

Aplicación del Modelo Hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a la Cuenca del Río Cañete (SWAT)

Natalia Uribe, Marcela Quintero, Jefferson Valencia

Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT)

Cali, Colombia

Marzo, 2013

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN	5
INTRODUCCIÓN	6
LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO	8
MODELO HIDROLÓGICO	9
SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT	9
I. FUENTES DE INFORMACIÓN	11
II. METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA	17
A. ASIGNACIÓN DE INFORMACIÓN A LA COBERTURA VEGETAL	17
B. ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS	18
C. PREPARACIÓN Y CORRECCIÓN DEL MDE	19
D. ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA	20
E. GENERACIÓN DE LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA	21
F. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN	24
III. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA	28
A. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD	28
B. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO	31
C. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE URH Y SU PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y AGUA	35
IV. CONCLUSIONES	41
V. PASOS SIGUIENTES EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN	42
VI. BIBLIOGRAFÍA	43
ANEXOS	44

LISTA DE FIGURAS

<i>Figura 1. Localización General de la Cuenca Hidrográfica</i>	<i>8</i>
<i>Figura 2. Mapa de Cobertura Vegetal de la Cuenca del Rio Cañete</i>	<i>12</i>
<i>Figura 3. Digitalización Mapa de Suelos de la Cuenca del Rio Cañete</i>	<i>14</i>
<i>Figura 4. Mapa de Suelos de la Cuenca del Rio Cañete</i>	<i>14</i>
<i>Figura 5. Modelo Digital de Elevación de la Cuenca del Rio Cañete</i>	<i>15</i>
<i>Figura 6. Dirección del Flujo de Agua</i>	<i>20</i>
<i>Figura 7. Estancamiento del Flujo de Agua</i>	<i>20</i>
<i>Figura 8. Ubicación de las Estaciones Climatológicas en la Cuenca Cañete</i>	<i>21</i>
<i>Figura 9. Mapa de Subcuencas Cuenca Cañete.....</i>	<i>22</i>
<i>Figura 10. Mapa de Unidades de Respuesta Hidrológica Cuenca Cañete.....</i>	<i>24</i>
<i>Figura 11. Periodos Calibración/Validación.</i>	<i>27</i>
<i>Figura 12. Relación entre la corriente y el agua subterránea.....</i>	<i>30</i>
<i>Figura 13. Caudal MENSUAL Simulado vs. Aforado est. socsi-calibracion manual</i>	<i>32</i>
<i>Figura 14. Caudal DIARIO Simulado vs. Aforado est. socsi-calibracion manual.....</i>	<i>32</i>
<i>Figura 15. Caudal MENSUAL Simulado vs. Aforado est. aguas-calibracion manual</i>	<i>33</i>
<i>Figura 16. Caudal MENSUAL Simulado vs. Aforado est. tinco-calibracion manual</i>	<i>33</i>
<i>Figura 17. Caudal MENSUAL Simulado vs. Aforado est. chavín-calibracion manual.....</i>	<i>34</i>
<i>Figura 18. Producción del promedio multianual por cada Unidad de Respuesta Hidrológica - URH.....</i>	<i>36</i>
<i>Figura 19. Producción de Agua Anual por cada Distrito</i>	<i>37</i>
<i>Figura 20. Producción de Sedimentos Anual por cada Unidad de Respuesta Hidrológica - URH.</i>	<i>40</i>

LISTA DE TABLAS

<i>Tabla 1. Fuentes de la Información Seleccionada Inicialmente</i>	<i>11</i>
<i>Tabla 2. Cobertura Vegetal de la cuenca del Rio Cañete</i>	<i>12</i>
<i>Tabla 3. Estaciones Climatológicas Utilizada en el Modelo.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 4. Estaciones Hidrometeorológicas Utilizada en el Modelo.....</i>	<i>16</i>
<i>Tabla 5. Asignación Código SWAT para las Coberturas del Suelo de la Cuenca Cañete.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabla 6. Características Físico-Químicas de los Suelos en la Cuenca Cañete.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabla 7. Parámetros generales de las subcuencas.....</i>	<i>23</i>
<i>Tabla 8. Resultado de Análisis de Sensibilidad para los Parámetros globales del flujo.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabla 9. RESUMEN DE LA CONFIGURACION INICIAL DE LOS PARAMETROS DEL MODELO SWAT</i>	<i>31</i>
<i>Tabla 10. Estadística Descriptiva resultados del modelo en todas las estaciones.....</i>	<i>34</i>
<i>Tabla 11. unidades de respuesta hidrológica con mayor producción de agua en la cuenca.....</i>	<i>38</i>
<i>Tabla 12. Contribución al caudal de diferentes zonas de la cuenca del río Cañete</i>	<i>39</i>

RESUMEN

El conocimiento de los procesos hidrológicos y los cambios climáticos que ocurren sobre la cuenca hidrográfica del Río Cañete ubicada en las Provincias de Cañete y Yauyos (Perú), permiten establecer su grado de afectación, su comportamiento y predecir las tendencias. Esta información permitirá desarrollar procesos de planificación y toma de decisiones en el corto, mediano y largo plazo. En los últimos años, los modelos hidrológicos han sido cada vez más utilizados para comprender y gestionar las actividades naturales y humanas que afectan a los sistemas de cuencas hidrográficas. Estos modelos hidrológicos puede contener parámetros que no se pueden medir directamente debido a las limitaciones para su medición (Beven, 2000).

En este estudio se empleó el programa Soil and Water Assessment Tool (SWAT¹) en la cuenca del Río Cañete para cuantificar todas las variables del balance hídrico del flujo del agua en el suelo (Producción de agua, agua en el suelo y recarga de acuífero profundo) y agua en la vegetación (Evapotranspiración potencial y actual) para un periodo diario de 19 años (1991-2009). El modelo fue calibrado y validado comparando con datos existente de caudal; esta metodología básicamente consistió en: a) Calibración del modelo, para lograr un ajuste satisfactorio entre los datos medidos y los simulados, mediante un análisis de sensibilidad en los parámetros del modelo, con un periodo de calibración de 8 años de observación (1993-2000): b) Validación del modelo, para evaluar la capacidad predictiva mediante la comparación de los datos medidos y simulados para un periodo de 9 años de observación (2001-2009).

La capacidad predictiva del modelo se analizó mediante el coeficiente de correlación entre los caudales simulados y medidos, el cual fue de 0.62 (Diario) - 0.96 (Mensual) y el coeficiente de Nash – Sutcliffe el cual fue de 0.3 a nivel diario y 0.82 a nivel mensual. De lo anterior se concluye que el modelo SWAT es una herramienta valiosa para la simulación del impacto del manejo del suelo y la vegetación en la producción de agua y sedimentos en la cuenca del Río Cañete, la cual experimenta una alta variación en suelos, uso de suelo, pendientes y condiciones climáticas. El estudio provee una fuerte base para futuros estudios concernientes al agua, alimentación, seguridad y administración de estrategias para el recurso del agua en las provincias de Cañete y Yauyos.

¹ http://www.brc.tamus.edu/swat/publications/swat-calibration-techniques_slides.pdf

INTRODUCCIÓN

En el 2010, el Ministerio de Ambiente de Perú empezó la iniciativa “Diseño participativo de un esquema de Pago por Servicios Ambientales en la cuenca del Río Cañete” con el apoyo de CARE, WWF y CIAT-CPWF. En esta iniciativa interinstitucional comprende actividades en torno al diagnóstico ambiental y socioeconómico, a la socialización de la iniciativa con los principales actores y al diseño del esquema como tal. Algunos componentes del diagnóstico están apoyados de estudios específicos como el análisis hidrológico de la cuenca y la valoración económica del servicio ambiental hidrológico para diferentes actores. Este informe es acerca del análisis hidrológico de la cuenca, el cual no solo pretende proveer un balance hídrico sino identificar las zonas que contribuyen con más agua al caudal que llega a la parte baja de la cuenca.

Esto exigen realizar un análisis que relación de manera combinada el tipo de uso del suelo, la pendiente, la precipitación y el tipo del suelo con la generación de caudales y sedimentos, elementos fundamentales para priorizar áreas por su importancia actual o potencial para producir agua y retener sedimentos. Esto es especialmente importante para el diseño de un esquema de PSA, ya que sobre todo en cuencas grandes como la del río Cañete, se deberá tarde o temprano que priorizar los pagos a las áreas más importantes por su impactos en los SAH. Estas áreas no deberán ser únicamente aquellas que actualmente proveen la mayor cantidad de agua sino las que con un cambio en su uso o manejo pueden mejorar su nivel de provisión actual. Sin embargo, este tipo de aproximación requiere la aplicación de un modelo que no solo relacione uso de la tierra y producción de agua sino que permita hacerlo para diferentes posibles uso. Así mismo, un análisis de posibles impactos de potenciales cambios en el uso de la tierra necesita partir de una modelación hidrológica, calibrada y validada, para el uso de la tierra actual, de tal forma que cual cambio posterior a las variables de uso o manejo produzcan una simulación confianza del efecto en el caudal de la cuenca.

En este sentido este informe corresponde a la modelación de la cuenca bajo las condiciones de uso de la tierra más recientes, y en este sentido permite priorizar las áreas que ya están contribuyendo importantemente con agua al caudal del río Cañete, aguas abajo.

La cuenca del río Cañete es la única de la costa peruana cuyo río principal goza de agua durante todo el año. Es por lo tanto que no es sorpresa que gran parte del sector agrícola de la región Lima se concentre en esta zona y así mismo se hayan desarrollado otros sectores económicos que dependen del recurso hídrico (sector hidroeléctrico, camaronero, turístico-canotaje). Así mismo sostiene una importante cantidad de población en el sector bajo, que aunque con casi nula precipitación pero acceso fácil a la capital, se abastece constantemente de agua gracias a los aportes de la cuenca alta. Estos aportes se originan de la desglaciación de los nevados y glaciales; del flujo desbordante de las lagunas; del afloramiento de manantiales y de la escorrentía superficial.

El presente estudio se ha realizado para toda la cuenca, y está enfocado a conocer la contribución de diferentes zonas de la cuenca a el punto de captación “Toma Imperial” ubicado a inicios de la zona de cuenca baja, punto no solo en el cual se cuentan con mediciones reales de caudales –para la calibración y validación del modelo, sino que a partir del mismo se comienzan a abastecer los distritos de riego, y parte del sistema de abastecimiento de agua potable.

El estudio siguió tres pasos importantes: 1. Recopilación, ajuste y sistematización de la información biofísica de la cuenca del Río Cañete necesaria para el análisis hidrológico, 2- Simulación del balance hídrico, calibración y validación y 3. Priorización de las áreas que tienen una mayor contribución al caudal en la zona baja de la cuenca.

LOCALIZACIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

La cuenca del Río Cañete administrativamente forma parte de las provincias de Cañete y Yauyos, pertenecientes ambas al departamento de Lima, en Perú. Geográficamente, se encuentra entre los paralelos 11°58'00" y 13°09'00" de latitud Sur y los meridianos 75° 31'00" y 76° 31'00" de longitud Oeste. La cuenca del río Cañete tiene una extensión aproximada de 6.192 km², de los cuales el 78,4% (4.856 km²) corresponde a la cuenca húmeda.

El río Cañete nace en la laguna Ticllacocho, ubicada al pie de las cordilleras de Ticlla y Pichahuarco, en la divisoria de cuencas con el río Mala. Sus recursos hídricos provienen de los aportes de la lluvia, así como los derivados de lagunas y deshielo de los nevados, ubicados estos principalmente en el extremo norte de la cuenca y sobre los 4.500 m. La longitud del río Cañete, entre su nacimiento y desembocadura, es de aproximadamente 220 km, presentando una pendiente promedio de 2% llegando hasta 8% en ciertos lugares. (Portal Agrario del Ministerio de Agricultura del Perú)

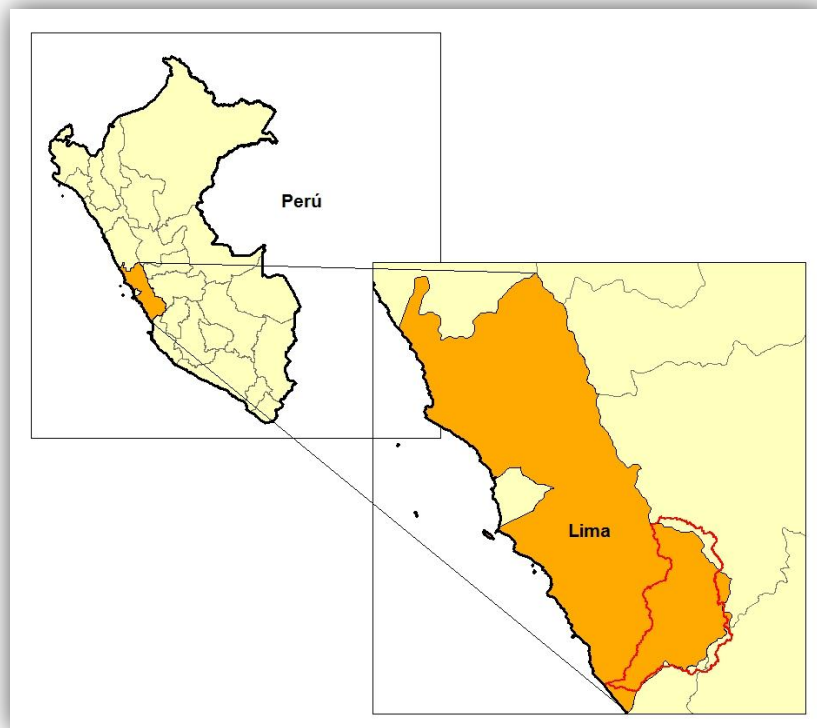


FIGURA 1. LOCALIZACIÓN GENERAL DE LA CUENCA HIDROGRÁFICA

MODELO HIDROLÓGICO

SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL – SWAT²

El modelo SWAT fue desarrollado por el USDA-ARS (Agricultural Research Service de Estados Unidos) para predecir el impacto en el manejo del suelo y la vegetación en el rendimiento hídrico, la producción de sedimentos y la contaminación de agua con agroquímicos. Es un modelo semi-distribuido y por tal razón es útil para modelar hidrológicamente cuencas con amplia variación de suelos, uso de suelo y condiciones de manejo (Arnold and Williams, 1987). Para esto, SWAT divide una cuenca en varias subcuencas, que a su vez están divididos en Unidades de Respuesta Hidrológica (URH's). Las URH consisten en áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo con un determinado balance hídrico. El balance hídrico es simulado para intervalos diarios durante un periodo continuo de tiempo.

El modelo está conformado por un conjunto de sub-modelos, los cuales se emplean para simular distintos procesos hidrológicos. El modelo hidrológico está basado en la ecuación general de balance hídrico:

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

donde SW_t es el contenido final de agua en el suelo (mm de agua); SW_0 es el contenido de agua inicial en el día i (mmH₂O); t es el tiempo (día); R_{day} es la cantidad de precipitación en el día i (mmH₂O); w_{seep} es la cantidad de agua acumulada en la zona no saturada del perfil del suelo en día i (mmH₂O); Q_{gw} es la cantidad de flujo de retorno en el día i (mm de agua); (Arnold et al.,1998). Dentro del modelo SWAT confluyen varios componentes que influyen en el balance hídrico de una cuenca. En cada componente se simulan varios procesos físicos a nivel del suelo, el clima, el crecimiento de cultivos, ciclo de nutrientes, dinámica de pesticidas y manejo de cultivos.

SWAT es un modelo ampliamente usado para simular la hidrología y calidad de agua de distintas cuencas en el mundo y los impactos de prácticas de manejo agrícola sobre la dinámica hidrológica. En Gassman et al. (2007) se encuentra una revisión sobre la historia de desarrollo de este modelo, sus diversas aplicaciones y nuevas actualizaciones reportadas en publicaciones arbitradas. Así mismo para consultar las especificidades del modelo el lector debe remitirse a Neitsch et al. (2001).

² Para más información visitar la página web: <http://swatmodel.tamu.edu/>

Como cualquier modelo, sus simulaciones implican incertidumbres causadas principalmente por errores en las variables de entrada, por limitaciones propias del modelo para simular procesos físicos en ciertas condiciones ambientales, y/o por la incertidumbre en la estimación de parámetros, teniendo presente que la mayor incertidumbre está asociada a los valores de los parámetros calibrados obtenidos con procesos de calibración automática (Tucci, 2005). Es por esta razón que la calibración y la validación son vitales en la aplicación del modelo SWAT y en otros modelos. Para estos procesos, SWAT cuenta con herramientas (i.e. análisis de sensibilidad) y guías para realizar una calibración y validación adecuada del modelo. Esto último es de gran utilidad ya que al ser SWAT un modelo hidrológico semi-distribuido, tiene potencialmente muchos parámetros a calibrar los cuales son imposibles de calibrar todos.

Adicionalmente a la utilidad de SWAT para simular efectos del cambio de uso/cobertura/manejo de la tierra sobre los caudales o la calidad del agua, SWAT también provee la posibilidad de simular los impactos del cambio climático en rendimiento hídrico, producción de sedimentos y carga de nutrientes en caudales (e.g. Stone et al. 2001; Jha et al. 2007; Marshall y Randhir 2008; Ficklin et al. 2009; Franczyk y Heejun 2009). SWAT puede simular el efecto de incrementos en la concentración de CO₂ en la atmósfera y de cambios en los parámetros de las variables climáticas sobre el crecimiento de las plantas (Gassman et al. 2007) y la hidrología de las cuencas.

I. FUENTES DE INFORMACIÓN

A partir de la información que fue suministra por el Ministerio de Agricultura, el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI), la reserva Paisajística Nor-Yauyos-Cocha y la Junta de Regantes, inicialmente se hizo una detallada y minuciosa búsqueda con el fin de extraer información valiosa para las entradas de los modelos y establecer un primer panorama de la cuenca de interés. En la siguiente tabla se presenta las fuentes de la información cartográfica seleccionada:

TABLA 1. FUENTES DE LA INFORMACIÓN SELECCIONADA INICIALMENTE

	Nombre	Formato	Descripción
INFORMACION FUENTE	Mapa de Cobertura	Shape	Coberturas Generales a Escala 1:100.000, Cartas Nacionales del Instituto Geográfico Nacional (IGN) - Realizado en los años 1970 y 1971
	Mapa de Suelos	Shape	Suelos Generales a Escala 1:100.000, Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) y Corporación Departamental de Desarrollo de Lima (CORLIMA) - 1989
	DEM	GRID	DEM SRTM con Resolución de 90 m, CIAT
	Cartografía Base	Shape	Drenajes, Centros poblados, División Político Administrativa, Nevados, etc.*
	Datos Climatológicos	Shape	Registros de Estaciones Hidrometeorológicas (Humedad Relativa, Precipitación, Temperatura Máximas y Mínimas, Radiación Solar y Aforos de Caudal, Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Para el Período 1991-2009

*Proveído por la Reserva Paisajística Nor Yauyos-Cochas

Uso del Suelo/Cobertura: Se utilizaron los datos de las Cartas Nacionales para las provincias de Junín y Lima, realizado por el IGN (Instituto Geográfico Nacional) en los años 1970 y 1971 a escala 1:100,000. En este estudio se emplearon métodos estereofotogrametricos de fotografías aéreas tomadas en 1962 con la elaboración de un control horizontal y vertical realizado por el IGM y una clasificación de campo en el año 1969. En la Tabla 2 se presentan las Coberturas Vegetales de este estudio y a su vez en la Figura 5 se puede observar la distribución de estas coberturas dentro de la cuenca.

De acuerdo al estudio “Inventario y evaluación de los recursos naturales de la reserva paisajística NorYauyos Cochás” en la cuenca alta del Rio Cañete, se describen unas coberturas que fue objeto del estudio.

TABLA 2. COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RIO CAÑETE

COBERTURA CAÑETE	DESCRIPCION	AREA (Ha)	AREA (%)
Matorrales	Comunidades arbustivas de ambientes secos	188600	31.3
Planicies costeras y estribaciones andinas sin vegetación.	Desierto costero sin vegetación	78730	13.1
Tierras altoandinas sin vegetación	Areas altoandinas sin vegetación (influencia de glaciares)	46290	7.7
Herbazal de tundra	Herbáceas de poco desarrollo, sobre los 4500 msnm (Pastoreo)	157100	26.0
Lagos y Lagunas	Cuerpos de agua	3225	0.5
Pajonal / Césped de puna	Agrupar los tipos de asociaciones Pajonal de puna + Césped de puna	109100	18.1
Bofedal	Herbáceas de piso, pegadas a ras del suelo.	1271	0.2
Queñoal	Bosque altoandino, sobre los 3800 msnm.	7095	1.2
Pajonal de puna	Herbáceas altoandinas hasta 1 m de alto con hojas punzo-cortantes	174	0.0
Cultivos agropecuarios	Areas con cultivos agrícolas + Areas con pastizales cultivados	6785	1.1
Nevados	Nevados	4758	0.8

Fuente: Cartas Nacionales, IGN 1971.

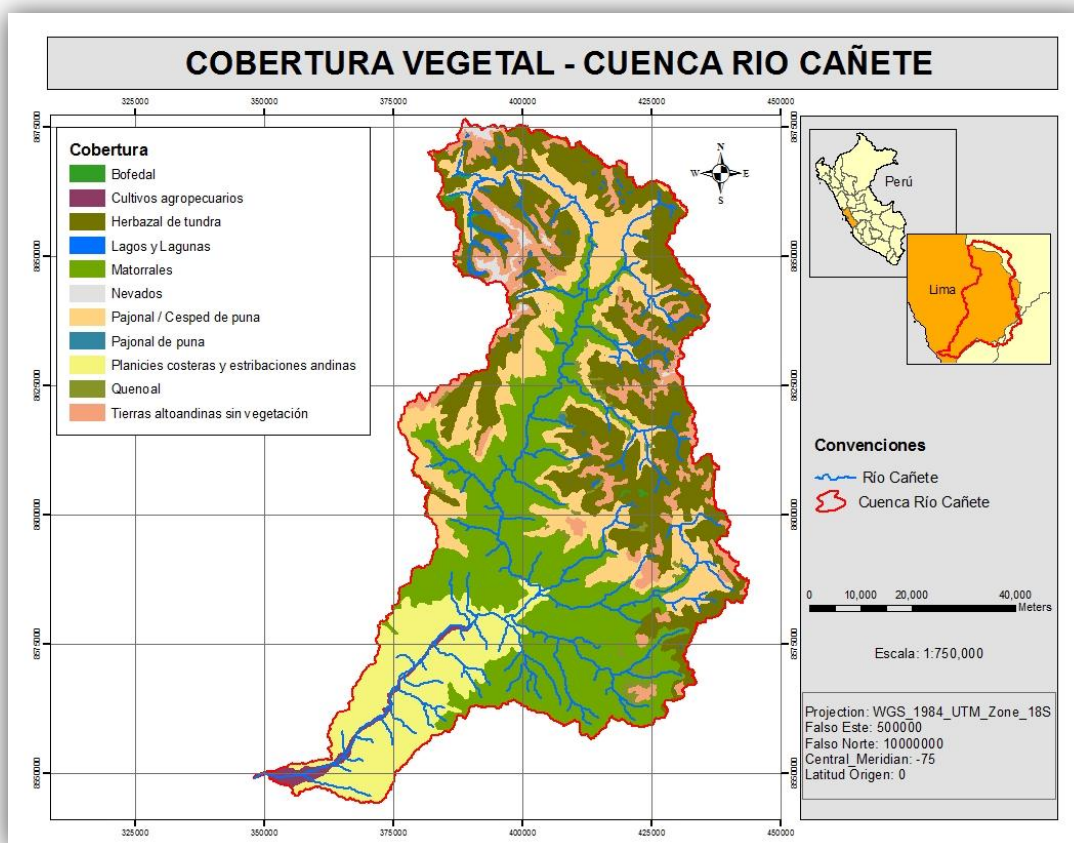


FIGURA 2. MAPA DE COBERTURA VEGETAL DE LA CUENCA DEL RIO CAÑETE.

Bosque Queñoa (Bq)

Este bosque está representado por el género *Polylepis* “queñoa”, oriundo de Sudamérica; es un árbol achaparrado, con tronco retorcido y abundancia de ritidomas exfoliables de consistencia papiráceo de color pardo rojizo; para los andes peruanos se han reportado más de diez especies, y mayormente se les utiliza para la formación de barreras vivas por encima de los 3500 msnm. La copa es generalmente difusa, presenta una madera dura, pesada, resistente a la humedad y laborable. Frecuentemente utilizada para leña, es una de las principales fuentes de energía para las comunidades altoandinas. Dentro de sus propiedades fisicoquímicas resalta su alta densidad, mediana resistencia a la compresión y alta resistencia al cizallamiento. Las hojas y ramas trituradas y hervidas son utilizadas como colorante marrón claro. (Gil Mora et al, 2007).

Pajonal de Puna / Césped de puna (Pj/Cp)

Esta gran unidad de vegetación conformada por comunidades de hierbas se encuentra ampliamente distribuida, extendiéndose en una superficie de 142 409 ha, que representa el 64.28% del área estudiada. Se encuentra ubicada en la porción superior de la cuenca del río Cañete, desde los 3800 hasta aproximadamente 3900 msnm, ocupando las laderas y cimas de paisajes colinosos y montañosos. Comprende las zonas de vida páramo muy húmedo – Subalpino Tropical y tundra pluvial – Altino Tropical.

Bofedal (Bo)

Esta unidad de vegetación se encuentra ubicada en áreas depresionadas con mal drenaje, tanto en planicies como en superficies inclinadas. Se encuentra a menudo en los alrededores de las lagunas y cochas. Está conformada por comunidades de hierbas de porte almohadillado o en cojín, conocida como “turbera”, la cual permanece siempre verdes durante el año gracias a la humedad permanente.

Información de Suelos: Esta información fue suministrada por el Ministerio de Agricultura y corresponde al Mapa de Suelos y Capacidad de Uso Mayor realizado por la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos Naturales (ONERN) y la Corporación Departamental de Desarrollo de Lima (CORLIMA) en el año 1989 a escala 1:100.000.

Para obtener el mapa final de Suelos de la cuenca del Río Cañete fue necesario realizar un trabajo previo de georeferenciación y digitalización de dos planchas cartográficas en formato análogo que conforman la región de estudio; actividades adicionales que fueron necesarias para obtener el mapa de suelos en la mejor escala de trabajo posible.

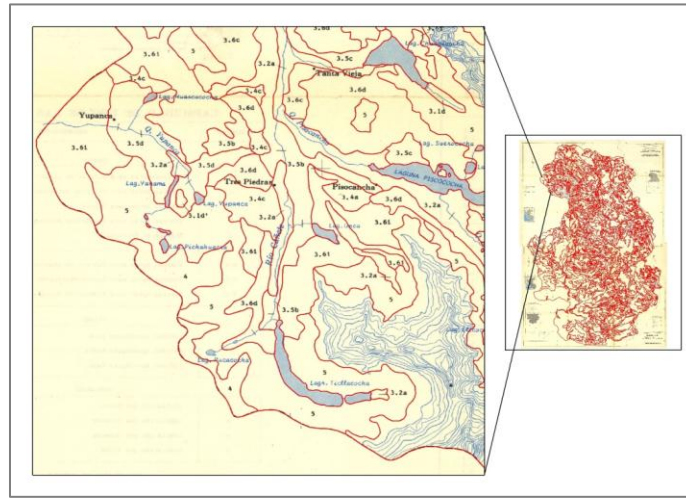


FIGURA 3. DIGITALIZACIÓN MAPA DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RIO CAÑETE

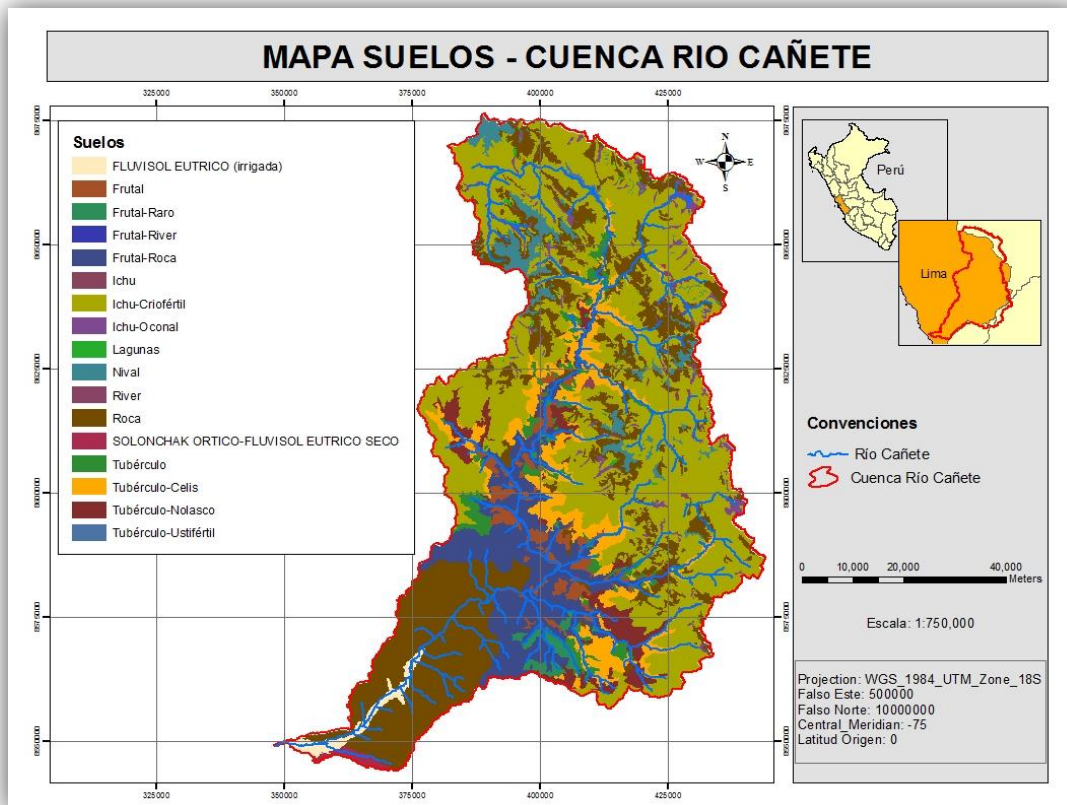


FIGURA 4. MAPA DE SUELOS DE LA CUENCA DEL RIO CAÑETE

Modelo Digital de Elevación: Para calcular la red hídrica de la cuenca, se utilizó el modelo digital del terreno se utilizó DEM SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) de resolución espacial 90 aportado por CIAT (Centro Internacional de Agricultura Tropical), al cual se le han realizado los ajustes necesarios en el llenado de vacíos de información. La cuenca del Río Cañete presenta una gran variedad en altitudes que van desde los 3 a 5861 msnm como se puede apreciar en la figura 5.

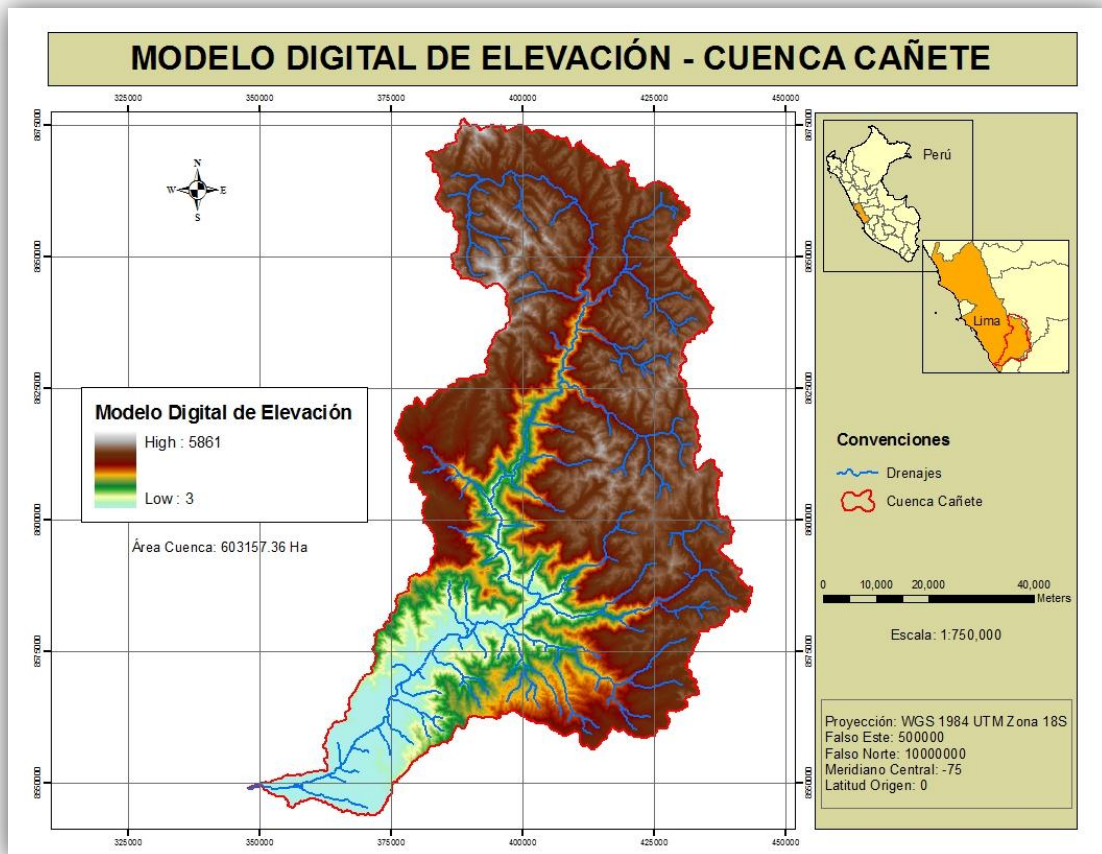


FIGURA 5. MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE LA CUENCA DEL RIO CAÑETE

Información Hidrometeorológica: Se contó con datos de Estaciones Hidrometeorológicas como Humedad Relativa, Precipitación, Temperatura (Máximas, Mínimas y Promedios), Radiación Solar y Aforos de Caudal, suministrada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). La información se analizó con el fin de establecer las estaciones que podrían tenerse en cuenta para la modelación, cumpliendo con registros diarios y continuos para el Período Simulado (1991-2009) y que se encontraran dentro o cerca de la cuenca de interés.

En la siguiente tabla se presenta las estaciones que se establecieron como entradas al Modelo:

TABLA 3. ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS UTILIZADA EN EL MODELO

NOMBRE	ESTE (m)	NORTE (m)	ALTITUD (m)	PRECIPITACION DIARIA	TEMPERATURAS DIARIA	CLIMATOLOGICA MENSUAL
CAÑETE	355705.042	8554188.667	158	X	X	X
CARANIA	405202.688	8635139.789	3875	X		
HUANGASCAR	409529.310	8573884.037	2533	X		
PACARAN	385534.360	8577888.072	721	X	X	X
TANTA	389341.689	8660300.059	4323	X		X
VILCA	410126.563	8660591.417	3864	X		
YURICOCHA	421394.860	8638284.486	4675	X		
YAUYOS	401017.784	8618868.347	2327	X	X	X
HUAROCHIRI	365733.826	8658322.424	3154		X	
NICOLAS	381970.587	8573780.842	650			X

El caudal del Rio cañete ha sido medido en siete estaciones hidrométricas: Socsi, Regantes en el mismo lugar de Socsi, Imperial, Chavín, Tinco, Aguas Calientes y Tanta, siendo las estaciones Socsi e Imperial (Desactivada) operada por SENAMHI y las otra cuatro por ELECTROPERU. Para el presente proyecto se seleccionaron los registros de caudales realizadas por las asociaciones de Regantes del valle del Rio Cañete en el mismo lugar de la estación Socsi para realizar la calibración y validación principal de la cuenca, debido a que cubre el caudal total y cuenta con la mayoría de información diaria y mensual. Adicional a este, se realizó la calibración y validación a nivel mensual en las estaciones de Aguas Calientes, Tinco y Chavín. El siguiente cuadro muestra la relación de las estaciones hidrométricas en el rio cañete y en el Figura 8 se presenta la ubicación de las mismas en la cuenca.

TABLA 4. ESTACIONES HIDROMETEOROLÓGICAS UTILIZADA EN EL MODELO

NOMBRE	CAUDALES	ENTIDAD	PERIODO	LATITUD	LONGITUD	ELEVACION
SOCSI	Diarios	SENAMHI	1994 Y 2008	-76.1948	-13.0286	500
SOCSI	Diarios	REGANTES	1993-2009	-76.1948	-13.0286	500
Imperial	Mensuales	SENAMHI	1926-1968	-76.1833	-13.0333	400
Chavin	Mensuales	ELECTROPERU	1986-1997	-75.9333	-12.7167	1414
Tinco de Alis	Mensuales	ELECTROPERU	1986- 1997	-75.8000	-12.2833	3150
Aguas Calientes	Mensuales	ELECTROPERU	1986- 1997	-76.1167	-12.0833	4180
Tanta	Mensuales	ELECTROPERU	1986- 1997	-76.0000	-12.1167	4275

Según el estudio "Evaluación y Ordenamiento de los Recursos Hídricos de la cuenca del Cañete" en la actualidad las mediciones en la estación SOCSI son efectuadas controlando la altura de la lámina de agua en un limnómetro ubicado al lado de la caseta limnográfica (margen derecha aguas arriba del puente) que no cuenta con un limnógrafo, aguas abajo, en el puente Socsí, es aforado el río con un correntómetro Universal en forma diaria en la época de estiaje, con lo cual se calibra continuamente la curva altura-caudal. En época de lluvias se realiza aforos solamente hasta que el caudal lo permita, puesto que la estación no cuenta con los respectivos accesorios para ajustarse. El emplazamiento de la estación no es el más adecuado, se ubica inmediatamente aguas debajo de una curva, además que en la sección de control se produce acumulación de material sólido de arrastre (margen izquierdo). Otro gran inconveniente es que dicha sección no controla el total del ancho del cauce.

II. METODOLOGÍA PARA LA MODELACIÓN HIDROLÓGICA

Toda la información espacial suministrada fue necesario realizar un proceso de re-proyección al Sistema de Referencia Proyectado Transverse Mercator - UTM Zona 18S, Coordenadas Falsas N: 1'000.000 m y E: 500.000 m, Datum WGS (Elipsoide WGS 1984). Esto con el fin de estandarizar toda la información utilizada y generada de las modelaciones, debido a que la información inicial provenía de diversas fuentes y se encontraban en diferentes Sistemas de Referencia. El proceso de re proyección se hizo por medio del Software ArcGIS teniendo en cuenta la Regionalización de los Parámetros de Transformación.

Con el fin de cortar la información espacial inicial (Cobertura Vegetal, Suelos y Modelo Digital de Elevación) dado que abarcaban una región más grande, se realizó una primera delimitación de la cuenca en el modelo SWAT, quedando definido la forma y el área de ésta. Con el límite definido y la información ya recortada se inicia el proceso de elaboración y edición de la Base de Datos del modelo ArcSWAT para realizar la simulación de la Línea Base.

A. ASIGNACIÓN DE INFORMACIÓN A LA COBERTURA VEGETAL

A las coberturas del suelo presentes en la cuenca (Figura 2) se les realizó la relación de los códigos de las coberturas de la base de datos de SWAT (Tabla 5) y se modificaron los valores del número de curva para cada uno de éstas de acuerdo a la experiencia obtenida en el comportamiento de las coberturas en la Región de los Andes.

TABLA 5. ASIGNACIÓN CÓDIGO SWAT PARA LAS COBERTURAS DEL SUELO DE LA CUENCA CAÑETE.

COBERTURA	COD. SWAT	CN	n	ÁREA (Ha.)
Matorrales	APPL	30-46-63-66	0.10	188600
Planicies costeras y estribaciones andinas sin vegetación	RNGB	39-61-74-80	0.15	78730
Tierras altoandinas sin vegetación	RNGB	39-61-74-80	0.15	46290
Herbazal de tundra	RYEG	31-59-72-79	0.10	157100
Lagos y Lagunas	WATR	92-92-92-92	0.01	3225
Pajonal / Césped de puna - Zona nevados	RYEG	31-59-72-79	0.10	109100
Bofedal	RYEG	49-69-79-84	0.05	1271
Queñoal	APPL	45-66-77-83	0.14	7095
Pajonal de puna	FESC	31-59-72-79	0.10	174
Cultivos agropecuarios	AGRL	67-77-83-87	0.14	6785
Nevados	RNGE	49-69-79-84	0.15	4758

CN: Numero de curva; n: Coeficiente de Manning

B. ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN DE SUELOS

Esta información contaba con el estudio físico químico de las unidades de suelos en la zona de estudio; pero carecía de las variables de Conductividad, Densidad Aparente y Disponibilidad de agua en el suelo. Por tal razón y teniendo en cuenta que estos datos son indispensables para la modelación hidrológica en SWAT, se determinaron sus valores utilizando el triángulo textural y la herramienta "Soil Characteristics Tool" (Saxton, 1986). Se debe tener presente que la herramienta de Saxton, 1986, funciona mejor para suelos minerales con bajo contenido de materia orgánica (máximo 8%) y alta densidad aparente.

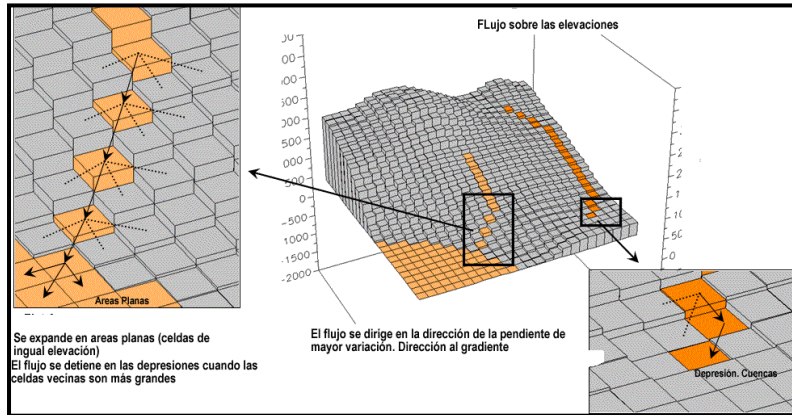
En la Tabla 6 se encuentran descritos los valores para las primeras 12 unidades de suelo a emplear dentro de la cuenca y en el **Anexo 1** se encuentran la descripción desde la unidad 13 hasta la 46.

TABLA 6. CARACTERÍSTICAS FÍSICO-QUÍMICAS DE LOS SUELOS EN LA CUENCA CAÑETE

No.	SNAM	(K) USLE	SOL_Z profundidad (mm)	SOL_BD densidad aparente (g/cm ³)	SOL_AWC disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	SOL_CBN carbono (%)	% ARCILLA (CLAY)	% LIMOS (SILT)	% ARENA (SAND)	% ROCK
1	1.1a	0.13	225	1.34	0.26	212.59	2.42	13.5	29.0	57.5	20
		0.13	500	1.41	0.28	114.94	1.99	21.0	28.5	50.5	20
		0.14	1100	1.45	0.29	93.23	1.51	23.5	28.5	48.0	20
2	1.1b	0.14	200	1.56	0.17	835.23	0.51	9.0	14.0	77.0	20
		0.14	350	1.57	0.17	920.35	0.39	9.0	14.0	77.0	20
		0.18	550	1.59	0.26	595.82	0.39	12.0	26.0	62.0	20
3	1.2a	0.19	750	1.47	0.42	112.85	1.00	15.0	58.0	27.0	20
		0.11	200	1.40	0.17	378.77	1.96	9.0	14.0	77.0	40
		0.14	500	1.54	0.17	562.06	0.71	9.0	14.0	77.0	40
		0.18	1000	1.59	0.24	402.09	0.42	12.0	26.0	62.0	40
4	1.2b	0.20	1350	1.56	0.42	101.15	0.42	15.0	58.0	27.0	40
		0.14	170	1.42	0.24	232.33	1.78	12.8	26.4	60.8	40
		0.16	442	1.56	0.23	263.94	0.72	15.7	21.3	63.0	40
5	1.2c	0.17	950	1.59	0.24	317.46	0.44	14.8	23.3	62.0	40
		0.13	157	1.40	0.28	158.46	1.91	15.7	25.5	52.2	40
6	1.2d	0.16	464	1.51	0.27	174.22	1.09	16.9	27.9	55.1	40
7	1.2i	0.16	188	1.52	0.23	357.03	0.97	11.0	23.8	65.3	40
8	1.3a	0.16	188	1.52	0.23	357.03	0.97	11.0	23.8	65.3	40
		0.17	200	1.49	0.23	377.92	0.83	11.3	23.7	65.0	20
9	1.3b	0.17	533	1.60	0.25	580.62	0.32	13.3	24.7	62.0	20
		0.16	167	1.52	0.22	433.63	0.97	12.0	21.0	67.0	20
10	1.4a	0.11	200	1.05	0.19	299.41	4.84	8.0	15.0	77.0	20
		0.15	350	1.59	0.22	323.98	0.49	20.0	13.0	67.0	20
		0.15	900	1.60	0.25	239.76	0.23	23.0	16.0	61.0	20
11	1.4c	0.13	150	1.44	0.22	278.22	1.77	14.0	19.0	67.0	20
		0.15	400	1.55	0.24	277.19	0.80	18.0	19.0	63.0	20
		0.12	800	1.49	0.23	165.49	1.67	21.0	13.0	66.0	20
12	1.5d	0.13	175	1.38	0.30	74.23	2.16	25.0	31.0	44.0	20
		0.15	400	1.48	0.30	61.46	1.05	27.5	28.0	44.5	20
		0.15	700	1.50	0.30	40.47	0.71	31.0	26.5	42.5	20

C. PREPARACIÓN Y CORRECCIÓN DEL MDE

Al igual que la información de Cobertura Vegetal y de Suelos; el MDE también fue recortado, además se le practicó una corrección por llenado de sumideros puesto que es necesario encontrar las zonas donde no es posible que el agua drene hacia alguna de las direcciones, pues la dirección del flujo determina el sentido y orientación en que fluye el agua, de esta forma se puede observar cómo se acumula el flujo. Todas estas trayectorias de drenaje de agua se generan en función de las condiciones topográficas.



Fuente: Baquero Olga Lucía.

FIGURA 6. DIRECCIÓN DEL FLUJO DE AGUA

Como se puede apreciar en la siguiente figura el píxel 763 está rodeado de alturas mayores, si existiese un flujo de agua que pasara por esa zona, ésta se quedaría estancada allí y no permitiría la generación de un drenaje continuo y coherente de acuerdo a la topografía de la zona.

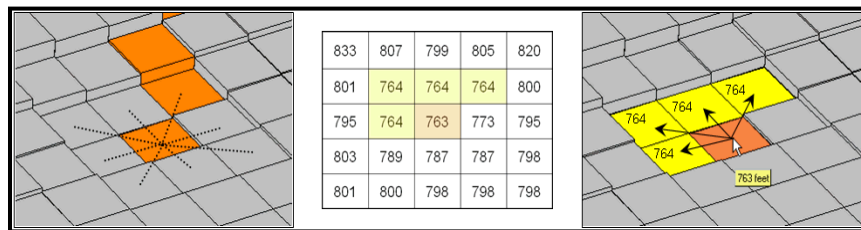


FIGURA 7. ESTANCAMIENTO DEL FLUJO DE AGUA

D. ESTRUCTURACIÓN DE LA INFORMACIÓN HIDROMETEOROLÓGICA

En primer medida se realizó la proyección al Sistema de Referencia seleccionado para el proyecto. Posteriormente se realizó el ordenamiento y la estandarización de la información de acuerdo al formato en que el modelo SWAT requiere los datos climatológicos de entrada.

Para realizar la calibración y validación del modelo es necesario contar con registros de caudal y sedimentos en lo posible a nivel diario; Para el presente proyecto se conto con información de la estación SOCSI para los años 1994 y 2008 y registros de caudales realizadas por las asociaciones de Regantes del valle del Rio Cañete en el mismo lugar para

un periodo de 1993 y 2009, además se cuenta con unos registros mensuales de las estaciones Chavín, Tinco, Aguas Calientes y Tanta de ELECTROPERU.

Es necesario aclarar que por el momento no se cuenta con información de Sedimentos registrados que permita realizar la calibración y validación de los resultados obtenidos en la modelación. La Figura 8 presenta la ubicación geográfica de las estaciones de precipitación, temperatura y caudales a emplear en la simulación de las tres cuencas.

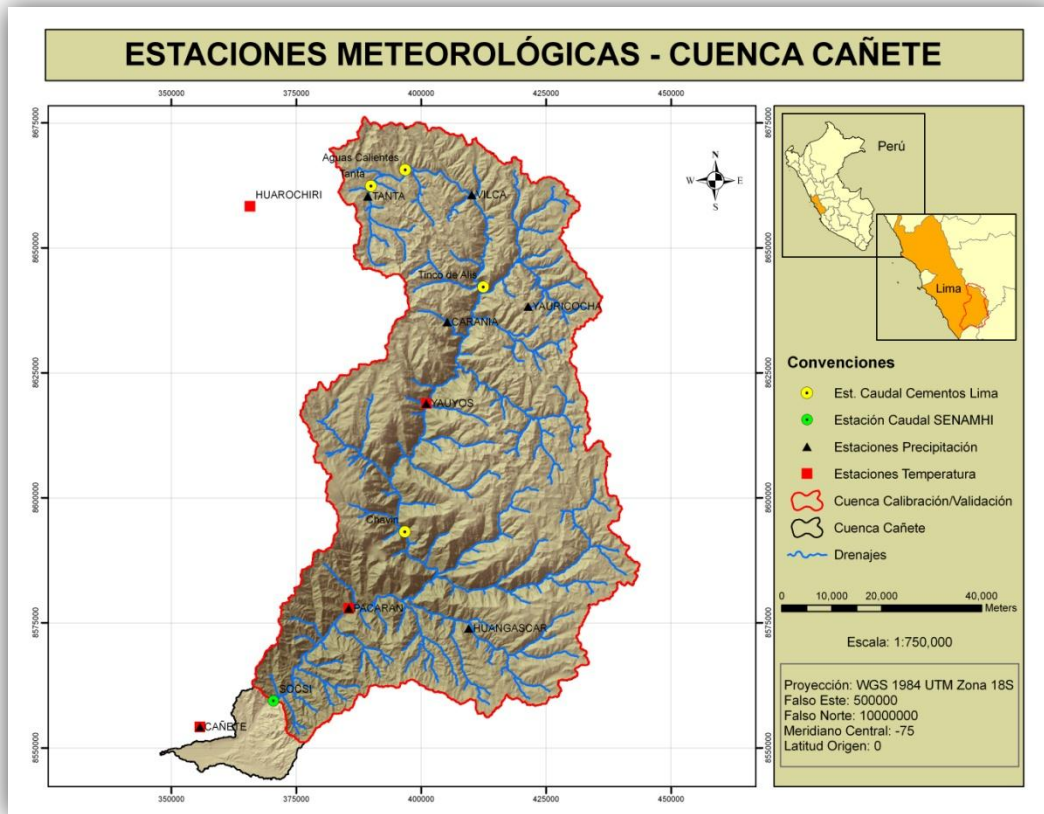


FIGURA 8. UBICACIÓN DE LAS ESTACIONES CLIMATOLÓGICAS EN LA CUENCA CAÑETE

E. GENERACIÓN DE LAS UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA

Definido el límite de la cuenca con un área de **5793.979 km²**, es necesario realizar una subdivididas en subcuencas (Figuras 9) con el objetivo de mejorar la exactitud en los cálculos de caudales y sedimentos presentes; para posteriormente en el modelo SWAT definir las URH (Unidades de Respuesta Hidrológica).

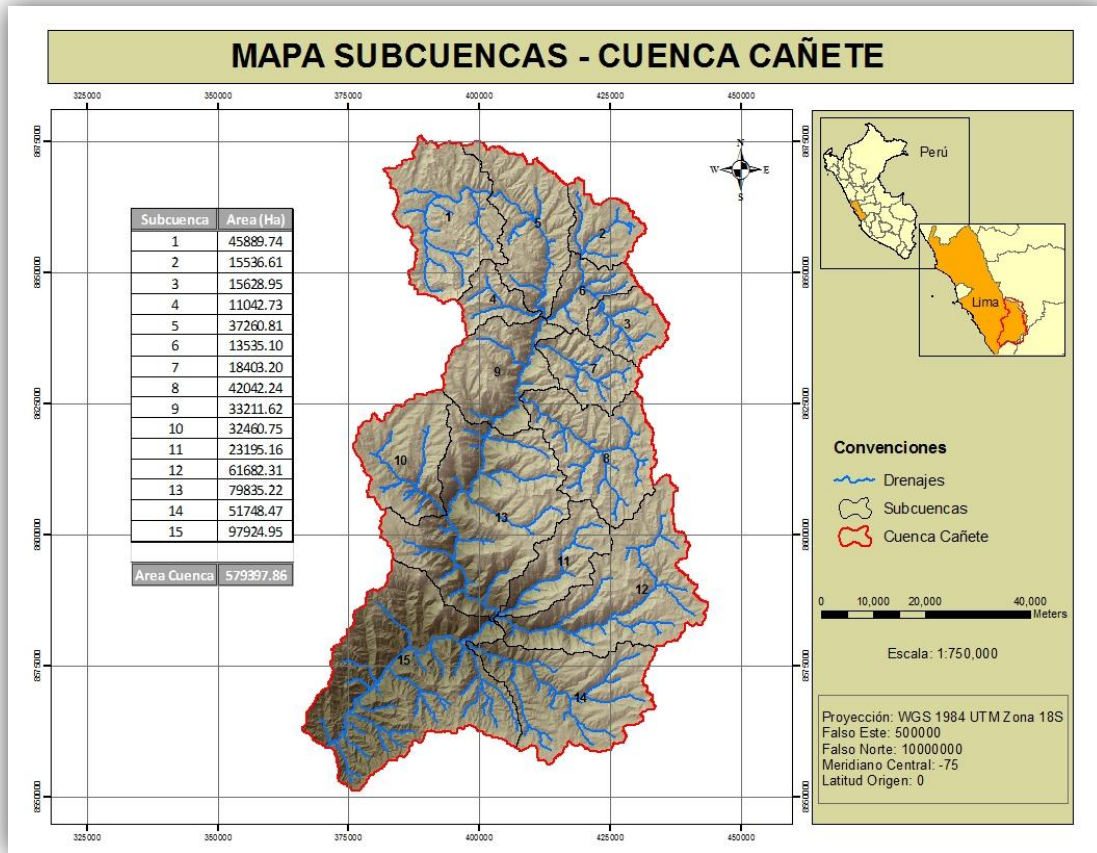


FIGURA 9. MAPA DE SUBCUENCAS CUENCA CAÑETE

Subcuenca	Area (Ha)	Lat	Long	Elev	ElevMin	ElevMax
1	45889.74	-12.12	-75.98	4831	4022	5819
2	15536.61	-12.14	-75.70	4467	3897	4913
3	15628.95	-12.30	-75.66	4747	3773	5036
4	11042.73	-12.25	-75.89	4486	3276	5861
5	37260.81	-12.12	-75.85	4540	3105	5404
6	13535.10	-12.23	-75.72	4209	3122	5010
7	18403.20	-12.38	-75.73	4414	2929	5271
8	42042.24	-12.52	-75.73	4381	2633	5272
9	33211.62	-12.39	-75.88	3733	2310	5623
10	32460.75	-12.54	-76.05	4471	1741	4970
11	23195.16	-12.72	-75.79	4547	1178	5135
12	61682.31	-12.79	-75.71	4613	1095	5115
13	79835.22	-12.64	-75.93	3786	1082	5282
14	51748.47	-12.95	-75.78	3444	986	4860
15	97924.95	-12.87	-76.04	1183	308	4418
Area Cuenca	579397.9					

TABLA 7. PARÁMETROS GENERALES DE LAS SUBCUENCAS

Una vez establecidos el límite de la cuenca y la división en subcuencas de la misma, se ingresó la información de suelos, uso de la tierra, clima, relieve y red de drenaje al modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) versión ArcSWAT bajo la plataforma de ArcGIS (9.3). Este modelo permite analizar variables hidrológicas de la cuenca como producción de agua al caudal, producción de sedimentos, evapotranspiración potencial y real, contenido de agua en el suelo, flujo lateral, percolación, recarga de acuíferos, entre otros, de manera integral. Es decir, los valores de estas variables son el resultado de la interacción agua-suelo-clima-uso-relieve en la cuenca para el periodo de tiempo simulado. Este tiempo de simulación está dado por el periodo de tiempo de información climática disponible. Es decir, en este caso se realizó una modelación hidrológica para un periodo de 19 años (1991-2009).

Es por esta razón, que el territorio de una cuenca no presenta un comportamiento hidrológico homogéneo, ya que pueden darse múltiples interacciones de este tipo en la medida que el suelo, el uso, el clima, y el relieve varían espacialmente. Estas diferentes combinaciones dan resultado a porciones del territorio con un comportamiento hidrológico específico llamadas Unidades de Respuesta Hidrológica - URH.

Por medio de la integración de la información mencionada anteriormente, se determinaron **2926** Unidades de Respuesta Hidrológica (URH) en la cuenca de estudio, las cuales corresponden a unidades del territorio que presentan condiciones de uso de tierra, suelo y topografía homogéneos y por lo tanto producen un impacto particular sobre la cantidad y calidad del agua de la cuenca (Figuras 10). Con la información de las URH, es posible identificar qué áreas en la cuenca son las que contribuyen más al aporte de sedimentos y agua al caudal.

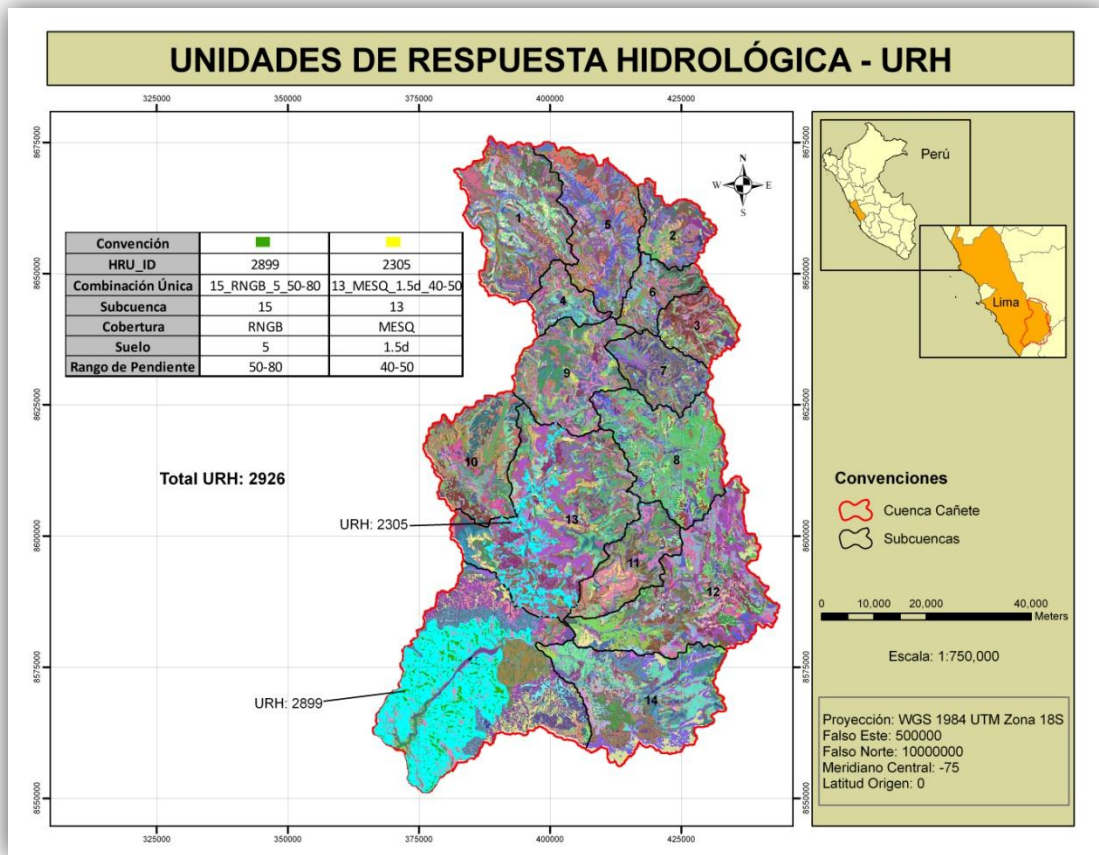


FIGURA 10. MAPA DE UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA CUENCA CAÑETE

F. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Según Tucci (2005), las incertidumbres que implican una simulación hidrológica son causadas principalmente por errores en las variables de entrada, la limitación de la estructura del modelo y la incertidumbre en la estimación de parámetros, teniendo presente que la mayor incertidumbre está asociada a los valores de los parámetros calibrados obtenidos con procesos de calibración automática. Es por esta razón que el Análisis de Sensibilidad, Calibración y análisis de incertidumbre son procesos vitales y de aspectos entrelazados de aplicación en el modelo SWAT y en otros modelos. El análisis de sensibilidad y las técnicas de calibración pueden ser evaluados con una amplia gama de graficas y/o procesos estadísticos. El análisis de incertidumbre es definido por Shirmohammadi et al, (2006) como “la cantidad estimada en que un valor observado o calculado puede apartarse del valor verdadero” y analiza las fuentes de incertidumbre en

los algoritmos del modelo, la calibración del modelo y validación de los datos, las variables de entrada y escala las fuentes claves de incertidumbre.

Análisis de sensibilidad.

El análisis de sensibilidad permite realizar la predicción de parámetros que tienen el mayor impacto sobre la simulación hidrológica y de sedimentos; proporcionando un conocimiento de la influencia de los parámetros en el modelo y posibilitando la racionalización de las etapas de calibración y el establecimiento de los parámetros que tienen una influencia significativa en los resultados del modelo con respecto a las observaciones reales.

Para el análisis de sensibilidad, el modelo SWAT2005 ha incorporado el método LH-OAT; el cual combina el diseño OAT (One factor At a Time) y el método de muestreo aleatorio LH (Latin Hypercube), tomando el muestreo de Latin Hypercube como puntos iniciales para el diseño OAT.

El concepto del método de muestreo aleatorio LH (Latin Hypercube) está basado en el método de Monte-Carlo, sin embargo utiliza un método de muestreo estratificado que permite la estimación más eficiente de los rangos posibles de los valores de las variables de entrada del modelo utilizado para el análisis. En este método se distribuyen los parámetros en N rangos, cada uno con una probabilidad de ocurrencia igual a $1 / N$ y el modelo ejecuta N corridas al azar de las combinaciones aleatorias de los parámetros. Los valores aleatorios de los parámetros son generados de forma que cada intervalo es simulado sólo una vez. Los resultados del modelo son típicamente analizados con múltiples variables de regresión lineal multivariada o métodos de correlación estadística. El Latin Hypercube es comúnmente aplicado en modelos de calidad del agua debido a su eficiencia y solidez (Weijers y Vanrolleghem, 1997; Vandenberghe et al., 2001). El principal inconveniente es la hipótesis sobre la linealidad.

EL diseño OAT es un método de análisis local propuesto por Morris (1991); es un ejemplo de una integración de un método de sensibilidad local a un método global, que analiza el efecto sobre los resultados de una modelación, con respecto al cambio en el valor de una única variable, mientras las demás variables permanecen constantes. Los métodos locales evalúan la media y la varianza de los datos de salida del modelo comparando los parámetros de entrada y de salida del modelo en un único punto.

$$S = M(x_1, \dots, x_i + \Delta x_i, \dots, x_n) - M(x_1, \dots, x_i)$$

S= sensibilidad del parámetro

ΔX = cambios en el parámetro

M= dato de salida del modelo

X= parámetro del modelo

En este método, el efecto final sobre los resultados, es la suma de los efectos parciales de los cambios hechos por cada variable. Los efectos elementales obtenidos mediante este

procedimiento permite al usuario procesar todo el conjunto de parámetros de entrada con un requisito de computación bajo. De esta manera, las sensibilidades locales se integran a una medida de la sensibilidad global. El diseño OAT es un método muy útil para la modelización de SWAT (Franco et al., 2002; van Griensven et al., 2001), ya que es capaz de analizar la sensibilidad de gran número de parámetros.

El método de análisis de sensibilidad LH-OAT combina así la solidez del método de muestreo Latin Hypercube que garantiza que todos los rangos de todos los parámetros han sido incluidos en la muestra con la precisión del diseño OAT asegurando que los cambios en los parámetros de salida en cada corrida del modelo pueden ser sin ambigüedades atribuidos a los cambios en los parámetros de entrada.

Calibración y Validación

Todos los modelos requieren una calibración para ajustar al menos algunos de sus parámetros (Sorooshian et., 1998). La calibración de un modelo como SWAT consiste en realizar un test de los parámetros de salida (caudal, sedimentos, escorrentía, etc.) entre los caudales simulados y los observados o tomados en campo; con la finalidad de poder determinar cuáles parámetros de entrada deben ser ajustados en el modelo.

SWAT es un modelo hidrológico semidistribuido y en consecuencia tiene potencialmente mucho parámetros a calibrar (miles) los cuales son imposibles de calibrar todos. Anqué se hace la anotación de que la selección de parámetros manual, es casi inevitable debido a la complejidad de los modelos a gran escala. Basados en el análisis de sensibilidad (el cual varía un parámetro secuencialmente mientras los otros permanecen constantes) se decidirá cual parámetro se incluirá en el proceso de calibración.

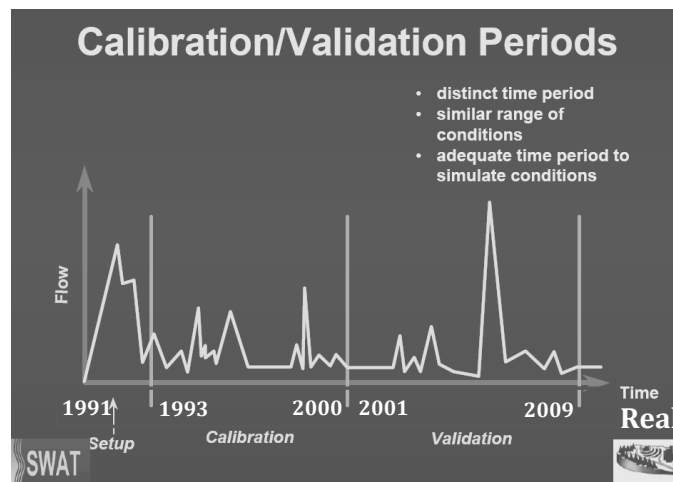
Para el proceso de calibración se recomienda en una primera medida realizar una calibración manual que permita ajustar de manera general los resultados, es decir, poder establecer el tiempo de concentración (Volumen máximo), la escorrentía superficial total, el flujo de base, etc. y después dependiendo de los resultados obtenidos se puede implementar un método de calibración automática como lo brinda la herramienta SWAT-CUP, con la finalidad de mejorar las estadísticas obtenidas en la calibración manual (para una serie de tiempo mensual o diaria) y que permita identificar los parámetros claves para la calibración y la incertidumbre obtenida.

En el presente proyecto se utilizó el método de calibración manual para los parámetros que influyen en el caudal; donde se calibro en diferentes subcuencas (1, 6, 13 y 15) de manera separada empleando gráficas y procesos estadísticos que permiten validar los resultados obtenidos.

Con respecto a los sedimentos trasportados en el caudal del río se hizo una primera aproximación para ver el aporte de volumen de sedimentos por hectárea en la cuenca

analizada, los valores obtenidos no pudieron ser validados, ya que por el momento no se contó con información de aforos de sedimentos.

Según lo propuesto en el manual de Calibración/Validación de SWAT (Figura 11) es necesario dividir el rango de datos disponibles en dos grupos; la calibración de los parámetros más sensitivos en los procesos modelados se realizó para el periodo correspondiente a 1993-2000 y para la validación o evaluación de la capacidad del modelo se tomó el rango 2001-2009. No se tiene en cuenta los dos primeros años (1991 y 1992), porque dentro de la modelación se debe de tener un tiempo para que la recarga de acuíferos se lleve a cabo. Una inicial calibración mensual fue realizada, seguida de una calibración diaria.



Fuente: Modificado Manual SWAT.

FIGURA 11. PERIODOS CALIBRACIÓN/VALIDACIÓN.

III. RESULTADOS MODELACIÓN HIDROLÓGICA

A. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD

A continuación se presentan los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad para los 26 parámetros globales que corresponden o tienen influencia en la variable del caudal (Stream Flow) del modelo; para determinar el grado de sensibilidad de los parámetros evaluados, el modelo estadístico en SWAT2005 los clasifica en un rango (Rank) de prioridad de 1-27 (rango que varía dependiendo del número de parámetros evaluados); identificando cuáles parámetros tienen mayor influencia sobre los resultados de caudal en el modelo. El rango de clasificación de parámetros está dado por:

- 1 muy importante
- 2 – 9 importante
- 10 – 26 relativamente importante
- 27 no importante

TABLA 8. RESULTADO DE ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD PARA LOS PARÁMETROS GLOBALES DEL FLUJO

NOMBRE VARIABLE EN SWAT	RANK	PARAMETRO	PROCESO
Tlaps	1	Temperature lapse rate [°C/km]	Clima
Cn2	2	Initial SCS CN II value	Cobertura
Esco	3	Soil evaporation compensation factor	Evaporación
Slope	4	Average slope steepness [m/m]	Pendiente
Ch_K2	5	Channel effective hydraulic conductivity [mm/hr]	Enrutamiento
Sol_Z	6	Soil depth [mm]	Suelos
Sol_K	7	Saturated hydraulic conductivity [mm/hr]	Suelos
Sol_Awc	8	Available water capacity [mm H2O/mm soil]	Suelos
Gwqmn	9	Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	Acuíferos
Gw_Revap	10	Groundwater "revap" coefficient	Acuíferos
Alpha_Bf	11	Baseflow alpha factor [days]	Acuíferos
Canmx	12	Maximum canopy storage [mm]	Cobertura
Blai	13	Maximum potential leaf area index	Cobertura
Gw_Delay	14	Groundwater delay [days]	Acuíferos
Ch_N2	15	Manning's n value for main channel	Enrutamiento
Revapmn	16	Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap" [mm]	Acuíferos
Biomix	17	Biological mixing efficiency	Cobertura
Surlag	18	Surface runoff lag time [days]	Escorrentía
Epco	27	Plant uptake compensation factor	Evaporación
Sftmp	27	Snowfall temperature [°C]	Nieve
Slsbbsn	27	Average slope length [m]	Pendiente
Smfmn	27	Melt factor for snow on December 21 [mm H2O/°C-day]	Nieve
Smfmx	27	Melt factor for snow on June 21 [mm H2O/°C-day]	Nieve
Smtmp	27	Snow melt base temperature [°C]	Nieve
Sol_Alb	27	Moist soil albedo	Suelos
Timp	27	Snow pack temperature lag factor	Nieve

En los resultados del análisis de sensibilidad se identificó que de los 26 parámetros globales analizados hay 1 parámetro como el más sensible (sensibilidad global 1) que hace parte del ajuste del clima. Además, hay 8 parámetros importantes (sensibilidad global >2 y sensibilidad global <= de 9) relacionados a los procesos de Suelos, Cobertura, Evaporación, Pendiente y de movimiento de agua en el suelo. Por último, hay 9 parámetros "ligeramente importantes" (sensibilidad global >10 y sensibilidad global <=20), y 8 parámetros que no causan cambio a la salida del modelo (sensibilidad global de 27).

A manera de resumen se determina que el parámetro más sensible en el modelo corresponde al **Gradiente de Temperatura (TLAPS)** este parámetro se calcula para ajustar la temperatura de las bandas de elevación de las subcuencas. Para ajustar la temperatura, el registro de la elevación de la estación meteorológica ingresada se compara con la elevación especificada para la banda de elevación. Si no se definen las bandas de altitud, la temperatura generada o a leer desde el archivo *.Tmp* se utiliza para la subcuencas sin ajuste. Un valor positivo del TLAPS indica un aumento de la temperatura con un aumento en la elevación, mientras que un valor negativo indica una disminución de la temperatura con un aumento en la elevación. Si no se introduce un valor para TLAPS, el modelo establece TLAPS = -6 °C/Km. Dentro de los parámetros que tienen un nivel alto de importancia de sensibilidad, encontramos:

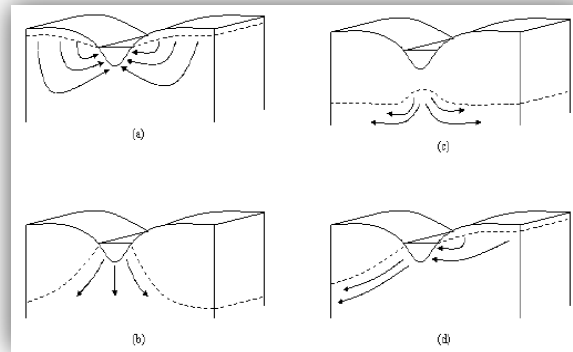
CN2 Numero de Curva de escorrentía inicial en condiciones de humedad II. Es un parámetro empírico utilizado en hidrología para la predicción de la escorrentía directa o infiltración por las fuertes lluvias; este numero es una función de la permeabilidad del suelo, uso del suelo y los antecedentes de las condiciones de agua del suelo. Este método de curva fue desarrollado por el Servicio de Conservación de Suelos o SCS del USDA. Los Valores de CN que están en la base de datos de SWAT son apropiadas para pendientes menores al 5%.

Factor de compensación para la evaporación del suelo (ESCO), este parámetro permite al usuario modificar la profundidad del perfil del suelo a la cual la demanda de evaporación es permitida para satisfacer la demanda de evaporación del suelo en el efecto de la acción capilar; este parámetro varía entre (0.01 y 1); cuando este valor es reducido, "el modelo es capaz de extraer más de la demanda de evaporación de los niveles más bajos". SWAT2005 supone que el 50% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 10 mm del suelo y el 95% de la demanda de evaporación se extrae de los primeros 100 mm del suelo.

El valor promedio de pendiente de la ladera (SLOPE): determina la geomorfología de cada una de las subcuencas y a su vez tienen influencia en la velocidad de enrutamiento del agua y los sedimentos hacia el canal principal del caudal.

Conductividad Hidráulica Efectiva en el Canal (CH_K2) este parámetro se calcula para la corriente o canal principal; donde las corrientes en el Modelo SWAT2005 se pueden clasificar dependiendo de la relación que existe con el sistema de aguas subterráneas. Una corriente situada en un área de descarga que recibe el flujo de agua subterránea es una corriente que gana mayor flujo (Figura 12-a). Este tipo de corriente se caracteriza por un

aumento en la descarga aguas abajo. Una corriente situada en un área de recarga es una corriente de pérdida de flujo. Este tipo de corriente se caracteriza por una disminución en la descarga aguas abajo. Una corriente de pérdida de flujo se puede conectar al flujo de aguas subterráneas de dos maneras (Figura 12-b) o (Figura 12-c). Una corriente que a la vez recibe y pierde el flujo de agua subterránea presenta un flujo continuo (Figura 12-d).



Fuente: Manual Teórico SWAT2005.

FIGURA 12. RELACIÓN ENTRE LA CORRIENTE Y EL AGUA SUBTERRÁNEA

La Conductividad Hidráulica (SOL_K) de los suelos es el parámetro que determina la habilidad de un suelo de conducir el agua a través de las capas del suelo, teniendo impacto en el flujo base del caudal. Cabe anotar que esta variable es la que normalmente no se encuentra disponible en los estudios de suelos de los países andino, en este caso Colombia; por lo cual casi siempre toca recurrir a la herramienta “Soil Water Characteristics Tool” (Saxton, 1986 - <http://hydrolab.arsusda.gov/soilwater/Index.htm>) que calcula la tensión de agua del suelo, la conductividad y la capacidad de retención de agua basada en la textura del suelo, la materia orgánica, contenido de grava, la salinidad, y la compactación para suelos con materia orgánica menor al 10%. Lo que hace necesario que estos valores necesiten ser ajustados con base estudios de suelos en regiones con mayor contenido de materia orgánica, característica muy común en la región Andina.

La Disponibilidad de Agua del Suelo (SOL_AWC): también referida como la capacidad disponible de agua, es calculada; restando la fracción del agua presente en el punto de marchites a la capacidad de campo ($AWC = FC - WP$). Donde AWC es el contenido de agua disponible en el suelo para la planta, FC es la capacidad de campo, y el WP es el punto de marchites. El SWAT estima el contenido volumétrico de agua cada capa del suelo.

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

B. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

Tomando como base la experiencia obtenida en la modelación de cuencas en la región Andina y de acuerdo a las recomendaciones sugeridas en estos casos por los autores de SWAT, se modificaron algunos parámetros del modelo (Tabla 9) según los resultados obtenidos en el análisis de sensibilidad (parámetros más sensibles) para realizar una calibración manual del modelo. Todos los parámetros de entrada al modelo son constantes en los periodos de calibración y validación.

TABLA 9. RESUMEN DE LA CONFIGURACION INICIAL DE LOS PARAMETROS DEL MODELO SWAT

PARAMETRO	NOMBRE VARIABLE EN SWAT	RANGO	VALOR DEFULT	VALOR OBTENIDO CALIBRACION MANUAL
Baseflow alpha factor [days]	ALPHA_BF.gw	0 - 1	0.048	0.01
Groundwater delay [days]	GW_DELAY.gw	0 - 500	31	25
Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	GWQMN.gw	0 - 5000	0	1
Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap"	REVAPMN.gw	0 - 500	1	50
Soil evaporation compensation factor	ESCO.hru	0.01 - 1	0.95	1
Snow pack temperature lag factor	TIMP.bsn	0.01 - 1	1	0.5
Melt factor for snow on June 21 [mm H2O/°C-day]	SMFMX.bsn	0 - 10	4.5	3.5
Melt factor for snow on December 21 [mm H2O/°C-day]	SMFMN.bsn	0 - 10	4.5	1
Snow melt base temperature [°C]	SMTMP.bsn	± 5	0.5	2
Surface runoff lag time [days]	SURLAG.bsn	1 - 24	4	8
Manning's nvalue for main channel	CH_N2.rte	0 - 0.3	Varia por HRU	Varia por HRU
Initial SCS CN II value	CN2.mgt	20 - 90	Varia por HRU	Varia por HRU
Temperature lapse rate [°C/km]	TLAPS.sub	-20 - 20	0	-6.5

Los principales ajustes realizados en la calibración manual radican en las variables referentes a los procesos de acuíferos (variable con extensión .gw), al gradiente de temperatura (TLAPS.sub) y a las variables que interfieren en el proceso de generación de cobertura de nieve (SNOW FALL) y derretimiento de la misma (SNOW MELT) los cuales tiene la extensión .bsn dentro del modelo.

Los resultados del modelo fueron analizados de forma mensual y diaria, comparándolos con los registrados en la estación Sosci operada por SENAMHI que abarca el área total del área de la cuenca. Para el proceso de validación se compararon los caudales observados y simulados, con los parámetros ajustados en el proceso de calibración manual. En las Figuras 13 y 14 se presentan el caudal mensual y diario tanto para el periodo de calibración (1993-2000) como para el periodo de validación (2001-2009) y en la Tabla 10 las estadísticas descriptivas de los resultados obtenidos en la calibración manual.

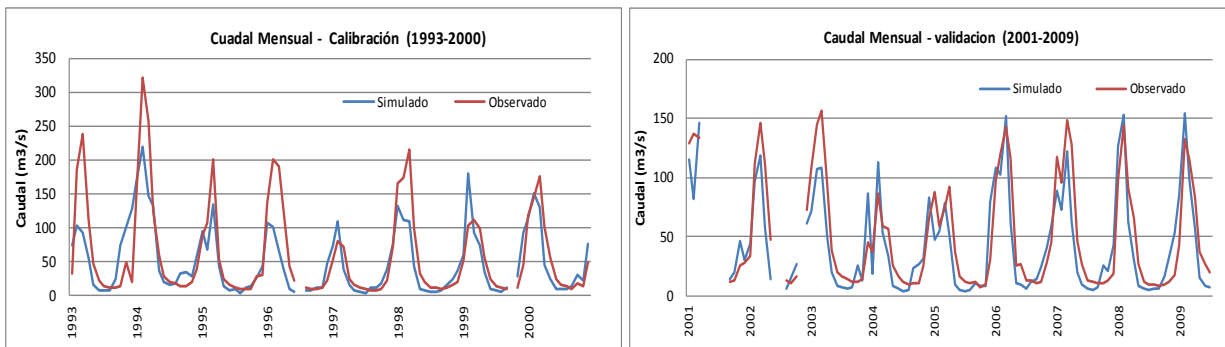


FIGURA 13. CAUDAL MENSUAL SIMULADO VS. AFORADO EST. SOCSI-CALIBRACION MANUAL

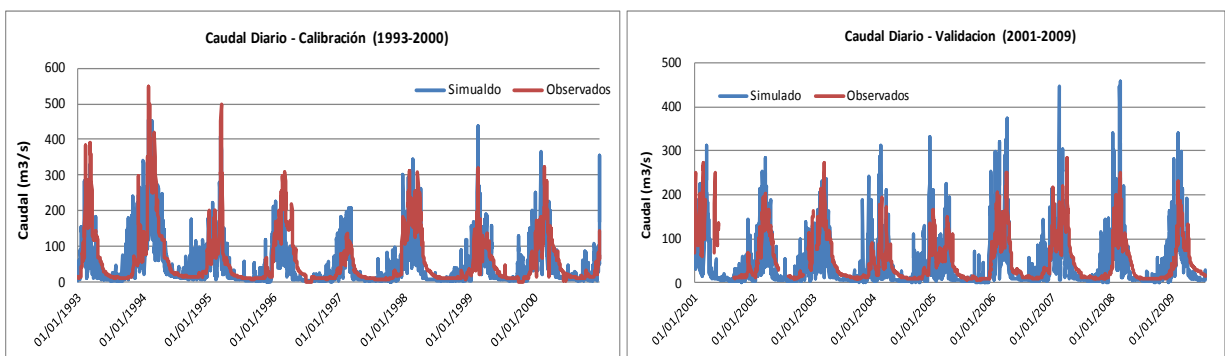


FIGURA 14. CAUDAL DIARIO SIMULADO VS. AFORADO EST. SOCSI-CALIBRACION MANUAL

En general los caudales simulados se ajustan bien a los caudales aforados en el área total de la cuenca (Estación Socsi), obteniendo ajustes razonables donde la mayor diferencia se presenta en los caudales máximos para ciertos eventos puntuales. Para la simulación mensual, en general, el flujo simulado se adapta muy bien con los valores observados. La eficiencia de Nash y el coeficiente de correlación son valores que demuestran un buen ajuste para el período de análisis, lo que demuestra la gran capacidad que tiene el modelo en predecir los valores promedios mensuales de caudal; con respecto a la simulación diaria, se presenta un mejor ajuste en el periodo de calibración y una disminución de este en el periodo de validación, debido a que el modelo no alcanza a predecir los niveles máximos de caudal.

Con la finalidad de validar la simulación en áreas diferentes al punto de cierre de la cuenca; se realizó la validación de los resultados de caudales mensuales obtenidos en la calibración manual en las estaciones de Aguas Calientes que abarca el caudal simulado hasta la Subcuenca 1 de la configuración de la simulación, Tinco hasta la Subcuenca 6 y Chavín hasta

la Subcuenca 13; la validación se realizó para los años 1993-1997 fecha correspondiente a los registros disponibles para estas estaciones. Los resultados obtenidos se presentan en las siguientes figuras al igual que las estadísticas descriptivas.

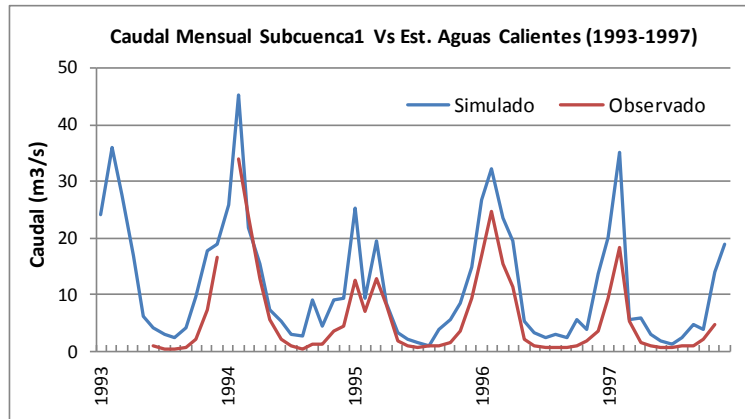


FIGURA 15. CAUDAL MENSUAL SIMULADO VS. AFORADO EST. AGUAS-CALIBRACION MANUAL

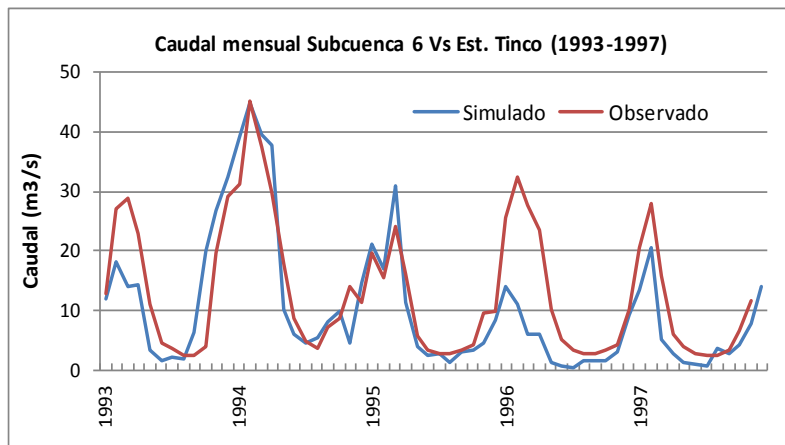


FIGURA 16. CAUDAL MENSUAL SIMULADO VS. AFORADO EST. TINCO-CALIBRACION MANUAL

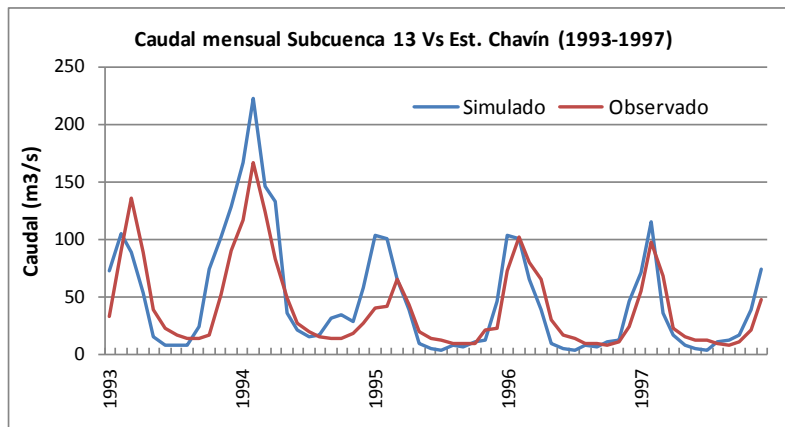


FIGURA 17. CAUDAL MENSUAL SIMULADO VS. AFORADO EST. CHAVÍN-CALIBRACION MANUAL

TABLA 10. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA RESULTADOS DEL MODELO EN TODAS LAS ESTACIONES

Coefficientes	Socsi - Regantes	Aguas Calientes	Tinco	Chavín
Coefficiente de Nash (NS)	0.82	0.01	0.80	0.66
Correlación (R2)	0.92	0.97	0.95	0.93

NS: Coeficiente de Nash-Sutcliff r: Coeficiente de Correlación

Se puede apreciar que los resultados obtenidos de la simulación mensual presentan un alto grado de correlación en todas las estaciones y de acuerdo a la eficiencia de Nash los resultados presentan ajustes razonables a excepción de la Subcuenca 1 validada con los registros de la estación Aguas Calientes, presentando un coeficiente de Nash de 0.01 que refleja bajo ajuste especialmente en los caudales máximos. Esto se debe principalmente a que es una de las subcuencas a las cual se le ha definido parámetros que permiten que el modelo ejecute procesos de desglaciación y ha sido sobreestimado este proceso.

También se puede apreciar que el nivel de correlación y el índice de Nash en la estación Chavín es más alto que en la estación Socsi en la cual los valores observados son superiores para ciertos meses puntuales en comparación con los resultados del modelo. Las principales hipótesis que justifican este efecto son: 1) No se ha validado el modelo en las subcuencas 12 y 14 correspondientes a los Ríos Caca y Huangascar respectivamente, los cuales hacen sus aportes al Rio cañete después de la estación Chavín y antes de la estación Socsi; se puede presentar que estas dos zonas estén aportando un caudal más alto que alcanza a registrar la estación Socsi ya sea por aporte de desglaciación o por precipitación y/o 2) Existe un nivel alto de incertidumbre en los datos observados en la estación Socsi de acuerdo al método de medición implementada y en estos meses pueden estar sobreestimados los registros.

C. LOCALIZACIÓN ESPACIAL DE URH Y SU PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS Y AGUA

Con los resultados de la modelación hidrológica se identificó la contribución de sedimentos y agua al caudal por parte de cada una de las URH durante el período simulado (19 años). Con base a estas dos variables hidrológicas se realizaron comparaciones entre las URH presentes en la cuenca para determinar aquellas que tienen un mayor producción de sedimentos basándose únicamente en la simulación del proceso de pérdida de suelo no calibrada, ya que no se contó con información de producción de sedimentos en la cuenca.

En las Figuras 18 y 20 se presentan las URH en cada una de las cuencas con su aporte de agua al caudal y producción de sedimentos respectivamente. En el **anexo 3**, están también priorizadas por el aporte de sedimentos y agua además de contener los valores de las demás variables que interfieren en el balance hídrico.

- Variables del balance hídrico por cada URH:
- No. de la URH
- Tipo de cobertura
- Subcuenca donde encuentra localizada
- Área (Km²)
- Precipitación anual (mm)
- Evapotranspiración real (mm)
- Percolación (mm)
- Escorrentía (mm)
- Perdida por transmisión (mm)
- Flujo Lateral (mm)
- Agua aportada por el acuífero superficial (mm)
- Producción de agua (H²O mm): Monto total de agua que sale de cada URH y que entra al cauce principal. (WYLD = SURQ + LATQ + GWQ - TLOSS - abstracciones estanque)
- Producción de sedimentos (toneladas métricas/ha): Cantidad de sedimentos producidos en cada URH y aportados al cauce principal

A continuación se presenta de forma gráfica el promedio multianual (1993-2009) de la producción de agua en (mm) y sedimentos (t/ha) por cada URH en la cuenca; lo que permite analizar de forma visual la variación en términos de contribución de agua al caudal (mm) a través de la Cuenca (Figura 18). Con base en esta información se han priorizado las áreas con mayor contribución de agua al caudal bajo las condiciones de línea base. Las 30 URH con la mayor contribución se detallan en la Tabla 11. En el anexo 3, se encuentran los valores de las variables del balance hídrico para cada una de las URH de las cuencas simuladas.

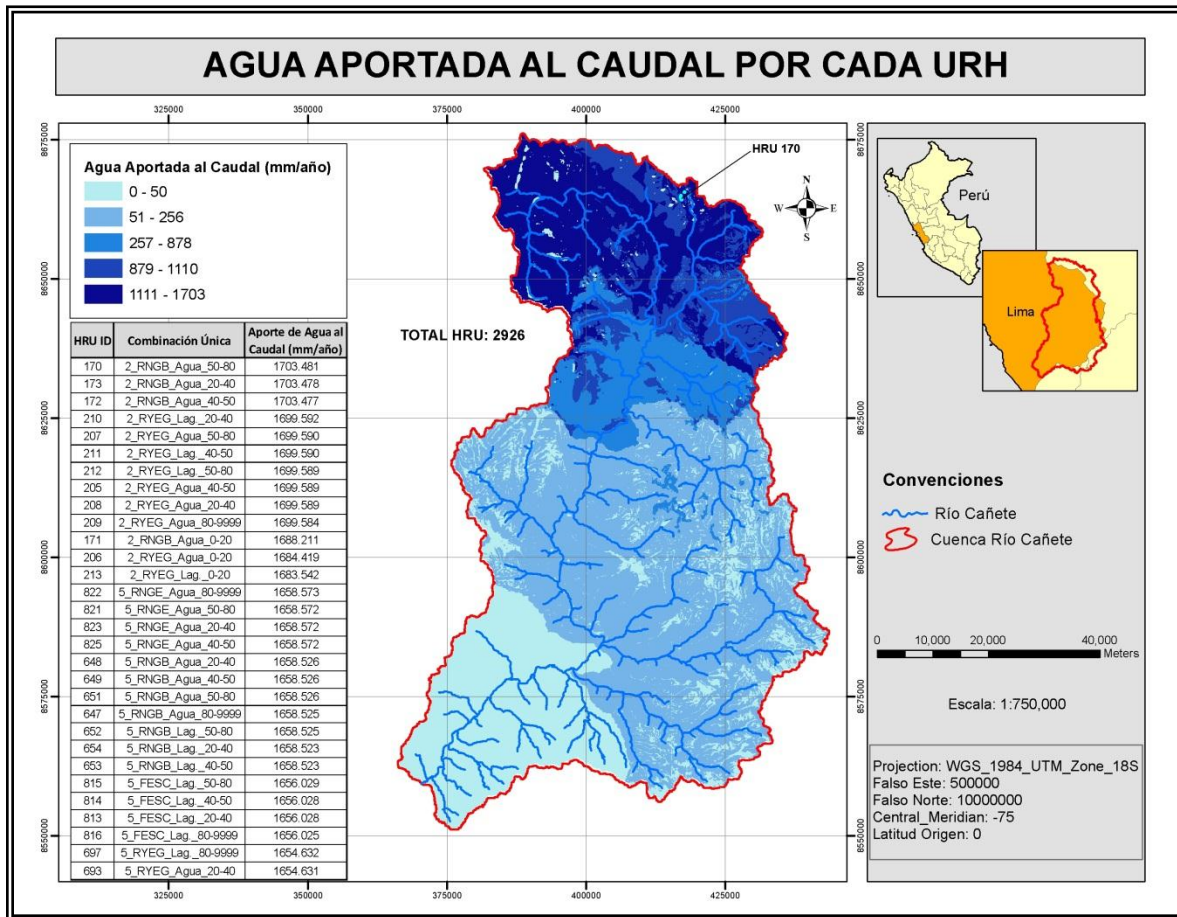


FIGURA 18. PRODUCCIÓN DEL PROMEDIO MULTIANUAL POR CADA UNIDAD DE RESPUESTA HIDROLÓGICA - URH.

Se puede apreciar que la mayor producción de agua para el periodo simulado (1991-2009) corresponde a la parte alta de la cuenca. Esta producción de caudal se encuentra muy ligada a la precipitación de las zonas y a los procesos de desglaciación.

A continuación se presenta la producción de caudal para cada uno de los distritos que se encuentran dentro del área de la cuenca del río cañete.

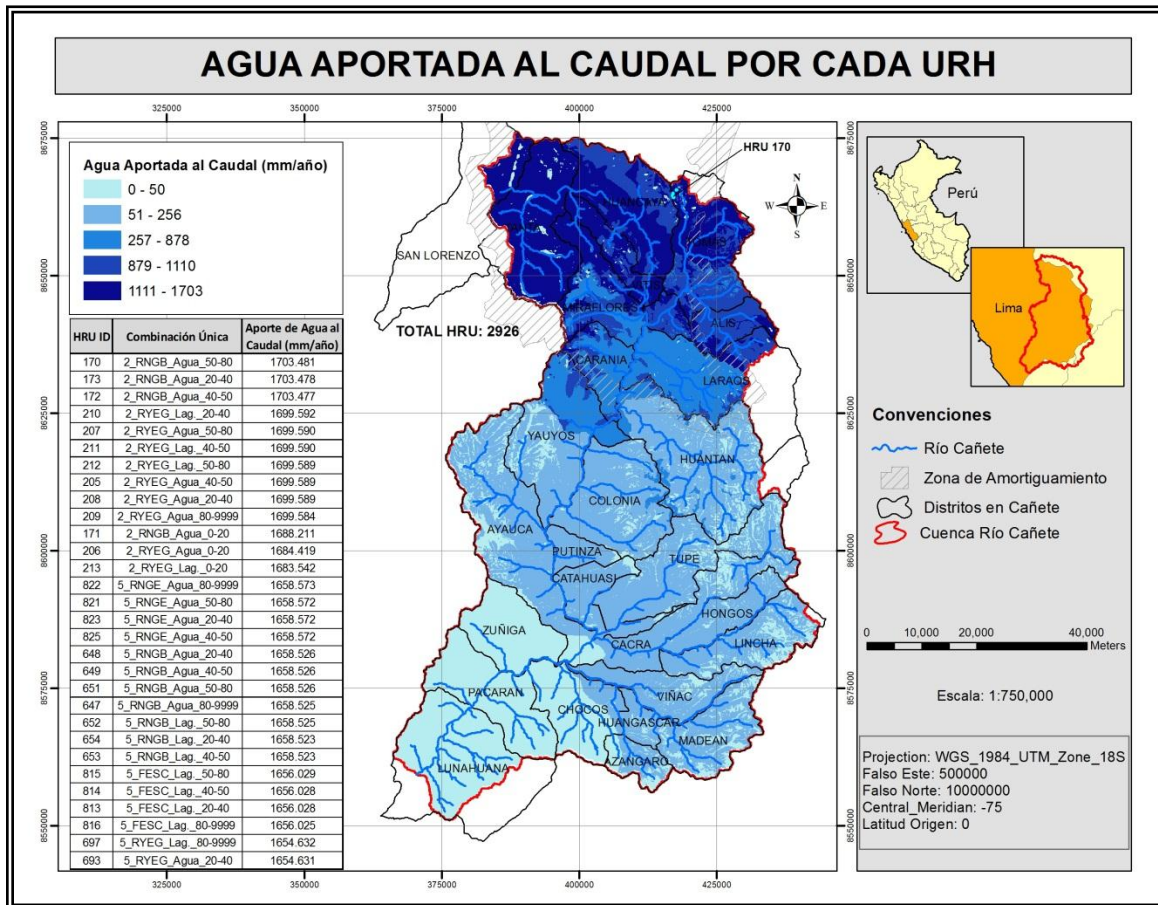


FIGURA 19. PRODUCCIÓN DE AGUA ANUAL POR CADA DISTRITO

TABLA 11. UNIDADES DE RESPUESTA HIDROLÓGICA CON MAYOR PRODUCCIÓN DE AGUA EN LA CUENCA

No. HRU	Combinación Única (Subcuenca, Cobertura, Suelo y Rango Pendiente)	Área (Ha)	Aporte de Agua al Caudal (mm/año)
170	2_RNGB_Agua_50-80	8.18	1703.48
173	2_RNGB_Agua_20-40	32.72	1703.48
172	2_RNGB_Agua_40-50	6.54	1703.48
210	2_RYEG_Lag_20-40	41.72	1699.59
207	2_RYEG_Agua_50-80	11.45	1699.59
211	2_RYEG_Lag_40-50	8.18	1699.59
212	2_RYEG_Lag_50-80	7.36	1699.59
205	2_RYEG_Agua_40-50	6.54	1699.59
208	2_RYEG_Agua_20-40	6.54	1699.59
209	2_RYEG_Agua_80-9999	2.45	1699.58
171	2_RNGB_Agua_0-20	8.18	1688.21
206	2_RYEG_Agua_0-20	8.18	1684.42
213	2_RYEG_Lag_0-20	56.45	1683.54
822	5_RNGE_Agua_80-9999	13.09	1658.57
821	5_RNGE_Agua_50-80	12.27	1658.57
823	5_RNGE_Agua_20-40	11.45	1658.57
825	5_RNGE_Agua_40-50	8.18	1658.57
648	5_RNGB_Agua_20-40	160.33	1658.53
649	5_RNGB_Agua_40-50	110.43	1658.53
651	5_RNGB_Agua_50-80	179.97	1658.53
647	5_RNGB_Agua_80-9999	31.09	1658.53
652	5_RNGB_Lag_50-80	3.27	1658.52
654	5_RNGB_Lag_20-40	6.54	1658.52
653	5_RNGB_Lag_40-50	2.46	1658.52
815	5_FESC_Lag_50-80	39.27	1656.03
814	5_FESC_Lag_40-50	9.82	1656.03
813	5_FESC_Lag_20-40	3.27	1656.03
816	5_FESC_Lag_80-9999	1.64	1656.02
697	5_RYEG_Lag_80-9999	3.27	1654.63
693	5_RYEG_Agua_20-40	56.44	1654.63

Estas URH identificadas espacialmente por ser “actualmente” importantes en la contribución de agua en la cuenca, son un elemento fundamental a la hora de priorizar y concretar medidas de adaptación a posibles cambios climáticos.

En general, se puede apreciar que en la cuenca del Río Cañete la mayor producción de agua (mm) para el período simulado (1991-2009) corresponde a la parte alta de la subcuenca del río en la zona de la reserva del Yauyos. Esta producción de caudal se encuentra muy ligada a la precipitación de las zonas y a los procesos de desglaciación y el buen ajuste del modelo en términos de producción de agua permitió priorizar las áreas que tienen una contribución importante. Este primer ejercicio de priorización resultó en 52602 ha ubicadas en los distritos de Miraflores, Alis, Laraos, Vitis, Thomas y Huancaya, con un aporte promedio anual entre 1111-1507 mm.

En otras palabras, las partes alta y media de la cuenca hasta la estación Chavín contribuyen con un 77% del agua que llega al caudal como se aprecia en **Error! Reference source not found.** y a partir de esta zona agua abajo se presenta una disminución importante de la precipitación y por ende de aporte de agua al caudal.

TABLA 12. CONTRIBUCIÓN AL CAUDAL DE DIFERENTES ZONAS DE LA CUENCA DEL RÍO CAÑETE

Ubicación	Caudal promedio mensual (m ³ /s)		Porcentaje de contribución al caudal*
	Simulado	Aforado	
Agua Calientes	11,50	6,40	12
Tinco	10.40	12.90	25
Chavín	47.70	40.00	77
Regantes (Socsi)	43.40	52.20	----

*Porcentaje de contribución al caudal aforado en el punto de Regantes (Socsi), que es el punto de cierre de toda la cuenca del río Cañete.

Debido a que no se pudo calibrar el modelo para la producción de sedimentos, no se puede tener como fuente confiable los resultados obtenidos en la simulación de forma cuantitativa; pero si se puede definir las áreas de mayor producción. En la Figura 20, las zonas que se aprecian en un color marrón intenso son las que más aportan mayor cantidad de sedimentos al caudal principal.

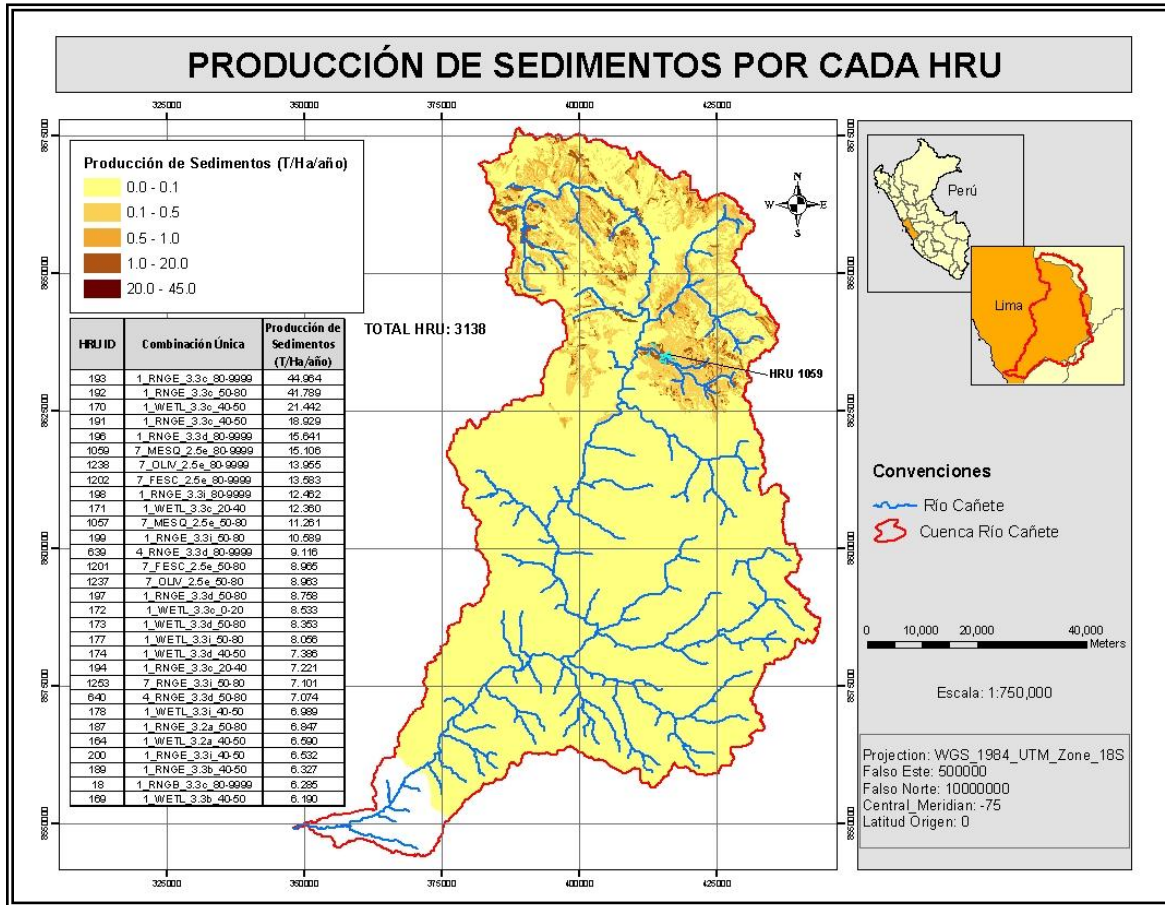


FIGURA 20. PRODUCCIÓN DE SEDIMENTOS ANUAL POR CADA UNIDAD DE RESPUESTA HIDROLÓGICA - URH.

IV. CONCLUSIONES

Los caudales tienen ajustes razonables. En general los caudales simulados se ajustan muy bien a los caudales aforados. La principal discrepancia se presenta en los ajustes de los caudales máximos, donde los valores simulados están un poco por encima de los valores de caudal aforado a nivel diario. Esto se debe fundamentalmente en muchas ocasiones, porque se realiza un solo registro de caudal por día y es posible que no se alcancen a registrar las crecidas que pueden presentarse durante las 24 horas del día; otra justificación es que los instrumentos de medición de caudal en muchas ocasiones tiene un nivel máximo y este es el mayor nivel que registra, situación que se presenta en la estación SOCSI. Un última opción, es que hay una salida de agua en el sistema cuya magnitud esta subestimada como aportes a acuíferos profundos, congelamiento, etc.

El uso de modelos hidrológicos sin previa calibración y validación, conduce a una sobreestimación considerable de las variables estudiadas. Esto es por lo menos cierto para cuencas de los Andes, como la cuenca de Cañete, donde los primeros resultados siempre tienden a sobreestimar los flujos base y pico del cauce principal. Mediante la calibración es posible lograr un ajuste aceptable de la dinámica y magnitud entre los datos observados y los simulados. Por tanto, la verdadera capacidad predictiva del modelo es mayor a la de un modelo sin previa calibración, tal como lo muestra la etapa de validación. Aun cuando la naturaleza de este tipo de modelos los hace aplicables a cuencas que no cuentan con estaciones de aforo en un buen periodo de datos, los resultados deben ser calibrados y validados con datos aforados en la cuenca.

Por último, el buen ajuste del modelo en términos de producción de agua permitió priorizar las áreas que tienen una contribución importante. Este primer ejercicio de priorización resulto en 52602 ha ubicadas en los distritos de Miraflores, Alis, Laraos, Vitis, Thomas y Huancaya, con un aporte promedio anual entre 1111-1507 mm. Aunque por sedimentos se ha hecho una priorización preliminar, estos resultados solo deben interpretarse como la importancia relativa de ciertas URH por su alta contribución de sedimentos. Sin embargo, en términos absolutos los valores de pérdida de suelo no son confiables ya que no hubo información de mediciones reales que permitieran evaluar el ajuste del modelo.

V. PASOS SIGUIENTES EN EL PROCESO DE INVESTIGACIÓN

- Validar el aporte de desglaciación de los nevados presentes en la cuenca
- Calibración de sedimentos (si existe información disponible)
- Incorporar información sobre acuíferos (a ser proveída por la Autoridad Local del Agua)

VI. BIBLIOGRAFÍA

Arnold, J. G, R. Srinivasan, R. S. Muttiah, and J. R. Williams (1998). Large area hydrologic modeling and assessment. Part I: Model development, *J. Am. Water Resour: Assoc.*, 34(1), 73-89.

Arnold, J. G., and J. R. Williams. 1987. Validation of SWRRB: Simulator for water resources in rural basins. *J. Water Resour. Plan. Manage.* ASCE 113(2): 243 - 256.

Beven K, Binley A. 2000. The futures of distributed models-model calibration and uncertainty prediction. *Hydrological Process* 6:279-298.

Jones, P.G. 2006. MarkSim™: Una herramienta para producir datos diarios simulados de tiempo para cualquier punto en los trópicos; versión 1 en español, [CD-ROM] / P.G. Jones, P.K. Thornton, W. Díaz y P.W. Wilkens: editado por Annie L. Jones. Cali, CO: Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), 2005.

Neitsch, S.L., Arnold J.G., Williams J.R., 2005. SWAT - Soil and Water Assessment Tool – User’s manual, Vers. 2005. Grassland, Soil and Water Research Laboratory & Blackland Research Center, USDA-ARS (United States Department of Agriculture - Agricultural Research Service), Temple, TX 76502.

Tucci, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2.ed.rev. e aum. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678p.

Saxton, K. E.; Rawls, W. J.; Romberger, J. S. and Papendick, R. I. 1986. Estimating generalized soil-water characteristics from texture. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 50(4): 1031 – 1036.

Sorooshian, S., Yapo, P. O., y Gupta, H. V. (1998). Multi-objective Global Optimization for Hydrologic Models. 204 p.

ANEXOS

Anexo 1. Descripción de las unidades de Suelos

No.	SNAM	(K) USLE	SOL_Z profundidad (mm)	SOL_BD densidad aparente (g/cm ³)	SOL_AWC disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	SOL_CBN carbono (%)	% ARCILLA (CLAY)	% LIMOS (SILT)	% ARENA (SAND)	% ROCK
13	2.1a	0.14	150	1.30	0.27	173.33	2.62	13.7	34.3	52.0	40
		0.16	350	1.50	0.25	315.42	1.14	10.7	28.3	61.0	40
		0.16	717	1.48	0.27	212.95	1.17	14.0	30.3	55.7	40
		0.18	1133	1.55	0.32	179.86	0.66	15.3	38.0	46.7	40
14	2.1b	0.13	200	1.38	0.25	138.80	2.31	18.0	25.5	56.5	40
		0.16	600	1.54	0.25	176.20	0.83	18.5	23.5	58.0	40
		0.15	1100	1.54	0.26	101.84	0.75	23.5	22.0	54.5	40
15	2.1c	0.15	250	1.49	0.23	255.76	1.27	13.8	22.8	63.4	40
		0.15	450	1.55	0.19	528.73	0.66	9.5	17.0	73.5	40
		0.16	690	1.56	0.23	284.46	0.73	15.0	21.0	64.0	40
16	2.1d	0.12	175	1.37	0.28	57.54	2.39	27.0	26.3	46.8	40
		0.16	463	1.50	0.30	52.52	0.82	27.0	30.0	43.0	40
17	2.1i	0.12	200	1.28	0.28	38.00	3.31	32.5	29.0	38.5	40
18	2.1e	0.13	150	1.21	0.24	209.28	3.50	12.0	26.7	61.3	40
19	2.4a	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
20	2.4b	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
21	2.4c	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
22	2.4d	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
23	2.4i	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
24	2.4e	0.16	200	1.48	0.34	115.87	1.04	19.5	40.5	40.0	20
		0.17	425	1.51	0.34	120.95	0.79	20.0	39.0	41.0	20
		0.17	650	1.54	0.31	117.49	0.62	22.5	31.5	46.0	20
25	2.5a	0.14	175	1.47	0.28	141.35	1.42	20.0	27.5	52.5	20
		0.15	400	1.42	0.29	6.60	0.42	44.0	25.0	31.0	20
		0.15	613	1.50	0.30	34.28	0.70	32.5	24.0	43.5	20
		0.16	1160	1.55	0.30	65.21	0.31	28.8	23.6	47.6	20
26	2.5c	0.13	200	1.37	0.29	109.96	2.25	21.0	30.0	49.0	20
		0.15	350	1.50	0.29	70.73	1.00	27.0	25.0	48.0	20
		0.15	600	1.52	0.28	61.08	0.80	29.0	21.0	50.0	20
		0.16	800	1.55	0.30	91.14	0.42	26.0	26.0	48.0	20
27	2.5d	0.13	167	1.33	0.30	73.80	2.58	25.0	32.7	42.3	20
		0.13	433	1.36	0.31	68.25	1.96	25.3	35.3	39.3	20
		0.15	683	1.47	0.32	80.09	1.10	24.0	34.7	41.3	20
28	2.5i	0.13	150	1.27	0.25	158.07	3.30	17.0	24.0	59.0	20
		0.15	350	1.52	0.28	146.91	1.00	21.0	26.0	53.0	20
		0.16	700	1.56	0.27	195.60	0.62	21.0	22.0	57.0	20
29	2.5e	0.16	200	1.54	0.27	246.71	0.86	17.0	26.0	57.0	20
		0.16	400	1.57	0.24	348.55	0.62	17.0	19.0	64.0	20
30	2.3b	0.13	200	1.00	0.29	105.14	5.12	23.0	40.0	37.0	20
		0.14	500	1.39	0.33	38.68	1.43	30.0	40.0	30.0	20
		0.17	700	1.45	0.34	30.95	0.73	31.0	40.0	29.0	20

No.	SNAM	(K) USLE	SOL_Z profundidad (mm)	SOL_BD densidad aparente (g/cm ³)	SOL_AWC disponibilidad de agua en el suelo (mm/mm)	SOL_K conductividad hidráulica (mm/hr)	SOL_CBN carbono (%)	% ARCILLA (CLAY)	% LIMOS (SILT)	% ARENA (SAND)	% ROCK
31	2.3d	0.12	200	1.28	0.26	15.86	2.85	44.0	30.0	26.0	20
		0.16	350	1.29	0.26	5.72	0.81	52.0	32.0	16.0	20
32	2.3i	0.12	200	1.28	0.26	15.86	2.85	44.0	30.0	26.0	20
		0.16	350	1.29	0.26	5.72	0.81	52.0	32.0	16.0	20
33	3.1a	0.15	350	1.26	0.36	113.27	2.40	16.0	55.0	29.0	20
		0.15	550	1.35	0.36	109.01	1.86	17.0	51.0	32.0	20
		0.15	850	1.33	0.36	77.15	1.96	21.0	52.0	27.0	20
		0.26	1100	1.56	0.51	119.98	0.42	12.0	70.0	18.0	20
34	3.1b	0.13	150	1.03	0.24	242.12	4.70	10.0	27.0	63.0	20
		0.13	300	1.29	0.24	278.04	2.72	10.0	27.0	63.0	20
		0.17	500	1.56	0.28	327.08	0.62	15.0	29.0	56.0	20
35	3.1c	0.13	150	1.03	0.24	242.12	4.70	10.0	27.0	63.0	20
		0.13	300	1.29	0.24	278.04	2.72	10.0	27.0	63.0	20
		0.17	500	1.56	0.28	327.08	0.62	15.0	29.0	56.0	20
36	3.1d	0.13	250	1.11	0.30	122.09	4.08	19.0	40.0	41.0	20
37	3.1i	0.13	250	1.11	0.30	122.09	4.08	19.0	40.0	41.0	20
38	3.3b	0.13	150	1.25	0.23	354.72	3.10	9.0	24.0	67.0	10
		0.16	350	1.48	0.28	795.69	1.19	7.0	32.0	61.0	10
		0.13	550	1.30	0.20	651.65	2.31	3.0	23.0	74.0	10
		0.15	1000	1.58	0.19	9962.79	0.29	7.0	15.0	78.0	10
39	3.3c	0.14	150	0.95	0.33	228.84	4.37	9.0	52.0	39.0	10
		0.15	300	1.01	0.34	249.61	3.88	7.0	54.0	39.0	10
		0.16	450	1.48	0.38	193.22	1.04	19.0	43.0	38.0	10
40	3.3d	0.14	150	0.96	0.33	191.90	4.39	12.0	53.0	35.0	10
		0.15	350	0.93	0.34	190.45	4.47	12.0	55.0	33.0	10
41	3.3i	0.14	150	0.96	0.33	191.90	4.39	12.0	53.0	35.0	10
		0.15	350	0.93	0.34	190.45	4.47	12.0	55.0	33.0	10
42	3.2a	0.14	250	0.90	0.77	3208.35	29.84	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	400	0.90	0.49	1326.32	19.96	12.0	55.0	33.0	0
		0.14	500	0.74	0.22	112.73	3.74	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	700	0.90	0.50	1398.77	20.43	12.0	55.0	33.0	0
43	3.2b	0.14	250	0.90	0.77	3208.35	29.84	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	400	0.90	0.49	1326.32	19.96	12.0	55.0	33.0	0
		0.14	500	0.74	0.22	112.73	3.74	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	700	0.90	0.50	1398.77	20.43	12.0	55.0	33.0	0
44	3.2c	0.14	250	0.90	0.77	3208.35	29.84	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	400	0.90	0.49	1326.32	19.96	12.0	55.0	33.0	0
		0.14	500	0.74	0.22	112.73	3.74	12.0	53.0	35.0	0
		0.15	700	0.90	0.50	1398.77	20.43	12.0	55.0	33.0	0
45	So Fe(s)	0.19	100	1.61	0.25	786.25	0.17	6.4	30	63.6	40
		0.19	800	1.61	0.23	1422.41	0.06	2.4	30	67.6	40
		0.20	1800	1.61	0.29	1851.80	0.17	0.4	40	59.6	40
46	Fe	0.14	250	1.46	0.13	10.94	1.33	24	32	44	0
		0.16	500	1.54	0.12	10.81	0.64	22	29	49	0
		0.16	800	1.51	0.13	3.25	0.35	32	29	39	0
		0.18	900	1.53	0.15	9.20	0.52	20	45	35	0
		0.19	2000	1.60	0.12	48.97	0.29	5	40	55	0

Anexo 2. Valor de las variables sensibles después del proceso de calibración

PARAMETRO	SIGNIFICADO	RANGO POSIBLE	VALOR DESPUES CALIBRACION
Ch_K2	Channel effective hydraulic conductivity [mm/hr]	0 - 150	0
Alpha_Bf	Baseflow alpha factor [days]	0 - 1	0.01
Gw_Revap	Groundwater "revap" coefficient	0.02 - 0.2	0.02
Gwqmn	Threshold water depth in the shallow aquifer for flow [mm]	0 - 5000	1
Gw_Delay	Groundwater delay [days]	0 - 500	25
Revapmn	Threshold water depth in the shallow aquifer for "revap" [mm]	0 - 500	50
Esco	Soil evaporation compensation factor	0.01 - 1	1
Timp	Snow pack temperature lag factor	0.01 - 1	0.5
Epc0	Plant uptake compensation factor	0.01 - 1	1
Surlag	Surface runoff lag time [days]	1 - 24	8
SMFMX	Melt factor for snow on June 21 [mm H2O/°C-day]	0 - 10	3.5
SMFMN	Melt factor for snow on December 21 [mm H2O/°C-day]	0 - 10	1
SFTMP	Snowfall temperature [°C]	-5 - 5	1
SMTMP	Snow melt base temperature [°C]	-5 - 5	2
Sol_Z	Soil depth [mm]	0 - 3500	Varia para cada HRU
Sol_K	Saturated hydraulic conductivity [mm/hr]	0 - 2000	
Sol_Awc	Available water capacity [mm H2O/mm soil]	0 - 1	
Sol_Alb	Moist soil albedo	0 - 0.25	
Ch_N2	Manning's n value for main channel	0 - 0.3	
Slope	Average slope steepness [m/m]	0 - 0.6	
Biomix	Biological mixing efficiency	0 - 1	
Blai	Maximum potential leaf area index	0.5 - 10	
Cn2	Initial SCS CN II value	20 - 90	
Canmx	Maximum canopy storage [mm]	0 - 100	

Anexo 3. Balance Hídrico para las URH. (Archivo Excel adjunto)