



*Escuela Técnica Superior de  
Ingenieros de Caminos, Canales  
y Puertos.*  
UNIVERSIDAD DE CANTABRIA



# **Análisis de vulnerabilidad al cambio climático de la cuenca Paute (Ecuador)**

Trabajo realizado por:

*Myriam Andrea Calderón Cancelada*

Dirigido:

*Manuel del Jesus Peñil*

Titulación:

**Máster Universitario  
en Gestión Integrada  
de Sistemas Hídricos**

Santander, Octubre de 2016

**TRABAJO FINAL DE MASTER**

# CONTENIDO

<b>ANÁLISIS DE VULNERABILIDAD AL CAMBIO CLIMÁTICO DE LA CUENCA PAUTE (ECUADOR)</b> .....	<b>0</b>
<b>1. INTRODUCCIÓN</b> .....	<b>2</b>
<b>2. DESCRIPCIÓN DEL ÁREA Y CARACTERÍSTICAS DEL ESTUDIO</b> .....	<b>3</b>
CARACTERÍSTICAS DE LA CUENCA .....	3
CARACTERÍSTICAS CENTRAL HIDROELÉCTRICA PAUTE INTEGRAL .....	3
ESCENARIOS DE CAMBIO CLIMÁTICO .....	5
<b>3. DESCRIPCIÓN DE DATOS DE DATOS DE ENTRADA</b> .....	<b>6</b>
CLIMATOLOGÍA.....	6
• Estaciones Pluviométrica y termométricas.....	6
• Modelos de proyección de precipitación y temperatura en escenarios de cambio climático ....	6
MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN.....	7
TIPO DE SUELO .....	7
USOS DEL SUELO.....	8
CAUDALES MEDIDOS EN LA CUENCA DEL RÍO PAUTE.....	8
<b>4. METODOLOGÍA</b> .....	<b>9</b>
CARACTERIZACIÓN DE LA INFORMACIÓN PLUVIOMÉTRICA Y TERMOMÉTRICA.....	11
• Caracterización del periodo de referencia (1981-2010).....	11
• Proyecciones de precipitación y temperatura - escenarios de cambio climático .....	13
SIMULACIÓN NUMÉRICA-USO DE MODELOS HIDROLÓGICOS .....	15
• Simulación del escenario de referencia .....	15
• Simulación de Escenario cambio climático .....	19
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	19
<b>5. RESULTADOS</b> .....	<b>20</b>
ANÁLISIS DE RESULTADOS MODELO ENTRE RCPS Y PERIODOS HORIZONTE .....	20
• Simulación de caudal diario medio anual .....	20
• Simulación de sedimentos totales .....	23
ANÁLISIS ESPACIAL DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS .....	25
• Caudal diario Medio.....	25
• Simulación sedimentos .....	28
• Solidos suspendidos Totales (mg/l) .....	31
DISCUSIÓN DE RESULTADOS GENERADOS EN HEC HMS Y SWAT .....	34
• Caudal medio diario .....	34
• Sedimentos .....	37
• Análisis DAFO DE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS SWAT Y HECHMS.....	38
<b>6. CONCLUSIONES</b> .....	<b>40</b>
<b>7. REFERENCIAS</b> .....	<b>41</b>
<b>ANEXO 1 CARACTERIZACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROMETEREOLOGICA</b> .....	<b>0</b>
<b>ANEXO 2 PROYECCIONES DE USO DEL SUELO PARA LOS PERIODOS DE REFERENCIA</b> .....	<b>0</b>
<b>ANEXO 3 –MODELACION NUMÉRICA</b> .....	<b>0</b>
<b>ANEXO 4- CALIBRACIÓN DE LOS MODELO</b> .....	<b>0</b>

## 1. Introducción

El río Paute nace en los páramos del nudo de Portete a una altura de 4300 m.s.n.m, localizada en la región Austral de Ecuador, es uno de los ríos más importantes de Ecuador, para el año 2009 se estimaban un total de 4093 concesiones de agua, de las cuales el 91,5 % dedicaban a la generación hidroeléctrica, un 5,2 % se destina a riego y el 1,62% a consumo humano (Ministerio del Ambiente, 2009). Es así como su mayor potencial es la capacidad de generación de agua; considerada una cuenca estratégica, en la cual se asienta un sistema de generación hidroeléctrica vital para el país, la Central Hidroeléctrica Paute Integral. En la actualidad ésta realiza el aprovechamiento de las aguas del río Paute, siendo la central generadora más grande del país, con una capacidad instalada de 1.075 MW, lo cual representa el 32% de la capacidad total instalada en el Ecuador.

Los páramos, son ecosistemas alpinos neotropicales que cubren los Andes Tropicales, se considera que estos son una importante fuente de agua, los ríos alimentados por páramos se caracterizan por tener un caudal base elevado y sostenido gracias a la elevada capacidad de retención del agua de los suelos. Sin embargo, los páramos se enfrentan con la amenaza creciente por el cambio climático, ya que los aumentos de temperatura, se relaciona con cambios en la distribución de las especies vegetales, aumento en las tasas de evapotranspiración, y aumento en la sequía del suelo, lo anterior se traduce entonces en pérdida en la capacidad de retención de agua del suelo y aumento en la variabilidad de caudal. Sin embargo se resalta otros factores a corto plazo, como la presión de demográfica, cambios en el uso del suelo, y la expansión e intensificación de la agricultura y ganadería, que en su conjunto intensifican la erosión del suelo, modifican la cantidad calidad de agua para consumo y generación hidroeléctrica (Vuille, 2013).

De acuerdo a la importancia de la cuenca del río Paute, se hace necesario, el uso de herramientas que permitan evaluar el comportamiento de la cuenca respecto a cambio de uso del suelo y dinámicas climáticas globales que se proyectan a futuro. El presente informe describe la aplicación de los modelos SWAT y HECHMS, ambos de transferencia lluvia-caudal, para evaluar la vulnerabilidad del complejo hidroeléctrico Paute Integral, respecto a la variación de los caudales líquidos y sólidos en el río Paute, ante los escenarios de cambio climático y cambios de uso del suelo, a partir de un modelo calibrado y validado con datos de caudal del años 1981 a 2010, que corresponde a la simulación de la situación actual y proyecciones para los escenarios de cambio climático RCP 2.6, 4.5, 6 y 8.5 en los periodos 2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100.

Este proyecto, tiene por objetivo la evaluación de las proyecciones de caudales líquidos y sólidos de las Subcuencas en las que se localiza el complejo hidroeléctrico Paute Integral, para escenarios de cambio climático RCP 2.6, RCP4.5, RCP 6 y RCP8.5, con el fin de identificar si existen variaciones para los periodos futuros 2011-2040, 2041-2070 y 2071-20100, respecto al periodo de referencia actual (1981-2010), y si estas variaciones representan un riesgo para el uso hidroeléctrico, principal uso que se le da a la cuenca.

La estructura del documento en adelante consta de cuatro partes: Primero la descripción del área de estudio, sistema hidroeléctrico y escenarios de cambio climático. Segundo, información base disponible para el estudio. Tercero, Metodología seguida en el proceso de simulación del escenario de referencia y escenarios de cambio climático. Y cuarto, resultados y análisis de los resultados obtenidos. Igualmente se anexa información detallada de estos numerales al final del documento.

## 2. DESCRIPCION DEL ÁREA Y CARACTERISTICAS DEL ESTUDIO

A continuación se describe de forma general las características de la cuenca Paute, el sistema hidroeléctrico Paute Integral y los escenarios de cambio climático considerados en el presente estudio.

### Características de la cuenca

La cuenca del río Paute se ubica en la región del Austro de Ecuador (centro sur), entre la cordillera oriental y occidental de los Andes, en una extensión de 6436 km<sup>2</sup>. Los principales afluentes del río Paute nacen en la cordillera occidental de los Andes, en las lagunas de Cajas aproximadamente a 4000 metros de altura. En la ciudad de Cuenca se unen las Subcuencas de los ríos Yanuncay, Tomebamba, Tarqui y Machángara, formando el río Cuenca, en éste aguas abajo desembocan los ríos Burgay, Jardán y Cutilcay, formando el río Paute, el cual a su vez recibe otro gran número de drenajes tributarios ().

En el sitio denominado Amaluzá, se localiza el complejo hidroeléctrico Paute, luego de tener represamiento en este sector el río Paute pasa a formar parte del río Namangoza, el cual se une al río Zamora dando origen al río Santiago, éste finalmente desemboca en el río Amazonas.

Las cuencas de los Ríos Paute, el 35.9% del territorio está expuesto a amenaza alta y máxima de deslizamiento, el 11.5% a sequías y el 11.6% a inundaciones (Ministerio del Ambiente, 2009). Se destaca, el alto riesgo de deslizamientos, siendo el evento más recordado el deslizamiento de La Josefina, ocurrido en 1993, el cual provocó un represamiento que luego ocasionó una avenida de entre 7000 a 9000 m<sup>3</sup>/s. Respecto a los eventos de sequía, en los años 1999 y 2009 el Ecuador experimentó apagones debido a la sequía que azotaba al país reflejándose en la reducción de caudal en la presa Daniel Palacios (Ortega, 2013).

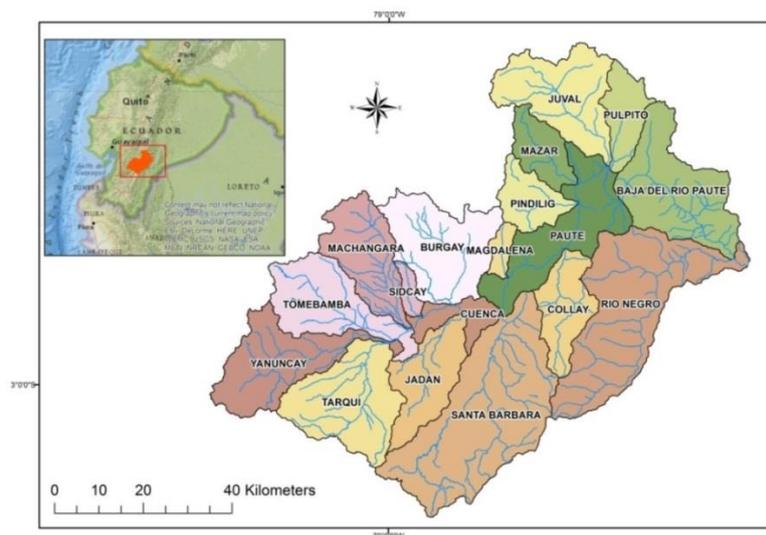


Figura 1 Cuenca Río Paute

### Características central hidroeléctrica Paute Integral

En las provincias del Azuay, Cañar y Morona Santiago, en la cuenca baja del río Paute, se desarrolla el Complejo Hidroeléctrico Paute Integral, conformado por Mazar, Molino, Sopladora y Cardenillo, cuatro centrales en cascada que aprovecharán el agua de la cuenca del

río Paute para generar energía (**Figura 2**) .A continuación se describe los componentes de este sistema hidroeléctrico.

- **Central Paute molino:** La central más grande del Ecuador, genera anualmente 4900 GWh, actualmente, el 35% de la demanda de energía eléctrica del país. Está compuesta por la presa Daniel Palacios, que es de tipo arco gravedad y tiene una altura de 170 m, posteriormente, a 8 km en línea recta se encuentra la casa de máquinas en caverna que alberga 10 unidades generadoras tipo Pelton, diseñadas para un caudal de  $200 \text{ m}^3/\text{s}$ .



**Figura 2** Localización del sistema Hidroeléctrico Paute Integral en la cuenca del río Paute.

- **Paute Sopladora:** La central subterránea de Sopladora, hasta hace poco en construcción, está ubicada en la margen derecha del río Paute, entre las quebradas Sopladora y Palmira, cruzando el río Paute mediante un túnel con un paso subfluvial. Está diseñada para captar los caudales turbinados de hasta  $150 \text{ m}^3/\text{s}$  directamente de los dos túneles de descarga de la central Molino y conducirlos hasta la casa de máquinas subterránea a través de un túnel de carga de 4,7 km de longitud y una tubería de presión de 338m. Generará anualmente 2.700 GWh, a través de 3 unidades con turbinas tipo Francis.
- **Paute Cardenillo en etapa de Estudios Definitivos:** Corresponde a la cuarta y última etapa del Complejo Paute Integral. Actualmente, cuenta con Estudios y Diseños Definitivo para la licitación de la construcción del proyecto. Cardenillo se desarrollará directamente aguas abajo de la central Sopladora, aprovechando el caudal turbinado de la misma, más el de la cuenca intermedia, aprovechando  $180 \text{ m}^3/\text{s}$ . Con una potencia instalada de 593 MW, y se generará 3,300 GWh al año.

Tendrá una presa de regulación diaria, de tipo arco doble curvatura de 136 m de altura. Consta de seis turbinas tipo pelton albergadas en una caverna subterránea ubicadas a 4.4 km de la presa. Dispondrá de una unidad adicional de generación de 7.3 MW a pie de presa.

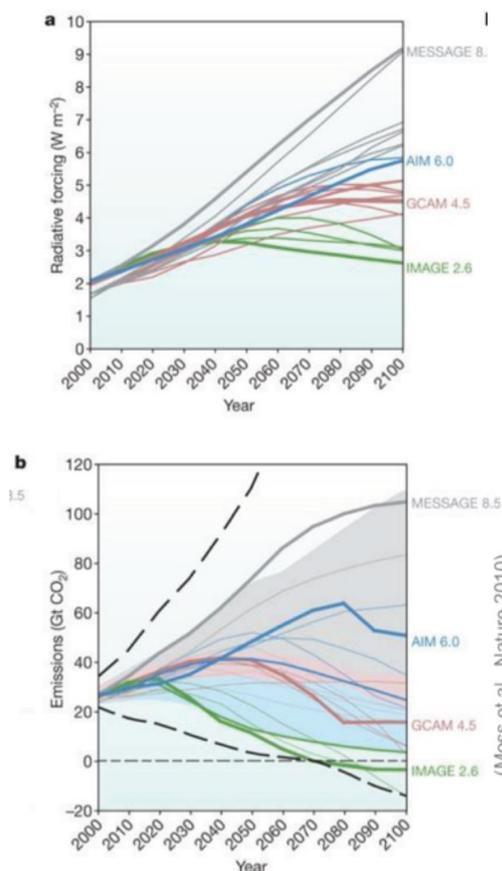
- **Mazar – Dudas:** El proyecto presenta un avance global de 86.03% (Agosto 2016), inicio de operación del aprovechamiento Alazán en el mes de abril 2015. Está formado por 3 centrales hidroeléctricas, compuesto en dos esquemas, en el primero las centrales en

cascada denominadas Alazán y San Antonio aprovechan las aguas del río Mazar, y el segundo corresponde a la central Dudas que aprovecha las aguas del río Pindilig.

### Escenarios de cambio climático

En el quinto informe del IPCC, se han definido cuatro nuevos escenarios de emisión, las denominadas Sendas Representativas de Concentración (RCP, de sus siglas en inglés), son nombrados de acuerdo al forzamiento radiativo<sup>1</sup> que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>, RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>, RCP 6.0 W/m<sup>2</sup> y RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>. Los escenarios describen líneas evolutivas plausibles de las condiciones climáticas y otros aspectos del futuro, principalmente relacionadas con aspectos socio-económicos y las emisiones de gases de efecto invernadero y aerosoles asociadas (CIIFEN, 2014).

En la **Figura 3**Figura 3, se indica la evolución temporal de las radiaciones y emisiones correspondientes, en comparación con el anterior informe del IPCC, el nuevo escenario RCP2.6 (o "required by science") tiene concentraciones mucho más bajas que cualquiera de los escenarios SRES (escenarios del cuarto informe), y el escenario RCP8.5 llega a fines de siglo con concentraciones de CO<sub>2</sub> más alta que cualquiera de los escenarios SRES.



**Figura 3** Evolución temporal del forzamiento radiativo (a) y emisiones (b) en los RCP usados en el Quinto Informe del IPCC. En gris se representa el percentil 98 de los escenarios SRES utilizados en el Cuarto Informe. Las líneas grises representan los escenarios SRES.

#### RCP2.6

Esta vía de concentraciones es representativa de escenarios de mitigación cuyo objetivo es limitar el calentamiento global a menos de 2 °C a fin de siglo. Este objetivo se puede alcanzar si el forzamiento radiativo hacia el año 2100 alcanza valores menores a 3W/m<sup>2</sup>. Por esto, en este RCP se ha supuesto que, inicialmente, el forzamiento radiativo crece hasta alcanzar un valor de 3,1W/m<sup>2</sup> a mediados de siglo, cuando comienza a reducirse hasta que hacia el final de siglo alcanza un valor de 2.6W/m<sup>2</sup>.

#### RCP4.5

Este es un escenario de estabilización, en el que para el año 2100, el forzamiento radiativo es de 4.5 W/m<sup>2</sup>, sin haber excedido este valor antes (Thomson et al., 2011). En este escenario, las emisiones de GEI llegan a su máximo alrededor del año 2040, luego comienzan a bajar hasta el año 2080, cuando se estabilizan.

#### RCP6.0

En esta vía representativa de concentraciones, las emisiones de gases de efecto invernadero y cambios en el uso de suelo se traducen en un forzamiento radiativo de 6 W/m<sup>2</sup> al año 2100 (Masui et al, 2011).

#### RCP8.5

Representa una vía en la que las emisiones y las concentraciones son altas.

<sup>1</sup> El forzamiento radiativo (FR) cuantifica el cambio en los flujos de energía entrante y saliente en el sistema

En la Tabla 1 se describen las consideraciones en las que se basan los escenarios de vulnerabilidad RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP8.5.

**Tabla 1 Principales Características de los escenarios de cambio climático**

ESCENARIO	Requerimientos-Consideraciones
RCP 2.6	- Tecnologías de almacenamiento y captura de carbono (“Carbón Capture and Storage”, CCS) -Disminución de emisiones de bio-energías, gas natural, petróleo y carbono a partir del año 2020
RCP 4.5	- Supone políticas climáticas que incluyen la penalización del uso de carbono -La población mundial en 2065 llega a 9 mil millones y se reduce a 8,7 mil millones en 2100. - crecimiento del PBI mundial en 1 orden de magnitud - Crecimiento de la necesidad energética en 3 órdenes de magnitud - Imponer precios al carbón, tecnología de captura y almacenamiento de carbón (CCS), desarrollo de la industria eléctrica (llega a ser un sumidero neto de carbón).
RCP 6	- Imposición de políticas climáticas, es decir, que limiten las emisiones vía precios y tecnología de CCS - La población mundial crece hasta 9,8 billones al año 2100. - El PIB per cápita global crece un 1,6% anualmente durante 2000–2060 y entre 1,3 y 1,4% durante 2060–2100. - La intensidad energética disminuye a un ritmo de 1,2%/año antes de 2060 a un ritmo de 1.5%/año entre 2060-2100.
RCP8.5	-Alto crecimiento poblacional - Crecimiento relativamente bajo del PIB -Tasas modestas de cambios tecnológicos y de eficiencia energética. - Importante demanda energética -No se implementan políticas de cambio climático.

### 3. Descripción de datos de datos de entrada

#### Climatología

- **Estaciones Pluviométrica y termométricas**

Para la caracterización de los aspectos meteorológicos de la cuenca se ha dispuesto de las estaciones pluviométricas y termométricas facilitadas por INAMHI. Los datos de pluviometría disponen de series diarias, comenzando sus mediciones las series más antiguas desde 1964 hasta el 2014. Las estaciones termométricas constan de datos observados de temperaturas máximas y mínimas diarias desde 1970 las más antiguas hasta el 2014. Esta información ha sido tratada al objeto de depurar aquellas estaciones que dispongan de la mejor información meteorológica con datos de series en continuo lo más largas posible.

En lo que respecta a los datos observados se ha facilitado a su vez las series mensuales de los pluviómetros seleccionados por INAMHI, en la cuenca de estudio y en un área ampliada de la misma durante el periodo 1981 a 2010.

- **Modelos de proyección de precipitación y temperatura en escenarios de cambio climático**

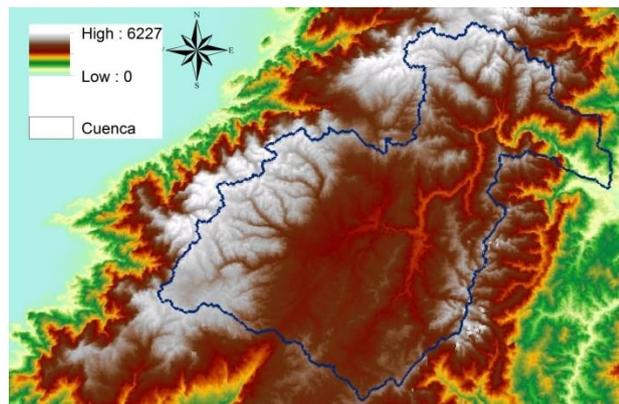
Para la determinación de las tendencias climáticas, para las proyecciones de precipitación y temperatura para los escenarios definidos en el quinto informe del IPCC; RCP2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP 8.5, se hace uso de los resultados de los modelos climáticos globales GCM correspondientes a 4 de los modelos globales utilizados en la Tercera Comunicación Nacional

en Cambio Climático (TCN), del informe del panel intergubernamental del cambio climático (IPCC), facilitados por el Ministerio de Medioambiente de Ecuador (MAE).

Para simular los escenarios de cambio climático se dispone de ensembles de los resultados obtenidos a partir de los modelos globales de la (TCN), para los Representative Concentration Pathways (RCP) 2.6, 4.5, 6.0, y 8.5. Los modelos globales aplicados para la obtención del proceso de downscaling estadístico y dinámico han sido: CSIRO-Mk3-6-0, GISS-E2-R, IPSL-CM5A-MR y MIROC-ESM, esta metodología permite conseguir proyecciones de cambio climático en una región determinada con una resolución espacial más alta que los modelos globales.

### Modelo Digital de Elevación

El modelo digital de elevación (MDT), con 30 m de resolución procedente de: ASTER GDEM Versión 2 elaborado en cooperación con Japan-US ASTER Science Team es el principal insumo para la delimitación del área de la cuenca y Subcuencas del río Paute (**Figura 4**). Según se puede observar las mayores altitudes se localizan en la zona norte y noroccidental de la cuenca alcanzándose la máxima cota de 5.100 m. Las cotas más bajas se presentan en la desembocadura del río Paute en el río Namangoza.

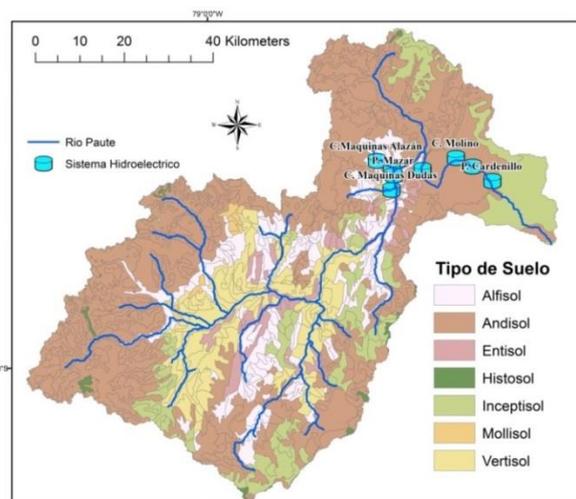


**Figura 4** Modelo Digital de Elevación Cuenca del Río Paute

### Tipo de suelo

De acuerdo al mapa de suelo, del Ministerio de Ambiente de Ecuador (MAE), la cuenca del Paute, está conformada por 7 tipos de suelo (Figura 5). El 55.6% del área corresponde al tipo Andisol, suelos formados con un clima muy húmedo, y temperaturas bajas, constituidos por materiales meteorizables y por material volcánico, bien drenados y poco sensibles a la erosión hídrica, su textura es franco limosa y retienen entre el 50% al 100% del agua, no se utilizan para la agricultura por ende su vegetación es de paramo (Correa, 2002).

Es de resaltar que en la Cuenca media, en el área donde se distribuye la red de drenaje, se presentan suelos del tipo Vertisol, los cuales se caracterizan por ser susceptibles a erosión hídrica que puede ir de moderada a severa.



**Figura 5** Suelos cuenca río Paute, porcentaje de área de la cuenca: suelos Anfisoles (7,2%), Andisoles (55,6%), Entisol (2,2%), Histosol (1,9%), Inceptisol (25,5%), Vertisol (7,1%) Fuente: Ministerio de Ambiente Ecuador

## Usos del suelo

Para el escenario actual se utilizó un mapa de cobertura y uso de la tierra, de la base de datos del sistema único de información ambiental (SUIA), del Ministerio de Ambiente de Ecuador (MAE)<sup>2</sup>. Las coberturas corresponden a 9 clases de vegetación las cuales se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares (AGRL-Agricultural Land Generic, AGRR-Agricultural Land Row Crops, FRSE- Forest Evergreen, FRST- Forest Mixed, PAST-Pasture, RNGB-Range Brush, URBN Residential, WATR-Water, WAPS-Winter -Pasture).

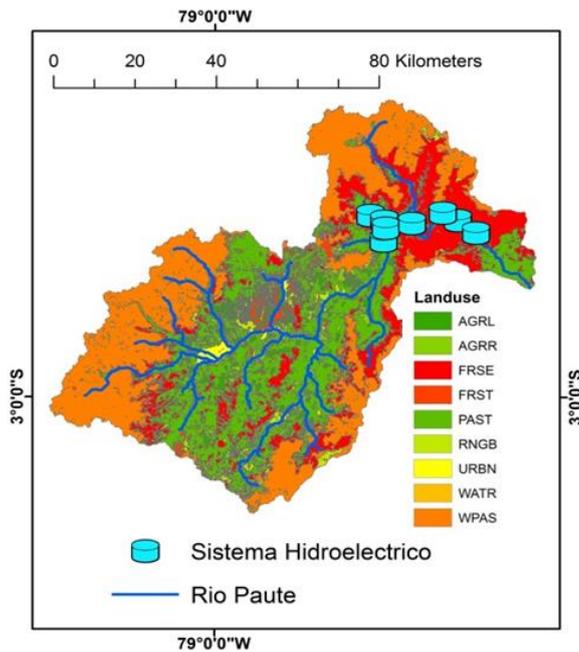


Figura 6 Uso del suelo, reclasificado a partir del mapa de uso del suelo año 2014, SUIA- IME Ecuador.

De acuerdo al mapa de uso del suelo en el 33.76% de la cuenca se presenta vegetación de paramo de alta montaña (WPAS). En el 32,35% coberturas de pasto y herbáceas (PAST), que se distribuye en gran parte de la zona central e interior de la cuenca.

El 19.35 % del área son bosque y vegetación perenne, y las demás coberturas como cultivos agrícolas, cultivos de grano, , área urbana, etc. no cada uno presenta un área inferior al 5% del área de la cuenca, lo cual indica en términos generales que en la gran mayoría de la cuenca se mantiene gran parte de su vegetación natural.

## Caudales Medidos en la cuenca del río Paute

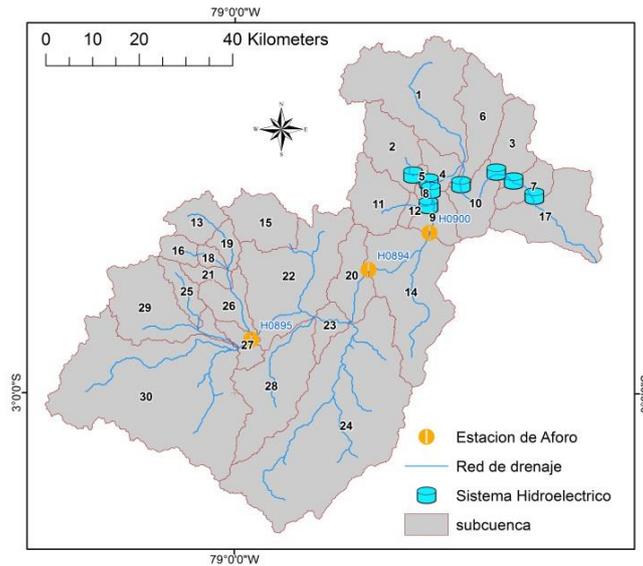
El régimen hidrológico está condicionado al régimen de la precipitación, presentándose en la parte baja de la cuenca mayor escurrimiento superficial en los meses de junio a agosto y más bajos entre noviembre del año anterior a febrero del siguiente año, y en su parte alta a media se dan caudales altos entre febrero a junio y de octubre a noviembre, siendo lo más bajos de julio a septiembre (INAMHI, 2000).

Para la calibración del modelo hidrológico con datos de las series históricas en el periodo 1981-2010 se han seleccionado los aforos de caudales que disponen de mayor número de registros en continuo, durante el periodo de simulación (Tabla 2, Figura 7).

Tabla 2 Aforos de caudal seleccionados

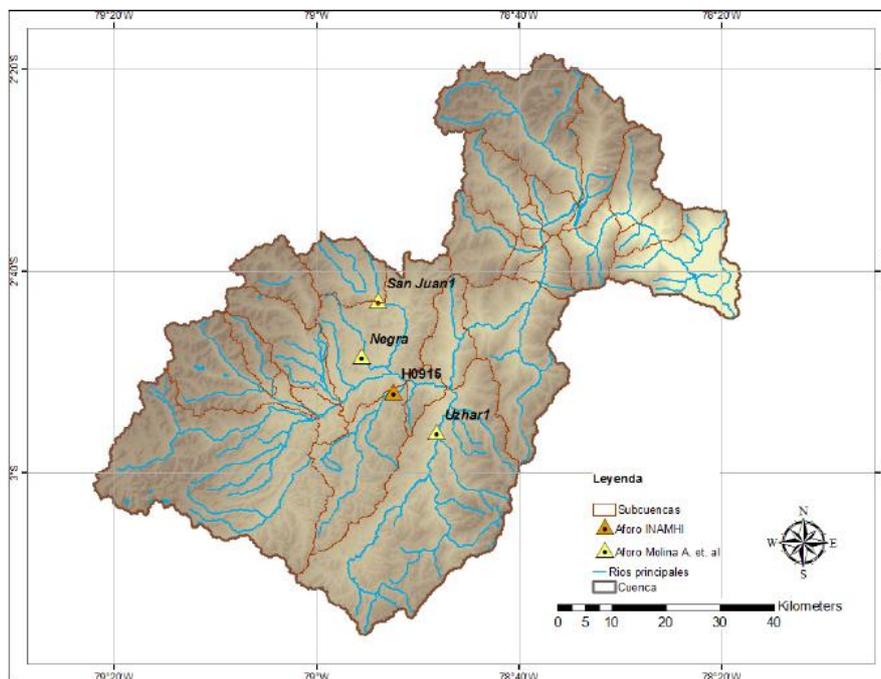
Estación de aforo	Nombre de la estación	Altitud	Coordenadas Geográficas		Q medio (m <sup>3</sup> /s)	Fecha de Registros
			longitud	latitud		
H894	PAUTE EN PAUTE(DJ GUALACEO)	2176	-78.74	-2.76	55.24	1980-2014
H895	TOMEBAMBA EN MONAY	2353	-78.97	-2.90	17.95	1964-2011
H900	PAUTE AJ DUDAS	2000	-78.62	-2.69	71.24	1963-2009

<sup>2</sup> <http://mapainteractivo.ambiente.gob.ec/>



**Figura 7 Ubicación de estaciones de aforo seleccionadas**

Con respecto a los aforos de medición de sedimentos se ha dispuesto de poca información de datos medidos. En concreto se cuenta con el aforo H-915 con información de transporte total del arrastre de material en periodo de tiempo anual. Dada la escasa información al respecto de datos fiables en materia de transporte de sedimentos se ha aplicado la metodología propuesta por (Molina et. al., 2007). Para ello se han seleccionado tres aforos: San Juan1, Negra y Uzhar1, ubicadas en la zona meridional de la cuenca (Figura 8).



**Figura 8 Ubicación de estaciones de aforo de sedimentos**

#### 4. METODOLOGIA

La metodología seguida el análisis de los cambios de los caudales y sedimentos de la cuenca del río Paute, en función de los escenarios de cambio climático RCP 2.6, RCP 4.5, RCP6 y RCP8.5, consta de las etapas descritas en la Figura 9, en el cual se indica la información de entrada del

estudio (en casillas redondeadas), el orden principal del proceso (líneas más oscuras) , para el cual, los datos de entrada principales son los datos de precipitación del escenario actual y proyectada a escenarios de cambio climático, ambas resaltadas en colores. A continuación se describen las etapas del proceso metodológico.

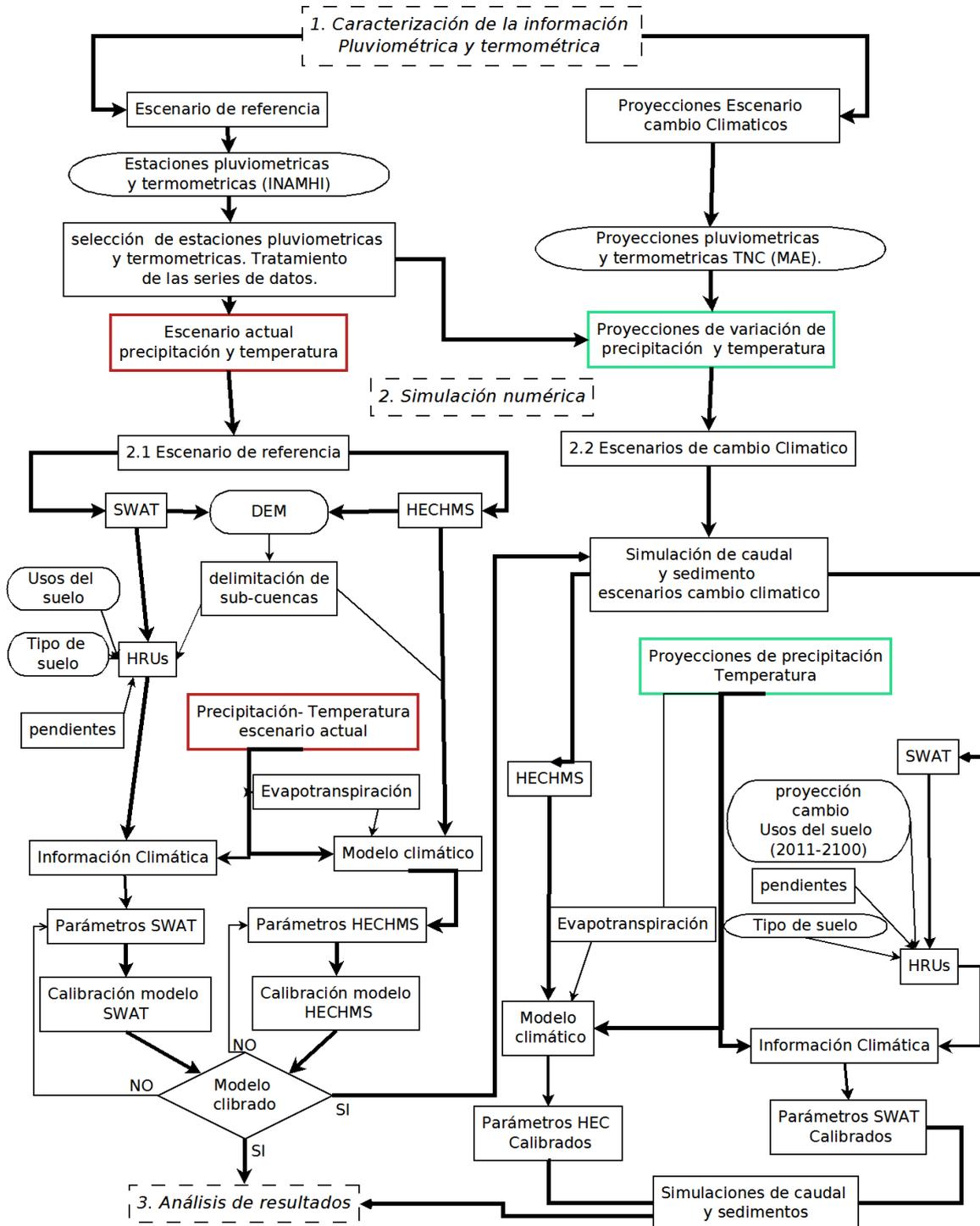


Figura 9 Esquema de la metodológico

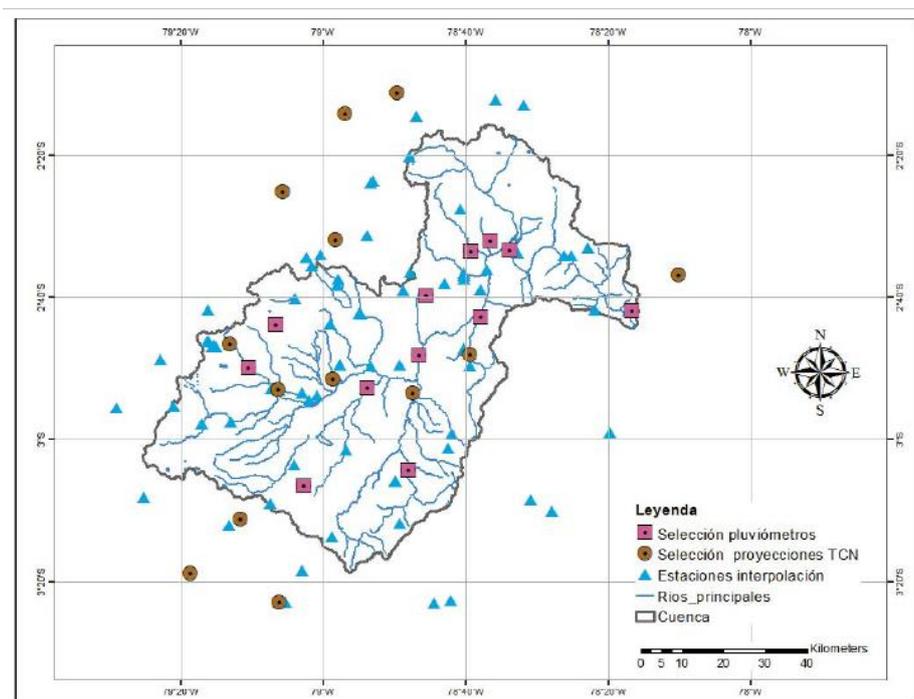
## Caracterización de la información Pluviométrica y termométrica

- **Caracterización del periodo de referencia (1981-2010)**

La caracterización consta de varias etapas, en principio la selección de las estaciones pluviométrica y termométrica, seguido del análisis de las características de precipitación y temperatura actual de la cuenca para el periodo de referencia (1981-2010) y por último la proyección de precipitación y temperatura para los escenarios de cambio climático y periodos horizonte.

Respecto a la selección de las mejores estaciones pluviométricas, de series diarias (de 1964 hasta el 2014), suministrada por el INAMHI, se seleccionaron aquellos pluviómetros que disponen del mayor número de datos observados en continuo para el posterior proceso de rellenado de la series a partir del proceso de interpolación. La reconstrucción o rellenado de las series observadas se ha realizado mediante el uso de técnicas geostatísticas conocidas como “kriging”, El proceso consta de dos pasos, el primero para estimar si en un punto determinado va a llover (indicador kriging) y el segundo para estimar la magnitud de dicha lluvia.

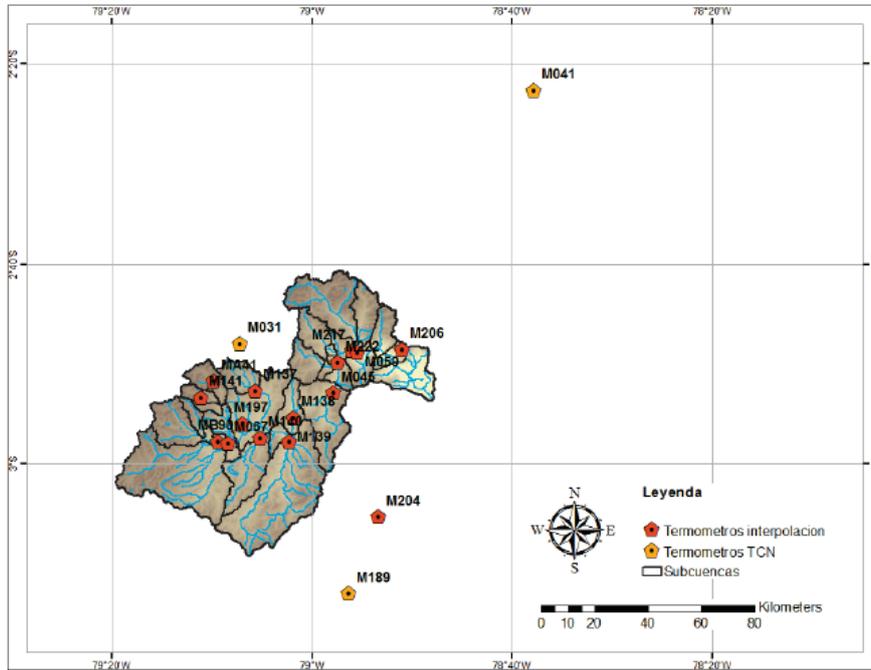
En la **Figura 10** se han representado las estaciones utilizadas para la interpolación y la reconstrucción de los pluviómetros que finalmente se seleccionarán para el modelado. Se presentan a su vez los pluviómetros de los que se han dispuesto las proyecciones de precipitación para escenarios da cambio climático (downscaling estadístico de la TCN), y los seleccionados dentro de la cuenca.



**Figura 10 Localización de las estaciones pluviométricas seleccionadas para la interpolación y la modelización**

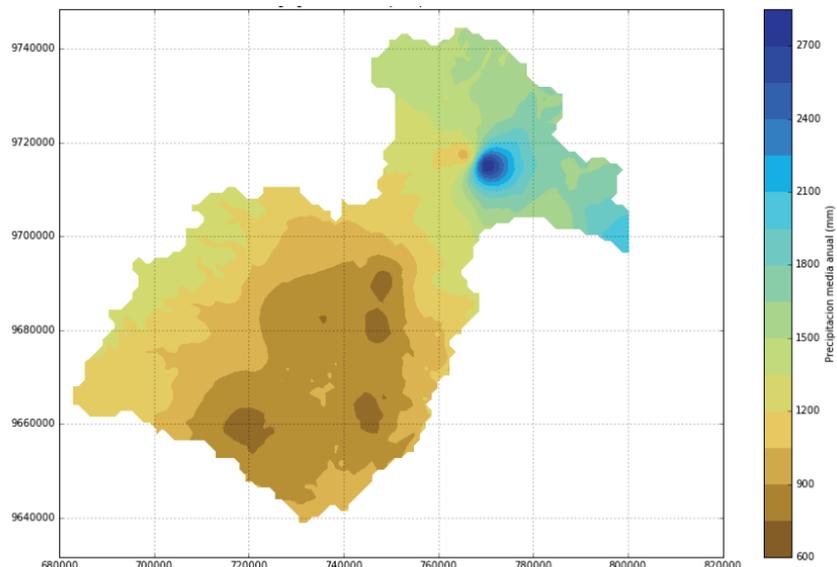
Respecto a la información disponible de termómetros se han contabilizado 8 estaciones con series lo suficientemente largas y en continuo como para su aplicación en el proceso de caracterización climática. En la Figura 11 se han localizado las estaciones utilizadas para el proceso de reconstrucción y rellenado de los días sin dato. Los datos de proyecciones del TCN

han sido facilitados en las estaciones M31, M41 y M189 ubicadas fuera de la cuenca. Dado que en la zona de estudio existen series de termómetros con datos observados con series suficientemente largas en continuo, se asignarán las proyecciones obtenidas para dichos tres termómetros al resto de las estaciones seleccionadas.



**Figura 11 Localización de las estaciones termométricas seleccionadas para la interpolación y la modelización**

Con relación a la caracterización de la precipitación en la cuenca, el resultado de la interpolación de las lluvias anuales mediante la técnica de “kriging” se representa en la **Figura 12**, diferenciándose las distintas zonas de precipitación asociadas a la orografía y la altitud, entre otros de los factores que condicionan el clima local. Las mayores precipitaciones se presentan en la parte baja de la cuenca entre los 2400 y 2700 mm/año. En las zonas de mayor altitud en la cuenca alta, se evidencian que la precipitación esta entre 600 a 1200 mm/año en la cuenca media entre 1200 y 1800 mm/año.



**Figura 12 Precipitación media anual de la cuenca del río Paute**

Las temperaturas medias en la cuenca, de acuerdo al análisis realizado de la información termométrica, para el escenario de referencia (1981-2010), oscilan entre los 4 y los 26°C, asociados los valores máximos a los puntos de menor cota de la cuenca, ubicados en la provincia de Morona-Santiago, en la zona de la cuenca baja del Paute.

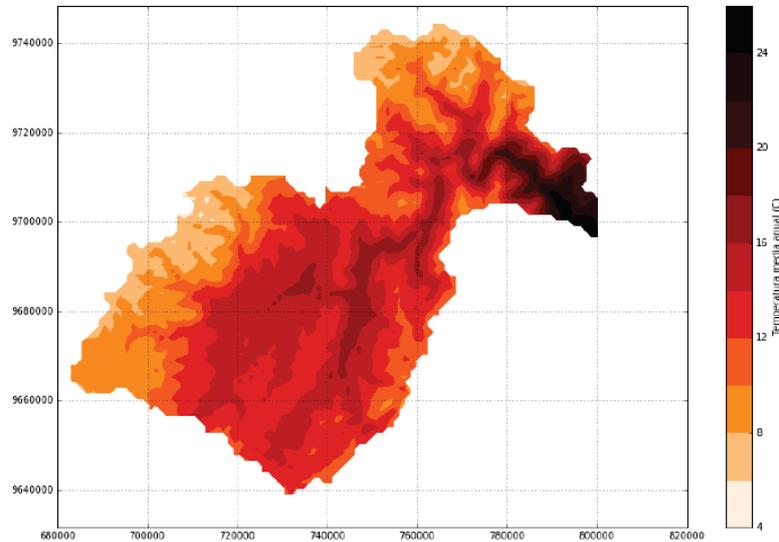


Figura 13 Temperatura media anual de la cuenca del río Paute

- **Proyecciones de precipitación y temperatura - escenarios de cambio climático**

Con relación a la etapa de generación de proyecciones de precipitación y temperatura, para los escenarios de cambio climático (RCPs) y periodos horizonte, que posteriormente son input de los modelos hidrológicos se hizo uso de modelos climáticos.

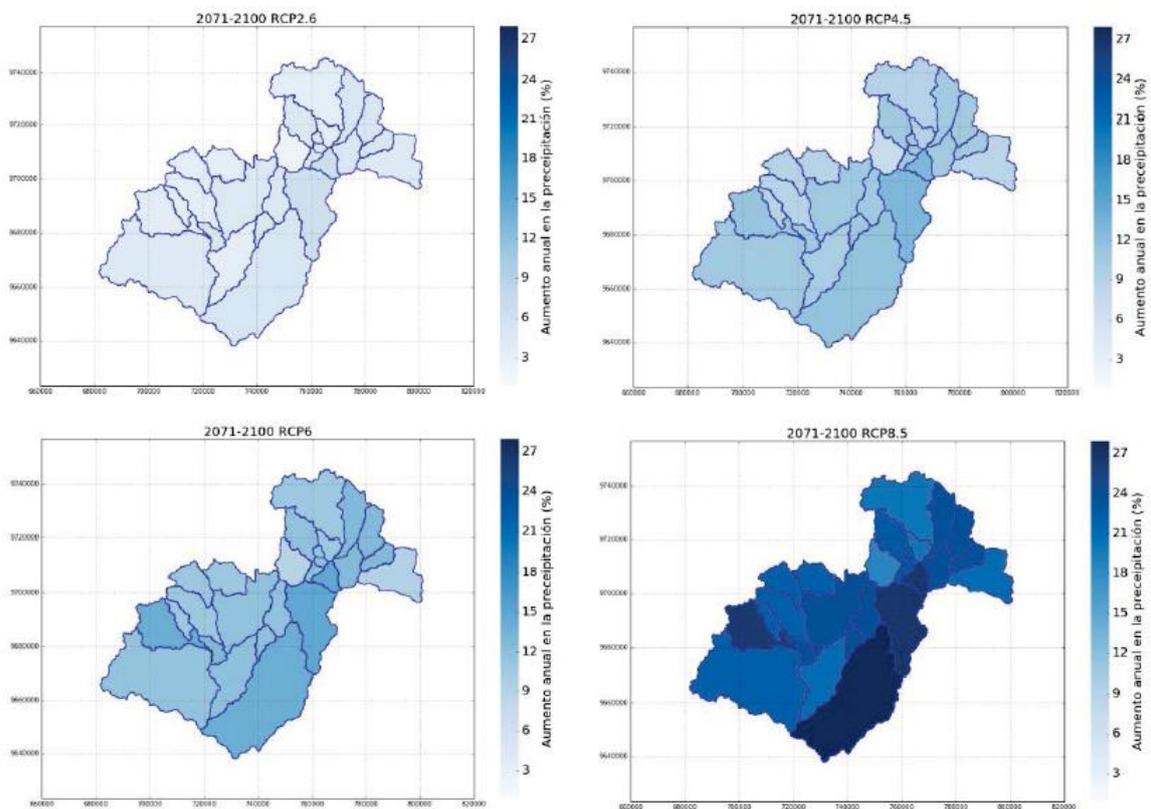
La herramienta básica para realizar estimaciones de proyecciones climáticas son los modelos de circulación general acoplados océano-atmósfera (AOGCM, por sus siglas en inglés). El principal forzamiento de los AOGCM utilizados en el Quinto Informe es la radiación solar, para la que se ha incluido su variación interanual. Todos los modelos son también forzados por concentraciones de gases atmosféricos, de origen antropogénico y natural (gases de efecto invernadero, aerosoles provenientes de erupciones volcánicas, quema de biomasa o contaminación). Además de forzamiento por cambios de uso de suelo.

Los modelos globales, proporcionan información de gran calidad pero tienen una resolución espacial demasiado baja para estudios regionales o locales, por lo tanto se ha recurrido a la técnica de downscaling, técnica que deriva información de pequeña escala (en un emplazamiento o una región) a partir de datos a una escala espacial mayor. Esta técnica fue aplicada por el equipo de trabajo de la Tercera Comunicación Nacional del Ecuador (TCN) a través de un proceso de downscaling estadístico y dinámico, a partir de la selección de los 4 mejores modelos (CSIRO-MKB- 6-0, GISS-E2-R, IPSL-CMSA-MR y MIROC-ESM). la TCN, con los datos mensuales de precipitación y temperaturas media, máxima y mínima, realizó el proceso de reducción de escala estadística, aplicando el método de “Corrección del Sesgo” y se obtuvieron las series mensuales de cada modelo para los periodos de clima presente (1981-2005) y futuros (2011-2040, 2041-2070 y 2071-2100), para 137 estaciones de Precipitación, 32 estaciones de Temperatura Media, 34 estaciones de Temperatura Máxima Media y 29 estaciones de Temperatura Mínima Media en todo Ecuador. Una vez obtenidos los datos de cada modelo, se obtuvo una única serie de proyecciones climáticas para cada estación, generada a través del método de Ensamble de Confiabilidad Ponderad.

A partir de las proyecciones obtenidas del TCN, se han extraído, a nivel mensual, las tendencias de los resultados de los propios modelos en base a un periodo de referencia que comprende la línea base desde el año 1981 al 2010; calculando el porcentaje de variación de la precipitación media anual asociada a cada pluviómetro para cada uno de los escenarios.

En la **Figura 14** y **Figura 15**, se indican los resultados de variación porcentual de la precipitación y temperatura, en las diferentes subcuencas del río Paute (cuyos criterios y procedimiento de delimitación se indica más adelante), para los diferentes escenarios RCP, en el periodo 2071-2100, periodo en el que se evidencian mayores variaciones. El total de los resultados y una descripción más detallada de la metodología empleada se indica en el ANEXO 1.

Como conclusión del análisis de los diferentes escenarios y periodos, los mayores incrementos de precipitación respecto de la línea base se producen en el RCP 8.5, llegando a observarse en algunos puntos de la cuenca incrementos de la precipitación media anual del orden del 8% (2011-2040) hasta un 27% (2071-2100).



**Figura 14 Variación de la precipitación (%) en los cuatro RCP. Escenario 2071-2100**

Con relación a las proyecciones de temperatura los mayores incrementos de temperatura media se estimaron para el RCP 8.5 experimenta incrementos de 0,8°C (periodo 2011-2040) hasta 3.3 °C (2070-2100).

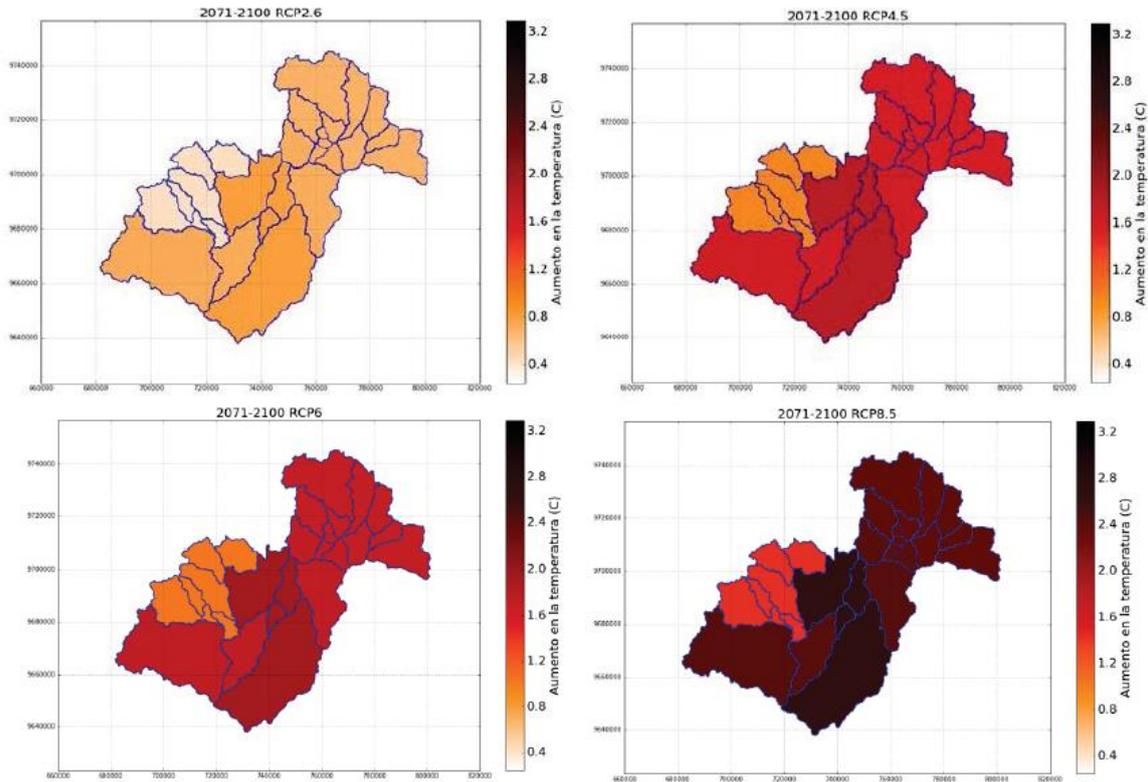


Figura 15 Variación de la temperatura (%) en los cuatro RCP. Escenario 2071-2100

### Simulación Numérica- Uso de modelos Hidrológicos

Con el fin de simular las condiciones de caudal y sedimento para el escenario de referencia y las proyecciones de cambio climático, se ha usado los modelos SWAT y HEC HMS, ambos de simulación lluvia-escorrentía. La implementación de los modelos se divide en dos etapas la modelación del escenario actual, que incluye la calibración de los caudales de la cuenca, con ayuda de datos medidos de caudal. La segunda etapa, con los modelos calibrados a la condición actual, consiste en la simulación de caudal y sedimento para los escenarios de cambio climático.

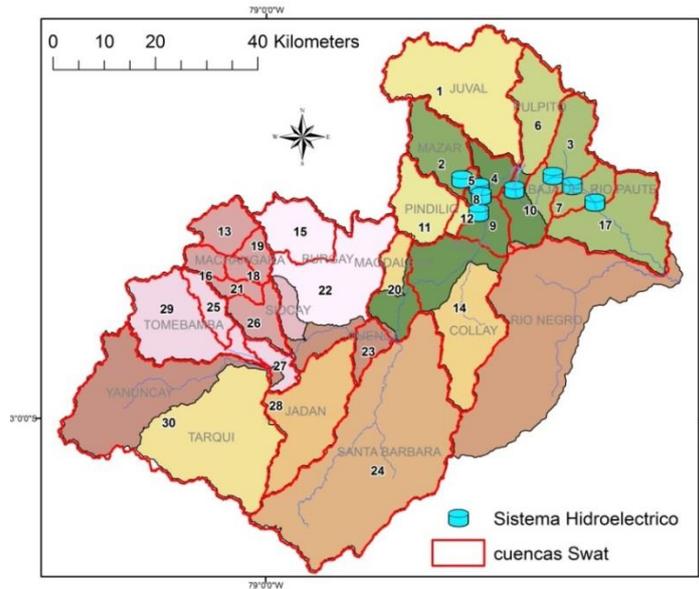
- **Simulación del escenario de referencia**

Para la primera etapa que consiste en la simulación del escenario de referencia, para ambos modelos se requiere definir el modelo de cuenca, que consiste en la división de la cuenca hidrográfica en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos, la información de entrada para esta delimitación es el Modelo Digital de Elevaciones (MDE). Cada uno de los modelos, cuenta con herramientas que permiten realizar esta delimitación: el modelo SWAT incorpora directamente la herramienta watershed Delineator, por su parte, el modelo HECHMS, a partir de su extensión HecGeoHms permite realizar este procedimiento en Arcgis y luego ser exportado como un proyecto HecHms.

En la Figura 16 se indica la configuración de las subcuencas, para los dos modelos implementados, se delimitaron un total de 30 subcuencas, de las cuales se definieron 8 cuencas de mayor interés, considerando la ubicación de las centrales hidroeléctricas como punto de cierre. En la **Tabla 3** se indica la infraestructura principal del complejo hidroeléctrico Paute y la subcuencas definidas, en las cuales se centrará el análisis de los resultados obtenidos.

**Tabla 3 Subcuencas sistema hidroeléctrico**

Infraestructura Hidroeléctrica	Subcuenca
Presa Central Mazar	8
Presa Daniel Palacios	6
Presa y central Cardenillo	7
Central Paute Sopladora	3
Central Paute Molino	10
Casa de máquinas Dudas	12
Casa de máquinas Alazán	2
Casa de máquinas San Antonio	5



**Figura 16 Delimitación cuencas SWAT**

### Simulación en SWAT

Para la simulación adicional de las subcuencas SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consisten en áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo, para la definición de estos HRUs se usaron como datos de entrada: cartografía de tipo de suelo, cartografía de uso del suelo (Homologada a base de datos SWAT), y definición de cuatro rangos de pendiente (0-10%, 10-20%, 20-28% y > 28%). En la definición de los HRUs, su tamaño se condicionó por la elección de un umbral del 10% de área de las coberturas integradoras.

Posterior a la definición de los HRU, se ingresó los datos de precipitación y temperatura para el periodo de 1981-2010, resultado del tratamiento de la información de estaciones pluviométricas y climatológicas descrito en el anterior numeral de la presente metodología.

Para cada HRU, SWAT calcula la cantidad de escorrentía aplicando la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), en el caso de este estudio con datos de lluvia y temperatura diarios. En cuanto al módulo de producción de sedimentos, SWAT cuantifica la producción de sedimentos a partir de la ecuación universal modificada de pérdida de suelo-MUSLE. Por lo tanto, la caracterización de las condiciones específicas de la cuenca, se logra a partir de la calibración de los parámetros que intervienen en la generación de escorrentía y sedimento, tales como; capacidad de agua disponible, número de curva, práctica de manejo del uso del suelo, factor de erodabilidad, entre otros. Consiste en un proceso iterativo que han sido calibrados buscando que los valores simulados de caudal y sedimento, se ajuste a los valores ya medidos en la cuenca (datos de caudal de estaciones limnimétricas).

Una vez calibrado el modelo se exportan la simulación obtenida para el periodo de referencia, con los valores de sedimento y caudal diario simulado cada HRU y subcuencas. Los detalles de la simulación en SWAT se indican en el ANEXO 3.

## Simulación en HECHMS

El proceso de calibración y la simulación del escenario de referencia (1981-2010), en el modelo HECHMS, en este caso únicamente a nivel de SubCuenca, se realizó a partir de modelado continuo, que intenta simular la evolución de todo el proceso hidrológico: calcula qué parte de la precipitaciones queda retenida superficialmente (vegetación y charcos), qué pasa y se infiltra en el suelo y qué parte genera escorrentía superficial. Pasada la precipitación debe considerar si la que se almacenó en el suelo se evapotranspira o se infiltra hacia los acuíferos. Finalmente desde los acuíferos puede perderse hacia una circulación profunda (fuera del alcance del modelo) o alimentar los cauces.

En HECHMS a partir del modelo de cuenca y seleccionando como método de cálculo de pérdidas (Loss) el método Soil –moisture Accounting (SMA), se ingresaron los datos de diarios de precipitación (1981 a 2010) y los valores de evapotranspiración mensual, esta última calculada a partir de los datos de temperatura (1981 a 2010) mediante el método de Thornthwaite y Hargreaves, seleccionando el método de Thornthwaite, como aquel cuyos resultados se ajustan más a la evapotranspiración esperada en la cuenca.

El método SMA, tiene en cuenta cinco niveles de distintos en los que la precipitación puede ser retenida o almacenada: vegetación, retenciones superficiales, suelo, acuífero 1 (superficial) y acuífero 2 (más profundo). Cada uno de estos niveles depende de un total de 18 parámetros, que han sido calibrados (ver ANEXO 4).

Al igual que SWAT, en HECHMS, se simuló sedimentos a partir de la ecuación universal modificada de pérdida de suelo-MUSLE, para cuyo calculo, se ingresó para cada una de las cuencas los parámetros de factor de erodabilidad, factor topográfico y factor de cobertura. Además la curva granulométrica del río Paute, tomada del estudio de modelación numérica de sedimentación y lavado de embalses realizado para la presa Paute Cardenillo (Luis G. Castillo, 2010), ésta se indica en la **Figura 17** .

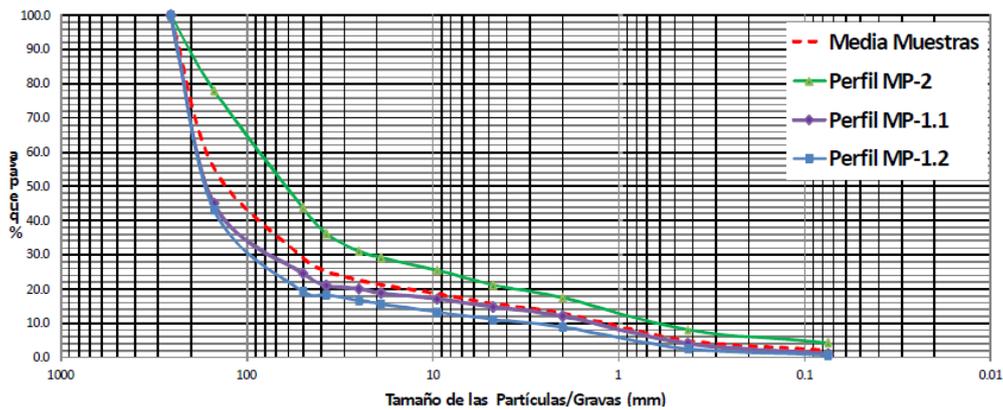


Figura 17 Curva granulométrica

Una vez calibrado el modelo se exportan la simulación obtenida para el periodo de referencia, en este caso, sólo se exportaron los valores de caudal diario simulado por cada subcuencas, ya que el modelo no genera series de datos de sedimento para exportar, simplemente permite su visualización.

## Calibración de modelos hidrológicos

El grado de ajuste de la calibración, tanto para SWAT como para HECHMS, se definió a partir de tres estadísticos de bondad de ajuste; sesgo porcentual (PBIAS), coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR) (Moriasi et al., 2007) . El proceso de calibración consistió en un proceso iterativo de cambio de parámetros, simulación y comparación de simulaciones con los datos observados de la cuenca, ajustando primero los caudales líquidos y continuando con el ajuste de los sedimentos.

En la **Tabla 4** y **Tabla 5**, se indican los resultados de la calibración para cada uno de los modelos y su categoría de acuerdo a Moriasi et al., 2007.

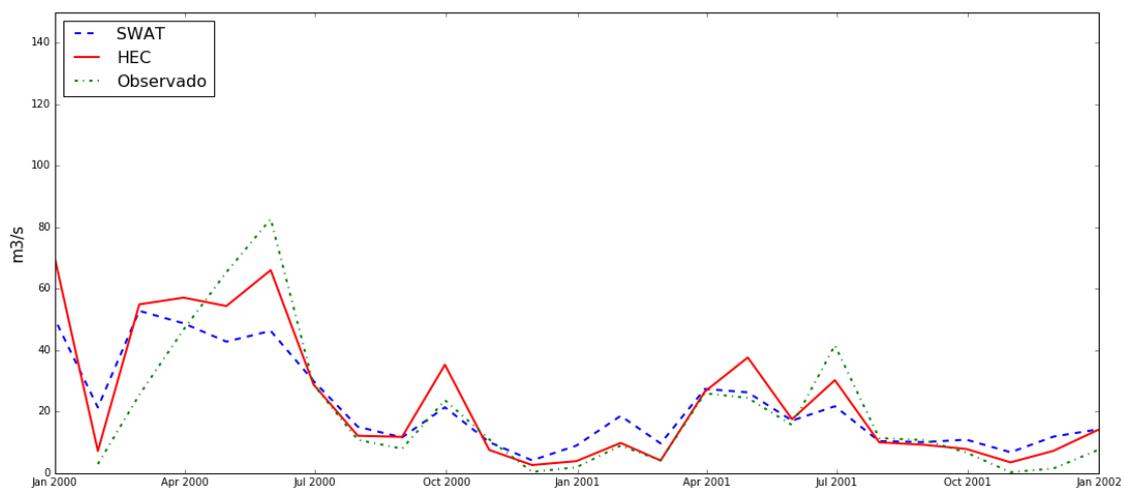
**Tabla 4 Resultados de la calibración y categoría de ajuste modelo SWAT**

cuenca	PBIAS		NSE		RSR	
	valor	Categoría	valor	Categoría	valor	Categoría
<b>Sub-cuenca 20</b>	7.013	Excelente	0.618	Aceptable	0.609	Aceptable
<b>Sub-cuenca 27</b>	6.744	Excelente	0.637	Aceptable	0.594	Buena
<b>Sub-cuenca 14</b>	5.199	Excelente	0.631	Aceptable	0.599	Buena

**Tabla 5 Resultados de la calibración y categoría de ajuste modelo HECHMS**

cuenca	PBIAS		NSE		RSR	
	valor	Categoría	valor	Categoría	valor	Categoría
<b>Sub-cuenca 20</b>	9.325	Excelente	0.660	Buena	0.575	Buena
<b>Sub-cuenca 27</b>	13.604	Buena	0.757	Excelente	0.486	Excelente
<b>Sub-cuenca 14</b>	3.301	Excelente	0.786	Excelente	0.456	Excelente

En la **Figura 18**, se indica una comparación entre los datos de caudal para la cuenca 27, simulados por el modelo SWAT y HECHMS, respecto a los datos medidos en la cuenca para el periodo de calibración de 2000 a 2002. En general se identifica un buen ajuste, siendo más precisa la simulación para caudales mínimos, y siendo menos precisa para los picos de caudal (valores máximos).



**Figura 18 Comparación de grado de calibración del modelo SWAT y HECHMS, respecto a datos de caudal medidos en la Sub-cuenca 27.**

Los detalles del proceso de calibración se indican en el ANEXO 4.

- **Simulación de Escenario cambio climático**

Una vez calibrados los modelos, tanto SWAT como HECHMS, se usan estos para la simulación de escenarios de cambio climático, cuyos datos principales de entrada son las proyecciones de temperatura y precipitación para los escenarios RCP: RCP 2.6, RCP4.5, RCP6 y RCP 8.5, definidas para los diferentes periodos horizonte; 2011-2040, 2041-2070, 2071-2100.

En el modelo SWAT, se recalcularon los HRU, para la simulación de cada periodo horizonte, incorporado los cambios en el uso del suelo, para el año final de cada periodo horizonte (2040, 2070 y 2100). Estas proyecciones de cambio de uso del suelo, se realizaron a partir del mapa de uso del suelo del año 2014, asociando la probabilidad de cambio que presenta cada una de las celdas del Raster y sus celdas vecinas. El resultado respecto a cambios en el uso del suelo, indica cambios mínimos, relacionados con aumento de áreas de cultivos agrícolas, y disminución del cultivo de grano y Bosque Forestal de vegetación mixta. Esta metodología se describe con mayor detalle en el ANEXO 2.

Una vez calculados los HRU, se incorporan los parámetros de SWAT calibrados para la cuenca, y se ejecuta uno a uno cada periodo, incluyendo los datos de precipitación y temperatura proyectados para cada escenario RCP.

Respecto a HECHMS, se realiza se con el método SMA y los parámetros calibrados para las diferentes cuencas. Es un procedimiento similar al de SWAT, sólo que HECHMS no permite incorporar los cambios en el uso del suelo. Para la simulación de cada periodo se ingresa los datos de precipitación proyectada y de evapotranspiración calculada para cada RCP. La evapotranspiración se calcula por el método de Thornthwaite, a partir de las proyecciones de temperatura para cada escenario RCP.

### **Análisis de resultados**

Como resultado de las simulaciones, para las 30 subcuencas de estudio (dentro de la cuenca del río Paute), se obtuvieron datos de caudal ( $m^3/s$ ) y sedimento (Ton/año, mg/l), para el periodo de referencia (10981-2010) y las proyecciones de estas variables para cada escenarios de cambio climático (RCP 2.6, RCP 4.5, RCP6, y RCP 8.5) en los años horizonte definidos (2011-2040, 2041-2070, 2071-2100). Simulados tanto en SWAT como en HECHMS.

Se analizaron los resultados obtenidos en cada modelo, a partir de tres etapas, la primera consistió en un análisis estadístico sencillo entre los diferentes escenarios RCP y periodos horizonte, con el fin de analizar si existen variaciones entre el escenario de referencia y los escenarios RCP. Para lo cual se seleccionaron tres subcuencas representativas de la cuenca de estudio, para cuyos resultados de caudal y sedimentos simulados en SWAT se generaron diagramas de Boxplot, que permite identificar las diferencias en la distribución de los datos y los valores mínimos, medios, mediana, y los cuartiles.

La segunda etapa del análisis de resultados consistió en generación de cartografía para la cada cuenca de los resultados obtenidos, a partir del uso de sistemas de información Geográfica, en los cuales se indica las variaciones de caudal, sedimentos totales y suspendidos, que presentan los diferentes escenarios y periodos horizontes respecto al escenario de referencia, según la simulación realizada en SWAT.

La tercera etapa consiste en la comparación de los resultados obtenidos en la simulación de SWAT y HECHMS, con el fin de identificar las implicaciones generales de usar un modelo u otro para este tipo de estudios.

## 5. RESULTADOS

### Análisis de resultados modelo entre RCPs y periodos Horizonte

A continuación se indican los resultados obtenidos, de una muestra de tres cuencas; la cuenca 8, 6, y 7, donde se localizan la presa central Mazar, presa Daniel Palacios y Central Cardenillo respectivamente, cuyo orden corresponde a la dirección del drenaje desde aguas arriba hacia aguas abajo.

Los resultados se indican mediante diagramas boxplot, generados para los resultados simulados de caudal diario medio anual ( $m^3/s$ ), y carga de sedimento anual (Ton/año). Cada renglón de la gráfica representa los periodos simulados, iniciando en el primer renglón por el periodo de referencia, (1981-2010). Cada columna corresponde a un escenario RCP, omitiendo el escenario RCP6, ya que este no presenta mayor variación respecto al escenario RCP4.5, por tanto, puede considerarse un escenario promedio entre el RCP4.5 y RCP8.5.

El análisis de resultados de los diferentes escenarios consiste en identificar las variaciones que se estiman para los años horizontes respecto al periodo de referencia (1981-2010).

- **Simulación de caudal diario medio anual**

Los resultados de caudal se indican en la **Figura 19**, en general en las cuencas tomadas como muestra se observa un aumento en los caudales para los escenarios y años horizontes simulados. Respecto a los caudales mínimos de la cuenca, no se evidencian mayores cambios, no decrecen, de hecho todos aumentan respecto al periodo de referencia (1981-2010), manteniéndose en el orden de los 48 a 63  $m^3/s$ .

En el escenario de referencia (1981-2010, primer renglón de la gráfica) se observa caudales máximos de: 100  $m^3/s$  (cuenca 8), 120  $m^3/s$  (cuenca 6) y 158  $m^3/s$  (cuenca 7), se identifica que para el primer periodo entre 2011 y 2040, se genera un aumento del caudal máximo (entre el 8 al 25% dependiendo del escenario), pero éste no es tan significativo como en los periodos 2041-2070 y 2071-2100, cuyo rango de aumento depende del escenario RCP en el que se encuentre (porcentaje de aumento máximo de 40%).

#### Cuenca 8

En la cuenca 8, para la cual en el periodo de referencia (1981-2010), el 25% de los caudales son menores o iguales a 60  $m^3/s$ , el 75% de 80  $m^3/s$ , siendo el caudal máximo 100  $m^3/s$ . Para todos los periodos horizonte simulados es superado el valor máximo de caudal del periodo de referencia (100  $m^3/s$ ), se alcanzan valores mayores a 130  $m^3/s$ , en el periodo 2041-2070 (escenarios RCP 2.6, RCP6 y RCP8.5), y cercanos a 150  $m^3/s$  para el periodo de 2071-2100 (escenario RCP8.5).

Respecto a los escenarios RCP, para el primer periodo horizonte (2011-2040), en el escenario de menor aumento de caudal es en el RCP 2.6 y se presenta el caudal máximo en para RCP 4.5 de 120  $m^3/s$ . Para el periodo siguiente, el menor aumento se da en el escenario RCP4.5 (caudal de 113.40  $m^3/s$ ) y se alcanza un valor máximo de 137  $m^3/s$  en el escenario RCP 8.5. Por último, para el periodo de 2071-2100 los caudales máximos están en el rango de 125-147  $m^3/s$  en el escenario RCP 4.5, RCP 6 y RCP 8.5.

Es de resaltar que el escenario RCP 8.5 es el considerado de mayores cambios, por ejemplo, el 75% de los caudales están entre los 82 y 92  $m^3/s$ , con excepción del escenario RCP8.5, en el

cual para el último periodo, el 75% de los caudales son iguales o menores a  $105 \text{ m}^3/\text{s}$ , esto quiere decir que cerca de un 25% de los caudales sobre pasa los  $100 \text{ m}^3/\text{s}$ , el valor máximo de caudal del periodo de referencia (1981-2010).

Los caudales mínimos de la cuenca 8, se mantienen cercanos a 50 y  $55 \text{ m}^3/\text{s}$ , nuevamente con excepción del escenario RCP8.5, donde alcanza valores de  $62 \text{ m}^3/\text{s}$ .

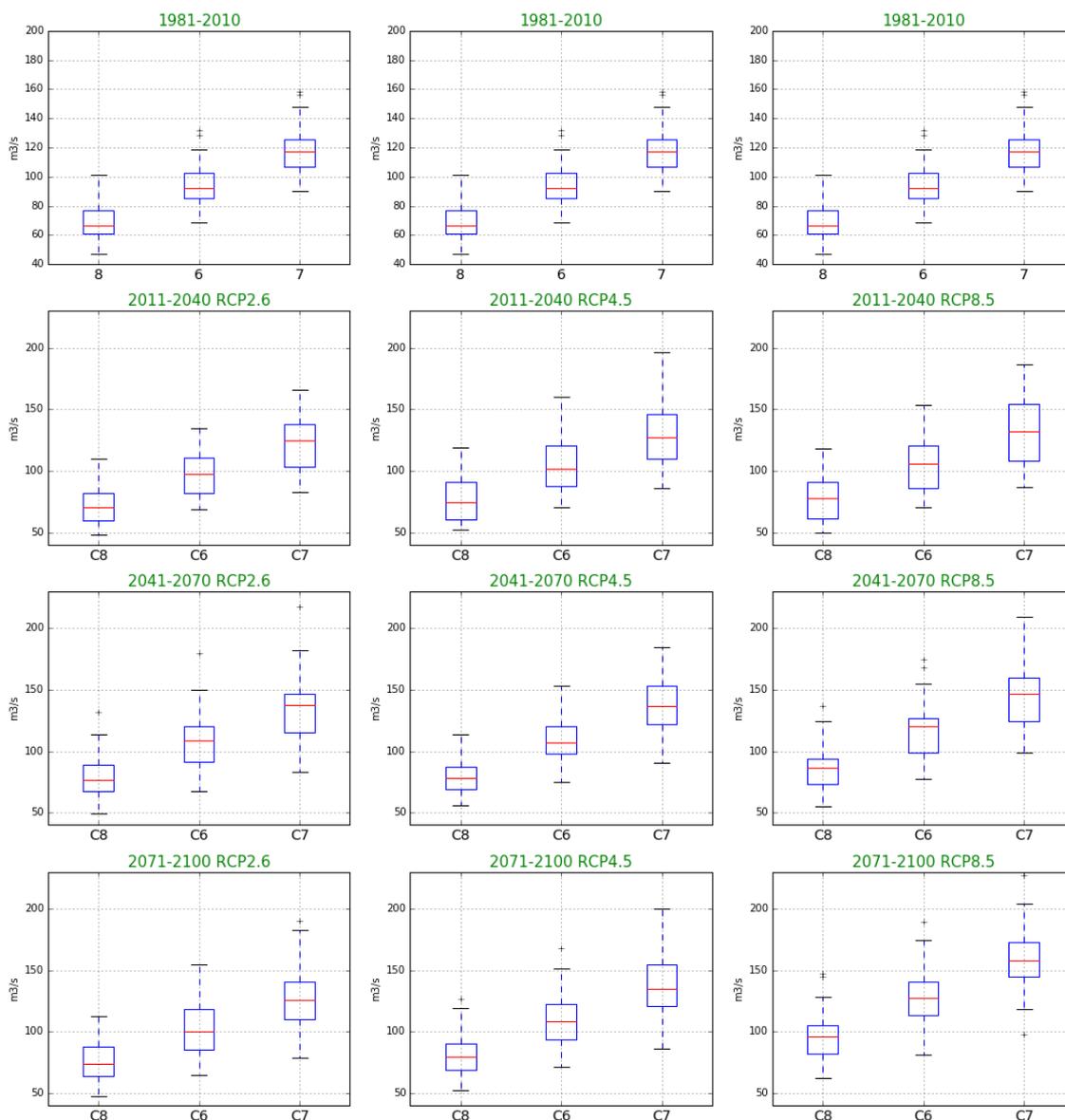


Figura 19 Simulación Caudal ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) medio anual para escenarios RCP y años Horizonte

## Cuenca 6

Para el periodo inicial en esta cuenca, el valor mínimo de caudal es  $69 \text{ m}^3/\text{s}$ , el primer cuartil es cerca de  $85 \text{ m}^3/\text{s}$ , el tercer cuartil  $102 \text{ m}^3/\text{s}$ , y el valor máximo de caudal es  $131.8 \text{ m}^3/\text{s}$ . Estos valores para los años horizontes simulados son excedidos, es así como, para el primer periodo (2011-2040) el caudal máximo puede alcanzar valores de entre  $135 \text{ m}^3/\text{s}$  (escenario RCP 2.6) y  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  (escenario RCP 4.5). EL periodo 2041-2070, indica valores máximos de caudal en el rango de  $153 \text{ m}^3/\text{s}$  (RCP 4.5). El último periodo se caracteriza por caudales máximos entre  $155 \text{ m}^3/\text{s}$  (RCP 2.6) y  $185 \text{ m}^3/\text{s}$  (RCP 8.5).

Con relación a los escenarios radiativos, en el primer periodo el escenario RCP 4.5 evidencia mayores variaciones en el caudal, el caudal máximo sobrepasa los 155 m<sup>3</sup>/s, y el 50% de los caudales son superiores de 100 m<sup>3</sup>/s.

Para el segundo periodo los valores máximo se mantienen en el mismo rango para todos los escenarios (150 m<sup>3</sup>/s), observándose tendencias en el cambio de la distribución de los datos entre escenarios, por ejemplo, mientras en los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5, los valores de caudal del 50% de los datos se aleja de 100 m<sup>3</sup>/s en el escenario RCP 4.5 los datos de caudal se concentran en torno a éste valor. Es el escenario RCP8.5, el de mayores variaciones, ya que la mediana se ha desplazado hacia valores máximos y el 50% de los caudales supera el caudal de 120 m<sup>3</sup>/s.

Para el último periodo las variaciones de caudal son similares para los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5, con caudales máximos cercanos a 155 m<sup>3</sup>/s, en el escenario RCP8.5 el caudal máximo alcanza valores de 180 m<sup>3</sup>/s. Mientras en los escenarios RCP2.6 y RCP 4.5, el 50% de los datos se mantiene cerca de los 100 m<sup>3</sup>/s, en este el RCP8.5, el valor es de 128 m<sup>3</sup>/s, y el 75% de los caudales alcanzan valores de 140 m<sup>3</sup>/s, casi un 20 m<sup>3</sup>/s más que los demás escenarios.

Con relación a los caudales mínimos, para la mayoría de los escenarios y periodos estos se mantienen cercanos o sobre 68.60 m<sup>3</sup>/s (1981-2010), presentándose leve disminución en el escenario RCP 2.6, con valores de 68.40 m<sup>3</sup>/s (2011-2040), 67.30 m<sup>3</sup>/s (2041-2070), y 64.90 m<sup>3</sup>/s (2071-2100). Todo lo contrario ocurre en el escenario RCP8.5, en el cual el caudal mínimo esperado está entre 70 m<sup>3</sup>/s (2011-2040) y 82 m<sup>3</sup>/s (2071-2100).

- **Cuenca 7**

En el periodo de referencia, esta cuenca presenta valores de caudal mínimo de 90.50 m<sup>3</sup>/s, máximo de 155 m<sup>3</sup>/s, primer cuartil de 106 m<sup>3</sup>/s y el tercer cuartil de 126 m<sup>3</sup>/s. En general se observa que a medida que se avanza en años horizonte aumenta el caudal, es un ejemplo que el caudal máximo supera ; para el primer periodo (2011-2040) los 160 m<sup>3</sup>/s en todos los RPC, para 2041-2070 el umbral de 180 m<sup>3</sup>/s, y el de 190 m<sup>3</sup>/s de 2071 a 2100.

Respecto a los escenarios RCP, en el periodo de 2011-2040 la mayor variación se da para los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5, donde el 75% de los caudales alcanzan valores de 150 m<sup>3</sup>/s y el 25% supera el valor de 103 m<sup>3</sup>/s, con un caudal máximo de 200 m<sup>3</sup>/s en el escenario RCP4.5.

En el periodo 2041-2070, para los escenarios RCP2.6 y RCP 4.5, los resultados de caudal son similares, con máximos cercanos a 180 m<sup>3</sup>/s, sin embargo la distribución de los datos es diferente, ya que el escenario RCP 2.6, presenta valores de caudal mínimo de 83 m<sup>3</sup>/s, y la mediana de los datos está más cerca de valores altos de caudal, mientras que el RCP4.5 el caudal mínimo es de 91 m<sup>3</sup>/s y el 50% de los datos se concentra en torno al valor promedio de los caudal 136 m<sup>3</sup>/s . El escenario de mayores variaciones es el escenario RCP8.5, con un caudal máximo superior a 200 m<sup>3</sup>/s y un mínimo de 100 m<sup>3</sup>/s.

En el último periodo horizonte, los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5 evidencian los mayores cambios, el caudal se estima alcanza los 200 m<sup>3</sup>/s, mientras que el escenario RCP2.6 es de 180 m<sup>3</sup>/s. El caudal mínimo en el escenario RCP8.5 aumenta a 98 m<sup>3</sup>/s, es decir 8 m<sup>3</sup>/s respecto al caudal mínimo de referencia. Además mientras en los demás escenarios el 75% de los caudales están cerca de 150 m<sup>3</sup>/s, en el RCP8.5 el 25% de los caudales está cerca de este valor y el 50% de los caudales supera este umbral.

Es de resaltar que RCP8.5 es el escenario donde mayores cambios se observa, para todos los periodos, por ejemplo, el aumento de caudal indica que el 75% de los caudales alcanza un valor de  $154 \text{ m}^3/\text{s}$  en el periodo 2011-2040,  $160 \text{ m}^3/\text{s}$  de 2041 a 2070 y  $173 \text{ m}^3/\text{s}$  de 2071 y 2100, este último valor supera al caudal máximo ( $158 \text{ m}^3/\text{s}$ ) simulado en el escenario de referencia (1981-2010).

- **Simulación de sedimentos totales**

La construcción de embalses altera el balance natural de los ríos, ya que se genera sedimentación en la estructura como consecuencia de las bajas velocidades derivadas de la retención del agua. Debido a la acumulación de los sedimentos, los reservorios van paulatinamente perdiendo capacidad de almacenamiento de agua, y por consiguiente su vida útil se ve disminuida. Además, las secuelas de dicha sedimentación también se ven reflejadas tanto aguas arriba como aguas abajo de las represas, con efectos de agradación y degradación derivados del ejercicio natural del río de sobrepasar el desbalance generado como consecuencia de la modificación, tanto del caudal líquido como del caudal sólido natural del cuerpo de agua.

**De acuerdo a lo anterior, la generación de sedimentos es un factor importante, ya que se relaciona con la vida útil de los sistemas y cambios en la dinámica fluvial del río. En las cuencas seleccionadas como muestra, se localizan tres represas importantes del sistema hidroeléctrico; presa hidroeléctrica; presa central Mazar (cuenca 8), presa Daniel Palacios (6), y presa central Cardenillo (7). En la**

Figura 20, se indican los resultados de la simulación de sedimentos totales toneladas/año generados por estas cuencas.

### **Cuenca 8**

Para el periodo de referencia (1981-2010), se aprecia que en la cuenca 8 se pueden alcanzar valores altos de sedimentos del orden de  $0.6 \times 10^7$  ton/año, sin embargo en el 50% de los casos no se espera se supere las  $0.4 \times 10^7$  ton/año y en el 75% los  $0.5 \times 10^7$  ton/año.

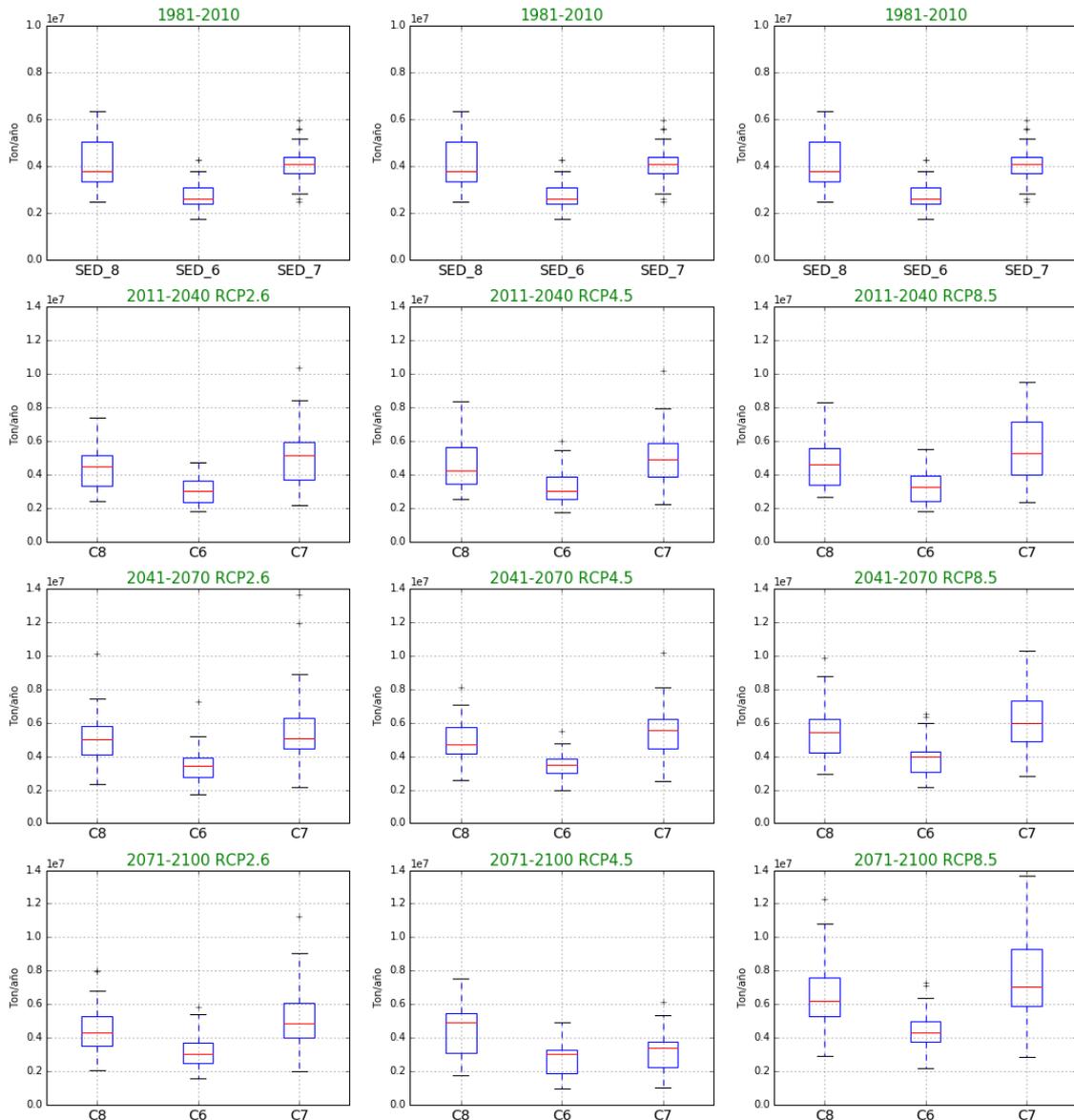
El análisis entre periodo horizonte indica que para el primer periodo (2011-2040), se espera para todos los escenarios que el 50% del sedimento anual generado supere las  $0.4 \times 10^7$  ton/año, y en los escenarios RCP 4.5 y RCP 8.5, se alcancen valores máximos de  $0.8 \times 10^7$  ton/año, que son  $0.2 \times 10^7$  ton/año más respecto al periodo de referencia.

En el horizonte 2041-2070, los valores máximos de sedimento se mantienen por debajo del  $0.8 \times 10^7$  ton/año en los escenarios RCP 2.6 y RCP 4.5, siendo superado este umbral en el escenario RCP 8.5, sin embargo es de resaltar que para todos los escenarios el primer cuartil es de  $0.4 \times 10^7$  ton/año, valor que en el escenario de referencia representaba el 50% de los valores anuales de sedimento generado, indicador creciente en la generación de sedimento.

Para el último periodo, la mayor variación se presenta en los escenarios RCP 4.5 y RCP8.5, para el primero el 50% de los datos supera las  $0.48 \times 10^7$  ton/año, y presenta valores máximos de  $0.75 \times 10^7$  ton/año. En el escenario RCP8.5, los valores mínimos de sedimento son cercanos a  $0.3 \times 10^7$  ton/año, superando en  $0.1 \times 10^7$  ton/año, el valor de referencia. El escenario RCP8.5, en el 50% de los casos, supera las de  $0.6 \times 10^7$  ton/año, que para el escenario de referencia correspondía al valor máximo. El valor máximo para este escenario pasa el umbral de  $1 \times 10^7$  ton/año, considerado significativo ya que representa  $0.4 \times 10^7$  ton/año, que corresponde a 66%

más que el periodo de referencia, valor que no se alcanza para ningún otro periodo, ni escenario.

**Figura 20 Simulación Sedimentos totales (Ton/año) para escenarios RCP y años Horizonte**



**Cuenca 6**

En la cuenca 6, localizada aguas debajo de la cuenca 8, los sedimentos para los años 1981 a 2010 se estima están entre  $0.18 \times 10^7$  ton/año a  $0.4 \times 10^7$  ton/año, concentrándose los valores en  $0.3 \times 10^7$  ton/año. Como se indica a continuación para todos los periodos y escenarios de cambio climático simulados se supera el valor máximo de  $0.4 \times 10^7$  ton/año estimado para el periodo base.

Para 2011-2040 se identifica para los escenarios RCP4.5 y RCP85, un aumento de  $0.1 \times 10^7$  ton/año en el valor máximo de sedimento. En el periodo 2041-2070, el aumento es similar a los esperados en 2011-2040, con excepción del escenario RCP8.5, en el que alcanza  $0.6 \times 10^7$  ton/año como valor máximo de sedimento generado, cerca de  $0.2 \times 10^7$  ton/año más que en el

periodo base. Por último para 2071 a 2100, se estima, que igualmente los máximos supera el umbral de  $0.4 \times 10^7$  ton/año, siendo el escenario RCP8.5 el de mayor variación, ya que el 50% de los datos sobrepasa este umbral.

Respecto a los valores mínimos de sedimento, en el escenario RCP 4.5 para el periodo 2071-2100, la cantidad de sedimentos decrece en  $0.1 \times 10^7$  ton/año, para los demás periodos y escenarios se mantiene cercano al valor de referencia ( $0.2 \times 10^7$  ton/año).

### **Cuenca 7**

En la cuenca 7, se generan entre  $0.3 \times 10^7$  a  $0.5 \times 10^7$  ton/año de sedimento, según los resultados del periodo base. De los escenarios simulados, el escenario RCP8.5, es el que mayores cambios en la cantidad de sedimentos presenta, a medida que aumenta el periodo horizonte, para este escenario, aumenta la cantidad de sedimento producido, pasando de un máximo en el periodo 1981-2010 de  $0.5 \times 10^7$  ton/año a  $1 \times 10^7$  ton/año (2011-2040), en el siguiente periodo (2041-2070) se mantiene en el mismo rango los valores máximos, pero la mediana se acerca más a valores extremos. Para el último periodo horizonte, 2071-2100, los sedimentos podrían alcanzar un valor máximo de  $1.3 \times 10^7$  ton/año y el 25% de la carga alcanzar las  $0.6 \times 10^7$  ton/año, valor que no se alcanzaba para el periodo inicial, indicador del aumento significativo de sedimentos en la cuenca.

Con relación a los valores mínimos de sedimentos, se mantienen cercanos a  $0.2 \times 10^7$  ton/año, similares al periodo de referencia con excepción del escenario RCP4.5 para el periodo de 2071-2100, donde se presenta valores de  $0.1 \times 10^7$  ton/año.

### **Análisis espacial de los resultados obtenidos**

A continuación se indican los mapas comparativos entre los cambios observados entre los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5, respecto a los diferentes años horizonte, se indica los valores que presenta la variable de interés para el periodo de referencia (1981 a 2010) y los demás mapas representan la variación de cada variable respecto al periodo de referencia para los diferentes años horizonte.

Se ha seleccionado los escenarios RCP 2.6 y RCP8.5, ya que cada uno representa el escenario de menor (RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>) y mayor (RC 8.5 W/m<sup>2</sup>.) forzamiento radiativo que se producen al año 2100, como ya se ha mencionado, tiene en cuenta las variables socioeconómicas involucradas, y por ende, permite comparar un escenario de menor y mayor gestión de las emisiones.

Es importante aclarar que para la generación de estos mapas se han tomado los valores medio anuales por cada periodo de las variables de interés; media del caudal diario anual, media de los sedimentos totales anuales y media de los sólidos suspendidos totales anuales.

- **Caudal diario Medio**

Para el periodo de referencia se identifica que en la parte alta de la cuenca el caudal varía entre 1.02 a 8.52 m<sup>3</sup>/s, en la cuenca media el caudal aumenta hasta cerca de 53.10 m<sup>3</sup>/s, entre la cuenca baja y media 75 m<sup>3</sup>/s y en la cuenca baja, donde se localiza el complejo hidroeléctrico, alcanza los 130 m<sup>3</sup>/s.

## Escenario RCP 2.6

Para el periodo de 2011 a 2040 se observa desensos de caudal de hasta  $-0.53 \text{ m}^3/\text{s}$ , en la cuenca 8, localizada en centro del área de drenaje y la cuenca 28 en la parte derecha superior, ésta drena a la cuenca 6 y en la salida de esta ultima se localiza la presa Daniel Palacios. En la cuenca baja donde se localiza el complejo hidroelectrico las mayores variaciones se relacionan con el aumento de caudal, se observa aumentos de  $+1.32 \text{ m}^3/\text{s}$  hasta  $+4.77 \text{ m}^3/\text{s}$ .

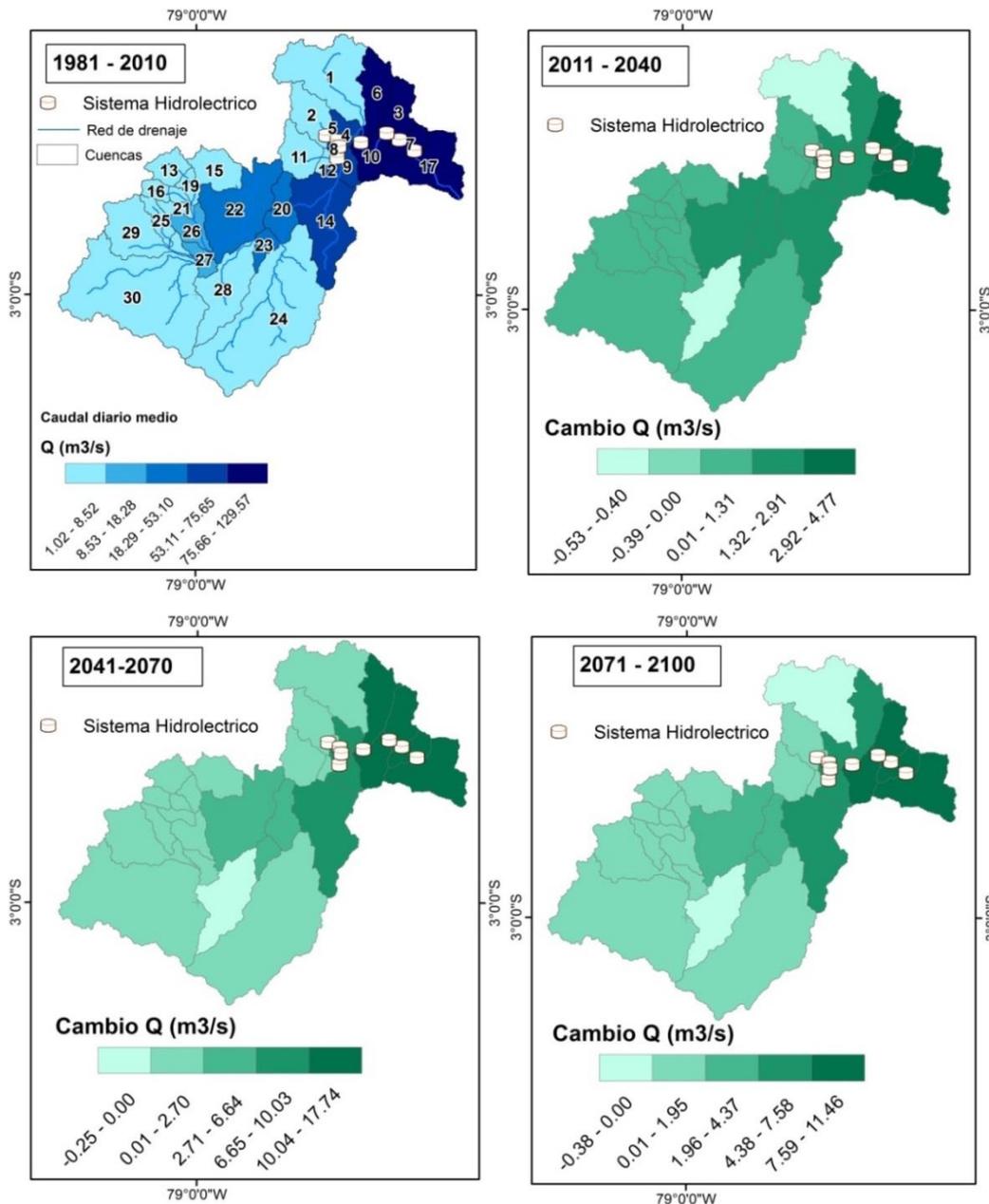


Figura 21 Proyección de la Variación del caudal diario medio Escenario RCP2.6 y periodos horizonte SWAT

En el periodo 2041 a 2070, se evidencia disminución del caudal medio diario en la cuenca 8, de hasta  $-0.25 \text{ m}^3/\text{s}$ , en las demás cuencas se observan aumento de caudal, en la cuenca media se incrementan en  $+2.7$  y  $+6.7 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el área donde se localiza el complejo hidroelectrico, el aumento varía de  $+7$  a  $+10 \text{ m}^3/\text{s}$  aguas arriba, hasta un máximo de  $+17.74 \text{ m}^3/\text{s}$  en la parte baja. Es para este periodo donde el escenario RCP2.6 indica los mayores aumentos de caudal,

es así como en la parte baja donde el caudal medio diario es de  $130 \text{ m}^3/\text{s}$  (en el periodo de referencia), este puede aumentar hasta  $147.7 \text{ m}^3/\text{s}$ .

En el ultimo periodo en condiciones del escenario RCP2.6, las cuencas 8 y 1 son más vulnerables a disminución de caudal en cerca de  $-0.38 \text{ m}^3/\text{s}$ . En las demás cuencas se espera un aumento de caudal, que alcanza un máximo de  $+11.46 \text{ m}^3/\text{s}$  a la salida de la cuenca, en la zona donde se localiza la central Cardenillo, central Sopladora y Paute Molino.

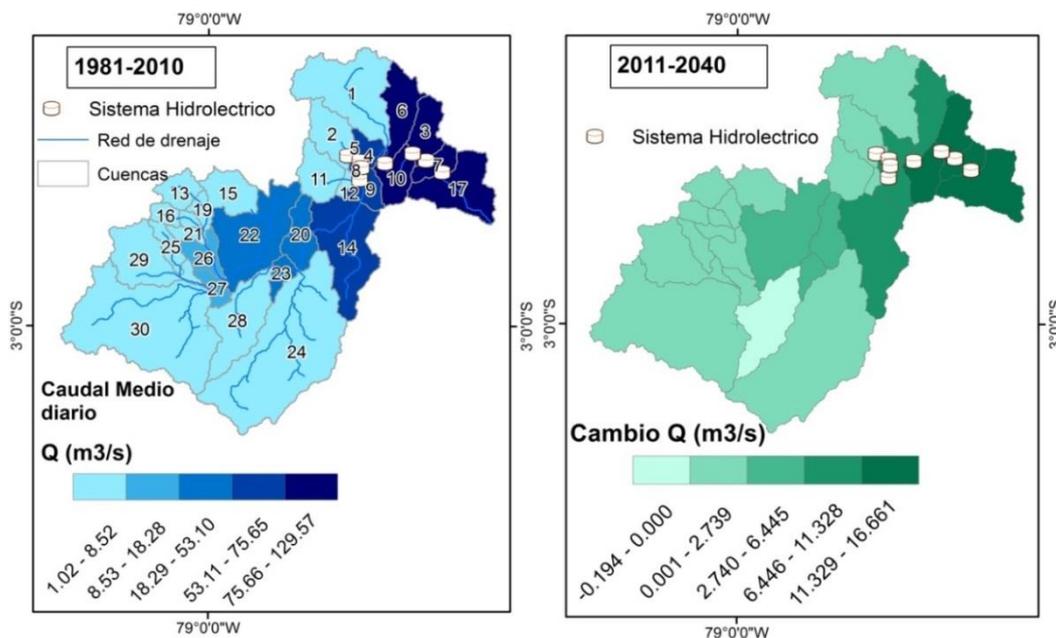
### Escenario RCP 8.5

Para este escenario, se identifican las mayores variaciones, por ejemplo, en el periodo 2011-2040, mientras que en el escenario RCP2.6 el aumento de caudal en la cuenca baja era de máximo  $+4.77 \text{ m}^3/\text{s}$ , para el escenario RCP8.5 el aumento se estima en  $+16 \text{ m}^3/\text{s}$ , que indica un aumento de caudal de la cuenca baja de  $129 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $146 \text{ m}^3/\text{s}$ . Respecto a la disminución de caudal, que se presenta en la cuenca 8, se alcanzarían valores de  $-0.20 \text{ m}^3/\text{s}$ , que corresponde a una menor disminución respecto a la estimada en el escenario RCP2.6.

En el periodo 2041-2070, para el escenario RCP8.5 el rango de variación es más mayor al observado en el escenario RCP2.6, al alcanzar en la cuenca baja un aumento máximo de hasta  $+29.64 \text{ m}^3/\text{s}$ , que para el escenario RCP2.6 correspondía a máximo  $+17.74 \text{ m}^3/\text{s}$ . Es así como el caudal en la cuenca baja podría alcanzar un caudal máximo para este periodo de  $160 \text{ m}^3/\text{s}$ .

Para el periodo 2071-2100, los aumentos de caudal medio diario, pueden variar de  $+0.39$  a  $+45.71 \text{ m}^3/\text{s}$ , esta última la variación más significativa respecto a los demás periodos y escenarios simulados. Es así como se pueden alcanzar caudales medio diarios de  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  en la cuenca alta,  $70.5 \text{ m}^3/\text{s}$  en la cuenca media y  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  en la cuenca baja, que corresponde a un aumento en cerca de un 23%, 37% y 50% respecto al escenario de referencia.

Es de resaltar que para este escenario en los periodos 2041-2070 y 2071-2100, no se evidencia disminución de caudal en ninguna de las cuencas.



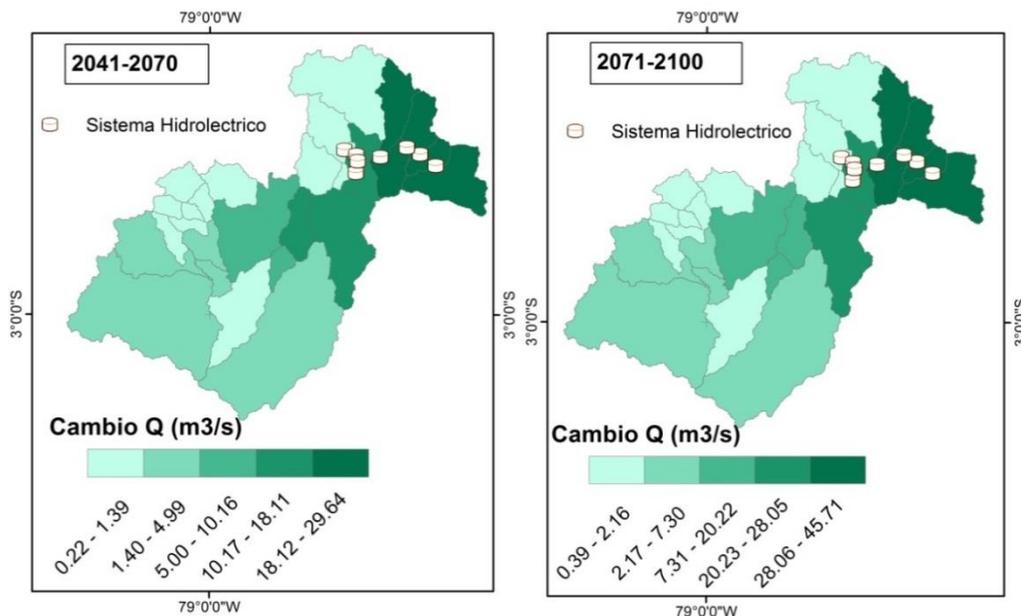


Figura 22 Proyección de la Variación del caudal diario medio Escenario RCP8.5 y periodos horizonte Simulada en SWAT

- **Simulación sedimentos**

De acuerdo a la dinámica fluvial de los drenajes en la cuenca, el cambio en el tamaño de material, los cambios de pendiente (disminución), hacen que conforme avance en el río, cambie también el modo de transporte del sedimento. Al inicio del recorrido, el transporte en la capa del fondo es más importante, en sus tramos finales lo es el material del fondo en suspensión y el transporte de lavado (Sánchez & Maza, 1985).

Para el periodo de referencia la cantidad de sedimento anual generados se estima entre  $0.20$  a  $6 \times 10^5$  Ton/año en las cuencas de la parte alta, cuencas de menor área drenada, con excepción de las cuenca 30, 28 y 24 que alcanza valores de  $14.98 \times 10^5$  Ton/año. En la cuenca media y baja, donde el río Paute ya ha recibido gran parte de sus tributarios, se observan la mayor generación de sedimentos del orden de  $14.90 \times 10^5$  Ton/año a  $53.13 \times 10^5$  Ton/año, esto es coherente, ya que a medida que aumenta el caudal de río, aumenta su capacidad de transporte, sin olvidar que existen otros factores como el uso del suelo y la fuerte pendiente de la cuenca, que a su vez aumentan la magnitud de este proceso.

#### Escenario RCP 2.6

Para el primer periodo, 2011 -2040, en la mayoría de las cuencas se identifica aumento en la cantidad de sedimento generado, con excepción de las cuencas 28 y 1, donde se estima una disminución de hasta  $-8.40 \times 10^5$  Ton/año, lo anterior, puede relacionarse con la cantidad de caudal de estas cuencas, ya que para el mismo periodo y escenario se estima que el caudal decrece en las mismas.

Para el mismo periodo, se observa un aumento en la cantidad de sedimento generado, en parte media y baja de la cuenca, aumentando en promedio hasta  $+ 3.86 \times 10^5$  Ton/año. Es de resaltar que el aumento más significativo se presenta en las cuencas 30 y 17, con aumento de hasta  $+9.49 \times 10^5$  Ton/año, es así como en la cuenca 30 puede pasar de  $15 \times 10^5$  Ton/año a tener valores de hasta  $24.5 \times 10^5$  Ton/año, siendo la única cuenca alta donde se observan cambios tan significativos. La cuenca 17, es el área de salida de toda la cuenca del río Paute,

por ende, es de esperarse que en esta se den los máximos valores de sedimentos, ya que en este punto se recoge toda la carga de sedimentos transportada por el drenaje, siendo un reflejo del aumento de la erosión que se da en los diferentes sectores de la cuenca.

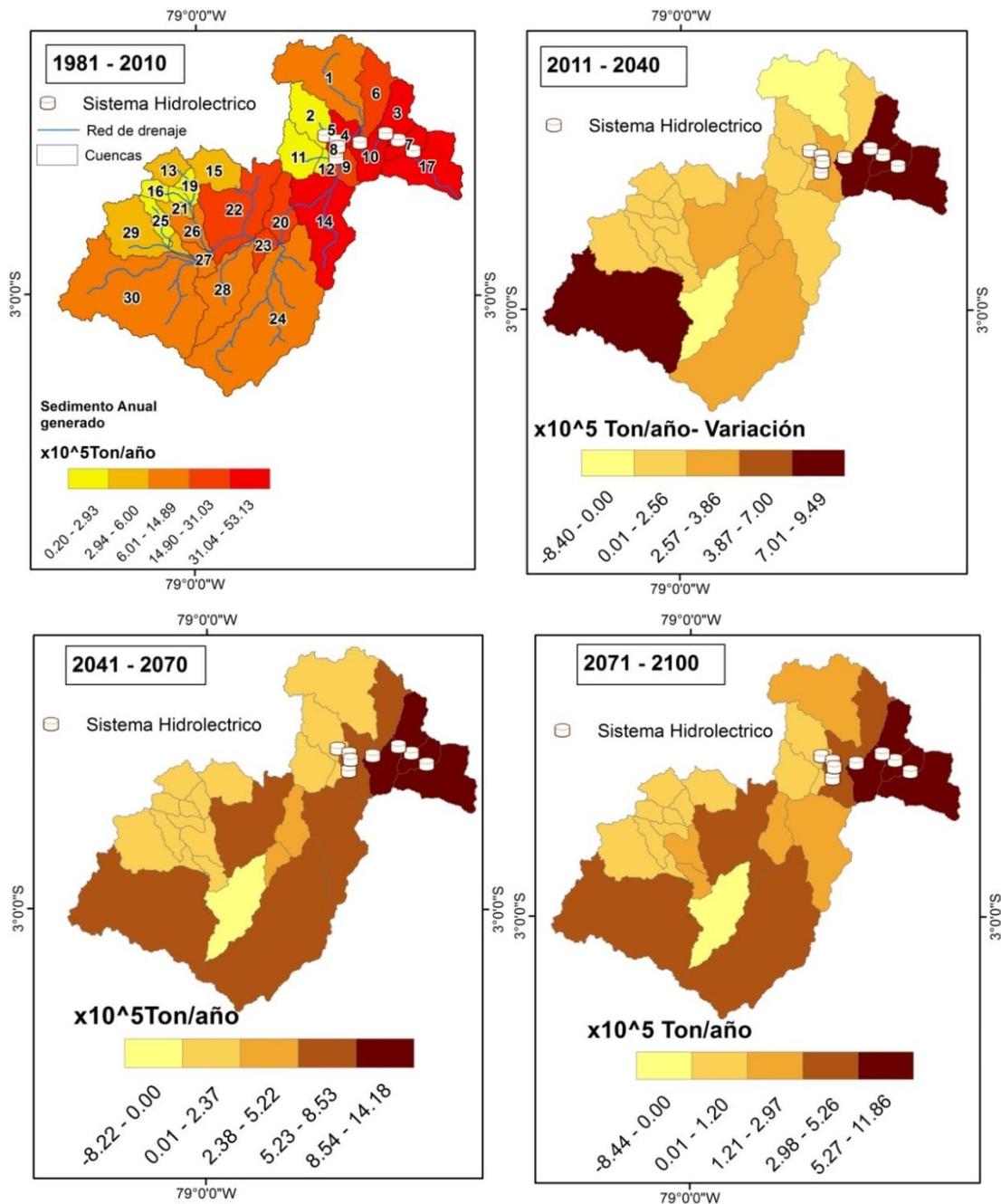


Figura 23 Proyección de la Variación del sedimento anual (Ton/año) Escenario RCP2.6 y periodos horizonte simulación SWAT

El periodo de 2041 a 2070, se evidencia como el periodo de mayor aumento de generación de sedimentos, con excepción de la cuenca 28. En la mayoría del área el aumento se encuentra en el rango de +5.23 a +8.53  $\times 10^5$  Ton/año. Se suma a esto, que en las cuencas donde se evidencia aumento de sedimentos superior a + 5.23  $\times 10^5$  Ton/año, en su gran mayoría para el periodo de referencia (1981-2010) presentan la mayor cantidad de sedimento (en su mayoría entre a 15  $\times 10^5$  Ton/año a 53  $\times 10^5$  Ton/año), que se traduce, en que mínimo de 20 Ton/año a

78 Ton/año de sedimentos totales anuales se generaran en esas cuencas para el periodo 2041-2070 (**Figura 23**).

Para el ultimo periodo horizonte, 2071-2100, en la mayoría del área se presenta aumento en la carga de sedimentos, principalmente en las cuencas que para el periodo de referencia generan más sedimentos. El aumento máximo esperado es de +5.27 Ton/año hasta 11.86 Ton/año, que se alcanza en la cuenca baja (**Figura 23**).

Es de resaltar que para todos los años horizonte (2011-2100) en la cuenca baja, cuencas 3,7,10 y 17, donde se localiza algunos componentes del sistema hidroelectrico, se observa un aumento en la carga de sedimentos, que varia de +9.5 a +14.18  $\times 10^5$  Ton/año, y que se traduce en una carga total de un 18% a un 27% más de sedimento, lo cual representa un riesgo, para el mantenimiento de la vida util del embalse, principalmente para la presa Cardenillo, localizada en la cuenca 7.

### Escenario RCP8.5

En la Figura 24 se indican los resultados de la simulación de sedimentos totales generados por la cuenca para el escenario RCP8.5.

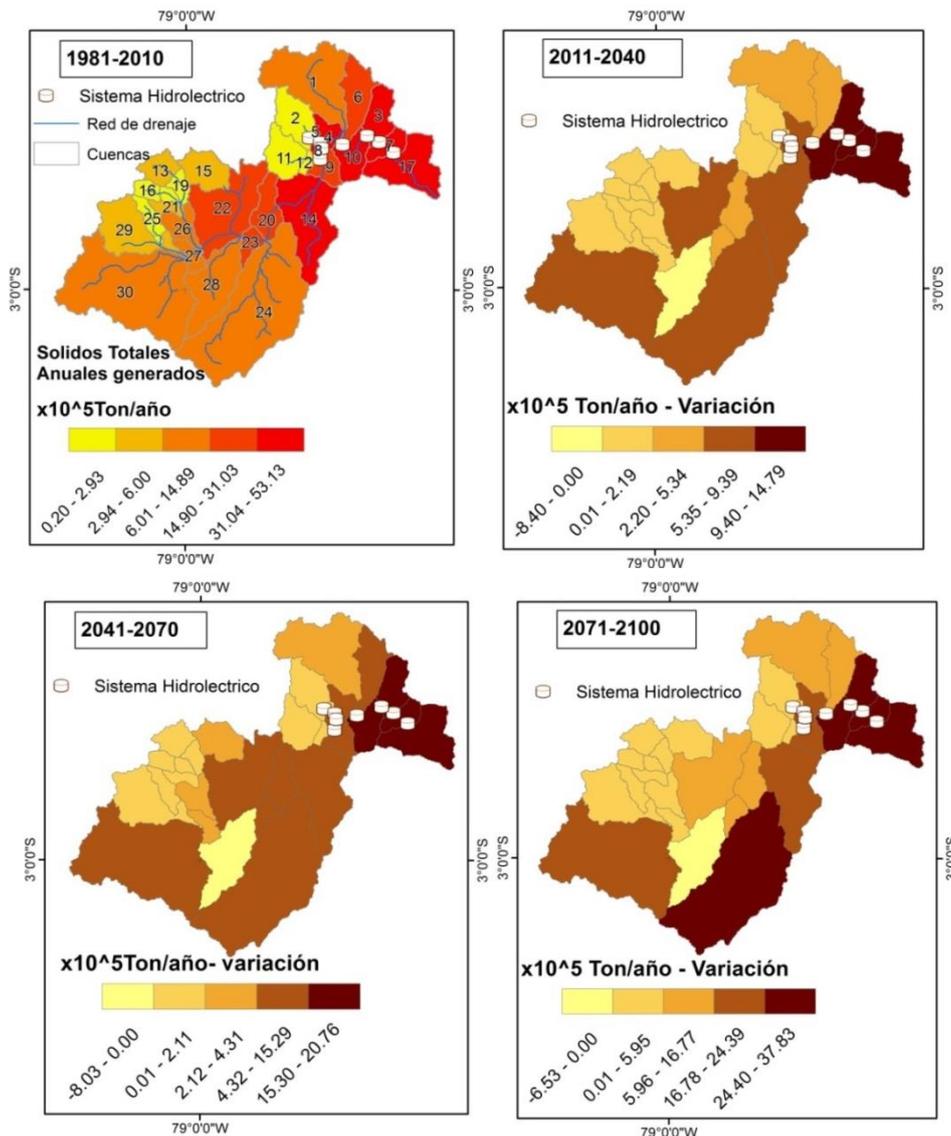


Figura 24 Proyección de la Variación del sedimento anual (Ton /año) Escenario RCP8.5 y periodos horizonte

Para el periodo de 2011 a 2040, al igual que en el escenario RCP 2.6, se estima disminución en la cantidad de sedimento generada por la cuenca 28 en el orden de  $-8.4 \times 10^5$  Ton/año. Respecto al aumento de sedimento, se identifica un aumento máximo de  $+5.34 \times 10^5$  Ton/año en la cuenca media,  $2 \times 10^5$  Ton/año más que las observadas en el escenario RCP2.6. La cuenca baja refleja la mayor variación con un máximo de  $+9.49 \times 10^5$  Ton/año, que indican una generación total de  $67 \times 10^5$  Ton/año.

Las proyecciones indican para el periodo 2041-2070, un aumento en la generación de sedimento en un rango máximo de  $+20,7 \times 10^5$  Ton/año, en la zona de la cuenca baja y de máximo  $+15.29 \times 10^5$  Ton/año en la cuenca media.

En el periodo 2071-2100, se presenta la mayor generación de sedimento, se estima en  $+37.83 \times 10^5$  Ton/año en la cuencas bajas (3-10-7 y 17) y la cuenca media (24). Esto se traduce en una generación total de  $90 \times 10^5$  Ton/año en la cuenca baja y  $70 \times 10^5$  Ton/año en la cuenca 24.

La cuenca 28, es la única que para todos los periodos presenta disminución en la generación de sedimentos, esta disminución varía de  $-8.40 \times 10^5$  Ton/año a  $-6.53 \times 10^5$  Ton/año, del periodo 2011 -2040 y 2071-2100.

- **Sólidos suspendidos Totales (mg/l)**

La cantidad de sólidos suspendidos es uno de los parámetros de calidad de agua más importante, respecto al abastecimiento de agua para uso doméstico. La cantidad de sólidos en suspensión transportada por el drenaje depende de los procesos de erosión y sedimentación asociada a la dinámica fluvial de los drenajes, principalmente del cauce principal, en este caso el río Paute.

Para el periodo de referencia se indentifica una concentración máxima de hasta  $2.28 \times 10^3$  mg/l sólidos suspendidos en la cuenca media, en la cuenca alta estos valores no superan los 100 mg/l.

En la cuenca baja la cantidad de sólidos suspendidos esta entre  $1.06 \times 10^3$  mg/l y  $1.75 \times 10^3$  mg/l, lo cual podría suponer ser un indicador, de capacidad de transporte mayor en la cuenca media, donde se genera una gran cantidad de sedimento transportado por el río que posteriormente se sedimenta antes de llegar en suspensión a la cuenca baja. Otra factor puede ser la retención de los mismos por los sistemas de captación de agua presentes en la cuenca o los sistemas de presa del sistema hidroeléctrico, sin embargo no se tiene información detallada al respecto.

A continuación se indican los resultados de sólidos suspendidos totales mg/l año, esperados en la cuenca del río Paute para el escenario RCP 2.6 y RCP 8.5, en los diferentes periodos simulados (**Figura 25**).

#### Escenario RCP 2.6

En el primer periodo (2011-2040) en el escenario de RCP 2.6, se identifica algunas variaciones en la concentración de sólidos suspendidos, en las cuencas donde se presentaban los menores valores de sólidos suspendidos 30,28,24,15,13,17,15, entre otras que en su mayoría son cuencas de nacimiento de agua, presentan disminución de hasta  $-0.04 \times 10^3$  mg/l. Para estas mismas cuencas se presenta disminución en el periodo 2071-2100 del orden de  $-0.11 \times 10^3$

mg/l. En las demás cuencas de la zona media y baja del área drenada, aumenta la concentración de sólidos suspendidos, con un aumento máximo de  $+0.18 \times 10^3$  mg/l.

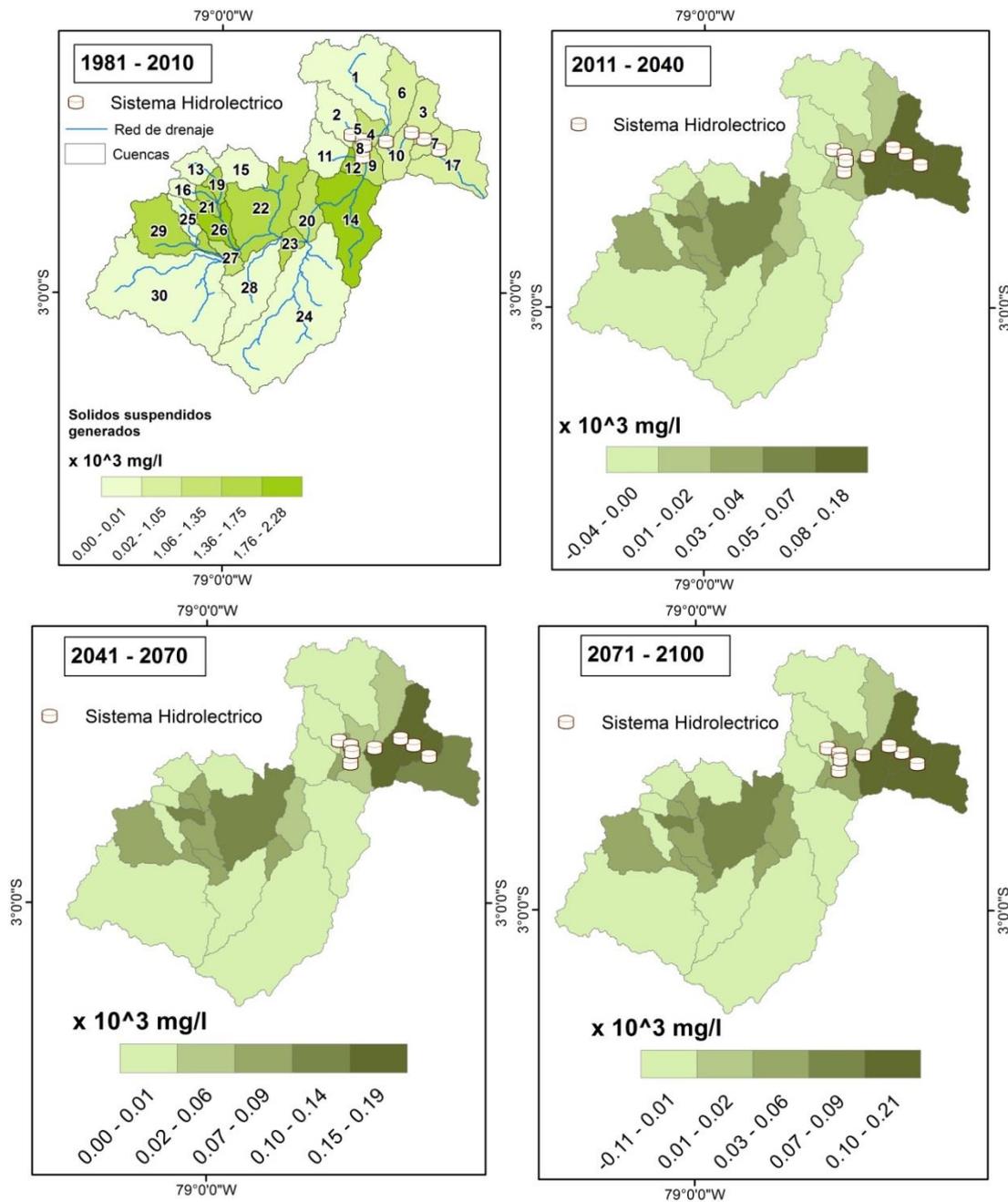


Figura 25 Proyección de la Variación de la concentración de sólidos suspendidos totales anual (mg/l) Escenario RCP2.6 y periodos horizonte

Para 2041-2070, el aumento alcanza los  $+0.19 \times 10^3$  mg/l y no se identifica para ninguna de las cuencas disminución en la concentración de sólidos suspendidos.

De 2071 a 2100, el aumento máximo en la cuenca media y baja es de  $+0.21 \times 10^3$  mg/l, que representa una concentración de sólidos totales de  $2.50 \times 10^3$  mg/l a la salida de la cuenca (Figura 25).

### Escenario RCP 8.5

Para el escenario RCP8.5, se observan unas variación en la concentración de sedimentos más significatva que la observada para el escenario RCP2.6, es así como en el periodo de 2011-2040, en este escenario se estima aumente la concentración en la cuenca baja a  $+0.24 \times 10^3$  mg/l, valor que corresponde a la máxima variación esperada en el escenario RCP2.6 para el periodo de 2071-2100. Para este mismo periodo no se identifica disminución en la concentración de solidos suspendidos para ninguna de las cuencas (**Figura 26**).

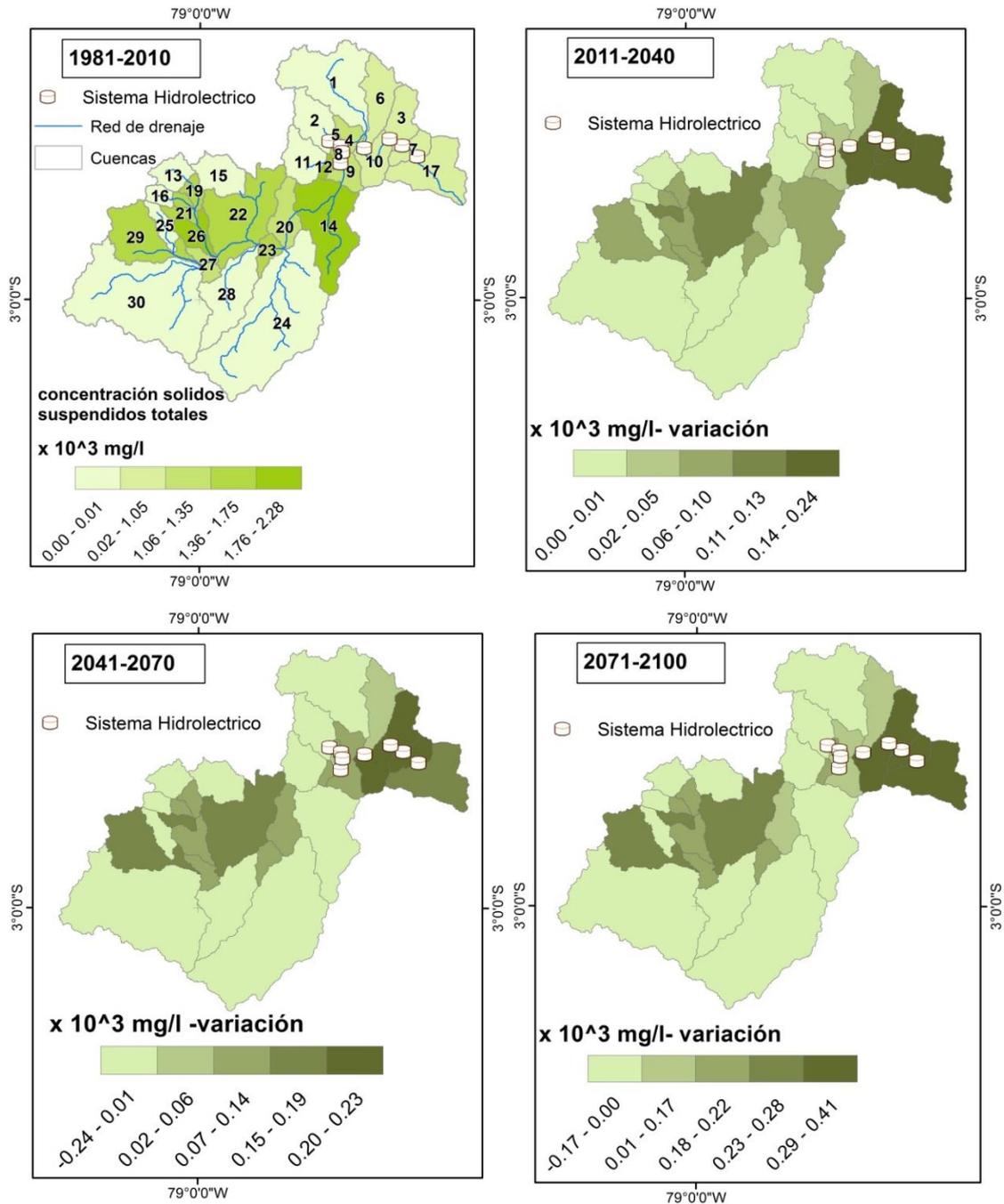


Figura 26 Proyección de la Variación de la concentración de solidos suspendidos totales anual (mg/l) Escenario RCP8.5 y periodos horizonte.

Los resultados de las proyecciones de 2041-2070, no varian mucho a los presentados en el periodo anterior, se alcanza una concentración máxima de  $0.23 \times 10^3$  mg/l.

El escenario RCP8.5, en el periodo 2071-2100, presenta la maxima variabilidad en relacion a la concentración de solidos, por ejemplo en la cuenca baja aumenta la concentración en  $+0.41 \times 10^3$  mg/l generando una concentración total de solidos de  $4.70 \times 10^3$  mg/l.

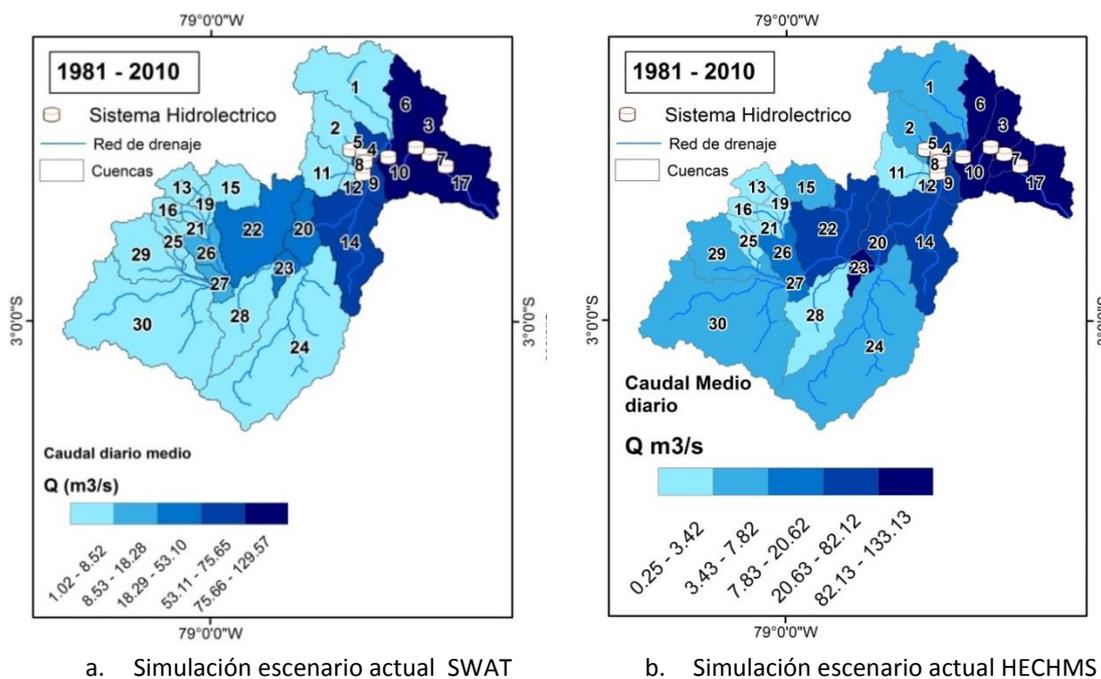
La parte media de la cuenca (subcuencas 29,26,22,23,21,19,20, 14) y cuenca baja para las diferentes proyecciones, presentan los valores mayores de concentración de sólidos, comportamiento similar al observado en el escenario de referencia.

### Discusión de resultados generados en HEC HMS Y SWAT

A continuación se describen las principales diferencias de los resultados obtenidos en la simulación de caudales y sedimentos implementando el modelo SWAT y el modelo HECHMS. Se divide en dos etapas el analisis, en la primera se discute los resultados de caudal a partir de la cartografica SIG generada con los resultados de cada modelo. En la segunda se analizan los resultados de sedimentos a partir de graficas, ya que el modelo HECHMS no genera serie de datos de sedimento simulado que se puedan exportar con facilidad, siendo más conveniente visualizar los resultados a partir de las graficas generadas por el modelo. Esta es la primera diferencia a resaltar entre estos dos modelos.

- **Caudal medio diario**

Respecto a los caudales para el escenario de referencia simulados en SWAT, en la cuenca alta se generan caudales de  $1.02$  a  $8.52$  m<sup>3</sup>/s, en la cuenca media el caudal aumenta hasta cerca de  $53.10$  m<sup>3</sup>/s y en la cuenca baja se estima entre  $74$  y  $130$  m<sup>3</sup>/s. La simulación en HechHms indica valores de  $0.25$  a  $7.82$  m<sup>3</sup>/s en la cuenca alta, hasta  $82.12$  m<sup>3</sup>/s en la cuenca media y en la baja de  $133.13$  m<sup>3</sup>/s, lo que indica en terminos generales que HechHms esta simulando mayores caudales. Sin embargo, no se consideran significativas las diferencias de los resultados de cada modelo y su distribución en el área de la cuenca (**Figura 27**).

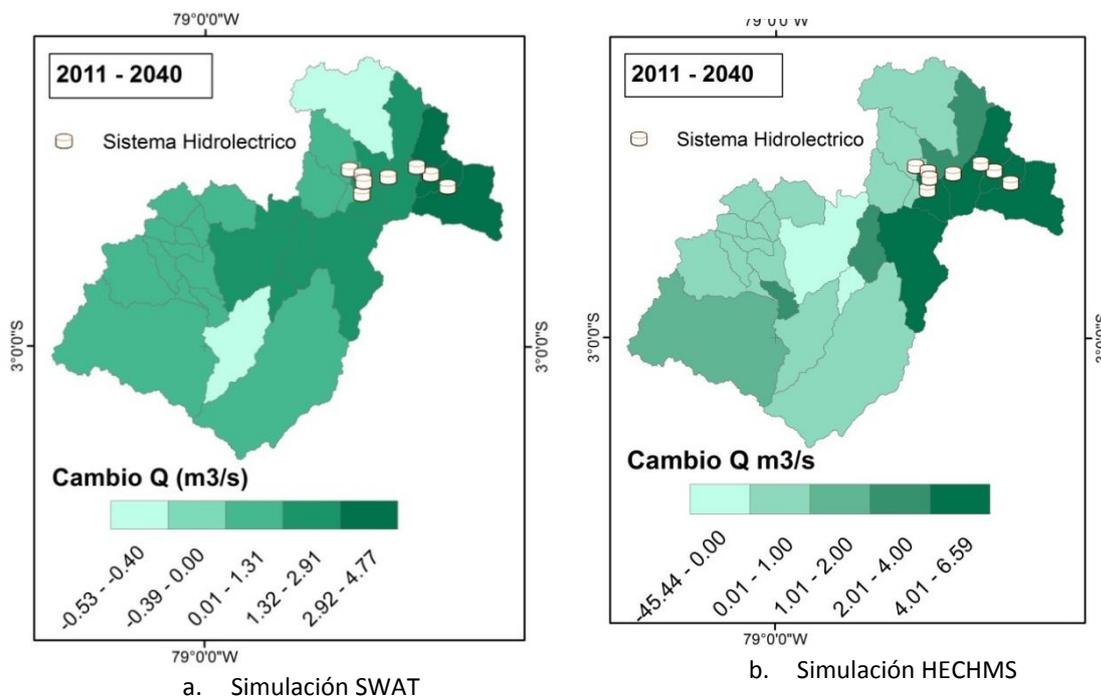


**Figura 27 Simulación de caudal medio diario para el periodo de referencia (1981-2010)**

A continuación se indica las diferencias en relación a los caudales simulados por HECHMS y SWAT para escenario RCP2.6 y RCP8.5.

Respecto a los escenarios de cambio climático, para el escenario RCP 2.6, las mayores diferencias entre los dos modelos son los resultados de disminución de caudal, mientras la simulación de SWAT indica una disminución máxima de  $-0.53 \text{ m}^3/\text{s}$  para la cuenca 28 para el periodo 2011-2040, en HECHMS, esta disminución de caudal, en la cuenca 23 puede alcanzar valores de  $-45.44 \text{ m}^3/\text{s}$  (periodo 2011- 2040) hasta  $-46.35 \text{ m}^3/\text{s}$  (2071-2100).

Sin embargo se deben leer estos resultados con precaución, siempre partiendo del escenario de referencia, en HECHMS el escenario de referencia indica un valor medio de caudal de la cuenca 23 de  $95 \text{ m}^3/\text{s}$ , que para el periodo 2011-2040 (escenario RCP2.6) decrece a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$ . El modelo SWAT indica un valor para el escenario de referencia de  $43.40 \text{ m}^3/\text{s}$  que para el periodo 2011-2040 (RCP2.6) aumenta a  $45 \text{ m}^3/\text{s}$ , por tanto, los valores de caudal total coinciden para ambas simulaciones en un rango de  $45$  a  $50 \text{ m}^3/\text{s}$  en el periodo 2011-2040.



**Figura 28 Simulación de la variación de caudal medio diario escenario RCP2.6 periodo 2011-2040**

Con relación al aumento de caudal, en el escenario RCP 2.6, para cada periodo, ambos modelos muestran tendencias similares, de 2011 a 2040 se espera un aumento máximo en la cuenca baja de  $+4.77 \text{ m}^3/\text{s}$  (SWAT) y  $+6.59 \text{ m}^3/\text{s}$  (HECHMS), para 2041-2070 es de  $+17.74 \text{ m}^3/\text{s}$  (SWAT) y  $+17.53 \text{ m}^3/\text{s}$  (HECHMS) y para 2071-2100 es de  $+11.46$  (SWAT) y  $10.99$  (HECHMS). Teniendo en cuenta que el modelo SWAT simula para la cuenca baja, en el periodo de referencia, un caudal total de máximo  $129.57 \text{ m}^3/\text{s}$  y HECHMS simula  $133.13 \text{ m}^3/\text{s}$ , las implicaciones con relación al aumento de caudal, a simple vista, son más significativas en la simulación realizada con HECHMS, ya que indica que el caudal máximo puede alcanzar valores de  $140 \text{ m}^3/\text{s}$  (2011-2040),  $150.66 \text{ m}^3/\text{s}$  (2041-2070) y  $144.12$  (2071-2100), pero e que en terminos generales se diferencia de los resultados de SWAT en más o menos  $5 \text{ m}^3/\text{s}$ .

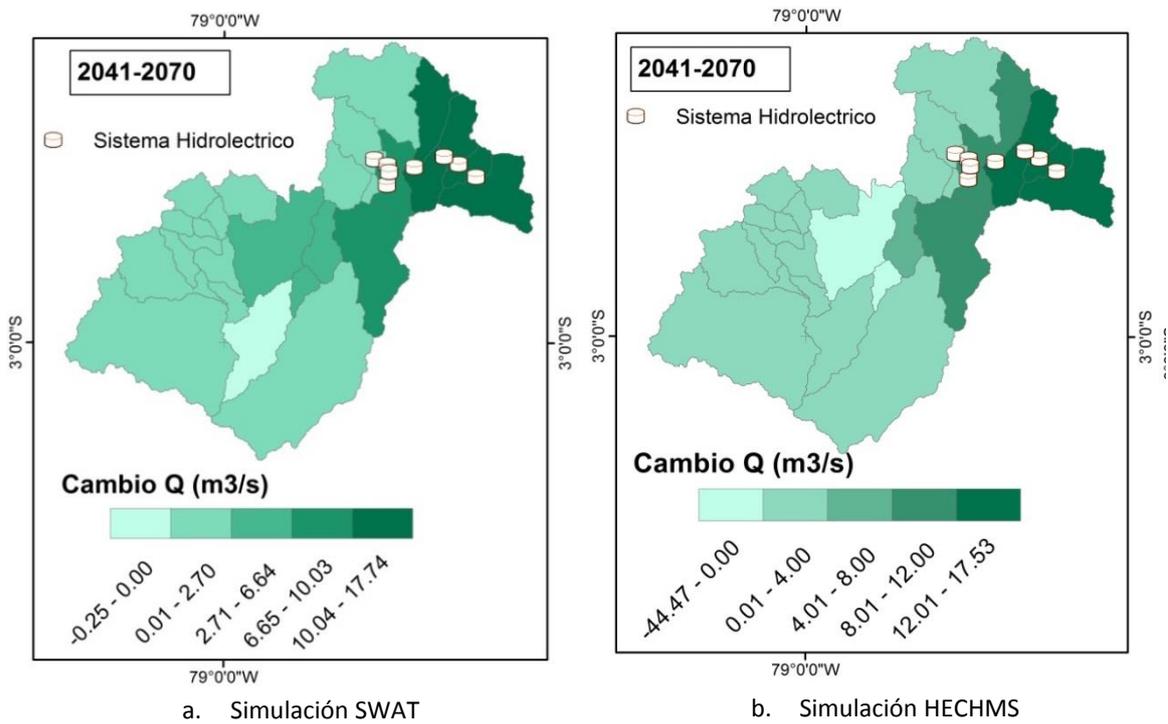


Figura 29 Simulación de la variación de caudal medio diario escenario RCP2.6 periodo 2011-2040

Respecto al escenario RCP8.5, para ambos modelos, es el escenario que evidencian mayores variaciones respecto al escenario de referencia. Las variaciones en relación al aumento de caudal de 2011 a 2040 se estiman entre + 16.66 m<sup>3</sup>/s (SWAT) y + 16.34 (HECHMS). Para 2041 a 2070 el aumento es cercano a +30 m<sup>3</sup>/s y para el periodo de mayores variaciones (2071-2100) es de +45.71 m<sup>3</sup>/s (SWAT) y +45.19 m<sup>3</sup>/s (HECHMS), reflejado principalmente el en aumento de caudal de la cuenca baja, para la cual se puede aumentar el caudal total de 129.57 m<sup>3</sup>/s a 175 m<sup>3</sup>/s , según resultados de SWAT o de 133 m<sup>3</sup>/s a 178.5 m<sup>3</sup>/s , según indica HECHMS, siendo la diferencia entre ambos resultados de caudal total al final de la cuenca de 4 m<sup>3</sup>/s .

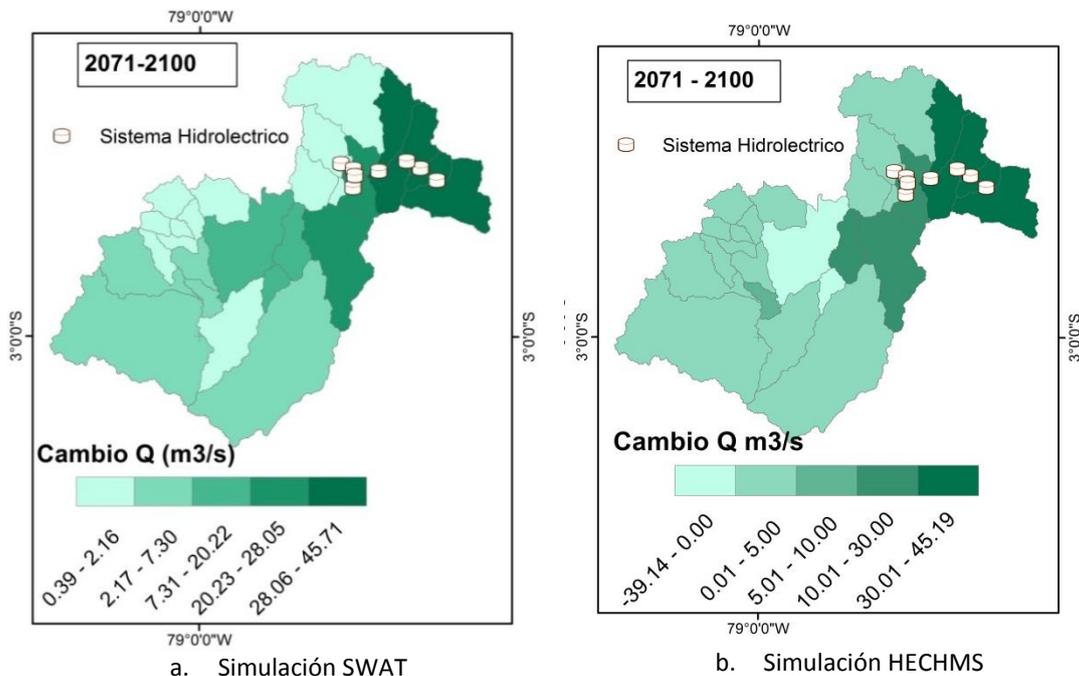


Figura 30 Simulación de la variación de caudal medio diario escenario RCP2.6 periodo 2011-2040

Es de resaltar para este escenario RCP8.5, que la simulación en HECHMS, indica para todos los periodos una disminución de caudal de las cuencas 22 y 23, de hasta  $-39 \text{ m}^3/\text{s}$ . En el caso de la cuenca 22 la disminución de caudal es de  $49 \text{ m}^3/\text{s}$  (1981-2010) a  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  (2071 -2100), este resultado se asocia a la incertidumbre en el proceso de calibración de cada modelo en esa área de la cuenca, ya que los valores de precipitación y temperatura usados para ambos modelos es la misma, y los resultados de evapotranspiración no varían significativamente en relación al escenario de referencia. Ya que no se tienen datos de caudal medidos en esta cuenca, no es posible afirmar con certeza el comportamiento de esta, sería necesario una simulación más detallada de la misma.

- **Sedimentos**

Respecto a la simulación de sedimentos, la comparación de ambos modelos se realiza a partir de graficas de sedimentos totales diarios simulados por cada modelo en la cuenca 14. Se considero conveniente realizar esta comparación en una cuenca para la cual se calibraron los caudales líquidos. Las diferencias más relevantes entre los dos modelos, es que en general HECHMS simula una menor generación de sedimentos, mientras que para el escenario de referencia el modelo SWAT indica valores máximos de  $250.000 \text{ Ton/día}$  (Figura 31), el modelo HECHMS en esta cuenca estima valores de máximo  $1200 \text{ Ton/día}$  (Figura 32).

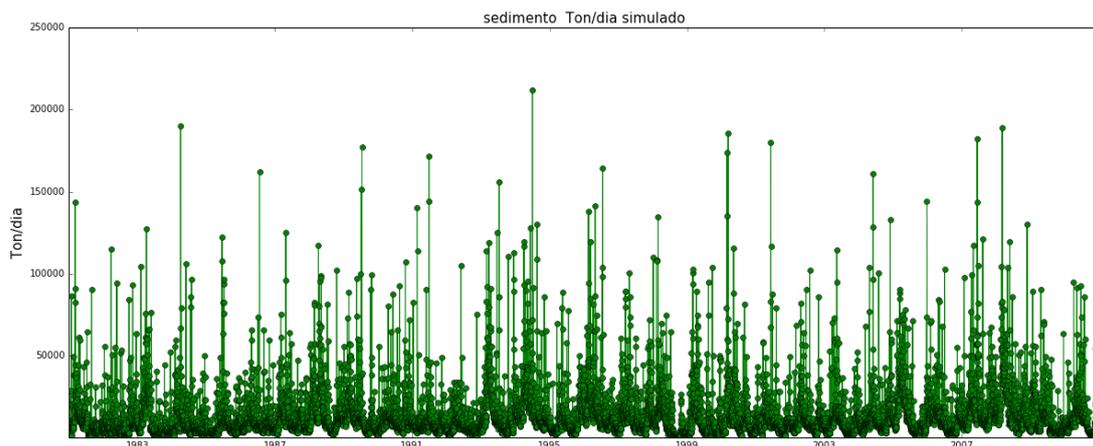


Figura 31 simulación SWAT sedimento Ton/día subcuenca 14 (1981-2010)

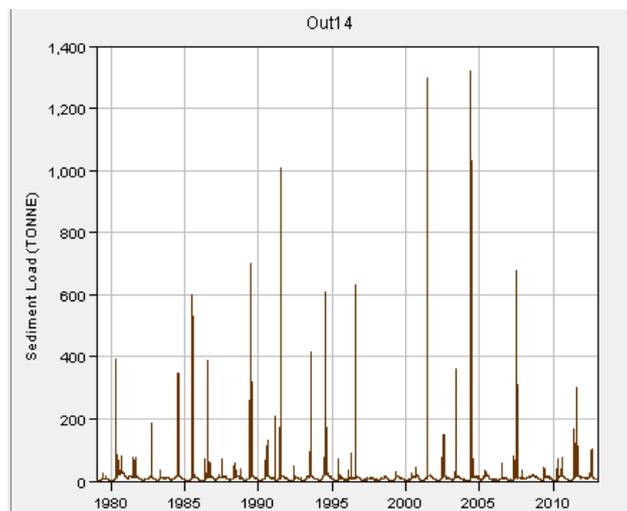


Figura 32 simulación HECHMS sedimento Ton/día subcuenca 14 (1981-2010)

De acuerdo a lo anterior, para en la simulación de sedimentos de cambio climático es de esperarse menores valores en la simulación del modelo HECHMS. Para el escenario RCP2.6 (2071-2100) el modelo SWAT estima un aumento en la generación de sedimentos con valores máximos de 250000 ton/día (**Figura 33**) y HECHMS de máximo 1900 Ton/día (**Figura 34**). En ausencia de más estaciones de medición, de acuerdo a las características del río y la cuenca se considero que el modelo SWAT es el que mejor se ajusta a la generación de sedimentos presente en la cuenca para el escenario de referencia, es por esto que apartir de sus resultados se analizó lel comportamiento de la cuenca en relación a la generación de sedimento para los diferentes escenarios de cambio climático.

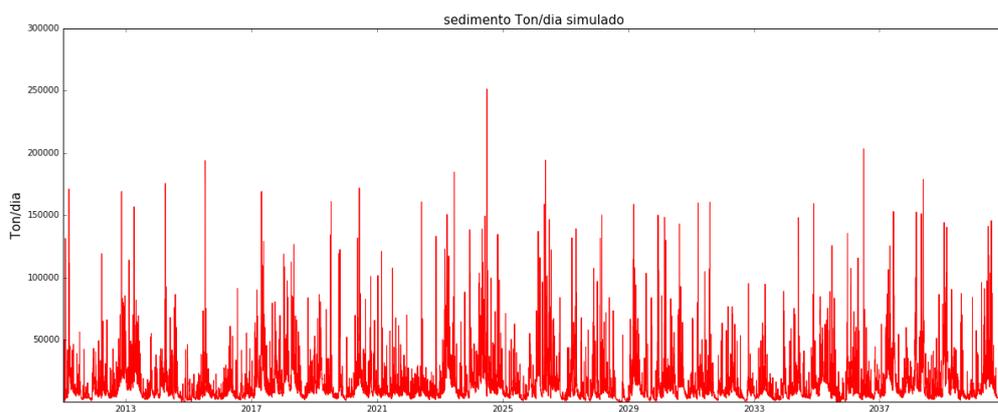


Figura 33 simulación SWAT sedimento Ton/día subcuena 14, RCP 2.6(2071-2100)

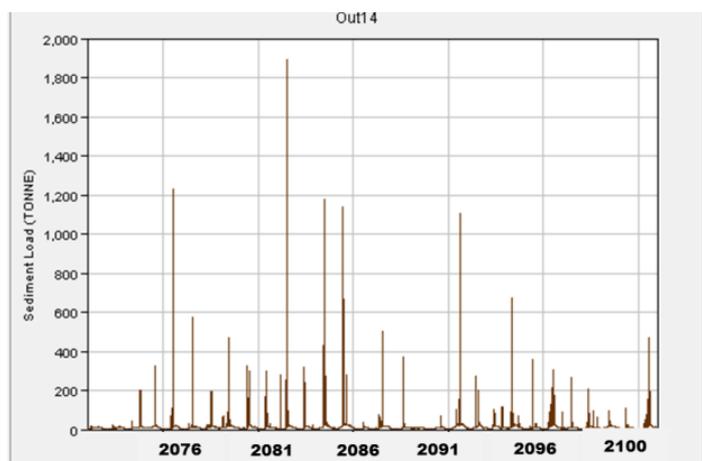


Figura 34 simulación SWAT sedimento Ton/día subcuena 14, RCP2.6 (2071-2100)

- **Análisis DAFO DE LA APLICACIÓN DE LOS MODELOS SWAT Y HECHMS**

Ambos modelos de simulación lluvia caudal, presentan características específicas para su uso, aspectos como requerimientos de datos mínimos de entrada, tiempo de simulación, interfaz, generación de errores y resultados generados fueron evaluados en las matrices de Debilidades, Amenazas, Fortalezas y Oportunidades (DAFO), indicadas en la Tabla 8 y Tabla 9. A partir del cual se concluye que en relación a un análisis de caudal, a partir de modelado lluvia-caudal, para escenarios actuales y proyectados, el modelo HECHMS permite calcular con menores requerimientos resultados similares a los calculados por SWAT.

Respecto a la simulación de sedimentos, el modelo SWAT presenta mejores resultados, y permite un mejor ajuste de los sedimentos generados en la cuenca. Sin embargo, esto también puede estar influenciado por la ausencia de datos de calidad tanto medidos, como de estudios de sedimentos detallados en la cuenca.

**Tabla 6 DAFO MODELO SWAT**

<b>Debilidad</b>	<b>Amenaza</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere la calibración de muchos parámetros, que a su vez aumentan el grado de incertidumbre.</li> <li>- Requiere un mayor número de datos de entrada: precipitación, mapa de uso del suelo, mapa de tipo de suelo, temperatura. En los formatos definidos por el modelo.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere un buen equipo para su ejecución</li> <li>- Requiere mayor tiempo de ejecución</li> </ul>
<b>Fortaleza</b>	<b>Oportunidad</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Incorpora directamente herramientas de delimitación de la cuenca</li> <li>- Permite la lectura directa de archivos de texto de precipitación y temperatura</li> <li>- Permite incorporar cambio en uso del suelo</li> <li>- Permite exportar fácilmente todos los datos de todas las variables simuladas.</li> <li>- Calcula directamente la evapotranspiración con los datos de temperatura ingresados.</li> <li>- Interfaz visualmente es agradable.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Visualización en GIS de otras variables de la cuenca en el mismo entorno de trabajo (Arcgis)</li> <li>- Permite integrar a la simulación el comportamiento de otras variables, como humedad relativa y viento que para proyectos de gestión hídrica pueden resultar interesantes. Sin embargo para todo ellos se requieren datos de entrada de buena calidad y en los formatos definidos por el Software.</li> </ul>

**Tabla 7 DAFO MODELO HECHMS**

<b>Debilidad</b>	<b>Amenaza</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- Requiere de ingreso de información manualmente, lo que a veces puede dar más espacio a errores del usuario.</li> <li>- Requiere el cálculo de evapotranspiración por separado.</li> <li>- Para delimitación de la cuenca a partir del Modelo Digital de Elevaciones, requiere el uso de otras herramientas no incluidas en el modelo, extensión HECGEO HMS compatible con Arcgis.</li> </ul> <p>La modelación de sedimentos, fue subestimada por el modelo. Es posible que se requiera una alta calidad de datos de entrada para que el modelo simule mejor esta variable.</p> <p>No se encuentra bibliografía suficiente del uso de este modelo para la simulación sedimentos.</p>	<p>El programa permite visualizar resultados, sin embargo los archivos de resultados no permiten ser exportados en diferentes formatos.</p>
<b>Fortaleza</b>	<b>Oportunidad</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>- HECHMS requiere menos parámetros de calibración en relación al SWAT. Para el estudio se obtuvieron resultados similares a los simulados en SWAT.</li> <li>- Una vez calibrado, en el mismo archivo se pueden simular los escenarios cambiando únicamente los datos de precipitación y evapotranspiración.</li> <li>- Para este estudio el modelo HECHMS presentó mejores valores de ajuste según la referencia (Moriasi et al., 2007)</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Menores requerimientos de tiempo e información de entrada para la simulación de caudales. Amplia aplicación para estudios en los que se tenga poca información de la cuenca.</li> </ul>

## 6. CONCLUSIONES

Los resultados de la simulación de ambos modelos de lluvia-escorrentía indican para el escenario RCP 8.5 los mayores cambios, principalmente en la zona media y baja de la cuenca del río Paute. Se estima un aumento de caudal líquido diario total de  $180 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $91 \times 10^5$  Ton/año de sedimento generado en la salida de la cuenca para el periodo 2071-2100. Un aumento de caudal en términos de generación eléctrica, puede considerarse positivo, ya que se dispone del caudal suficiente para cumplir con los requerimientos del sistema, sin embargo un aumento de caudal conlleva un aumento en la capacidad de transporte de sedimentos del río, y por ende, un aumento en el riesgo de inundación, colmatación y disminución en la resistencia de las estructuras. Estos resultados representan el riesgo y a su vez un reto en la regulación de caudales sólidos y líquidos, evitando la pérdida de vida útil del embalse y modificaciones importantes de la dinámica fluvial aguas arriba y aguas abajo de los sistemas de embalses.

La regulación involucrada la cuenca, el río y el embalse. Acciones como la conservación del suelo, desarrollo e implementación de políticas de uso de suelo y mejoramiento de la cobertura vegetal en la cuenca, puede reducir el aporte de sedimentos al cuerpo de agua y posteriormente al embalse. Los resultados de este estudio pueden ser insumo para un análisis más detallado del sistema y su capacidad de funcionamiento.

Es importante recalcar, que las simulaciones realizadas no se han incorporado a un modelo de simulación de operación de embalses, los resultados corresponden a la simulación de sedimentos y caudal para toda la cuenca, por tanto, no consideran la cantidad de sólidos que actualmente retiene el sistema, ni los que podría llegar a retener para los escenarios proyectados. Esto también incorpora a la simulación un grado de incertidumbre, ya que el escenario de referencia es calibrado con caudales líquidos y sólidos aguas arriba del sistema hidroeléctrico, sin embargo tanto en el escenario actual y escenarios proyectados no se están considerando todos los cambios en el retraso de caudal y retención de sedimento generado por el sistema de embalses.

Ambos modelos, tanto el HECHMS como el SWAT se pueden aplicar perfectamente a este tipo de estudios, sin embargo, se considera que el modelo SWAT requiere mayores parámetros a calibrar y mayor tiempo de preparación de la información de entrada y ejecución. Sin embargo una vez ejecutado sus resultados permiten realizar un análisis más detallado.

En relación a los caudales simulados por el modelo SWAT y HECHMS, la diferencia es aproximadamente  $4 \text{ m}^3/\text{s}$ , para la mayoría de cuencas. Respecto a simulación de sedimentos las diferencias son más significativas, presentándose mayor incertidumbre para ambos modelos en la calibración, es así como la eficiencia de cada modelo también está medida en datos de mediciones distribuidos en toda la cuenca, con series largas y fiables que permitan atender a resultados específicos y calibrar apropiadamente la cuenta disminuyendo el grado de incertidumbre.

## 7. REFERENCIAS

- CIIFEN. (2014). *Metodología para la Estimación de Vulnerabilidad en Ecuador , Perú y Bolivia: Proyecto Información de cambio climático y biodiversidad para el fomento de políticas públicas de conservación y adaptación en la región de los Andes Tropicales*. Retrieved from [http://geoportal.ciifen.org/media/filer\\_public/3f/68/3f68d0ef-e4e5-4285-8da4-aa7e98aad032/analisis\\_de\\_vulnerabilidad.pdf](http://geoportal.ciifen.org/media/filer_public/3f/68/3f68d0ef-e4e5-4285-8da4-aa7e98aad032/analisis_de_vulnerabilidad.pdf)
- Correa, M. E. D. (2002). *"La cuenca del rio paute: diagnostico y propuesta de manejo integral. politicas de desarrollo agropecuario."* Cuenca.
- Luis G. Castillo, J. M. C. (2010). Modelación numérica de la sedimentación y lavado de embalses. *Comité Español de Grandes Presas*.
- Ministerio del Ambiente. (2009). *Estudio de vulnerabilidad actual a los riesgos climáticos en el sector de los recursos hídricos en las cuencas de los Ríos Paute, Jubones, Catamayo, Chone, Portoviejo y Babahoyo*. Retrieved from <http://web.ambiente.gob.ec/sites/default/files/users/dhermida/estudiovulnerabilidad.pdf>
- Moriasi, D. N., Arnold, J. G., Liew, M. W. Van, Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model Evaluation Guidelines for systematic Quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50(3), 885–900.
- Ortega, J. C. G. (2013). *Desde el Paute hasta Coca codo Sinclair 40 años de hidroenergía en el Ecuador discurso alrededor de cambio de matriz energética*. <http://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Sánchez, J., & Maza, J. (1985). Morfología de ríos. *Morfología de Rios*.
- Vuille, M. (2013). El cambio climático y los recursos hídricos en los andes tropicales. *Banco Interamericano de Desarrollo*, 21. Retrieved from [http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012\\_VUILLE\\_FINAL\\_ESP.pdf?sequence=1](http://publications.iadb.org/bitstream/handle/11319/5826/SR2012_VUILLE_FINAL_ESP.pdf?sequence=1)

## ANEXO 1 CARACTERIZACIÓN DE INFORMACIÓN HIDROMETEREOLÓGICA

### Pluviometría-Escenario Actual

Tabla 8 caracterización de estaciones pluviométricas seleccionadas

Estación	Act/Inact	%Huecos	Tipo	Periodo	P(mm/año)	Latitud	Longitud	Altitud
M0045	Activa	12,52	CP	06/1974-11/2013	1368,84	-2,716	-78,630	2400
M0138	Activa	5,06	CO	01/1964-01/2013	747,04	-2,800	-78,763	2194
M0139	Activa	9,98	CP	01/1964-05/2013	734,94	-2,882	-78,776	2230
M0140	Inactiva	12,72	CO	04/1969-05/2005	842,82	-2,870	-78,875	2510
M0141	Activa	5,33	CO	01/1964-01/2013	1249,43	-2,733	-79,073	3335
M0217	Activa	21,23	PG	6/1974-12/2013	3060,07	-2,572	-78,567	2321
M0410	Activa	6,63	PV	01/1964-03/2014	1274,17	-2,574	-78,650	2450
M0414	Activa	11,12	PV	01/1964-04/2014	1249,86	-2,670	-78,747	3270
M0417	Activa	10,74	PV	03/1975-08/2013	1343,09	-2,774	-79,172	3270
M0418	Activa	7,66	PV	06/1963-04/2014	669,12	-3,083	-79,013	2720
M0424	Activa	6,73	PV	05/1968-05/2014	741,53	-3,048	-78,786	2600
M0426	Activa	3,44	PV	01/1964-05/2014	910,33	-2,851	-78,949	2545
M0427	Activa	4,37	AU, PV	09/1967-04/2014	1022,01	-2,877	-79,070	2711
M429	Activa	17,85	PV	01/1964-05/2014	1126,98	-2,826	-79,132	2800
M0501	Activa	19,65	PV	12/1971-12/2013	2080,62	-2,702	-78,303	665
M0671	Inactiva	23,89	PV	12/1978-12/1992	990,71	-2,551	-78,608	2680

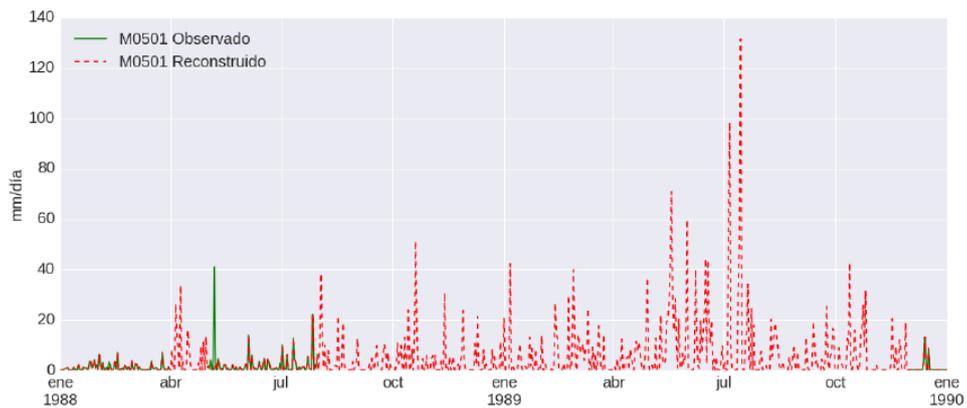


Figura 35 Serie reconstruida de un pluviómetro y serie de datos observados

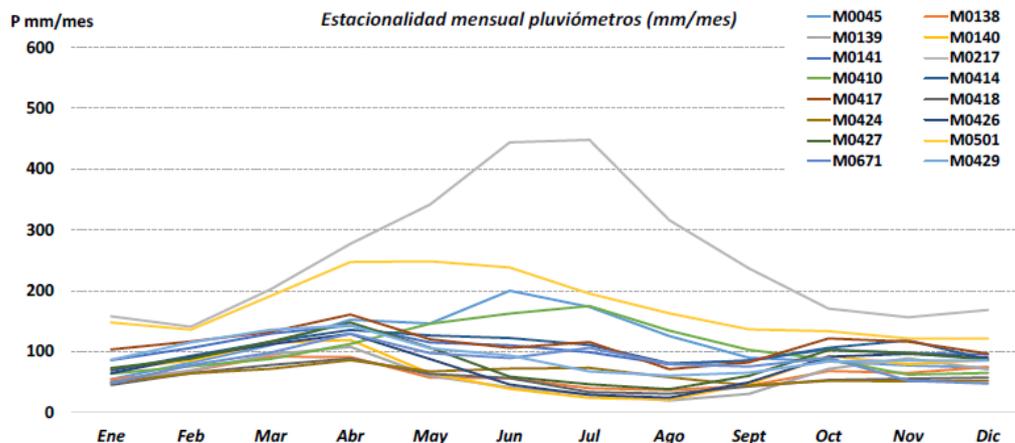


Figura 36 Variación mensual de la precipitación en las estaciones pluviométricas Seleccionadas (mm/mes)

## Termometría-Escenario Actual

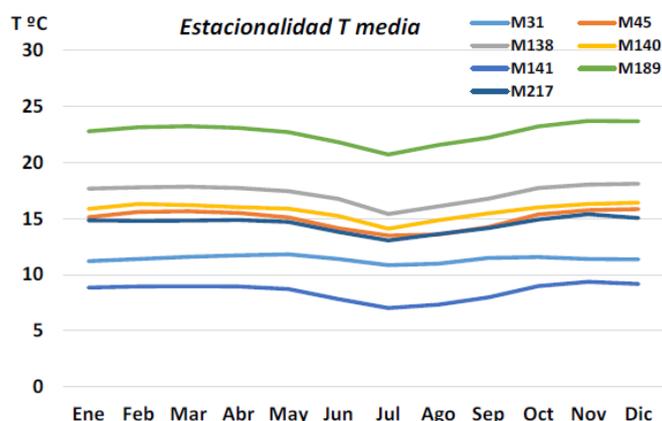
Con respecto a la información disponible de termómetros se han seleccionado 8 estaciones con series lo suficientemente largas y en continuo como para su aplicación en el proceso de caracterización climática según se presenta en la **Tabla 9**.

**Tabla 9** caracterización de estaciones termométricas seleccionadas

Termómetro	Fecha Serie	% huecos	Tmed	Tmax	Tmin	Lat	Long	Altitud
M031	1958-2013	7,35%	11,40514	16,58	7,55	-2,55194	-78,94528	3083
M041	1967-2013	4,06%	21,58877	28,01	16,29	-1,68833	-77,95861	880
M045	1980-2013	21,07%	14,95881	21,13	10,17	-2,71611	-78,62972	2400
M138	1963-2012	10,27%	17,28685	24,08	10,83	-2,8	-78,76278	2194
M140	1969-2004	26,69%	15,72665	22,2	9,02	-2,87028	-78,87472	2510
M141	1964-2013	6,01%	8,51809	13,54	4,49	-2,73278	-79,07306	3335
M189	1977-2013	2,78%	22,66499	28,01	17,99	-3,39806	-78,57583	851
M217	1982-1993	33,33%	14,51043	18,09	9,86	-2,57167	-78,56667	2321

En la siguiente figura se representa la estacionalidad de los termómetros seleccionados, a partir de su temperatura media mensual, en la que se observa la misma tendencia en todos ellos. En los meses de marzo-abril y octubre-noviembre se alcanzan los máximos de temperatura anual mientras que los mínimos se producen en el mes de julio.

**Figura 37** Estacionalidad de las estaciones termométricas seleccionadas



## PROYECCIONES DE CAMBIO CLIMATICO

### Método delta o factor de cambio

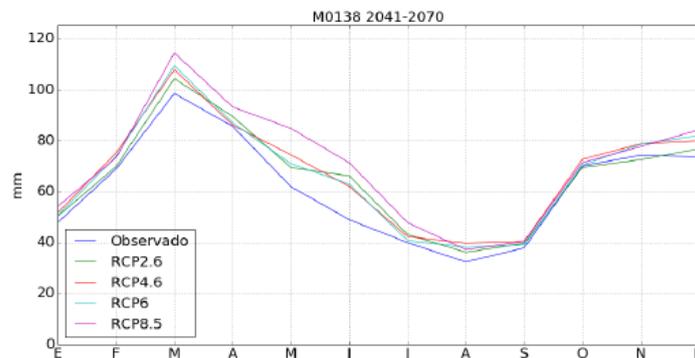
Las proyecciones de los GCM en ocasiones difieren mucho de la realidad. Por lo tanto en vez de utilizar los resultados de las proyecciones directamente como input para los modelos hidrológicos muchas veces es recomendable extraer las tendencias de los resultados de los propios modelos en base a un periodo de referencia; para más tarde ser aplicados a los datos instrumentales. Es precisamente ésta metodología, a escala mensual, la que se ha sido aplicada en el presente informe; utilizando como periodo de referencia para la línea base el periodo que comprende desde el año 1981 al 2010.

### Proyecciones de precipitación

Estando en disposición de los resultados de las proyecciones del downscaling estadístico y dinámico de la TCN, se representa el porcentaje de variación de la precipitación media anual asociada a cada pluviómetro para cada uno de los escenarios. Dado que esta caracterización climática en los distintos escenarios servirá de base para la determinación de los caudales fluyentes en cada una de las subcuencas de análisis, se ha calculado datos para cada subcuencas en las que se divide la cuenca de estudio al objeto de tener una representación hidrológica respecto de los fenómenos que ocurren a nivel de subcuenca.

Los indicadores de precipitación representados por el porcentaje de variación de la lluvia media anual respecto de los datos históricos observados en cada uno de los pluviómetros seleccionados. Estos valores anuales han sido calculados a partir de los valores mensuales, que son los datos empleados para la generación de las proyecciones aplicadas en la modelización hidrológica.

Figura 38 Estacionalidad del pluviómetro M138 escenario 2041-2070

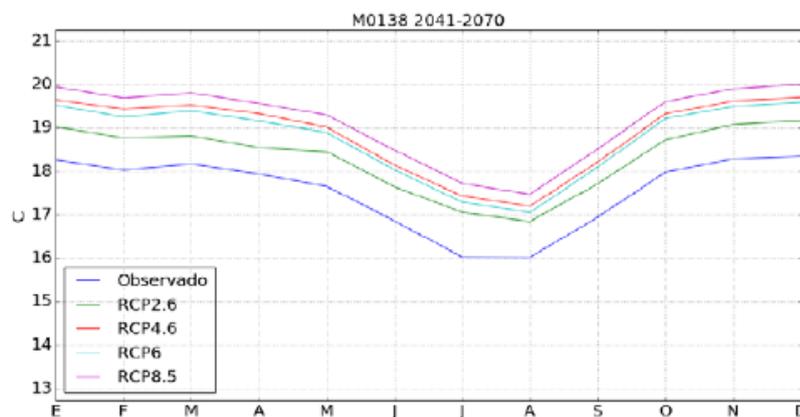


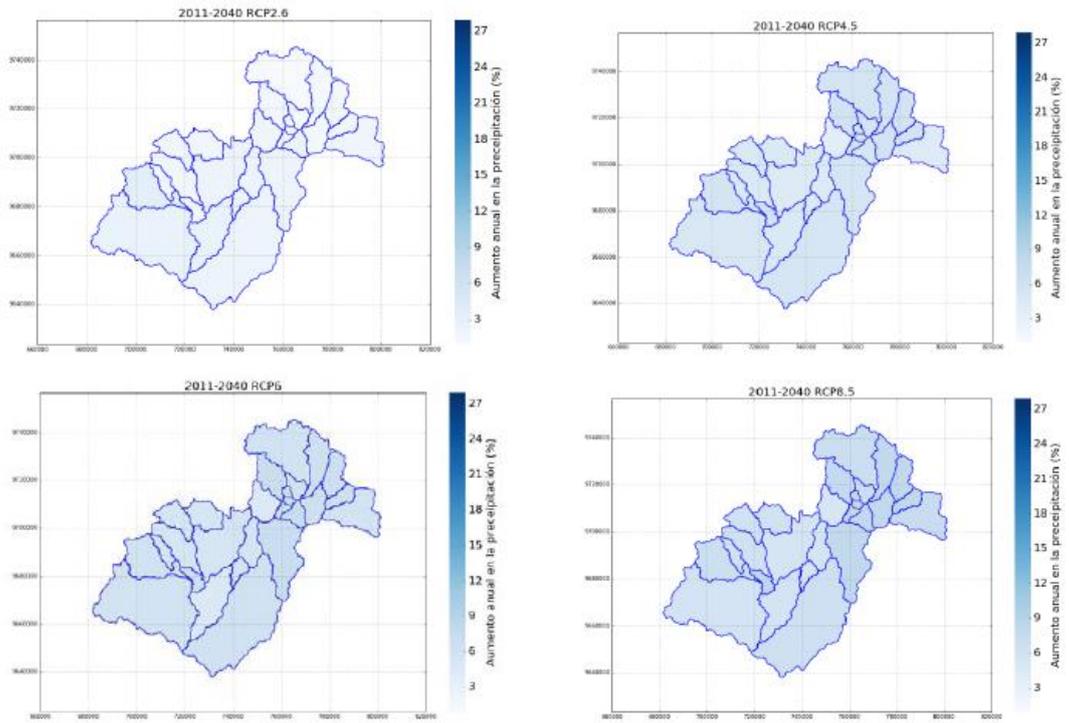
### Proyecciones de temperatura media

Al igual que para el caso de la precipitación media anual, se calcula la variación media de la temperatura en cada uno de los escenarios y RCP.

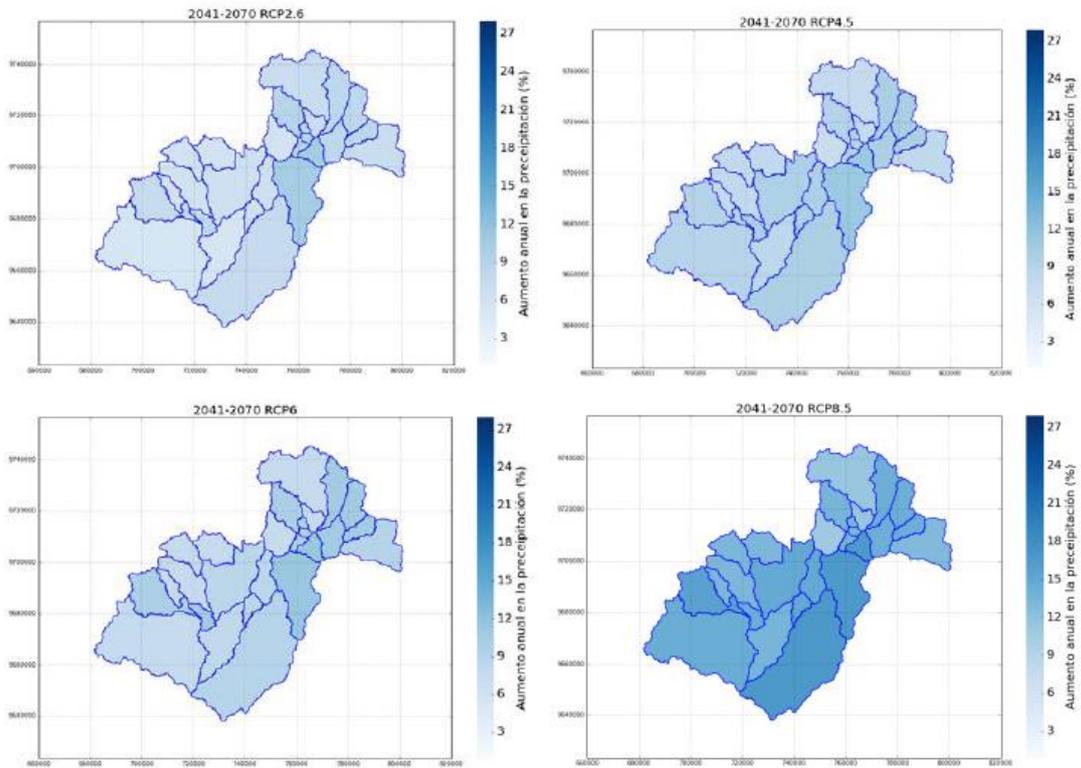
La representación de los cambios de la estacionalidad de la temperatura media mensual de las proyecciones respecto de los datos históricos observados en cada uno de los termómetros. Los valores anuales son una integración de los valores mensuales, que son realmente los datos que se emplean en la generación de las series de temperaturas futuras aplicadas en la modelización hidrológica.

Figura 39 Estacionalidad del termómetro M138 escenario 2041-2070

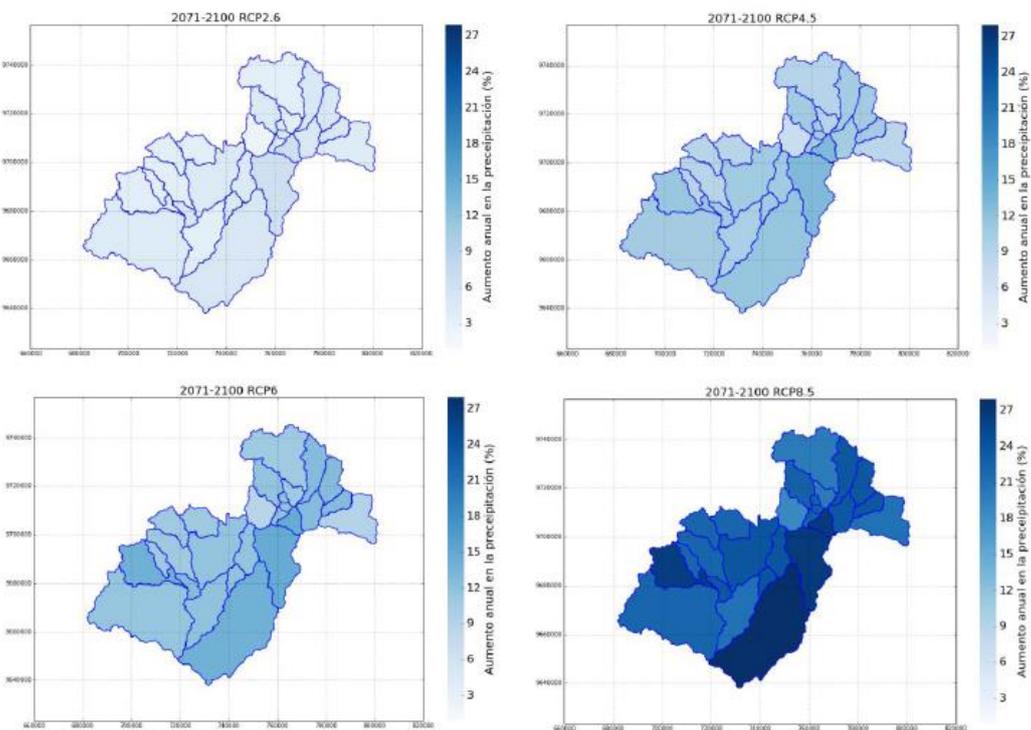




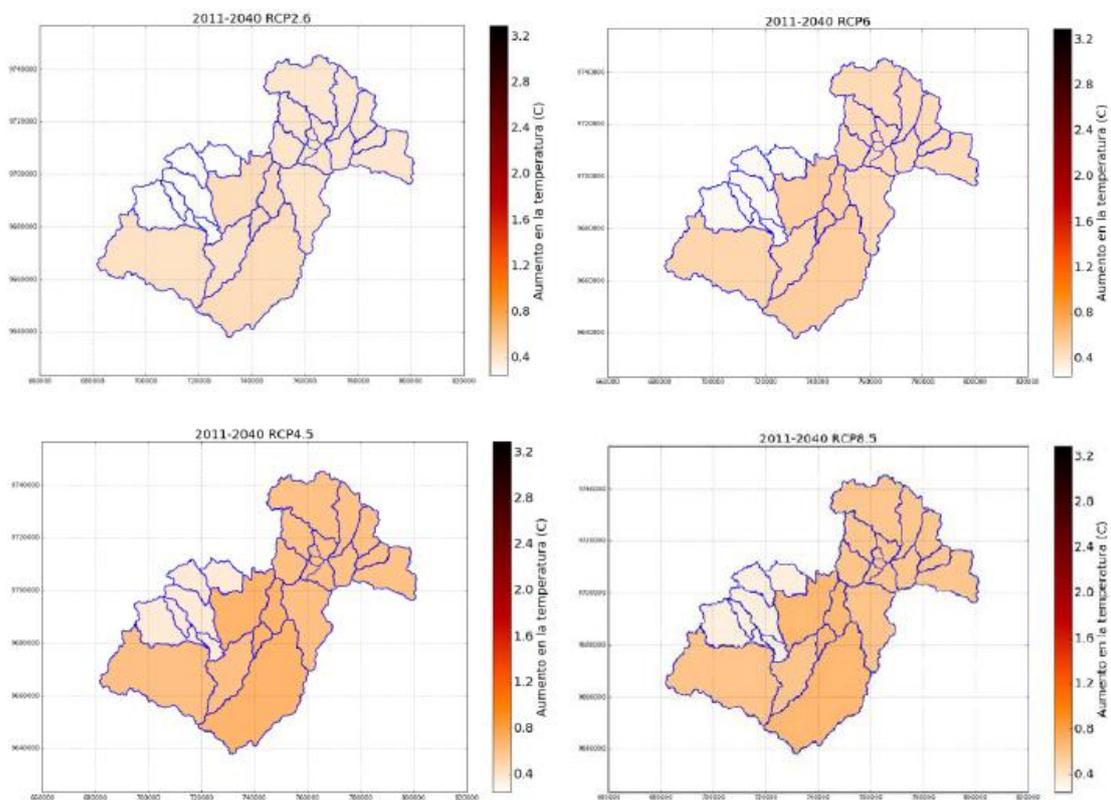
**Figura 40 Variación de la precipitación (%) escenarios RCP, periodo 2011-2040**



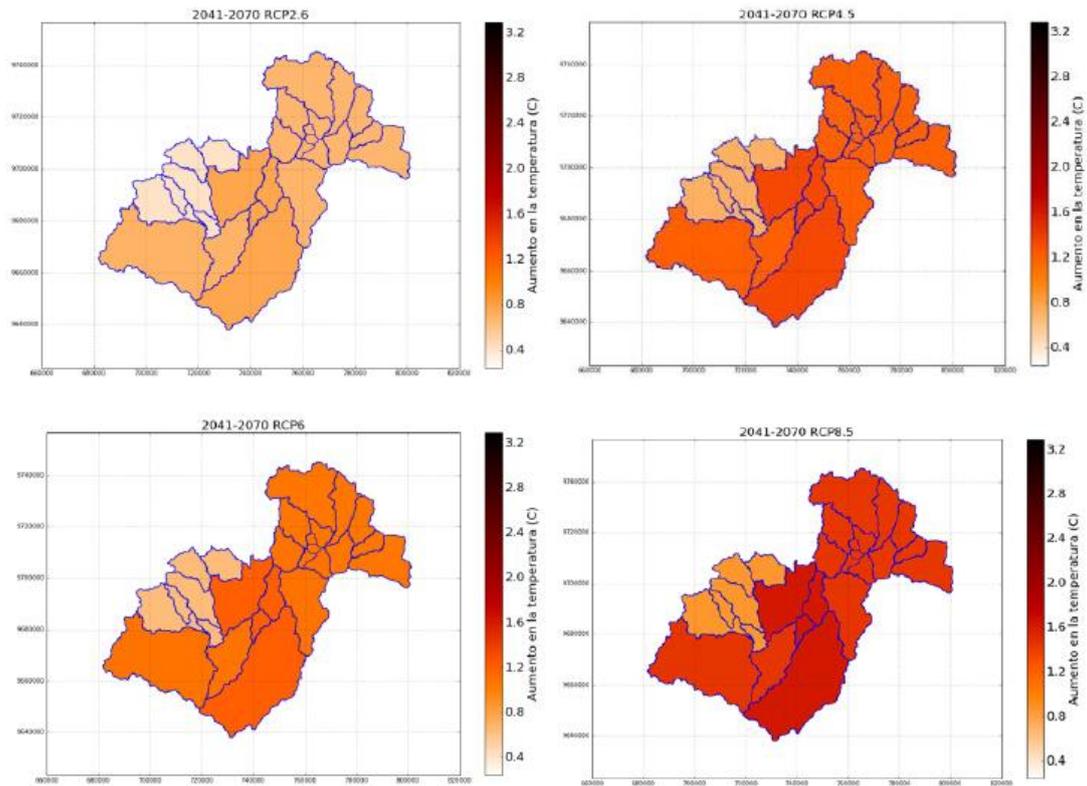
**Figura 41 Variación de la precipitación (%) escenarios RCP, periodo 2041-2070**



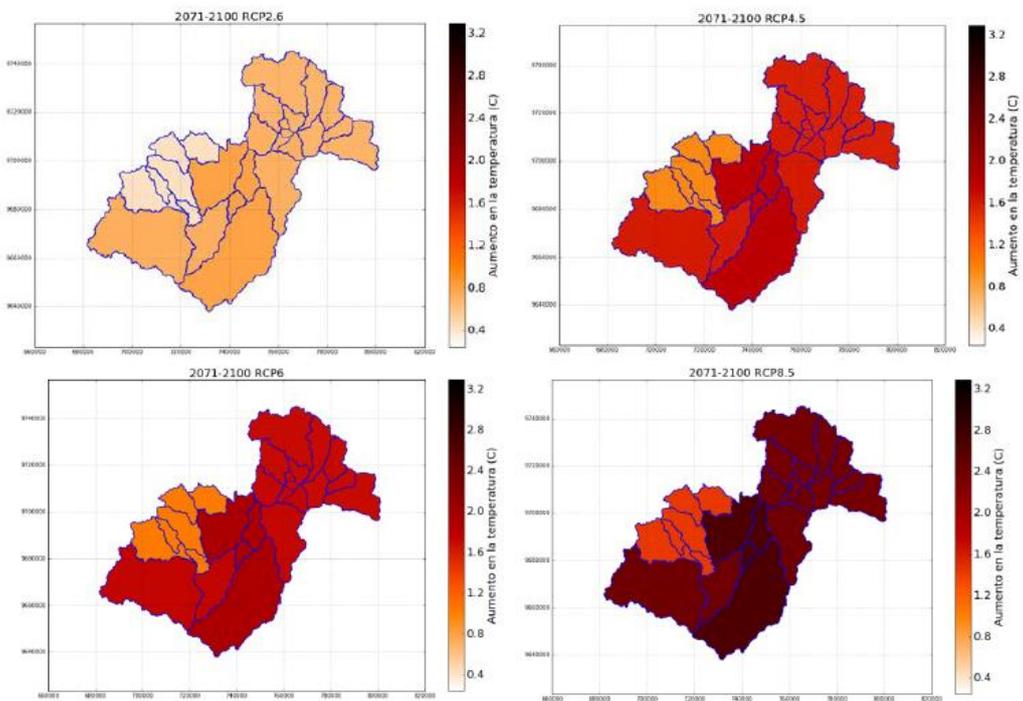
**Figura 42 Variación de la precipitación (%) escenarios RCP, periodo 2071-2100**



**Figura 43 Variación temperatura media (°C) escenarios RCP, periodo 2011-2040**



**Figura 44 Variación temperatura media (°C) escenarios RCP, periodo 2041-2070**



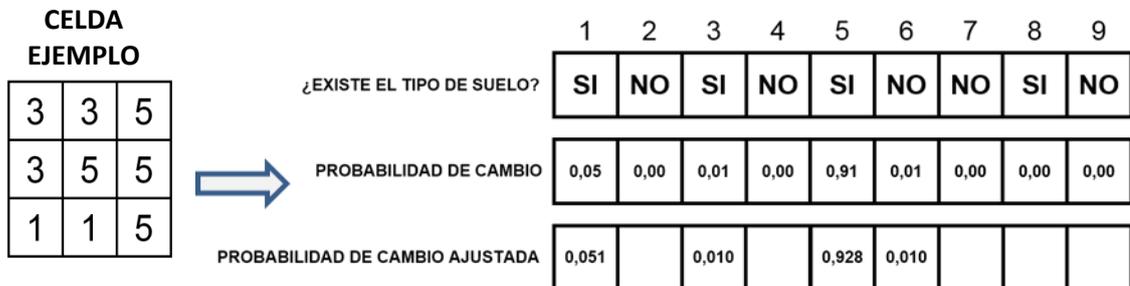
**Figura 45 Variación temperatura media (°C) escenarios RCP, periodo 2071-2100**

## ANEXO 2 PROYECCIONES DE USO DEL SUELO PARA LOS PERIODOS DE REFERENCIA

A diferencia del tipo de suelo, el uso del suelo puede variar, con el fin de considerar estas variaciones se realizaron proyecciones de los cambios en el uso del suelo para el año límite de los diferentes periodos evaluados, años 2040, 2070 y 2100.

Para realizar las proyecciones de cambio de uso del suelo, se calculó la probabilidad que posee una unidad de suelo para permanecer o cambiar a otro tipo de suelo, a partir del raster de Uso del suelo de año 2014 (resolución de 100 m), para cada una de las celdas ha seguido el siguiente proceso:

- Si la celda se encuentra fuera del área de estudio (valor 0), continúa teniendo el mismo valor.
- Para aquellas celdas dentro del área de estudio, se analizan los valores de las ocho celdas adyacentes (izquierda, derecha, arriba, abajo, y diagonales).
- Se establece la condición de que una celda puede cambiar de uso de suelo sólo y exclusivamente si el nuevo uso de suelo existe en alguna de las celdas adyacentes.
- Con el análisis de las celdas adyacentes y las probabilidades de cambio de uso de suelo que se habían obtenido, se recalcula una nueva probabilidad de cambio ajustado únicamente al valor de la celda y a la existencia o no de un uso en las celdas adyacentes.
- Se genera a continuación un número aleatorio que en función de las nuevas probabilidades ajustadas define el nuevo uso del suelo en la celda.



Este proceso se repite para cada uno de los distintos escenarios, y siempre partiendo del escenario 2014, pues se entiende que los datos de cambios de uso de suelo proporcionados hacen referencia a cambios respecto de la situación inicial.

En la Figura 46, se indica las proyecciones en cambio de uso de suelo obtenidas, a partir de las cuales, se calculó el porcentaje de área que ocupa cada una de las coberturas, identificándose aumento en el área de cultivos agrícolas, con disminución del cultivo de grano y Bosque Forestal vegetación mixta, sin embargo los cambios no son drásticos entre los diferentes periodos (Tabla 10).

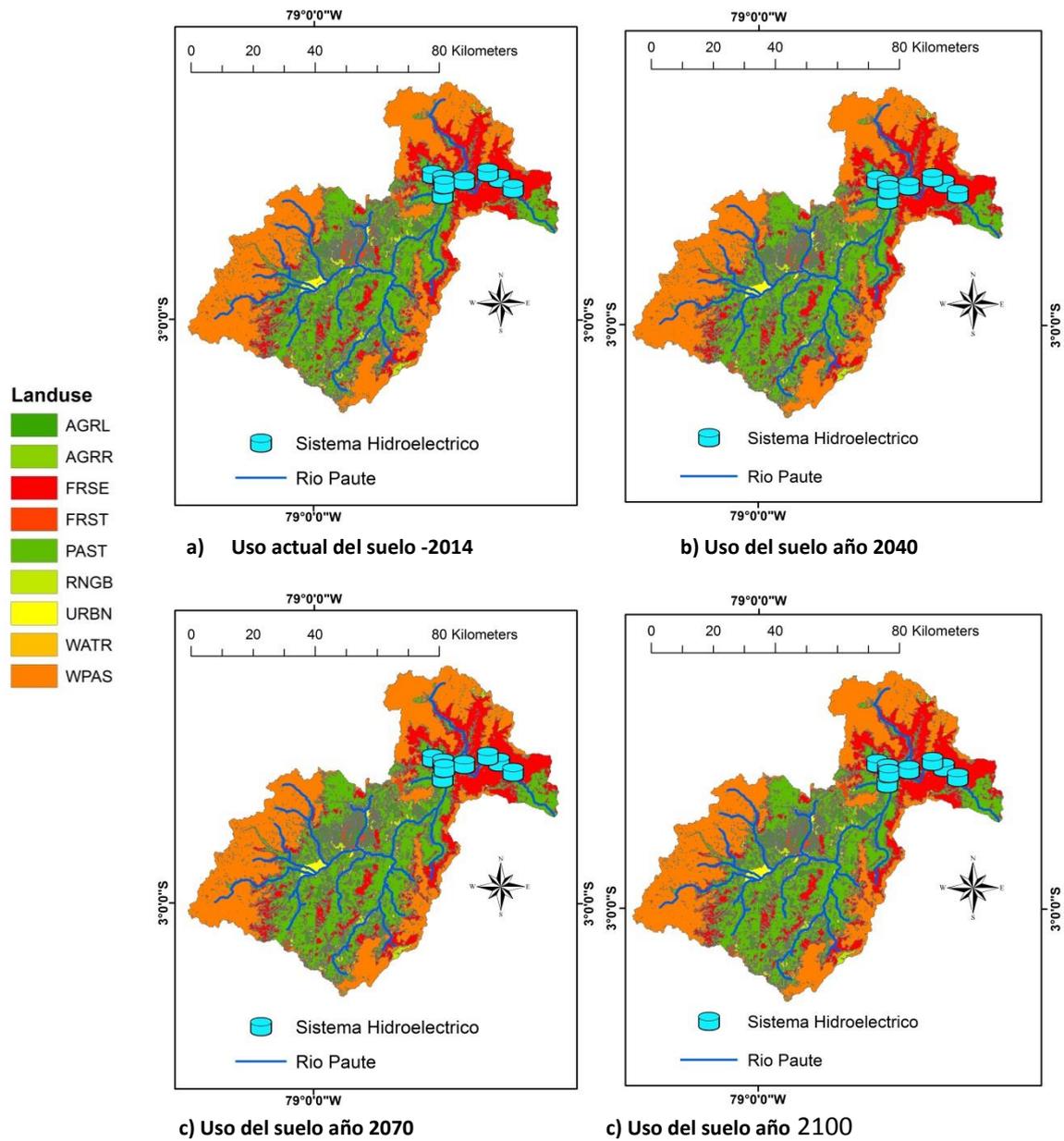


Figura 46 Uso del suelo año actual, 2040, 2070 y 2100

Tabla 10 Proyecciones del área de la cuenca ocupada para cada uso de suelo

Tipo Uso	Descripción	Porcentaje de área ocupada			
		Actual-2014	Año 2040	Año 2070	Año 2071
AGRL	Cultivo Agrícola	3.70	4.09	4.26	4.27
AGRR	Cultivo Agrícola de grano	2.42	1.63	1.37	1.34
FRSE	Bosque Forestal vegetación Perenne	19.35	19.41	19.41	19.41
FRST	Bosque Forestal vegetación mixta	2.18	1.90	1.82	1.81
PAST	Pasto y Herbáceas	32.35	33.15	33.33	33.34
RNGB	Arbustos, matorral y vegetación de poca altura	4.40	4.20	4.18	4.18
URBN	Urbano	1.16	1.15	1.15	1.15
WATR	Agua	0.67	0.63	0.62	0.62
WPAS	Pastizal de páramo de alta montaña	33.76	33.85	33.87	33.87

### ANEXO 3 –MODELACION NUMÉRICA

#### Descripción del modelo SWAT

El modelo seleccionado para la evaluación de las proyecciones de caudales y de sedimentos es SWAT (Soil and Water Assessment Tool), (ASCE 1993). Programa semidistribuido de simulación en continuo. Es una herramienta de modelamiento hidrológico diseñado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en conjunto con la Universidad de Texas. Este modelo 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.

SWAT se basa en un balance hídrico para determinar la entrada, salida y almacenamiento de agua en la cuenca. Para el modelamiento, la cuenca hidrográfica se divide en pequeñas subcuencas con el fin de mejorar la exactitud de los cálculos. Adicionalmente SWAT trabaja por unidades de respuesta hidrológica (HRU) que consisten en áreas homogéneas de uso de la tierra y características del suelo, las cuales son identificadas dentro de un espacio de simulación de SWAT. A continuación se muestra un esquema del flujo del agua, representando el balance hídrico que simula el modelo.

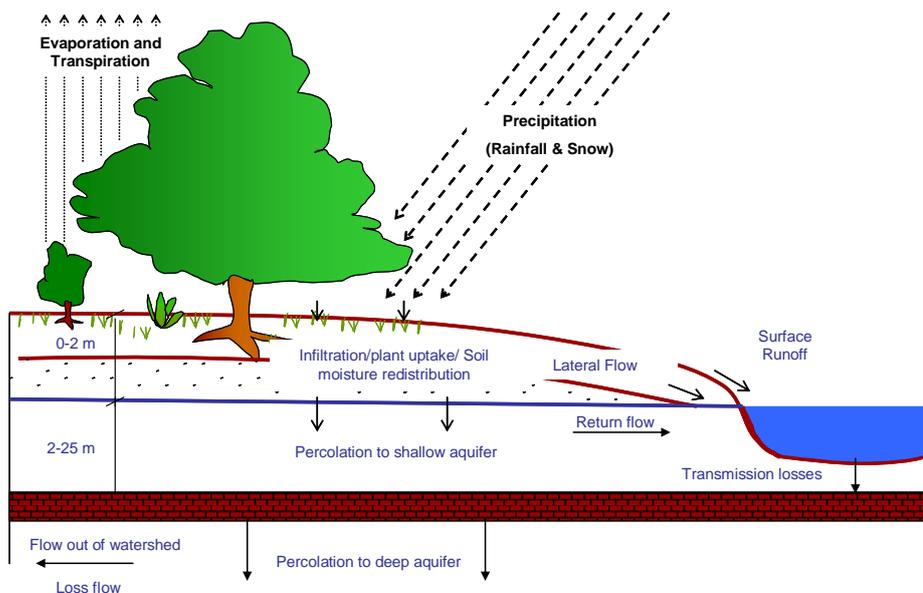


Figura 47 Esquema ciclo hidrológico simulado por SWAT.

El ciclo hidrológico simulado por SWAT está basado en la ecuación del balance hídrico:

$$SW_t = SW + \sum (R_t - Q_t - ET_t - ET_t - P_t - QR_t)$$

Donde,  $SW_t$  es la cantidad final de contenido de agua en el suelo (mm),  $SW$  es la cantidad inicial de contenido de agua en el suelo (mm),  $t$  es el tiempo en días,  $R_t$  es la cantidad de lluvia caída en el período de análisis (mm),  $Q_t$  es la cantidad de escorrentía (mm),  $ET_t$  evapotranspiración (mm),  $P_t$  percolación (mm),  $QR_t$  flujo de retorno (mm). Una vez determinadas las cargas de sedimentos, nutrientes y pesticidas en el agua del cauce principal, las mismas son ruteadas a través de la red de canales de la cuenca.

La cantidad de escorrentía es estimada aplicando la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos (SCS), con datos de lluvia diarios. Esta ecuación se fundamenta en que la escorrentía está determinada por el suelo, la cobertura de suelo y la práctica de manejo que en este se realice.

En cuanto al módulo de producción de sedimentos, SWAT cuantifica la producción de sedimentos para cada unidad de respuesta hidrológica con la ecuación universal modificada de pérdida de suelo-MUSLE (*Williams, 1975*).

La ecuación que rige los procesos de pérdida de suelos se determina por la siguiente ecuación:

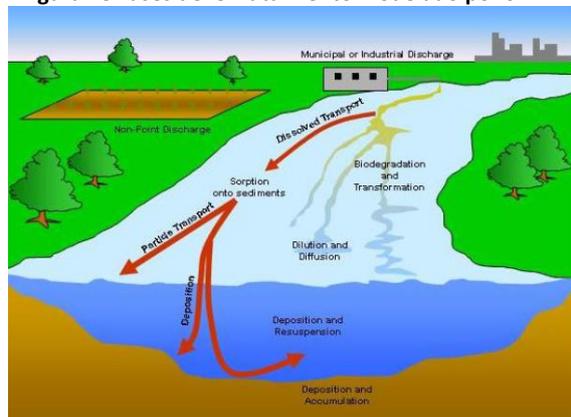
$$Y = 11.8 * (Q * q_p * A_c)^{0.56} * K * C * L * S * P * CFRG$$

Donde, Y es la producción de sedimentos en un día dado (Tm); Q es el volumen de escorrentía superficial (m<sup>3</sup>); q<sub>p</sub> es el pico de escorrentía superficial (m<sup>3</sup>/s); A<sub>c</sub> es el área de la zona de estudio (Ha) y K, C, L, S, P y CFRG corresponden a los términos de la ecuación de la USLE de erodabilidad (K), factor de cultivo (C), pendiente y longitud del cauce (LS), prácticas de control de la erosión (P) y de corrección de la erosión en suelos de roca (CFRG), respectivamente.

La versión utilizada en este proyecto es ArcSWAT 2012.10.15, la cual posee una interfaz con ArcGis que simplifica la utilización del mismo. La interfaz de ArcGIS, ArcSWAT (*Winchel et al., 2010*) constituye una herramienta fundamental para la gestión de la información de partida, la generación de las unidades de respuesta hidrológica, para la gestión de la información espacial necesaria para el análisis hidrológico y para el manejo de los resultados del modelo.

A partir de la estimación de aportación de cada HRU, el enrutamiento de los sedimentos en la cuenca se realiza considerando una distribución granulométrica inicial (*Suarez, 2001*) para, posteriormente, conducir esos sedimentos hacia el cauce. El objetivo final de SWAT es la estimación del total de los sedimentos transportados por el río al final del periodo de tiempo considerado, incluyendo tanto los sedimentos que fluyen por el cauce como los que provienen de la cuenca.

Figura 48 Fases del enrutamiento modelado por SWAT.



## Implementación del modelo SWAT

### Delimitación de las cuencas de estudio

Para la delimitación de las subcuencas de estudio se ha tenido en cuenta un tamaño mínimo de 6 km<sup>2</sup> hasta los 800 km<sup>2</sup> aproximadamente que ocupa la de mayor extensión. Se han considerado criterios tales como:

- Ubicación de las presas.
- Ubicación de las centrales hidroeléctricas.
- Ubicación de las estaciones de aforo de caudal.
- Ubicación de las estaciones de aforo de sedimentos.

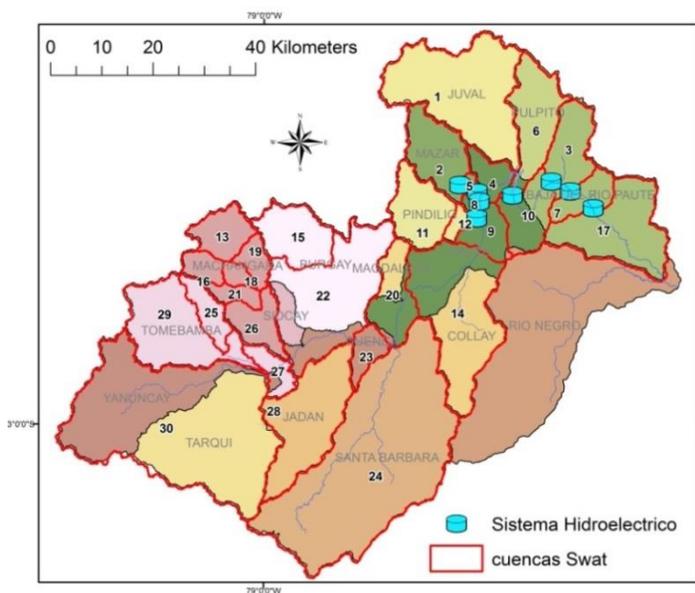


Figura 49 Delimitación cuencas SWAT

### HRUs

El modelo considera una subdivisión adicional a la de cuenca y subcuenca, esta clasificación se denominada unidad de respuesta hidrológica (HRU). Estas unidades son el resultado de la combinación y distribución existente entre el uso, el suelo y la pendiente de cada una de las cuencas.

Para el escenario actual se utilizó un mapa de cobertura y uso de la tierra a (MAE), las coberturas corresponden a 9 clases de vegetación las cuales se reclasificaron según las clases de cultivo de la base de datos SWAT, considerando comportamientos hidrológicos similares (AGRL-Agricultural Land Generic, AGRR-Agricultural Land Row Crops, FRSE- Forest Evergreen, FRST- Forest Mixed, PAST-Pasture, RNGB-Range Brush, URBN-Residential, WATR-Water, WAPS-Winter -Pasture ).

Para generar los HRUs, SWAT permite clasificar los rangos de pendiente, para el estudio se definieron cuatro rangos de pendientes, se identifica que aproximadamente el 10% de la cuenca presenta pendientes entre el 0% al 20%, predominando las áreas fuertemente

escarpadas con pendientes superiores al 28%, siendo la pendiente del 40% el valor promedio del área.

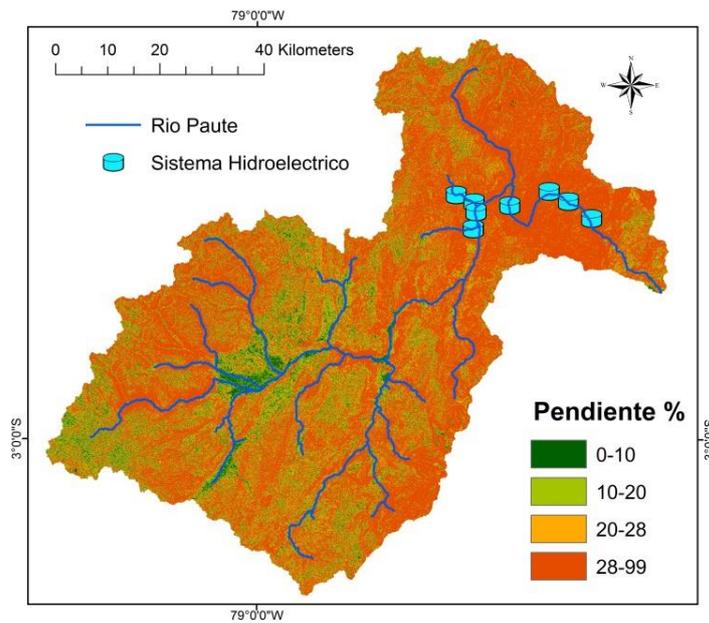


Figura 50 Mapa de Pendientes clasificadas en SWAT

Las unidades de respuesta hidrológicas (HRUs) se obtuvieron a partir de la integración de la cartografía de tipo de suelo, uso de suelo y pendiente, se incluyeron múltiples HRUs, cuyo tamaño quedó condicionado por la elección de un umbral del 10% de área de las coberturas integradoras (Figura 52).

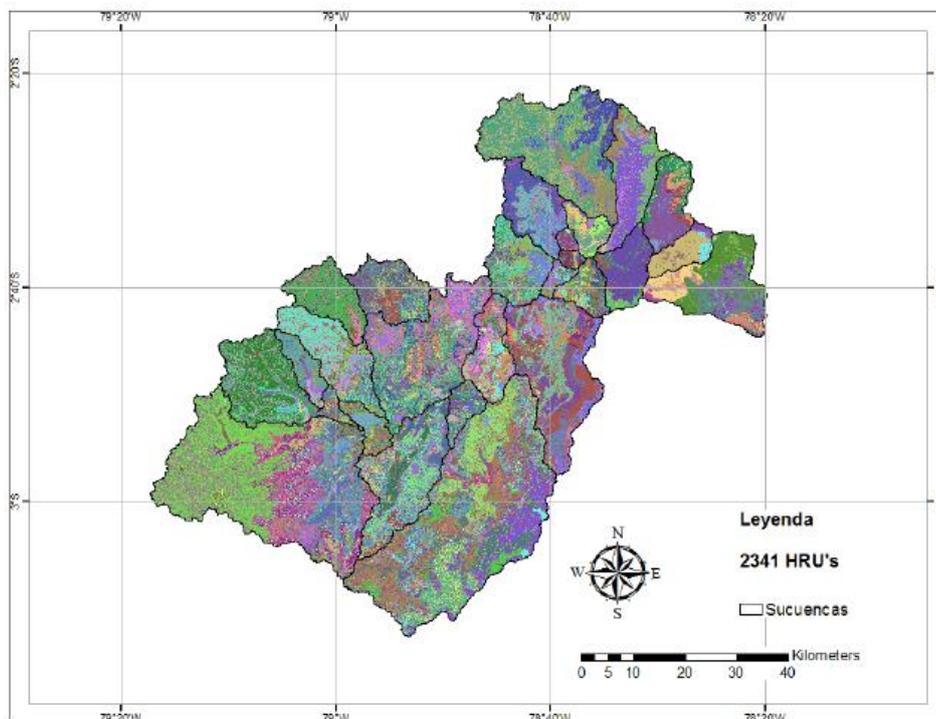


Figura 51 Mapa de Hru generado en SWAT

## Información pluviométrica y termométrica

Según se indica a lo largo del documento, se han utilizado una serie de pluviómetros tanto dentro como en el contorno de la cuenca para la reconstrucción de las series en las que no se dispone de datos. Se han seleccionado 16 pluviómetros y 8 estaciones termométricas dentro de la cuenca para la simulación de los procesos hidrológicos y erosivos con el modelo SWAT. Se dispone a su vez los pluviómetros de los que se han dispuesto las proyecciones de downscaling estadístico de la tercera comunicación nacional (TCN). Mientras que los resultados del downscaling dinámico cubren toda la zona de estudio con una resolución de 10 km.

Es así como para cada escenario a simular se ingresa los datos correspondientes de precipitación y temperatura.

Los resultados del modelo SWAT , ya se han descrito en detalle en el numeral de resultados del documento.

## **Modelo HECHMS**

### Descripción del modelo HeCHms

El modelo HEC-HMS (Hydrologic Engineering Center- Hydrologic Modeling System) es un modelo lluviaescorrentía, desarrollado por el Hydrologic Engineering Center HEC del U.S. Army Corps of Engineers USACE, que está diseñado para simular el hidrograma de escorrentía que se produce en un determinado punto de la red fluvial como consecuencia de episodios de lluvia. El modelo SMA representa la cuenca mediante un conjunto de capas o depósitos, como se muestra esquemáticamente en la Figura 1 en la que se pueden ver también las conexiones o flujos de agua existentes entre los mismos.

El primero de los depósitos de almacenamiento que se muestran en la citada figura representa la parte de precipitación que es interceptada por la vegetación y no llega a alcanzar la superficie del terreno. El siguiente depósito representa el almacenamiento de agua en la superficie del terreno, en pequeñas depresiones.

Pasando al interior del terreno, hay que señalar la existencia de un depósito que trata de representar el fenómeno complejo de almacenamiento de agua en la capa superior del suelo, que está dividido, a su vez, en dos zonas: la upper zone, que está constituida por la parte de suelo que es capaz de perder agua por evapotranspiración y/o percolación, y la tension zone, que representa la parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración. En realidad, la subdivisión del depósito de almacenamiento del suelo en dos zonas trata de diferenciar la existencia de agua libre y de agua capilar en el interior del mismo.

Los dos depósitos subterráneos de almacenamiento de agua en el suelo, que se pueden reducir a uno solo, según las circunstancias, sirven para representar el flujo hipodérmico y el flujo base. La consideración, en cada caso, de uno o de los dos depósitos está condicionada por la forma de la curva de recesión del hidrograma correspondiente.

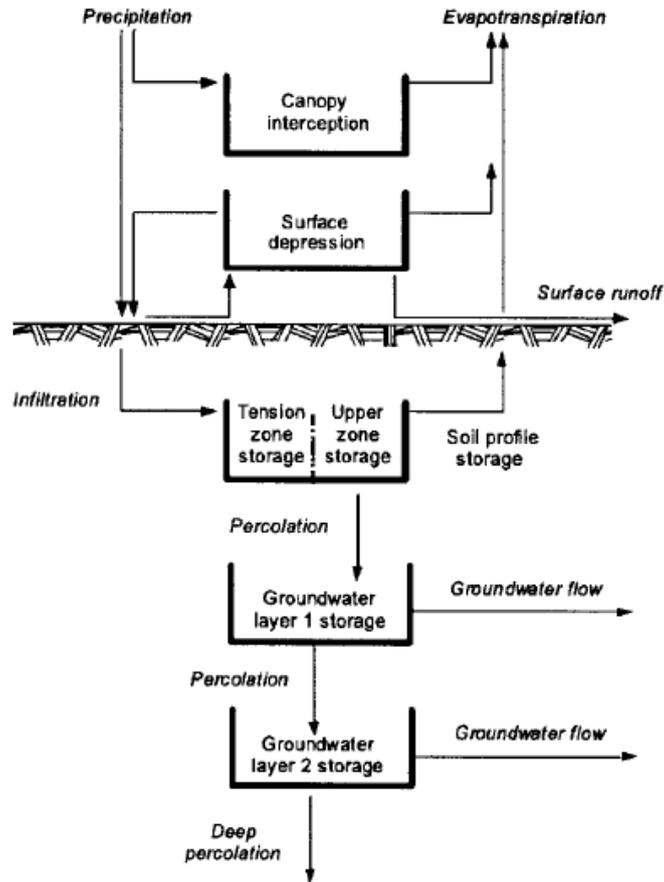


Figura 52 Esquema conceptual del modelo SMA

### Modelo de Cuenca

Con objeto de poder representar adecuadamente el comportamiento hidrológico de una determinada cuenca, es preciso, en primer lugar, llevar a cabo una representación esquemática de la misma, que refleje, de la mejor manera posible, su morfología y las características de su red de drenaje, en la Figura 52 se indica el modelo de la cuenca Paute definido en HECHMS, a partir del uso del modelo digital de elevaciones (resolución de 30 m) y la extensión HecGeoHms de Arcgis, exportando los resultados de Arcgis a HECHMS.

El modelo de cuenca, presenta como elementos las subcuenca, que se caracteriza porque no recibe ningún flujo entrante y da lugar a un único flujo saliente, que es el que se genera en la subcuenca a partir de los datos meteorológicos, una vez descontadas las pérdidas de agua, transformado el exceso de precipitación en escorrentía superficial y añadido el flujo base.

Los tramos de cauce, se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente. Los flujos entrantes, que provienen de otros elementos de la cuenca, tales como subcuencas u otros tramos de cauce, se suman antes de abordar el cálculo del flujo saliente.

Las confluencia se caracteriza porque recibe uno o varios flujos entrantes y da lugar a un solo flujo saliente, con la particularidad de que el flujo saliente se obtiene directamente como suma de los flujos entrantes, considerando nula la variación del volumen almacenado en la misma. Permite representar la confluencia propiamente dicha de ríos o arroyos, aunque ello

no es imprescindible, ya que los flujos entrantes pueden proceder también de subcuencas parciales.

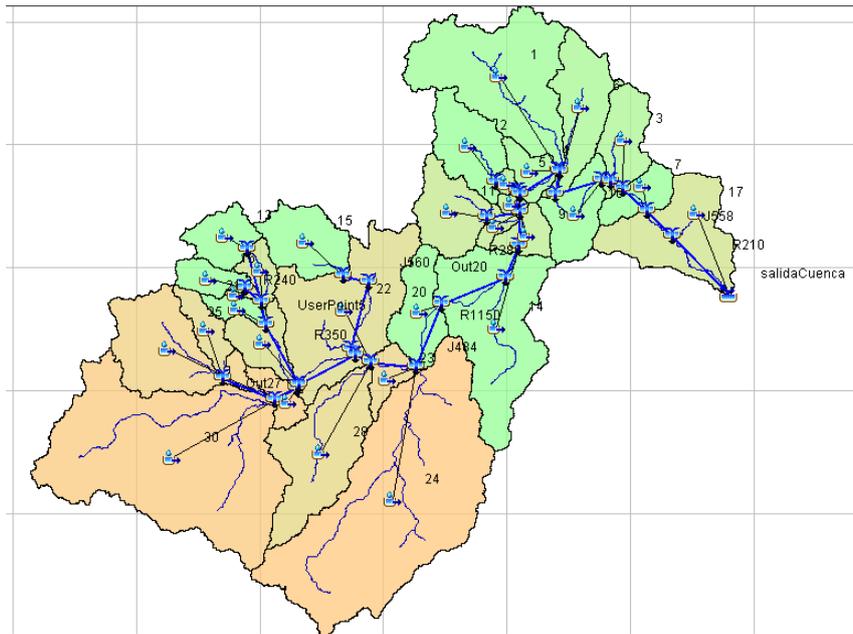


Figura 53 Esquema de cuenca Modelo HECHMS

#### Modelo Meteorológico de HECHMS

La precipitación constituye el input principal al proceso hidrológico antes descrito. Producto del análisis de información climatología se dispone de información pluviométrica para cada una de las cuencas, en el escenario actual y para cada una de las proyecciones de cambio climático, se definió par cada cuenca un pluviómetro, para cada uno de los cuales se ingresó la precipitación diaria del periodo y escenario a simular.

En cuanto a la evapotranspiración, cabe comenzar por señalar que su conocimiento no es relevante cuando se trata de analizar la respuesta hidrológica de la cuenca frente a aguaceros de corta duración. En los casos de simulación continua, el programa HEC-HMS contempla la posibilidad de definir valores medios mensuales, estos valores fueron calculados a partir de los datos de temperatura obtenidos para cada cuenca para el escenario actual y proyecciones de cambio climático. Se usó para su cálculo, el método de Hargreaves y Thornthwaite, identificando que el modelo de Thornthwaite representa mejor el comportamiento de la evapotranspiración de la cuenca.

En la Figura 54, se identifica la evapotranspiración esperada para los escenarios de cambio climático y periodos, en la cuenca 14, se evidencia los mayores aumentos en el escenario RCP8.5 (2071-2100), lo que se corresponde con el aumento de temperatura esperado para este mismo escenario en la cuenca. Este comportamiento es similar para todas las subcuencas.

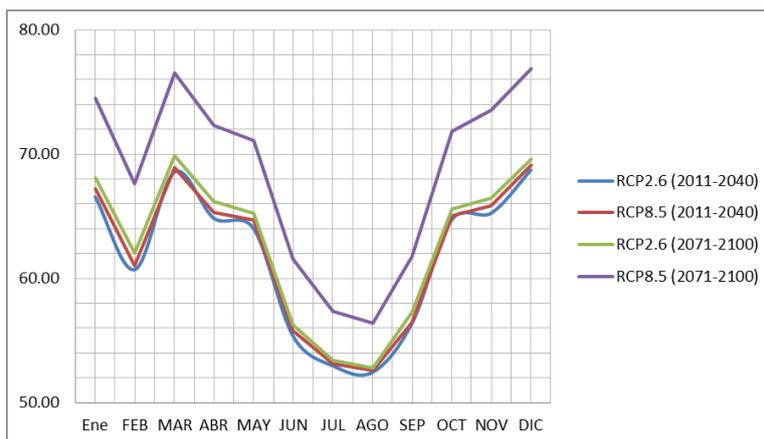
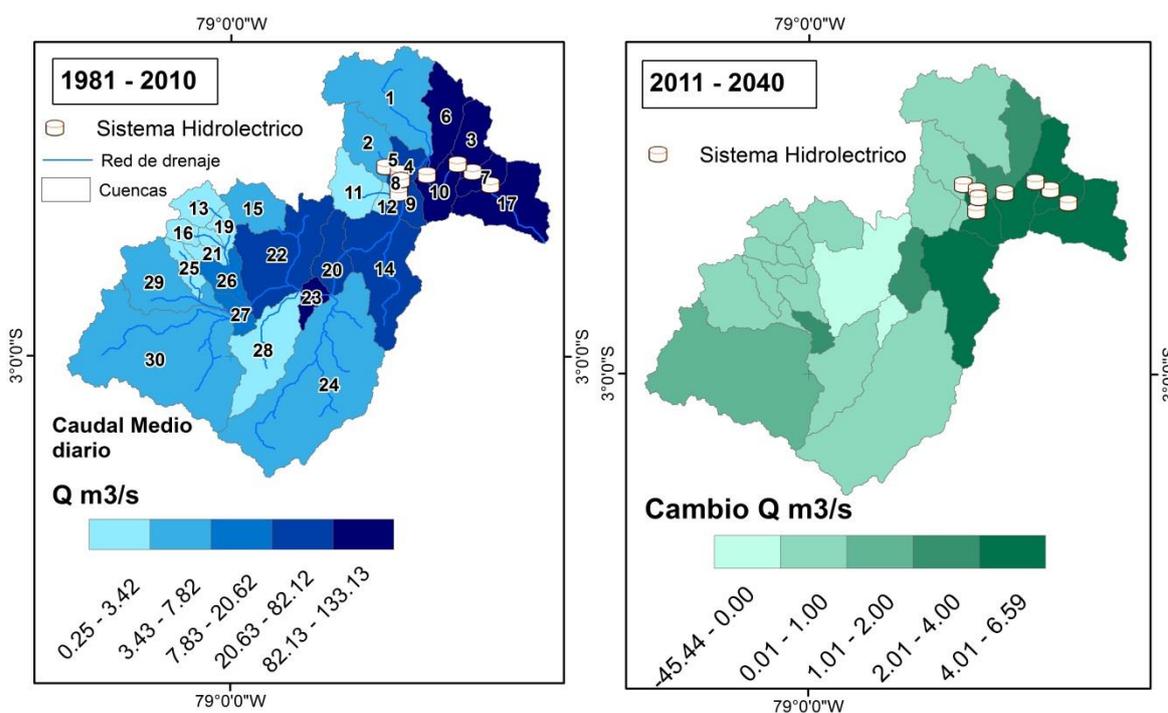


Figura 54 Cambios en la evapotranspiración para diferentes escenarios RPC, subcuenca 14.

### RESULTADOS DE HECHMS

A continuación se indican los mapas comparativos entre los cambios observados entre los escenarios RCP2.6 y RCP 8.5, respecto a los diferentes años horizonte, se indica los valores de caudal para el periodo de referencia (1981 a 2010) y los demás mapas representan la variación de caudal respecto al periodo de referencia para los diferentes años horizonte.

Se ha seleccionado los escenarios RCP 2.6 y RCP8.5, ya que cada uno representa el escenario de menor (RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>) y mayor (RC 8.5 W/m<sup>2</sup>.) forzamiento radiativo que se producen al año 2100, como ya se ha mencionado, tiene en cuenta las variables socioeconómicas involucradas, y por ende, permite comparar un escenario de menor y mayor gestión de las emisiones.



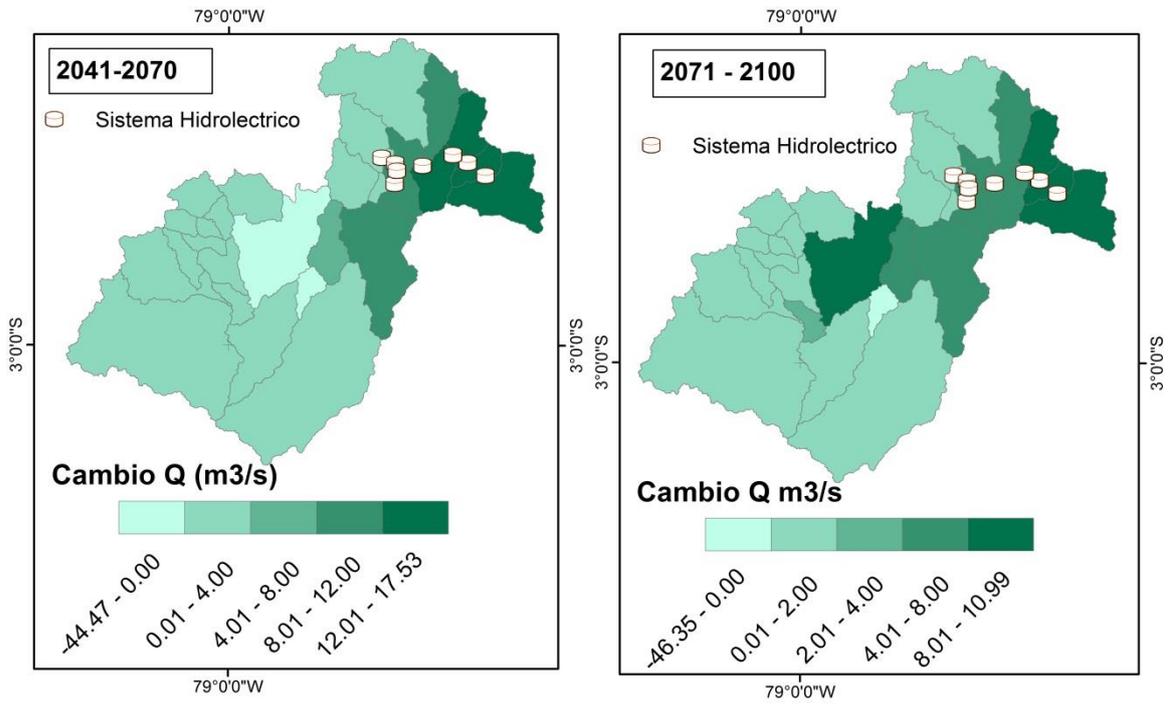
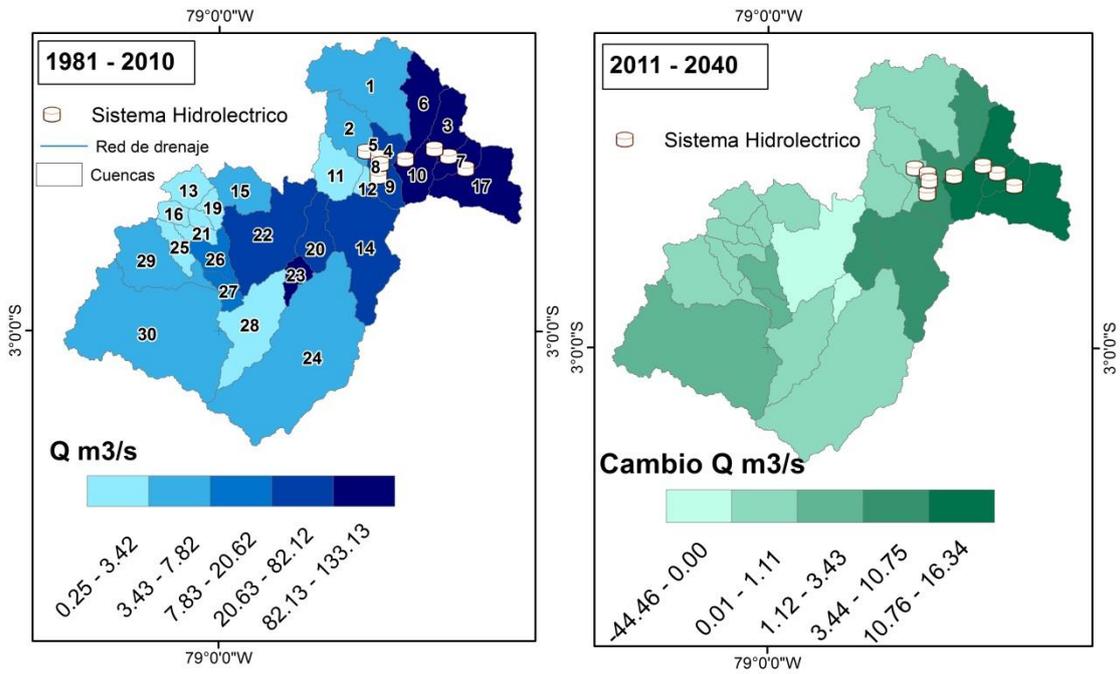


Figura 55 Proyección de la Variación del caudal diario medio Escenario RCP2.6 y periodos horizonte HECHMS



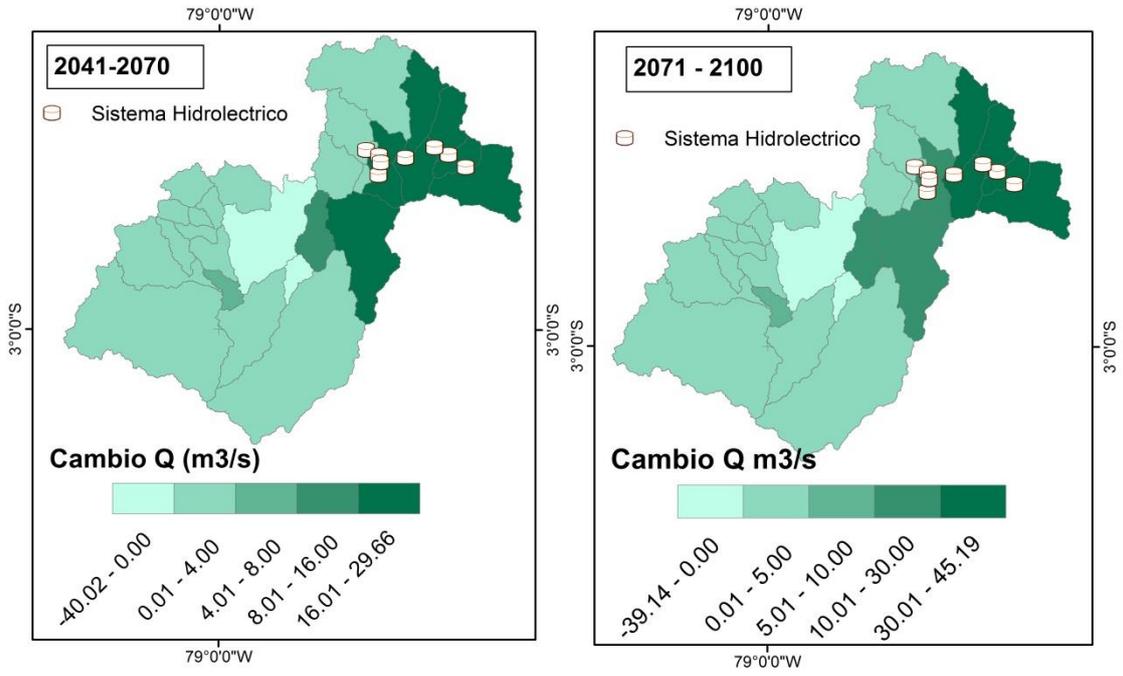


Figura 56 Proyección de la Variación del caudal diario medio Escenario RCP 8.5 y periodos horizonte HECHMS

## ANEXO 4- CALIBRACIÓN DE LOS MODELO

Antes de realizar las simulaciones de caudales líquidos y sólidos para el escenario actual y proyecciones de cambio climático, se realizó la calibración de los modelos SWAT y HECHMS, con el fin de valorar la medida de la bondad de ajuste de los caudales procedentes de las simulaciones, siguiendo las recomendaciones de Moriasi et al. (2007), se calcularon tres estadísticos, basados en medidas adimensionales del error (diferencias entre observados y simulados), tales como Sesgo porcentual (PBIAS, Percent Bias), coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE) y la Relación entre la raíz del error medio cuadrático y la desviación estándar de las observaciones (RSR, RMSE-observationsStandard deviation Ratio).

Los mencionados coeficientes se determinan a partir de las expresiones:

$$NSE = 1.0 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{om})^2}$$

$$PBIAS = \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{oi})} * 100$$

$$RSR = \frac{RMSE}{STDEV} = \frac{[\sqrt{\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{si})^2}]}{[\sum_{i=1}^n (Q_{oi} - Q_{om})^2]}$$

$n$  = Número de parejas de caudales consideradas  
 $Q_{oi}$  = Caudal observado en el instante  $i$   
 $Q_{si}$  = Caudal simulado en el instante  $i$ .  
 $Q_{om}$  = Valor medio de los caudales observados

**NSE** mide la relación entre la varianza de los residuales y la varianza de los valores observados, su valor óptimo es 1. Es un parámetro muy aplicado en la hidrología.

Con respecto a la medida de la desviación del volumen, expresa cuantitativamente la relación entre el volumen del hidrograma observado y el simulado. El ajuste perfecto indica un valor de PBIAS=0, por lo que en el proceso de calibración se debe buscar el valor más bajo del mismo.

Valores positivos del coeficiente **PBIAS**, indican subestimación de los valores de caudales simulados por el modelo con respecto a los observados. Por el contrario valores negativos del mismo indican sobreestimación de los caudales simulados.

**RSR** es una versión estandarizada del RMSE; se calcula como el cociente entre el RMSE y la desviación estándar de los datos observados. El valor de cero corresponde a un ajuste perfecto.

En función de la combinación del valor de dichos coeficientes (NSE, PBIAS, RSR) conjuntamente, se pueden distinguir distintos niveles de calidad del ajuste, según se indica Moriasi et al., 2007, descritos en la Tabla 11.

**Tabla 11 Niveles de calidad del ajuste a nivel mensual**

CALIDAD DE AJUSTE	NSE	PBIAS (%)	RSR
Excelente	$0.75 < NSE \leq 1.00$	$PBIAS < \pm 10$	$0.00 \leq RSR \leq 0.5$
Buena	$0.65 < NSE \leq 0.75$	$\pm 10 \leq PBIAS < \pm 15$	$0.50 < RSR \leq 0.60$
Aceptable	$0.50 < NSE \leq 0.65$	$\pm 15 \leq PBIAS < \pm 25$	$0.60 < RSR \leq 0.70$
No aceptable	$NSE \leq 0.50$	$PBIAS \geq \pm 25$	$RSR > 0.70$

(Moriasi et al., 2007)

### Estaciones de aforo de caudales seleccionadas para la calibración

Dentro de las estaciones de aforo suministradas por el INAMHI, se realizó una selección de aquellas estaciones de aforo, ubicadas dentro de la cuenca, que disponen de mayor cantidad de días aforados consecutivos y en periodos para los cuales los datos pluviométricos del área también son conocidos

Las estaciones y periodos de calibración definidos se indican en la

Tabla 12.

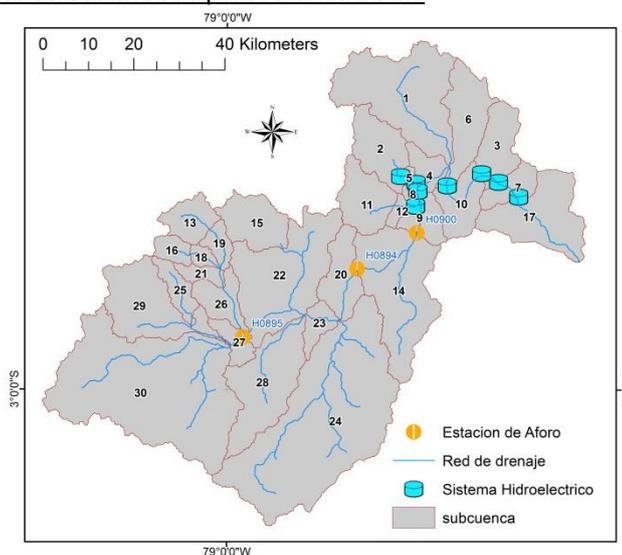


Figura 57 Ubicación de estaciones de aforo usadas para la calibración

Tabla 12 Estaciones de calibración

Estación de aforo	Nombre de la estación	Altitud	Coordenadas Geográficas		Ubicación-Subcuenca	Periodo de calibración
			longitud	latitud		
H894	PAUTE EN PAUTE(DJ GUALACEO)	2176	-78.74	-2.76	20	2006-2008
H895	TOMEBAMBA EN MONAY	2353	-78.97	-2.90	27	2000-2002
H900	PAUTE AJ DUDAS	2000	-78.62	-2.69	14	2005-2007

### Parámetros de calibración y nivel de ajuste del modelo SWAT

En las siguientes tablas se indican los parámetros finales obtenidos una vez realizado el proceso de calibración del modelo SWAT, en el proceso de calibración para la proyección de caudales y sedimentos en las cuencas de estudio.

Tabla 13 Parámetros de tipo de suelo

SOL_AWC (Capacidad de agua disponible)			
Tipo de suelo	Subcuenca	valor	
		Layer 1	Layer 2
Alfisol	2-5-11	0.003	0.003
	Restantes	0.009	0.009
Andisol	2-11	0.0065	0.009
	Restantes	0.148	0.148
Entisol	Todas	0.13	0.13
Inceptisol	Todas	0.04	0.04
Mollisol	Todas	0.11	0.11
Vertisol	Todas	0.11	0.11
CN_2(Número de Curva)			
Subcuenca	valor		

Tabla 16 Parámetros Calibración de sedimentos

Usle_P	
Subcuenca	valor
1-5-4-6-8-10-11-12-9-14-27-30	1
2	0.75
3	0.05
7	0.09
13	0.5
15	0.23
16	0.4
17-23	0.01
18-19-20-29	0.3
21-25	0.2
22	0.07

11	35			
2-5	70			
Restantes	83			
<b>SCS NC (NUMERO DE CURVA)</b>				
Tipo de Uso de suelo	A	B	C	D
AGRL	73	86	93	98
AGRR	78	91	95	97
FRSE	33	67	82	86
FRST	43	72	82	92
PAST	58	81	93	97
RNGB	46	68	79	89
WAPS	41	66	92	89

Tabla 14 Parámetros de Evapotranspiración

Parámetros HRUs	valor
ESCO(Coeficiente de compensación de evaporación de la tierra)	1
EPCO(Factor de Compensación de fracción de agua captada por las plantas)	0.7

Tabla 15 Parámetros de Agua subterránea

Parámetros del acuífero	valor
GWQMIN(Nivel del Umbral del acuífero poco profundo)	600
GE_DELAY (Tiempo de demora de recarga del acuífero)	25
ALPHA_BF (Constante de disminución de Flujo Normal)	0.03
GW_REVAP(Coeficiente de Evapotranspiración)	0.02

24	0.8
26	0.7
28	0.17
<b>Usle_C</b>	
Tipo de Uso de suelo	valor
AGRL	0.2
AGRR	0.2
FRSE	0.001
FRST	0.001
PAST	0.003
RNGB	0.003
WAPS	0.003
<b>Usle_K (Factor de erodabilidad)</b>	
Subcuenca	valor
2-4-10-11-12	0.25
3-6	0.01
5-8	0.65
Restantes	0.14
<b>Otros</b>	
Biomix (eficiencia de masa biológica)	1
SPCON	0.00075
ADJPKR	0.9

En cuanto a los niveles de ajuste en la Tabla 17, se indican los resultados de los estadísticos de la medida de la bondad de ajuste obtenidos y su clasificación de acuerdo a las recomendaciones de Moriasi et al (2007). Respecto a PBIAS se observa excelente ajuste, que al ser positivo indica que el modelo SWAT puede estar subestimando los datos, respecto a los demás parámetros, todos presentan un nivel aceptable o bueno de ajuste, lo cual permite afirmar que el modelo está representando adecuadamente el comportamiento hidrológico lluvia-caudal de la cuenca.

Tabla 17 Calidad del ajuste para las cuencas de referencia seleccionadas

cuenca	PBIAS		NSE		RSR	
	valor	Nivel-ajuste	valor	Nivel-ajuste	valor	Nivel-ajuste
subcuenca 20	7.013	Excelente	0.618	Aceptable	0.609	Aceptable
subcuenca 27	6.744	Excelente	0.637	Aceptable	0.594	Buena
subcuenca 14	5.199	Excelente	0.631	Aceptable	0.599	Buena

## Parámetros de calibración y nivel de ajuste del modelo HECHMS

Parámetros	unidad	Subcuencas						
		22	24	23	28	20	14	resto
Initial storage (canopy)	%	0	0	0	0	0	0	0
Max storage (canopy)	mm	10	10	10	10	10	10	10
Initial storage (surface)	%	0	0	0	0	0	0	0
Max storage (surface)	mm	20	20	20	20	20	20	20
Soil (%)	%	90	90	90	90	90	90	90
Groundwater 1	%	20	20	20	20	20	20	20
Groundwater 2	%	20	20	20	20	20	20	20
Max Infiltration	mm/hr	7	7	7	7	7	7	7
Impervious sub-basin área	%	0	0	0	0	0	0	0
Soil Storage	mm	150	150	150	150	150	150	150
Tension Storage	mm	130	140	130	130	140	140	140
Soil percolation rate	mm/hr	10	10	10	10	10	10	10
Groundwater 1 Storage	mm	25	25	25	25	25	25	25
Groundwater 1 Percolation	mm/hr	4	4	4	4	4	4	4
Groundwater 1 Coefficient	hr	100	150	100	100	100	80	80
Groundwater 2 Storage	mm	20	20	20	20	20	20	20
Groundwater 2 Percolation	mm/hr	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025	0.025
Groundwater 2 Coefficient	hr	1000	1000	1000	1000	1000	1500	1000
Gw 1 initial	m3/s	0	0	0	0	0	0	0
Baseflow 1 storage coefficient	hr	1000	2000	2000	1000	2000	2000	1000
Baseflow 1 number of reservoirs		1	1	1	1	1	1	1
Baseflow 1 initial	m3/s	0	0	0	0	0	0	0
Baseflow 2 storage coefficient	hr	2000	2500	2500	2000	2500	2500	2000
Baseflow 2 number of reservoirs				1	1	1	1	1

En la Tabla 18, se indican los resultados de la calibración del modelo HECHMS, es de resaltar que para este modelo se observa como principal parámetro de calibración el Tension Storage, parte del suelo que pierde agua exclusivamente por evapotranspiración.

**Tabla 18 Calidad del ajuste para las cuencas de referencia seleccionadas**

cuenca	PBIAS		NSE		RSR	
	valor	Categoría	valor	Categoría	valor	Categoría
subcuenca 20	9.325	Excelente	0.660	Buena	0.575	Buena
subcuenca 27	13.604	Buena	0.757	Excelente	0.486	Excelente

cuenca	PBIAS		NSE		RSR	
	valor	Categoría	valor	Categoría	valor	Categoría
subcuenca 14	3.301	Excelente	0.786	Excelente	0.456	Excelente

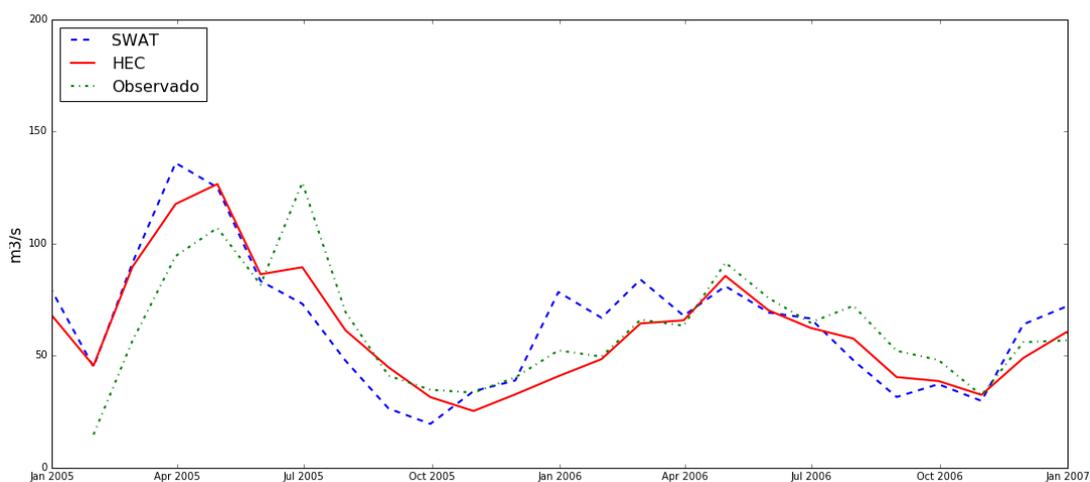
De acuerdo al esquema de simulación del modelo SMA, respecto a la evapotranspiración en primer lugar, se intenta satisfacer la evapotranspiración, a partir del volumen de agua contenido en la upper zone del depósito de almacenamiento de agua en el suelo al comienzo del intervalo. En caso afirmativo, la evapotranspiración real total (ERT) es igual a la potencial, y el volumen de agua que queda en el citado depósito continúa el mismo proceso pasando a los demás niveles de almacenamiento. Por el contrario, si ello no es posible, se empieza a utilizar el agua contenida en la tension zone del citado depósito de almacenamiento de agua en el suelo, en la que el agua se encuentra fuertemente ligada a las partículas del suelo, lo cual dificulta su extracción.

Es de acuerdo a lo anterior, que la calibración del modelo HECHMS, tiene en cuenta que se disponga de suficiente agua en la tension zone, para evapotranspiración, esto debido a los altos requerimientos de evapotranspiración que presenta el área, por sus altas temperaturas. De lo contrario si no se contará con esta capacidad gran parte del agua precipitada se convertiría directamente en evapotranspiración sin generar excedentes para la recarga del río.

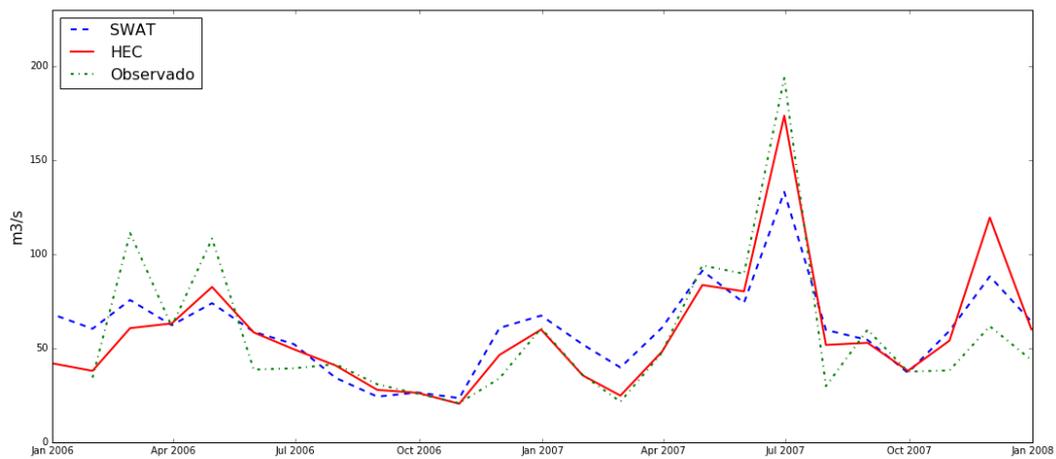
Además se regula el caudal del río a partir de la calibración de los parámetros que condicionan el caudal base y los aportes de agua subterránea.

### COMPRACION DE LOS RESULTADOS DE LA CALIBRACION

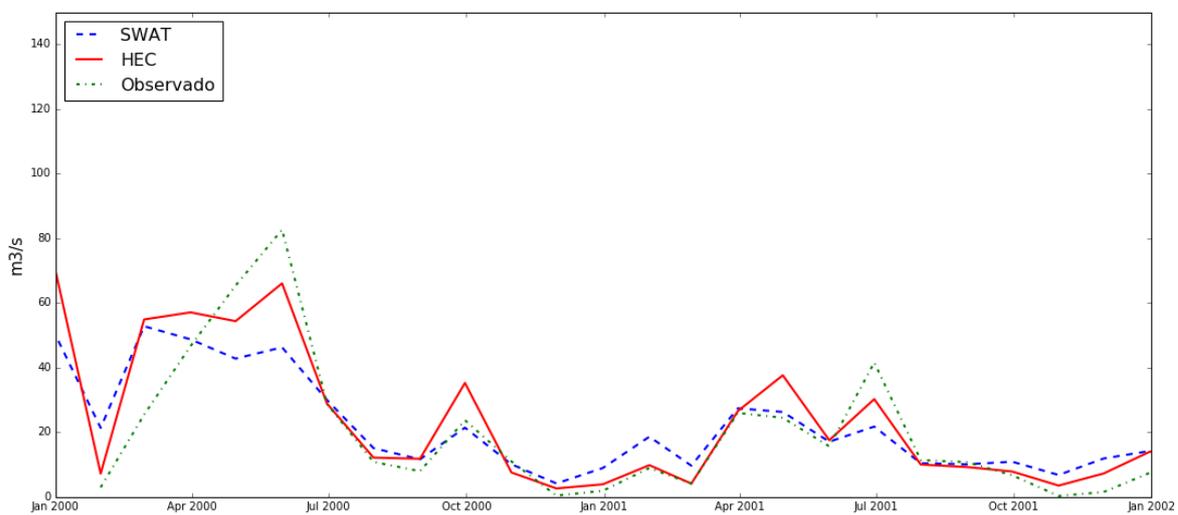
Para ambos modelos se alcanzaron los niveles de ajuste recomendados por Moriasi et al (2007), en general HECHMS presenta mayor nivel de ajuste, en relación a los rangos recomendados por el autor. En la Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se indica la comparación entre los resultados de simulación de cada modelo y los datos medidos en las subcuencas 14, 20 y 27, para los periodos de calibración considerados.



**Figura 58 Comparación de grado de calibración del modelo SWAT y HECHMS, respecto a datos de caudal medidos en la Sub-cuenca 14.**



**Figura 59** Comparación de grado de calibración del modelo SWAT y HECHMS, respecto a datos de caudal medidos en la Sub-cuenca 20.



**Figura 60** Comparación de grado de calibración del modelo SWAT y HECHMS, respecto a datos de caudal medidos en la Sub-cuenca 27.