al ligero desfase que existe entre los hidrogramas simulados y observados (Figura 4-2). Este desfase está vinculado con la respuesta retardada del flujo lateral ya que de acuerdo a los datos de suelo los valores iniciales de SOL\_BD se encuentran en el rango de 1-1.3 gr/cm<sup>3</sup> los cuales corresponden a suelos muy pesados (arcillosos) y este tipo de suelos son caracterizados por presentar mayor capacidad de retención de agua lo cual ocasiona una respuesta retardada en el hidrograma de descargas. Mientras tanto la mejora del desempeño del modelo cuando es incrementado SOL\_BD (p.e. NSE = 0.46 para  $\Delta = 0.4$ ) está relacionado con el incremento de la respuesta del flujo lateral en suelos livianos (SOL\_BD entre 1.4 – 1.82 gr/cm<sup>3</sup> para  $\Delta = 0.4$ ) donde el hidrograma simulado empata mejor con el hidrograma observado. En consecuencia para mejorar el desempeño del modelo se ha propuesto la calibración de SOL\_BD incrementando este en el rango de 0.2 - 0.5 con el cual se obtuvo de que IBFswat fuese próximo al IBF (0.78) de referencia. En consecuencia el incremento de SOL\_BD ha implicado que no fueran calibrados los valores de CN2.

Por otro lado SOL\_AWC es el parámetro más influyente en el balance hidrológico (Figura 4-3f) debido a que el incremento (reducción) de SOL\_AWC está vinculado con mayor (menor) evapotranspiración desde el perfil de suelo por lo que disminuye (aumenta) el  $Q_{gw}$  (Figura 4-3c). Por consiguiente en este estudio para que SWAT mejore la subestimación (PBIAS = -17.1%) se tuvo que reducir relativamente los valores de SOL\_AWC en el rango de -0.5 a -0.2.

Respecto al parámetro SOL\_K se encontró que el incremento de SOL\_K tiene influencia sobre el incremento de  $Q_{lat}$  lo cual reduce  $Q_{gw}$  sin embargo no altera el IBFswat y tampoco mejora el NSE y PBIAS; por lo que este parámetro no fue considerado en la calibración del modelo.

### Parámetros de los acuíferos que tienen impacto sobre la respuesta de $Q_{gw}$ ( $Q_{gws}$ y $Q_{gwd}$ )

Las respuestas de  $Q_{surf}$  y  $Q_{lat}$  son más rápidas que la respuesta de  $Q_{gw}$ , por lo que tienen mayor influencia en el hidrograma del periodo de altas descargas. Es por ello que para mejorar la subestimación de las descargas observados en el periodo de bajas descargas (Figura 4-2) en este estudio intentamos comprender y mejorar la respuesta de la contribución de  $Q_{gw}$  desde el acuífero superficial ( $Q_{gws}$ ) y profundo ( $Q_{gwd}$ ).

Así, identificamos y reportamos los principales parámetros de los acuíferos que tuvieron influencia en la respuesta hidrológica desde el acuífero superficial como el parámetro GWQMN (umbral de profundidad del agua necesaria en el acuífero superficial para que ocurra el flujo de retorno) y el factor ALPHA\_BF (constante de recesión de flujo base). Desde el acuífero profundo el parámetro RCHRG\_DP (fracción de recarga hacia el acuífero profundo) y ALPHA\_BF\_D (constante de recesión de flujo base del acuífero profundo).

En nuestro caso de este estudio en condiciones iniciales del modelo la profundidad inicial del agua en el acuífero superficial (SHALLST) así como el valor de GWQMN fueron ambos de 1000 mm. Este valor implica que en condiciones iniciales en el acuífero superficial no se tenga reserva de agua y la contribución de  $Q_{gws}$  solo sea dependiente de la recarga de agua por la precipitación en el periodo húmedo y cuando la altura de agua en el acuífero superficial supere el umbral ( $GWQMN = 1000\text{mm}$ ). Es por ello que para GWQMN (1000 mm) se tiene las altas subestimaciones (Figura 4-3h). Sin embargo a medida que disminuye los valores de GWQMN se reduce la subestimación (Figura 4-3h). Esta reducción está relacionada con el aumento de contribución de  $Q_{gws}$  ya que cuando se reduce el valor de GWQMN se tiene cierta cantidad de agua disponible en el acuífero superficial el cual se mantiene en equilibrio para valores de GWQMN menores a 700 mm y por consiguiente para la calibración se propuso un rango de búsqueda entre 600 a 700 mm. La determinación de este umbral es muy importante para que exista  $Q_{gws}$ . Por otro lado la respuesta desde el acuífero superficial hacia el canal está gobernada por el factor ALPHA\_BF (0.0646) el cual fue estimado en base a datos de descarga observado (sección 4.1.1.2). De acuerdo a Neitsch et al. (2011) para  $ALPHA\_BF=0.0646$  el tiempo de respuesta promedio desde el acuífero superficial ( $2.3/ALPHA\_BF$ ) es de 36 días el cual es muy corto para mantener las descargas en el largo periodo seco definido por la alta estacionalidad de la precipitación en la CRV. Por ello la contribución de  $Q_{gwd}$  hacia el canal es muy importante debido a que la respuesta desde el acuífero profundo es más lenta que del acuífero superficial. El factor ALPHA\_BF\_D (0.01 por defecto) gobierna la respuesta desde el acuífero profundo al canal y la cuantificación de  $Q_{gwd}$  está regulada por el parámetro RCHRG\_DP (0.05 por defecto) lo cual quiere decir que del total de agua que recarga el acuífero 5% (95%) recarga el acuífero profundo (acuífero superficial). Por lo que para mejorar la contribución de  $Q_{gwd}$  y con el propósito de mejorar las descargas simuladas en el periodo de bajas descargas, consideramos incrementar el valor de RCHRG\_DP entre 0.3 a 0.5.

### Discusión general de AS

De acuerdo a los análisis de los resultados de esta sección en el caso de este estudio el parámetro CN2 tiene fuerte influencia en la cuantificación y la respuesta de  $Q_{surf}$ , donde el incremento (disminución) de los valores de CN2 puede incrementar (reducir) significativamente la contribución

de escorrentía superficial (flujo base). Se demuestra que la reducción de CN2 mejora el desempeño del modelo a expensas de la pérdida de contribución de Qsurf y en efecto de la pérdida de capacidad del modelo SWAT en la caracterización de la contribución de escorrentía superficial y el flujo base. Por lo que el parámetro CN2 en este caso de estudio es un caso de equifinalidad ya que su inclusión en la calibración automática llevaría a que se obtengan buenos desempeños del modelo pero a expensas de la pérdida del sentido físico del modelo. Frente a ello el parámetro SURLAG fue muy importante para suavizar el hidrograma y mejorar el desempeño del modelo sin afectar la contribución de Qsurf.

Por otro lado los parámetros de suelo que fueron más sensibles son SOL\_BD y SOL\_AWC. Donde estos parámetros han presentado mayor influencia sobre la cuantificación y la respuesta de Qlat. Asimismo notamos que el impacto de los parámetros de suelo en la cuantificación de Qlat afecta más la cuantificación de Qgw que Qsurf. Finalmente fue muy importante identificar el umbral del parámetro GWQMN para que exista tanto Qgws como Qgwd y fue necesaria incrementar el valor de RCHRG\_DP para redistribuir el agua en el acuífero superficial y profundo con el propósito de mejorar las descargas simuladas en el periodo de bajas descargas desde el acuífero profundo.

#### 4.1.2.2 Análisis de incertidumbre y evaluación del desempeño del modelo SWAT en la calibración y validación

Fue llevado a cabo el análisis de incertidumbre tanto en la calibración y validación del modelo SWAT utilizando el SUFI-2 en base a los parámetros más sensibles identificados en el análisis de sensibilidad. Así los valores óptimos de los parámetros para el mejor modelo simulado se presentan en la Tabla 4-2.

Tabla 4-2: Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al código del parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro fue: sustituido por un cierto valor del rango (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo).

Orden	Código del parámetro	Rango	Valor ajustado
1	v__SURLAG.hru	[0.2, 0.5]	0.20
2	r__SOL_BD().sol	[0.2, 0.5]	0.34
3	r__SOL_AWC().sol	[-0.5, -0.2]	-0.33
4	v__GWQMN.gw	[600, 700]	681.30
5	v__RCHRG_DP.gw	[0.3, 0.5]	0.36

#### Simulación a paso de tiempo diario

En la simulación a paso de tiempo diario se puede observar una banda de incertidumbre muy estrecha dado por el intervalo de predicción al 95% (95PPU) (ver Figura 4-4) y de acuerdo las medidas de incertidumbre el P-factor indica que la banda incluye el 57% (63%) de las observaciones diarias en el periodo de calibración (validación). Mientras R-factor lo cual representa el espesor medio de la banda 95PPU dividido por la desviación estándar de los datos observados resultó de 0.33 y 0.34 para el periodo de calibración y validación respectivamente. Dado que el valor de P-factor (R-factor) de 1 (0) es deseado. De acuerdo a Chaibou Begou et al., (2016) en este estudio consideramos

que valores de R-factor ( $< 1$ ) y de P-factor ( $> 0.5$ ) deben ser adecuados debido a la incertidumbre asociada en los datos utilizados en una cuenca como CRV con escasa disponibilidad de datos. Así, en este estudio se considera que el modelo SWAT es adecuado con bajo grado de incertidumbre dado por la estrecha banda (R-factor  $< 0.35$ ) de 95PPU que contiene más del 50% de observaciones diarias. La fortaleza de los resultados del análisis de incertidumbre en la calibración y validación fueron juzgadas también por métricas cuantitativas de desempeño (NSE y PBIAS) comparando las descargas simuladas respecto a las observadas como se muestra en la Figura 4-4. Donde se aprecia que en general la descarga media diaria simulada caracteriza muy bien los patrones de la descarga observada con un desempeño bueno en la etapa de calibración (NSE = 0.73) y muy bueno en validación (NSE = 0.79). Asimismo respecto al PBIAS el modelo SWAT nos muestra una ligera sobrestimación de la descarga media diaria observada en la etapa de calibración (PBIAS = 0.8%) y ligera subestimación en validación (PBIAS = -2.2%), lo cual nos indica que el modelo tiene un desempeño muy bueno según el esquema de clasificación de Moriasi et al., (2007) mostrada en la Tabla 3-2.

### **Simulación a paso de tiempo mensual**

En la simulación a paso de tiempo mensual se puede observar que las medidas de incertidumbre mejoran (Figura 4-4). Así de acuerdo a P-factor la banda de 95PPU contiene 74% (80%) de las observaciones mensuales con una estrecha banda de incertidumbre dado por R-factor de 0.3 (0.29) en la calibración (validación) del modelo. Los valores bajos de R-factor ( $< 0.3$ ) y altos de P-factor ( $> 0.7$ ) nos confirman que el modelo SWAT puede caracterizar el hidrograma observado a paso mensual con bajo grado de incertidumbre como se muestra por la estrecha banda de 95PPU (Figura 6). En general las medidas incertidumbre encontrados en este estudio son relativamente buenos en comparación a otros estudios que han encontrado similares valores de P-factor pero a expensas de mayores valores de R-factor (próximos a 1) caracterizados por bandas anchas de 95PPU (p.e Schuol et al., (2008); Khoi and Thom, (2015); Yesuf et al., (2016); Smarzyńska and Miatkowski, (2016); Li et al., (2016) y Khoi and Thom, (2015)).

Por otro lado las métricas de desempeño a paso mensual mejoran respecto a los obtenidos en la simulación diaria. Así la Figura 4-4 nos muestra la evaluación de descargas medias mensuales en el periodo de calibración (NSE=0.95, PBIAS = 0.8%) y validación (NSE=0.95, PBIAS = -2.4%) y de acuerdo Moriasi et al., (2007) se puede catalogar que el desempeño del modelo SWAT fue muy bueno por presentar valores de NSE  $> 0.75$  y PBIAS  $< 10\%$ .



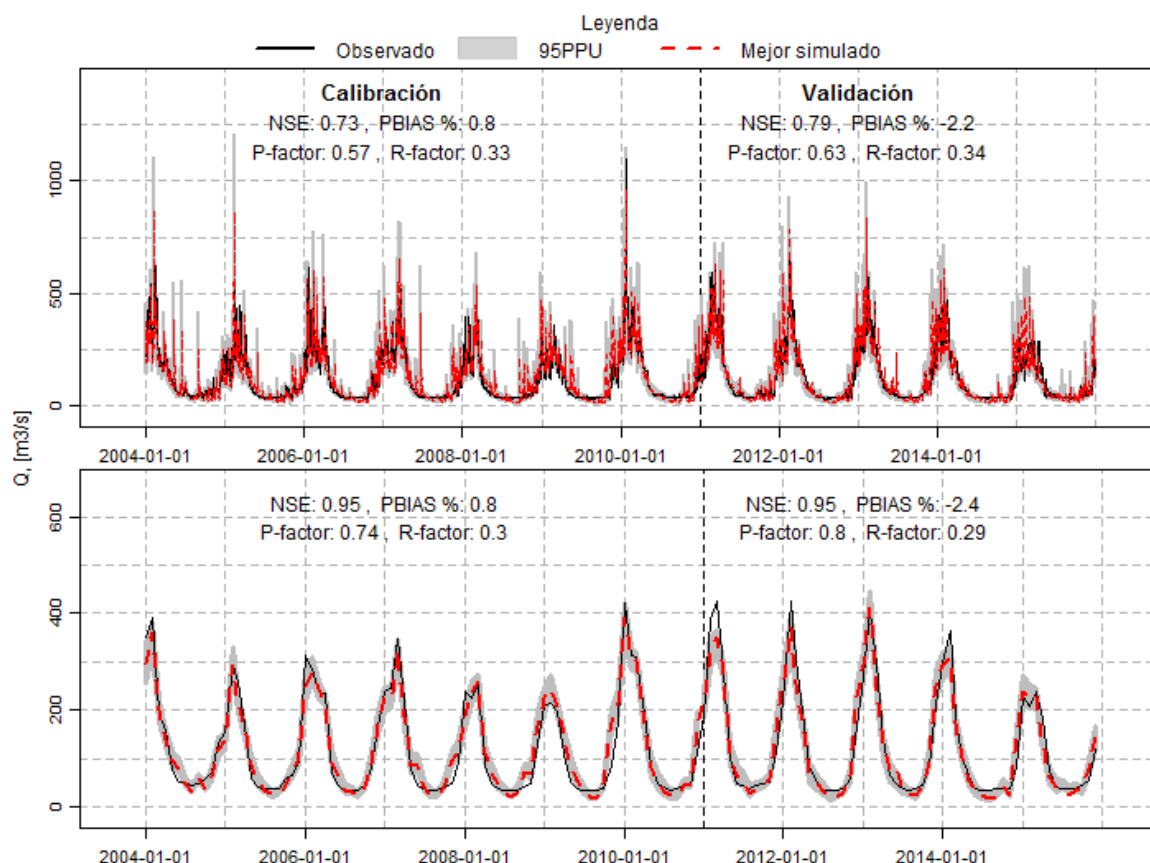


Figura 4-4: Arriba (Abajo) se muestra los hidrogramas de descarga media diaria (mensual) tanto observada como el mejor simulado y su respectivo banda de incertidumbre dado por el intervalo de predicción al 95% [95PPU] para el periodo de calibración y validación

### Verificación de flujo base y escorrentía superficial

En este estudio verificamos si el modelo reproduce bien la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en referencia al IBF (0.78) estimado en base a los datos observados de acuerdo a la técnica de separación de flujo base automatizado (Arnold et al. 1995a) donde la contribución de flujo base (escorrentía superficial) al flujo total fue de 78% (22%). Para el cual en la Tabla 4-3 se muestra el balance de masa anual del rendimiento hídrico (WYLD) de la cuenca que es estimado en base a los valores anuales medios de los diferentes componentes hidrológicos que son calculados por el modelo SWAT. Así podemos apreciar que el índice de flujo base estimado por SWAT (IBFswat) en condiciones iniciales del modelo sin calibrar fue de 0.69 con el cual fue subestimado en 9.1% el IBF (0.78) de referencia. Sin embargo se verifica que esta subestimación fue mejorada en el periodo de calibración (0%) y con una ligera sobreestimación en el periodo de validación (3%). Esta mejora en el IBFswat con respecto a IBF de referencia se debe a la reducción de la contribución de escorrentía superficial ( $Q_{surf}$ ) y al aumento de la contribución del flujo base (FB). Donde también es muy notable la redistribución en los componentes del flujo base con respecto al modelo inicial. Así se tiene que el flujo lateral ( $Q_{lat}$ ) en general ha aumentado, el Flujo de retorno desde el acuífero superficial ( $Q_{gws}$ ) ha disminuido y el flujo de retorno desde el acuífero profundo ( $Q_{gwd}$ ) ha aumentado. Estos cambios están relacionados con el cambio de los parámetros iniciales en la etapa de calibración los cuales fueron discutidos en la sección (4.2.3).

Tabla 4-3: Balance de masa anual del rendimiento hídrico de la cuenca. IBF es el índice de base flujo de referencia estimado de acuerdo a la técnica de separación de flujo base automatizado (Arnold et al. 1995a) (ver sección 4.1.2). IBFswat es el índice de base flujo estimado por el modelo SWAT.

balance de masa anual	Sin calibración	Calibración	Validación
	2004-2010	2004-2010	2011-2015
Rendimiento en la salida de la cuenca			
Rendimiento hídrico (WYLD=Qsurf+Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	321.05	389.76	395.03
Contribución de escorrentía superficial (Qsurf) [mm]	99.86	84.92	74.55
Contribución de flujo base (FB=Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	221.19	304.84	320.48
Flujo Lateral (Qlat) [mm]	87.17	158.46	164.08
Flujo de retorno desde el acuífero superficial (Qgws) [mm]	126.13	93.88	100.22
Flujo de retorno desde el acuífero profundo (Qgwd) [mm]	7.89	52.5	56.18
Verificaciones			
IBF de referencia	0.78	0.78	0.78
IBFswat = $[Qlat + Qgws + Qgwd] / [Qsurf + Qlat + Qgws + Qgwd]$	0.69	0.78	0.81
Porcentaje de bias de IBFswat respecto a IBF de referencia [%]	-9.00	0.00	3.00

De acuerdo a las medidas de incertidumbre y desempeño el modelo SWAT tuvo muy buen desempeño tanto a paso diario y mensual. Asimismo se verificó que SWAT fue capaz de caracterizar muy bien la contribución tanto de la escorrentía superficial y el flujo base. De esta manera demostramos que con el enfoque seguido en este estudio es posible la aplicación del modelo SWAT en el modelamiento hidrológico de tal manera que este tenga sentido real. Así el modelo SWAT puede ser utilizado para otros estudios hidrológicos en la CRV.

#### 4.1.3 Balance hídrico de la cuenca

Con el fin de hacer frente a los problemas de gestión del agua, es muy importante el análisis y la cuantificación de los diferentes elementos de los procesos hidrológicos que ocurren dentro de la cuenca. El modelo SWAT caracteriza los diferentes procesos; siendo la precipitación, la escorrentía superficial, el flujo base (el flujo lateral más el flujo de retorno desde los acuíferos) y la evapotranspiración los elementos más importantes del balance hídrico. Así, en este estudio para comprender mejor los diferentes procesos que ocurren dentro de la cuenca del río Vilcanota; se ha caracterizado los diferentes componentes del balance hídrico en base al modelo SWAT calibrado.

Así, los valores del promedio anual para el periodo 2004-2015 se muestran en la Tabla 4-4. Donde podemos apreciar que el mayor aporte de agua al sistema está dado por la precipitación (808.2 mm). 52% de la precipitación se pierde del sistema hacia la atmósfera por la evapotranspiración real (ET = 419.7 mm) y por otro lado el 48% del aporte total al sistema (TAS) es el rendimiento hídrico de la cuenca (WYLD = 394.48 mm). De acuerdo a IBFswat (0.79) la contribución de flujo base (FB=312.61 mm) a WYLD fue de 79%. Mientras tanto la contribución de escorrentía superficial (81.87 mm) a WYLD fue de 21%. La mayor contribución del flujo base (FB = 312.61 mm) está dado por el flujo lateral (Qlat = 161.73 mm, 51.7%), seguido por el flujo de retorno desde el acuífero superficial (Qgws = 96.73 mm, 30.9%) y el flujo de retorno desde el acuífero profundo (Qgwd = 54.15 mm, 17.4%). Adicionalmente para el periodo 2004-2015 el porcentaje de bias de IBFswat en referencia a IBF es de 1% lo cual nos demuestra que el modelo tiene la capacidad de caracterizar muy bien la contribución

de la escorrentía superficial ( $Q_{sur}$ ) y el flujo base (FB). Es así que para caracterizar el potencial del rendimiento hídrico de la cuenca en la Figura 4-5 se muestra la caracterización espacial del rendimiento hídrico promedio anual (periodo 2004-2015) y sus componentes en porcentaje de contribución de la escorrentía superficial y el flujo base. Donde se puede apreciar que las subcuencas ubicadas a la salida de la cuenca tienen rendimientos más altos (1400 mm/año) debido que esta parte de la cuenca experimenta las altas tasas de precipitación por encontrarse próximo a la Amazonía peruana. Mientras tanto el resto de las cuencas ubicadas en los Andes presentan bajos rendimientos ( $< 600$  mm/año). La mayor contribución al rendimiento hídrico está dado por el flujo base donde la mayor cantidad de HRUs (50% de 1204) contribuyen en el rango de 72 a 88 % (dados por el percentil 25 y 75%). Por otro lado 50% de HRUs tienen una contribución en el rango de 11.3 a 27.8%. El mapa de rendimiento hídrico será de utilidad práctica para determinar las áreas potenciales para el aprovechamiento hídrico y los mapas de contribución de escorrentía superficial y el flujo base serán de utilidad para las prácticas de conservación de suelos en áreas de mayor contribución de escorrentía superficial con el objetivo de reducir la erosión del suelo e incrementar el

### **Flujo base**

La evolución temporal promedio de los principales procesos hidrológicos que ocurre en la cuenca se muestra en la Figura 4-6, donde se aprecia la evolución temporal media diaria de la cuenca como la precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial, contribución de flujo base y el parámetro del número de curva.

Por otro lado en la Figura 4-7 se muestra la distribución espacial del parámetro número de curva (CN2) para eventos extremos definido como la media de los valores de CN2 mayores al percentil 95% del periodo 2000-2015 lo cual será de utilidad práctica para la estimación de eventos extremos de inundación en base al método del número de curva para el dimensionamiento de infraestructuras hidráulicas.

Tabla 4-4: Promedio anual del balance hídrico (periodo 2004 – 2015) de la cuenca del río Vilcanota

Componentes del balance hídrico anual	Periodo 2004-2015
<b>Aporte al sistema</b>	
Total aporte al sistema (TAS) [mm]	814.24
Precipitación (R) [mm]	808.20
Nieve [mm]	6.10
Derretimiento de la nieve [mm]	6.04
<b>Pérdida del sistema hacia la atmósfera</b>	
Pérdida total hacia la atmósfera (ET_total) [mm]	419.76
Sublimación	0.06
Evapotranspiración real (ET) [mm]	419.70
<b>Rendimiento en la salida de la cuenca</b>	
Rendimiento hídrico (WYLD=Qsurf+Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	394.48
Contribución de escorrentía superficial (Qsurf) [mm]	81.87
Contribución de flujo base (FB=Qlat+Qgws+Qgwd) [mm]	312.61
Flujo Lateral (Qlat) [mm]	161.73
Flujo de retorno desde el acuífero superficial (Qgws) [mm]	96.73
Flujo de retorno desde el acuífero profundo (Qgwd) [mm]	54.15
<b>Verificaciones</b>	
IBF de referencia	0.78
$IBF_{swat} = [Q_{lat} + Q_{gws} + Q_{gwd}] / [Q_{surf} + Q_{lat} + Q_{gws} + Q_{gwd}]$	0.79
Porcentaje de bias de IBF <sub>swat</sub> respecto a IBF de referencia [%]	1.00
ET/R	0.52
WYLD/TAS	0.48

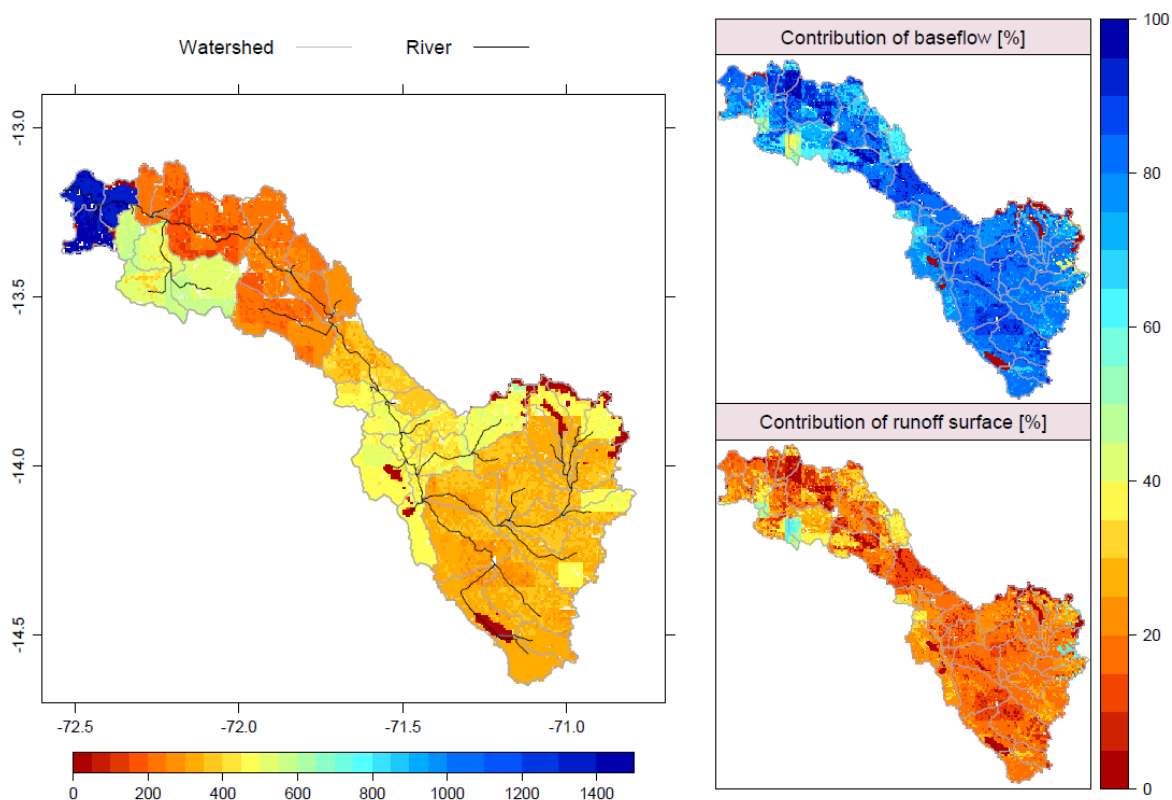


Figura 4-5: Distribución espacial a nivel de HRUs de: rendimiento hídrico (WYLD en mm) (Izquierda), contribución de flujo base (derecha superior) y contribución de la escorrentía superficial (derecha inferior)

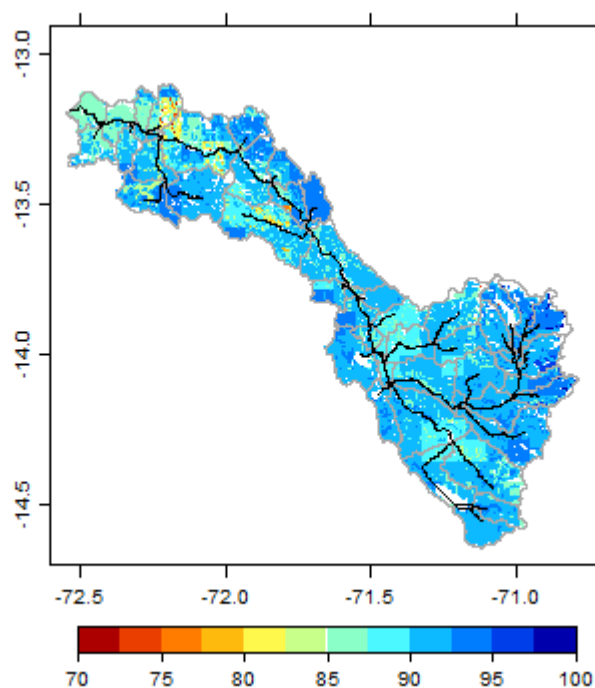


Figura 4-6: Distribución espacial del parámetro número de curva (CN2) para eventos extremos definido como la media de los valores de CN2 mayores al percentil 95% del periodo 2000-2015 para cada HRU.



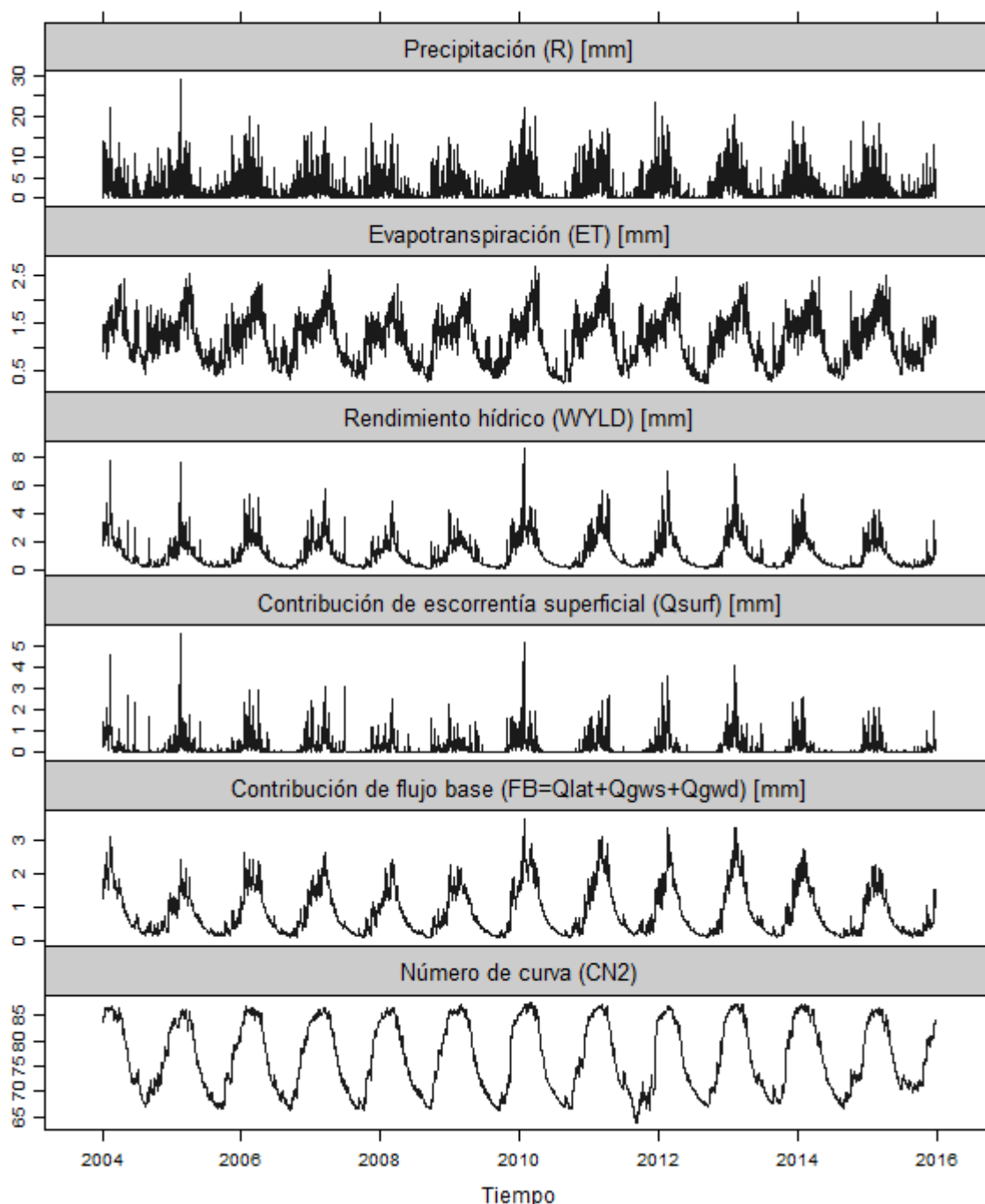


Figura 4-7: Evolución temporal promedio diario para la cuenca de precipitación, evapotranspiración, rendimiento hídrico, contribución de la escorrentía superficial, contribución de flujo base y el parámetro del número de curva.

## 4.2 Evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico

### 4.2.1 Evaluación estadística de PPES

La evaluación de PPES en referencia a la precipitación observada para dos periodos definidos por la era de TMPA y GPM con el propósito de comparar el desempeño del producto 3B42V7 en la era TMPA y GPM, así como el desempeño de 3B42V7 e IMERG en la era de GPM. Así, la Figura 4-8

muestra los gráficos de dispersión y proporciona una comparación cuantitativa de los valores diarios de precipitación estimados por los productos de satélite versus las correspondientes observaciones de los pluviómetros para todo el conjunto de datos de la era TMPA y GPM sobre la cuenca del río Vilcanota. Donde se aprecia que el producto 3B42V7 tiene correspondencias similares con los datos observados tanto en la era de TMPA y GPM de acuerdo a los valores de CC. Sin embargo de acuerdo a PBIAS el producto 3B42V7 sobrestima la precipitación observada en ambas eras; siendo la sobrestimación mayor en la era de GPM (PBIAS: 17.21%) que TMPA (PBIAS: 11.14%). Por otro lado en la era de GPM encontramos que el producto IMERG supera notablemente a 3B42V7. Así se tiene que de acuerdo a CC, IMERG (0.56) tiene mejor correspondencia con los datos observados que 3B42V7 (0.47). De acuerdo a MAE, IMERG (1.74 mm/d) presenta reducción consistente de los errores absolutos en referencia a 3B42V7 (2.06 mm/d) y según el PBIAS es remarcable que IMERG (-0.47%) ha corregido las sobrestimaciones de 3B42V7 (17.21%). Estos resultados muestran en términos cuantitativos que el producto IMERG es relativamente mejor que 3B42V7.

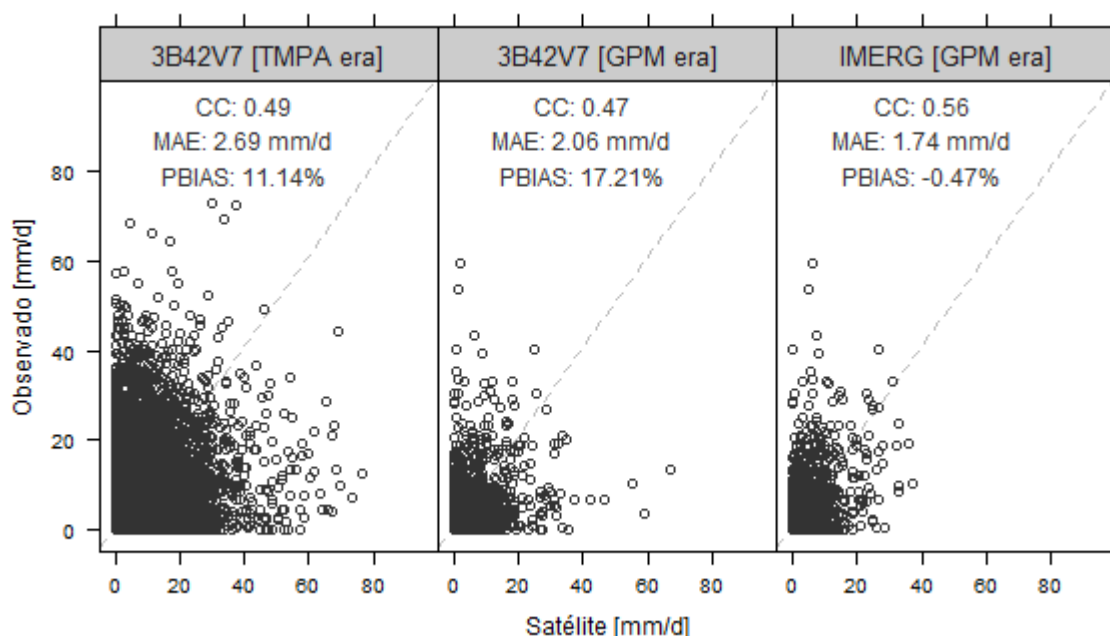


Figura 4-8: Dispersión de los valores diarios de precipitación de los diferentes productos de precipitación estimado por satélite versus sus correspondientes valores observados para todo el conjunto de datos de las celdas que contienen al menos una estación pluviométrica para la era de TMPA (periodo enero 2000 – Marzo 2014) y la era de GPM (Abril 2014 – diciembre 2015). La línea discontinua oblicua de color gris representa la relación 1:1.

La Figura 4.9 muestra los estadísticos categóricos que evalúan las capacidades de detección de lluvia de IMERG y 3B42V7 en referencia a los datos de lluvia observada por los pluviómetros tanto en la era de TMPA y GPM. En esta figura en general ambos productos tienen similares habilidades (POD, FAR y TS) en la caracterización de eventos de lluvia o no-lluvia definidos por el umbral de  $PO > 0.1$  mm, pero sus habilidades de ambos productos se deterioran a medida que aumenta el umbral. La evaluación de estos estadísticos en ambas eras nos indica que según el POD el producto 3B42V7 tenía mejor capacidad de detección de altos eventos ( $> 8$  mm/d) en la era de TMPA que GPM, mientras las falsas alarmas (FAR) son similares en ambas eras y en consecuencia de acuerdo a TS la fracción de eventos que fueron correctamente detectados por 3B42V7 fue ligeramente mejor en la

era TMPA que GPM. Por otro lado la comparación en la era de GPM entre 3B42V7 e IMERG nos indica que IMERG tiene mejor POD para eventos muy altos (> 16 mm/d), valores menores de FAR y valores de TS ligeramente mayores que 3B42V7.

En consecuencia las habilidades de detección de eventos de precipitación por 3B42V7 fue mejor en la era de TMPA que en la era de GPM y por otro lado en la era de GPM el producto IMERG es mejor que 3B42V7 en cuanto a la detección de eventos.

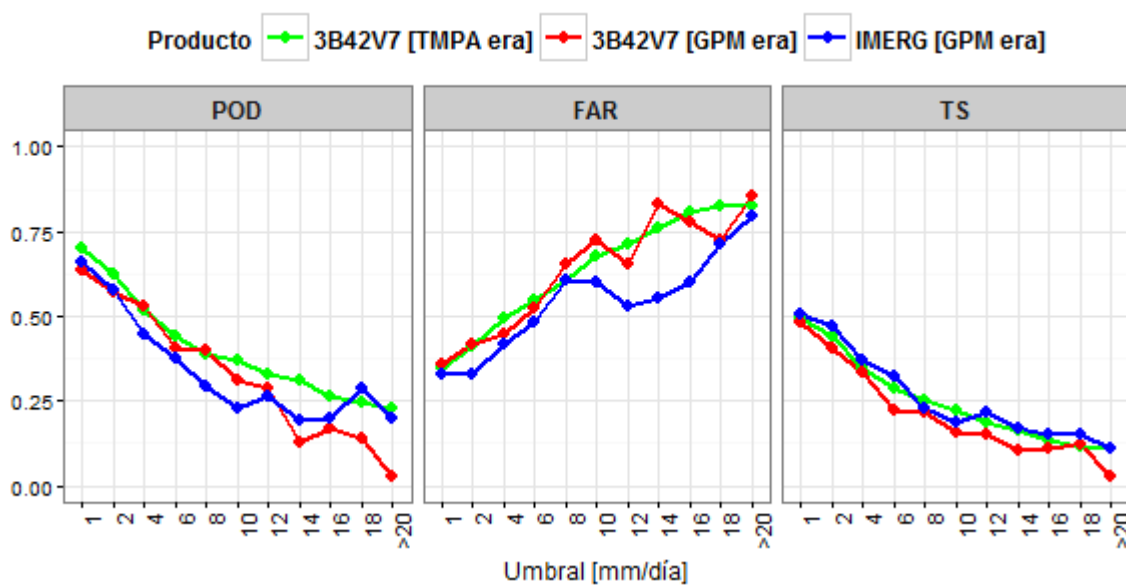


Figura 4-9: Métricas de contingencia de probabilidad de detección (POD), ratios de falsa alarma (FAR) y Threat Score (TS) para la precipitación en la cuenca del río Vilcanota para la era de TMPA (periodo enero 2000 – Marzo 2014) y la era de GPM (Abril 2014 – diciembre 2015)

También analizamos la distribución de probabilidad de la ocurrencia de las diferentes tasas de precipitación lo cual proporciona una idea de las características del error en función a la intensidad de la precipitación y el potencial efecto del error en aplicaciones hidrológicas. Así, la Figura 4-10 muestra las funciones de densidad de probabilidad (PDF) según la probabilidad de ocurrencia de la precipitación para diferentes clases de intensidades de precipitación. De acuerdo a esta figura los resultados obtenidos nos indican que en ambas eras (TMPA e GPM) los dos productos (3B42V7 e IMERG) caracterizan de manera similar la gama del porcentaje de eventos observados en cada clase de intensidad. De aquí que ambos productos son catalogados útiles para las aplicaciones hidrológicas en la cuenca del río Vilcanota. Sin embargo es muy importante remarcar que a pesar de que ambos productos reproducen muy bien el porcentaje de eventos observados (Figura 4-10) en cada clase de intensidad; estos eventos no necesariamente se corresponden en el tiempo como se muestra por los bajos valores de correlación ( $CC < 0.60$ ). Finalmente la distribución espacial de CC y PBIAS mostrados en la Figura 4-11 nos revela que en términos de CC en la mayoría de los pixeles comparados hay una ligera mejora para IMERG que 3B42V7. Por otro lado en términos de PBIAS es muy clara la subestimación de la lluvia en la parte baja de la cuenca (salida de la cuenca) por ambos productos y en ambas eras. Sin embargo es muy notable que IMERG corrija y reduce el PBIAS en la parte alta de la cuenca (altura de la estación Sicuani).

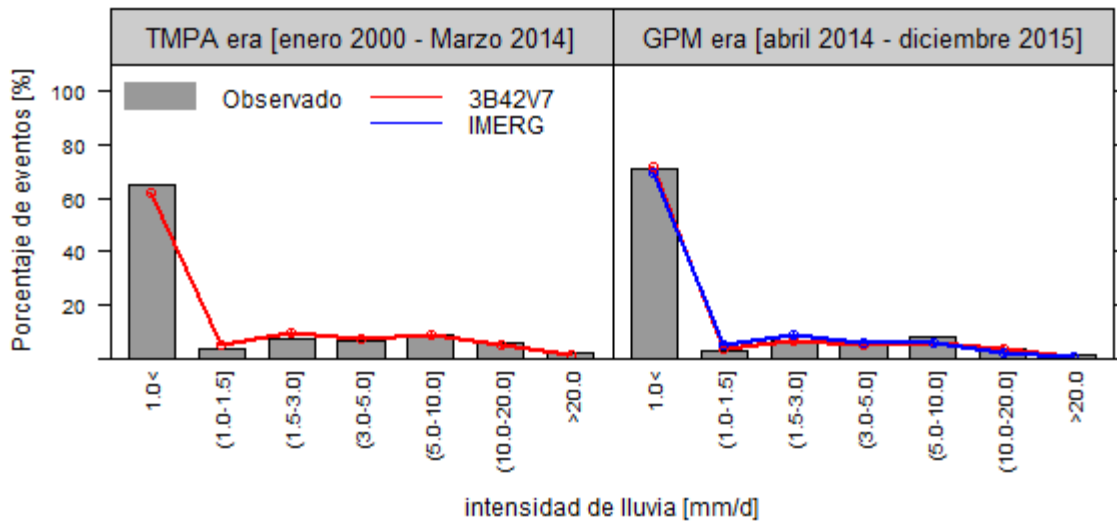


Figura 4-10: Función de densidad de probabilidad de la ocurrencia de eventos (en %) de la lluvia diaria para diferentes intensidades (mm/d).

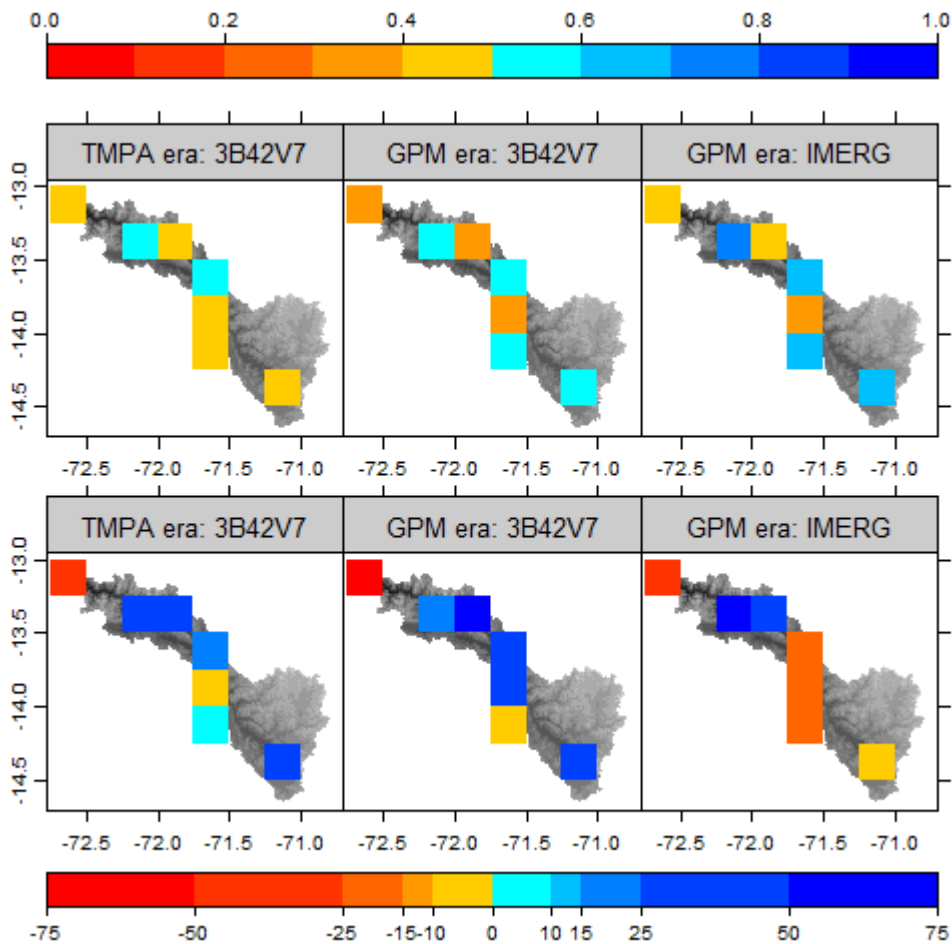


Figura 4-11: Distribución espacial de coeficiente de correlación (CC, arriba) y de porcentaje de bias (PBIAS, Abajo)

## 4.2.2 Evaluación hidrológica de PPES

### 4.2.2.1 Análisis de parámetros calibrados

Para la evaluación hidrológica de PPES se ha calibrado el modelo SWAT en base a los escenarios planteados en la Figura 3-3 y los resultados del juego de parámetros calibrados y sus valores óptimos en cada escenario se muestra en la Tabla 4-5. Así, en esta tabla se muestra que utilizando la precipitación observada como entrada en SWAT (Escenario 1), solamente se encontró 5 parámetros que gobiernan la respuesta hidrológica de la cuenca del río Vilcanota. Así se tiene el parámetro SURLAG, que es el coeficiente de retraso de la escorrentía superficial y en efecto SURLAG suaviza el hidrograma de descargas simuladas en el canal producto del retraso en la liberación de la escorrentía superficial desde los HRUs (Neitsch et al. 2011). Asimismo entre los parámetros del suelo que influyen en la respuesta hidrológica se tiene a SOL\_BD (densidad aparente húmeda del suelo) y SOL\_AWC (capacidad de agua disponible en el suelo). Finalmente la calibración de los parámetros de los acuíferos como GWQMN (umbral de profundidad del agua necesaria en el acuífero superficial para que ocurra el flujo de retorno) y RCHRG\_DP (fracción de recarga hacia el acuífero profundo) fueron indispensables para que el modelo tenga la capacidad de simular muy bien las descargas en el periodo de bajas descargas (Figura 4-12) debido a la fuerte estacionalidad de precipitación en esta región.

Considerando como punto de partida los parámetros calibrados en el escenario 1; en el escenario 2 utilizando 3B42V7 como entrada en SWAT se ha recalibrado solamente 2 parámetros (SURLAG y SOL\_AWC) del escenario 1. Donde se ha reducido el valor de SURLAG (de 0.2 a 0.05) para suavizar el hidrograma simulado debido que las descargas simuladas en el periodo de altas descargas utilizando 3B42V7 en SWAT ha generado picos muy altos en la temporada de altas descargas en referencia a las descargas observadas (Figura 4-13b). Finalmente se ha recalibrado el parámetro SOL\_AWC donde se aprecia que los valores de SOL\_AWC fueron incrementados relativamente en 1.05 (105%) con la finalidad de reducir la sobrestimación de las descargas simuladas usando 3B42V7 (Figura 4-13b) ya que el incremento de los valores de SOL\_AWC está vinculado con mayor evapotranspiración desde el perfil de suelo.

Es remarcable que a pesar de la complejidad del modelo SWAT, en este estudio solamente encontramos 5 parámetros que gobiernan la respuesta hidrológica de la cuenca del río Vilcanota y solo 2 de estos 5 parámetros fueron necesarios para recalibrar SWAT de tal manera que este tenga la capacidad simular las descargas utilizando 3B42V7 como lluvia de entrada.

Los desempeños del modelo SWAT en cada escenario se describe a continuación.

Tabla 4-5: Valores de los parámetros del modelo SWAT calibrado. En la columna que corresponde al parámetro “v” (“r”) indica que el parámetro inicial fue: sustituido por un valor fijo (multiplicado por 1 + cierto valor de cambio relativo). Parámetros\_1 (Parámetros\_2) es el conjunto de parámetros calibrados del modelo SWAT utilizando como entrada los datos de lluvia observada (3B42V7). Valores sombreados en gris indica que fueron los únicos parámetros recalibrados en el escenario 2 en referencia al escenario 1.

Orden	Parámetro	Descripción	Escenario 1	Escenario 2
			Parámetros_1	Parámetros_2
1	SURLAG <sup>(v)</sup>	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	0.20	0.05
2	SOL_AWC <sup>(r)</sup>	Capacidad de agua disponible en el suelo [mm H <sub>2</sub> O/mm suelo]	-0.33	1.05
3	SOL_BD <sup>(r)</sup>	Densidad aparente húmeda del suelo [g/cm <sup>3</sup> ]	0.34	0.34
4	GWQMN <sup>(v)</sup>	Umbral de profundidad del agua necesaria en el acuífero superficial para que ocurra el flujo de retorno [mm]	681.30	681.30
5	RCHRG_DP <sup>(v)</sup>	Fracción de recarga hacia el acuífero profundo	0.36	0.36

#### 4.2.2.2 Escenario 1: descargas simuladas en base a parámetros\_1

En este estudio se ha calibrado el modelo hidrológico SWAT en una cuenca con limitada representatividad de la variabilidad espacial de las variables meteorológicas debido a la baja red de estaciones meteorológicas (solo 9 estaciones utilizadas, Figura 3-1). A pesar de ello los resultados del modelamiento hidrológico en la etapa de la calibración del modelo SWAT utilizando los datos de la precipitación observada (PO) .

La Figura 4-12 muestra que en general la descarga media diaria simulada caracteriza muy bien los patrones de la descarga observada. Incluso es muy importante remarcar que el modelo SWAT tuvo la capacidad de reproducir los eventos extremos registrados entre enero y marzo del 2010 (Lavado-Casimiro et al. 2010; Huggel et al. 2015). En efecto considerando los criterios de valoración de desempeño de Moriasi et al., (2007); se tiene que de acuerdo a NSE = 0.7 (PBIAS = 0.8%) el modelo SWAT tiene un desempeño bueno (muy bueno).



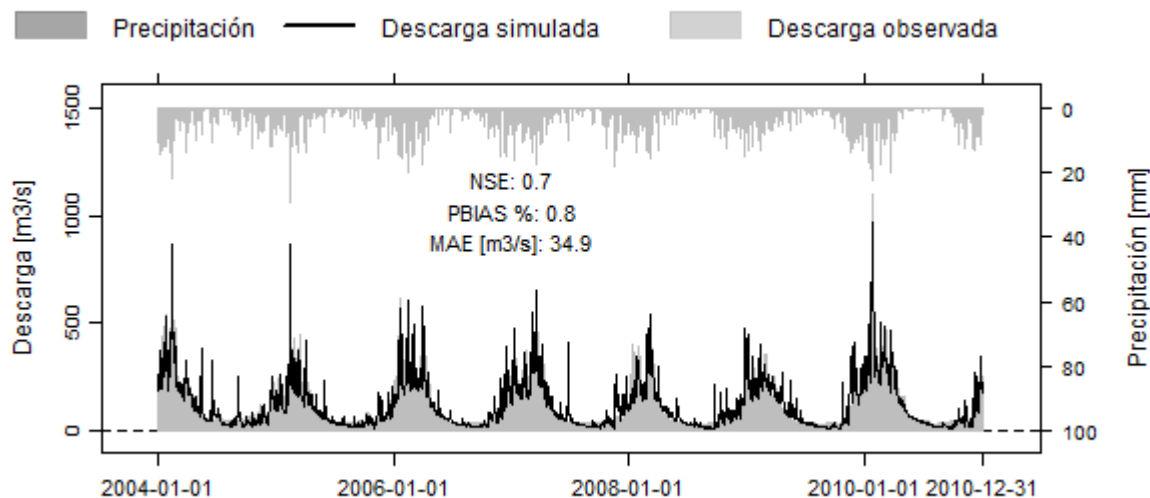


Figura 4-12: Escenario1: Calibración del modelo SWAT utilizando la precipitación observada (PO)

El modelo SWAT calibrado con PO fue utilizado para validar el modelo utilizando la misma PO y los productos de PPES (3B42V7 e IMERG) tanto en la era de TMPA (2011-marzo 2014) y GPM (abril 2014 – diciembre 2015), cuyos resultados se muestran en la Figura 4-13. Así se tiene que en la era de TMPA utilizando PO; el modelo SWAT tiene un desempeño muy bueno para ambas métricas (NSE = 0.8 y PBIAS = -2.4%) aunque en la era de GPM el valor de NSE disminuye ligeramente (NSE=0.6, desempeño satisfactorio) pero el PBIAS sigue siendo muy bueno (PBIAS = -1.8%).

Por otro lado en la era de TMPA utilizando 3B42V7 el desempeño de SWAT es satisfactorio (bueno) para NSE = 0.5 (PBIAS = 12.5%); donde es apreciable que el modelo tiende a sobrestimar las descargas observadas. Sin embargo las métricas para 3B42V7 se deterioran significativamente para la era GPM; siendo estos insatisfactorios (NSE = -1.0, PBIAS = 36.9%). Las altas sobrestimaciones de SWAT para 3B42V7 en la era de GPM (PBIAS = 36.9%) se debe principalmente a que 3B42V7 sobrestima las precipitaciones en la temporada de altas descargas como se observa en la Figura 4-13d. De aquí, en efecto encontramos que la utilidad de 3B42V7 en el modelamiento hidrológico es adecuada para la era de TMPA que GPM.

Finalmente en la era de GPM los desempeños de SWAT utilizando IMERG indica que con respecto a NSE = 0.4 (PBIAS = -1.4%) el desempeño de SWAT es insatisfactorio (muy bueno).

Comparando los resultados de la era GPM claramente encontramos que el balance hidrológico en la cuenca es muy bueno utilizando IMERG (PBIAS = -1.4%) que 3B42V7 (PBIAS = 36.9%) y es comparable con la PO (PBIAS = -1.8%) lo cual nos indica que el aporte de la precipitación a nivel de la cuenca es muy bien contabilizada por IMERG. Asimismo, de acuerdo a NSE el desempeño de SWAT utilizando IMERG (0.4) es más comparable a PO (0.6) que 3B42V7 (-1.0) lo cual es también afirmado por MAE donde el error medio absoluto de IMERG (28.4 m<sup>3</sup>/s) fue más próximo al de PO (26.8 m<sup>3</sup>/s) que 3B42V7 (50.9 m<sup>3</sup>/s).

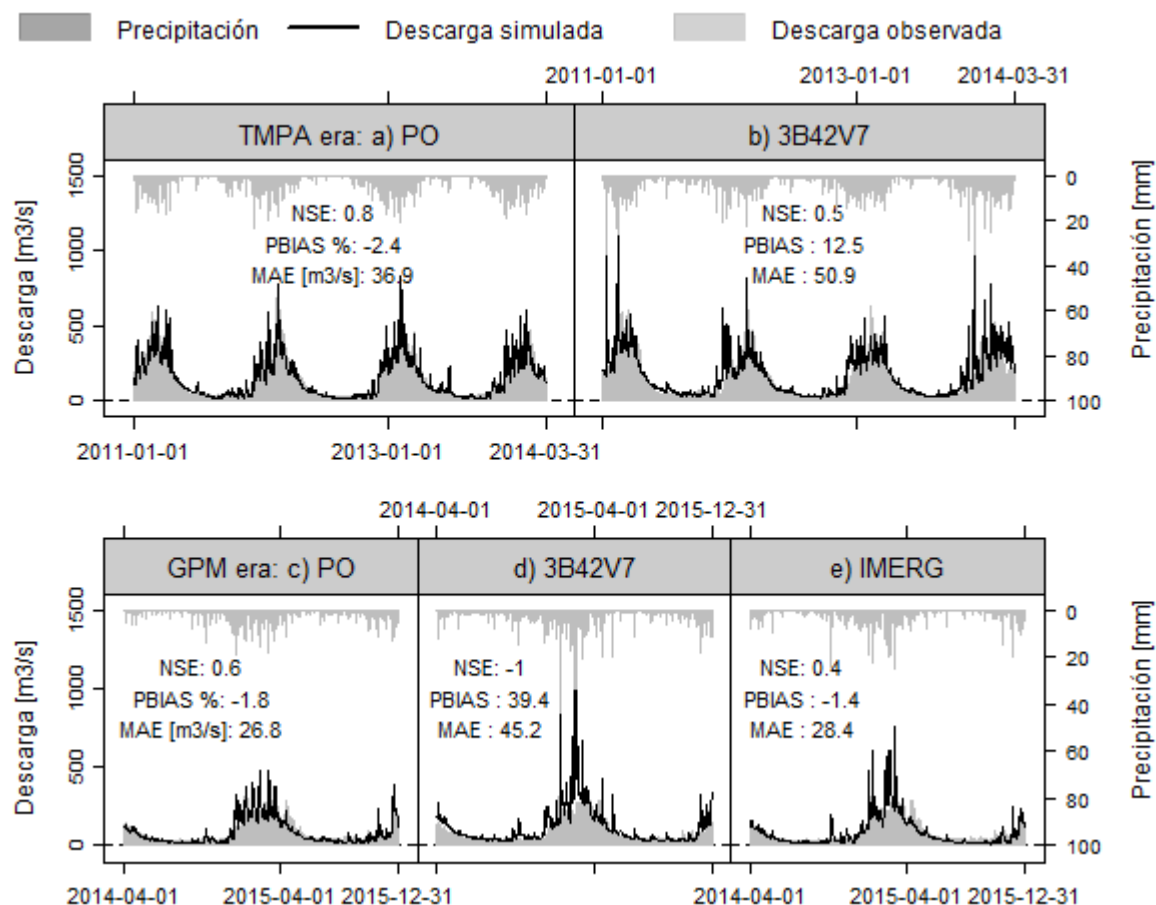


Figura 4-13: Escenario1: Arriba (Abajo) Validación del modelo SWAT en la era TMPA (GPM) utilizando PO [a] y 3B42V7 [b] (PO [c], 3B42V7 [d] e IMERG [e])

#### 4.2.2.3 Escenario 2: descargas simuladas en base a parámetros\_2

En este escenario se ha calibrado el modelo SWAT utilizando los datos de precipitación de 3B42V7 y luego utilizando este modelo calibrado se ha validado SWAT para el mismo 3B42V7 e IMERG tanto en la era de TMPA y GPM. Así, los resultados se muestran en la Figura 4-14, donde en la era de TMPA el modelo SWAT utilizando 3B42V7 caracteriza muy bien los patrones de la descarga observada y con muy buenos desempeños tanto en la etapa de calibración (NSE = 0.7, PBIAS = 3.1%) y validación (NSE = 0.8, PBIAS = -1.4%). Sin embargo para 3B42V7 en la era de GPM, SWAT tiene desempeños insatisfactorios (NSE = 0.2, PBIAS = 20.2%). Así, estos resultados nuevamente demuestran la utilidad del producto 3B42V7 en el modelamiento hidrológico en la era de TMPA y no así en la era de GPM. Por otro lado en la era GPM el desempeño de SWAT para IMERG es bueno (NSE = 0.7, PBIAS = -10.3%), lo cual demuestra que también IMERG es mejor que 3B42V7 en la era de GPM.

Evaluación adicional sobre el desempeño de SWAT para IMERG en ambos escenarios nos demuestra que el modelo SWAT para IMERG subestima más en el escenario 2 (PBIAS = -10.3%) que en el escenario 1 (PBIAS = -1.4%) lo cual nos indica que el balance hidrológico de la cuenca es más precisa utilizando IMERG en el modelo calibrado con PO (escenario 1). Por otro lado de acuerdo a NSE, IMERG es mejor en el escenario 2 (NSE = 0.7) que en el escenario 1 (NSE = 0.4); esta mejora del NSE en el escenario 2 está relacionado con la suavización de las descargas en la temporada de altas

descargas (Ver Figura 10a y 11b) lo cual está gobernado por la reducción del parámetro SURLAG en el escenario 2 (SURLAG = 0.05, Tabla 4-5). De aquí en este estudio se ha planteado recalibrar el modelo SWAT del escenario 1 con el propósito de mejorar el desempeño del modelo utilizando los datos de IMERG (denominado escenario 3). Es así que el modelo fue recalibrado únicamente cambiando el valor del parámetro SURLAG de 0.20 a 0.05, donde este último valor fue adoptado del escenario 2 y los resultados de la simulación se muestra en la Figura 4-10. En esta última figura se aprecia que SWAT utilizando IMERG tiene desempeño bueno (muy bueno) de acuerdo a NSE (PBIAS) según los criterios de valoración de Moriasi et al., (2007). A su vez de acuerdo a MAE (24.6 m<sup>3</sup>/s) el error en esta última simulación es el más bajo que en el escenario 1 (28.4 m<sup>3</sup>/s, Figura 4-13e), escenario 2 (27.5 m<sup>3</sup>/s, Figura 4-14d) e incluso menor que el propio modelo SWAT para PO en la era de GPM (26.8 m<sup>3</sup>/s, Figura 4-14a) por lo que el uso de IMERG en el modelamiento hidrológico utilizando el modelo SWAT en una cuenca con escasa información como es el caso de la cuenca del río Vilcanota es muy prometedor aunque el producto IMERG debe ser aun mejorado en la temporada lluviosa ya que es notorio que sobrestima las descargas observadas en la temporada de altas descargas (Figura 4-15).

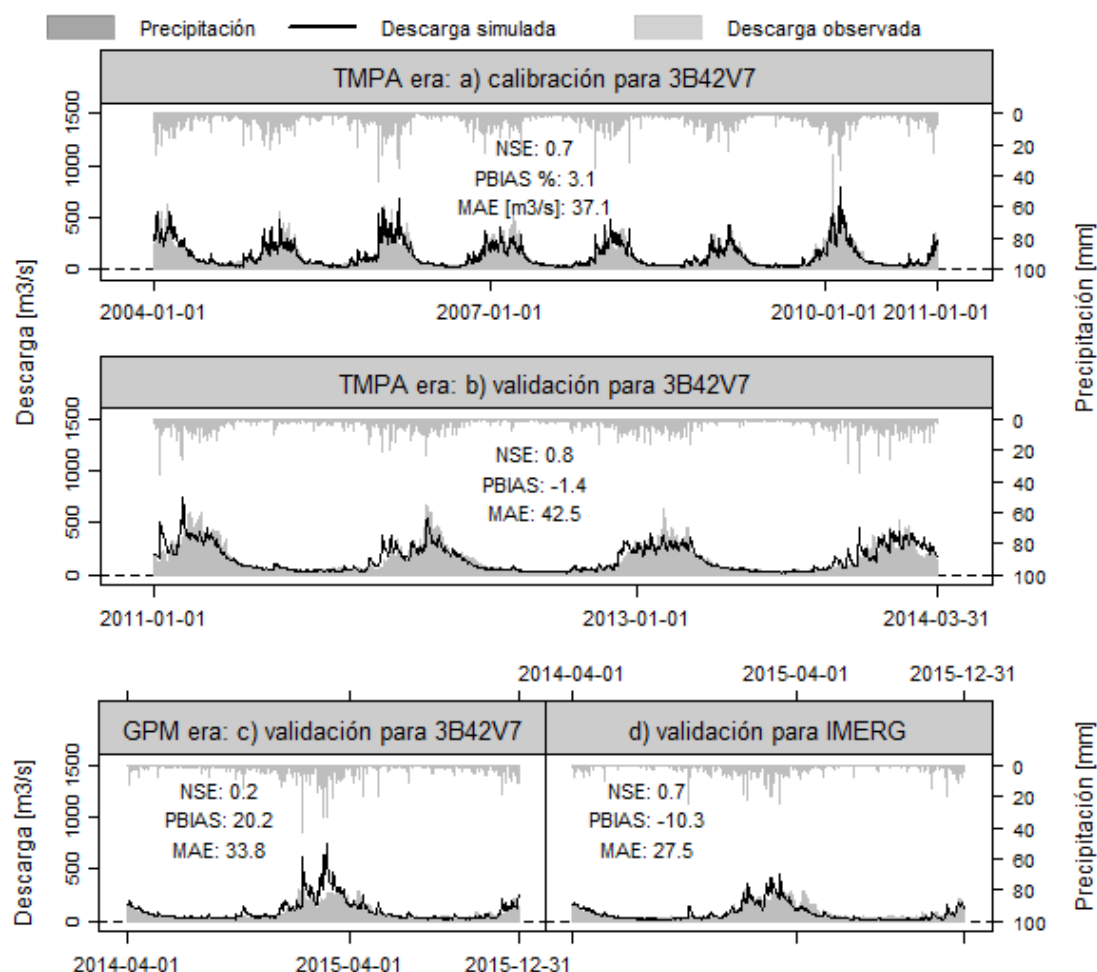


Figura 4-14: Escenario 2: Calibración (a) y validación (b) de SWAT utilizando 3B42V7 en la era TMPA. Validación de SWAT para 3B42V7 (c) e IMERG (d) en la era GPM

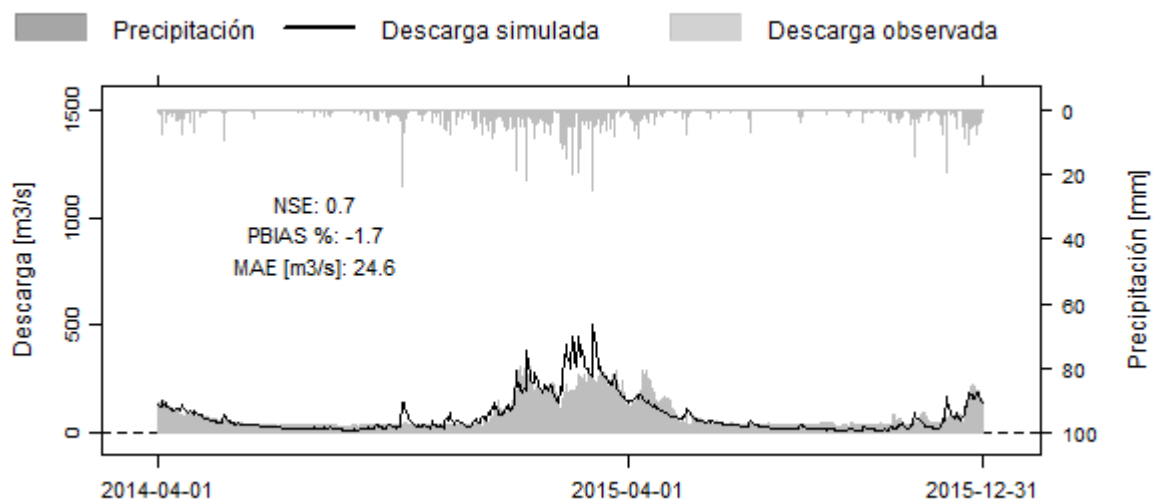


Figura 4-15: Escenario 3: Validación del modelo SWAT para IMERG. Para esta simulación el modelo SWAT del escenario 1 fue recalibrado cambiando únicamente el valor de SURLAG a 0.05 donde este valor fue adoptado del escenario 2.

## 5. CONCLUSIONES

### 5.1 Sobre el modelamiento hidrológico de la cuenca del río vilcanota

En este estudio, se llevó a cabo un minucioso análisis de sensibilidad de parámetros con el propósito de identificar los parámetros más sensibles del modelo hidrológico SWAT y por primera vez reportamos de cómo estos parámetros sensibles afectan la respuesta hidrológica en los diferentes componentes del proceso hidrológico del cual:

- Fueron identificados solamente 5 parámetros sensibles siendo: SURLAG, SOL\_BD, SOL\_AWC, GWQMN y RCHRG\_DP; y tienen gran impacto en la cuantificación y la respuesta hidrológica en los diferentes componentes del proceso hidrológico. El parámetro que tuvo mayor influencia en la respuesta de la escorrentía superficial fue SURLAG. Los parámetros de suelo más sensibles y que tienen mayor influencia sobre la cuantificación y la respuesta del flujo de retorno fueron SOL\_BD y SOL\_AWC. Los parámetros GWQMN y RCHRG\_DP fueron los más importantes en la cuantificación y respuesta del flujo de retorno desde los acuíferos para mejorar las descargas simuladas en el periodo de bajas descargas.
- Se ha encontrado que SWAT es adecuado para el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota, lo cual fue verificado mediante las métricas de incertidumbre (P-factor y R-factor) y de desempeño (NSE y PBIAS). Así, en la etapa de la calibración (validación) en el periodo 2004-2010 (2011-2015) se obtuvo muy buen desempeño del modelo SWAT con  $NSE=0.73$  ( $NSE=0.79$ ) y  $PBIAS=0.8\%$  ( $PBIAS=-2.2\%$ ) con una banda estrecha de incertidumbre dado por valores bajos de R-factor = 0.33 (R-factor = 0.34) donde el intervalo de predicción al 95% contuvo más del 57% (63%) de las descargas medias diarias observadas según el P-factor. Por otro lado en la simulación de las descargas mensuales las métricas de desempeño del modelo SWAT fueron mejores aún.
- Fue posible calibrar el modelo SWAT de tal manera que esta tenga la capacidad de caracterizar muy bien la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en la cuenca del río Vilcanota. Por lo que el enfoque metodológico seguido en este estudio proporcionará información de gran utilidad para los usuarios del modelo hidrológico SWAT para su comprensión del modelo y su aplicación sin que esta pierda el sentido físico.
- El excelente desempeño del modelo SWAT en la simulación de descargas de la cuenca del río Vilcanota, permite inferir que es un modelo adecuado para el modelamiento hidrológico de cuencas ubicadas en los Andes.

### 5.2 Sobre la evaluación de la utilidad de la lluvia estimada por satélite en el modelamiento hidrológico

La evaluación estadística y de la aplicabilidad en el modelamiento hidrológico fueron realizado con dos productos de precipitación estimada por satélite (PPES) como el producto 3B42V7 de la misión TMPA (TRMM multi-satellite precipitation analysis) e IMERG (Final run) de la misión GPM (Global Precipitation Measurement). El producto 3B42V7 fue analizado para dos periodos distintos definidos por la era de TMPA (2000 – marzo 2014) y por la era GPM (abril 2014 – diciembre 2015) y es este último periodo donde fue comparado con el producto IMERG.

Así, la evaluación estadística de la comparación de PPES (3B42V7 e IMERG) versus la precipitación observada por los pluviómetros (PO) se llevó a cabo utilizando los tradicionales estadísticos por pares (coeficiente de correlación [CC], error absoluto medio [MAE] y porcentaje de bias [PBIAS]) y categóricos (probabilidad de detección [POD], ratios de falsa alarma [FAR] y Threat score [TS]), por tanto se concluye:

- El producto 3B42V7 es mejor en la era TMPA que GPM; particularmente debido a que en esta última era el producto 3B42V7 sobrestima más la precipitación observada.
- En la era de GPM en general el producto IMERG ha demostrado sustanciales mejoras respecto a 3B42V7 como en la reducción de bias y los errores absolutos. Asimismo una consistente observación fue la mejora en la detección de eventos de precipitación y la reducción de falsas alarmas.

La evaluación de la aplicabilidad en el modelamiento hidrológico de PPES fue llevado a cabo utilizando el modelo hidrológico SWAT; donde el modelo fue calibrado bajo dos escenarios de calibración y validación. Así, en el escenario 1 (2) SWAT fue calibrado utilizando PO (3B42V7) y este modelo calibrado se utilizó para validar PO, 3B42V7 e IMERG (3B42V7 e IMERG) tanto en la era TMPA y GPM. En el primer escenario SWAT fue calibrado solamente en base a 5 parámetros (SURLAG, SOL\_BD, SOL\_AWC, GWQMN y RCHRG\_DP) muy importantes que gobiernan la respuesta hidrológica de la cuenca y tan solo 2 de estos 5 parámetros (SURLAG y SOL\_AWC) fueron recalibrados para que 3B42V7 sea útil en el modelamiento hidrológico por tanto, las simulaciones en ambos escenarios demuestran que:

- La utilidad del producto 3B42V7 en el modelamiento hidrológico es adecuada solamente en la era de TMPA debido que en la era GPM el desempeño de SWAT utilizando 3B42V7 es insatisfactorio. Por otro lado en concordancia a la evaluación estadística se encontró que en la era de GPM la utilidad de IMERG en el modelamiento hidrológico es muy superior que 3B42V7; incluso se ha demostrado que en un posible tercer escenario cuando SWAT adopta 4 (1; SURLAG) parámetros del primer (segundo) escenario, el desempeño de SWAT utilizando IMERG es muy bueno y comparable a los desempeños de SWAT que utiliza los datos de precipitación observada.
- Por lo que en este estudio el uso de IMERG en el modelamiento hidrológico utilizando SWAT en una cuenca con escasa información como es el caso de la cuenca del río Vilcanota es muy prometedor.



## 6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour KC (2012) SWAT-CUP-2012. SWAT Calibration and Uncertainty program—A User Manual. Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, Dübendorf.
- Abbaspour KC, Yang J, Maximov I, et al (2007) Modelling hydrology and water quality in the pre-alpine/alpine Thur watershed using SWAT. *J Hydrol* 333:413–430. doi: 10.1016/j.jhydrol.2006.09.014
- Alansi AW, Amin MSM, Abdul Halim G, et al (2009) Validation of SWAT model for stream flow simulation and forecasting in Upper Bernam humid tropical river basin, Malaysia. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 6:7581–7609. doi: 10.5194/hessd-6-7581-2009
- Andres N, Vegas Galdos F, Lavado Casimiro WS, Zappa M (2014) Water resources and climate change impact modelling on a daily time scale in the Peruvian Andes. *Hydrol Sci J* 59:2043–2059. doi: 10.1080/02626667.2013.862336
- Aouissi J, Benabdallah S, Lili Chabaâne Z, Cudennec C (2016) Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia. *Agric Water Manag.* doi: 10.1016/j.agwat.2016.03.004
- Aparicio Mijares, F. J. y Mijares FA (1989) Fundamentos de hidrología de superficie.
- Arnold JG, Allen PM, Muttiah R, Bernhardt G (1995a) Automated Base Flow Separation and Recession Analysis Techniques. *Ground Water* 33:1010–1018. doi: 10.1111/j.1745-6584.1995.tb00046.x
- Arnold JG, Kiniry JR, Srinivasan R, et al (2013) Soil & Water Assessment Tool: Input/output documentation. version 2012. Texas Water Resour Institute, TR-439 650.
- Arnold JG, Moriasi DN, Gassman PW, et al (2012) Swat: Model Use, Calibration, and Validation. *Asabe* 55:1491–1508.
- Arnold JG, Srinivasan R, Muttiah RS, Williams JR (1998) Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *J. Am. Water Resour. Assoc.* 34:73–89.
- Arnold JG, Williams JR, Maidment DR (1995b) Continuous-Time Water and Sediment-Routing Model for Large Basins. *J Hydraul Eng* 121:171–183. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(1995)121:2(171)
- Beven K, Binley A (1992) The future of distributed models: Model calibration and uncertainty prediction. *Hydrol Process* 6:279–298. doi: 10.1002/hyp.3360060305
- Chaibou Begou J, Jomaa S, Benabdallah S, et al (2016) Multi-Site Validation of the SWAT Model on the Bani Catchment: Model Performance and Predictive Uncertainty. *Water* 8:178. doi: 10.3390/w8050178
- Chow VT, Maidment DR, Mays LW (1988) Applied hydrology. McGraw-Hill, Inc., New York, NY.
- Cotler H (2004) El manejo integral de cuencas en México. Estudios y reflexiones para orientar la política ambiental. México, D. F.: Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales e Instituto Nacional de Ecología. 264 p.
- Cruz HR (2014) Aplicación del modelo SWAT para cuenca, análisis del flujo base en una sur, mexicana del pacífico. Colegio de Postgraduados - postgrado de hidrocencias
- Dai A (2006) Precipitation Characteristics in Eighteen Coupled Climate Models. *J Clim* 19:4605–4630. doi: 10.1175/JCLI3884.1
- Del Carmen R (2001) Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua.

- Eberhart R, Kennedy J (1995) A new optimizer using particle swarm theory. Proc Sixth Int Symp Micro Mach Hum Sci 39–43. doi: 10.1109/MHS.1995.494215
- Emam AR, Kappas M, Abbaspour KC (2014) Simulation of Water Balance Components in a Watershed Located in Central Drainage Basin of Iran. In: Remote Sensing of the Terrestrial Water Cycle. John Wiley & Sons, Inc, pp 463–477
- Espinoza JC, Ronchail J, Guyot JL, et al (2009) Spatio-temporal rainfall variability in the Amazon basin countries (Brazil, Peru, Bolivia, Colombia, and Ecuador). Int J Climatol 29:1574–1594. doi: 10.1002/joc.1791
- FAO-1995 (2003) The Digitized Soil Map of the World Including Derived Soil Properties (version 3.5). FAO Land and Water Digital Media Series # 1. FAO, Rome.
- FAO-UNESCO (1988) Soil map of world, revised legend. Rome: FAO. World Soil Resources Reports 60.
- FGRA-WWF (2003) Manejo del Agua en Cuencas Hidrográficas: Desarrollo de Nuevos Modelos en México.
- Ficklin DL, Barnhart BL (2014) SWAT hydrologic model parameter uncertainty and its implications for hydroclimatic projections in snowmelt-dependent watersheds. J Hydrol 519:2081–2090. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.082
- Garreaud R (2000) Cold Air Incursions over Subtropical South America: Mean Structure and Dynamics. Mon Weather Rev 128:2544–2559. doi: 10.1175/1520-0493(2000)128<2544:CAIOSS>2.0.CO;2
- Garreaud R, Vuille M, Clement AC (2003) The climate of the Altiplano: observed current conditions and mechanisms of past changes. Palaeogeogr Palaeoclimatol Palaeoecol 194:5–22. doi: 10.1016/S0031-0182(03)00269-4
- Gassman PW, Reyes MR, Green CH, Arnold JG (2007) The Soil and Water Assessment Tool : historical development, applications, and future research directions. Trans ASAE 50:1211–1250. doi: 10.1.1.88.6554
- Gonzales-Inca CA (2009) Assessing the Land Cover and Land Use Change and Its Impact on Watershed Services in a Tropical Andean Watershed of Peru. University of Jyväskylä
- González JI (2000) Guía metodológica para el estudio de cuencas hidrológicas superficiales con proyección de manejo. Universidad de La Habana, Cuba.
- Hargreaves GH, Samani Z a. (1985) Reference crop evapotranspiration from temperature. Appl Eng Agric 1:96–99. doi: 10.13031/2013.26773
- Hong Y, Hsu K-L, Sorooshian S, et al (2004) Precipitation Estimation from Remotely Sensed Imagery Using an Artificial Neural Network Cloud Classification System. J Appl Meteorol 43:1834–1853. doi: 10.1175/JAM2173.1
- Hou AY, Kakar RK, Neeck S, et al (2014) The Global Precipitation Measurement Mission. Bull Am Meteorol Soc 95:701–722. doi: 10.1175/BAMS-D-13-00164.1
- Huffman GJ, Bolvin DT, Nelkin EJ (2015) Integrated Multi-satellite Retrievals for GPM (IMERG) Technical Documentation.
- Huffman GJ, Huffman GJ, Adler RF, et al (2007) The TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis: Quasi-Global, Multi-Year, Combined-Sensor Precipitation Estimates at Fine Scale. J HYDROMETEOR 38–55.

- Huggel C, Raissig A, Rohrer M, et al (2015) How useful and reliable are disaster databases in the context of climate and global change? A comparative case study analysis in Peru. *Nat Hazards Earth Syst Sci* 15:475–485. doi: 10.5194/nhess-15-475-2015
- INDECI (2012) Evaluación del impacto socio-económico de la temporada de lluvias 2010 en la Región Cusco.
- Joyce RJ, Janowiak JE, Arkin PA, et al (2004) CMORPH: A Method that Produces Global Precipitation Estimates from Passive Microwave and Infrared Data at High Spatial and Temporal Resolution. *J Hydrometeorol* 5:487–503. doi: 10.1175/1525-7541(2004)005<0487:CAMTPG>2.0.CO;2
- Kane RP (1999) Rainfall extremes in some selected parts of Central and South America: ENSO and other relationships reexamined. *Int J Climatol* 19:423–455. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(19990330)19:4<423::AID-JOC368>3.0.CO;2-O
- Kane RP (2000) El Niño/La Niña relationship with rainfall at Huancayo, in the Peruvian Andes. *Int J Climatol* 20:63–72. doi: 10.1002/(SICI)1097-0088(200001)20:1<63::AID-JOC447>3.0.CO;2-J
- Khoi DN, Thom VT (2015) Parameter uncertainty analysis for simulating streamflow in a river catchment of Vietnam. *Glob Ecol Conserv* 4:538–548. doi: 10.1016/j.gecco.2015.10.007
- Kim H, Parajuli PB (2012) Impacts of reservoir operation in the SWAT model calibration. In: American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting 2012, ASABE 2012. pp 1135–1146
- Kim H, Parajuli PB (2014) Impacts of Reservoir Outflow Estimation Methods in SWAT Model Calibration. *Trans ASABE* 57:1029–1042. doi: 10.13031/trans.57.10156
- Kodama Y-M (1992) Large-scale common features of subtropical precipitation zones (the Baiu frontal zone, the SPCZ, and the SACZ). Part I : Characteristics of subtropical frontal zones. *J Meteor Soc Japan* 70:813–836.
- Kubota T, Shige S, Hashizume H, et al (2007) Global Precipitation Map Using Satellite-Borne Microwave Radiometers by the GSMaP Project: Production and Validation. *IEEE Trans Geosci Remote Sens* 45:2259–2275. doi: 10.1109/TGRS.2007.895337
- Lavado Casimiro WS, Labat D, Guyot JL, Ardoin-Bardin S (2011) Assessment of climate change impacts on the hydrology of the Peruvian Amazon-Andes basin. *Hydrol Process* 25:3721–3734. doi: 10.1002/hyp.8097
- Lavado Casimiro WS, Ronchail J, Labat D, et al (2012) Basin-scale analysis of rainfall and runoff in Peru (1969–2004): Pacific, Titicaca and Amazonas drainages. *Hydrol Sci J* 57:625–642. doi: 10.1080/02626667.2012.672985
- Lavado-Casimiro WS, Silvestre E, Pulache W (2010) Tendencias en los extremos de lluvias cerca a la ciudad del Cusco y su relación con las inundaciones de enero del 2010. *Rev Peru Geo-Atmosférica RPGA* 2:89–98.
- Lenters JD, Cook KH, Ringler TD (1995) Comments on “On the Influence of the Andes on the General Circulation of the Southern Hemisphere.” *J Clim* 8:2113–2115. doi: 10.1175/1520-0442(1995)008<2113:COTIOT>2.0.CO;2
- Li J, Heap AD (2008) A Review of Spatial Interpolation Methods for Environmental Scientists. *Aust Geol Surv Organ GeoCat#* 68:154. doi: [http://www.ga.gov.au/image\\_cache/GA12526.pdf](http://www.ga.gov.au/image_cache/GA12526.pdf)

- Li N, Tang G, Zhao P, et al (2017) Statistical assessment and hydrological utility of the latest multi-satellite precipitation analysis IMERG in Ganjiang River basin. *Atmos Res* 183:212–223. doi: 10.1016/j.atmosres.2016.07.020
- Li Y, Thompson J, Li H (2016) Impacts of Spatial Climatic Representation on Hydrological Model Calibration and Prediction Uncertainty: A Mountainous Catchment of Three Gorges Reservoir Region, China. *Water* 8:73. doi: 10.3390/w8030073
- Liebmann B, Kiladis GN, Marengo J, et al (1999) Submonthly Convective Variability over South America and the South Atlantic Convergence Zone. *J Clim* 12:1877–1891. doi: 10.1175/1520-0442(1999)012<1877:SCVOSA>2.0.CO;2
- Lindenschmidt K-E, Fleischbein K, Baborowski M (2007) Structural uncertainty in a river water quality modelling system. *Ecol Modell* 204:289–300. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2007.01.004
- Linsley K, Kohler A, Paulhus LH (1990) *Hidrología para ingenieros*. México: Editorial McGraw-Hill.
- Luo Y, Arnold J, Allen P, Chen X (2012) Baseflow simulation using SWAT model in an inland river basin in Tianshan Mountains, Northwest China. *Hydrol Earth Syst Sci* 16:1259–1267. doi: 10.5194/hess-16-1259-2012
- Mantas VM, Liu Z, Caro C, Pereira AJSC (2014) Validation of TRMM multi-satellite precipitation analysis ( TMPA ) products in the Peruvian Andes. *Atmos Res* 163:132–145. doi: 10.1016/j.atmosres.2014.11.012
- Me W, Abell JM, Hamilton DP (2015) Effects of hydrologic conditions on SWAT model performance and parameter sensitivity for a small, mixed land use catchment in New Zealand. *Hydrol Earth Syst Sci* 19:4127–4147. doi: 10.5194/hess-19-4127-2015
- Minoti RT (2006) *Abordagens qualitativa e quantitativa de micro-bacias hidrográficas e áreas alagáveis de um compartimento do Médio Mogi-Superior/SP 231f., Brasil: Tese (Doutorado em Ciências da Engenharia Ambiental), Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São*.
- Moriasi DN, Arnold JG, Van Liew MW, et al (2007) Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Trans ASABE* 50:885–900. doi: 10.13031/2013.23153
- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J., Williams J. (2011) *Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. Texas Water Resour Institute, TR-406 1–647.
- Neitsch SL, Arnold JG, Kiniry JR, et al (2002) *Soil and Water Assessment Tool User's Manual*. Version 2000.
- Oñate F, Aguilar G (2003) *Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del Río Catamayo*.
- Perrin J, Ferrant S, Massuel S, et al (2012) Assessing water availability in a semi-arid watershed of southern India using a semi-distributed model. *J Hydrol* 460-461:143–155. doi: 10.1016/j.jhydrol.2012.07.002
- Salzmann N, Huggel C, Rohrer M, et al (2013) Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes. *Cryosph* 7:103–118. doi: 10.5194/tc-7-103-2013

- Sánchez-Vega I, Dillon MO (2006) Jalcas. In: R. M. Moraes, et al., eds. Botánica Económica de los Andes Centrales. La Paz, Bolivia: Herbario Nacional de Bolivia, Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés. 77–90.
- Satgé F, Bonnet M-P, Gosset M, et al (2016) Assessment of satellite rainfall products over the Andean plateau. *Atmos Res* 167:1–14. doi: 10.1016/j.atmosres.2015.07.012
- Scheel MLM, Rohrer M, Huggel C, et al (2011) Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) performance in the Central Andes region and its dependency on spatial and temporal resolution. *Hydrol Earth Syst Sci* 15:2649–2663. doi: 10.5194/hess-15-2649-2011
- Schuol J, Abbaspour KC, Srinivasan R, Yang H (2008) Estimation of freshwater availability in the West African sub-continent using the SWAT hydrologic model. *J Hydrol* 352:30–49. doi: 10.1016/j.jhydrol.2007.12.025
- Shen ZY, Chen L, Chen T (2012) Analysis of parameter uncertainty in hydrological and sediment modeling using GLUE method: a case study of SWAT model applied to Three Gorges Reservoir Region, China. *Hydrol Earth Syst Sci* 16:121–132. doi: 10.5194/hess-16-121-2012
- Smarzyńska K, Miatkowski Z (2016) Calibration and validation of SWAT model for estimating water balance and nitrogen losses in a small agricultural watershed in central Poland. *J Water L Dev* 29:31–47. doi: 10.1515/jwld-2016-0010
- Suarez W, Macedo N, Montoya N, et al (2015) Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010). *Rev Peru Geo-Atmosférica RPGA* 4:80–92.
- Tan ML, Ficklin DL, Dixon B, et al (2015) Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. *Appl Geogr* 63:357–368. doi: 10.1016/j.apgeog.2015.07.014
- Tang G, Zeng Z, Long D, et al (2016) Statistical and Hydrological Comparisons between TRMM and GPM Level-3 Products over a Midlatitude Basin: Is Day-1 IMERG a Good Successor for TMPA 3B42V7? *J Hydrometeorol* 17:121–137. doi: 10.1175/JHM-D-15-0059.1
- Tuo Y, Duan Z, Disse M, Chiogna G (2016) Evaluation of precipitation input for SWAT modeling in Alpine catchment: A case study in the Adige river basin (Italy). *Sci Total Environ* 573:66–82. doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.08.034
- USDA Soil Conservation Service (1972) National Engineering Handbook; Section 4, Hydrology. U.S. Department of Agriculture: Washington, DC, USA.
- USDA-SCS (1983) National Engineering Handbook. USDA, Washington, DC.
- van Griensven A, Meixner T (2006) Methods to quantify and identify the sources of uncertainty for river basin water quality models. *Water Sci Technol* 53:51–9.
- Vegas F, Andres N, Zappa M, et al (2015) Simulación y caracterización del régimen natural de descargas diarias en los andes del sur del Perú: región de Apurímac y Cusco. *Rev Peru Geo-Atmosférica RPGA* 4:1–18.
- Veith TL, Van Liew MW, Bosch DD, Arnold JG (2010) Parameter Sensitivity and Uncertainty in SWAT: A Comparison Across Five USDA-ARS Watersheds. *Trans ASABE* 53:1477–1486. doi: 10.13031/2013.34906

- Vilaysane B, Takara K, Luo P, et al (2015) Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environ Sci* 28:380–390. doi: 10.1016/j.proenv.2015.07.047
- Villón M (2004) *Hidrología*. Editorial Tecnológica de Costa Rica. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Viviroli D, Dürr HH, Messerli B, et al (2007) Mountains of the world, water towers for humanity: Typology, mapping, and global significance. *Water Resour Res*. doi: 10.1029/2006WR005653
- Vuille M, Francou B, Wagnon P, et al (2008) Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Rev* 89:79–96. doi: 10.1016/j.earscirev.2008.04.002
- Wilks DS (2006) *Statistical methods in the atmospheric sciences*.
- Williams JR (1969a) Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Trans ASAE* 12:100–103. doi: 10.13031/2013.38772
- Williams JR (1969b) Flood routing with variable travel time or variable storage coefficients. *Trans ASAE* 12:100–103.
- Williams JR, Hann RW (1972) HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resour Res* 8:79–85.
- Xue C, Chen B, Wu H (2014) Parameter Uncertainty Analysis of Surface Flow and Sediment Yield in the Huolin Basin, China. *J Hydrol Eng* 19:1224–1236. doi: 10.1061/(ASCE)HE.1943-5584.0000909
- Yesuf HM, Melesse AM, Zeleke G, Alamirew T (2016) Streamflow prediction uncertainty analysis and verification of SWAT model in a tropical watershed. *Environ Earth Sci* 75:806. doi: 10.1007/s12665-016-5636-z
- Zheng-qing L, Cheng-gang L, Zhuo-tong N, et al Improvement and Applications of SWAT Model in the Upper-middle Heihe River Basin. *J. Nat. Resour.* 28:1404–1413.