

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL  
DE HUAMANGA**

**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**

**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**



**Respuesta hidrológica con cambio climático en flujos de agua  
azul y verde, cuenca del río Cachi, Ayacucho 2021**

**TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AGRÍCOLA**

**PRESENTADO POR:**

**Elmer Jonatan Moreno Villafuerte**

**ASESORA:**

**Ph.D. Sandra Del Águila Ríos**


**Ayacucho – Perú**

**2022**

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA**  
**TESIS**

**Respuesta hidrológica con cambio climático en flujos de agua azul y  
verde, cuenca del río Cachi, Ayacucho 2021**

Expedito : 15 de julio de 2022  
Sustentado : 05 de agosto de 2022  
Calificación : Muy bueno  
Jurados :



---

**Ing. EFRAÍN CHUCHÓN PRADO**  
**Presidente**



---

**M.Sc. ELEAZAR CHUCHÓN ANGULO**  
**Miembro**



---

**Ing. JOHN SAMUEL CAZORLA ORIHUELA**  
**Miembro**



---

**Ph.D. SANDRA DEL ÁGUILA RÍOS**  
**Asesora**

***A Dios:***

*El Alfa y la Omega; el principio y el fin, el primero y el último.*

*En las alturas abriré ríos, y fuentes en medio de los valles; abriré en el desierto estanques de aguas, y manantiales de aguas en la tierra seca.*

*Isaías 41:18*

## **AGRADECIMIENTO**

A la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, alma mater; a la Facultad de Ciencias Agrarias, en especial a la escuela profesional de Ingeniería Agrícola, por haberme acogido para mi formación profesional.

A los catedráticos en general por sus enseñanzas para desarrollarme profesionalmente y haberme brindado sus conocimientos; especialmente en el área de los recursos hídricos.

Finalmente quiero expresar mi sincero agradecimiento al Ph.D. Sandra Del Águila Ríos, asesora del presente trabajo, quien con su enseñanza, constancia y colaboración permitió el desarrollo del trabajo de investigación.

De igual manera al gobierno regional de Ayacucho por haberme facilitado acceder a los datos de la estación hidrométrica Chicllarazo de la cuenca hidrográfica de la irrigación Cachi, para realizar el trabajo de investigación.



## ÍNDICE GENERAL

	<b>Pág.</b>
Dedicatoria.....	ii
Agradecimiento.....	iii
Índice general.....	iv
Índice de tablas .....	vi
Índice de figuras.....	vii
Índice de anexos.....	xi
Resumen.....	1
Introducción .....	2
<b>CAPÍTULO I MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>4</b>
1.1. Antecedentes .....	4
1.1.1. Antecedentes en América.....	4
1.1.2. Antecedentes en el Perú .....	5
1.2. Ciclo hidrológico.....	6
1.3. Modelos hidrológicos.....	8
1.3.1. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	9
1.4. Medidas de bondad de ajuste .....	13
1.5. Modelo SWAT (herramienta de evaluación de suelo y agua) .....	15
1.5.1. Enfoque del modelo SWAT .....	20
1.6. Cambio climático .....	21
1.6.1. Escenarios globales de cambio climático.....	21
1.6.2. Downscaling.....	22
1.6.3. CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment) .....	26
1.6.4. Modelos y forzamiento futuro.....	27
1.7. Datos pisco.....	30
1.8. Recursos hídricos azules y verdes.....	31
1.8.1. Agua azul .....	32
1.8.2. Agua verde .....	33
1.9. Flujos de agua azul y verde en el modelo SWAT.....	34
1.10. Calibración y validación .....	36
1.11. Herramienta CMhyd .....	38
1.11.1. Métodos de corrección de sesgo .....	39

<b>CAPÍTULO II METODOLOGÍA.....</b>	<b>43</b>
2.1. Ubicación del área de investigación.....	43
2.1.1. Ubicación política .....	43
2.1.2. Ubicación geográfica .....	43
2.1.3. Ubicación hidrográfica.....	43
2.1.4. Ubicación administrativa .....	44
2.2. Materiales y equipos .....	45
2.2.1. Información hidrometeorológica observada .....	45
2.2.2. Información geográfica .....	46
2.2.3. Información climática proyectada.....	47
2.2.4. Materiales y herramientas informáticas .....	48
2.3. Metodología .....	48
2.3.1. Recopilación y procesamiento de información climática .....	49
2.3.2. Recopilación y procesamiento de información cartográfica.....	54
2.3.3. Aplicación del modelo hidrológico SWAT .....	61
2.3.4. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo .....	70
2.3.5. Reducción de escala y proyección climática.....	73
<b>CAPÍTULO III RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....</b>	<b>83</b>
3.1. Ejecución del modelo QSWAT.....	83
3.1.1. Características cartográficas de la cuenca de estudio .....	83
3.1.2. Disponibilidad de flujos de agua azul y verde durante el periodo histórico .....	86
3.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo .....	90
3.2.1. Análisis de sensibilidad.....	90
3.2.2. Calibración y validación .....	94
3.3. Respuesta hidrológica al cambio climático en flujos de agua azul y verde .....	96
3.3.1. Modelos climáticos y corrección de sesgos .....	96
3.3.2. Respuesta hidrológica al cambio climático en flujos de agua azul.....	98
3.3.3. Respuesta hidrológica al cambio climático en flujos de agua verde.....	101
<b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>108</b>
<b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>110</b>
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>111</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>116</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
Tabla 1.1. Índices estadísticos de bondad de ajuste para probar la validez del modelo.....	15
Tabla 1.2. Modelos climáticos y su resolución espacial .....	28
Tabla 1.3. Tendencia de forzamiento radiativo bajo diferentes RCP.....	29
Tabla 1.4. Versiones PISCO de precipitación.....	30
Tabla 2.1. Ubicación hidrográfica del ámbito de estudio .....	43
Tabla 2.2. Ubicación de las estaciones virtuales de referencia .....	45
Tabla 2.3. Datos cartográficos de entrada para el modelo SWAT .....	47
Tabla 2.4. Modelos climáticos disponibles para la región estudiada.....	47
Tabla 2.5. Clasificación de suelos en la cuenca Cachi.....	57
Tabla 2.6. Representación del código SWAT del Uso del suelo .....	59
Tabla 2.7. Clases de pendiente (%) para ingresarse al SWAT.....	60
Tabla 3.1. Características del Uso de suelo/Cobertura vegetal.....	84
Tabla 3.2. Características del Tipo de suelo (Edafología) .....	84
Tabla 3.3. Características de las subcuencas simuladas en SWAT.....	85
Tabla 3.4. Ratios de balance hídrico para el periodo de 1981-2016 (resultado de la simulación).....	87
Tabla 3.5. Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 1981-2016.....	88
Tabla 3.6. Parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad en la cuenca Cachi .....	91
Tabla 3.7. Resultados de los parámetros calibrados para la cuenca Cachi .....	93
Tabla 3.8. Valor ajustado de los parámetros calibrados.....	95
Tabla 3.9. Estadísticas de ajuste del rendimiento del modelo.....	96
Tabla 3.10. Rendimiento de los modelos climáticos para la cuenca Cachi .....	97
Tabla 3.11. Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 2046-2070.....	99
Tabla 3.12. Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 2075-2099.....	104

## ÍNDICE DE FIGURAS

		<b>Pág.</b>
Figura 1.1.	El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global .....	6
Figura 1.2.	Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global .....	7
Figura 1.3.	La cuenca de drenaje como sistema hidrológico .....	7
Figura 1.4.	Descripción esquemática de la modelación hidrológica.....	9
Figura 1.5.	Modelos de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C) ..	12
Figura 1.6.	Tipos de modelos hidrológicos mediante el flujo en un canal.....	13
Figura 1.7.	Representación esquemática del ciclo hidrológico .....	17
Figura 1.8.	Explicación de objetos espaciales SWAT + .....	20
Figura 1.9.	Estructura conceptual de un modelo de circulación general .....	22
Figura 1.10.	Reducción de escala de GCM-RCM (Adaptado de Willems, 2011).....	24
Figura 1.11.	Esquema de uso de GCMs en RCMs.....	25
Figura 1.12.	Data CORDEX para sudamérica (SAM-44).....	26
Figura 1.13.	Los dominios CORDEX-CORE (bordes grises) .....	27
Figura 1.14.	Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios RCP.....	29
Figura 1.15.	Observaciones y las proyecciones del modelo CMIP5.....	29
Figura 1.16.	Precipitaciones PISCO para enero de 1998 .....	31
Figura 1.17.	Conceptualización de un enfoque verde-azul .....	32
Figura 1.18.	Diagrama esquemático del agua azul y verde.....	34
Figura 1.19.	Balance hidrológico en SWAT con enfoque “Green Water y Blue Water” .....	36
Figura 1.20.	Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo.....	38
Figura 1.21.	Marco de corrección de sesgo.....	39
Figura 2.1.	Mapa de ubicación de la zona en estudio .....	44
Figura 2.2.	Mapa de ubicación de estaciones virtuales hidrometeorológicas .....	46
Figura 2.3.	Esquema de la ruta metodológica de la investigación .....	49
Figura 2.4.	Proyecciones de datos grillados PISCO (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera).....	50
Figura 2.5.	Proyecciones de datos grillados Piscopp, cuenca Cachi, (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera).....	50
Figura 2.6.	Accesibilidad de la data PISCO-SENAMHI (Color rojo: Área de desempeño) .....	50

Figura 2.7.	Variabilidad histórica en boxplot de las temperaturas máximas diarias.....	51
Figura 2.8.	Variabilidad histórica en boxplot de las temperaturas mínimas diarias.....	51
Figura 2.9.	Variabilidad histórica en boxplot de las precipitaciones diarias .....	52
Figura 2.10.	Series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones virtuales.....	52
Figura 2.11.	Correlación de las estaciones virtuales sobre el área de estudio.....	53
Figura 2.12.	Hidrometría histórica, estación Chichlarazo.....	53
Figura 2.13.	Mapa de elevación del área de estudio .....	54
Figura 2.14.	Red fluvial (A) y Límite de captación (B) de la cuenca Cachi.....	55
Figura 2.15.	Flujo de acumulación y captación de la cuenca Cachi .....	55
Figura 2.16.	Representación de unidades SOTER y la estructura de una unidad SOTER.....	56
Figura 2.17.	Características del suelo en SPAW.....	57
Figura 2.18.	Mapa del tipo de suelo del área de estudio .....	58
Figura 2.19.	Mapa de cobertura vegetal del área de estudio.....	60
Figura 2.20.	Mapa de pendientes del área de estudio.....	61
Figura 2.21.	Representación metodológica del modelo hidrológico SWAT .....	63
Figura 2.22.	Datos de entrada para la simulación en SWAT.....	64
Figura 2.23.	Subcuencas generadas en SWAT en la cuenca Cachi .....	65
Figura 2.24.	Uso de suelos reclasificados con código SWAT de la cuenca Cachi ....	66
Figura 2.25.	Atributos requeridos de SWAT para los tipos de suelos .....	66
Figura 2.26.	Tipos de suelos de la cuenca Cachi reclasificado con código SWAT...	67
Figura 2.27.	Bandas de pendientes de la cuenca Cachi generados por SWAT.....	67
Figura 2.28.	165 HRU's en la cuenca Cachi generados por SWAT.....	68
Figura 2.29.	Esquema del flujo de agua subterránea en SWAT .....	69
Figura 2.30.	Datos climáticos (precipitación y temperatura) del producto PISCO del SENAMHI .....	70
Figura 2.31.	Paso a paso creación de SWAT-SUFI2 archivos de entrada.....	71
Figura 2.32.	Calibración ficticia en la cuenca aforada mediante SWAT-CUP.....	72
Figura 2.33.	Optimización de parámetros mediante SWAT-CUP.....	73
Figura 2.34.	Climatología regional (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera) del proyecto CORDEX .....	74

Figura 2.35.	Reducción de escala - Downscaling .....	75
Figura 2.36.	Corrección de sesgo (“bias correction”) .....	76
Figura 2.37.	Diagrama de procesamiento de datos para proyecciones futuras con CMhyd .....	77
Figura 2.38.	Portal de descarga del Earth System Grid Federation .....	78
Figura 2.39.	Esquema de transferencia de variable climática de escala global a escala de cuenca.....	79
Figura 2.40.	Downscaling estadístico y extracción de datos con la herramienta CMhyd .....	80
Figura 2.41.	Estadística de ajuste de modelos climáticos y la data histórica PISCO del SENAMHI.....	81
Figura 2.42.	Enfoque de modelos para análisis de proyecciones (correspondiente a la respuesta hidrológica) .....	82
Figura 3.1.	Composición: (a): DEM, (b): Uso de suelo, (c): Tipo de suelo, (d): Subcuencas .....	84
Figura 3.2.	Mapa de subcuencas (resultado de la simulación) de la cuenca Cachi..	85
Figura 3.3.	Optimización en el tiempo de trabajo para la operación del sistema.....	87
Figura 3.4.	Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 1981-2016 .....	88
Figura 3.5.	Distribución de los medios anuales de lluvia, agua azul y verde en el periodo histórico (1981 – 2016) .....	89
Figura 3.6.	Comparación de diferentes parámetros de flujos de agua azul para el periodo de 1981- 2016 .....	89
Figura 3.7.	Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 1981-2016 .....	90
Figura 3.8.	Diagrama de flujo para ajuste de parámetros en el modelo SWAT.....	91
Figura 3.9.	Análisis de sensibilidad de los parámetros .....	92
Figura 3.10.	Parcelas de puntos (valor de parámetros vs función objetivo) .....	93
Figura 3.11.	Ubicación de la bocatoma Chiellarazo (aguas arriba) .....	94
Figura 3.12.	Serie de tiempo de flujo mensual calibrado y validado .....	95
Figura 3.13.	Serie observadas y simuladas con banda de probabilidad (95PPU) ....	95
Figura 3.14.	Comparación de los modelos GCMs-RCMs y producto PISCO- SENAMHI .....	97
Figura 3.15.	Climatología regional (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno,	

	SON: Primavera) del modelo IPSL-CM5A-MR .....	98
Figura 3.16.	Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 2046-2070 .....	99
Figura 3.17.	Flujo de agua azul media anual para la década del (2046-2070).....	100
Figura 3.18.	Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 2046-2070 .....	100
Figura 3.19.	Flujo de agua azul media anual para la década del (2075-2099).....	101
Figura 3.20.	Flujo de agua verde media anual para la década del (2046-2070).....	102
Figura 3.21.	Flujo de agua verde media anual para la década del (2075-2099).....	102
Figura 3.22.	Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 2075-2099 .....	103
Figura 3.23.	Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 2075-2099 .....	103
Figura 3.24.	Respuesta hidrológica del BWF Y GWF bajo el modelo IPSL-CM5A-MR.....	105
Figura 3.25.	Componentes de agua azul y verde para la década del 2090.....	105
Figura 3.26.	Respuesta hidrológica (resultado de la simulación) del BWF y GWF para el periodo histórico y futura.....	106
Figura 3.27.	Coeficiente de agua verde y certidumbre del modelo .....	106
Figura 2.28.	Distribución espacial de caudales media mensual para la cuenca Cachi .....	107

## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
Anexo 1. Anomalías de precipitación sobre la cuenca del río Cachi .....	117
Anexo 2. Distribución espacial de la climatología diaria de la cuenca del río Cachi .....	120
Anexo 3. Atributos del tipo del suelo requeridos por el SWAT .....	121
Anexo 4. Qmed mensual observado en la estación hidrométrica .....	122
Anexo 5. Definición y rango de parámetros para análisis de sensibilidad .....	123
Anexo 6. Distribución espacial de la climatología global del modelo CMIP5_RCP8.5 .....	124
Anexo 7. Diagrama de cajas de las temperaturas (máx, min) sobre la cuenca del río Cachi, del modelo IPSL-CM5A-MR.....	125
Anexo 8. Calibración de la precipitación diaria y mensual de modelos climáticos regionales con datos observados grillados del producto PISCO_SENAMHI .....	126
Anexo 9. Variación interanual de los componentes hidrológicos para la década del 2060 (2046 – 2070) .....	129
Anexo 10. Variación interanual de los componentes hidrológicos para la década del 2090.....	131
Anexo 11. Variación interanual de los componentes hidrológicos del GWF para la década del (2075 – 2099) .....	133
Anexo 12. Variación del BFW y GWF en la cuenca del río Cachi .....	135
Anexo 13. Caudal mensual promedio a nivel de subcuencas para la década del 2070.....	136
Anexo 14. Caudal mensual promedio a nivel de subcuencas para la década del 2090.....	138
Anexo 15. Diagrama de Taylor para los modelos GCMs-RCMs .....	140



## LISTA DE ACRÓNIMOS

<b>IPCC</b>	: Panel intergubernamental del cambio climático.
<b>SWAT</b>	: Soil and Water Assessment Tool (herramienta de evaluación de suelo y agua).
<b>CORDEX</b>	: Coordinated Regional Downscaling Experiment (Experimento regional coordinado de reducción de escala).
<b>CMIP5</b>	: Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5.
<b>PISCO</b>	: Datos peruanos interpolados de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI.
<b>SAM-44</b>	: Dominio de América del Sur a una resolución de 0,44°.
<b>BWF</b>	: Flujos de agua azul.
<b>GWF</b>	: Flujos de agua verde.
<b>SUFI-2</b>	: Ajuste secuencial de incertidumbre.
<b>RCP</b>	: Trayectoria de concentración representativa.
<b>RCM</b>	: Modelo climático regional.
<b>FR</b>	: Forzamiento radiactivo.
<b>USDA</b>	: Departamento de Agricultura de los Estados Unidos.
<b>SOTERLAC</b>	: La base de datos de suelos y terrenos para América Latina y el Caribe
<b>HRU</b>	: Unidad de respuesta hidrológica.
<b>CMhyd</b>	: Datos del modelo climático para el modelado hidrológico.
<b>NetCDF</b>	: Network Common Data Form (Formulario de datos comunes en red).
<b>SRTM</b>	: Shuttle Radar Topography Mission (Misión de topografía de radar de transbordador).
<b>ISRIC</b>	: Información del suelo mundial.
<b>RCA4</b>	: Rossby Centre Regional Atmospheric Climate Model (Modelo de clima atmosférico regional del centro de Rossby).
<b>95PPU</b>	: Incertidumbre de predicción del 95 por ciento.
<b>IPSL-CMC</b>	: Centro modelo climático - Instituto Pierre Simón Laplace

## RESUMEN

Actualmente, las demandas hídricas presentan un crecimiento continuo en cantidad y calidad, sobre los recursos hídricos azules y verdes disponibles a nivel global, y asimismo la reducción proyectada de los flujos de agua azul y verde, consecuencia del cambio climático, deduce un nuevo nivel de incertidumbre futura. Este trabajo tiene como objetivo estimar cuantitativamente la respuesta hidrológica en los flujos de agua azul y verde en la cuenca del río Cachi, bajo escenarios de cambio climático, para el periodo histórico (1981 – 2016) y las décadas del 2060 (2046 – 2070) y del 2090 (2075 – 2099), usando el modelo hidrológico semidistribuido SWAT; previamente calibrado y validado con el algoritmo SUFI-2 obteniendo valores de Nash – Sutcliffe (0.57, 0.62); R2 (0.57, 0.63) y KGE (0.64, 0.75), donde estos valores indican un rendimiento óptimo del modelo. Se utilizó la proyección de la precipitación y temperatura del modelo IPSL-CM5A-MR (Francia), dentro de los 10 modelos evaluados, bajo el escenario de forzamiento radiativo RCP8.5 del *Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment* (CORDEX), empleando *downscaling* estadístico con corrección del error por *power transformation* y *distribution mapping* para la precipitación y temperatura respectivamente, usando la herramienta CMhyd. Los resultados sugieren que el promedio anual de flujo de agua azul (BWF) para la década del 2060 (2046-2070) disminuye en - 6.1% (198 mm-245.5 mm) para las subcuencas del sur, por el contrario, incrementa en +19% (198 mm-245.5 mm) para la subcuencas de Huanta y San Pedro de Cachi; entre tanto para la década del 2090 (2075-2099) presenta una disminución considerable de -35.1% (269.5 mm-175 mm) para las subcuencas del sur; mientras que el flujo de agua verde (GWF) presenta una pequeña variación de 4% (767 mm-798.5 mm) para la década del 2060 (2046-2070), en cambio para la década del 2099 el GWF incrementa en +11.5% (767 mm-866.5 mm) a nivel de la cuenca, concluyendo el BWF presenta una variación espacio temporal en el futuro y GWF muestra una tendencia creciente.

**Palabras clave:** Cambio climático; agua azul; agua verde; SWAT; SUFI-2; CORDEX; *downscaling*; RCP; CMhyd.

## INTRODUCCIÓN

Durante los últimos años los procesos regionales del ciclo del agua y los impactos en estos procesos por el cambio climático se han convertido en temas de gran interés académico. El cambio climático puede alterar las condiciones regionales de precipitación, temperatura y evapotranspiración, que luego agrava la escasez de agua (Zhang *et al.*, 2020). El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su quinta fase (AR5) ha definido cuatro posibles escenarios de emisión de carbono, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP), para el año 2100, donde las proyecciones climáticas presentan aumentos en la temperatura de +1.7°C a +6.7°C a nivel de América Latina; para las proyecciones de emisiones medias y altas (RCP 4.5 y RCP8.5), las variaciones espacio temporal de las precipitaciones tienen un aumento del 25% en el sureste para el dominio SAM (Dominio de América del Sur) (IPCC, 2013).

Al mismo tiempo se ha observado un cambio progresivo de las condiciones climáticas, producto de las actividades antropogénicas, lo que provocará cambios en la hidrología de la cuenca, como la infiltración del agua, escorrentía superficial, la evapotranspiración, alteraciones en la humedad del suelo y el flujo de agua subterránea que ha tenido como consecuencia aumentos de la frecuencia y severidad de fenómenos, como inundaciones y sequías que afecta y pone en riesgo la seguridad hídrica y alimentaria en la cuenca del río Cachi; la cual este fenómeno es más persistente en zonas alta andinas que son las fuentes principales de los servicios ecosistémicos hídricos y el lugar donde se desarrolla importante actividad agrícola para la provisión de alimentos a las grandes ciudades; principalmente en las cuencas alta andinas; el principal factor del efecto sobre la disponibilidad hídrica y la reducción de la capacidad de regulación de embalses aguas abajo, es el cambio climático; donde el aumento generalizado de la temperatura y la alteración en la estacionalidad de las precipitaciones

en el futuro, atribuye significativamente a riesgos relacionados con el agua azul, y la disponibilidad de aguas verdes que son importantes para la salud del ecosistema fluvial.

El agua azul y verde es vital para las personas y los ecosistemas, donde se presenta una competencia constante entre los seres humanos y el medio ambiente por los recursos hídricos, la disponibilidad de los recursos hídricos debe evaluarse de manera integral para profundizar nuestra comprensión de las fuentes de agua renovables y lograr una gestión sostenible, eficaz y justa de los recursos hídricos (Jiang *et al.*, 2021). Es importante pronosticar los cambios en el ciclo hidrológico a partir de la modelación hidrológica, bajo escenario de cambio climático en la cuenca Cachi, utilizando modelos hidrológicos que puedan captar los fenómenos hidrológicos con un detalle espacial suficiente, para prevenir a las regiones que puedan verse afectadas. La cuenca alberga también el sistema de riego más grande de la región y uno importante de la Sierra peruana, el sistema hidráulico Cachi; más de 200 km de canales, una represa de 80 millones de m<sup>3</sup>, más de 6,000 usuarios para una superficie regada de más de 10,000 ha; donde la temperatura y precipitación a largo plazo tiene un efecto significativo en el flujo de la corriente que comprende a la cuenca.

### **Objetivo general**

Estimar la producción de flujos de agua azul y verde a través de un modelo semidistribuido bajo escenario de cambio climático a fin de analizar la variación de la respuesta hidrológica en la cuenca del río Cachi.

### **Objetivos específicos**

1. Simular los flujos de agua azul y verde con el modelo hidrológico semidistribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool) a partir de la información cartográfica y hidrometeorológica.
2. Calibrar y validar el modelo hidrológico semidistribuido SWAT en flujos de agua azul y verde en la cuenca del río Cachi.
3. Simular y analizar la respuesta hidrológica en flujos de agua azul y verde a partir de series meteorológicas perturbadas (escenario de cambio climático) en la cuenca del río Cachi.

## **CAPÍTULO I**

### **MARCO TEÓRICO**

#### **1.1. ANTECEDENTES**

##### **1.1.1. Antecedentes en América**

Stehr *et al.* (2010) mencionan en su investigación, desarrollada para la tecnología y ciencia del agua; que lleva por título “*Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile*”, el cual tuvo como objetivo cuantificar la sensibilidad de la hidrología, a partir de simulaciones realizadas mediante un modelo matemático, dentro de dos subcuencas del río Biobío frente a un amplio set de escenarios plausibles de cambio climático, la investigación analiza la respuesta del modelo hidrológico obtenido a partir de los distintos escenarios derivados de modelos de circulación global (MCG), evaluándose también el impacto de usar variaciones de precipitación y temperatura obtenidas de un modelo de circulación regional (MCR). Los resultados mencionan que, para la mayor parte de los escenarios de cambio climático modelados, se producirá una reducción en la magnitud de los caudales medios mensuales y anuales, siendo esta variación mayor en las épocas de primavera y verano.

Velásquez y Troin, (2020) en su investigación “*Incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas*”, tiene como objetivo investigar la incertidumbre asociada con el modelo de circulación general (MCG) al escenario de emisión y a la variabilidad natural del clima en la estimación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas. Las simulaciones climáticas de tres MCG bajo tres escenarios de emisión (B1, A1B y A2) se usan para alimentar el modelo hidrológico SWAT, de tipo físico estocástico y semidistribuido. Las simulaciones cubren 30 años en un periodo de referencia (1971-2000) y dos periodos de 20 años en el futuro (2046-2065 y 2081-2100). Los resultados muestran que los caudales altos son influenciados por la incertidumbre asociada a partir del MCG; además, se pudo observar

a los indicadores hidrológicos que tienen una sensibilidad menor al escenario de emisión para las cuencas de estudio.

### **1.1.2. Antecedentes en el Perú**

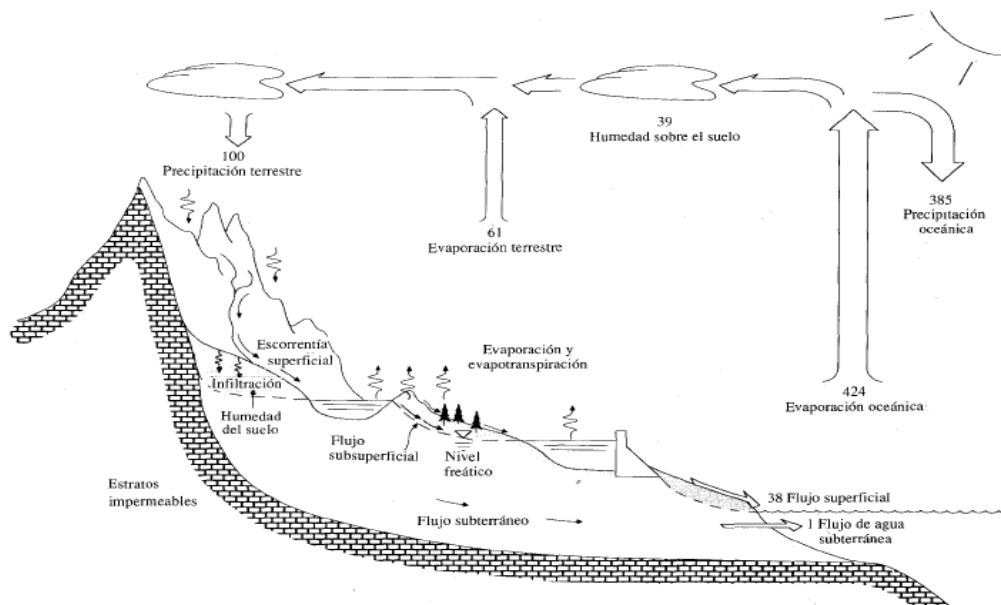
Martínez (2014) en su tesis titulada “*Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*”, el cual tuvo como objetivo principal evaluar el efecto del cambio climático en la variación de la oferta de agua de la cuenca del río Ica para fines del siglo XXI, en base al modelo hidrológico SWAT y los Modelos de la Circulación General (MCG). El modelo hidrológico fue calibrado y validado para un periodo total de 11 años (2000 - 2010) obteniéndose los valores de Nash-Sutcliffe (NSE) de 0.890 y 0.808 respectivamente, lo que representa un buen desempeño del modelo hidrológico. Los resultados indican que las estimaciones de escurrimiento presentan un incremento promedio de 30.53% a 53.97% en la oferta hídrica anual, en el caso de la producción de agua a nivel mensual, se proyectan los mayores incrementos en marzo, septiembre y diciembre con estimaciones promedio de +59.60%, + 133.47% y + 74.33% respectivamente, como también se estima el descenso de la escurrimiento en los meses de julio y agosto con variaciones de -86.86% y -21.29% respectivamente.

León Ochoa *et al.* (2019) en su investigación “*Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura – Perú, considerando la incidencia del cambio climático*” evaluó los impactos del cambio climático en la oferta hídrica superficial, es decir el análisis cuantitativo del flujo superficial a partir de datos espaciales de terreno como la topografía, tipo de suelo, uso de suelo y características climáticas en la subcuenca media y alta del río Piura, Perú, con el modelo hidrológico *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT) previamente calibrado y validado. Para las evaluaciones a futuro, se optó por las simulaciones climáticas del HADGEM2-ES y CSI-RO-Mk3-6-0, de los modelos climáticos globales (MCG), en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. La temperatura y precipitación en los escenarios de cambio climático proyectan un aumento promedio de + 2.9°C y 39.3%, respectivamente, respecto del periodo observado. La evapotranspiración futura muestra una tendencia general a disminuir, con un aumento ligero en el lado noroccidental de la cuenca. En particular, la tendencia promedio de la escurrimiento mensual al 2050 aumento de + 71.8%. Por otro lado, entre los meses de mayo a setiembre, se tiene una disminución de -66.1%.

## 1.2. CICLO HIDROLÓGICO

Según Chow *et al.* (1994) “el ciclo hidrológico es el foco principal de la hidrología superficial y subsuperficial, la cual no tiene principio ni fin y sus procesos diversos ocurren en forma continua y espacial” (p.2).

Chow *et al.* (1994) muestra un esquema donde el agua se evapora desde los océanos y la superficie terrestre para formar parte de la atmósfera; el vapor de agua se transporta y se eleva en la atmósfera hasta que se condensa y precipita en forma de lluvia sobre la superficie terrestre y los océanos; el agua precipitada es interceptada por el dosel de la vegetación y se convierte en flujo superficial la cual escurre sobre el suelo y corre a través del suelo como flujo subsuperficial y descarga en los ríos como escorrentía superficial (p.2).

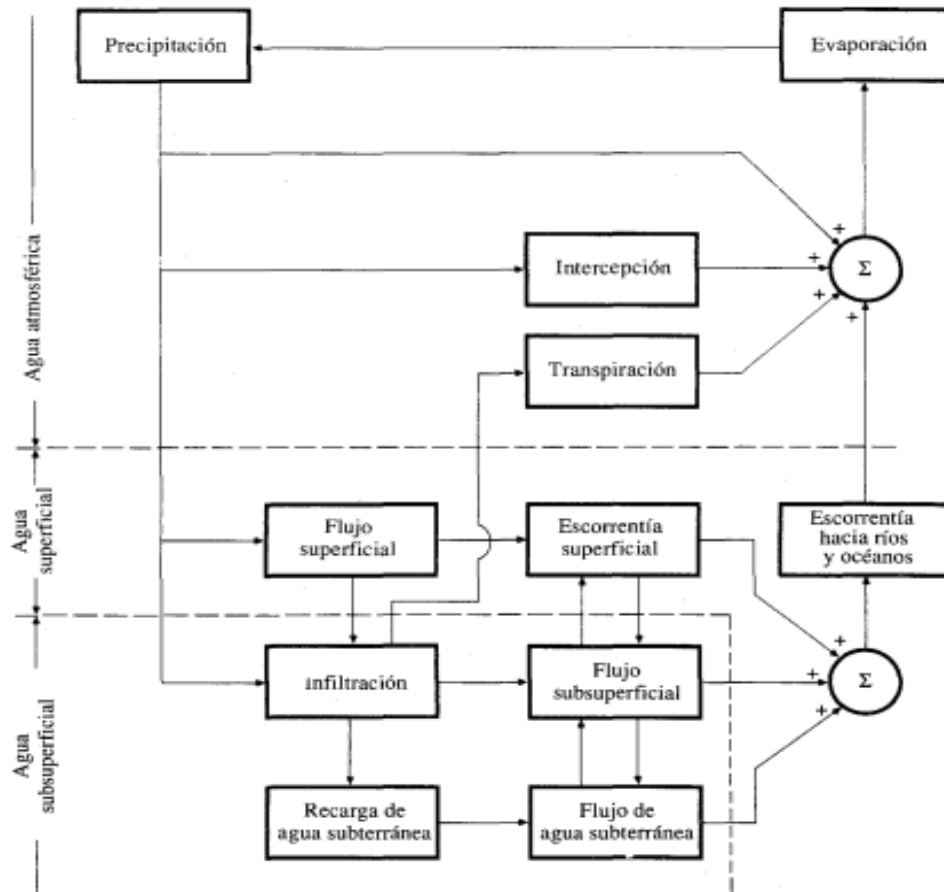


**Figura 1.1.** El ciclo hidrológico con un balance de agua promedio global

Fuente: Chow *et al.*, (1994), p.3

Para Ordoñez (2011) “el ciclo hidrológico podría considerarse como un sistema, cuyos componentes son: precipitación, evaporación, escorrentía y otras fases del ciclo” (p. 11).

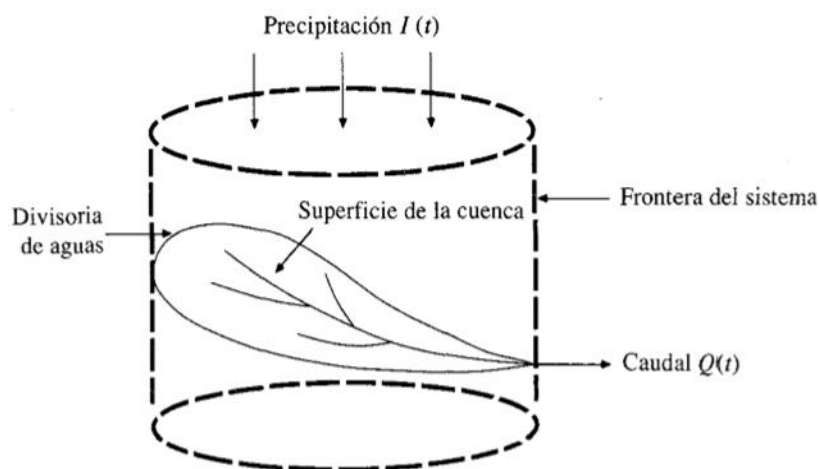
Chow *et al.* (1994) consideran al ciclo hidrológico como un sistema, cuyos componentes son precipitación, escorrentía, evaporación y otras fases del ciclo hidrológico. Estos componentes pueden conglomerarse en subsistemas del ciclo total, estos subsistemas las cuales son más simples pueden analizarse separadamente y combinarse los resultados de acuerdo con las interacciones entre los subsistemas (p.5).



**Figura 1.2.** Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global

Fuente: Chow *et al.*, (1994) p. 6

Un **sistema hidrológico** se “define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas” (Chow *et al.*, 1994, p. 7).



**Figura 1.3.** La cuenca de drenaje como sistema hidrológico

Fuente. Chow *et al.*, (1994) p.8



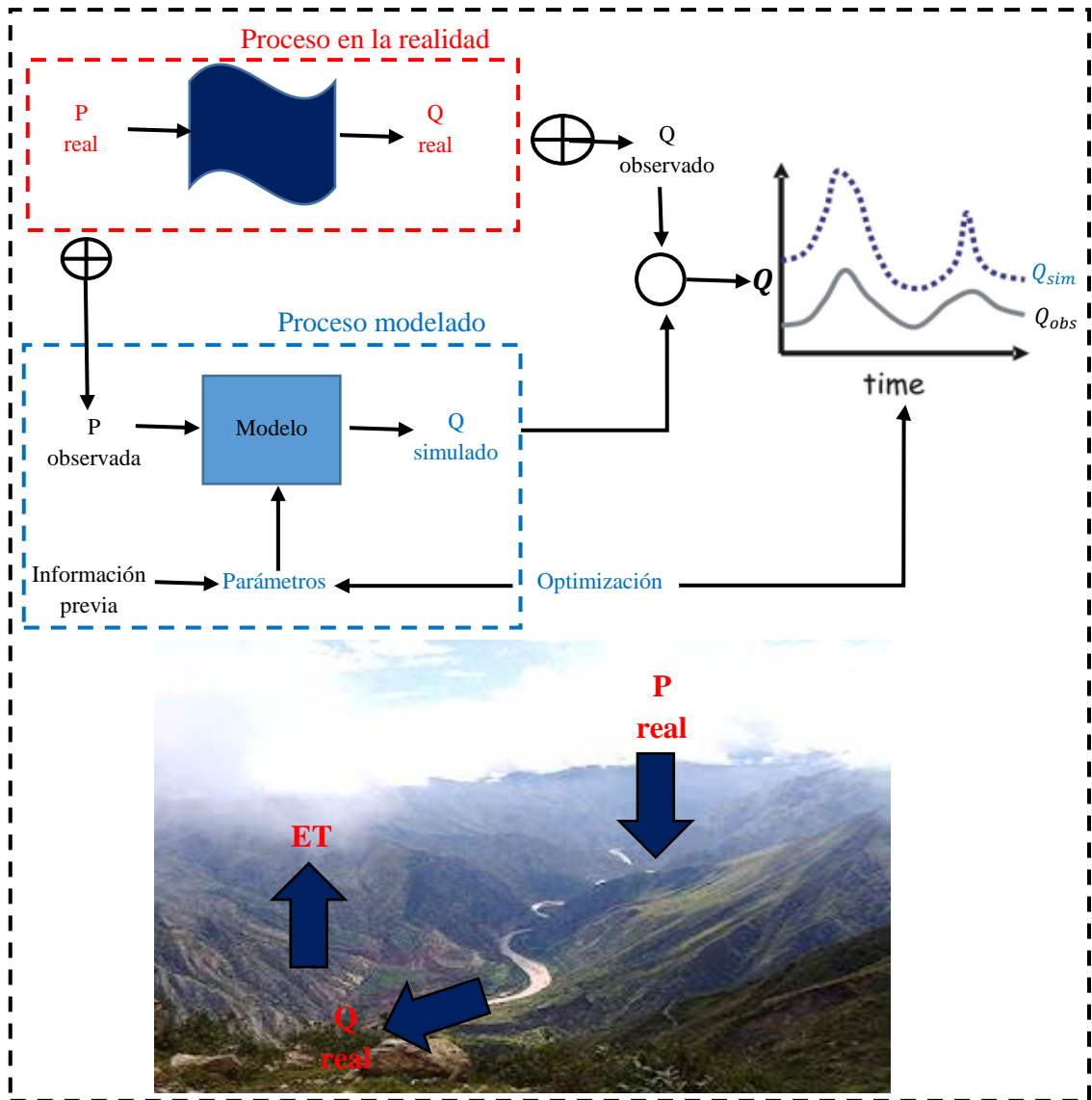
### **1.3. MODELOS HIDROLÓGICOS**

Pascual y Díaz (2016) definen al modelo como una representación simplificada del mundo real, de forma simplificada que simula las relaciones de la respuesta dentro de la cuenca. Los modelos hidrológicos intentan representar los diferentes procesos del ciclo hidrológico que se dan dentro de un espacio (generalmente una cuenca) y que transforman, en principio, una precipitación en escorrentía para luego presentar una respuesta hidrológica posible de dichos procesos (p. 1).

En la hidrología existe una variedad de modelos hidrológicos que representen los procesos hidrológicos desde los modelos determinísticos y estocásticos, con el fin de representar la realidad de la cuenca hidrográfica y sus procesos, la cual es preciso comprender el objetivo de modelar una área de estudio.

Según Eslamian (2014) los siguientes componentes deben ser considerados en la selección de un modelo hidrológico por anticipado:

- Objetivos de modelado hidrológico, la evaluación del impacto del cambio climático, la influencia antropogénica sobre el régimen hidrológico, etc.
- Sistema para modelar; pequeña cuenca, cuenca grande, tramo de río o embalse, etc.
- Elementos hidrológicos a modelar como inundaciones, las descargas diarias, descarga mensual o anual, la calidad del agua, etc.
- El sistema climático y las características fisiográficas del sistema a modelar; cuenca en distintas condiciones: áridas, semiáridas o tropicales, etc.
- Los recursos de la disponibilidad de datos a nivel continua (horarios, diarios, mensuales, estacionales o anuales), longitud (series de tiempo para la calibración del modelo y validación), y la calidad (porcentaje de datos faltantes, homogeneidad, coherencia de los datos), etc.
- Simplicidad del modelo, tener en cuenta el número de parámetros del modelo a ser optimizado y la facilidad de utilizar el modelo para fines prácticos.
- Una vez seleccionado el modelo, se procede a representar de manera simplificada los procesos reales de la hidrología de la cuenca; entre ellos la conversión de la precipitación en caudal.



**Figura 1.4.** Descripción esquemática de la modelación hidrológica

Fuente. Adaptado de Vrugt *et al.*, (2008) p.42

### 1.3.1. Clasificación de los modelos hidrológicos

Según Mediero (2007) existen numerosas clasificaciones de los modelos hidrológicos, la cual principalmente se clasifican en tres puntos de vista, la primera se fundamenta en el tipo de representación espacial del modelo, la segunda en la forma de representar los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca y la última en la serie temporal en la que se puede aplicar el modelo (p. 16).

Los modelos hidrológicos se clasifican en tres grupos en función de la representación espacial (Mediero, 2007, p.16):

- **Modelos agregados:** Son aquellos que consideran una distribución espacial uniforme de lluvia en una total de cuenca, utilizando como variable de entrada la precipitación media, y supone que los parámetros de los diferentes submodelos, que simulan los diferentes procesos hidrológicos, son globales para toda la cuenca y permanecen constantes a lo largo de un episodio (Mediero, 2007, p.16).
  
- **Modelos semidistribuidos:** Estos modelos permiten otra cierta variabilidad espacial y temporal de la lluvia y parámetros de los submodelos que lo componen, mediante la división de la cuenca en subcuencas con lluvia y parámetros constantes en cada uno de ellos. Los modelos semidistribuidos se construyen a partir de la superposición de diversos modelos agregados, por ejemplo diversas subcuencas de una cuenca hidrográfica, comúnmente es dividir el área de estudio en Unidades de Respuesta Hidrológica, la cual estas unidades generan sus propias salidas de forma agregada, pero aparecen entradas y salidas de unas a otras (Mediero, 2007, p.16).
  
- **Modelos distribuidos:** Estos modelos presentan la variación espacio temporal de la lluvia y parámetros, mediante la división de la cuenca en grilla de celdas, en donde se simulan los diferentes procesos hidrológicos. En un modelo distribuido, se tiene una sección de área de estudio dividida en porciones cuadrículas cada una con un conjunto de parámetros y sus propias variables de entrada al modelo, la cual cada porción de área, recibe un flujo de salida de energía y materia proporcionada por las cuadrículas vecinas (Mediero, 2007, p.16).

En función del tipo de representación de los procesos hidrológicos que ocurren en la cuenca se pueden clasificar en cuatro grupos (Mediero, 2007, p.17):

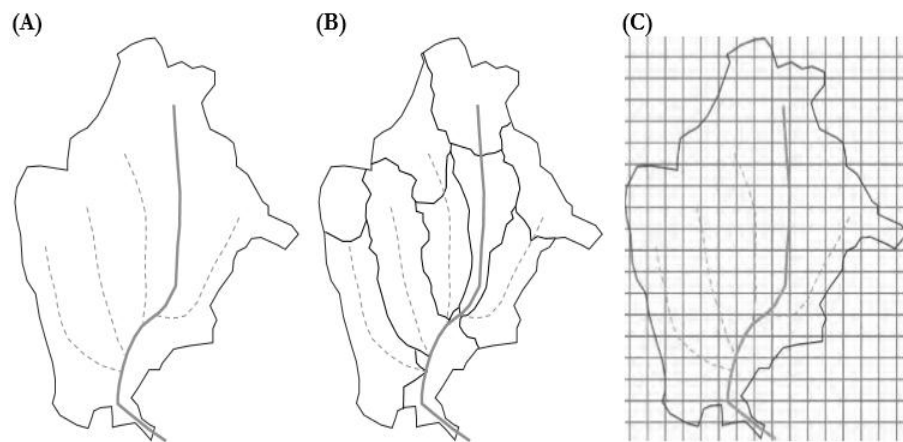
- **Modelos métricos:** Estos modelos presentan gran dependencia de los datos observados, con fin de caracterizar la respuesta hidrológica del sistema, a partir de un método de extracción de la información de los datos existentes. Estos modelos se presentan con una consideración posiblemente nula de los procesos físicos que ocurren en el sistema hidrológico (Mediero, 2007, p.17).
  
- **Modelos conceptuales:** Son aquellos que presentan los procesos hidrológicos más importantes a partir de una base de conocimiento inicial en forma de una

representación conceptual. El inicio de estos modelos depende de la capacidad computacional, lo que permite la representación integrada de la fase terrestre del ciclo hidrológico para generar series continuas del flujo. La representación hidrológica del modelo se realiza mediante relaciones simplificadas con parámetros que no se pueden medir físicamente en la realidad (Mediero, 2007, p.17).

- **Modelos físicamente basados:** Estos modelos se basan en los conocimientos más recientes del comportamiento físico de los procesos hidrológicos a partir de ecuaciones numéricas, realizando la simulación del comportamiento hidrológico de una cuenca, mediante la utilización de las ecuaciones de continuidad, resolviendo las ecuaciones diferenciales de forma numérica, a partir de la aplicación de métodos de diferencias finitas o elementos finitos (Mediero, 2007, p.17).
  
- **Modelos de episodio ('event-driven'):** Desarrollados para simulaciones de cortos intervalos de series de tiempo, con único episodio de lluvia. Estos modelos se centran en la simulación de los procesos de infiltración y escorrentía superficial, ya que su principal objetivo es la evaluación de la escorrentía directa mediante el flujo superficial. Sin embargo, no tienen en cuenta el proceso de recuperación de humedad entre episodios de lluvia (Mediero, 2007, p.17).
  
- **Modelos continuos:** Son aquellos que permiten la simulación de caudales diarios, mensuales o anuales a partir de intervalos de tiempo mayores a un umbral de lluvia. Estos modelos consideran todos los procesos que influyen en la generación de escorrentía, tanto la escorrentía directa mediante el flujo superficial, como la escorrentía indirecta mediante el flujo subterráneo (Mediero, 2007, p.17).

Pascual y Díaz (2016) clasifica los modelos hidrológicos de múltiples maneras teniendo en cuenta criterios matemáticos, es decir los procesos físicos. Si bien es cierto que en la mayoría de los casos los modelos se describen por la forma de representar la superficie de la cuenca (agregados, semidistribuidos y distribuidos), el enfoque matemático (deterministas y estocásticos) y la forma de plantear los procesos hidrológicos que analizan (física y empírica), también es necesaria contar con modelos que puedan predecir las simulaciones en cuencas no aforadas (p. 6).

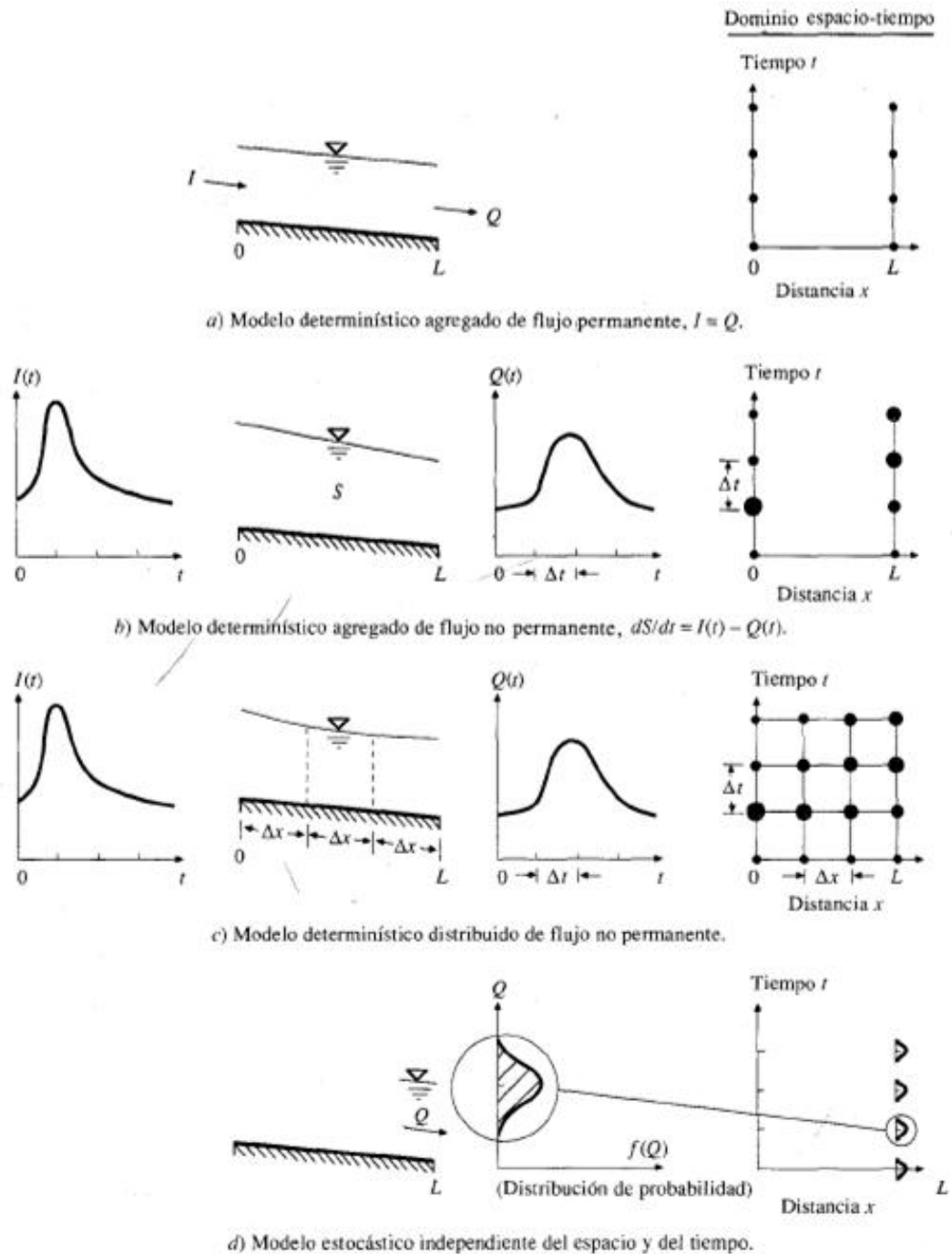
- **Modelos determinísticos:** Un modelo determinístico se emplea en la circunstancia en la que se disponga de poca información, ejemplo disponer de un valor para un solo parámetro, como son casos comunes de las obras de ingeniería hidráulica; estos modelos se basan en los datos y conocimientos de acontecimientos de lluvia diaria que se dispone usualmente de series temporales (Quintana, 2018, p. 35).
- **Modelos estocásticos:** El modelo estocástico se define como la información que se emplea para tratar valores de series históricas de manera continua a través del tiempo. Este tipo de modelos se emplea frecuentemente para la pronosticación a corto y largo plazo de series hidrológicas, pero es necesaria la comparación de las series observadas y simuladas (Quintana, 2018, p. 35).



**Figura 1.5.** Modelos de tipo agregado (A), semidistribuido (B) y distribuido (C)

Fuente. Pascual & Díaz (2016) p.6

Para Chow *et al.* (1994) todos los modelos hidrológicos son aproximaciones de la realidad, donde la salida de un sistema real nunca puede pronosticarse con certeza; así mismo, los fenómenos hidrológicos varían con tres dimensiones de espacio y tiempo, como la aleatoriedad, tres dimensiones de espacio y tiempo, la cual se ha llevado a cabo sólo para algunos pocos caos idealizados (p.12).



**Figura 1.6.** Tipos de modelos hidrológicos mediante el flujo en un canal

Fuente: Chow *et al.*, (1994) p.13

#### 1.4. MEDIDAS DE BONDAD DE AJUSTE

Moriasi *et al.* (2016) afirma que las medidas de desempeño estadísticas se utilizan ampliamente para cuantificar el desempeño de los modelos, al describir la cercanía del comportamiento del valor simulado a las observaciones. Aunque existen diferentes formas de categorizar a las medidas de desempeño, las medidas se agrupan como regresión estándar, adimensional e índice de error y entre otras (p. 1769).

Según Kiprotich *et al.* (2021) para el análisis del desempeño del modelo a calibrar, se utilizan índices estadísticos que son los siguientes (p. 10) (Tabla 1.1) :

- Producto del coeficiente de determinación (R<sup>2</sup>) y la pendiente de la recta de regresión entre la simulación y la observación (bR<sup>2</sup>)

$$bR^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})(y_i^{sim} - y_{sim}^{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_{sim}^{mean})^2}} \right)^2$$

- Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})^2}$$

- Error medio cuadrático (RMSE)

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

- Sesgo porcentual (PBIAS)

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

- Eficiencia de Kling-Gupta (KGE)

$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 (\beta - 1)^2 (\gamma - 1)^2}$$

- Eficiencia volumétrica (VE)

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_{sim} - y_{obs}|}{\sum_{i=1}^n y_{obs}}$$

Dónde  $y$  es la descarga del flujo de la corriente,  $obs$  es la observación, mientras  $sim$  es la simulación,  $r$  es el coeficiente de correlación,  $\beta$  es la relación de sesgo (adimensional) y  $\gamma$  es la razón de variabilidad (adimensional).

**Tabla 1.1.** Índices estadísticos de bondad de ajuste para probar la validez del modelo

Coeficiente	Descripción	Valores óptimos
Sesgo porcentual (PBIAS)	Mide la tendencia promedio del flujo del canal simulado a desviarse del flujo observado.	0: óptimo Negativo: subestimación, Positivo: sobreestimación
Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)	Una estadística normalizada que calcula la magnitud relativa de la varianza del flujo simulado en comparación con el flujo observado.	NSE = 1 coincidencia perfecta, NSE = 0, predicciones del modelo precisas como la media de los datos observados, - $\infty < NSE < 0$ , la media observada es un mejor predictor que el modelo.
Raíz cuadrada del error cuadrático medio (RMSE)	Mide el error de los valores predichos de flujo y los valores de flujo observados <i>in situ</i> .	Valor inferior a la mitad de la desviación estándar: eficiente
Producto del coeficiente de determinación (R <sup>2</sup> ) y la pendiente de la recta de regresión entre la simulación y la observación (bR <sup>2</sup> )	Permite medir la discrepancia en la magnitud de la simulación y la observada flujos (b) y su dinámica (R <sup>2</sup> ).	$0 \leq bR^2 \leq 1$ 1: Óptimo, > 0,5: buena coincidencia, < 0,5: representativo.
Eficiencia Kling-Gupta (KGE)	Ayuda a evaluar la importancia relativa de diversos componentes (correlación, sesgo y variabilidad).	- $\infty < KGE > 1$ ~ 1 eficiente
Eficiencia volumétrica (VE)	Representa la fracción de agua que llega al canal en el momento adecuado.	- $\infty \leq VE \leq 1$ ~ 1 eficiente

Fuente. Adaptado de Kiprotich *et al.*, (2021) p.10

### 1.5. MODELO SWAT (HERRAMIENTA DE EVALUACIÓN DE SUELO Y AGUA)

El SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) es un modelo hidrológico de base física y continua, en énfasis para la aplicación del modelado de cuencas hidrográficas a corto y largo plazo, desarrollado por el Departamento de Agricultura de los Estados Unidos en colaboración de la Universidad de Texas.

Neitsch *et al.* (2011) describieron al modelo SWAT de la siguiente manera: El SWAT fue desarrollado para cuantificar y predecir el impacto de las prácticas de manejo de la tierra sobre la producción de agua, sedimentos, nutrientes y sustancias químicas



productos de la actividad agrícola, en cuencas hidrográficas y cuencas fluviales, con diferentes tipos de suelos, usos de la tierra y condiciones de manejo, a lo largo de largos períodos de tiempo. El modelo tiene una base física y continua la cual es computacionalmente eficiente, requiere datos relativamente fáciles de disponer y permite estudiar los impactos a largo plazo. (p. 1)

Uribe (2010) describe y organiza al modelo SWAT con propósitos de simulación de la siguiente manera: La información de entrada para cada subcuenca es agrupada u organizada en las categorías siguientes: clima, unidades hidrológicas de respuesta o HRU's, estanques/humedales, agua subterránea y entre otras. Las unidades de respuesta hidrológica son agrupadas en áreas de tierra que son comprendidas de cobertura vegetal, suelo y pendiente de terreno. (p. 6)

La simulación de la hidrología de la cuenca se divide en dos divisiones mayores:

- **Fase terrestre del ciclo hidrológico;** controla la cantidad de agua (superficial y subsuperficial), el sedimento, las cargas de alimento nutritivo y pesticida al principal canal en cada subcuenca (Uribe, 2010, p. 6).
- **Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico;** el que puede ser definido como el movimiento del agua, sedimentos, entre otros a través de la red de canales de la cuenca hidrográfica hacia el vertedero (Uribe, 2010, p. 7).

El ciclo hidrológico es simulado por SWAT la cual se basa en la ecuación del equilibrio del agua:

$$SW_t = SW_0 + \sum (R_{day} - Q_{surf} - E_a - W_{seep} - Q_{gw})$$

Dónde:

$SW_t$ : contenido final de agua en el suelo ( $mm H_2O$ ),  $t$  es el tiempo( $días$ ).

$SW_0$ : contenido inicial de agua del suelo en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).

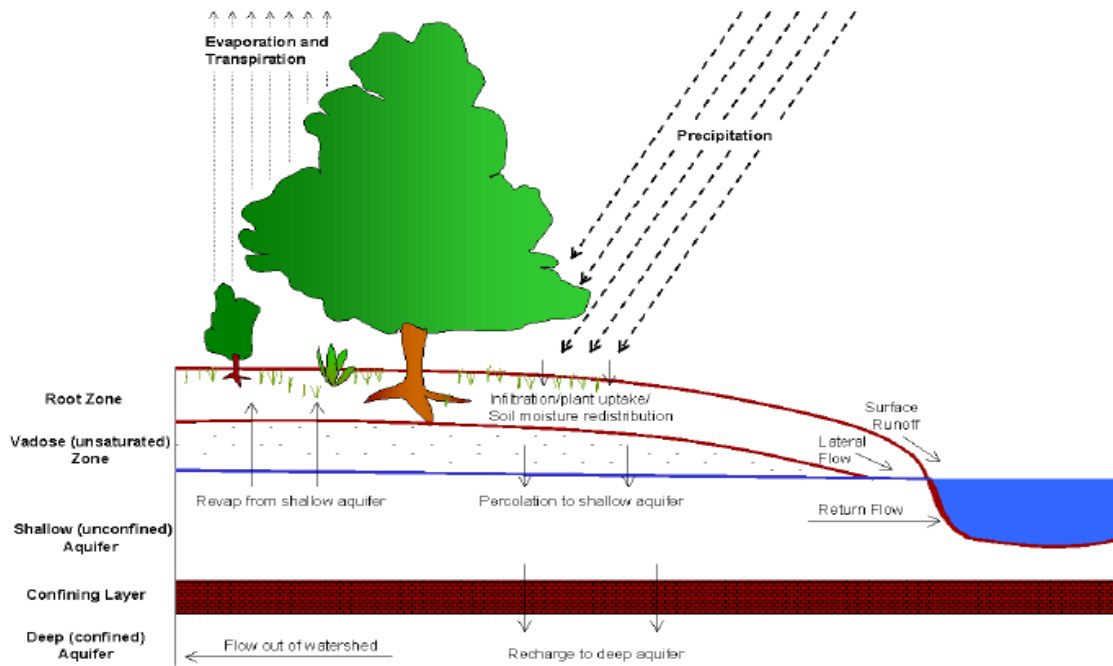
$R_{day}$ : cantidad de precipitación en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).

$Q_{surf}$ : cantidad de escorrentía de la superficie en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).

$E_a$ : cantidad de evapotranspiración en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).

$W_{seep}$ : cantidad de agua que percola en el perfil de suelo en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).

$Q_{gw}$ : cantidad de flujo de retorno en un día  $i$  ( $mm H_2O$ ).



**Figura 1.7.** Representación esquemática del ciclo hidrológico

Fuente. Neitsch et al., (2011) p.8

La subdivisión de la cuenca permite al modelo reflejar las diferencias de los procesos hidrológicos. Las escorrentías son predichas separadamente para cada HRU y dirigidas para obtener las escorrentías totales para las subcuencas. Esto aumenta la certeza y da una mejor concepción física del equilibrio del agua. Los inputs como entradas y procesos implicados en esta fase del ciclo hidrológico son resumidos en las secciones siguientes (Uribe, 2010, p. 8):

**a) Clima**

Para Uribe (2010) el clima de una cuenca proporciona las entradas de humedad, energía y otras variables climáticas que controlan el equilibrio del agua y determinan la importancia de los diferentes procesos del ciclo hidrológico. Las variables climáticas necesarias para el modelo SWAT consisten en precipitación diaria, temperatura máxima y mínima, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa (p. 8).

**b) Hidrología**

Cuando la precipitación desciende en forma de lluvia esta es interceptada por el dosel de la vegetación o cae a la superficie del suelo. El agua en la superficie del suelo se

infiltrará en el perfil del suelo o fluirá sobre la superficie como escorrentía. La escorrentía se mueve relativamente rápido hacia un canal de corriente y contribuye en un corto plazo (Uribe, 2010, p. 10).

### c) Evapotranspiración

La evapotranspiración es entendida para todos los procesos como el agua líquida o sólida de la superficie terrestre se convierte en vapor atmosférico, es decir otra cierta cantidad de agua que vuelve a la atmósfera. El modelo computa la evaporación de suelos y plantas separadamente. La evaporación verdadera del agua en el suelo se estima a partir de ecuaciones exponenciales de profundidad de suelo y contenido de agua. La transpiración de la planta se estima a partir de una función lineal de la evapotranspiración potencial e índice de área foliar de hoja (Uribe, 2010, p. 12).

### d) Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial ocurre en una gran área cubierta uniformemente y completamente con vegetación creciente que tiene acceso a un suministro ilimitado de agua terrestre, la cual el suelo es saturado. El modelo SWAT presenta opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves (Hargreaves y Samani 1985), Priestley y Taylor (Priestley y Taylor 1972) y Penman -Monteith (Monteith 1965) (Uribe, 2010, p. 12).

### e) Escurrimiento superficial

El flujo superficial terrestre es el flujo que ocurre a lo largo de una superficie inclinada, esta será mayor cuando se presenta mayor intensidad de lluvia. Utilizando las cantidades diarias de lluvia, el SWAT simula volúmenes de superficie de escorrentías y promedios máximos de escorrentías para cada HRU. Éste es computado utilizando una modificación del método de curva numérica del USDA (*USDA Soil Conservation Service 1972*) o el método de infiltración de Green y Ampt (Fernández, 2017, p. 13).

Para Fernández (2017) el escurrimiento superficial en el modelo SWAT es calculada en base al método de número de curva propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (USDA-SCS, 1972) (p. 13).

$$Q_{surf} = \frac{(R_{day} - 0.2S)^2}{(R_{day} + 0.8S)} \text{ y } S = 25.4 \left( \frac{1000}{CN} - 10 \right)$$

Dónde:

$Q_{surf}$  : escorrentía superficial (mm)

$R_{day}$  : es la precipitación diaria (mm)

$S$  : corresponde a las pérdidas máximas de agua (mm)

$CN$  : parámetro curva número depende del uso de suelo, de los tratamientos culturales del suelo y del grupo hidrológico de suelo (adimensional).

#### **f) Infiltración**

La infiltración es la entrada de agua en un perfil de suelo de la superficie terrestre; ésta depende de la característica de la capa superior de suelo; cuando la infiltración continúa, el suelo es saturado, causando que el promedio de infiltración disminuya con el tiempo hasta que alcance un valor constante. La tasa final de infiltración equivale a la conductividad hidráulica saturada de la tierra, la cual depende de otros factores como la pendiente de terreno y el espacio poroso del suelo. La cantidad de agua que ingresa hacia el perfil de la superficie terrestre se calcula como la diferencia entre la cantidad de lluvia y la cantidad de escorrentía de superficie (Uribe, 2010, p. 11).

#### **g) Redistribución**

La redistribución se refiere al movimiento continuo de agua a través de la superficie terrestre, después de la entrada del agua (a través de precipitación o irrigación). El contenido de agua a través del perfil es uniforme, la cual la redistribución disminuye. El componente de la redistribución usa un almacenamiento que estima el flujo por cada capa de tierra en la zona principal (Uribe, 2010, p. 12).

#### **h) Percolación**

Según Fernández (2017): “La percolación es el movimiento por el cual el agua recorre los medios permeables de suelo saturados de agua. Ambos fenómenos están íntimamente ligados puesto que, la primera no puede continuar hasta cuando tiene lugar la segunda” (p. 4).

#### **i) Flujo lateral subsuperficial**

El flujo de agua subsuperficial es una contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie, encima de las zonas saturadas de agua. El flujo subterráneo lateral en el perfil de suelo (0-2m) se calcula simultáneamente con

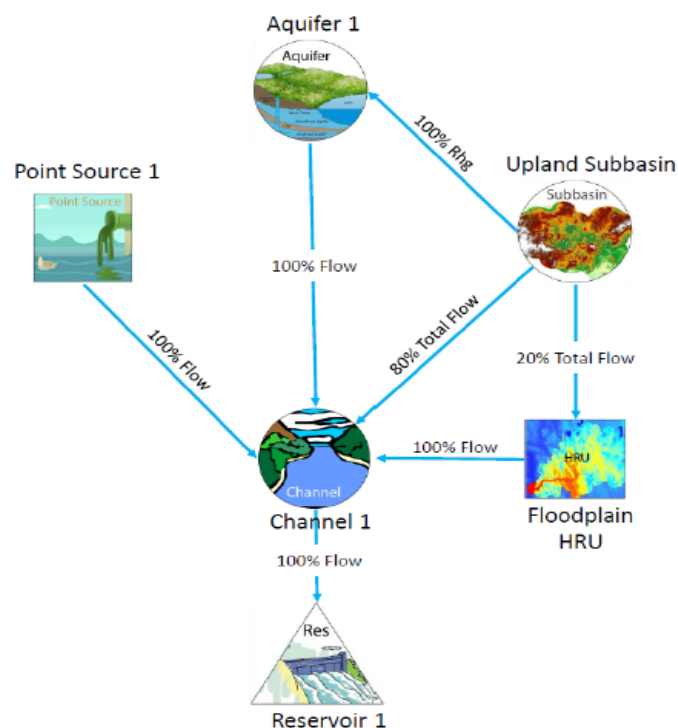
redistribución. Un modelo físico de almacenamiento se utiliza para predecir el flujo subsuperficial en cada capa de tierra (Fernández, 2017, p. 14).

#### j) Flujo de retorno

El flujo del retorno o flujo base, es el volumen de agua subterránea originado en el acuífero poco profundo la cual se encuentra debajo del nivel freático a mayor presión atmosférica; que contribuye al flujo de regreso a las corrientes dentro de la cuenca hidrográfica y un acuífero profundo que contribuye al flujo de regreso a las corrientes fuera de la cuenca (Neitsch *et al.*, 2011, p. 15).

#### 1.5.1. Enfoque del modelo SWAT

Las simulaciones hidrológicas dentro de SWAT nos permiten simular los procesos de flujo superficial y subsuperficial, la infiltración, la evaporación y evapotranspiración, el flujo lateral, percolación y producción de sedimentos. Estas simulaciones se atribuyen a todas las subcuencas generadas por el modelo, facilitando que las diferencias en sus características hidrológicas sean consideradas de forma independiente (Fernández, 2017, p. 9). Cada objeto de conexión en el modelo SWAT, tiene un flujo de salida, desde el objeto espacial hasta salida en el canal (Figura 1.8).



**Figura 1.8.** Explicación de objetos espaciales SWAT +

**Fuente:** Jaclyn Tech Tech Texas A & M AgriLife Research ( 2019)

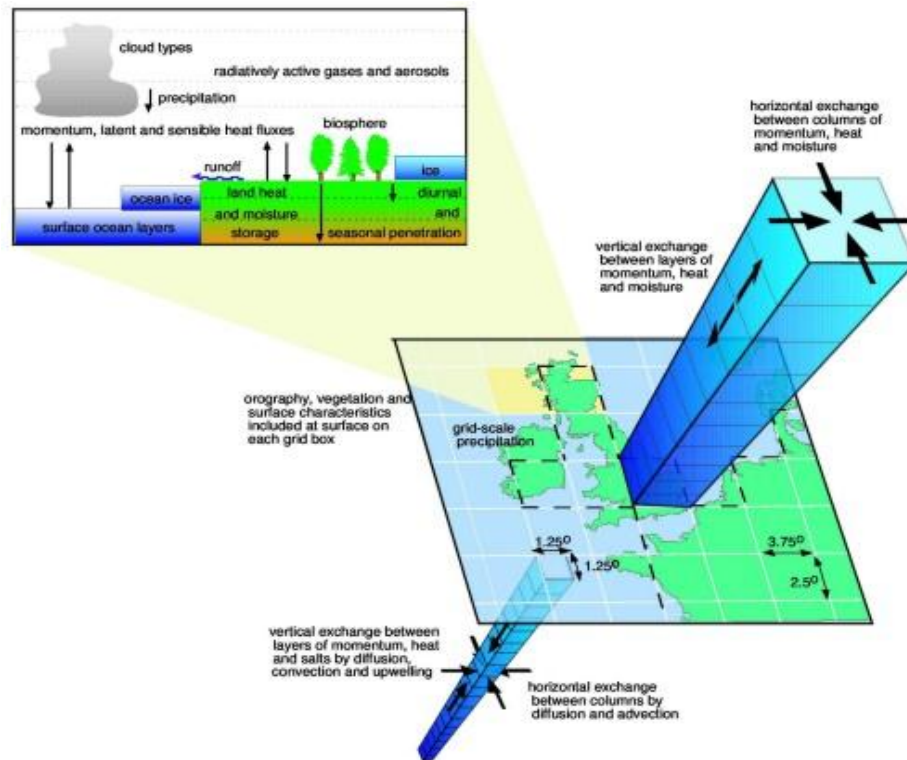
## **1.6. CAMBIO CLIMÁTICO**

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2007) define el término “cambio climático” como un cambio en el estado del clima (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) considerando un cambio promedio en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante décadas (periodos prolongados), generalmente atribuido en decenios o en períodos más largos (p. 30).

Por otro lado, El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, 2013), el cambio climático es entendido a partir del “concepto de forzamiento radiativo que es útil para comparar la influencia en la temperatura media global en superficie de la mayor parte de los agentes individuales que más afectan al equilibrio radiativo de la Tierra” (p. 53).

### **1.6.1. Escenarios globales de cambio climático**

Los escenarios de cambio climático se originan en base a las estimaciones climáticas, realizadas con los modelos climáticos globales que hacen uso de ecuaciones matemáticas para describir el comportamiento de los factores que impactan el clima, como los procesos físicos de la atmósfera y la interacción de ellas. Los factores anteriormente mencionados, junto con otros, como la dinámica atmosférica, los seres vivos, la energía procedente del sol que llega a la Tierra, entre otros, son considerados como variables de forzamiento radiativo que intervienen en la respuesta del equilibrio energético de la Tierra, expresado por calentamiento o enfriamiento del clima global (Oviedo y León, 2010, p. 27).



**Figura 1.9.** Estructura conceptual de un modelo de circulación general

Fuente: Oviedo y León (2010) p.28

Por otro lado, los mismos autores Oviedo y León (2010) mencionan que los modelos climáticos globales suelen ofrecer información a escalas superiores a los 2. 5° que difícilmente puede ser aplicada de manera directa a una región local, la cual se hace necesaria producir información más aproximada posible de las condiciones climáticas reales de esa región o lugar, por ente conlleva a reducir de escala dichos resultados con el objetivo de obtener una representación confiable para una adecuada toma de decisiones (p.35).

### 1.6.2. Downscaling

Para Eslamian (2014) entiende como downscaling al proceso de reducción de escala que se realiza a gran precisión de celda computacional con la salida de los modelos GCM. Existen diferentes métodos para reducir el impacto climático bajo el efecto del cambio climático, tanto métodos dinámicos como estadísticos o híbridos (p.133).

Los métodos dinámicos se ejecutan utilizando los modelos numéricos, capturando los procesos físicos del clima y su interacción de ella. En estos métodos, la resolución son precisos, pero son mucho más costosos y más difíciles que los estadísticos,

generalmente los métodos estadísticos son más populares y utilizados que los dinámicos, porque la creación de modelos numéricos requiere demasiado tiempo y dinero (Eslamian, 2014, p.133).

- **Downscaling dinámico**, el objetivo de la reducción de escala dinámica, es extraer información a la escala local de los GCM de gran escala, se logra anidando un modelo climático de área limitada de alta resolución como el RCM. En lugar de usar ecuaciones para reducir las proyecciones a escala global a un nivel regional y local, la reducción dinámica implica el uso de modelado meteorológico para estimar cómo los patrones globales afectan las condiciones climáticas locales (Eslamian, 2014, p.79).

Los métodos dinámicos se realizan a partir de modelos números, las cuales son capaces de representar el clima actual del área local a partir de la interacción física de la meteorología y atmósfera, lo cual requiere alto costo computacional, por ende la mayoría de los investigadores optan por el método estadístico para la reducción de escala de los modelos GCM.

- **Downscaling estadístico**, la reducción de escala estadística establece una conexión entre las variables históricas del clima a gran escala (predictores) y variables históricas local o de estación (predicta), a través de un modelo estadístico. En lugar de mantener un modelo climático dinámico a la resolución más alta de una región, este enfoque aplica la información de los GCM a la región mediante el uso de una serie de ecuaciones estadísticas para relacionar variaciones en el clima global a las variaciones en el clima local. El supuesto subyacente de estadística de métodos de reducción de escala es estacionario y seguirán siendo los mismos en el futuro con el cambio climático (Eslamian, 2014, p.79).

Las técnicas estadísticas utilizan una relación estadística observada entre los fenómenos a gran escala y cantidades locales (por ejemplo, la precipitación diaria o temperatura). La relación se aplica posteriormente a la salida de GCM para obtener señales de cambio climáticos locales y regionales (Siwila, *et al.*, 2013, p.128).

Las proyecciones históricas y futuras del clima de los modelos GCM tienen grandes incertidumbres, debido a su resolución (300 km x 300 km aproximados) y no se puede



utilizar los datos de simulación de los GCM y RCM (50 km x 50 km aproximados) a escalas locales, por ejemplo, a la escala de cuenca.

Fazeli *et al.* (2019) deducen que las técnicas de reducción de escala estadística utilizan la resolución aproximada de los GCM a escalas regionales para establecer relaciones entre la salida de GCM, las variables climáticas y el clima local, por lo cual se utiliza el factor de cambio que es un método para reducir la resolución espacial y temporal de las proyecciones climáticas y se puede implementar para diferentes escalas de series de tiempo, como periodos diarios, mensuales o más largos (p. 177).

El método del factor de cambio para reducir las series de precipitación y la temperatura, y para obtener la condición regional futura; donde los escenarios de cambio climático se agregan a los observados se representan de las siguientes ecuaciones (Fazeli, *et al.*, 2019, p. 177).

$$P = P_{base} * \Delta P$$

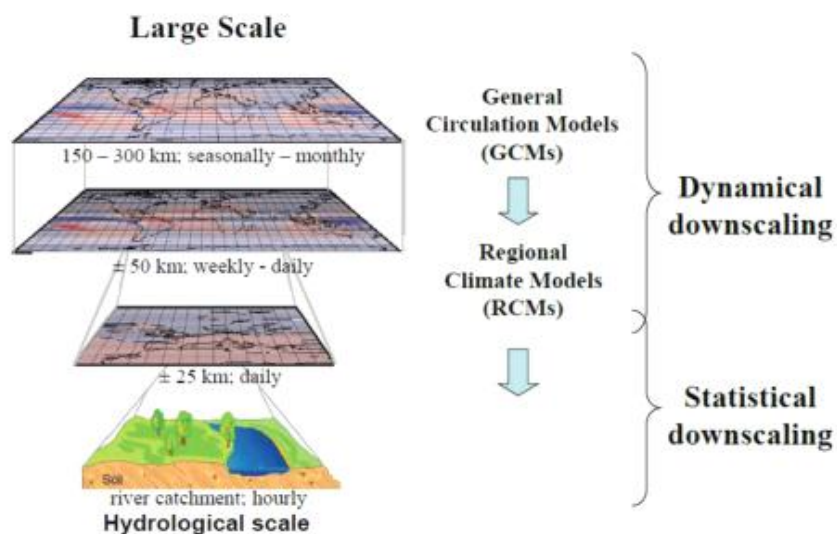
$$T = T_{base} * \Delta T$$

Dónde:

P y T: Series de tiempo de precipitación y temperatura en el periodo futuro.

$P_{base}$  y  $T_{base}$ : Series de tiempo de precipitación y temperatura observada en el periodo base.

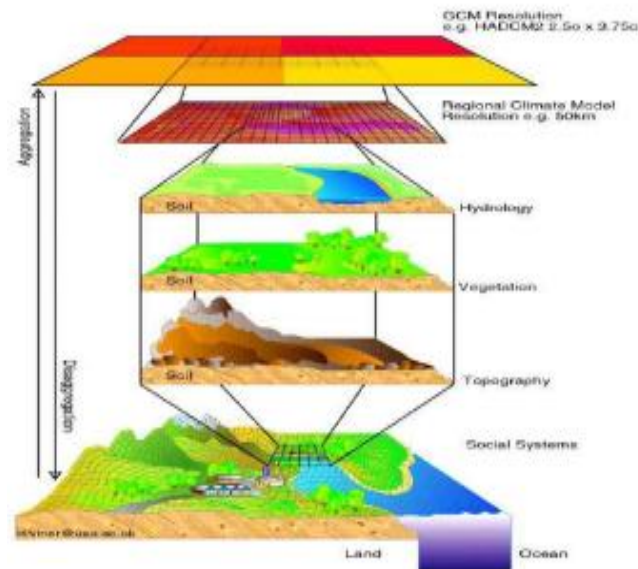
$\Delta P$  y  $\Delta T$  : Escenario de cambio climático reducido de precipitación y temperatura.



**Figura 1.10.** Reducción de escala de GCM-RCM (Adaptado de Willems, 2011)

Fuente: Siwila *et al.*, (2013) p.32

Oviedo y León (2010) afirman que una metodología que se ha utilizado ampliamente en los últimos años es la regionalización estadística y dinámica. El primero utiliza los datos de observaciones para ajustar las salidas del modelo a la realidad regional a partir de ecuaciones estadísticas; el segundo utiliza modelos de alta resolución espacial o modelos climáticos regionales que representan procesos en mayor detalle que los modelos globales (p. 35).



**Figura 1.11.** Esquema de uso de GCMs en RCMs

Fuente. Oviedo y León (2010) p.36

Eslamian (2014) asume que los GCM son las principales herramientas para estudiar y estimar la naturaleza del cambio climático, basándose en las leyes físicas de la composición y el comportamiento atmosférico del clima. El tamaño del sistema climático (atmósfera, océanos, tierra) y el rango de tiempo del clima, en los experimentos (de varias décadas a miles de años) imponen una restricción significativa en el diseño del GCM, esto conduce a un sesgo espacial y temporal (p.78).

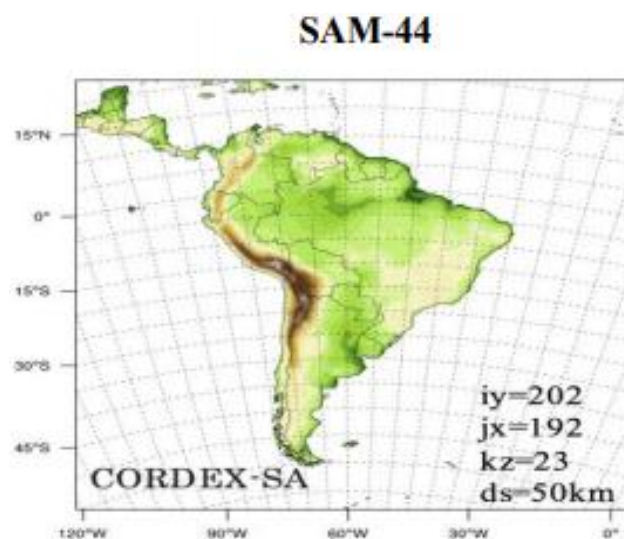
Los métodos estadísticos de reducción de escala se pueden clasificar según el uso de técnicas o la elección de variables predictores. El método representa a menudo una "*bias correction*" (corrección de sesgo), una corrección de las series históricas y proyectadas. Si los MCG sobrestiman la precipitación, se recomienda realizar una reducción de escala, por ente el método estadístico puede corregir ese sesgo a fin de modelar las precipitaciones futuras (Eslamian, 2014, p.79).

En la modelación hidrológica de áreas locales pequeñas, se requiere a la información local del clima, es por ello que se realizan experimentos, como el CORDEX (Experimento coordinado regional de reducción del clima) que son óptimos en capturar los procesos del clima local; está contribuye a la quinta fase de evaluación del IPCC.

### 1.6.3. CORDEX (Coordinated Regional Climate Downscaling Experiment)

Oviedo y León (2010) afirman que la misión de CORDEX es producir un conjunto de escenarios regionales de cambio climático a nivel global, para contribuir con el quinto reporte de evaluación del IPCC y a la vez crear un espacio para que la comunidad mundial interesada en la realización de escenarios regionales de cambio climático comparta información, resultados, experiencias, tecnología y encuentre soporte técnico (p. 16).

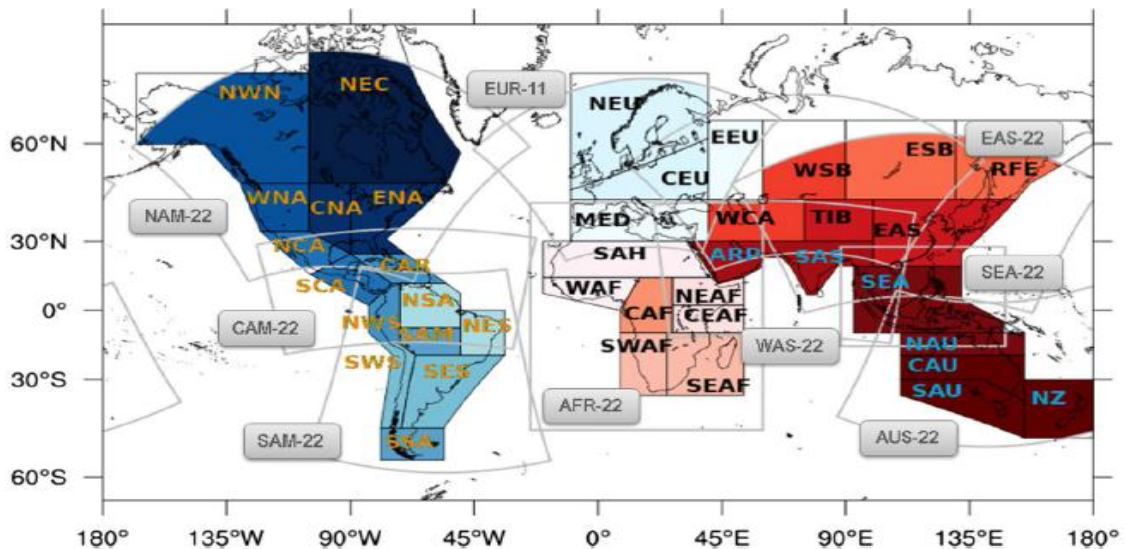
Los investigadores plantean al proyecto CORDEX como: En el marco de CORDEX se están produciendo proyecciones, mediante modelaciones dinámicas y estadísticas, teniendo en cuenta múltiples modelos globales de circulación general tomados del CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5 del WCRP). La resolución espacial utilizada es de  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$  que en la región ecuatorial equivale aproximadamente a 50 Km x 50 Km y se han seleccionado varios dominios que cubren un conjunto de países, buscando aprovechar los proyectos regionales existentes en el mundo. (Oviedo y León, 2010, p. 16)



**Figura 1.12.** Data CORDEX para sudamérica (SAM-44)

**Fuente:** Center for climate and Resiliencie Research (CR2) (2018)

Actualmente, el mundo está dividido en 14 dominios a nivel del globo. En el proyecto Cordex, se pueden encontrar dos técnicas de cuadrículas modelo (regular y rotada), estas técnicas se distinguen por la letra "i" al final de la descripción del dominio. Por ejemplo, el dominio sudamericano SAM-44i (cuadrícula regular), o simplemente SAM-44 (cuadrícula rotada) de América del Sur. El número 44 corresponde al espaciado de la cuadrícula en grados  $0.44^\circ \times 0.44^\circ$  (Ferreira *et al.*, 2020, p. 391).



**Figura 1.13.** Los dominios CORDEX-CORE (bordes grises)

Fuente: Teichmann *et al.*, (2020) p.1271

#### 1.6.4. Modelos y forzamiento futuro

Los modelos climáticos “son representaciones numéricas que explican la evolución del sistema climático en el tiempo y se basan en ecuaciones fundamentales para simular sus características físicas, químicas y biológicas, pero además las interacciones de sus componentes en una grilla geográfica global” (Avalos *et al.*, 2013, p. 11).

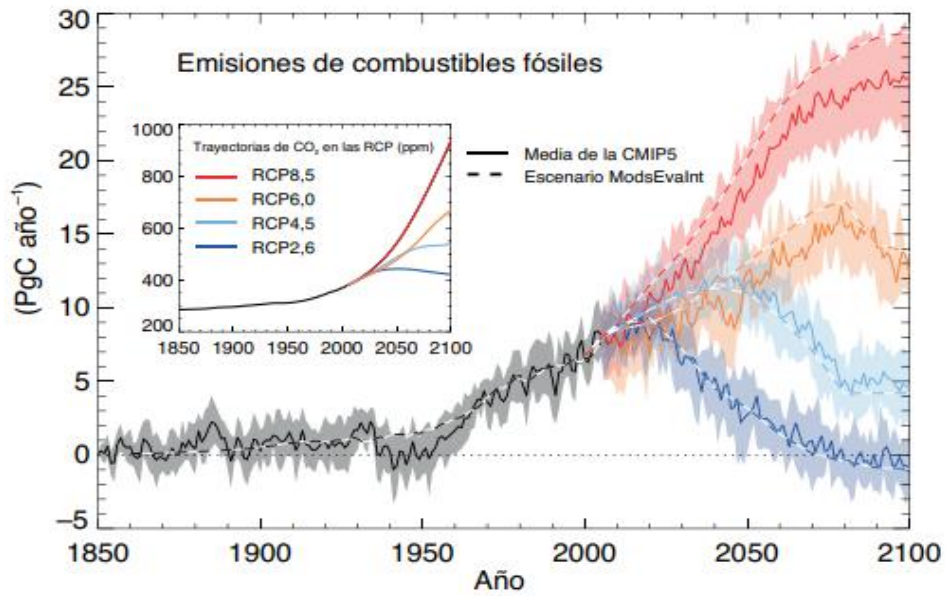
**Tabla 1.2.** Modelos climáticos y su resolución espacial

<b>País</b>	<b>Centro</b>	<b>Modelo</b>	<b>Resolución</b>
Canadá	CCCma	CanESM2	2.8° × 2.8°
Francia	IPSL	IPSL-CM5A-MR	2.5° × 1.2°
Australia	CSIRO	CSIRO-MK3.6.0	1.9° × 1.9°
Internacional	ICHEC	EC-EARTH	1.1° × 1.1°
USA	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	2.5° × 2.0°
Japón	MIROC	MIROC5	1.4° × 1.4°
Alemania	MPI-M	MPI-ESM-LR	1.9° × 1.9°
Noruega	NCC, NMI	NorESM1-M	2.5° × 1.9°
Reino Unido	MOHC	HadGEM2-ES	1.9° × 1.2°
Noruega	NCC, NMI	NorESM1-M	2.5° × 1.9°
Alemania	MPI-M	MPI-ESM-MR	1.9° × 1.9°
Suécia	SMHI	RCA4 V3	0.44° × 0.44°
Brasil	INPE	ETA V1	0.20° × 0.20°
Itália	ICTP	RegCM4-7 V0	0.22° × 0.22°
Alemania	MPI-CSC	Remo2009 V1	0.44° × 0.44°

Fuente. Adaptado de Ferreira et al., (2020) p.391

En los informes del IPCC se estudian un conjunto de nuevas trayectorias de concentración representativas (RCP) que sustituye en gran medida a los escenarios de emisiones de carbono. Estos producen una serie de respuestas que van desde el actual proceso de calentamiento, transitando por un forzamiento estabilizado, hasta un escenario de mitigación exigente (RCP2, 6) y finalmente reduce lentamente el forzamiento radiativo después de la mitad del siglo XXI (IPCC, 2013, p. 4).

En el informe del IPCC se definen 4 nuevos escenarios de emisión, denominadas Trayectorias de Concentración Representativas (RCP, por sus siglas en inglés). Estas se caracterizan por su Forzamiento Radiativo (FR) total para el año 2100 que oscila entre 2,6 y 8,5 W/m<sup>2</sup> (Tabla1.3), con base en las aproximaciones de las proyecciones de las variables climáticas de los últimos modelos CMIP5 (Proyecto de intercomparación de modelos acoplados fase 5) del IPCC.



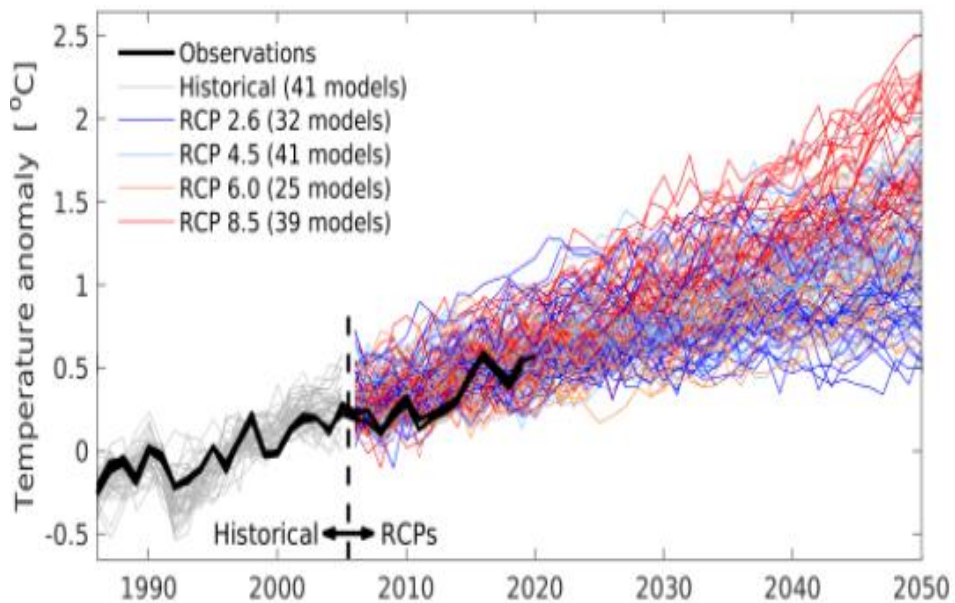
**Figura 1.14.** Emisiones de combustibles fósiles en los escenarios RCP.

Fuente: IPCC (2013).

**Tabla 1.3.** Tendencia de forzamiento radiativo bajo diferentes RCP

RCP	FR	Tendencia del FR	(CO <sub>2</sub> ) en 2100
RCP2.6	2.6W/m <sup>2</sup>	Decreciente en 2100	421ppm
RCP4.5	4.5W/m <sup>2</sup>	Estable en 2100	538ppm
RCP6.0	6.0W/m <sup>2</sup>	creciente	670ppm
RCP8.5	8.5W/m <sup>2</sup>	creciente	936ppm

Fuente: IPCC (2013).



**Figura 1.15.** Observaciones y las proyecciones del modelo CMIP5.

Fuente: (Climate Lab Book, 2021)

## 1.7. DATOS PISCO

El producto PISCO (*Peruvian Interpolated Data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations*) de precipitación v2.0 (PISCOp), en su versión mensual es el resultado de la combinación de estaciones terrenas, reanálisis y productos de satelitales para la estimación de lluvias con el objetivo de obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (~5x5 km); los datos grillados abarcan una serie espacio temporal y continua que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre 2016 (Aybar *et al.*, 2017, p. 5).

El producto PISCO esta elaborada a partir de estaciones meteorológicas y productos de satélites la cual tiene fines: PISCOp está orientado al modelamiento hidrológico, observación de sequías y balance hídrico. PISCOp sobreestima la cantidad de días con lluvia, esta es una consecuencia directa del uso de técnicas de interpolación sin consideraciones de intermitencia espacial, elevación del área de estudio entre otros; los usuarios pueden determinar un umbral de precipitación regional comparando los datos PISCOp con observaciones de pluviómetro en su ámbito de estudio (Aybar *et al.*, 2017, p. 20).

**Tabla 1.4.** Versiones PISCO de precipitación

Versión	Covariable	Escala temporal	Método de interpolación	Imputación	Observación	Tiempo
1.0	CHIRPS	Mensual	KED	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2014
1.1	CHIRPS	Mensual y diario	KED, IDW y RIDW	NO	Fuertes quiebres artificiales	1981-2015
1.2	CHIRP	Mensual y diario	RIDW	SI	Quiebres leves artificiales	1981-2016
2.0	CHIRP TRMM2A25	Mensual y diario	KED y RIDW	SI	Quiebres leves artificiales	1981-2016

**Dónde:**

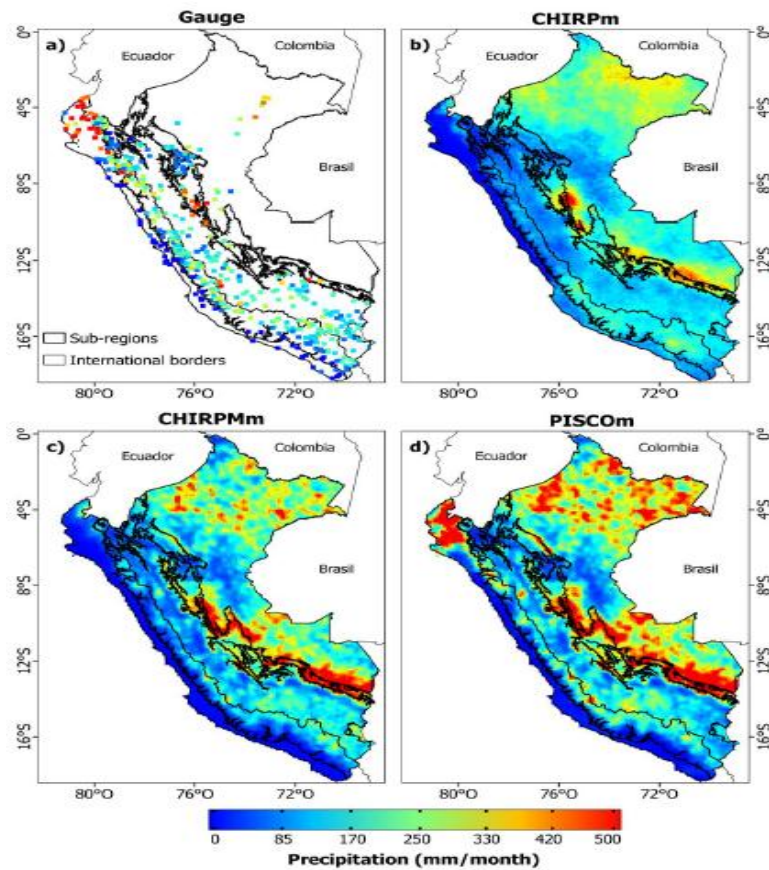
KED: Kriging con deriva externa,

IDW: Ponderación de distancia inversa,

RIDW: Ponderación de distancia inversa residual

Fuente. Aybar *et al.*, (2017) p.12





**Figura 1.16.** Precipitaciones PISCO para enero de 1998.

Fuente: Aybar *et al.*, (2019) p.40

Aybar *et al.* (2019) deducen que es posible utilizar los datos cuadrículados como el producto PISCO; como por ejemplo para el análisis de tendencias, eventos extremos u otras aplicaciones. Para la evaluación independiente y del balance hídrico confirman que PISCOp V2.1 es el más producto adecuado para representar estimaciones de precipitación del área, excepto para las áreas dominadas por el Amazonas. Por otro lado, recomiendan a los usuarios tener cuidado al utilizar PISCOp V.2.1 para el análisis de eventos máximos u otros fines (p. 25).

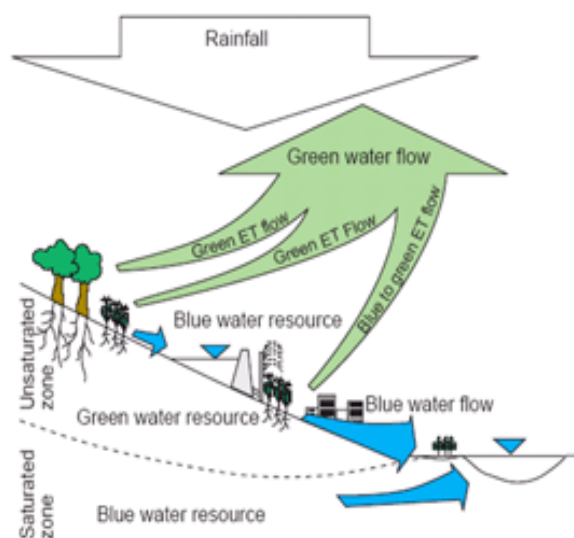
## 1.8. RECURSOS HÍDRICOS AZULES Y VERDES

La urgente necesidad de centrarse en las inversiones en agua en la agricultura de secano lleva a la conclusión de que las percepciones convencionales de los recursos hídricos son incompletas la cual requiere un enfoque óptimo en el análisis de la disponibilidad hídrica. Este reconocimiento requiere una ampliación de la política hídrica agrícola actual que durante décadas se ha inclinado hacia el agua para riego (Falkenmark & Rockstrom, 2006, p.129).



El tratamiento convencional de la planificación y gestión de los recursos hídricos se centra en el agua líquida, o agua azul. Sin embargo, el agua azul que ha dominado las percepciones del agua en el pasado solo representa un tercio del recurso real de agua dulce. La mayoría de la lluvia que desciende regresa a la atmósfera como un flujo de vapor atmosférico, dominado por el consumo de agua por parte de la vegetación a través de la interceptación. Por lo tanto, al analizar la producción de alimentos, debemos añadir una segunda forma de recurso hídrico, la lluvia que se infiltra naturalmente en el suelo y que está en camino de regreso a la atmósfera. (Falkenmark & Rockstrom, 2006, p. 129)

Falkenmark & Rockstrom (2006) conceptualiza bajo un enfoque verde-azul, para la planificación y gestión de los recursos hídricos de la siguiente manera: La lluvia, un recurso de agua dulce, se divide en un recurso de agua verde como humedad en la zona no saturada y en un recurso de agua azul en acuíferos, lagos, humedales y embalses, por ejemplo, represas. Estos recursos generan flujos, como el flujo de agua verde de los cultivos, bosque, praderas y sabanas de los sistemas de producción de biomasa terrestre y el flujo de agua azul en los ríos, a través de los humedales y a través del flujo base del agua subterránea. (p. 129)



**Figura 1.17.** Conceptualización de un enfoque verde-azul

Fuente: Falkenmark & Rockstrom (2006) p.129

### 1.8.1. Agua azul

El agua azul es la suma del agua superficial (por ejemplo, ríos, lagos, humedales) y el agua subterránea en forma líquida. Tradicionalmente, debido a que el agua azul está

directamente relacionada con las necesidades humanas (riego, transporte marítimo, generación de energía, producción industrial, etc.), la mayor parte de la investigación sobre los recursos hídricos se han centrado en el agua azul, mientras que se han realizado relativamente poca investigación sobre el agua verde (Zhang *et al.*, 2020, p.2).

Para Zhang *et al.* (2020) el “agua azul contiene tres componentes: la escorrentía superficial (SURQ), el flujo de agua subterránea (GWQ) y el flujo lateral (LATQ)” (p.2).

Yuan *et al.* (2019) proponen que el agua azul es la escorrentía de aguas superficiales y subterráneas generada directamente por las precipitaciones. También se entiende al agua azul como la suma de la descarga del río y la recarga del acuífero profundo, este último se entiende como la escorrentía de agua superficial y subterránea formada por la precipitación (Zhao *et al.*, 2016).

### **1.8.2. Agua verde**

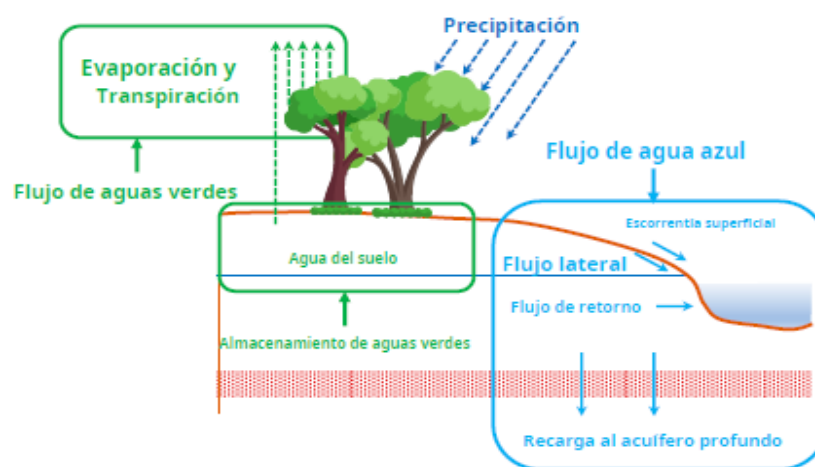
El agua verde es el agua de la precipitación que ingresa al suelo (suelo no saturado) y que puede ser absorbida y utilizada por las plantas. El agua verde incluye el flujo de agua verde (GWF) y el almacenamiento de agua verde (GWS), GWF es la evapotranspiración real y GWS es el contenido de agua del suelo que se refiere al agua almacenada en el suelo (Zhang *et al.*, 2020, p.2).

Jiang *et al.* (2021) mencionan que el agua verde se refiere al agua de las precipitaciones que se almacena en suelos no saturados (medio porosos están contenidos de aire), está favorece el crecimiento de las plantas. El agua verde se puede clasificar en dos componentes: agua verde en flujo que se refiere a la evapotranspiración real, y almacenamiento de agua verde que se refiere al agua almacenada en el suelo (p.1).

Los recursos hídricos verdes a gran medida forman parte de los recursos hídricos mundiales. Los estudios han demostrado que, en las zonas húmedas, el agua verde representa más del 30% de los recursos hídricos totales y en las zonas áridas, esta proporción puede llegar a más del 80%. Más relevante aún, el agua verde es la base para el crecimiento de las plantas y representa un papel enorme tanto en los ecosistemas terrestres como en la agricultura de secano (Zhang *et al.*, 2020, p.2).

Jiang *et al.* (2021) mencionan que el agua verde desempeña un papel fundamental en la preservación de las funciones de producción y servicio de los ecosistemas terrestres. Los recursos hídricos verdes representan la gran mayoría de la utilización de los recursos hídricos; más del 80% del agua utilizada por la producción mundial de alimentos y los pastizales forestales son agua verde (p. 2).

La planificación de los recursos hídricos azules y verdes presenta un enfoque frente a la variación del clima: El cambio climático tiene un gran impacto en los recursos hídricos verdes en las cuencas hidrográficas, y se refleja principalmente en cambios en las precipitaciones, temperatura y otros elementos meteorológicos. Por lo tanto, determinar las relaciones entre los procesos ecológicos y hidrológicos de los recursos hídricos verdes y azules, con el objetivo de mitigar las limitaciones de los recursos hídricos disponibles y evaluar los recursos hídricos de una manera científica integral, es importante para la planificación y gestión de los recursos hídricos. (Jiang *et al.*, 2021, p.2)



**Figura 1.18.** Diagrama esquemático del agua azul y verde.

**Fuente:** Yuan *et al.*, (2019) p.4

### 1.9. FLUJOS DE AGUA AZUL Y VERDE EN EL MODELO SWAT

Con el desarrollo de modelos hidrológicos distribuidos, las variaciones espacio-temporales de los recursos hídricos azules y verdes pueden estimarse mediante métodos que tienen un mecanismo físico y eficaz. Se ha demostrado que el modelo SWAT puede simular los recursos hídricos azules y verdes y detectar los impactos de la variabilidad climática en los componentes del ciclo hidrológicos (Yuan *et al.*, 2019, p. 2).

El modelo hidrológico evalúa los cambios de distribución espacial de los flujos de agua azul y verde en una cuenca; por lo tanto, ha sido ampliamente utilizado por académicos de todo el mundo, para la comprensión cuantitativa de la disponibilidad hídrica a corto y largo plazo (Jiang *et al.*, 2021, p. 2).

Yuan *et al.* (2019), mencionan que el modelo SWAT se utiliza para cuantificar los flujos de agua, incluido el flujo de agua azul (BWF) y el flujo de agua verde (GWF), donde BWF es la descarga del río y la recarga del acuífero profundo, mientras que GWF está representado por la evapotranspiración real (p. 3). Además, el coeficiente del agua verde (GWC) se utiliza para dar cuenta de la importancia relativa de BWF y GWF que puede escribirse como  $GWC = GWF / (BWF + GWF)$  (Yuan *et al.*, 2019, p. 4).

El modelo hidrológico SWAT calcula la evapotranspiración, infiltración, curva número y otros parámetros para cada HRU y luego suma estos parámetros correspondientes de cada HRU para obtener la evapotranspiración, escorrentía superficial, y otras variables hidrológicas para cada subcuenca, basado en el balance hídrico.

De manera para Zhang *et al.* (2020), basado en los resultados, enlaza las variables hidrológicas con la relación del agua azul y verde, y sus componentes respectivos de la siguiente manera:

$$BWF = SURQ + LATQ + GWQ$$

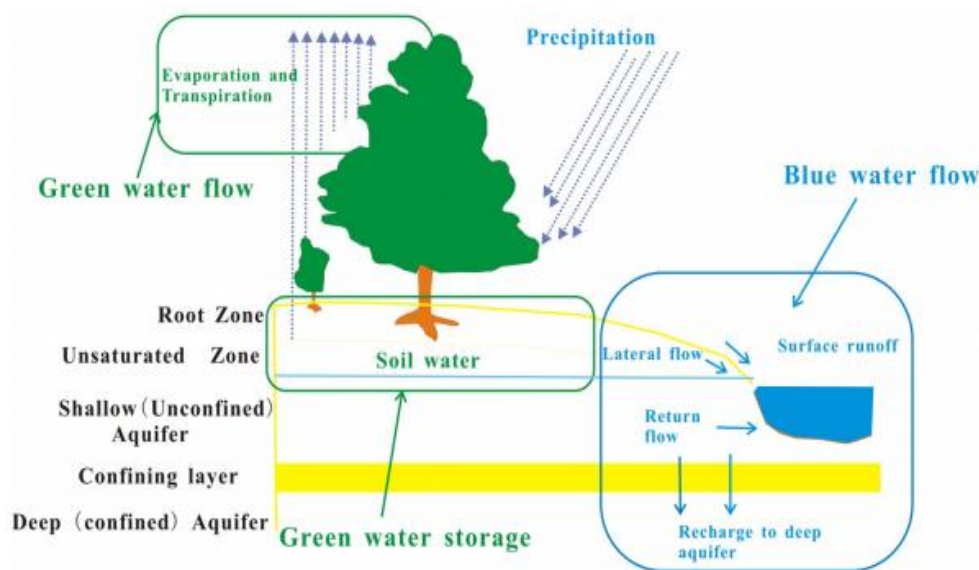
$$GWF = CGW + NGM$$

Dónde : BWF es el flujo de agua azul (mm), el volumen total de agua que ingresa al río desde la HRU a la subcuenca durante el intervalo de tiempo; SURQ, LATQ y GWQ son la escorrentía superficial, flujo lateral y flujo de agua subterránea respectivamente que fluyen hacia el canal en el intervalo de tiempo (mm); GWF es el flujo de agua verde, la cantidad real de evapotranspiración en el intervalo de tiempo (mm); CGW es el agua verde consumida, la cantidad de evapotranspiración de tierras de cultivo, pastizales y bosques (mm); NGW es el agua verde no utilizada, la cantidad de evapotranspiración de ciudades y cuerpos de agua (mm) y GWS es el almacenamiento de agua verde e indica el contenido de agua del suelo (SW), es decir, la cantidad de agua almacenada en el perfil del suelo durante el intervalo de tiempo (mm) (Zhang *et al.*, 2020, p. 5).

Mientras Fazeli *et al.* (2019) plantea la ecuación general del balance hídrico en el modelo SWAT, de la siguiente manera:

$$Lluvia = Evapotranspiración + Producción de Agua + \Delta(\text{Almacenamiento de suelo}) + \Delta(\text{Almacenamiento de Agua subterránea}) + pérdidas$$

Dónde cada uno de los componentes pueden estar involucrados en el flujo o almacenamiento de agua azul y verde. El agua azul es la suma del rendimiento de agua (SWAT salida WYLD) y la recarga del acuífero profundo (SWAT salida DA\_RCHG) durante el intervalo de tiempo. El flujo de agua verde está representada por la evapotranspiración real (ET de salida SWAT), y el almacenamiento de agua verde es la cantidad de agua en el perfil del suelo al final de un período de tiempo (SW de salida SWAT ) (Fazeli *et al.*, 2019 p.175).



**Figura 1.19.** Balance hidrológico en SWAT con enfoque “Green Water y Blue Water”

Fuente: Zhao *et al.*, (2016) p.319

## 1.10. CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

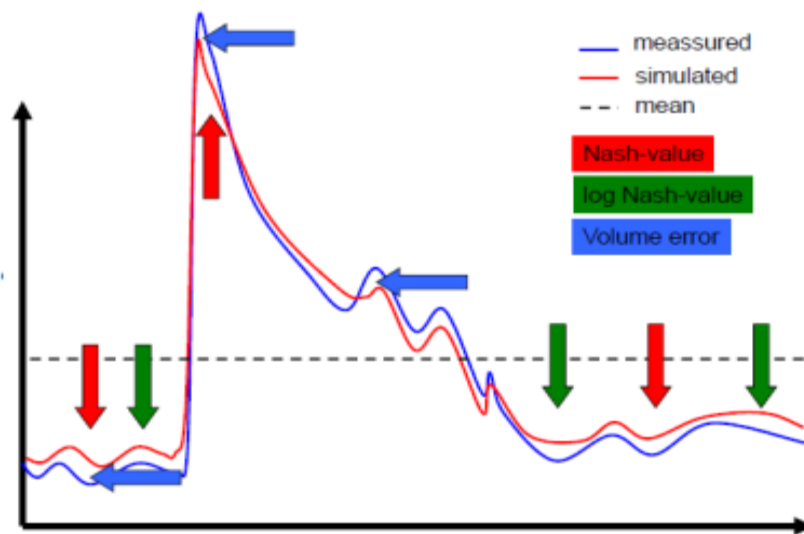
Durante la fase de calibración se evalúa la semejanza entre las variables simuladas y las observadas a partir de índices estadísticos de ajuste. En el caso se observen desviaciones significativas entre lo observado y simulado se ha de proceder a la modificación de los parámetros más significativos del modelo, generalmente mediante el análisis de sensibilidad realizado por la herramienta SWAT-CUP (Abbaspour, 2007, p. 20).

Es necesario tener presente que la calidad de los resultados obtenidos en la modelación hidrológica, mediante la calibración, sean eficientes; la cual se precisan los siguientes pasos (Vargas *et al.*, 2018, p. 17):

- a. **Análisis de sensibilidad.** Previo a la calibración del modelo, se hace un análisis de sensibilidad que consiste en identificar los parámetros más sensibles ante posibles cambios en sus valores; con esto se logra ser eficiente en la calibración y obtener el proceso hidrológico relevante. En esta etapa se busca encontrar los parámetros que tienen mayor peso o relevancia en la calibración del modelo (Vargas *et al.*, 2018, p.17).
- b. **Selección de los criterios de desempeño.** Son relaciones estadísticas que muestran la capacidad del modelo para representar adecuadamente la realidad; se emplean en un contexto de calibración y evaluación de incertidumbre mediante métodos de bondad de ajuste (Vargas *et al.*, 2018, p.17).
- c. **Calibración.** En esta etapa se evalúa la capacidad del modelo para representar los fenómenos de interés; para esto, se emplean series históricas observadas y la información previamente simulada. En esta tarea se recurre a los criterios anteriormente mencionados con el objeto de evaluar el desempeño del modelo comparando valores observados y simulados (Vargas *et al.*, 2018, p.17).
- d. **Validación.** El termino validación no necesariamente deduce la fiabilidad de la verdad. La validación permite corroborar el desempeño del modelo en un contexto espacio - temporal diferente a la calibración; está puede ser espacial (en un punto diferente de donde se calibró), temporal (empleando series con un periodo de tiempo diferente al calibrado) y espacio - temporal (en un punto y periodo diferente a los empleados en la calibración); es decir, se corre el modelo ya calibrado (Vargas *et al.*, 2018, p.17).

Según Cabrera (2017a) el uso de modelos hidrológicos tiene por finalidad simular los fenómenos que ocurren en la realidad. Sin embargo, a pesar del avance de la ciencia y tecnología, no existe un modelo hidrológico que simule a la perfección los complejos procesos hidrológicos de la cuenca debido a la presencia de errores de origen diferente (p.1).

En la Figura 1.20 se “muestra la combinación de una función objetivo que permitirá controlar mejor el proceso de calibración” (Cabrera, (2017a), p.4).



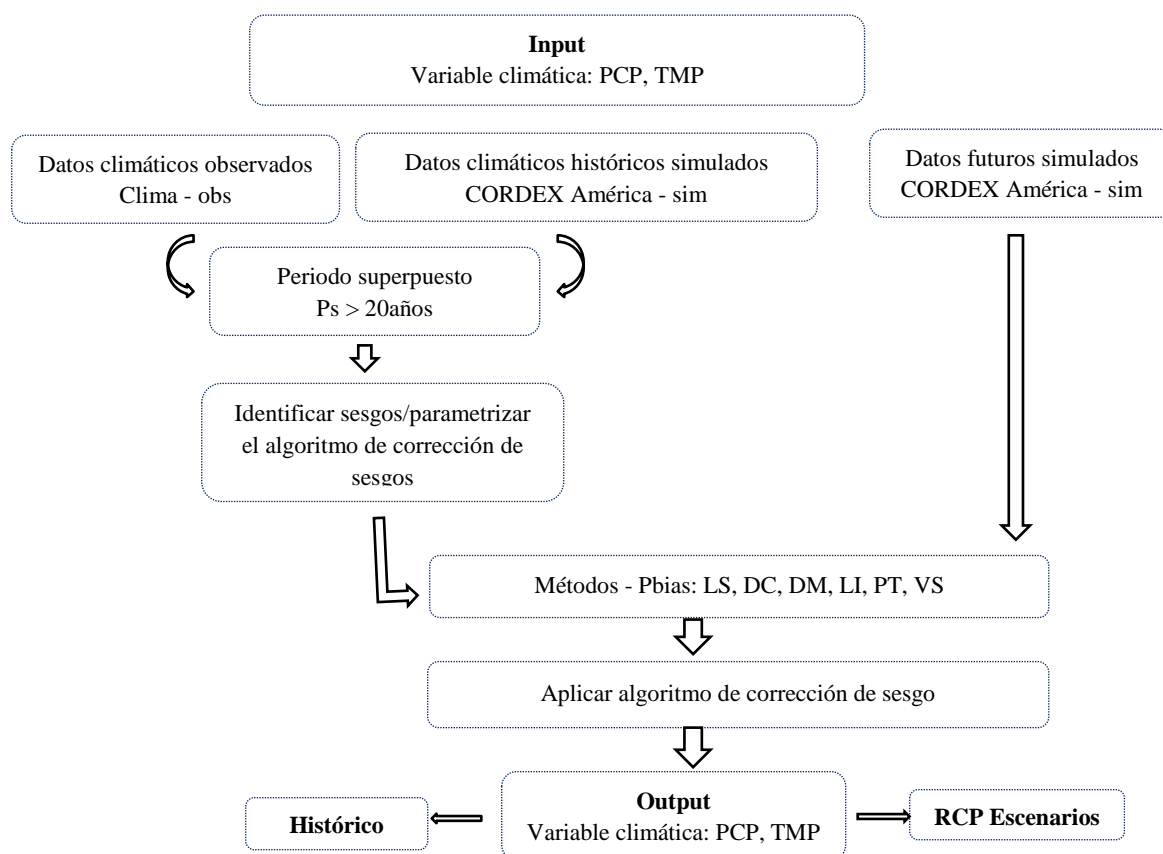
**Figura 1.20.** Efectos de las medidas de ajuste sobre la calibración de un modelo

Fuente: Cabrera (2017a) p.4

### 1.11. HERRAMIENTA CMhyd

Para simular el impacto de las condiciones futuras climáticas en los procesos hidrológicos en la modelación de cuencas hidrográficas y cuencas fluviales, a menudo presentan sesgos en las variables de temperatura y precipitación, debido a sesgos sistemáticos del modelo y promediado espacial dentro de las células de la rejilla (resolución espacial de las proyecciones climáticas), lo que dificulta el uso de los datos climáticos simulados, como datos de entrada directa para modelos hidrológicos (Rathjens *et al.*, 2016, p. 1).

Rathjens *et al.* (2016) mencionan que CMhyd (*Climate Model data for hydrologic modelling*) es una herramienta que se puede utilizar para extraer los datos obtenidos a partir de modelos climáticos globales y regionales, para corrección de sesgo y minimizar la discrepancia entre las variables climáticas observadas y simuladas en un paso de tiempo diario (p. 1).



**Figura 1.21.** Marco de corrección de sesgo

Fuente: Adaptado de Rathjens *et al.*, (2016) p. 3

### 1.11.1. Métodos de corrección de sesgo

El CMhyd es una herramienta para preparar las variables climáticas simuladas para los estudios de impacto sobre el cambio climático con el modelo SWAT. La herramienta ofrece varios métodos de corrección de sesgo como; la conversión lineal (LS) de la precipitación y de la temperatura, escala de intensidad local (LI) de precipitación, transformación de energía (PT) de precipitación, varianza scaling (VS) de la temperatura y distribución mapping (DM) para la precipitación y temperatura (Zhang *et al.*, 2018, p. 5).

#### a. Conversión lineal (LS) de la precipitación y de la temperatura

Fang *et al.* (2015) mencionan que el método LS tiene como objetivo hacer coincidir perfectamente la media mensual de los valores corregidos con la de los observados, es decir opera con valores de corrección mensual basados entre los datos observados y sin procesar (datos sin procesar RCM simulados en este caso); donde la precipitación generalmente se corrige con un multiplicador y la temperatura con un término aditivo mensualmente (p. 2550).



Zang *et al.* (2018) afirman que para la serie de precipitación, se definió una razón como el cociente de la media a largo plazo de la precipitación mensual observada al de simulaciones RCM. Luego la razón se uso para multiplicarla la precipitación diaria simulada del mes correspondiente (p.5).

$$P_{con,cor(d)} = P_{con(d)} \times \left( \frac{\overline{P_{obs(m)}}}{\overline{P_{con(m)}}} \right)$$

$$P_{sec,cor(d)} = P_{sec(d)} \times \left( \frac{\overline{P_{obs(m)}}}{\overline{P_{con(m)}}} \right)$$

Dónde,  $P_{con,cor(d)}$  es la precipitación diaria corregida en el mes correspondiente durante el periodo de control,  $P_{sec,cor(d)}$  es el mismo durante el periodo futuro;  $P_{con(d)}$  es la precipitación diaria sin corregir en el mes correspondiente durante el periodo de control,  $P_{sec(d)}$  es el mismo durante el periodo futuro,  $\overline{P_{obs(m)}}$  es la precipitación promedio mensual observada en el mes correspondiente durante el periodo de control,  $\overline{P_{con(m)}}$  es la precipitación promedio mensual simulada en el mes correspondiente durante un periodo futuro.

#### **b. Escala de intensidad local (LI) de precipitación**

Se ha informado ampliamente que las simulaciones RCM tienden a sobreestimar el número de días húmedos de frecuencia de la serie de tiempo de precipitación RCM simulado, donde sería mayor que el de la precipitación observada. El método LI utiliza un umbral de días para ajustar aún más las frecuencias húmedas de días (Zhang *et al.*, 2018, p.6).

Zang *et al.* (2018) conceptualiza este método con tres pasos, en primer lugar, se determina el umbral para que los números de días sea menor que un valor umbral elegido en las simulaciones del modelo RCM. En segundo lugar, un factor de escala se calcula con una relación en días húmedos entre las series de tiempo de precipitación observadas y las simuladas del RCM. Por último, la precipitación diaria corregida se calcula utilizando un factor de escala multiplicando por precipitación diaria y obteniendo así la precipitación corregida (p. 7).

### c. Transformación de energía (PT) de precipitación

Los métodos de corrección LS y LI no puedan ajustar los sesgos en la varianza de los datos históricos y simuladas RCM, la cual se busca un método que considere la varianza en la corrección sesgo a partir de un método exponencial.

Zang *et al.* (2018) mencionan un método no lineal, denominado como la transformación de energía (PT) que utiliza una forma exponencial  $P^* = aP^{b_m}$  que permite ajustar la desviación estándar de las simulaciones RCM. Generalmente, se calcula un factor de escala  $b_m$  para asegurar que el coeficiente de varianza de RCM fuera el mismo que el de las observaciones mensuales (p. 7).

$$f(b_m) = 0 = CV_m(P_{obs}(d)) - CV_m(P_{con}^{b_m}(d))$$

El coeficiente de varianza se calcula a partir de la siguiente ecuación, donde muestra una relación que permita acoplar la media y la desviación estándar para las simulaciones RCM:

$$\frac{\sigma_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{obs}(d))} - \frac{\sigma_m(P_{con}^{b_m}(d))}{\mu_m(P_{con}^{b_m}(d))} = CV_m$$

Finalmente, se calcula las series de datos corregidas de precipitación para el periodo de control y escenario futuro, igualando la precipitación observada con la serie intermedia usando el método LS.

$$P_{con}^*(d) = P_{con}^{*1}(d) \times \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{con}^{*1}(d))} \right], \quad P_{con}^{*1}(d) = P_{con}^{b_m}(d)$$

$$P_{sce}^*(d) = P_{sce}^{*1}(d) \times \left[ \frac{\mu_m(P_{obs}(d))}{\mu_m(P_{con}^{*1}(d))} \right], \quad P_{sce}^{*1}(d) = P_{sce}^{b_m}(d)$$

Dónde  $P_{con}^*(d)$  es la precipitación corregida para el periodo de control,  $P_{sce}^*(d)$  es la precipitación corregida para el periodo de escenario futuro,  $\mu_m$  y  $\sigma_m$  como la media y desviación estándar mensual respectivamente.

### d. Varianza scaling (VS) de la temperatura

Si bien PT es una forma eficaz de corregir tanto la media como la varianza de las series de tiempo de precipitación, sin embargo, el método no se puede utilizar para ajustar la

varianza de la serie de tiempo de temperatura, ya que la temperatura se distribuye normalmente. Por lo tanto, otro método: la escala de varianza (VS), se desarrolló para corregir el sesgo de la serie de tiempo de temperatura y se da como (Zhang *et al.*, 2018, p.7):

$$T_{cor,m,d} = [T_{con,m,d} - \mu(T_{con,m})] \times \frac{\sigma(T_{obs,m})}{\sigma(T_{con,m})} + \mu(T_{obs,m})$$

Dónde;  $T_{cor,m,d}$  es la temperatura diaria corregida,  $T_{con,m,d}$  es la temperatura diaria sin corregir en el mes correspondiente durante el período de control,  $\sigma(T_{obs,m})$  es la desviación estándar de la serie temporal de temperaturas observadas en el mes correspondiente,  $\sigma(T_{con,m})$  es la desviación estándar de serie de tiempo de temperatura RCM en el mes correspondiente.

#### e. Distribución mapping (DM) para la precipitación y temperatura

Para Fang *et al.*, (2015) el “método DM consiste en hacer coincidir la función de distribución de los datos brutos con las de observaciones. Se utiliza para ajustar la media, la desviación estándar y los cuantiles” (p.2551).

Zhang *et al.* (2018) describen al mapeo de probabilidad como un método popular de corrección de sesgos que se utiliza en numerosos estudios de cambio climático. Las cuales describen funciones de transferencia: las distribuciones gamma y gaussiana (normal) para la precipitación y temperatura respectivamente. Para la precipitación en primer lugar, se especificó la intensidad de precipitación y se utilizó para determinar la probabilidad acumulada de precipitación simulada. Entonces, en función de la probabilidad acumulada se selecciona el valor de precipitación corregido. Para la temperatura se determina la probabilidad acumulada de datos de temperatura simulados; entonces, de acuerdo con la probabilidad se puede seleccionar el valor de temperatura corregido (p.7). Una distribución gaussiana se puede representar matemáticamente como:

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad -\infty < x < \infty \quad F(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^x \exp\left[-\frac{(x-u)^2}{2\sigma^2}\right] du$$

Donde  $\mu$  es la media,  $\sigma$  es la desviación estándar y una variable reducida para la distribución gaussiana como  $z = \frac{(x-\mu)}{\sigma}$ .

## CAPÍTULO II METODOLOGÍA

### 2.1. UBICACIÓN DEL ÁREA DE INVESTIGACIÓN

#### 2.1.1. Ubicación política

Políticamente el área de estudio abarca lo siguiente y está ubicado en:

Departamento	:	Ayacucho (91%), Huancavelica (9%)
Provincias	:	4 provincias
Distritos	:	23 distritos
Cuenca andina	:	Cuenca del río Cachi

#### 2.1.2. Ubicación geográfica

Las ubicaciones geográficas del área de estudio están ubicadas en las coordenadas UTM WGS 84, zona 18 S – UTM:

Este	:	610707.704 - 538407.2886 m
Norte	:	8563103.259 - 8499892.975 m
Cota	:	2600 - 4240 m.s.n.m.

#### 2.1.3. Ubicación hidrográfica

De acuerdo a las unidades hidrográficas del Perú, el área de estudio se localiza en:

**Tabla 2.1.** Ubicación hidrográfica del ámbito de estudio

Nivel	Nombre de la unidad hidrográfica	Código	Área (Km <sup>2</sup> )
Nivel 1	Región Hidrográfica del Atlántico o del Amazonas	4	6007483.30
Nivel 2	Cuenca Alto Amazonas	49	2240156.52
Nivel 3	Cuenca Ucayali	499	348423.44
Nivel 4	Cuenca del Río Mantaro	4996	34363.18

#### 2.1.4. Ubicación administrativa

De acuerdo a la Autoridad Nacional del Agua (ANA, 2008), el área de estudio se ubica dentro de la Jurisdicción de:

- Autoridad administrativa del Agua Mantaro.
- Administración local del Agua Ayacucho.
- Autoridad del Agua de Huanta – Ayacucho.

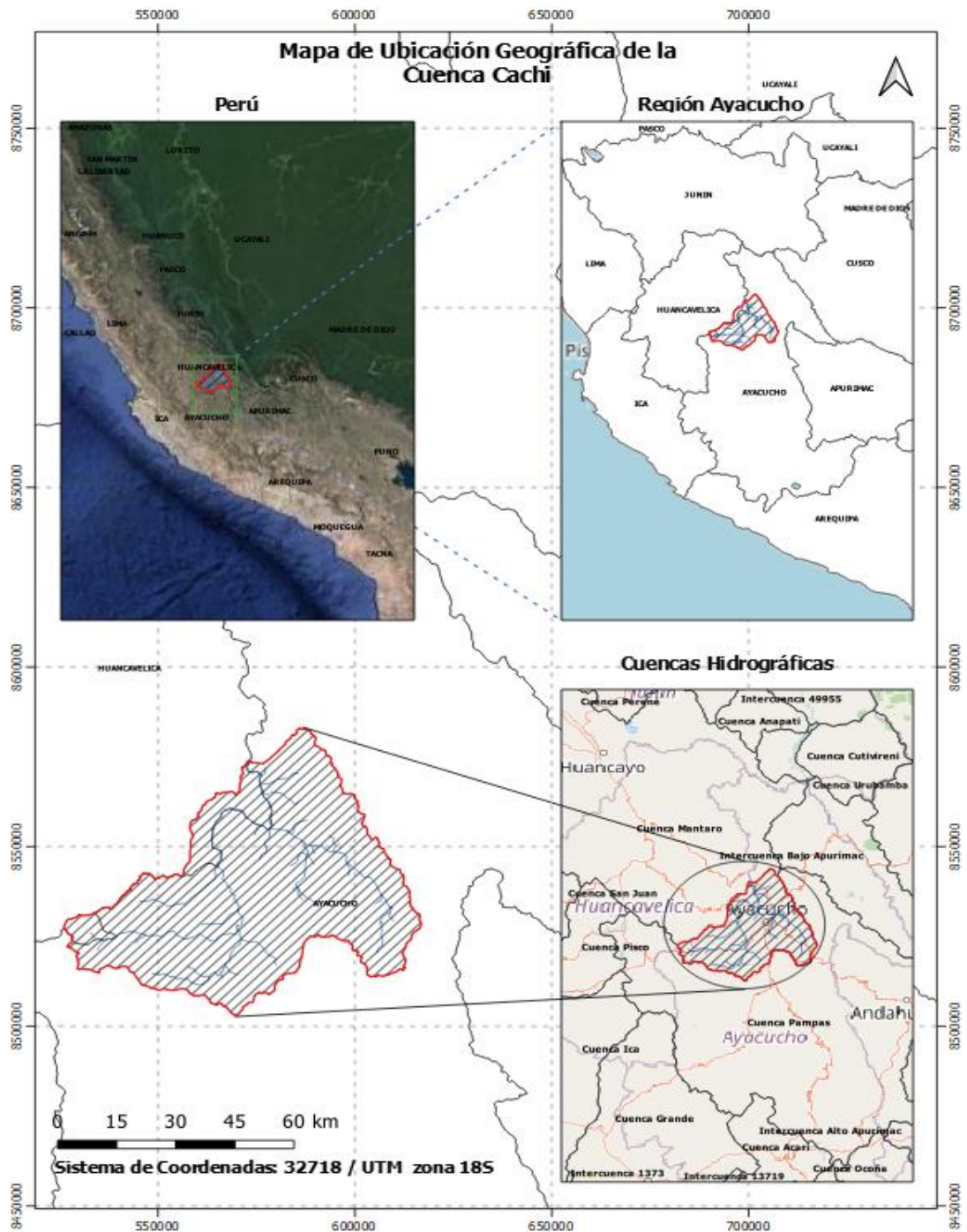


Figura 2.1. Mapa de ubicación de la zona en estudio

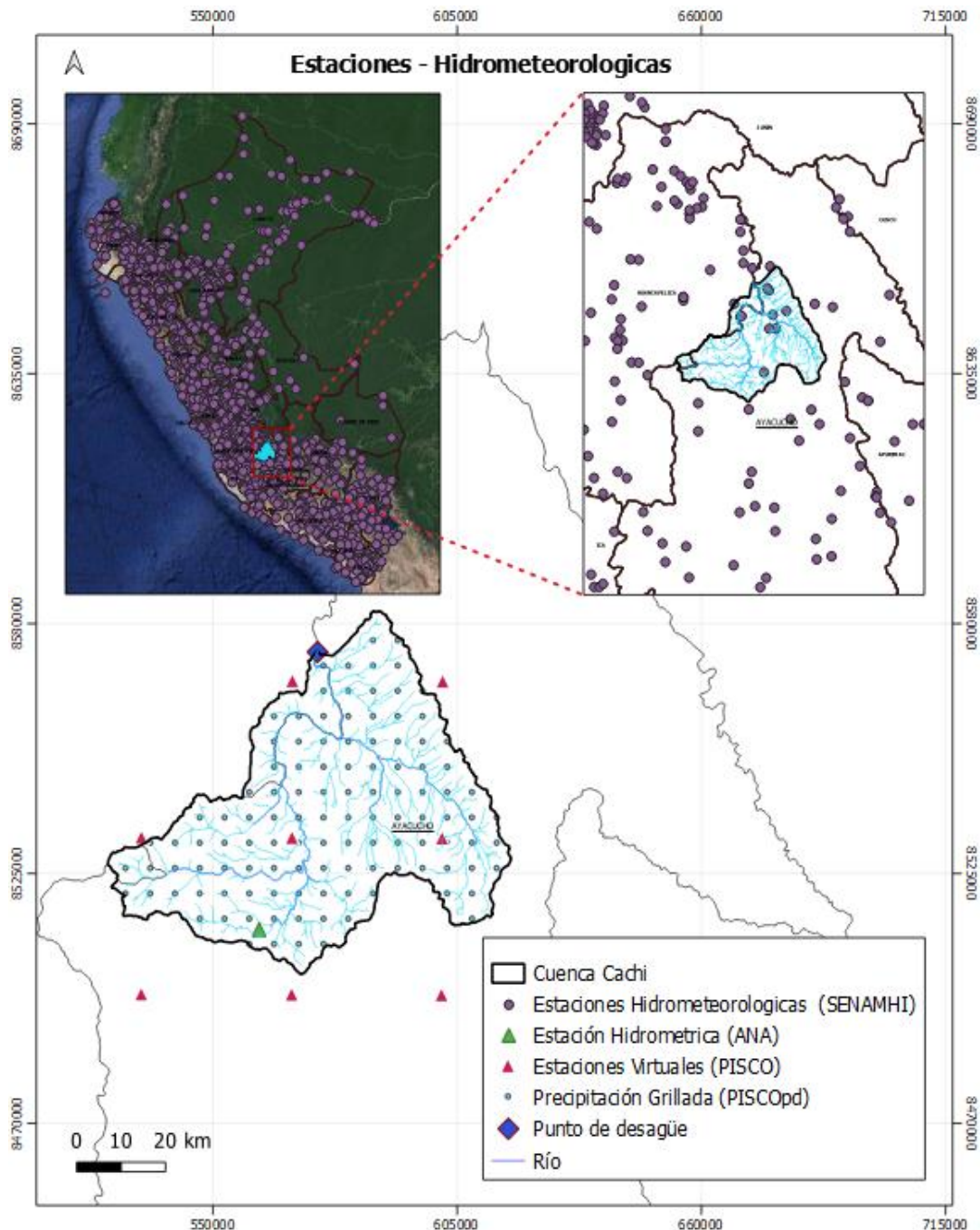
## 2.2. MATERIALES Y EQUIPOS

### 2.2.1. Información hidrometeorológica observada

En el marco de la hidrología; en particular que corresponde al estudio de aguas superficiales, se lo conoce a la **estación virtual** a toda intersección que existe entre las coordenadas, la cual sea posible deducir una serie de datos; por ente se utilizó estaciones virtuales (Tabla 2.2) para tener una distribución homogénea del comportamiento de la lluvia en la zona de estudio con base en los datos grillados, a nivel diario (precipitación, temperatura máxima y mínima) del producto PISCO versión 2.0 del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).

**Tabla 2.2.** Ubicación de las estaciones virtuales de referencia

<b>Estación virtual</b>	<b>Tipo de dato</b>	<b>Coordenadas geográficas</b>			<b>Ubicación política</b>	
		<b>Longitud</b>	<b>Latitud</b>	<b>Altitud</b>	<b>Región</b>	<b>Provincia</b>
Est_V1	Grillado (0.1°)	-74.063	-12.958	4002.000	Ayacucho	La Mar
Est_V2	Grillado (0.1°)	-74.063	-13.270	3545.000	Ayacucho	Vilcas Huamán
Est_V3	Grillado (0.1°)	-74.688	-13.270	4839.000	Huancavelica	Angaraes
Est_V4	Grillado (0.1°)	-74.063	-13.582	3947.000	Ayacucho	Vilcas Huamán
Est_V5	Grillado (0.1°)	-74.375	-13.582	3207.000	Ayacucho	Cangallo
Est_V6	Grillado (0.1°)	-74.375	-12.958	2682.000	Huancavelica	Acobamba
Est_V7	Grillado (0.1°)	-74.688	-13.582	3997.000	Ayacucho	Cangallo
Est_V8	Grillado (0.1°)	-74.375	-13.270	3485.000	Ayacucho	Huamanga



**Figura 2.2.** Mapa de ubicación de estaciones virtuales hidrometeorológicas

### 2.2.2. Información geográfica

El modelo hidrológico SWAT (*Soil and Water Assessment Tool*) requiere información básica cartográfica que represente espacialmente la distribución de las características físicas-químicas del área en estudio, como el tipo de suelo, uso de suelo, pendiente del terreno y el modelo digital de elevación (DEM) a través de distintos mapas temáticos; por lo tanto, se representó la información de la forma más detallada posible para la cuenca, como se muestra en la Tabla 2.3.

**Tabla 2.3.** Datos cartográficos de entrada para el modelo SWAT

Información	Fuente	Descripción	Formato
DEM	SRTM <a href="http://srtm.csi.cgiar.org/">http://srtm.csi.cgiar.org/</a>	Modelo digital de elevación (90x90 m)	Raster
Tipo de Suelo	SOTERLAC <a href="https://www.isric.org/explore/soter">https://www.isric.org/explore/soter</a>	Base de datos de suelos y terreno para América Latina y el Caribe (1:5 millón)	Raster
Uso de Suelo	GlobeLand30 <a href="http://www.globallandcover.com/">http://www.globallandcover.com/</a>	Cobertura vegetal (30x30 m)	Raster
Hidrografía	ANA	Red de drenaje hidrográfica	Shapefile

### 2.2.3. Información climática proyectada

Se consideraron 10 Modelos de Circulación General (MCG) de la base de datos CMIP5 (*Coupled Model Intercomparison Project – Phase 5*), dinámicamente reducidos por el Modelo Climático Regional RCA4, disponibles en el contexto del Experimento Coordinado Regional de Reducción del Clima (CORDEX) sobre América del Sur (SAM); con el fin de obtener proyecciones de precipitación y temperatura para el periodo futuro, correspondiente al escenario climático de emisión de la Ruta Representativa de Concentración (RCP) con valor preindustrial (+8.5 W/m<sup>2</sup>) como se muestra en la Tabla 2.4.

**Tabla 2.4.** Modelos climáticos disponibles para la región estudiada

Modelos - GCM	Centro -Modelos RCM	Resolución - RCM	Dato histórico	RCP8.5
CanESM2	WRF341I_v2	0.44° × 0.44°	✓	✓
IPSL-CM5A-MR	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
CSIRO-MK3.6.0	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
EC-EARTH	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
GFDL-ESM2M	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
MIROC5	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
NorESM1-M	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
HadGEM2-ES	RCA4_v3	0.44° × 0.44°	✓	✓
CanESM2	ETA V1	0.20° × 0.20°	✓	✓
MIROC5	ETA V1	0.20° × 0.20°	✓	✓

*Donde:* GCM = Modelo Global, RCM = Modelo Regional

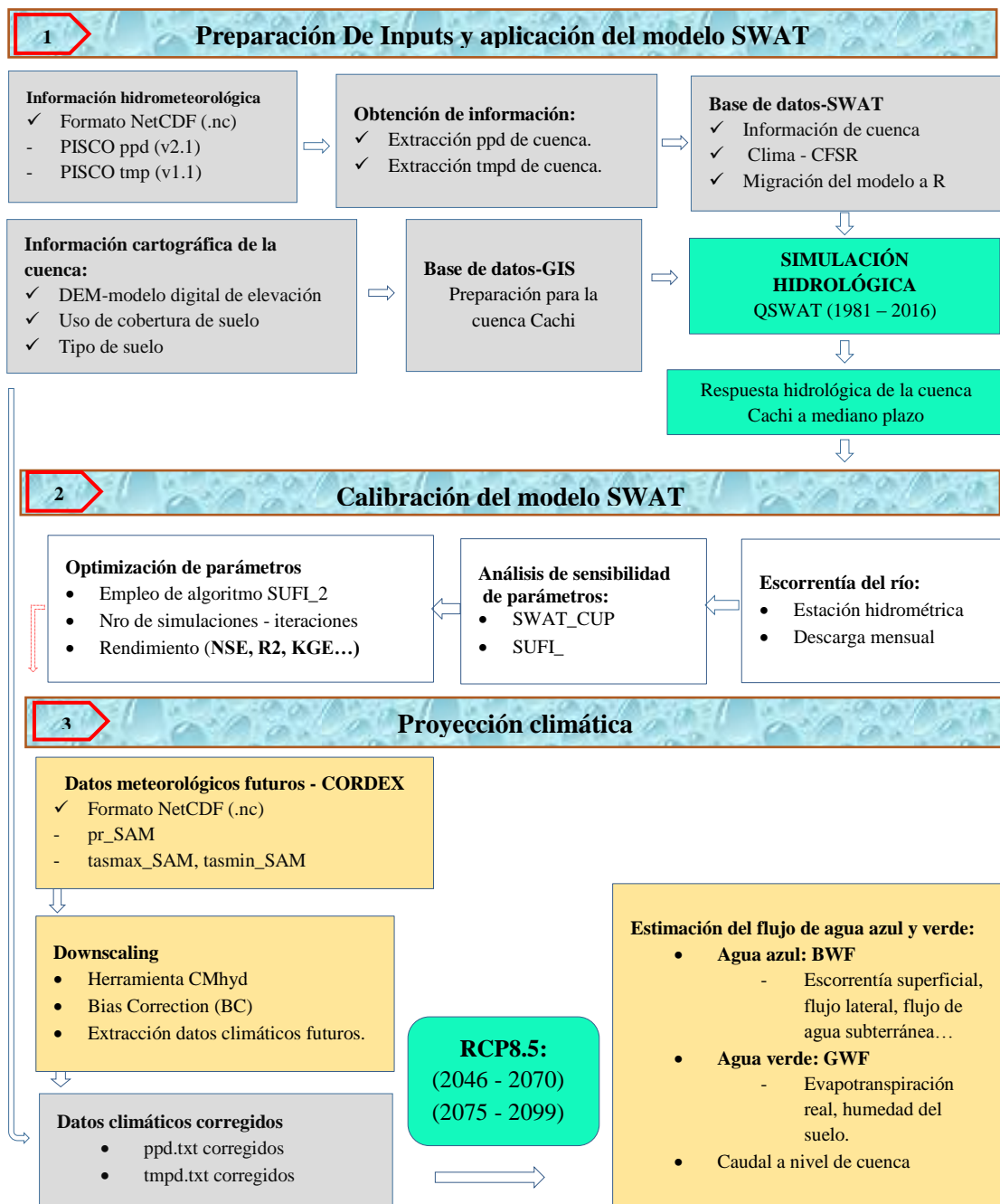


#### **2.2.4. Materiales y herramientas informáticas**

- ***Equipo de cómputo:***
  - ✓ 01 laptop core I7
  - ✓ 01 disco duro externo
  - ✓ 01 impresora multifuncional
  
- ***Programas de cómputo:***
  - ✓ QGIS 3.10.9
  - ✓ SWAT, QSWAT
  - ✓ Python 3.9 (IDE Spyder)
  - ✓ R 4.0.2 (IDE Rstudio)
  - ✓ SWATCup2019
  - ✓ CMhyd
  - ✓ Google Earth Pro
  - ✓ ArcGis10.3

### **2.3. METODOLOGÍA**

El diagrama de flujo que se muestra en la Figura 2.3 representa la metodología seguida en la presente investigación.

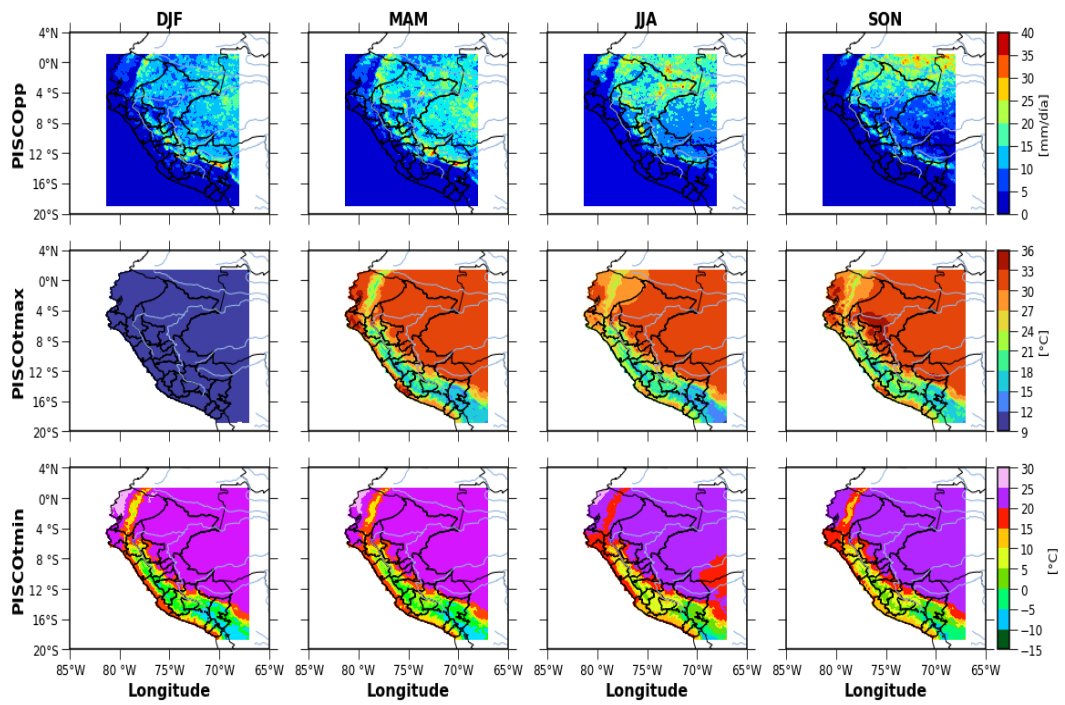


**Figura 2.3.** Esquema de la ruta metodológica de la investigación

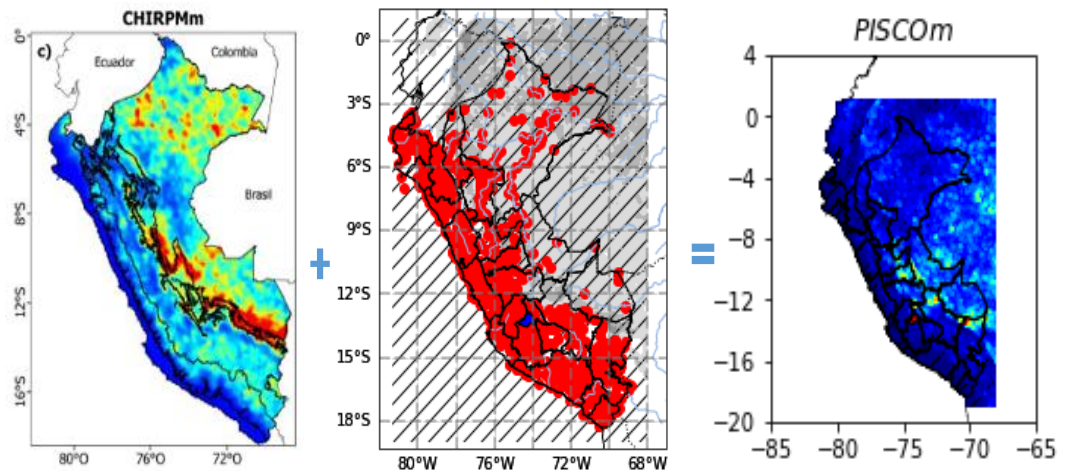
### 2.3.1. Recopilación y procesamiento de información climática

#### a) Datos grillados

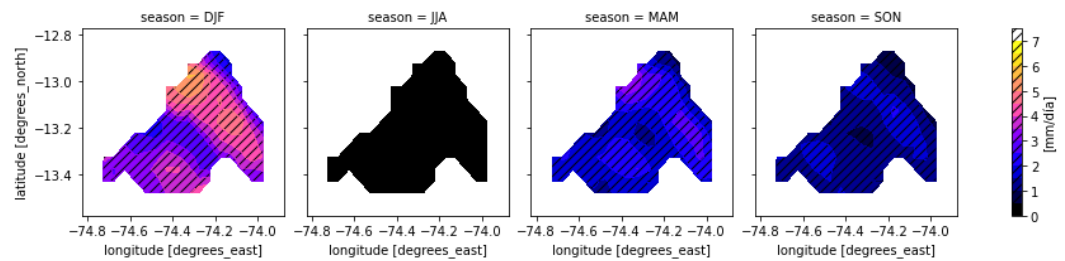
Se utilizó datos diarios de precipitación (PISCO V2.1), temperatura (PISCO V1.1) máxima y mínima provenientes de PISCO, está presentan una resolución espacial (0.1°: ~10 km) y temporal (diaria), almacenados en formato NetCDF. Esta información grillada es lo más aproximado a la realidad, debido a que incorpora datos observados de estaciones meteorológicas y de satélites meteorológicos.



**Figura 2.4.** Proyecciones de datos grillados PISCO (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera)

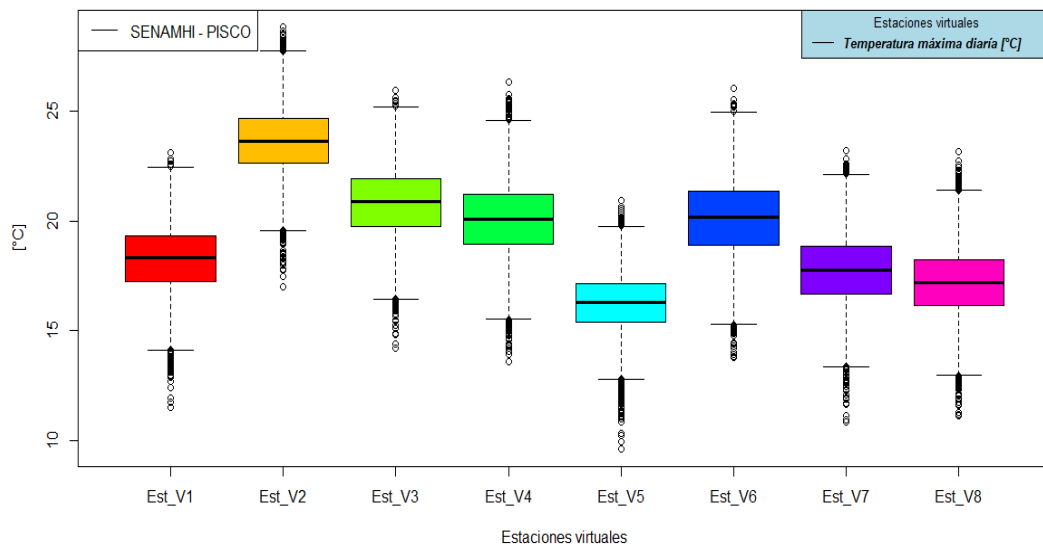


**Figura 2.5.** Proyecciones de datos grillados PISCOpp, cuenca Cachi, (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera)

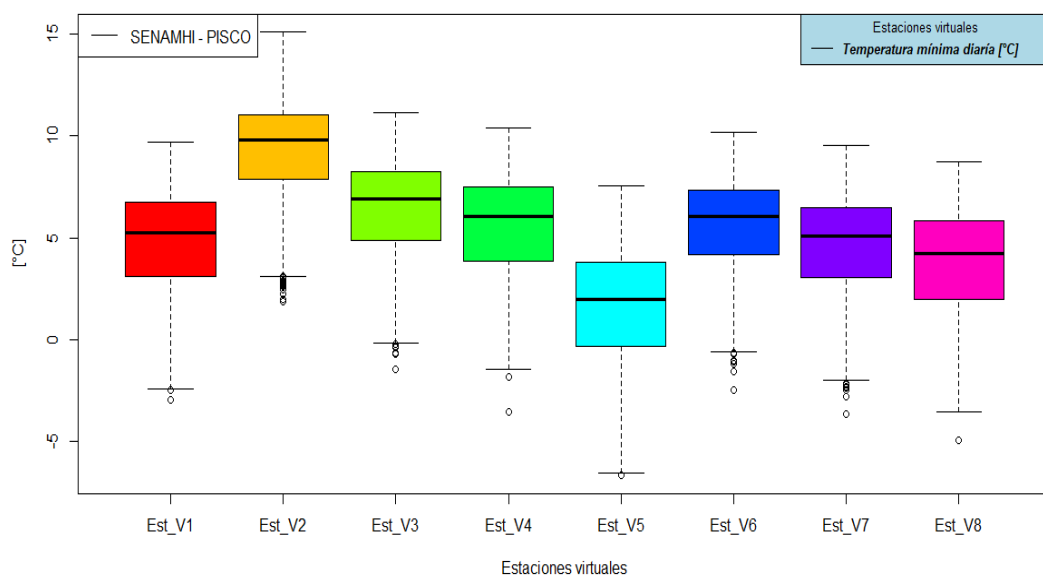


**Figura 2.6.** Accesibilidad de la data PISCO-SENAMHI (Color rojo: Área de desempeño)

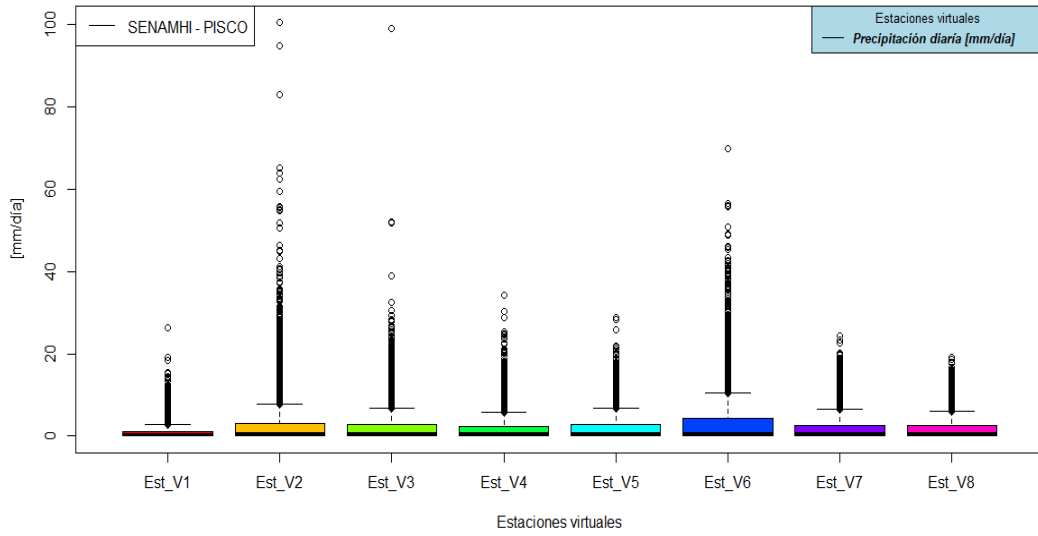
Los datos meteorológicos grillados que el modelo requiere como variables forzantes, se presentan a escala diaria (temperaturas máximas y mínimas, precipitación), estos obtenidos de los datos PISCO (Figura 2.6) a nivel de registro diario y continuo (1981-2016) y se distribuyen espacialmente dentro y fuera del área de estudio (8 estaciones virtuales del SENAMHI - PISCO), estas son las que se muestran en las siguientes Figuras 2.7 y 2.8, donde la temperatura máxima promedio oscila entre 19C° y 20C° , mientras la temperatura mínima varía entre 5C° y 7C° a nivel de la cuenca:



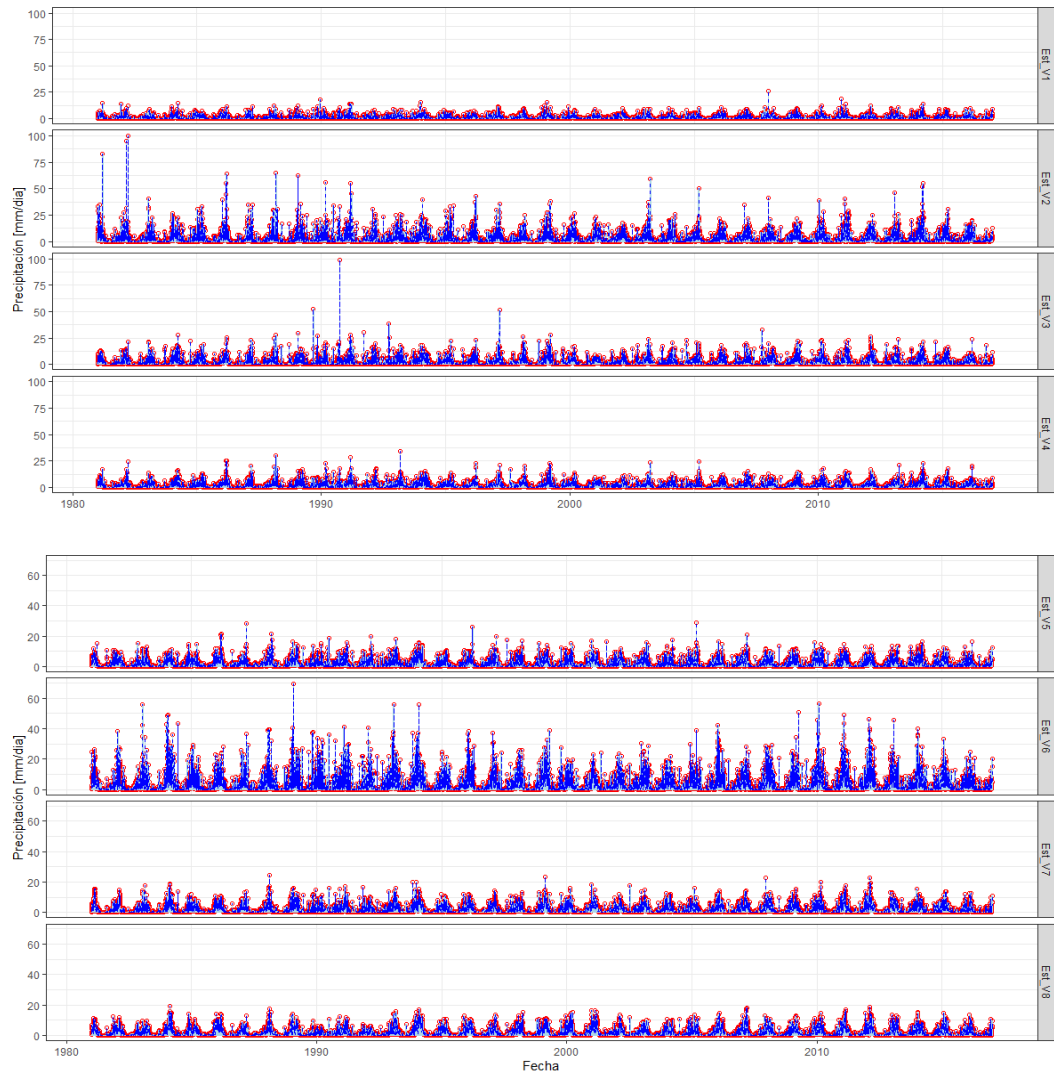
**Figura 2.7.** Variabilidad histórica en boxplot de las temperaturas máximas diarias



**Figura 2.8.** Variabilidad histórica en boxplot de las temperaturas mínimas diarias

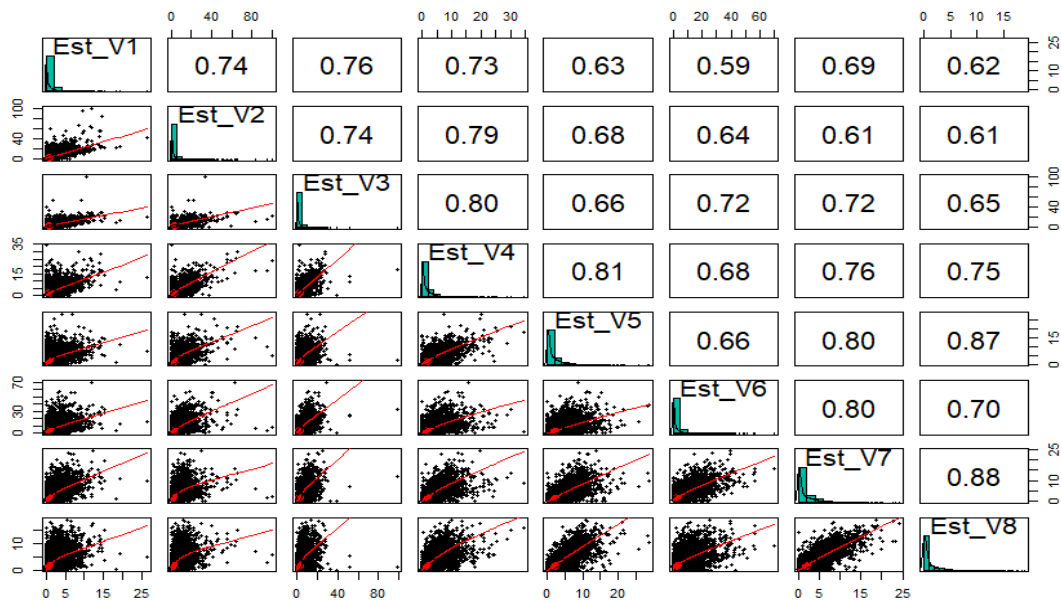


**Figura 2.9.** Variabilidad histórica en boxplot de las precipitaciones diarias



**Figura 2.10.** Series de tiempo del registro de precipitaciones de las estaciones virtuales

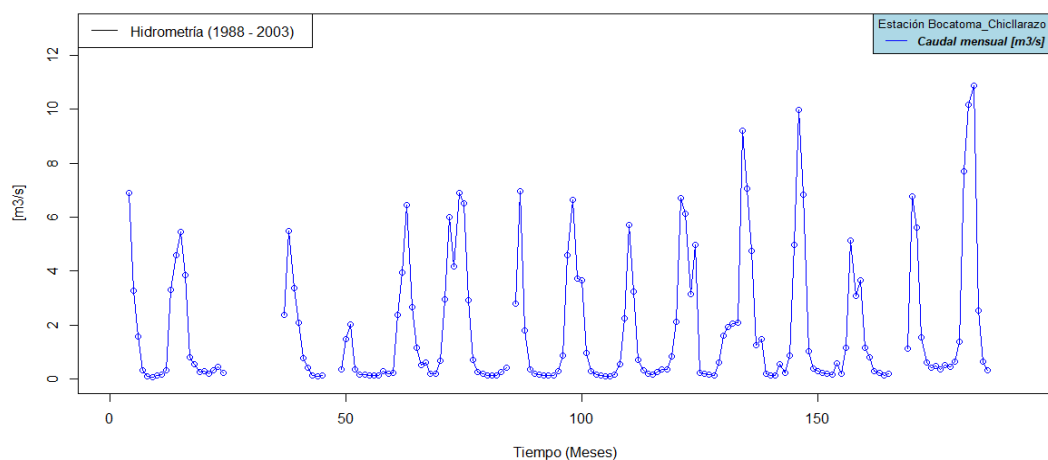
Para comprender la climatología de la lluvia, sobre el área de estudio; se realizó el gráfico a partir de la estadística del coeficiente de correlación de Pearson de los datos climáticos, para las estaciones virtuales, donde se presenta una correlación positiva, tal como se muestra en la Figura 2.11:



**Figura 2.11.** Correlación de las estaciones virtuales sobre el área de estudio

## b) Hidrometría

Los datos hidrométricos fueron obtenidos de la estación Chicllarazo, está administrada por el OPEMAN. El registro de los caudales mensuales (m<sup>3</sup>/s) se utilizó para medir el rendimiento, en énfasis a la calibración y validación del modelo (Figura 2.12).



**Figura 2.12.** Hidrometría histórica, estación Chicllarazo



### 2.3.2. Recopilación y procesamiento de información cartográfica

#### a) Modelo de elevación digital (DEM)

El territorio peruano cuenta con productos que brindan información altimétrica de libre acceso: el MDE a partir de técnicas estereoscópicas, ASTER (*Advance Space Borne Thermal Emisión and Reflection Radiometer*), el MDE a partir de técnicas interferométricas, SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) y la carta nacional del IGN a la escala 1:100 000.

Finalmente se utilizó el producto SRTM disponibles como DEM de 3 segundos de arco (resolución aproximada de 90 m) con la finalidad de definir la red hídrica y los límites de la cuenca (Figura 2.13).

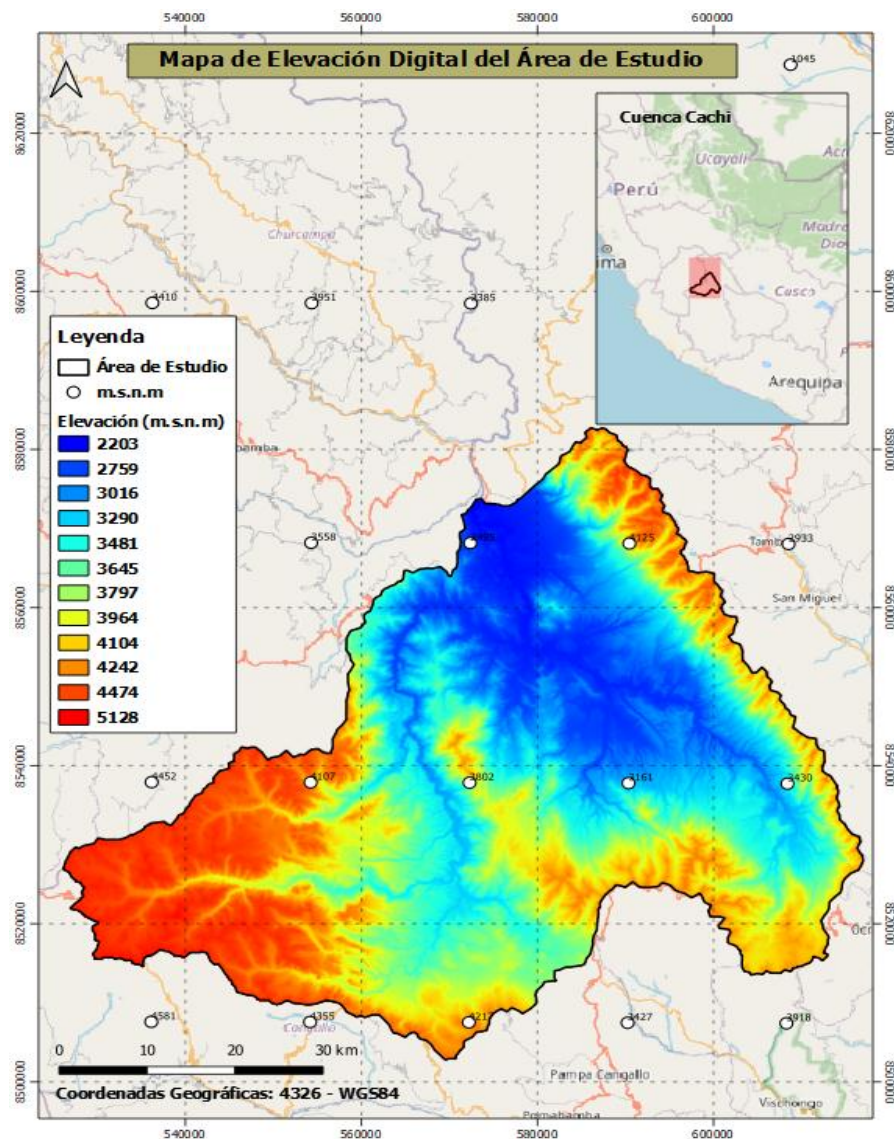
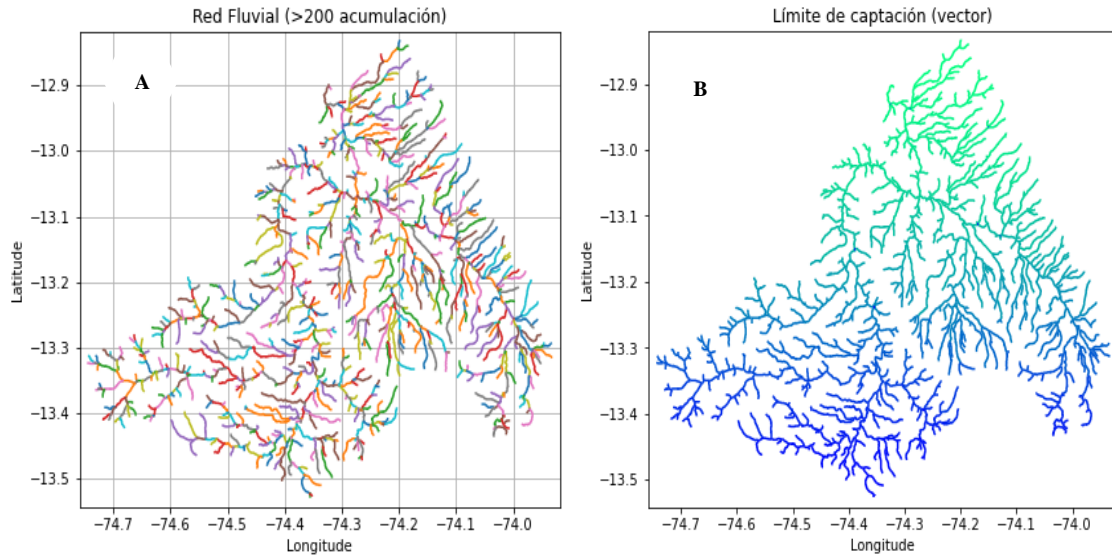
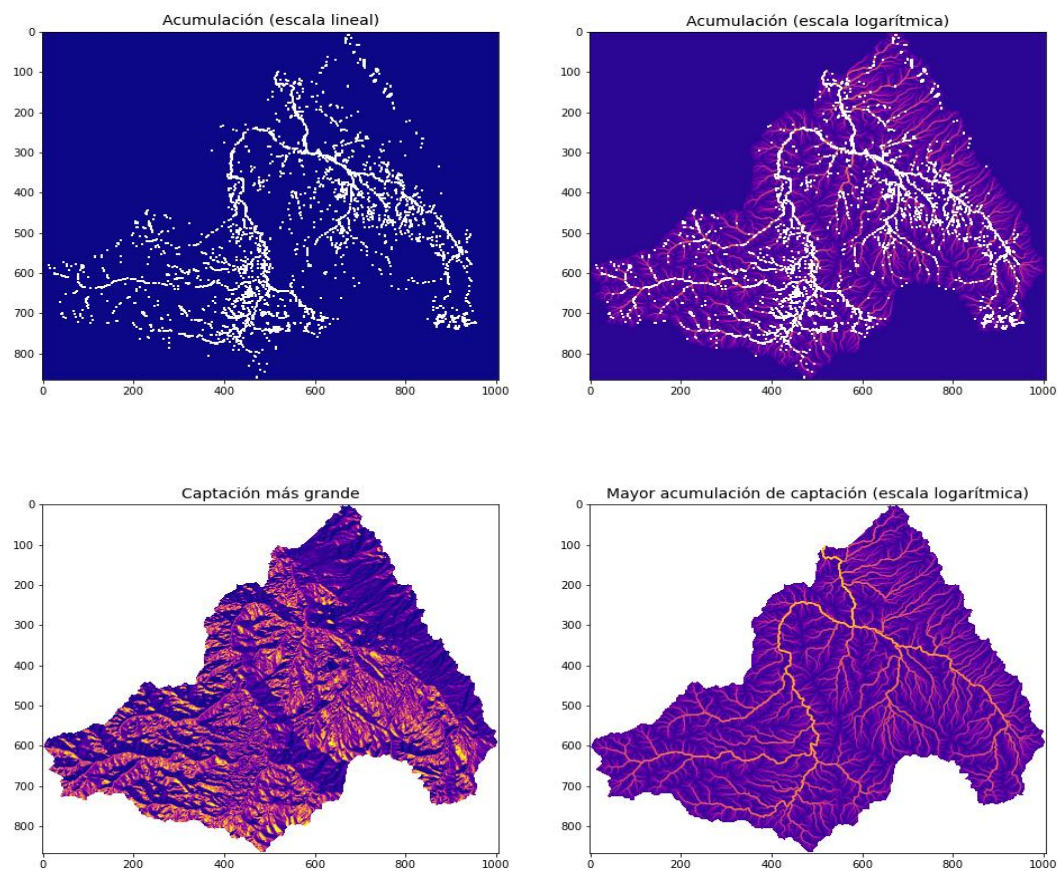


Figura 2.13. Mapa de elevación del área de estudio

El modelo digital de elevación (DEM), es de utilidad para tener conocimiento previo del área de la delimitación de la cuenca y subcuencas, bajo la distribución de la red fluvial y límite de captación de la cuenca Cachi (Figura 2.14 y 2.15).



**Figura 2.14.** Red fluvial (A) y Límite de captación (B) de la cuenca Cachi



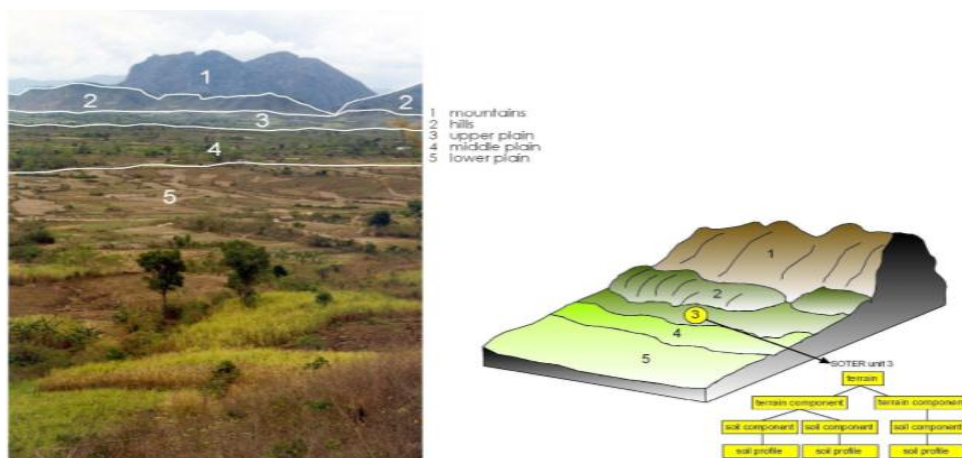
**Figura 2.15.** Flujo de acumulación y captación de la cuenca Cachi



## b) Tipo de suelo

Las características físicas y químicas del tipo de los suelos requeridos por el modelo SWAT, es quizás la información más complicada de obtener, debido a su alto costo y excesivo trabajo de campo necesario. Para el presente estudio se utilizó la información provista de SOTERLAC (Base de datos de suelo y terreno para América Latina y el Caribe: Versión 2.1), realizado en conjunto por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO) y la información del suelo Mundial (ISRIC).

El suelo y la base de datos del terreno (SOTER) es un programa para almacenar y emplear los datos sobre recursos naturales. Se compone de un componente espacial y un atributo de los datos, manejados por el Sistema de Información Geográfica y software de gestión de base de datos respectivamente. SOTER identifica las áreas de terreno con un distintivo, a menudo repetitivo, patrón de forma de relieve, litología, forma de la superficie, la pendiente, el material de matriz y el suelo. Estos se llaman SOTER-unidades (Dijkashoom *et al.*, 2005, p. 3).



**Figura 2.16.** Representación de unidades SOTER y la estructura de una unidad SOTER

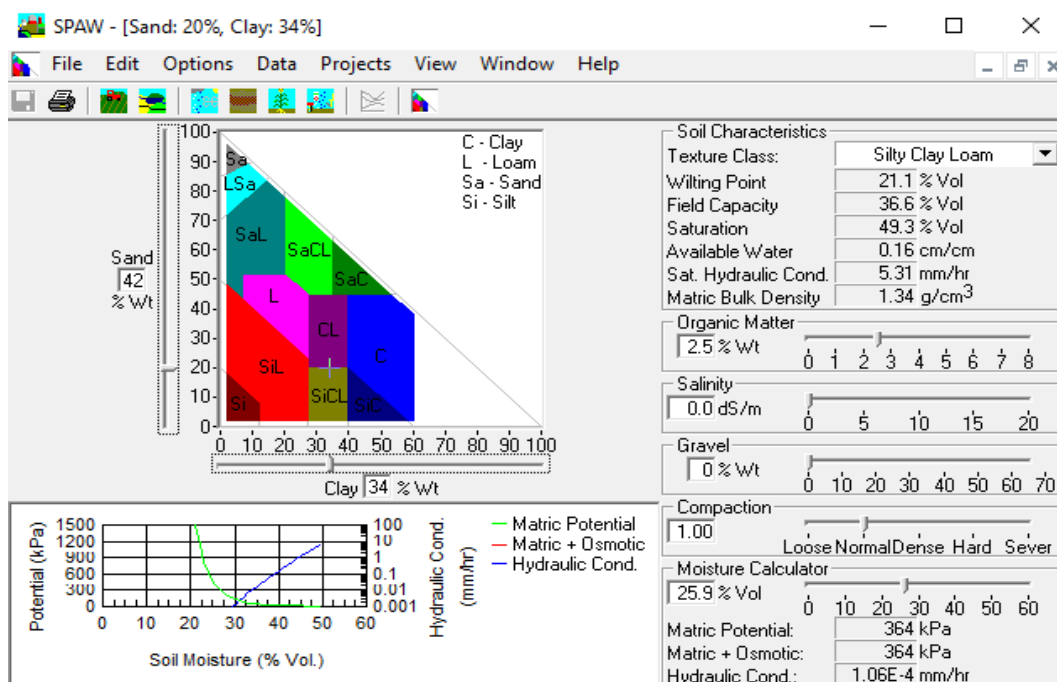
Fuente: Dijkashoom *et al.*, (2005) p.4

Los valores correspondientes a los parámetros fisicoquímicos que poseen cada una de las capas (por ejemplo, grupo hidrológico del suelo, granulometría del suelo, permeabilidad, densidad aparente, conductividad hidráulica entre otros), tanto de la capa superficial como la subsuperficial del suelo, se obtuvieron de la base de datos SOTERLAC, para la cuenca Cachi (Tabla 2.5) necesarios para formular el modelo SWAT.

**Tabla 2.5.** Clasificación de suelos en la cuenca Cachi

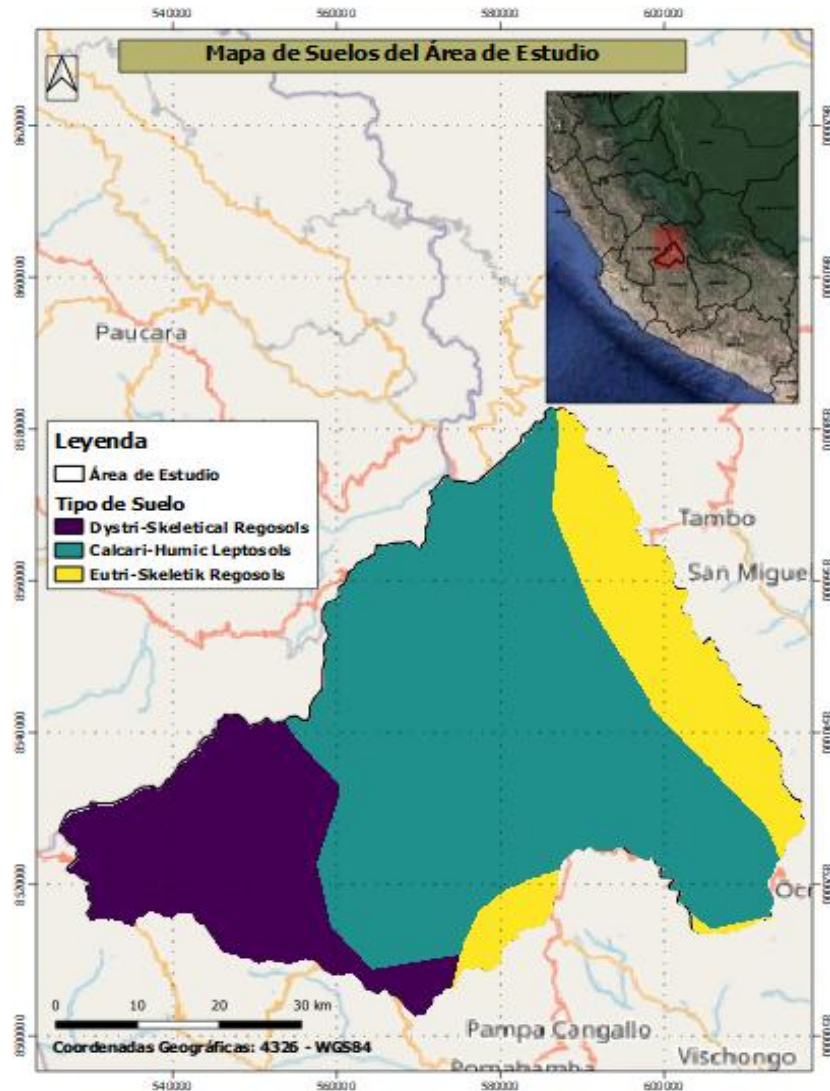
Código SWAT	Descripción	Numero de capas	% Arcilla	% Limo	% Arena
RGd	Dystri-Skeletal Regosols	4	13	20	67
Lpe	Calcari-Humic Leptosols	2	16	52	20
Rge	Eutri-Skeletal Regosols	5	6	22	72

Cabe resaltar que mediante la información de clases texturales (arena y arcilla) y el contenido de materia orgánica, de cada uno de los horizontes de los 11 perfiles, se calculó también la densidad aparente del suelo, capacidad del agua disponible en el suelo y la conductividad hidráulica, con el uso del Software SPAW (*Soil-Plant-Air-Water*) (Figura 2.17), algunos parámetros requeridos en el desarrollo del modelamiento hidrológico con SWAT.



**Figura 2.17.** Características del suelo en SPAW

Fuente: SPAW



**Figura 2.18.** Mapa del tipo de suelo del área de estudio

### c) Uso de suelo/cobertura vegetal

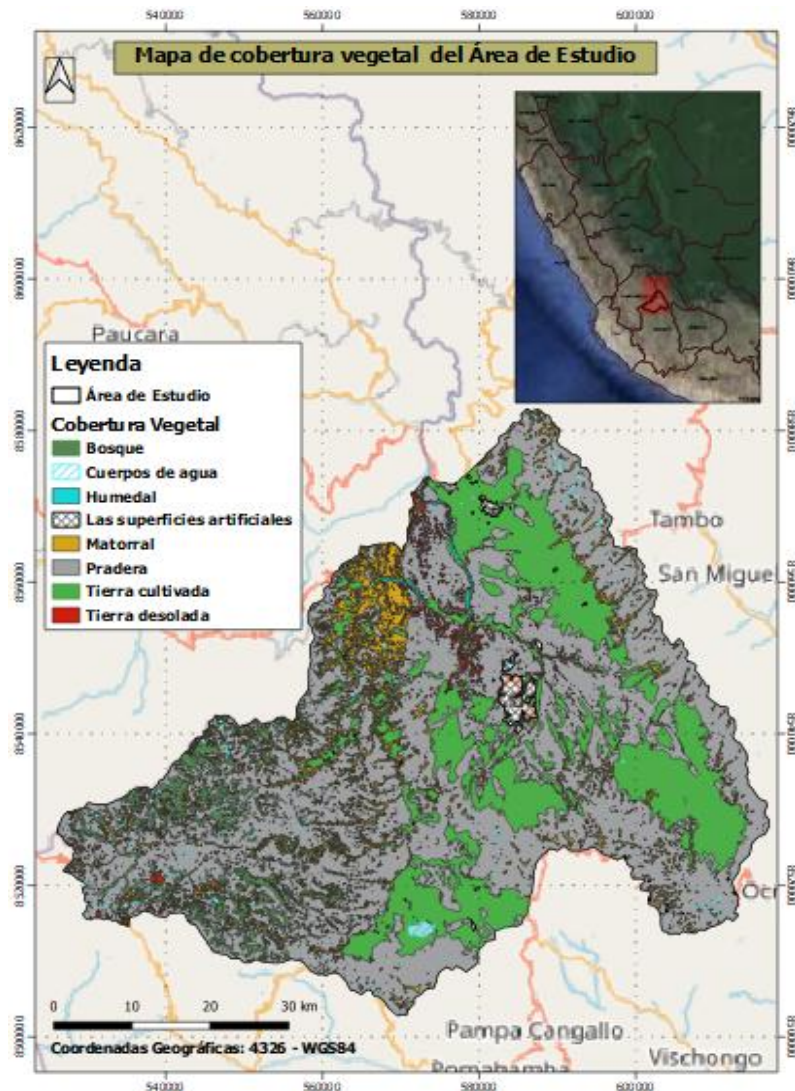
El Ministerio de Ciencia y Tecnología de China, con el fin de apoyar la investigación sobre los cambios globales y el desarrollo del sistema de la tierra de manera efectiva, ha puesto en marcha el Programa Nacional de Investigación de Alta Tecnología y Desarrollo de China (Programa 863) llamado “Mapeo de la teledetección y la investigación sobre tecnologías clave de la cobertura terrestre mundial” en el 2010 (*National Geomatics Center of China, 2014*).

Uno de los resultados del proyecto es el GlobeLand30 que es producto de la cartografía de la cubierta mundial terrestre con una resolución espacial de 30 metros, derivado de imágenes de teledetección del año 2020, la cual se utilizó para la siguiente investigación.

El proyecto GlobeLand30, consta de 10 tipos de cobertura del suelo, los cuales son: tierra cultivada, bosque, pradera, matorral, humedal, cuerpos de agua, tundra, superficies artificiales, tierra desolada, nieve y hielo permanente como se muestra en la Tabla 2.6.

**Tabla 2.6.** Representación del código SWAT del Uso del suelo

<b>Código GlobeLand30</b>	<b>Tipo</b>	<b>Contenido</b>	<b>Código Usuario</b>	<b>Código SWAT</b>
10	Tierra cultivada	Las tierras utilizadas para la agricultura, horticultura y jardines.	TCUL	AGRL
20	Bosque	Tierras cubiertas de árboles, con cubierta vegetal más del 30%.	BOSQ	FRSE
30	Pradera	Terrenos cubiertos de césped natural con una cubierta más del 10%.	PRAD	BROM
40	Matorral	Tierras cubiertas de arbustos con una cubierta de más del 30%.	MATR	FRST
50	Humedal	Tierras cubiertas de plantas y humedales y cuerpos de agua.	HUMD	WETL
60	Cuerpos de agua	Las masas de agua en la superficie terrestre.	CAGU	WATR
70	Tundra	Hierbas y arbustos en las regiones polares.	TUND	RNGB
80	Las superficies artificiales	Tierras modificadas por las actividades humanas.	SART	AGRC
90	Tierra desolada	Tierras con cubierta vegetales inferiores al 10%.	TDES	BARR
100	Nieve y hielo permanente	Tierras cubiertas por la nieve permanente, y la capa de hielo.	NHIP	WATR



**Figura 2.19.** Mapa de cobertura vegetal del área de estudio

#### d) Clasificación de pendientes

La clasificación de pendientes se realizó a partir del DEM (SRTM). El modelo te permite clasificar las pendientes. La cual, se optó por agrupar en 4 clases, con los rangos recomendados por el Reglamento de Clasificación de Tierras (D.S. N°017-2009-AG) como se muestra en la Tabla 2.7.

**Tabla 2.7.** Clases de pendiente (%) para ingresarse al SWAT

Clases	Pendiente (%)
Ligeramente inclinado	0 - 12
Moderadamente inclinado	12- 25
Algo escarpado	25 - 50
Escarpado a muy escarpado	> 50

Fuente: D.S. N°017-2009-AG.



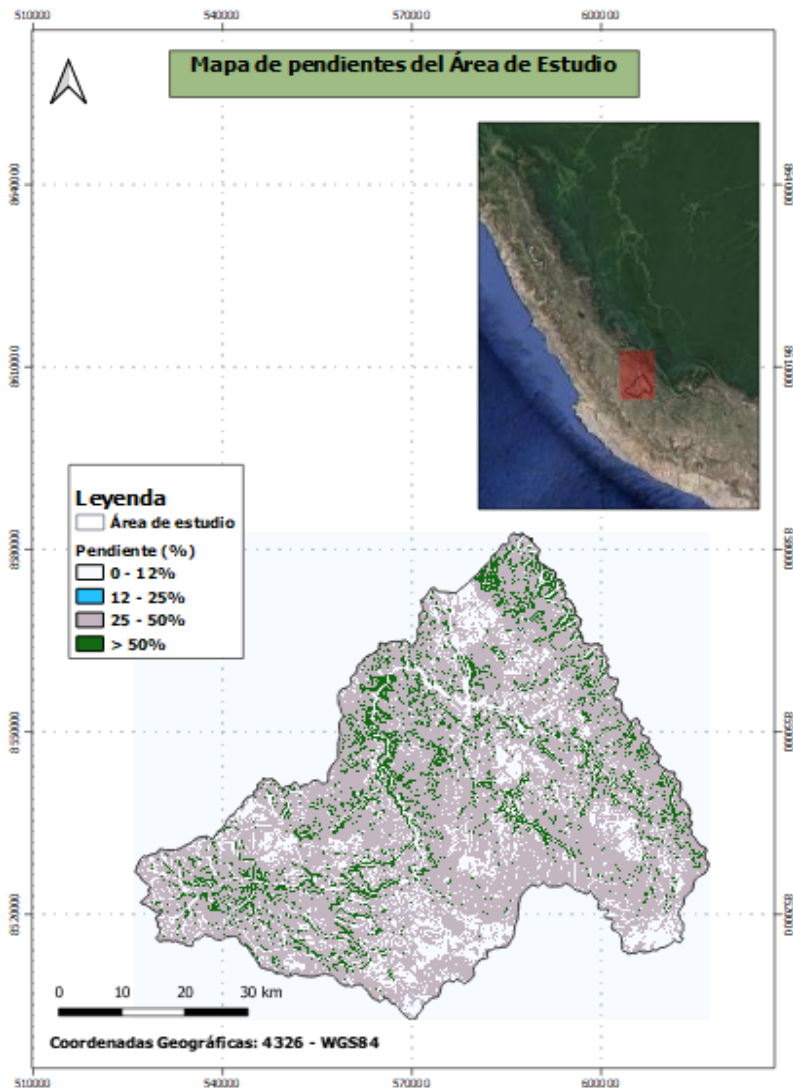


Figura 2.20. Mapa de pendientes del área de estudio

### 2.3.3. Aplicación del modelo hidrológico SWAT

El modelo SWAT es un modelo hidrológico de base física y continua, que simula el ciclo hidrológico, tanto a través del flujo superficial y subsuperficial, con el objetivo de predecir el balance hídrico de la cuenca hidrográfica a mediano y largo plazo.

Para estimar el flujo de agua azul y verde, en esta investigación se procedió al cálculo con las siguientes ecuaciones, provista de la base teórica descritas.

$$BWF = SURQ + LATQ + GWQ$$

$$GWF = GW \text{ Flow} + GW \text{ Storage}$$

Dónde: BWF es el flujo de agua azul (mm), el volumen total de agua que ingresa al río desde la HRU a la subcuenca durante el intervalo de tiempo (mm); SURQ, LATQ y

GWQ, representa la escorrentía superficial, flujo lateral y flujo de agua subterránea respectivamente, que fluyen hacia el canal en el intervalo de tiempo (mm); GWF es el flujo de agua verde, la cantidad real de evapotranspiración en el intervalo de tiempo (mm); GW Flow es la evapotranspiración real (mm), agua verde en flujo, calculado con el método de Hargreaves y GW Storage es el contenido de agua en el suelo que se refiere al agua almacenada en el suelo (mm).

De igual manera se calculó el coeficiente de agua verde para evaluar la distribución de los recursos hídricos verdes en la cuenca hidrográfica:

$$GWC = GWF/(GWF+BWF)$$

La simulación se realizó mediante el Sistema de Información Geográfica QGIS, a través de la interfaz QSWAT que permite la integración del modelo con el Sistema de Información Geográfica libre QGIS. Al inicio se ejecutó a través de la herramienta TauDEM incluida en el paquete QSWAT y con base en la información del SRTM en coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*). Para homogenizar el tamaño de las subcuencas se consideró un área umbral de 100 km<sup>2</sup> para la red de arroyos, generando así la cantidad de subcuencas y la definición de la unidad de respuesta hidrología, bajo condiciones homogéneas del tipo de suelo, uso de suelo y pendiente de la cuenca. Los datos climáticos que incluyen la precipitación diaria y la temperatura se obtuvieron de las estaciones virtuales mencionadas anteriormente, con datos climatológicas y pluviométricas ubicadas en el área de estudio por un período de 36 años (1981-2016); en el que los 2 primeros años (de 1981 a 1982) se consideró como períodos de calentamiento (NYSKIP).

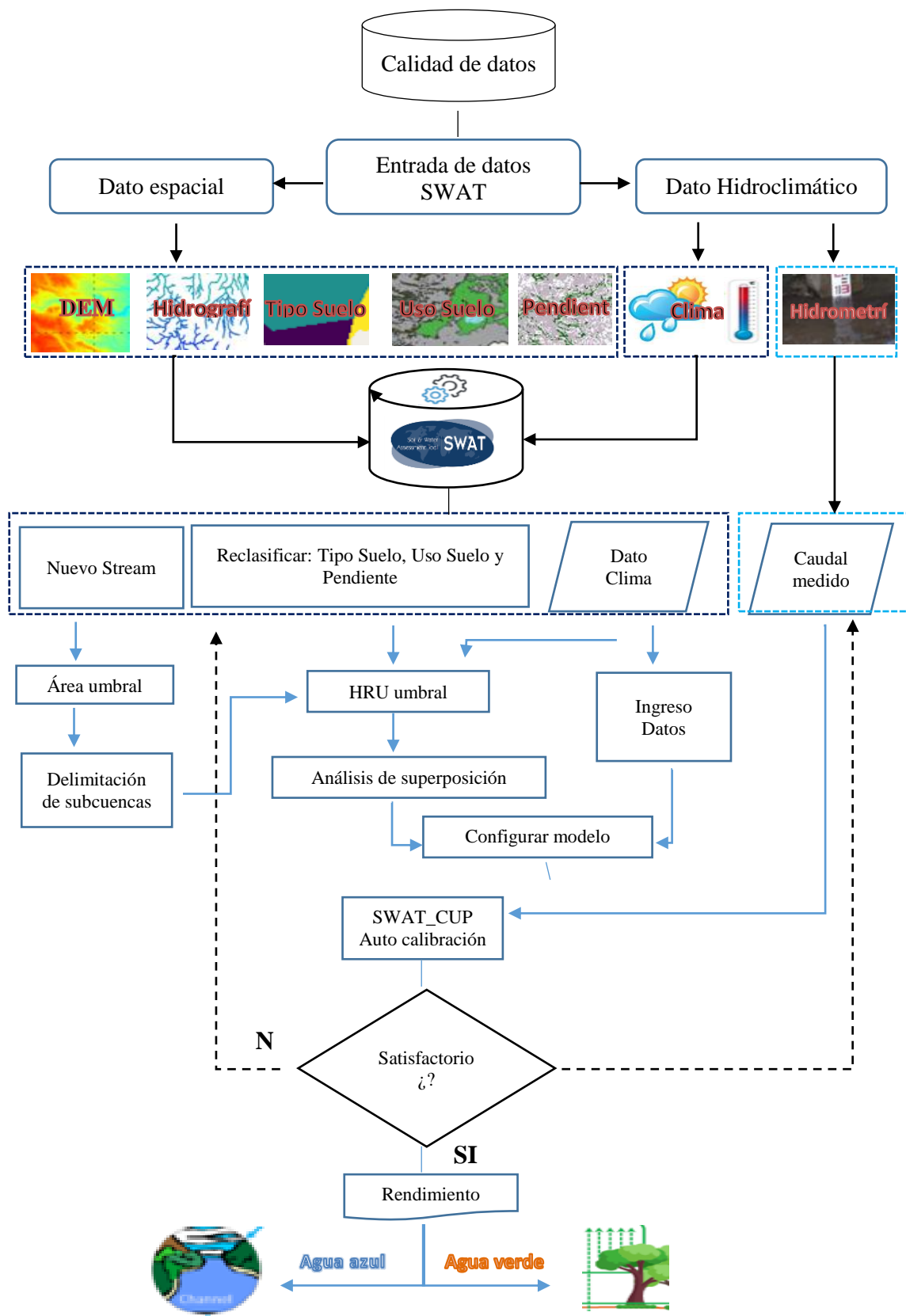
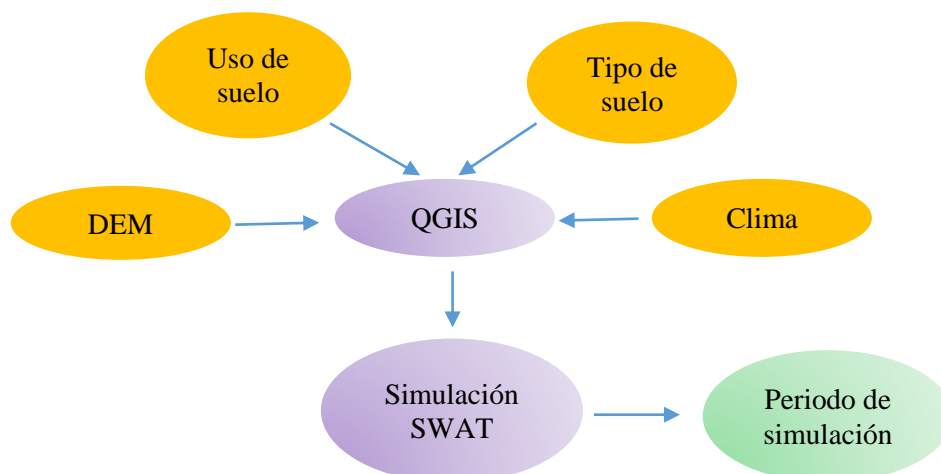


Figura 2.21. Representación metodológica del modelo hidrológico SWAT



Para la aplicación del modelo SWAT, se obtuvieron los siguientes datos de la cuenca:

- Topografía. DEM en formato “grid” con tamaño de pixel de 90 m, donde cada pixel representa la altitud promedio; se utilizó de los datos SRTM (Misión Topográfica de Radar del Transbordador de la NASA) Versión 4, descargada del siguiente enlace: <https://srtm.csi.cgiar.org/>.
- Hidrografía. Red de ríos en formato “shapefile” obtenidas de la ANA.
- Tipo de suelo. Archivo en formato “grid” con la clasificación de las propiedades físicas y químicas (Anexo 3) de la cuenca Cachi.
- Uso de suelo/coertura vegetal. Archivo en formato “grid” con la clasificación de la cobertura de uso de los suelos.
- Información climática. Se utilizó 8 estaciones virtuales ubicadas dentro y fuera de la cuenca, con datos diarios de precipitación (mm), temperatura máxima, mínima (C°), y se utilizó el simulador del clima para la humedad relativa (%), velocidad del viento (m/s) y radiación solar (MJ/día). Los datos estadísticos del clima se utilizaron del motor meteorológico mundial WGEN\_CFSR (*Global Weather data for SWAT*) a partir de datos de reanálisis del sistema de pronóstico climático (CFSR) del centro nacional para la predicción ambiental (NCEP) (<https://swat.tamu.edu/data/cfsr>) que tiene una resolución aproximada de  $\approx 36$  km, estos tienen una utilidad para áreas con limitada información de datos observados. La Figura 2.22 muestra los datos necesarios para la modelación hidrológica en SWAT.

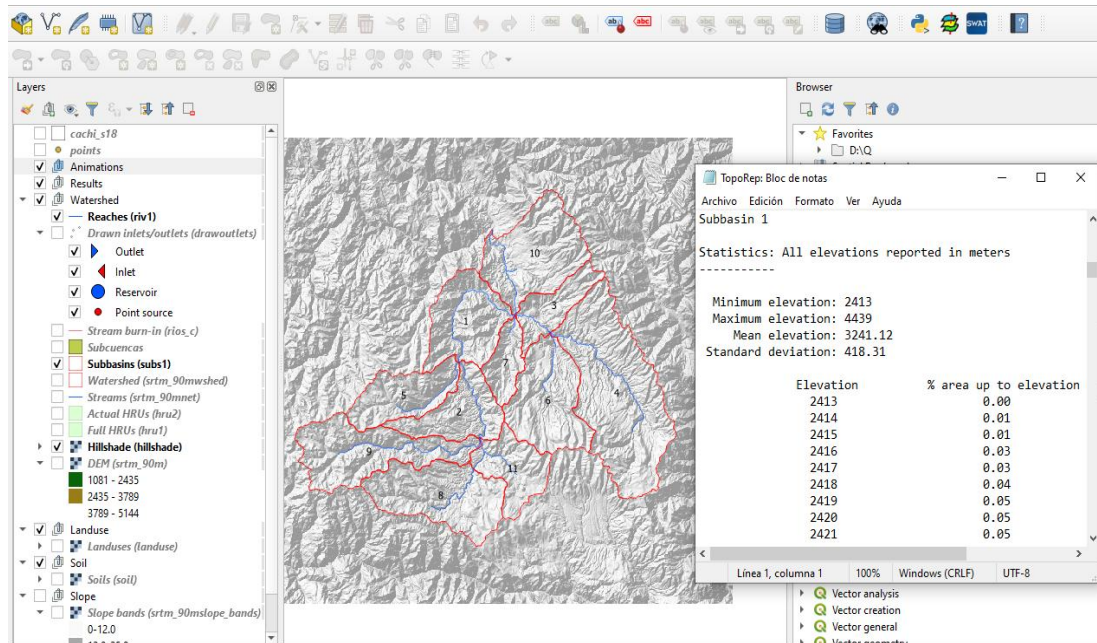


**Figura 2.22.** Datos de entrada para la simulación en SWAT

- Se seleccionó el DEM con tamaño de pixel de 90 m dentro del SWAT para la delimitación de las subcuencas y redes de corrientes, donde se utilizó la metodología

de TauDEM mediante la opción “*Delineate watershed*”, considerando un área umbral de 100 km<sup>2</sup> para la red de arroyos, la cual es óptimo para la delimitación de las subcuencas de la cuenca del río Cachi.

- Dentro de la cuenca Cachi se generaron 15 subcuencas, las cuales se unieron las subcuencas que representan un área menor al 5% mediante la opción “*Merge subbasins*”, habiéndose creado al final 11 subcuencas (Figura 2.23).



**Figura 2.23** Subcuencas generadas en SWAT en la cuenca Cachi

- Para la opción principal “*Create HRU’s*” (creación de HRU’s), se utilizó los datos raster (hdr.adf) para la generación de mapas de uso de suelo y tipo de suelo en el SWAT mediante la opción “*Landuse table*” (tabla de uso de suelo) y “*Soil table*” (tabla de suelo), a partir de tablas del uso y tipo de suelo en formato (.csv), las cuales estas fueron estructuradas de acuerdo con el formato requerido por el programa e ingresadas previamente a la base de datos (QSWATRef2012) del SWAT.
- A continuación, la Figura 2.24 muestra el mapa de Uso de suelo del año 2020, que abarca el 100 % sobre el área de estudio de la cuenca Cachi.

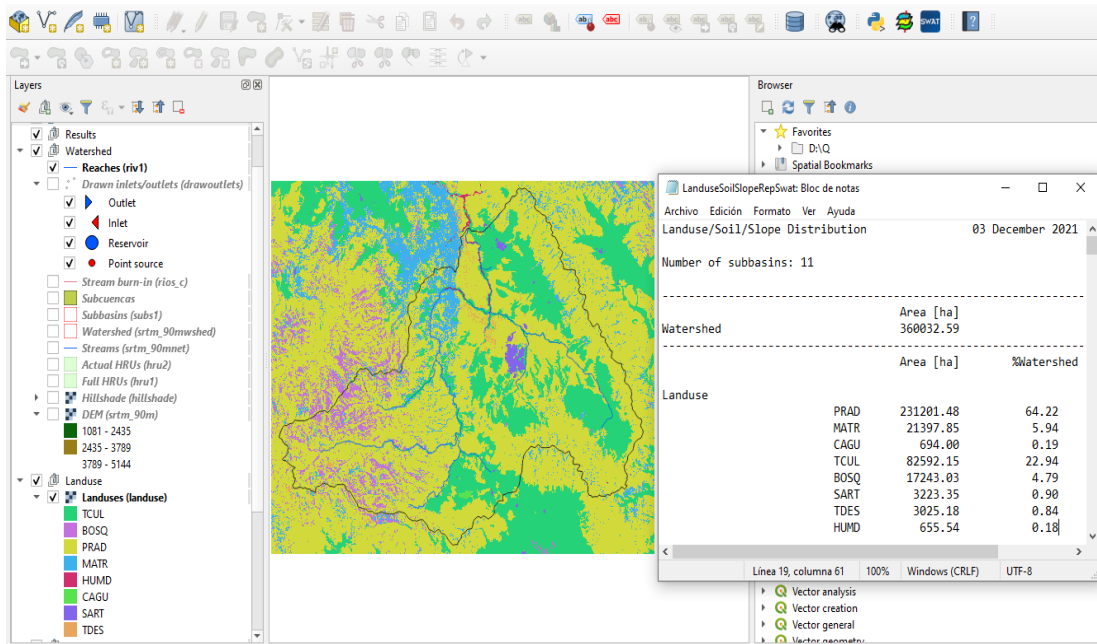


Figura 2.24. Uso de suelos reclasificados con código SWAT de la cuenca Cachi

- La Figura 2.25 muestra los atributos de los parámetros físicos y químicos del tipo de suelo, entre ellos el número de capas del suelo, grupo hidrológico del suelo, profundidad máxima de enraizamiento del perfil del suelo, profundidad de la superficie del suelo a la parte inferior de la capa, densidad aparente de suelo húmedo, capacidad de retención de agua del suelo, conductividad hidráulica saturada, contenido de carbono orgánico, porcentajes de arcilla, limo y arena; contenido de fragmento de roca, albedo húmedo del suelo, factor de erodabilidad del suelo de la ecuación USLE (K) y conductividad eléctrica (Anexo 3), estas obtenidas a partir de la base de datos SOTWIS\_LAC, opción “*SOTERsummaryFile*”. La Figura 2.26 muestra el mapa del tipo de suelos.

Nombre del suelo	Grupo hidrológico del suelo	Profundidad máxima de la raíz del perfil del suelo (mm)	Fración de la porosidad (espacio vacío) de la cual se excluyen los aniones	volumen potencial máxima de la grieta del perfil de suelo expresado como fracción del	profundidad de la superficie del suelo a la parte inferior de la capa.	Densidad aparente del suelo (Mg/m <sup>3</sup> o g/cm <sup>3</sup> )	Capacidad disponible del agua de la capa del suelo (Suelo del milímetro mm/H <sub>2</sub> O) DIVIDIR	Conductividad hidráulica saturada (m/h) del SOFTWARE SPAM	Contenido de carbono orgánico (% del peso del suelo) DIVIDIR ENTRE 10	Contenido de arcilla (% del peso del suelo)	Contenido de limo (% del peso del suelo)	Contenido de arena (% del peso del suelo)	Contenido de fragmento de roca (% del peso total)	Albedo del suelo húmedo del suelo.	Factor de erodabilidad del suelo de la ecuación USLE (K) (unidad de $s \cdot 0.13 \text{ metric tonm}^2$ )	Conductividad eléctrica (Ds/m)		
SNAM	NLAYERS	HYDGRP	SOL_ZMX	ANION_EXCL	SOL_CRK	TEXTURE	SOL_Z1	SOL_BD1	SOL_AWC1	SOL_K1	SOL_CBN1	CLAY1	SILT1	SAND1	ROCK1	SOL_ALB1	USLE_K1	SOL_EC1
RGd	4	C	800	0.5	0.5	CLAY	200	1.19	0.15	5.31	2.7	34	24	42	60	0.01	0.192	0
Lpe	2	B	300	0.5	0.5	CLAY_LO	200	1.35	0.16	4.62	3.27	16	52	32	4	0.01	0.279	0
Rge	5	C	1000	0.5	0.5	CLAY	200	1.2	0.13	26.09	0.48	18	27	55	28	0.01	0.261	0

Figura 2.25. Atributos requeridos de SWAT para los tipos de suelos

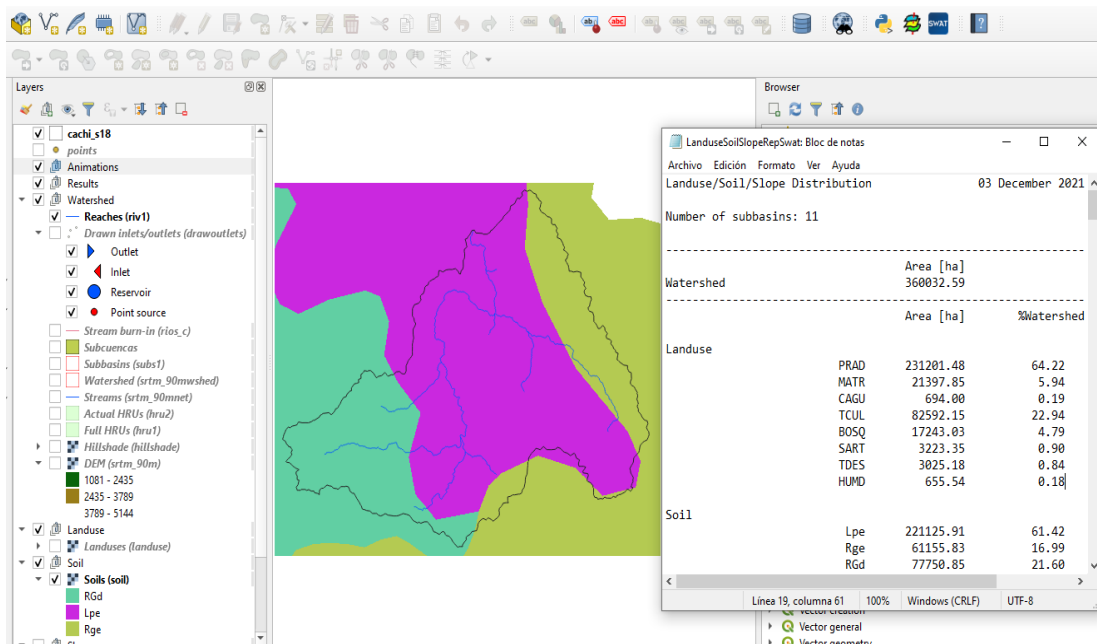


Figura 2.26. Tipos de suelos de la cuenca Cachi reclasificado con código SWAT

- Con la opción “Set bands for slope (%)” (bandas de pendiente) se definió las bandas de pendiente, determinándose 04 clases de pendiente: < 12%, 12-25%, 25-50%, >50%, según la Tabla 2.7 anteriormente mencionado.

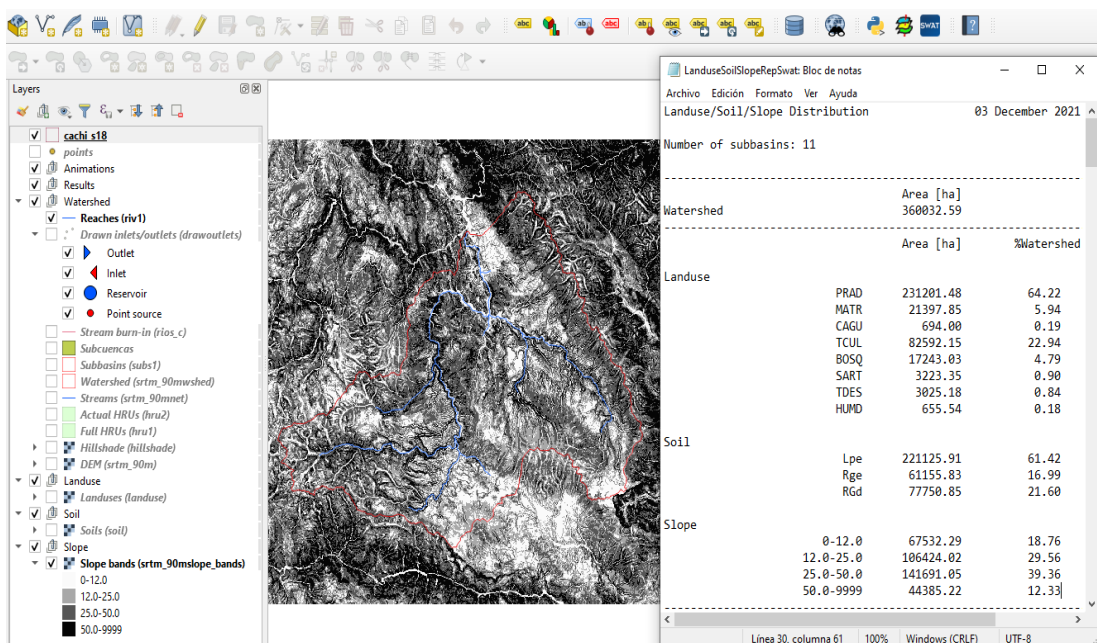
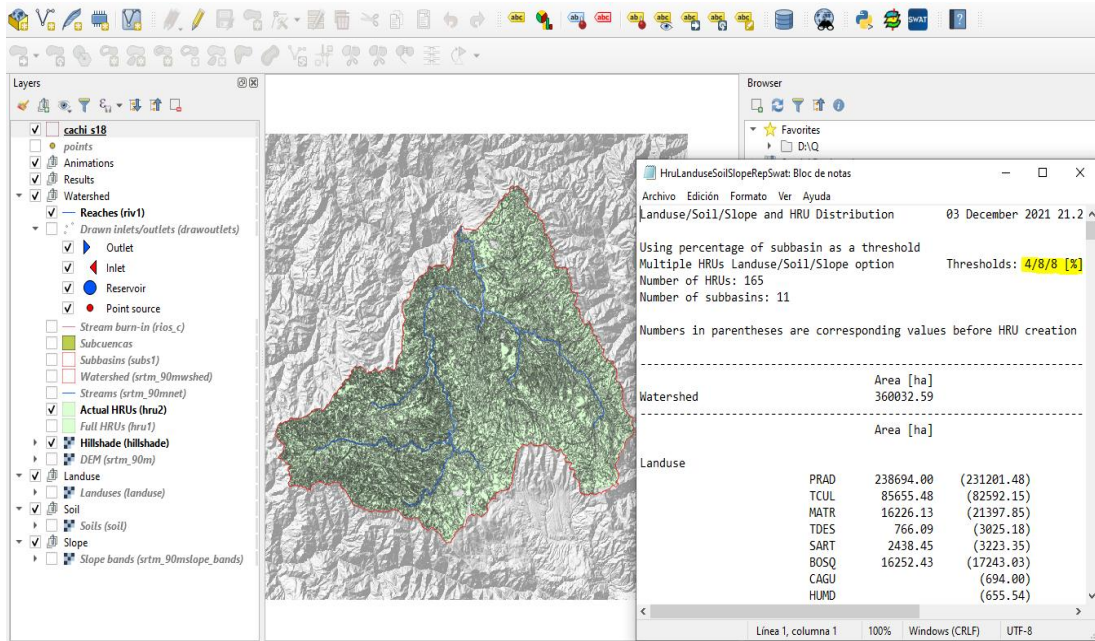


Figura 2.27. Bandas de pendientes de la cuenca Cachi generados por SWAT

- A continuación, se realizó la definición de las Unidades de Respuesta Hidrológica (HRU) homogéneas mediante la combinación y superposición de uso de suelo, tipo

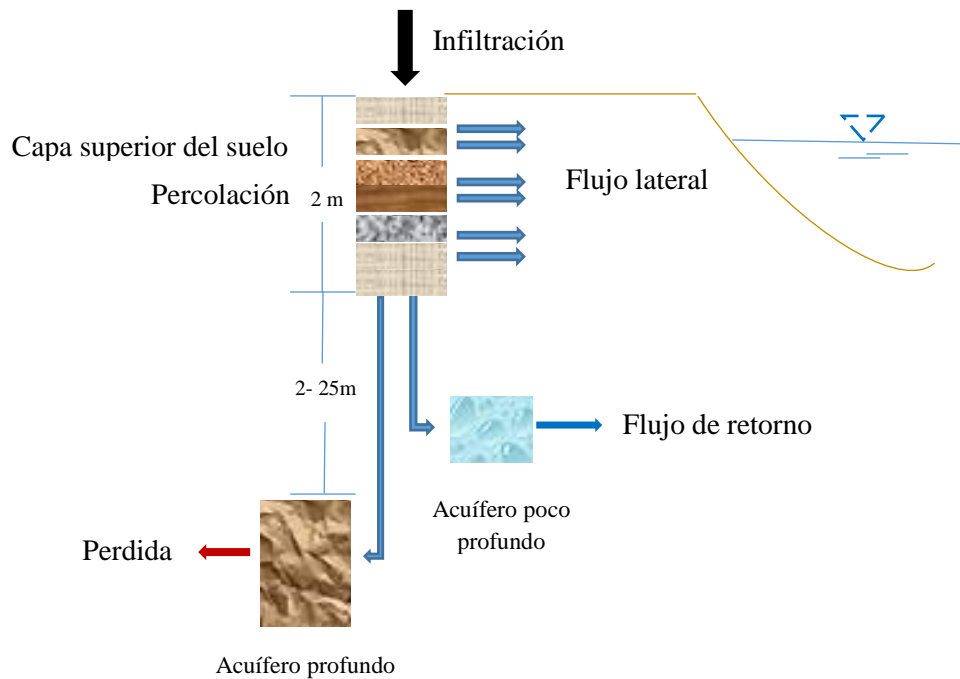
de suelo y pendiente, donde los umbrales de los HRU's que cubrirían menos del 4% para el uso de suelo, 8% para el tipo de suelo y pendiente fueron filtrados para evitar el exceso de parametrización del modelo, obteniéndose 165 HRU's (Figura 2.28).



**Figura 2.28.** 165 HRU's en la cuenca Cachi generados por SWAT

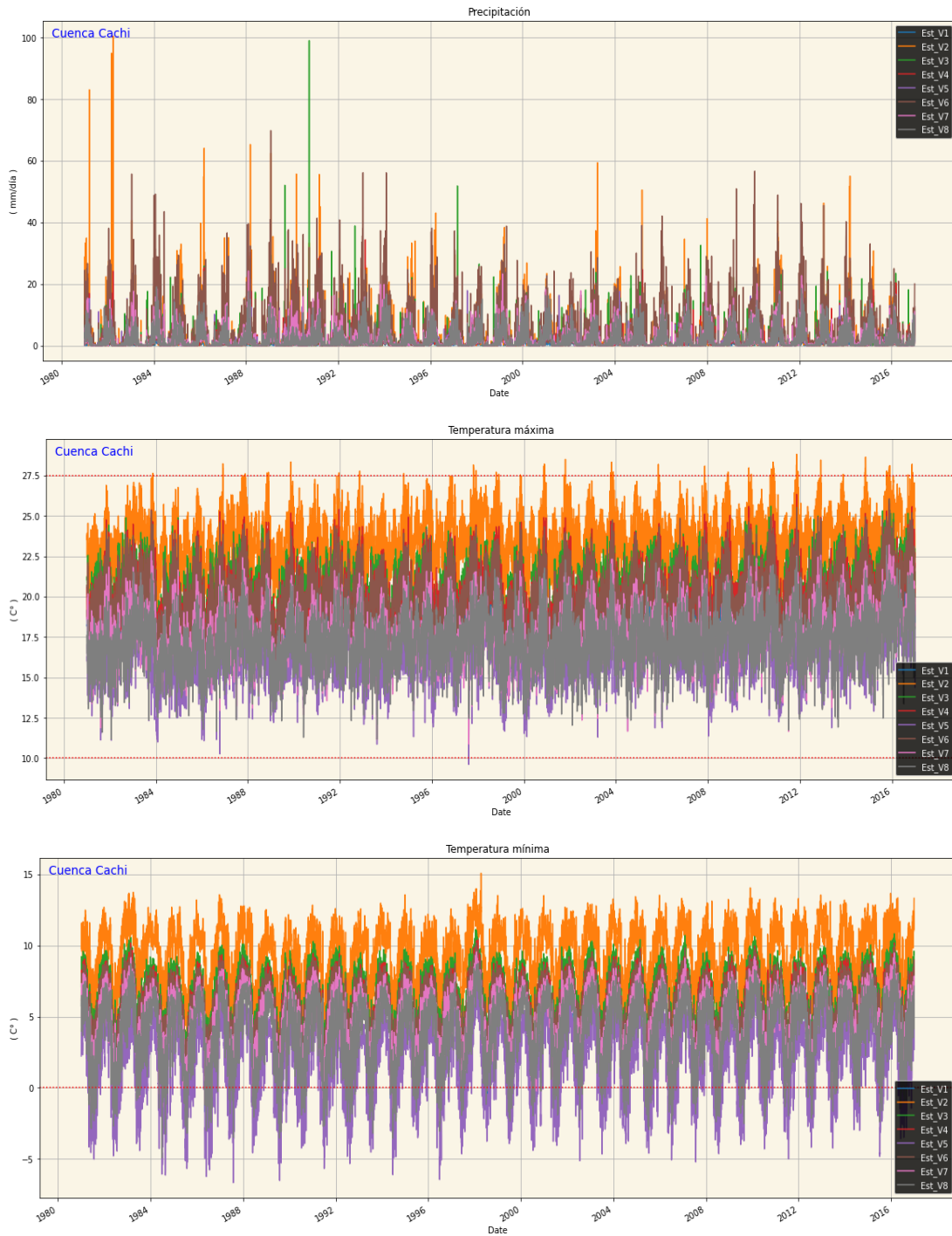
- La cantidad de escorrentía fue estimada mediante la metodología del número de curva del Servicio de Conservación de Suelos de los Estados Unidos la cual es aplicado en estudios de modelación hidrológica de cuencas hidrográficas y cuencas fluviales. Para la estimación de la evapotranspiración, el modelo SWAT ofrece tres fórmulas: Penman – Monteith, Hargreaves y Prestley – Taylor, la opción utilizada en el desarrollo de esta investigación fue a partir de la fórmula de Hargreaves, que requiere temperaturas máximas y mínimas.





**Figura 2.29.** Esquema del flujo de agua subterránea en SWAT

- En relación al agua subterránea en el modelo SWAT, esta empieza a través de la infiltración del agua; una vez el agua contenida en el suelo, puede fluir por el suelo a través del flujo subsuperficial (flujo lateral) desde la capa superior del suelo, otra parte del flujo sigue su camino sobre la zona no saturada que emita su superioridad en el acuífero poco profundo la cual regresa como flujo de retorno (flujo de agua subterránea) y desemboca en un río o lago cercano. La restante parte de agua contenida en la zona saturada puede pasar al acuífero profundo teniendo la posibilidad de ser bombeada de vuelta a la superficie del suelo.
- Respecto a los datos climáticos de entrada al modelo SWAT, mediante la interfaz “*SWAT Editor*”; se descargaron datos de precipitación y temperatura de PISCO de 8 estaciones virtuales para el periodo de 1981 – 2016 (Figura 2.30). Los datos de entrada de las series de precipitación y temperatura se ingresan en formato de texto (.txt) las cuales fueron estructurados para cada variable y estaciones, requeridos por el modelo SWAT.



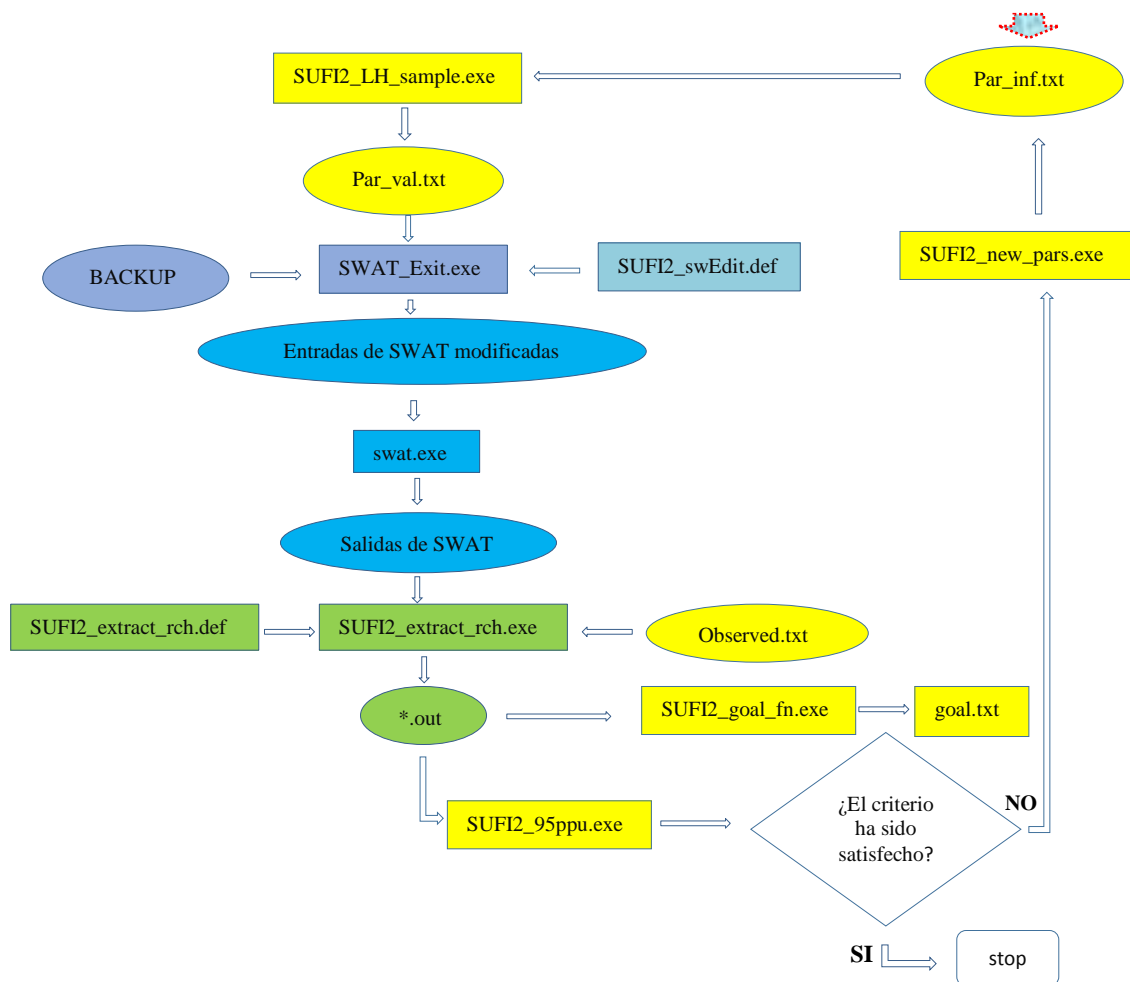
**Figura 2.30.** Datos climáticos (precipitación y temperatura) del producto PISCO del SENAMHI

### 2.3.4. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo

#### a) Sensibilidad

El análisis de sensibilidad se realizó mediante el programa SWAT\_CUP usando el algoritmo SUFI\_2 (ajuste de incertidumbre secuencial), el cual busca optimizar la función objetivo seleccionada, la cual también calcula los restantes para brindar los estadísticos de calibración.

La cual se seleccionaron 16 parámetros (Anexo 5) con fin de detectar aquellos parámetros que mayor contribución reflejaron en los índices estadísticos de ajuste, a partir de estos resultados se detectaron parámetros de mayor relevancia de la calidad del ajuste, relacionado con los procesos de los flujos de agua azul y verde (Figura 2.31).



**Figura 2.31.** Paso a paso creación de SWAT-SUF2 archivos de entrada

Fuente: Modificado de Abbaspour (2007)

## b) Calibración y validación

El proceso de calibración consiste en ajustar el valor simulado y observado, mediante estadísticas de ajuste para poder medir el rendimiento a través de una función objetivo. En este estudio se utilizó las siguientes métricas de ajuste; Eficiencia de Kling-Gupta (KGE), Eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), Producto del coeficiente de determinación (R2) y la pendiente de la recta de regresión entre la simulación y la observación (bR2), Sesgo porcentual (PBIAS) y la Eficiencia volumétrica (VE), calculadas mediante las siguientes ecuaciones, respectivamente:



$$KGE = 1 - \sqrt{(r - 1)^2 (\beta - 1)^2 (\gamma - 1)^2}$$

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_i^{sim})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})^2}$$

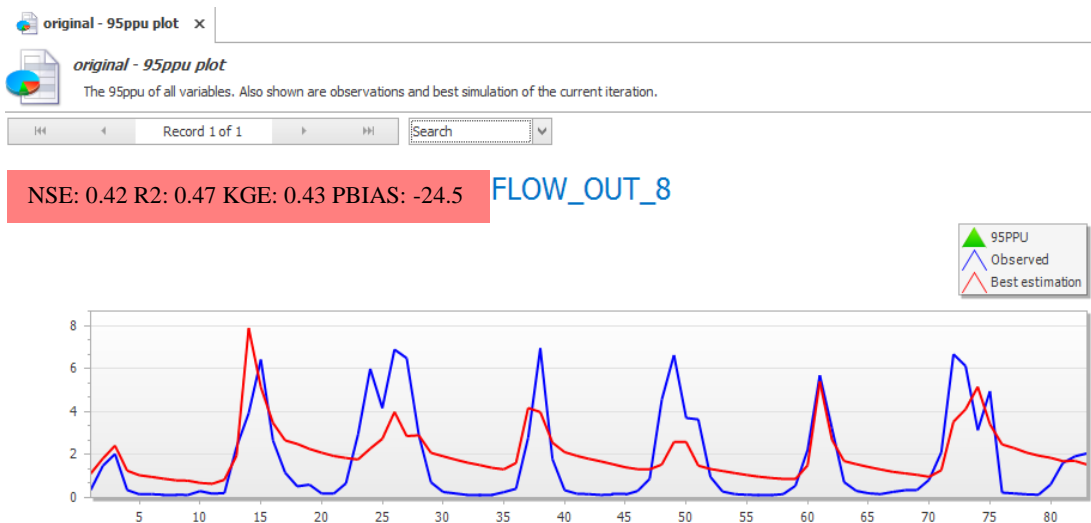
$$bR^2 = \left( \frac{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})(y_i^{sim} - y_{sim}^{mean})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{obs} - y_{obs}^{mean})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i^{sim} - y_{sim}^{mean})^2}} \right)^2$$

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

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n |y_{sim} - y_{obs}|}{\sum_{i=1}^n y_{obs}}$$

Donde  $r$  es el coeficiente de correlación de Pearson,  $\beta$  es la razón entre la desviación estándar de los caudales simulados y observados, y  $\gamma$  es la razón entre los caudales medio simulados y observados, mientras  $y$  es la descarga del flujo de la corriente,  $obs$  es la observación y  $sim$  es la simulación.

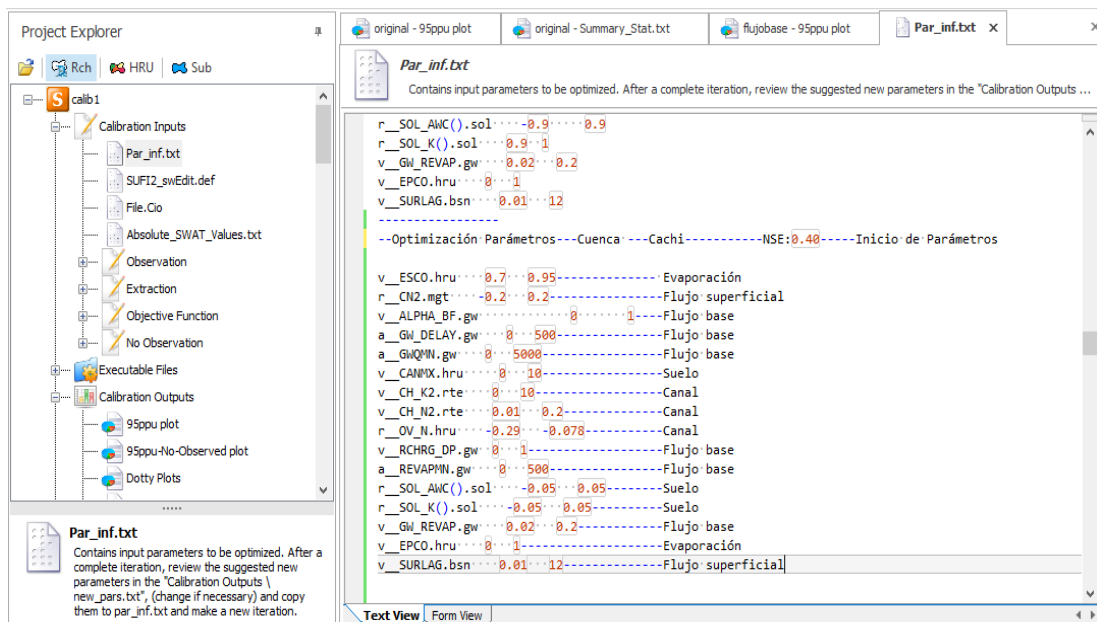
En la presente investigación se utilizó el SWAT-CUP para el análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo, donde al principio se incluyó los datos simulados y observados sin presencia de parámetros, para observar el rendimiento del modelo, donde podemos notar una sobreestimación (+) del flujo base y subestimación (-) del flujo superficial; tal como lo muestra el PBIAS, por ente requiere una calibración (Figura 2.32).



**Figura 2.32.** Calibración ficticia en la cuenca aforada mediante SWAT-CUP

**Dónde:** FLOW\_OUT\_8: Caudal de salida para la subcuenca 8 (correspondiente a la subcuenca Chicllarazo aguas arriba)

- La calibración se realizó, tomando en cuenta los parámetros que influyen en el flujo base y flujo superficial, con el objetivo de buscar una relación próxima entre el caudal simulado y observado como se muestra en la Figura 2.33.

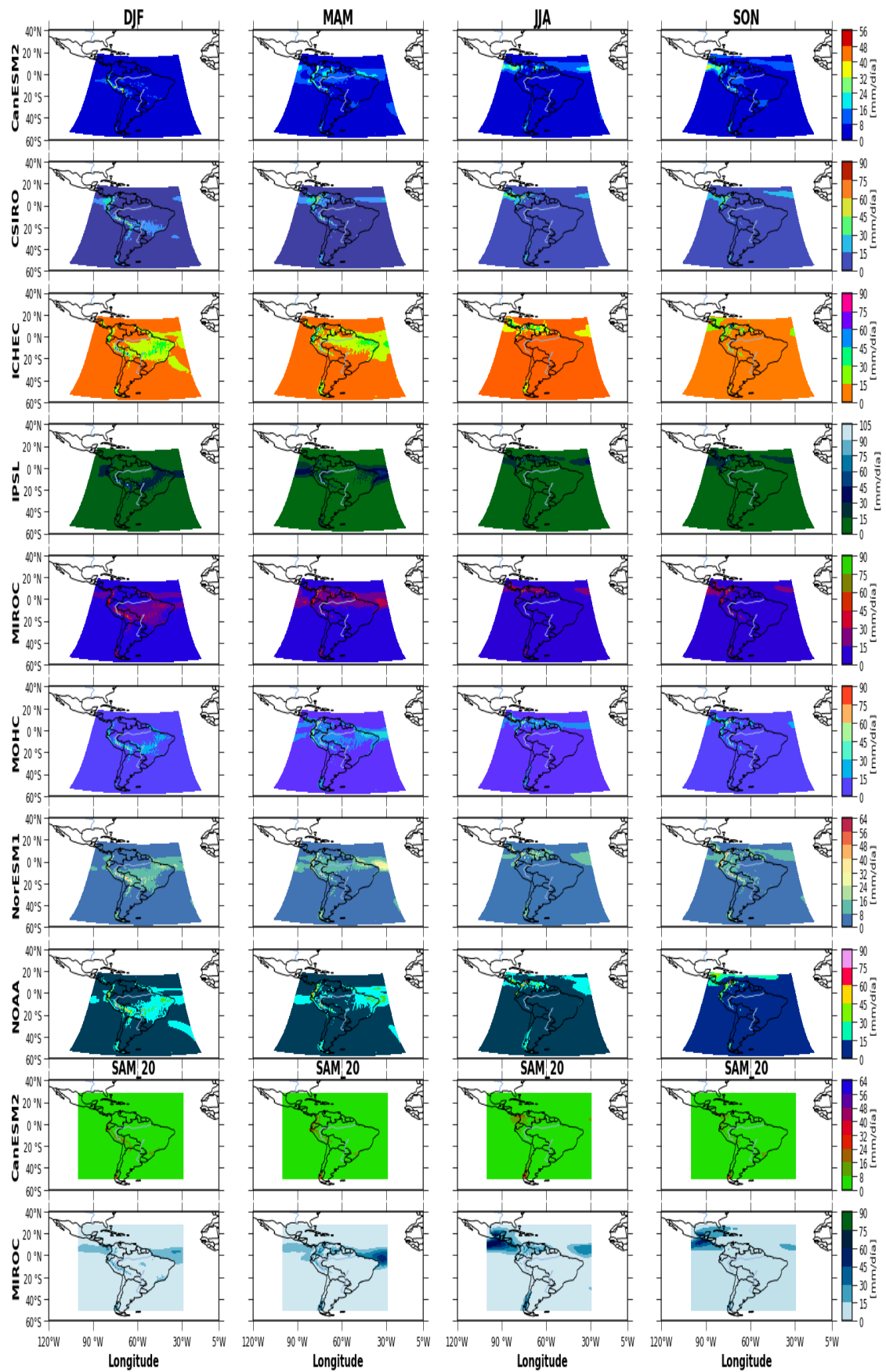


**Figura 2.33.** Optimización de parámetros mediante SWAT-CUP

### 2.3.5. Reducción de escala y proyección climática

#### a) Proyecciones climáticas: CORDEX

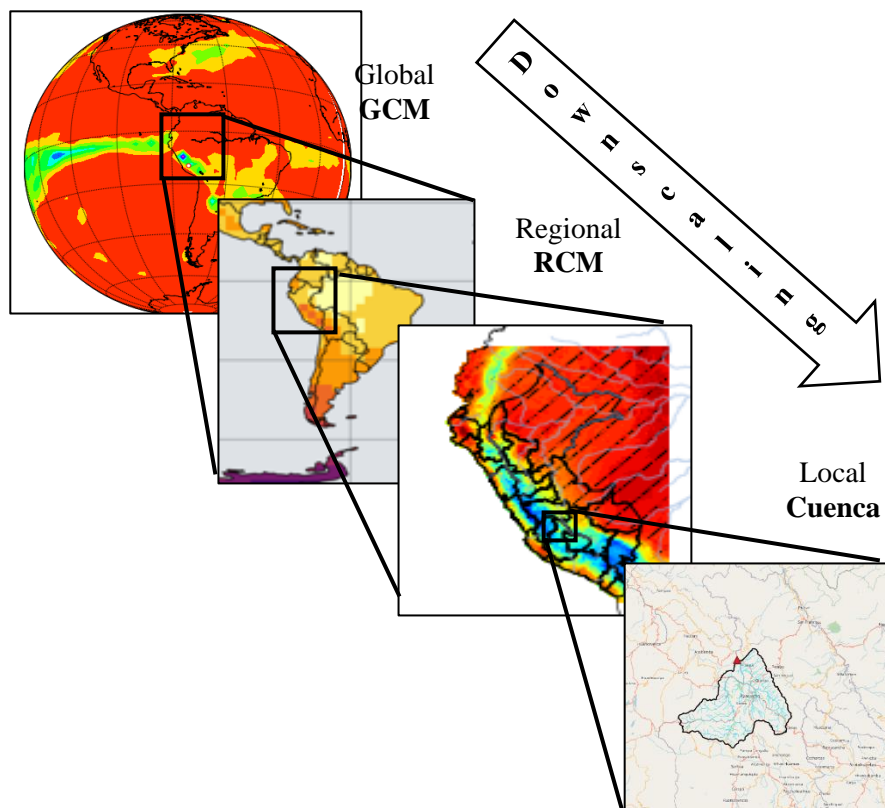
En este estudio se utilizó las proyecciones climáticas de los RCM (Figura 2.34). Los RCM son organizados por el proyecto CORDEX que proporciona y diseña un conjunto de experimentos, en especial el dominio SAM (Dominio de América del Sur), para diferentes modelos climáticos, con una resolución espacial (50 km<sup>2</sup> aproximadamente), bajo el escenario RCP8.5; obtenidos del servidor ESGF (*Earth System Grid Federation*).



**Figura 2.34.** Climatología regional (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera) del proyecto CORDEX

**a) Reducción de escala (Downscaling): corrección de sesgos**

Los modelos RCM provenientes del CMIP5 presentan sesgos en sus variables debido a su resolución espacial dentro de las celdas de cuadrícula, la cual los datos climáticos simulados no se pueden utilizar como entradas directas a los modelos hidrológicos. Para minimizar la discrepancia del cambio climático medido y modelado, se utilizó técnicas de corrección de sesgo mediante “*downscaling*” (Figura 2.35), para que las simulaciones hidrológicas basadas en datos de simulaciones climáticas corregidas cumplan con las simulaciones basadas en observaciones climáticas; dicho proceso se realizó mediante la herramienta CMhyd.

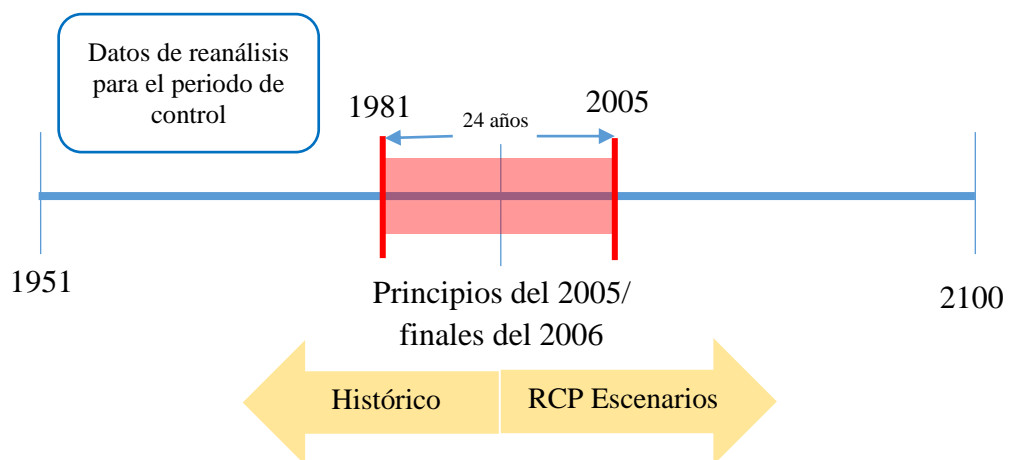


**Figura 2.35.** Reducción de escala - Downscaling

La herramienta CMhyd fue realizada para el estudio de cambio climático en la modelación de cuencas hidrográficas, la cual requiere información superpuesta de dato climática observada y simulada, para cada medidor en un modelo de cuenca a fin de realizar la corrección de sesgo y reducción de escala de datos (históricos y proyectados), para fines de modelación hidrológica.

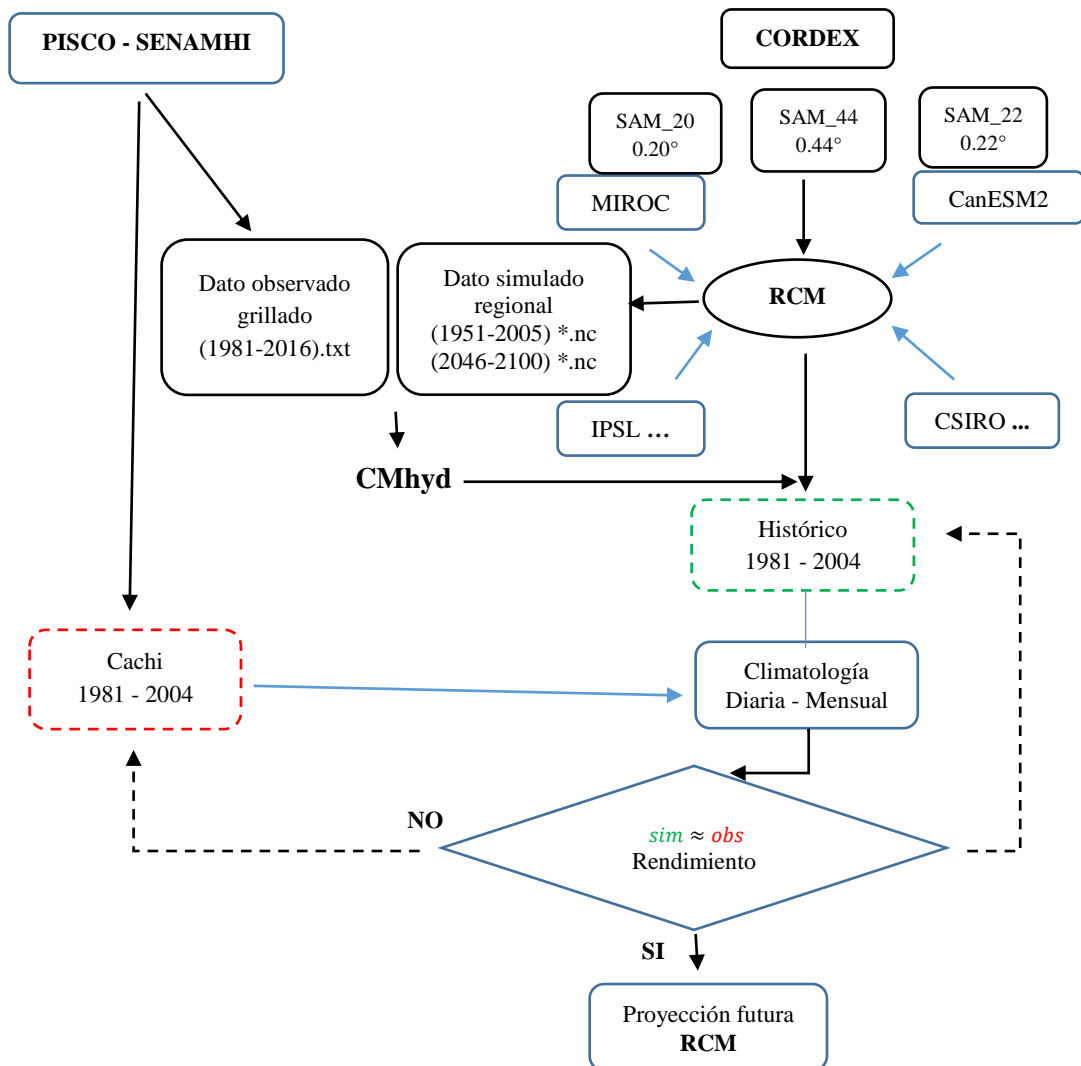
Los años 2046-2100 se utilizó como periodos de escenarios futuros y el periodo de 1981 a 2016 como base histórica para evaluar los sesgos climáticos, y años de parametrización de 1981 al 2005 (Figura 2.36). En la herramienta CMhyd, la superposición de datos observados y los datos históricos deben ser de 20 a 30 años, si el periodo de superposición es inferior a 10 años, los resultados no son adecuados. Otras variables meteorológicas, como radiación solar, humedad relativa y la velocidad de vientos se omitieron en escenarios futuros, porque estas variables no afectan significativamente las simulaciones climáticas de la hidrología regional. Para predecir el mejor modelo regional se utilizó la estación de referencia más cercana a la subcuenca aforada; para obtener el rendimiento de los modelos; mediante las observaciones grilladas y datos simulados históricos bajo un periodo de 1981 a 2004. Por lo tanto, para este estudio de investigación; se utilizó la herramienta CMhyd para las posiciones especificadas en la cuenca Cachi, se extrajeron los datos de los modelos y se utilizó para análisis adicionales.

Mediante la herramienta CMhyd se utilizó los metadatos NetCDF para convertir los datos de precipitación y temperatura en milímetros y grados Celsius, respectivamente y extraer series de tiempo de celdas de cuadrícula vinculadas al área de estudio (Figura 2.37). Los métodos de corrección de sesgo la cual se utilizó; es la transformación de potencia (PT), mapeo de distribución (DM) para la precipitación y la temperatura respectivamente, este último tiene como objetivo comparar la función de distribución de los valores de resultado esperados de RCM con la función de distribución medida.



**Figura 2.36.** Corrección de sesgo (“bias correction”)

De acuerdo con Melese Gemechu *et al.* (2021), el mapeo de distribución es el método de corrección más eficaz; corrige la mayoría de las características estadísticas y tiene los rangos de desviación más pequeños cuando se combina con el mejor ajuste medio general, por lo cual se utilizó la distribución gaussiana para la corrección de la temperatura.



**Figura 2.37.** Diagrama de procesamiento de datos para proyecciones futuras con CMhyd

Para la aplicación de la simulación climática en la cuenca Cachi, se consideraron los siguientes criterios:

- En la presente investigación se utilizó los RCM obtenidos desde la página de *Earth System Grid Federation*: <https://esgf-node.llnl.gov/projects/esgf-llnl/> (Figura 2.38). El ESGF es una plataforma que almacena datos climáticos, que desarrolla,

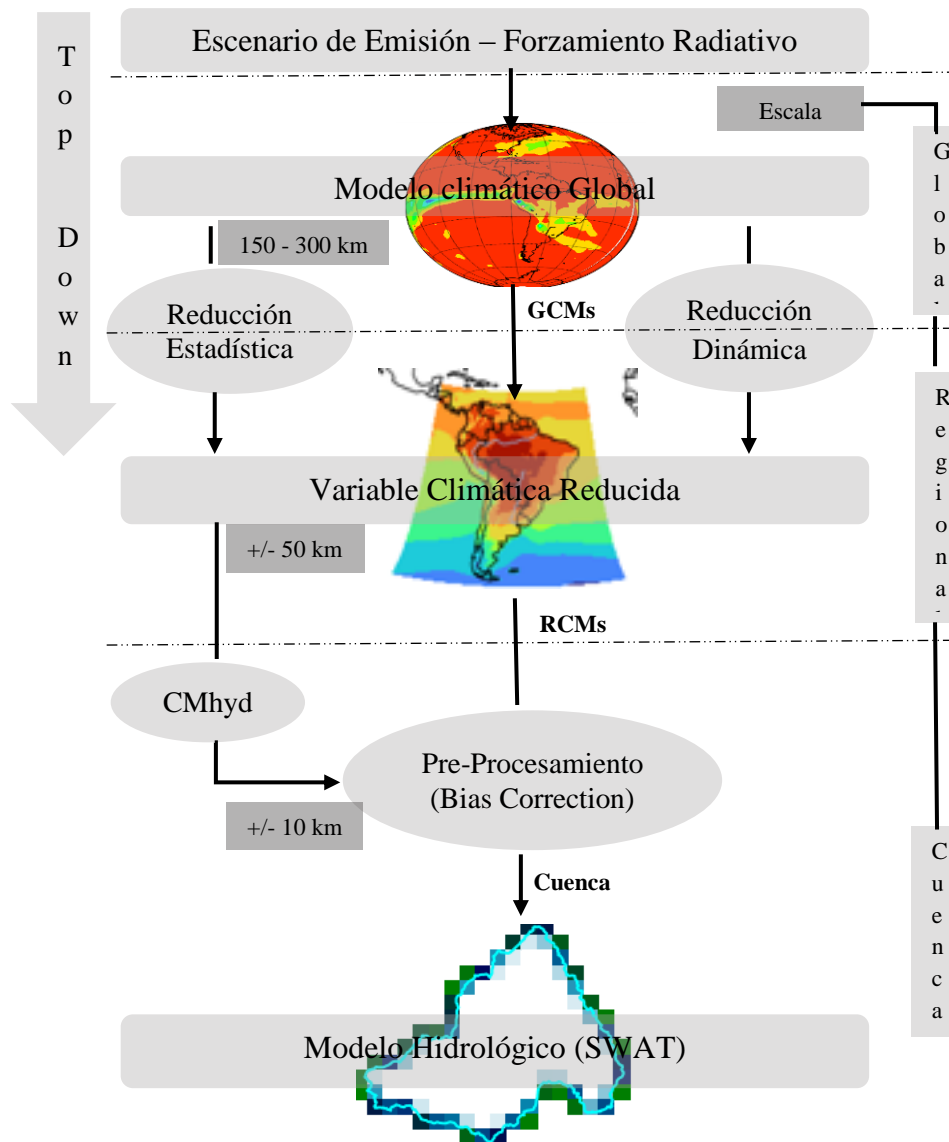
implementa y mantiene una infraestructura de software para la gestión, difusión y análisis de resultados de modelos y datos de observación.

The screenshot shows the ESGF@DOE/LLNL portal interface. At the top, it is hosted by the Department of Energy Lawrence Livermore National Laboratory and powered by ESGF and CoG. The main navigation bar includes 'Home', 'Contact Us', 'Data Nodes Status', and 'Technical Support'. A search bar contains the text 'SAM-44'. Below the search bar, there is a world map with various national flags indicating global participation. To the right of the map, there are sections for 'Federated ESGF-CoG Nodes' (listing ESGF@CEDA, ESGF@DKRZ, ESGF@IPSL, ESGF@NCI, ESGF@NSCLIU), 'Browse Projects' (listing parent and peer projects like CMIP3, CMIP5, etc.), and a tag entry field. A list of bullet points describes the ESGF mission, including supporting CMIP activities, developing data and metadata facilities, enhancing climate research infrastructure, fostering collaboration, and creating software infrastructure. At the bottom, there is a brief description of the ESGF component architecture and its role in serving climate data for the IPCC through the CMIP project.

**Figura 2.38.** Portal de descarga del Earth System Grid Federation

- En la presente tesis, se utilizó el escenario RCP8.5 del proyecto CORDEX, correspondiente al dominio SAM44 y SAM20 (modelo ETA v1), para los 10 modelos climáticos regionales, la cual se muestra en la Tabla 2.4 a mayor detalle. Los datos descargados para el ingreso al modelo SWAT fueron la precipitación (pr) y temperatura (tasmáx, tasmin) en formato NetCDF (.nc), para el periodo histórico (1951-2005) y periodo de modelación climática futura (2046-2100), así se presenta 54 años de equidistancia para el periodo histórico y futuro, de igual forma se incluyó la mayor cantidad de series de tiempo del periodo histórico observado, para la superposición de datos observados (PISCO) con relación a los datos simulados (RCMs), con la finalidad de abarcar mayor porcentaje (> %) de periodo superpuesto.
- Los modelos climáticos presentan en sus variables sesgos, debido a su longitud de píxel que dificultan el ingreso de datos para la modelación hidrológica, por consiguiente, se realizó la reducción de escala (300 – 10 km) por “Downscaling” y corrección de la variable climática sesgada mediante “bias correction” a partir de escala global a la unidad de cuenca con la herramienta CMhyd: <https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>.

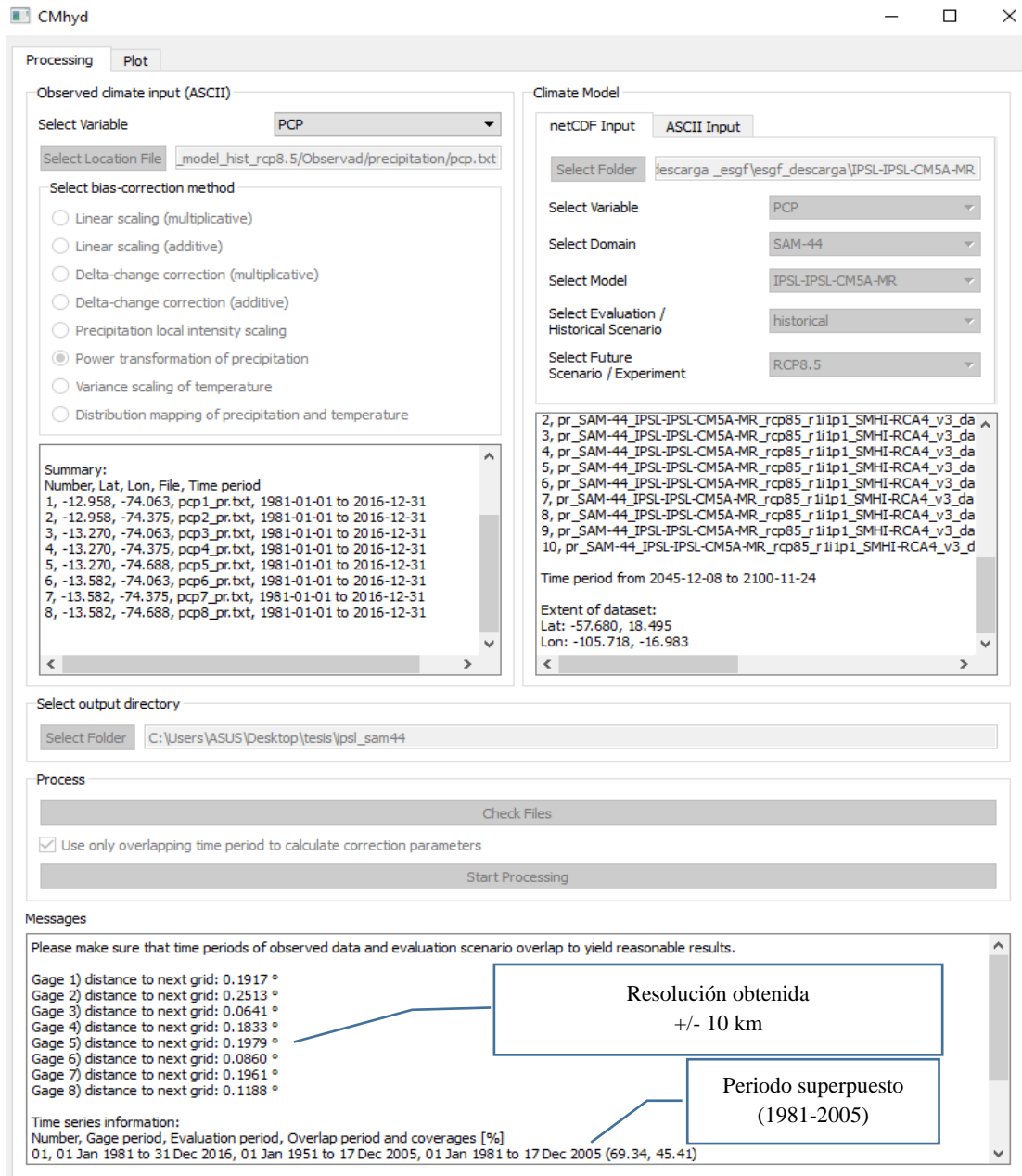




**Figura 2.39.** Esquema de transferencia de variable climática de escala global a escala de cuenca

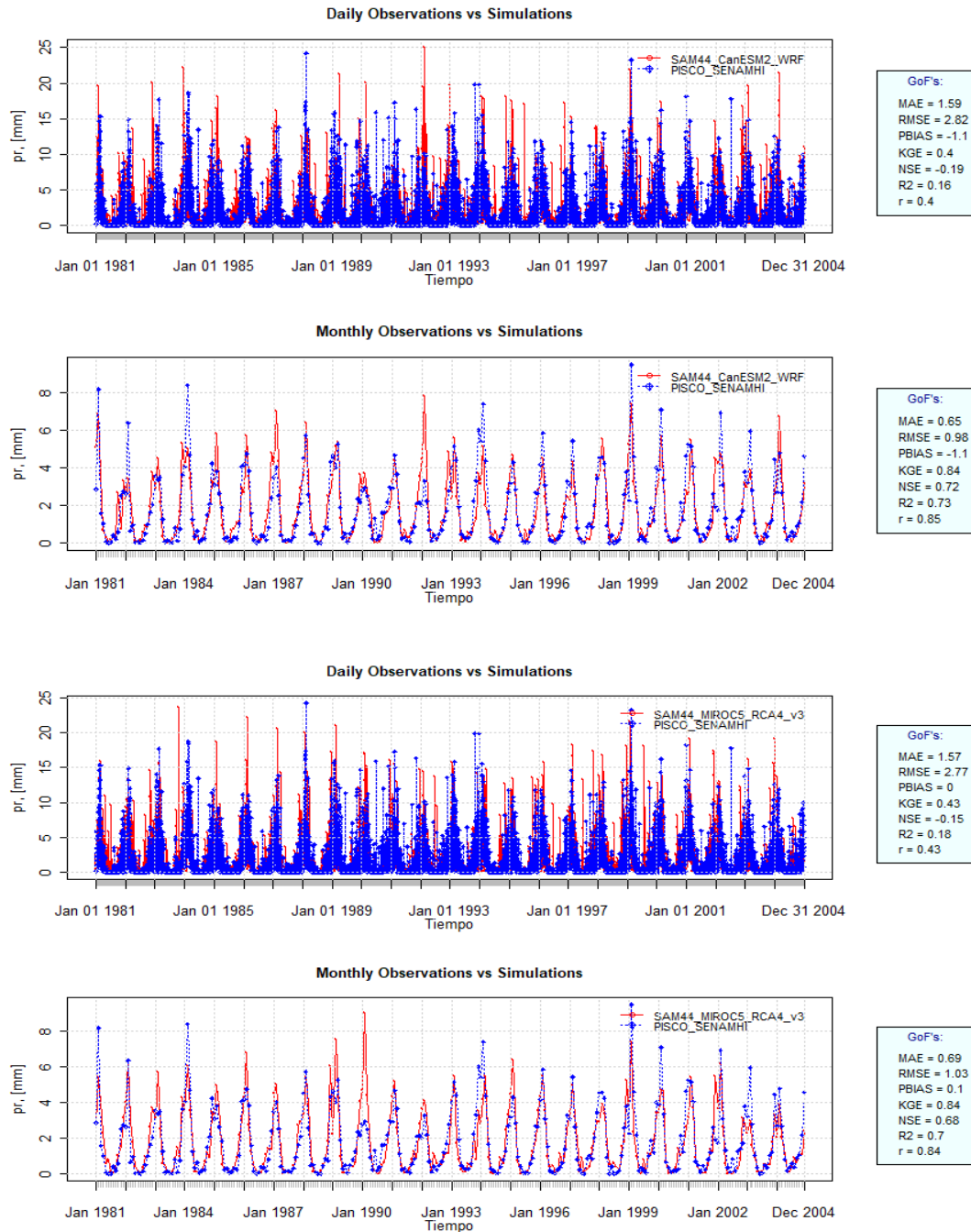
- La herramienta CMhyd requiere datos históricos observados de terreno en formato ASCII, las cuales estas son obtenidas de PISCO del SENAMHI, la cual se utilizó el lenguaje de programación Python para su respectiva descarga, para los puntos (correspondiente a estaciones virtuales) para la cuenca Cachi, para el periodo de 1981 al 2016. Los datos climáticos de ingreso la cual se utilizó fueron para el periodo histórico (1951-2005) y periodo futuro (2046-2100); en formato NetCDF (.nc). Para la reducción de escala (“*power transformation*” para la precipitación y “*distribution mapping*” para la temperatura) y extracción de datos, se realizó en la herramienta CMhyd, como se muestra en la Figura 2.40. Ver Figuras 2.36 y 2.37 para mayor detalle.





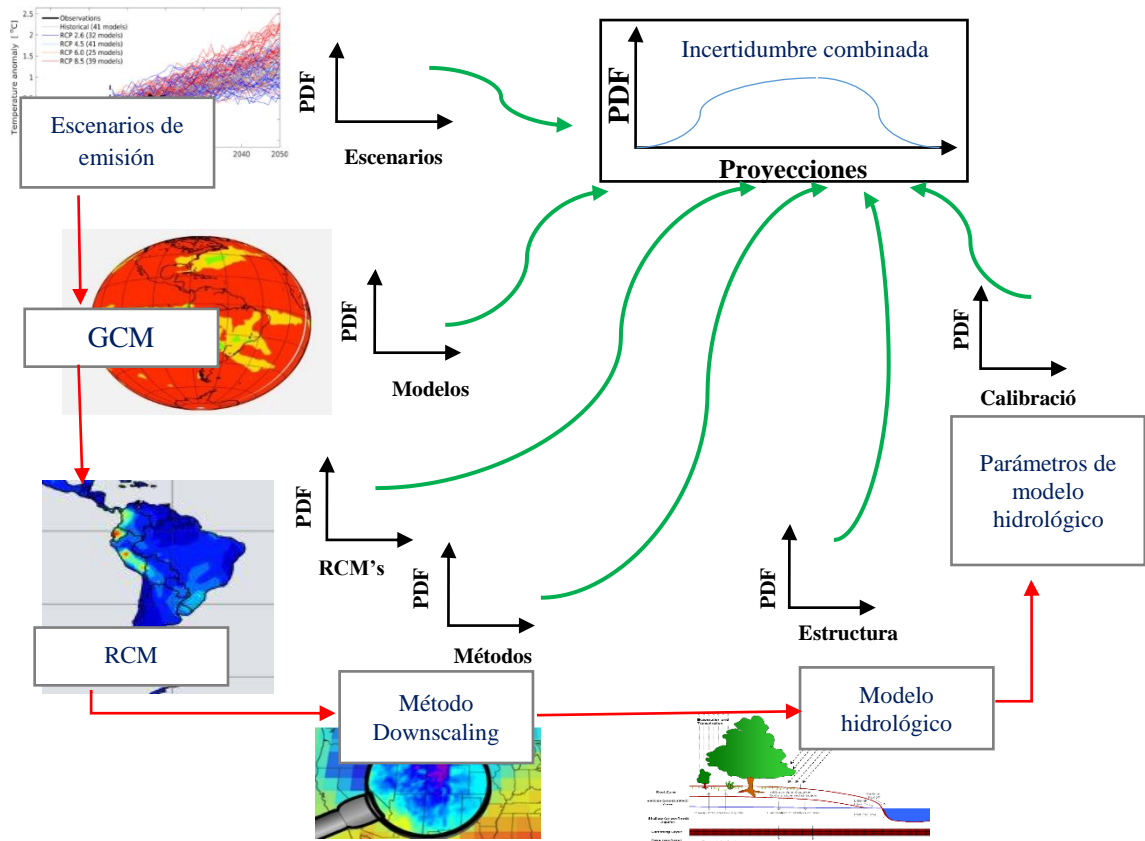
**Figura 2.40.** Downscaling estadístico y extracción de datos con la herramienta CMhyd

- A continuación, se procedió a buscar el modelo que mejor represente al clima histórico de la cuenca, por ende se realizó una comparación estadística de ajuste para el periodo de 1981 al 2004 (Figura 2.41), para los 10 modelos regionales (Anexo 8). La simulación en SWAT se realizó para las décadas del 2070 (2046-2070) y 2090 (2075-2099) para comprender la respuesta hidrológica a mayor detalle.



**Figura 2.41.** Estadística de ajuste de modelos climáticos y la data histórica PISCO del SENAMHI

- Para el trabajo de investigación se utilizó un enfoque de cadena de modelos que conecta modelos de manera eficiente y captura la incertidumbre combinada para localizar las proyecciones de los cambios en la hidrología de la cuenca Cachi, a fin de obtener una respuesta hidrológica a partir del escenario más crítico de cambio climático y comprender el impacto sobre la disponibilidad de los recursos hídricos azules y verdes, como se muestra en la Figura 2.42.



**Figura 2.42.** Enfoque de modelos para análisis de proyecciones (correspondiente a la respuesta hidrológica)

Fuente: Adaptado de <https://ncar.github.io/hydrology/projects/AIST>

## **CAPÍTULO III**

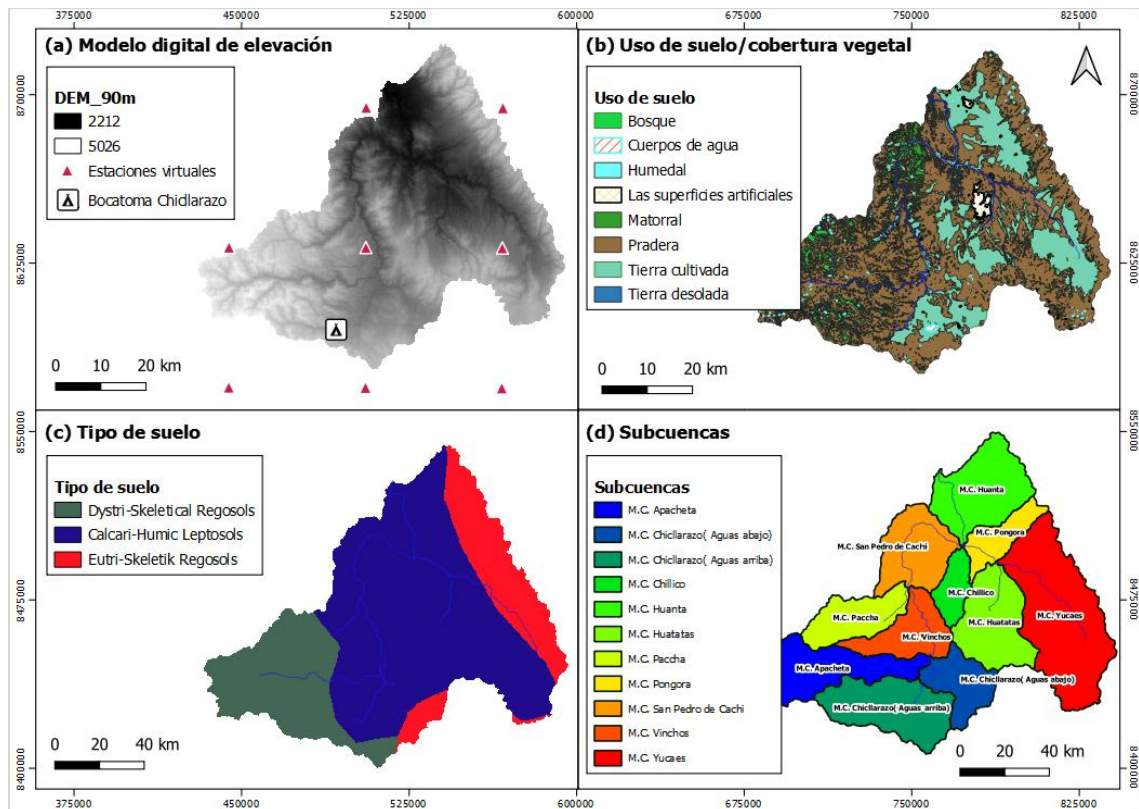
### **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

#### **3.1. EJECUCIÓN DEL MODELO QSWAT**

##### **3.1.1. Características cartográficas de la cuenca de estudio**

Durante la ejecución del modelo QSWAT; primero se realizó la delimitación de cuencas hidrográficas usando TauDEM ejecutando funciones, entre ellas la delimitación de redes de arroyos mediante un área umbral de 100 km<sup>2</sup>, y la delimitación de 11 subcuencas (Tabla 3.3) para un área total de la cuenca de 3600.3 km<sup>2</sup>. En segundo lugar, mediante el DEM se creó las unidades de respuesta hidrológica (HRU's) homogéneas; por ende, los umbrales de los HRU's filtrados en el modelo SWAT se establecieron en un 4% y 8% para el uso del suelo, tipo de suelo y pendiente obteniéndose 165 HRU's. Para la simulación de la producción de flujos de agua azul y verde; el periodo completo de simulación cubre 36 años (1981-2016) de información meteorológica grillada (estaciones virtuales).

Las Tablas 3.1 y 3.2 muestran los resultados de las características del Uso y Tipo de suelo.



**Figura 3.1.** Composición: (a): DEM, (b): Uso de suelo, (c): Tipo de suelo, (d): Subcuencas

**Tabla 3.1.** Características del Uso de suelo/Cobertura vegetal

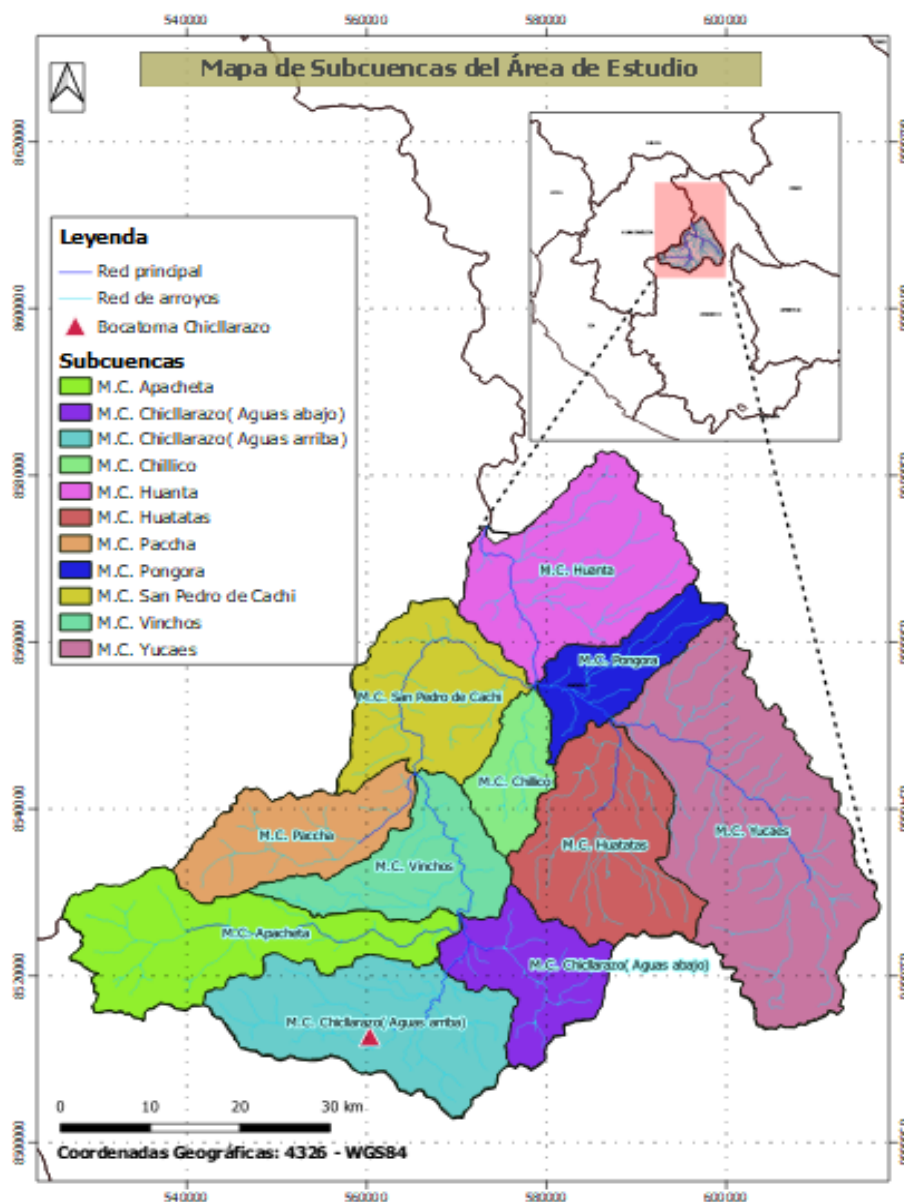
Uso de suelo	Código	Área (km <sup>2</sup> )	% cuenca
Bosque	BOSQ	172.4	4.79
Cuerpos de agua	CAGU	6.9	0.19
Humedal	HUMD	6.6	0.18
Tierra urbana	SART	32.2	0.90
Matorral	MATR	213.9	5.94
Pradera	PRAD	2312.0	64.22
Tierra cultivada	TCUL	825.9	22.94
Tierra desolada	TDES	30.3	0.84

**Tabla 3.2.** Características del Tipo de suelo (Edafología)

Tipo de suelo	Código	Área (km <sup>2</sup> )	% cuenca
Dystri-Skeletal Regosols	RGd	777.5	21.60
Calcari-Humic Leptosols	Lpe	2211.3	61.42
Eutri-Skeletal Regosols	Rge	611.6	16.99

**Tabla 3.3.** Características de las subcuencas simuladas en SWAT

Subcuencas	Área (km <sup>2</sup> )	% cuenca
San Pedro de Cachi	310.3	8.62
Vinchos	242.7	6.74
Pongora	160.4	4.45
Yucaes	742.7	20.63
Paccha	241.5	6.71
Huatatas	365.9	10.16
Chillico	120.4	3.34
Chicllarazo (aguas arriba)	401.2	11.14
Apacheta	398.9	11.08
Huanta	405.1	11.25
Chicllarazo (aguas abajo)	211.2	5.87
<b>Total</b>	<b>3600.3</b>	<b>100</b>



**Figura 3.2.** Mapa de subcuencas (resultado de la simulación) de la cuenca Cachi

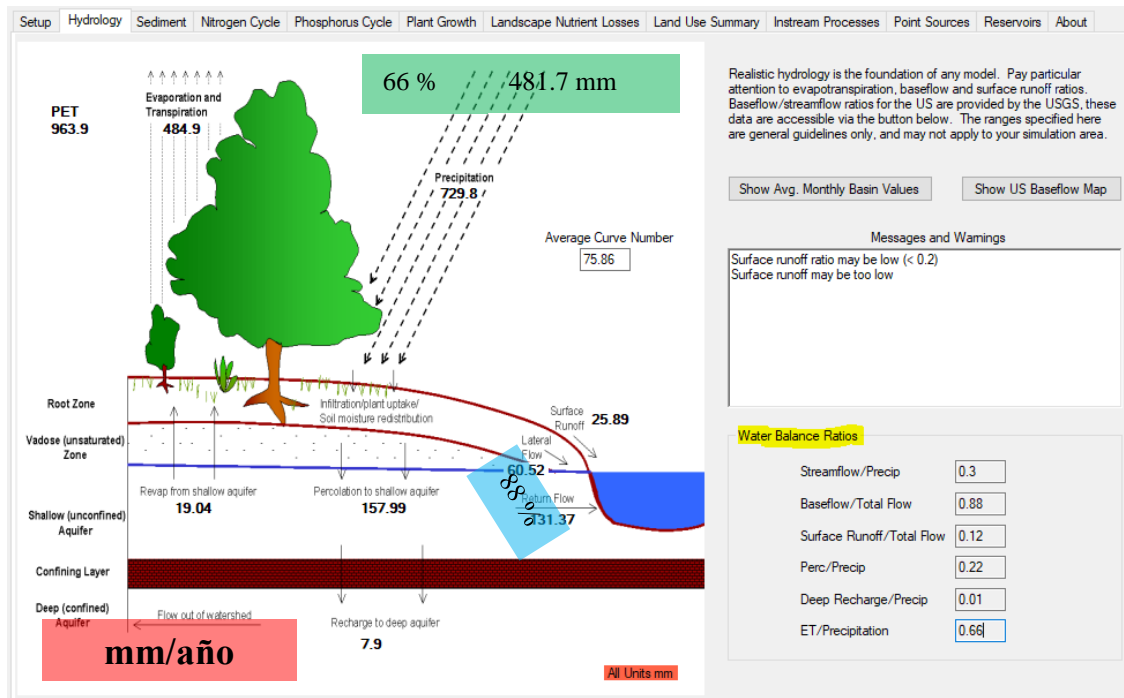
### 3.1.2. Disponibilidad de flujos de agua azul y verde durante el periodo histórico

Como sabemos los flujos de agua azul y verde tienen su origen en el balance hídrico de la cuenca, donde los cálculos de agua azul y agua verde se basaron en promedios de varios años. Por ejemplo, la cantidad de agua en la década del año 2000 fue el promedio anual de 1981- 2016, así para las próximas décadas; la cual se simuló a partir de la información del Uso del suelo, Tipo de suelo y clima. La relación entre el flujo total, el flujo base y el flujo del suelo se estimó en la cuenca Cachi, mediante ratios para comprender los flujos de agua azul y verde.

- Las proporciones (ratios) fue resultado de la simulación del modelo, tal como se muestra en la Figura 3.3 en la opción “*Water Balance Ratios*”, donde la tasa de escorrentía superficial puede ser menor (<0.2); estas se obtienen mediante una relación entre las variables simuladas a nivel de promedio anual (mm/año) del balance de agua durante el periodo base, por ejemplo para la proporción del flujo base y flujo total se obtiene de la siguiente manera:

$$\frac{\text{Flujo base}}{\text{Flujo total}} = \frac{\text{Flujo lateral (FL)} + \text{Flujo de retorno (FR)}}{\text{Flujo lateral} + \text{Flujo de retorno} + \text{Escorrentía superficial}} = \frac{60.52 + 131.37}{60.52 + 131.37 + 25.89} = 0.88 \text{ (88\%)}$$

La cual significa que el 88% del flujo de agua azul total, representa el volumen de agua subterránea y la contribución de la corriente de flujo que se origina debajo de la superficie; de igual manera podemos notar que (FL < FR) donde el rendimiento hídrico de la cuenca es óptimo, caso contrario el rendimiento de agua puede ser excesivo la cual presentaría un problema con el flujo de agua subterránea.



**Figura 3.3.** Resultado de la simulación hidrológica para el periodo 1981-2016 en el modelo SWAT

- La cuenca del río Cachi experimenta una pérdida del sistema a la atmósfera por agua verde en flujo: evapotranspiración real (481.7 mm, 66% de la precipitación). De aquí, la proporción de la evapotranspiración real entre la precipitación es de 0.66 (66%) como se muestra en la Tabla 3.4.

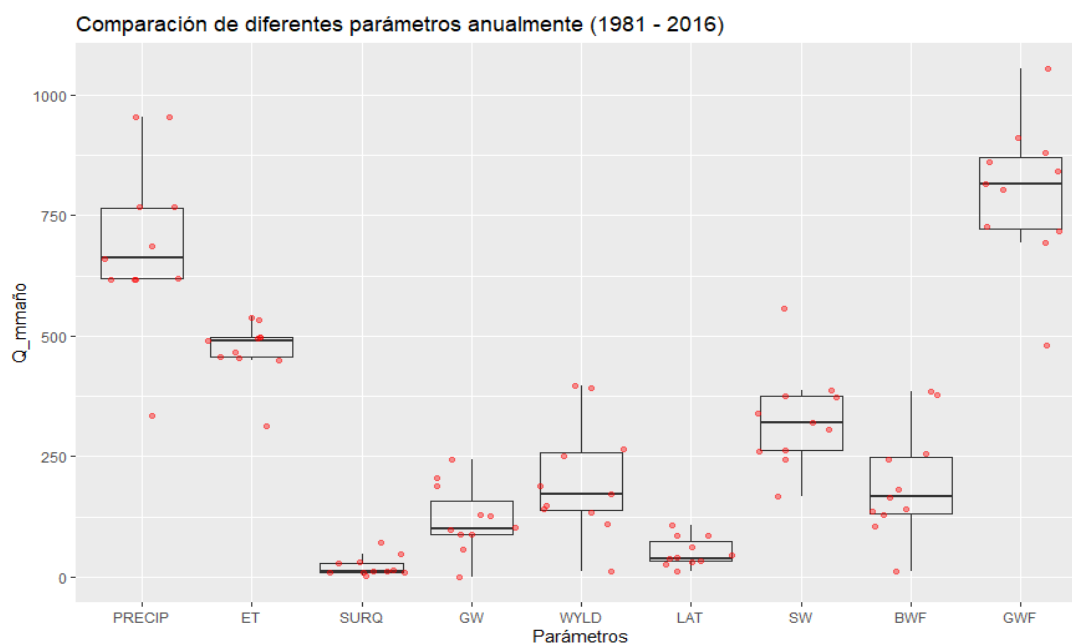
**Tabla 3.4.** Ratios de balance hídrico para el periodo de 1981-2016 (resultado de la simulación)

Periodo	SF / base	BF/ FT	SR/ FT	Perc/ Prec	DR/ Prec	ET/Prec
Ratio	0.3	0.88	0.12	0.22	0.01	0.66
%	30	88	12	22	1	66

**Dónde:** SF = Flujo de corriente, Prec = Precipitación, BF = Flujo base, SR = Escorrentía superficial, FT= Flujo total, Perc = Percolación, DR = Recarga profunda, ET = Evapotranspiración real.

Los medios anuales de precipitación, el agua azul y agua verde durante el periodo base representan el 645.5 mm, 198.5 mm, y 767 mm respectivamente (Figura 3.4 y 3.5). Estos valores se tomarán en cuenta para el análisis de la respuesta hidrológica, bajo efecto del cambio climático.



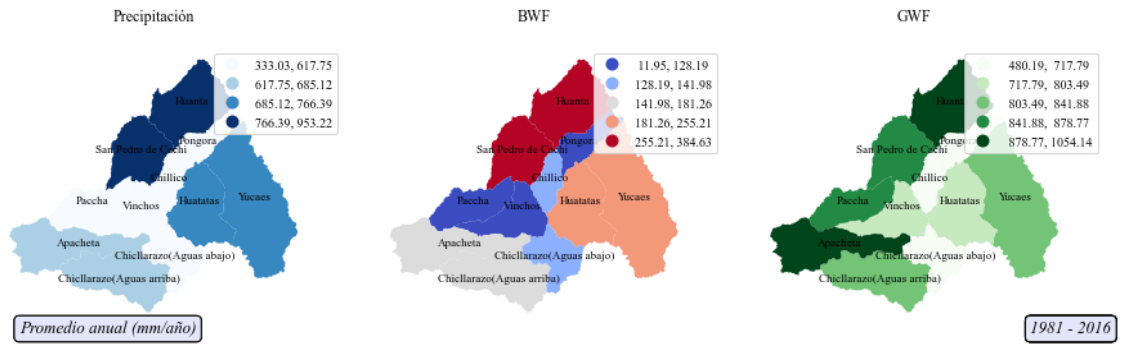


**Figura 3.4.** Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 1981 - 2016

**Dónde:** PRECIP: Precipitación, ET: Evapotranspiración real (agua verde en flujo), SW (agua verde en almacenamiento): Humedad de suelo, SURQ: Flujo superficial, GW: Flujo subterráneo, WYLD: Rendimiento hídrico, LAT: Flujo lateral, BWF (SURQ+GW+LAT): Flujos de agua azul, GWF: (ET+SW): Flujos de agua verde, PET\*: Evapotranspiración potencial.

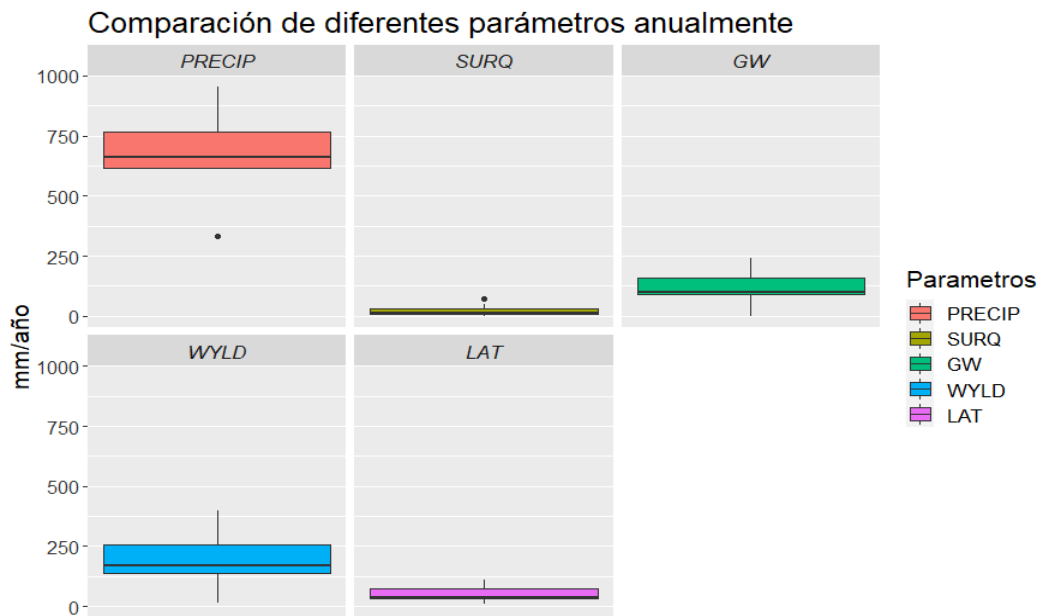
**Tabla 3.5.** Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 1981-2016

Mes	PP (mm)	SURQ (mm)	LAT (mm)	WYLD (mm)	ET (mm)	PET (mm)
Enero	131.18	5.14	11.37	20.61	69.77	86.56
Febrero	144.97	5.47	16.91	38.98	70.01	75.49
Marzo	166.82	12.72	20.89	69.88	66.62	70.31
Abril	43.11	0.55	4.42	45.76	46.94	58.58
Mayo	12.82	0.06	0.37	26.98	36.40	78.31
Junio	10.35	0.16	0.28	11.15	15.27	80.11
Julio	4.65	0.00	0.10	2.04	8.45	94.46
Agosto	8.83	0.00	0.13	0.84	9.32	96.09
Septiembre	37.61	1.14	1.06	2.68	24.40	73.04
Octubre	40.57	0.06	0.91	1.53	38.31	80.70
Noviembre	41.53	0.10	1.03	1.60	39.06	84.65
Diciembre	91.01	0.64	3.48	4.63	62.09	87.46
<b>Total</b>	<b>733.45</b>	<b>26.04</b>	<b>60.95</b>	<b>226.68</b>	<b>486.64</b>	<b>965.76</b>

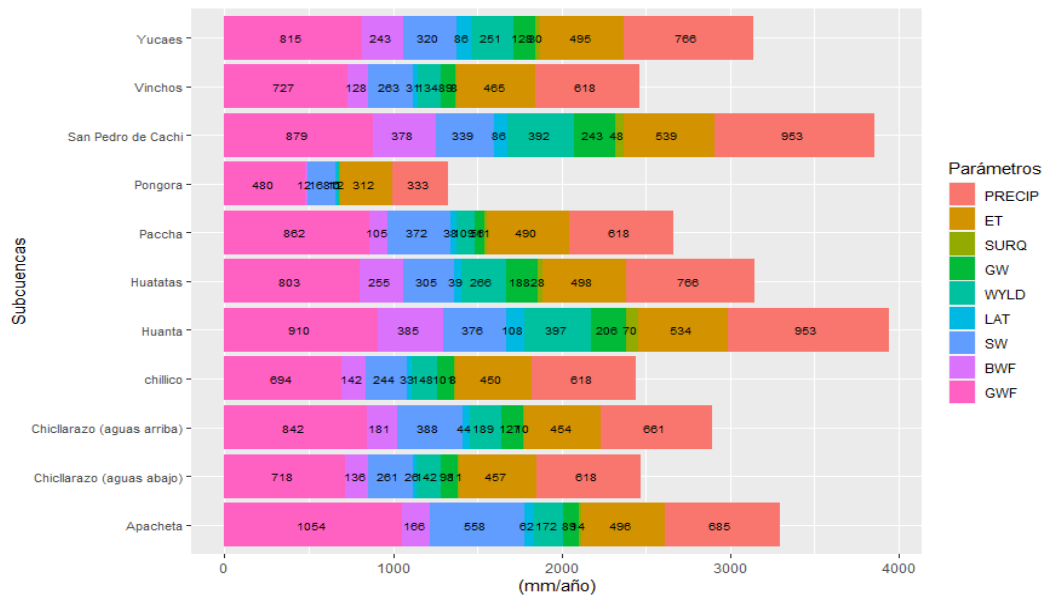


**Figura 3.5.** Distribución de los medios anuales de lluvia, agua azul y verde en el periodo histórico (1981 – 2016)

En la Figura 3.6 se muestra que la precipitación se encuentra encima de los 500 mm y debajo de los 750 mm, de igual forma las variables del flujo de agua azul: SURQ (0-50 mm), GW (0-250 mm), LAT (0-50 mm) a nivel de la cuenca y subcuencas (Figura 3.7).



**Figura 3.6.** Comparación de diferentes parámetros de flujos de agua azul para el periodo de 1981- 2016



**Figura 3.7.** Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 1981-2016

### 3.2. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN DEL MODELO

#### 3.2.1. Análisis de sensibilidad

El análisis de sensibilidad nos permite conocer las variaciones de los parámetros importantes que muestran cambios de la hidrología a nivel de la cuenca, en este estudio un total de 16 parámetros fueron sometidos a la calibración utilizando SWAT-CUP y el método de ajuste secuencial de incertidumbre (SUFI-2). En este algoritmo, se calculó bajo niveles de la distribución acumulada para una incertidumbre de 2.5% (L95PPU) y 97.5% (U95PPU). También se utilizó el factor P, el factor R, factor t-stat y p-value; donde el parámetro con un valor absoluto más alto de t-stat y un valor p-value cercano a cero tendrá un mayor efecto sobre la variable en el análisis de sensibilidad. Si bien para la calibración se presentan rangos más plausibles de valores óptimos de parámetros; sin embargo, se presentó al final un rango de parámetros más significativos para calibrar el flujo superficial y flujo base como se muestra en la Figura 3.8, con el objetivo de ajustar los datos observados y simulados.

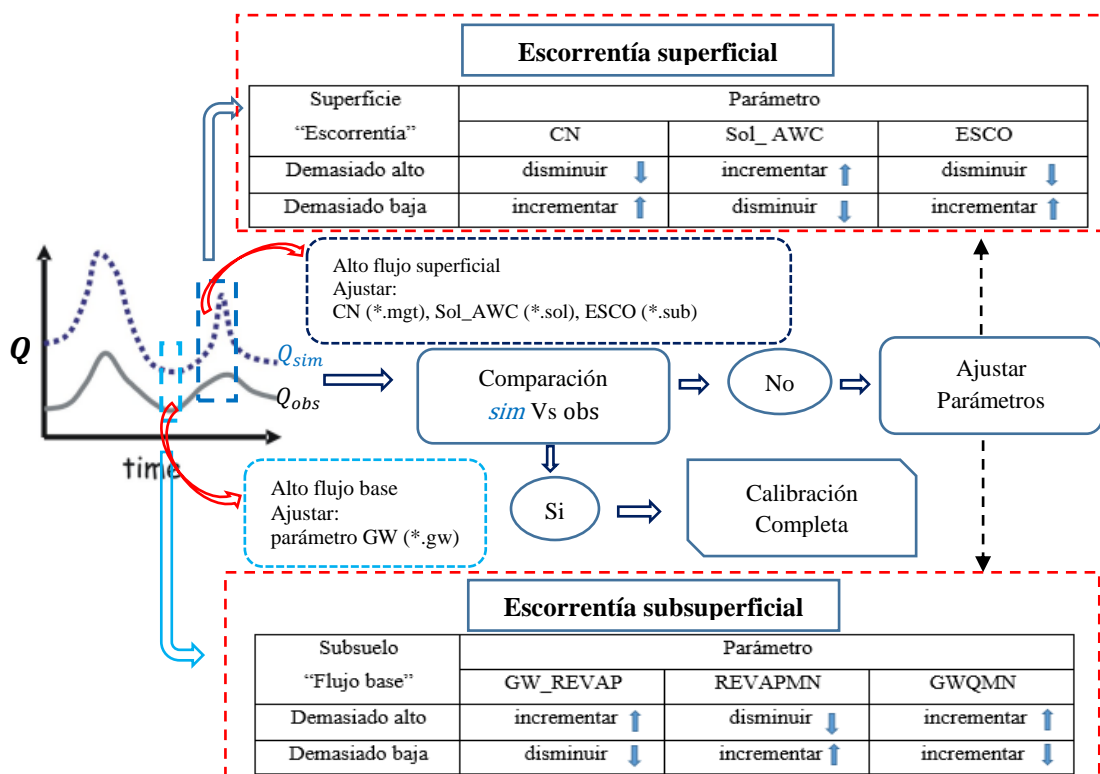


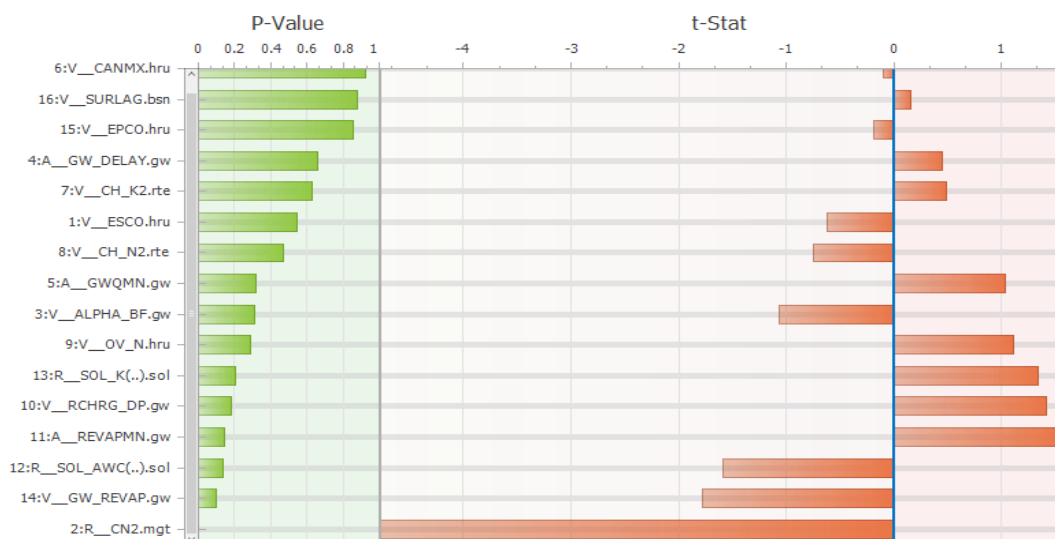
Figura 3.8. Diagrama de flujo para ajuste de parámetros en el modelo SWAT

Tabla 3.6. Parámetros utilizados para el análisis de sensibilidad en la cuenca Cachi

Parámetro	Rango	
	Min	Max
r _ CN2.mgt	-20%	20%
v _ ALPHA_BF.gw	0	1
a _ GW_DELAY.gw	0	500
a _ GWQMN.gw	0	5000
v _ CH_K2.rte	0	10
v _ CH_N2.rte	0.01	0.2
v _ EPCO.hru	0	1
v _ ESCO.hru	0.7	0.95
v _ GW_REVAP.gw	0.02	0.2
a _ REVAPMN.gw	0	500
r _ SOL_AWC ().sol	-0.05	0.05
r _ SOL_K ().sol	-0.05	0.05
v _ SURLAG.bsn	0.01	12
v _ OV_N.hru	-0.29	-0.07
v _ RCHRG_DP.gw	0	1
v _ CANMX.hru	0	10

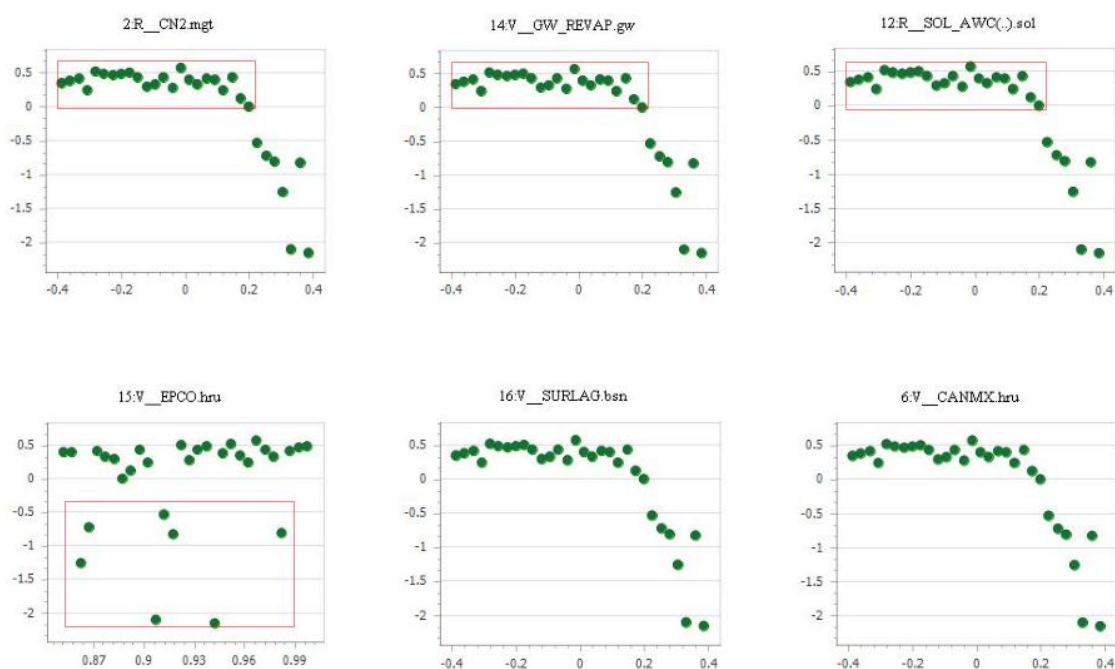
Al utilizar los parámetros mencionados en la Tabla 3.6 y realizar el análisis de sensibilidad se encontraron los 3 parámetros más sensibles entre ellos tenemos; el número de curva para la condición de humedad II (CN2), coeficiente de “revaporización” de agua subterránea (GW\_REVAP) y la capacidad de agua disponible en el suelo (SOL\_AWC) que presentan procesos de escorrentía (flujo superficial), agua subterránea (flujo base) y suelo (humedad de suelo), respectivamente; de hecho son procesos acordes al área de estudio de la cuenca, considerando el curva número como parámetro sensible para el flujo superficial.

En la Figura 3.9, el factor p-value determina la importancia de la sensibilidad, siendo los valores más cercanos a cero los de mayor sensibilidad; por otro lado, el factor t-Stat, donde los valores absolutos mayores representan una medida de mayor sensibilidad.



**Figura 3.9.** Análisis de sensibilidad de los parámetros

En la Figura 3.10 se muestra el diagrama de puntos (correspondiente al número de iteraciones: 30) para algunos parámetros, donde en el eje ‘y’ representa la función objetivo (>0.5); la cual el parámetro EPCO.hru (Factor de compensación de absorción de plantas) presenta cambios aleatorios lo que significa que es menos sensible a diferencia de otros parámetros.



**Figura 3.10.** Parcelas de puntos (valor de parámetros vs función objetivo)

**Tabla 3.7.** Resultados de los parámetros calibrados para la cuenca Cachi

Parámetro	Factor		Rank
	t-Stat	p-Value	
r_CN2.mgt	-4.7701	0.0003	1
v_GW_REVAP.gw	-1.7755	0.0992	2
r_SOL_AWC ().sol	-1.5885	0.1361	3
a_REVAPMN.gw	1.5448	0.1463	4
v_RCHRG_DP.gw	1.4201	0.1791	5
r_SOL_K ().sol	1.3352	0.2047	6
v_OV_N.hru	1.1112	0.2865	7
v_ALPHA_BF.gw	-1.0589	0.3088	8
a_GWQMN.gw	1.0325	0.3206	9
v_CH_N2.rte	-0.7488	0.4672	10
v_ESCO.hru	-0.6248	0.5428	11
v_CH_K2.rte	0.4923	0.6306	12
a_GW_DELAY.gw	0.4483	0.6612	13
v_EPCO.bsn	-0.1863	0.8550	14
v_SURLAG.bsn	0.1520	0.8814	15
v_CANMX.hru	-0.0936	0.9268	16

### 3.2.2. Calibración y validación

Para la calibración y validación se utilizaron descarga del caudal mensual de la estación de medición de la bocatoma Chicllarazo ubicada agua arriba de la subcuenca Chiellarazo (Figura 3.11), cuyas aguas drenan sobre el río Cachi. El periodo para la calibración (1992-1998) se utilizó para medir el rendimiento del modelo. Los resultados de la calibración del caudal mostraron una concordancia aceptable en la que los valores de NSE y R2 fueron 0.57 y KGE de 0.64; este último considerado como la versión modificada del NSE. Las Figuras 3.12 y 3.13 muestra la descarga (observada y simulada) y banda de incertidumbre al 95PPU, respectivamente, durante el proceso de la calibración. La validación del modelo se realizó con cuatro años, de 1999 al 2002, donde se muestra una mejora del NSE, R2 y KGE de 0.62, 0.63 y 0.75 respectivamente; en general, hubo un ajuste aceptable entre la salida observada y simulada. Se consideró número de iteraciones de 30 y obteniéndose como resultado los valores de los parámetros calibrados (Tabla 3.8).

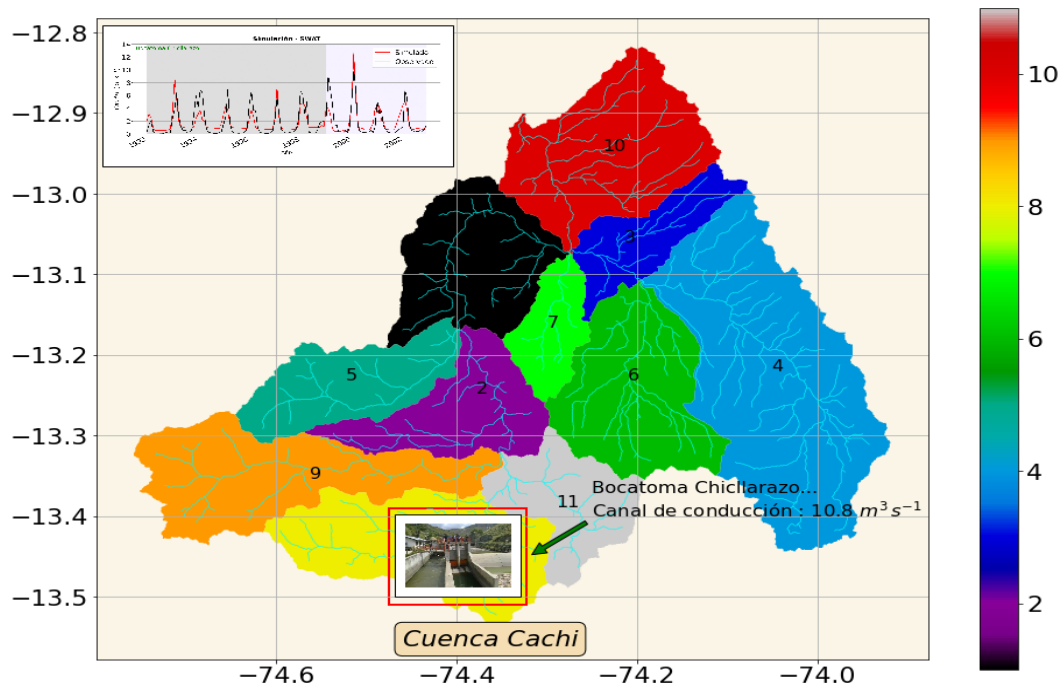


Figura 3.11. Ubicación de la bocatoma Chicllarazo (aguas arriba)

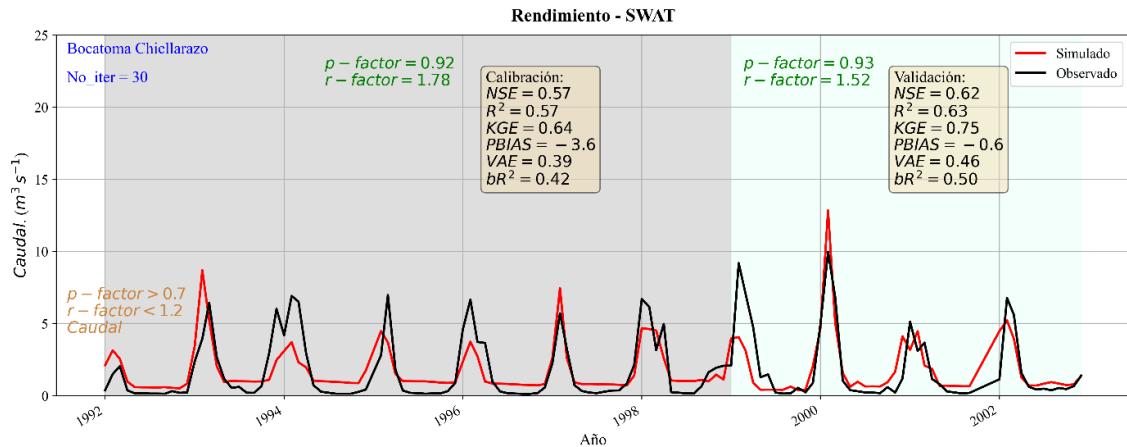


Figura 3.12. Series de tiempo de flujo mensual calibrado y validado

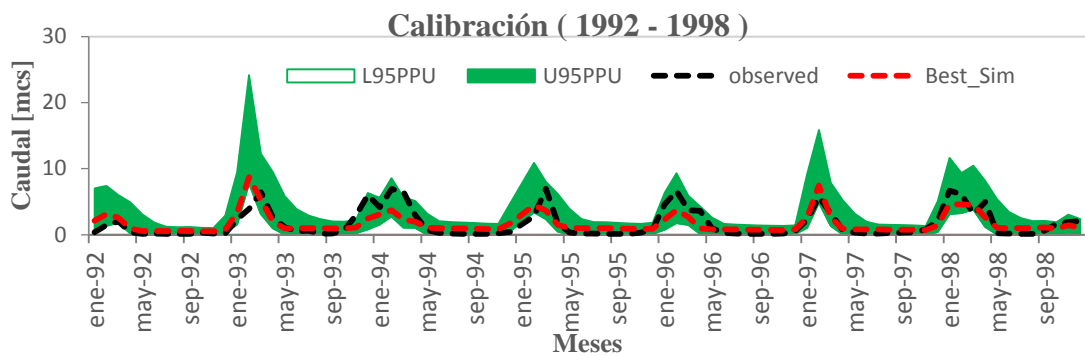


Figura 3.13. Series observadas y simuladas con banda de probabilidad (95PPU)

Tabla 3.8. Valor ajustado de los parámetros calibrados

Parámetro	Valor Valor ajustado	Rank
r_CN2.mgt	-0.0133	1
v_GW_REVAP.gw	0.0830	2
r_SOL_AWC ().sol	-0.6900	3
a_REVAPMN.gw	191.667	4
v_RCHRG_DP.gw	0.3833	5
r_SOL_K ().sol	0.8750	6
v_OV_N.hru	0.5098	7
v_ALPHA_BF.gw	0.1167	8
a_GWQMN.gw	1083.33	9
v_CH_N2.rte	0.1598	10
v_ESCO.hru	0.9675	11
v_CH_K2.rte	325.003	12
a_GW_DELAY.gw	424.999	13
v_EPCO.bsn	0.3833	14

r\_: multiplicar (Vor\*(Vd+1)); Vor: valor original, Vd: valor dado  
v\_: reemplazo al valor original, a\_: sumar al valor original



En la Tabla 3.9 se muestra el resumen del rendimiento del modelo para la calibración y la validación.

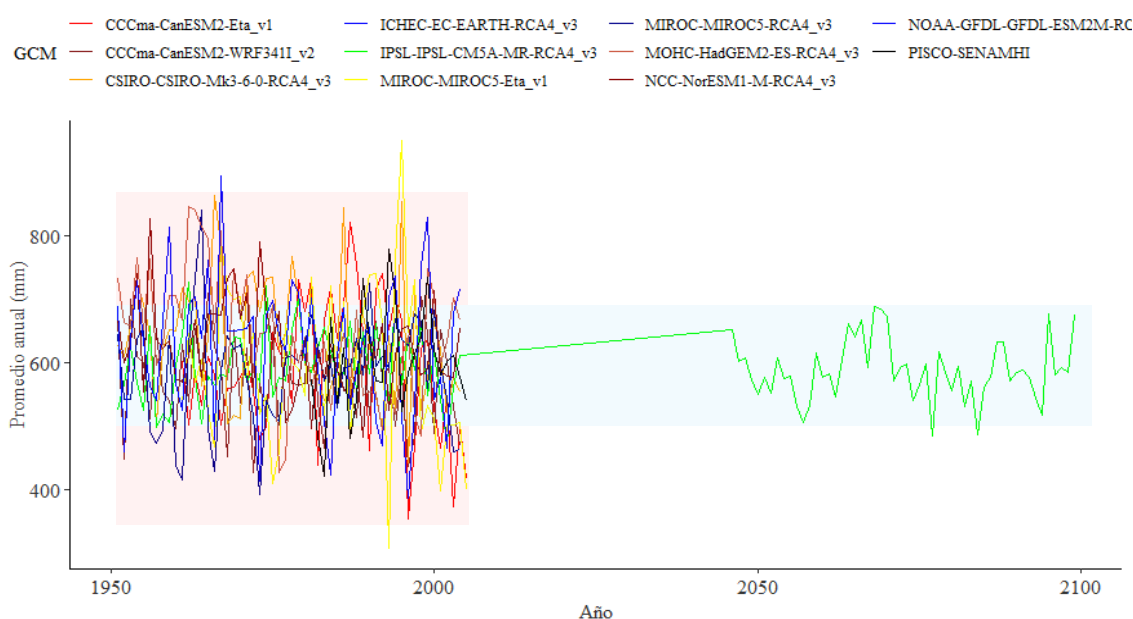
**Tabla 3.9.** Estadísticas de ajuste del rendimiento del modelo

Periodo	Media observada (m <sup>3</sup> /s)	Media simulada (m <sup>3</sup> /s)	Rendimiento del modelo					
			NSE	R2	KGE	PBIAS	VAE	bR2
Calibración (1992 – 1998)	1.64	1.69	0.57	0.57	0.64	-3.6	0.39	0.42
Validación (1999 – 2002)	1.97	1.96	0.62	0.63	0.75	-0.6	0.46	0.50

### 3.3. RESPUESTA HIDROLÓGICA AL CAMBIO CLIMÁTICO EN FLUJOS DE AGUA AZUL Y VERDE

#### 3.3.1. Modelos climáticos y corrección de sesgos

Una vez calibrado y validado el modelo bajo la optimización de parámetros, se realizó el ingreso de datos forzantes; como la temperatura y precipitaciones futuras al modelo SWAT, para las décadas del año 2060 (2046 – 2070) y 2090 (2075 – 2099), a partir del modelo que mejor representó el clima histórico de la cuenca, donde se consideró 10 modelos climáticos regionales del CORDEX las cuales fueron reducidos por técnicas estadísticas (“*downscaling*”), empleando corrección de sesgo por transformación de potencia (PT) y el mapeo de distribución (DM) para la precipitación y temperatura respectivamente. Los modelos climáticos se han evaluado, donde el modelo IPSL-CM5A-MR, representó una aproximación confiable con el clima histórico del área de estudio, como se muestra en la Figura 3.14.

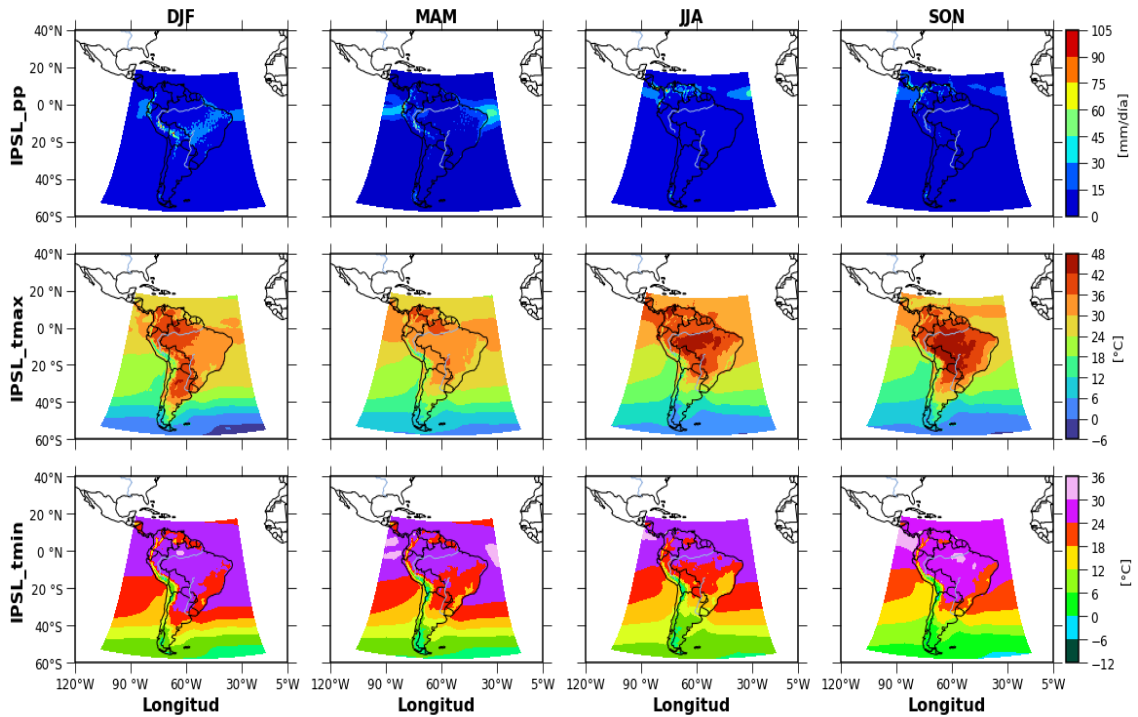


**Figura 3.14.** Comparación de los modelos GCMs-RCMs y el producto PISCO-SENAMHI

Al realizar el análisis estadístico de ajuste de datos simulados históricos de los modelos, con los datos observados del producto PISCO, el modelo climático francés IPSL-CM5A-MR (Figura 3.15) resultó como óptimo para el área de estudio (Tabla 3.10), considerando a paso mensual; mientras a paso diario (Anexo 8) el rendimiento es menor de lo esperado, posiblemente esto se debe al tipo de corrección.

**Tabla 3.10.** Rendimiento de los modelos climáticos para la cuenca Cachi

País	Centro	Modelo	R	Rendimiento		
				R2	RMSE	NSE
Francia	IPSL	IPSL-CM5A-MR	0.87	0.75	0.93	0.74
Internacional	ICHEC	EC-EARTH	0.86	0.74	0.96	0.73
Australia	CSIRO	CSIRO-MK3.6.0	0.85	0.72	0.99	0.71
Brasil	INPE	ETA V1	0.84	0.71	1.02	0.69
Reino Unido	MOHC	HadGEM2-ES	0.83	0.69	1.04	0.68
Japón	MIROC	MIROC5	0.84	0.70	1.03	0.68
Noruega	NCC, NMI	NorESM1-M	0.83	0.70	1.03	0.68
USA	NOAA-GFDL	GFDL-ESM2M	0.82	0.67	1.12	0.63
Canadá	CCCma	CanESM2	0.85	0.73	0.98	0.72
Brasil	MIROC	ETA V1	0.76	0.60	1.27	0.52



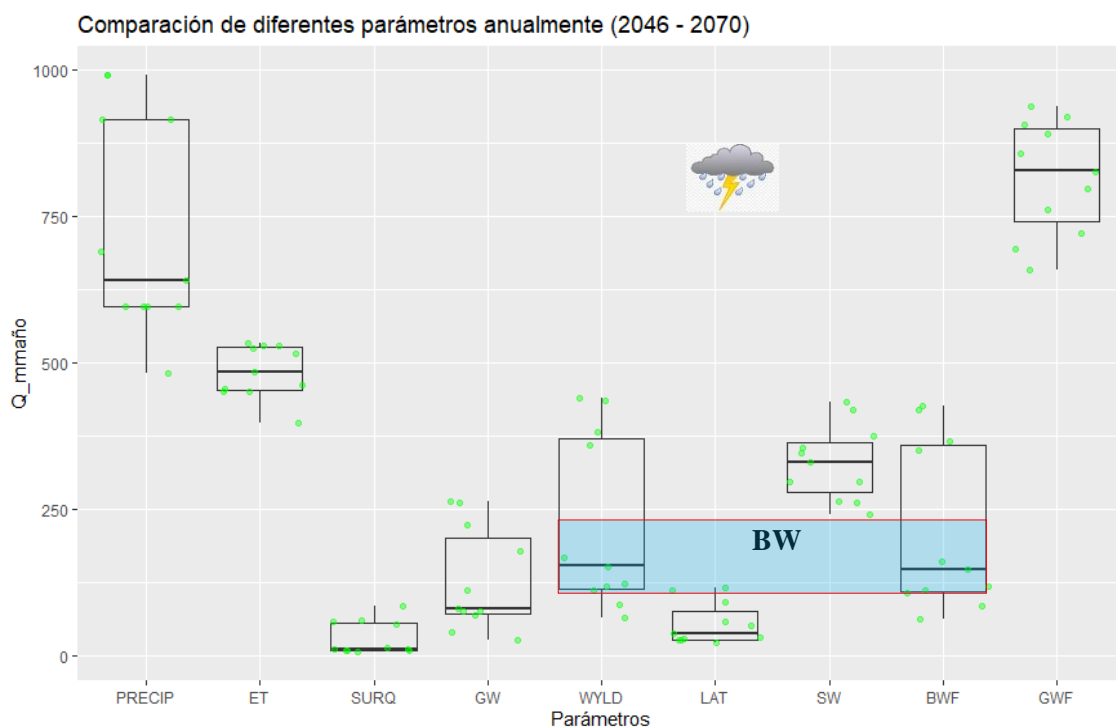
**Figura 3.15.** Climatología regional (DJF: Verano, MAM: Otoño, JJA: Invierno, SON: Primavera) del modelo IPSL-CM5A-MR

### 3.3.2. Respuesta hidrológica al cambio climático en flujos de agua azul

#### a) Flujos de agua azul (BWF) para la década del 2060 (2046-2070)

La simulación futura se realizó a partir del modelo IPSL-CM5R-MR, donde se obtuvo como resultado; la media anual de la lluvia de 736 mm (Figura 3.16) para la década del 2060; la cual aporta 40.6% (412.5 mm) de agua azul para las subcuencas de Huanta y San Pedro de Cachi (Figura 3.17 y 3.18), mientras tanto se proyecta un aumento de los flujos del agua azul en 19% (198.5 mm - 245.5 mm), respecto al periodo histórico, por el contrario, desciende en 6.1% (245.5 mm - 230.5 mm) para las subcuencas del sur. En la Figura 3.16 podemos observar que el BWF es similar al WYLD la cual se encuentra por encima de 100 mm y debajo de 250 mm, por lo cual significa que la cantidad de agua aportada por las subcuencas es proporcional al BWF, obteniendo una conclusión tentativa:

$$\text{WYLD} = \text{SURQ} + \text{LATQ} + \text{GWQ} \text{ y } \text{BWF} = \text{WYLD} (\text{rendimiento hídrico}) + \text{GW\_RCHG} (\text{recarga total al acuífero\_salida HRU}).$$



**Figura 3.16.** Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 2046-2070

La Tabla 3.11 muestra las variables del balance hídrico: PP, SURQ, LAT, WYLD, etc.

**Tabla 3.11.** Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 2046-2070

Mes	PP (mm)	SURQ (mm)	LAT (mm)	WYLD (mm)	ET (mm)	PET (mm)
Enero	161.43	7.73	16.37	33.05	79.63	91.61
Febrero	142.51	5.53	16.36	45.09	73.08	76.95
Marzo	174.39	18.50	21.12	79.95	70.72	76.14
Abril	26.13	0.37	2.47	44.63	45.48	75.73
Mayo	5.26	0.00	0.14	25.18	24.29	104.92
Junio	4.74	0.01	0.10	7.86	9.27	99.32
Julio	2.23	0.00	0.03	1.23	5.49	115.54
Agosto	11.33	0.00	0.17	0.81	9.59	113.30
Septiembre	47.60	2.94	2.09	5.71	28.05	79.05
Octubre	54.07	1.11	2.04	4.96	41.84	83.04
Noviembre	40.85	0.23	1.18	3.61	41.52	97.61
Diciembre	112.01	1.20	5.42	8.66	70.05	93.99
<b>Total</b>	<b>782.55</b>	<b>37.62</b>	<b>67.49</b>	<b>260.74</b>	<b>499.01</b>	<b>1107.2</b>

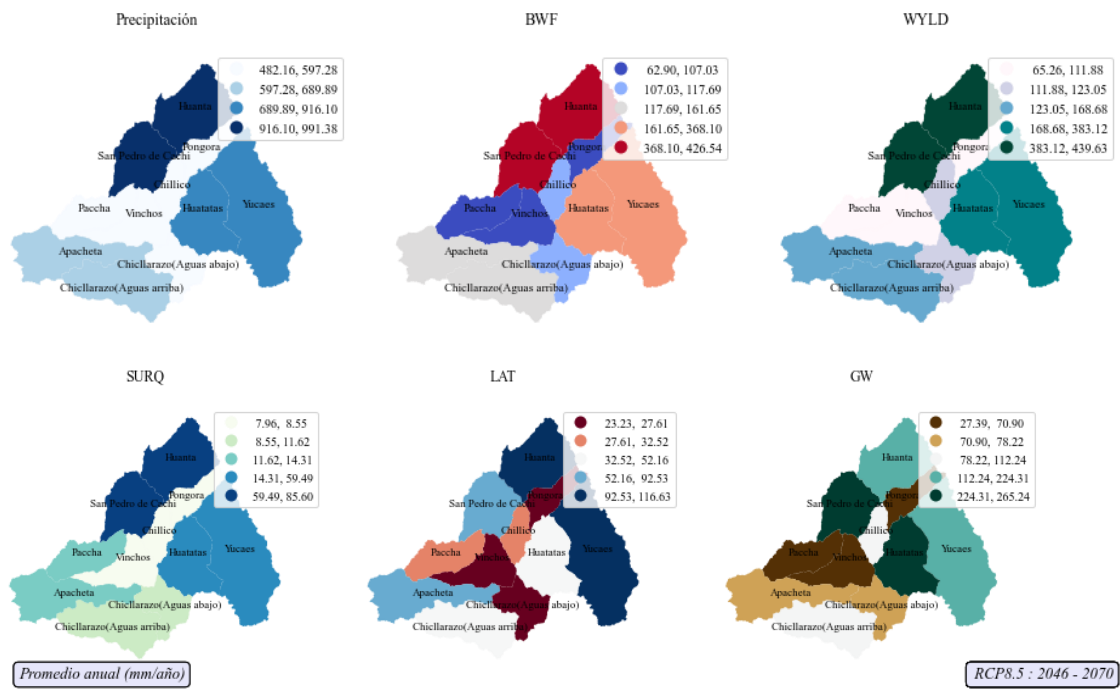


Figura 3.17. Flujo de agua azul media anual para la década del (2046-2070)

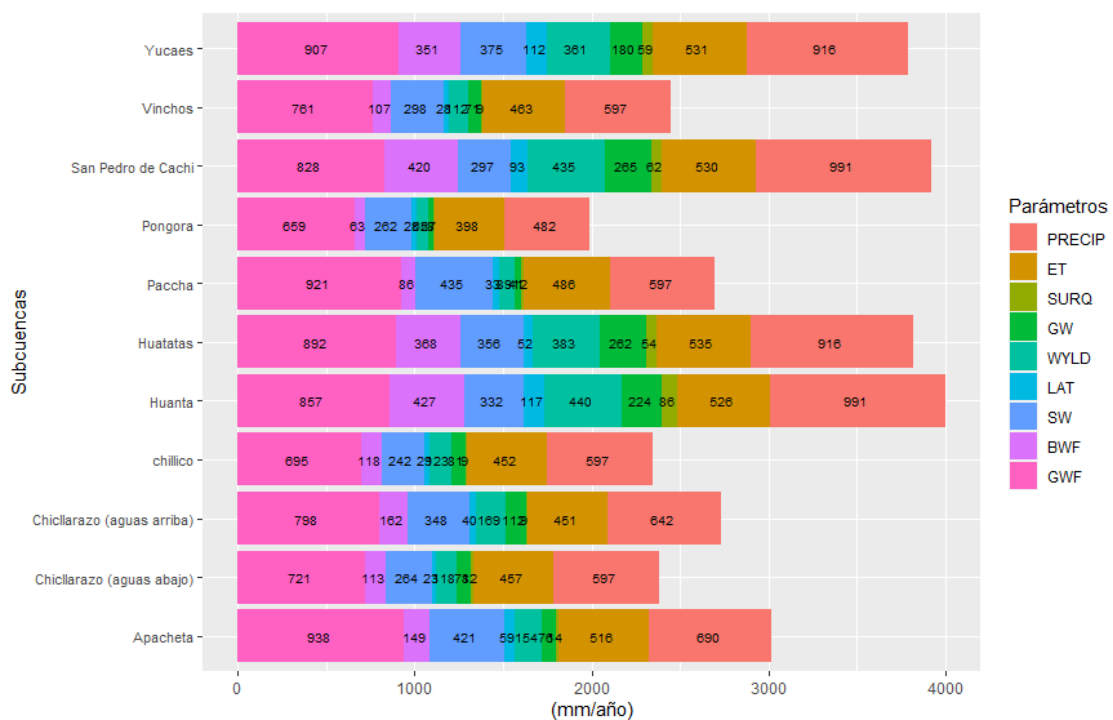
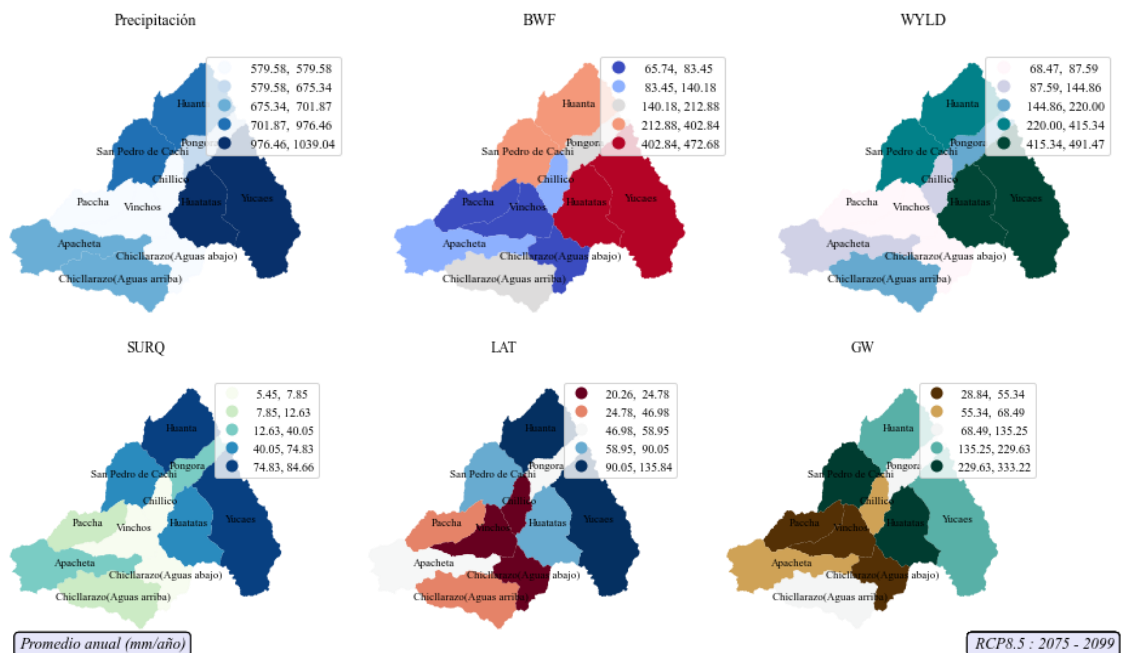


Figura 3.18. Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 2046-2070

**b) Flujos de agua azul (BWF) para la década del 2090 (2075-2099)**

El patrón espacial como forzante del agua azul fue influenciado principalmente por la lluvia. Sin embargo, la distribución de la lluvia presenta un cambio mayor para la

década del 2090 (2075 – 2099); con un promedio anual de 809 mm de lluvia que aporta un 44.3% (451mm) de agua azul; específicamente para las subcuencas de Yucaes y Huatatas (Figura 3.19), donde aumentan los flujos de agua azul en 40.3% (430 mm – 473 mm); mientras se observa una disminución considerable de 35.1% (269.5 mm – 175 mm) para las subcuencas (Huanta y San Pedro de Cachi) y las subcuencas del sur en comparación con el periodo histórico. Esta es validada de igual forma con el rendimiento hídrico que es directamente proporcional al agua azul. En general tanto la lluvia, rendimiento hídrico, y el agua azul varían de manera aleatoria con el tiempo; tanto en las regiones más húmedas y periodos secos a nivel de subcuencas, está probablemente se verá afectada por el cambio climático en el futuro.



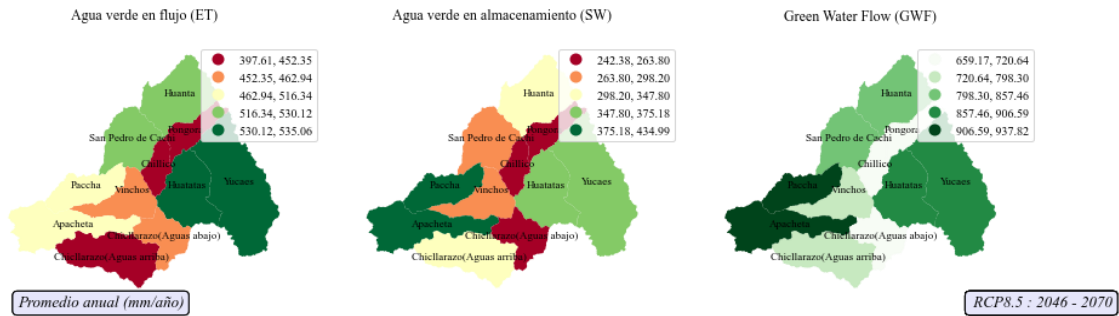
**Figura 3.19.** Flujo de agua azul media anual para la década del (2075-2099)

### 3.3.3. Respuesta hidrológica al cambio climático en flujos de agua verde

#### a) Cambio climático en flujos de agua verde (GWF)

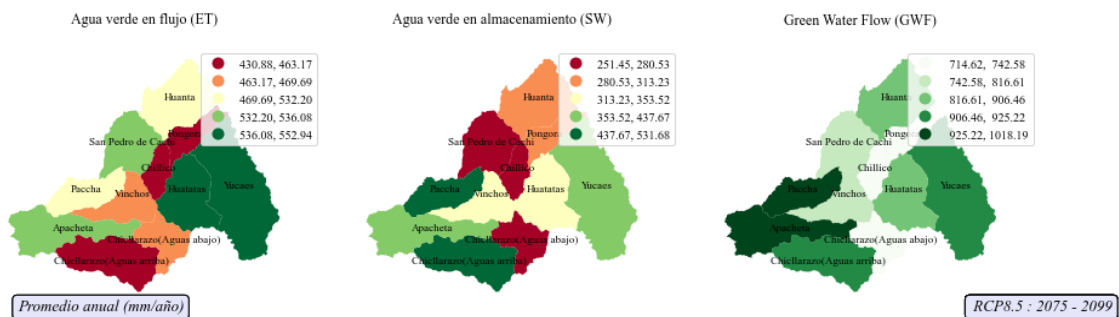
En las Figuras 3.20 y 3.21 podemos observar que los flujos de agua verde durante el periodo intermedio (2046 – 2070) varía ligeramente en 4% (767 mm – 798.5 mm), mientras para el periodo lejano (2075 -2099), el promedio anual de agua verde aumenta en 11.5% (767 mm - 866.5 mm), todo ello en relación al periodo histórico. Esto puede explicarse por el cambio de la temperatura, donde la temperatura máxima diaria promedio incrementa a 25C° (Anexo 7), en comparación con la temperatura histórica de 20C°; donde los flujos de agua verde están directamente relacionados con la

temperatura. Podemos aclarar también que los flujos de agua verde muestran condiciones más homogéneas en diferentes décadas en comparación que las del agua azul. En resumen, el valor de flujo de agua verde presenta una tendencia creciente en el futuro.

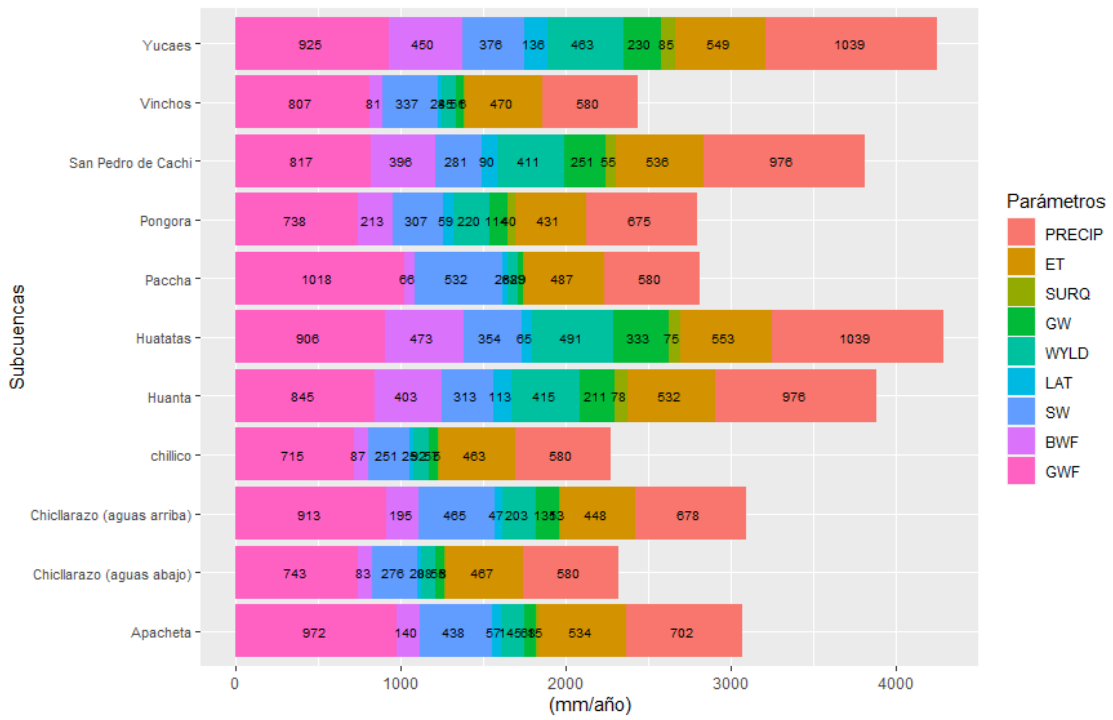


**Figura 3.20.** Flujo de agua verde media anual para la década del (2046-2070)

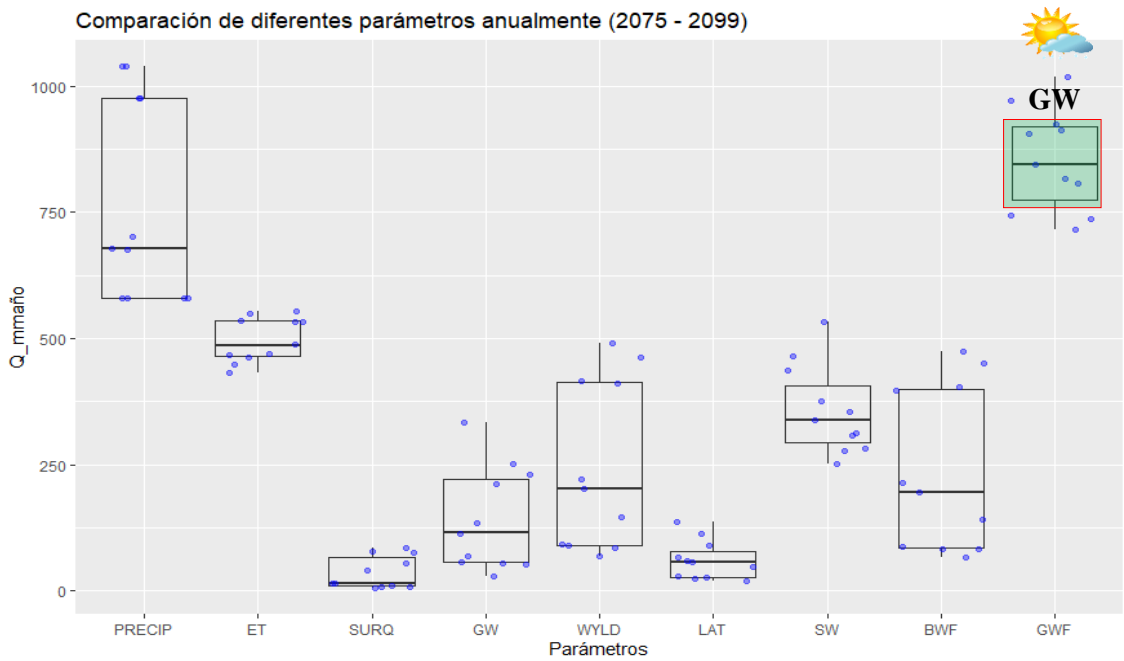
En relación al agua verde en almacenamiento, estas están influenciados principalmente por la cobertura del suelo, donde incrementan de aguas arriba a aguas abajo en la cuenca, específicamente las subcuencas Apacheta y Paccha (Figura 3.21) que están dominadas por pradera y tierra cultivada; mientras la evapotranspiración es relativamente alta, para el periodo futuro, posiblemente debido a las altas temperaturas, lo que significa que la mayor parte de la precipitación se evapora a la atmósfera. En las Figuras 3.22 y 3.23 podemos observar que el GWF incrementa para la década del 2090 (2075-2099) a nivel de subcuencas, la cual presenta valores encima de los 550 mm esto debido al aumento de la temperatura en las próximas décadas. Para el parámetro de agua verde en flujo (ET) se obtuvo como resultado un aumento de 510.42 mm (Tabla 3.12) para la década del 2090, respecto a la década del 2070 la cual presenta 499.01mm (Tabla 3.11), lo que resulta la pérdida de agua por evapotranspiración real hacia la atmosfera para la década del 2090 (2075-2099).



**Figura 3.21.** Flujo de agua verde media anual para la década del (2075-2099)



**Figura 3.22.** Comparación de parámetros de BWF y GWF a nivel de subcuencas para el periodo 2075-2099



**Figura 3.23.** Comparación de diferentes parámetros de los flujos de agua azul y verde para el periodo 2075-2099

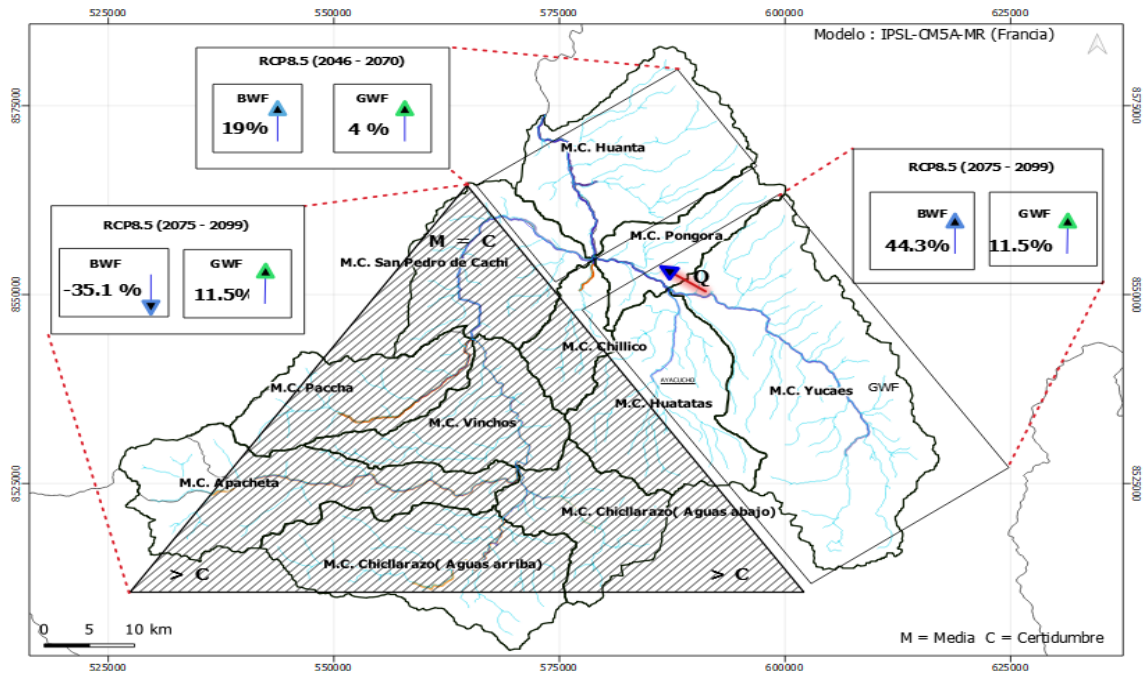


**Tabla 3.12.** Balance hídrico de la cuenca Cachi (resultado de la simulación) para el periodo de 2075-2099

<b>Mes</b>	<b>PP (mm)</b>	<b>SURQ (mm)</b>	<b>LAT (mm)</b>	<b>WYLD (mm)</b>	<b>ET (mm)</b>	<b>PET (mm)</b>
Enero	178.79	11.17	20.37	50.19	85.50	94.19
Febrero	138.16	4.84	15.62	53.49	75.44	79.98
Marzo	144.19	13.97	16.51	75.50	71.51	82.89
Abril	16.28	0.04	0.86	37.79	38.72	88.35
Mayo	3.00	0.04	0.09	18.90	17.37	119.02
Junio	4.05	0.00	0.09	3.70	7.29	109.53
Julio	1.53	0.00	0.02	0.94	4.28	124.89
Agosto	10.66	0.00	0.13	0.75	9.49	119.67
Septiembre	47.78	4.32	2.14	7.10	26.32	85.11
Octubre	74.95	3.30	4.44	10.35	47.05	90.51
Noviembre	55.20	1.30	2.27	8.50	47.62	105.82
Diciembre	153.04	5.49	11.74	23.77	79.83	97.28
<b>Total</b>	<b>827.63</b>	<b>44.47</b>	<b>74.28</b>	<b>290.98</b>	<b>510.42</b>	<b>1197.24</b>

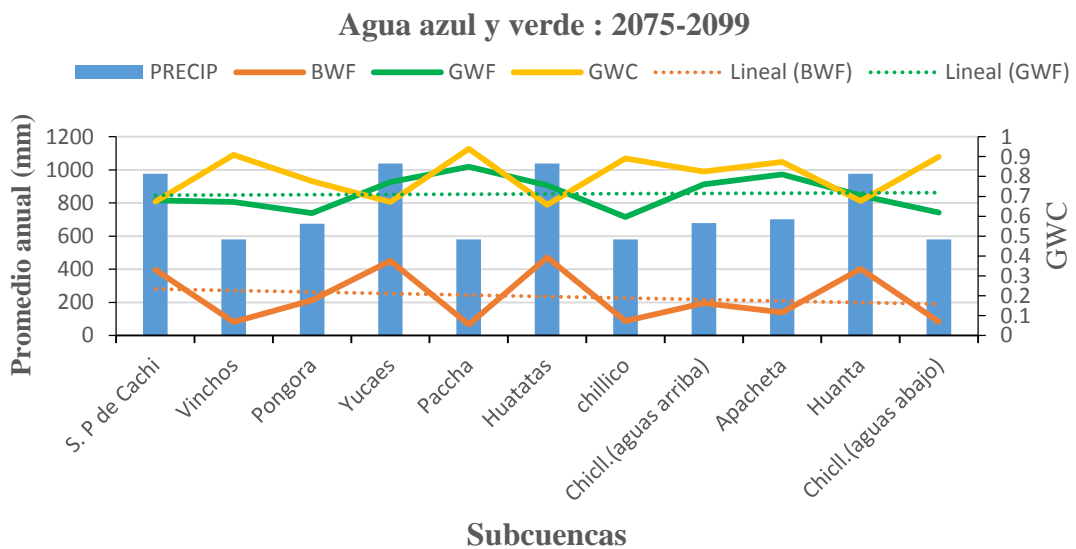
**b) Coeficiente de agua verde (GWC) y certidumbre del modelo.**

Para un análisis minucioso, se tiene en cuenta la importancia relativa de BWF y GWF mediante el coeficiente (GWC) (Figura 3.26). Dónde en general el GWC fue superior a 0.70 (70%) para el periodo histórico, esto se debe a una mayor precipitación, en consecuencia, la producción de agua es abundante para el periodo histórico, por el contrario, para los periodos futuros, bajo forzamiento radiativo RCP8.5; disminuye a 0.66 (66%), es decir menor precipitación, lo que significa menor producción de agua en el futuro en algunas regiones de la cuenca Cachi, la cual resulta mayor pérdida de agua producto de la evapotranspiración. En la Figura 3.24 se muestra el resultado del BWF (-35%) y GWF (+11%) para las subcuencas que presentan una mediana y alta certidumbre, para la década del 2090 (2075-2099) respecto al periodo histórico (1981-2016), esto a partir del modelo IPSL-CM5A-MR (francés).



**Figura 3.24.** Respuesta hidrológica del BWF Y GWF bajo el modelo IPSL-CM5A-MR

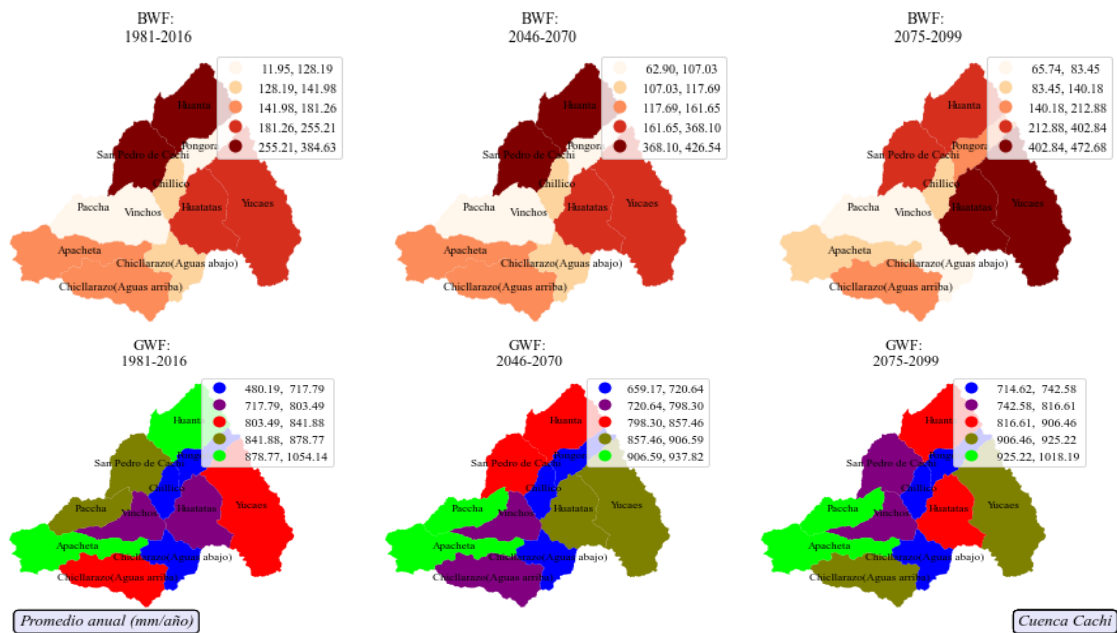
En la Figura 3.25 se muestran los componentes de agua azul y verde para el periodo del 2075 al 2099, donde se puede observar la variación del BWF y una tendencia creciente del GWF en comparación con el periodo base (Anexo 12).



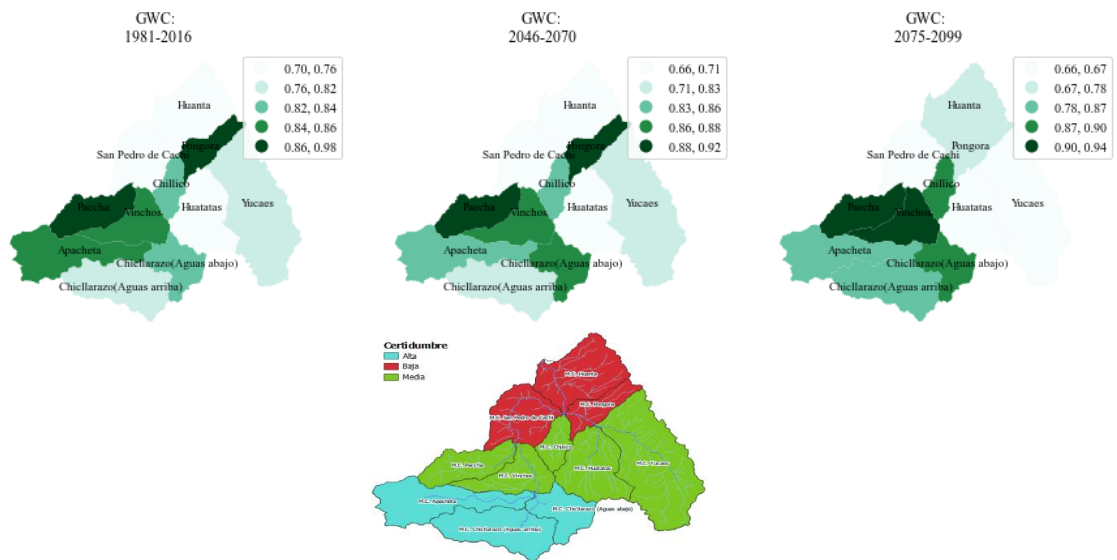
**Figura 3.25.** Componentes de agua azul y verde para la década del 2090

Si bien el modelo SWAT es computacionalmente eficiente; cabe resaltar la certidumbre (Figura 3.27) del modelo; donde la certidumbre será alta para las subcuencas que

presenta la misma altitud, características hidrológicas, entre otros; respecto a la subcuenca aforada.



**Figura 3.26.** Respuesta hidrológica (resultado de la simulación) del BWF y GWF para el periodo histórico y futura

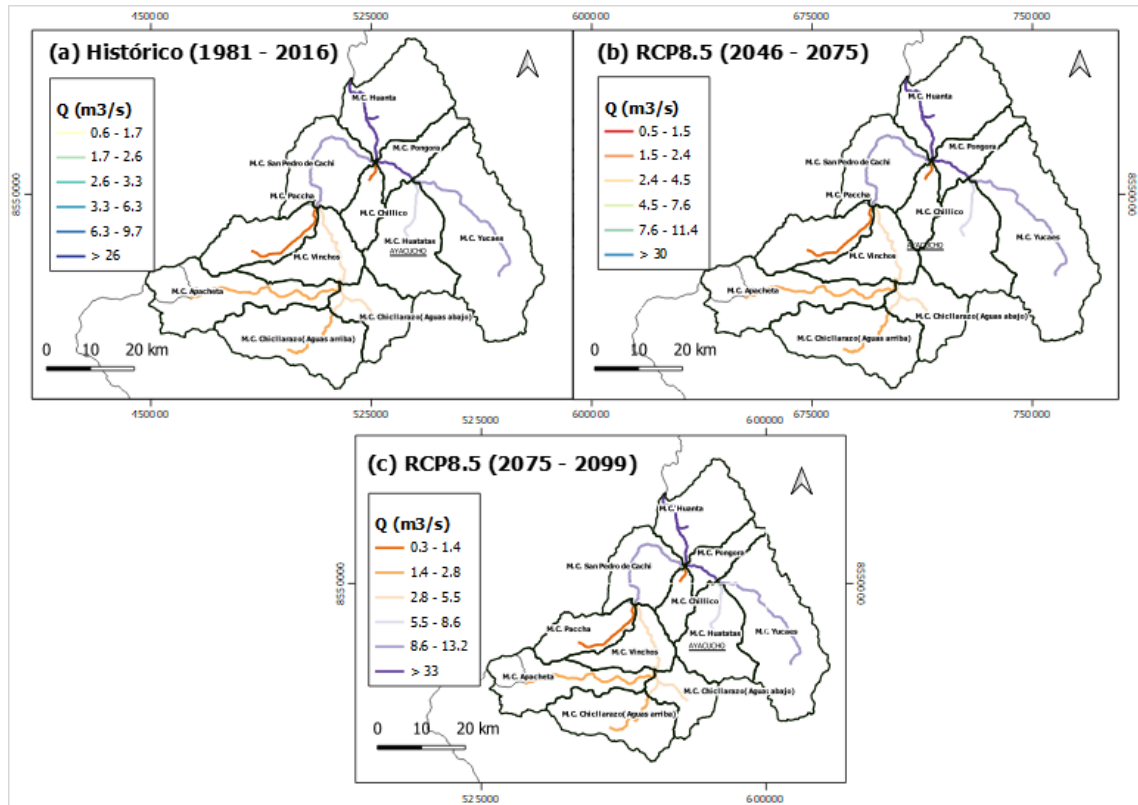


**Figura 3.27.** Coeficiente de agua verde y certidumbre del modelo

### c) Caudales a nivel de subcuencas

Si bien se ha analizado los flujos de agua azul a nivel de cuenca, cabe resaltar la importancia de flujos de caudales a nivel de subcuencas (Anexo 13), como se muestra en la Figura 3.28, donde la descarga mensual promedio simulada a nivel de cuenca,

representa el 13m<sup>3</sup>/s, 15m<sup>3</sup>/s y 17m<sup>3</sup>/s para las décadas del 2000 (1981 – 2016), 2060 (2046 – 2070) y 2090 (2075 – 2090) respectivamente, considerando el número de curva promedio de 75.86, estos provocarán inundaciones en las zonas más húmedas y épocas de estiaje en los periodos secos, en las subcuencas analizadas.



**Figura 3.28.** Distribución espacial de caudales media mensual para la cuenca Cachi

## CONCLUSIONES

En este trabajo de investigación se investigó desde la estimación de la producción de flujos de agua azul y verde a través del modelo hidrológico semidistribuido SWAT mediante información cartográfica e hidrometeorológica; posteriormente se realizó la calibración y validación del modelo, finalmente, una vez calibrado y validado, simular el modelo a partir de series meteorológicas perturbadas (escenario de cambio climático), a fin de analizar la respuesta hidrológica en la cuenca del río Cachi.

1. En la cuenca del río Cachi se realizó la simulación, obteniéndose como resultado un área total de la cuenca de 3600.3 km<sup>2</sup>, 11 subcuencas y 165 HRUs. El resultado de los medios anuales en el periodo base representa el 645.5 mm, 198.5 mm y 767 mm para la precipitación, flujos de agua azul y flujos de agua verde respectivamente; estas comprendidas a partir de proporciones (ratios) del flujo total, flujo base y flujo del suelo, la cual demuestra que el 88% del flujo de agua azul total, representa el volumen de agua subterránea que origina una corriente de flujo debajo de la superficie y el flujo de agua verde: evapotranspiración real (481.7 mm, 66% de la precipitación) representa una pérdida del sistema a la atmósfera.
2. Se calibró y validó el modelo a partir del flujo mensual observado y simulado; donde se obtuvo como resultado valores de Nash – Sutcliffe (0.57, 0.62); R2 (0.57, 0.63) y KGE (0.64, 0.75) respectivamente, considerando este último como la versión modificada del NSE, estos valores indican un rendimiento óptimo del modelo hidrológico SWAT. Se evidencia también que SWAT\_CUP es práctico de ser utilizado para la calibración y el análisis de sensibilidad de modelos de cuencas.
3. En la cuenca del río Cachi se realizó la simulación a partir de la proyección de cambio climático; los resultados indican un aumento en flujos de agua azul (BWF) en 19% para la década del 2060 para las subcuencas de Huanta y San Pedro de

Cachi, por el contrario, disminuye en 6.1% para las subcuencas del sur; mientras tanto, para la década del 2090 presenta una disminución considerable de 35.1% para la mayoría de las subcuencas, a excepción de las subcuencas de Yucaes y Huatatas. En relación con los flujos de agua verde (GWF) los resultados muestran una pequeña variación de 4% para la década del 2060, mientras para la década del 2099 incrementa en 11.5% a nivel de la cuenca; todo ello respecto al periodo base; donde el GWF presenta una tendencia creciente en el futuro.

La hidrología realista es la base de cualquier modelo, por ello se realizó la importancia relativa de BWF y GWF, mediante el coeficiente GWC, la cual da soporte a los objetivos específicos, en relación al BWF y GWF.

4. Al analizar la importancia relativa de BWF y GWF mediante el coeficiente (GWC), se obtuvo como resultado de GWC superior a 0.70, lo que resulta mayor producción de agua, para el periodo histórico, por el contrario, para periodos futuros, bajo escenario climático RCP8.5, el GWC disminuye a 0.66, la cual significa menor producción de agua en la mayoría de las regiones de la cuenca Cachi. En relación con los flujos de caudales, la descarga mensual promedio representa el 13m<sup>3</sup>/s, 15m<sup>3</sup>/ y 17m<sup>3</sup>/s para las décadas del 2000 (1981 - 2016), 2060 (2046 - 2070) y 2090 (2075 – 2099) respectivamente.

## RECOMENDACIONES

1. La carencia de datos de estaciones hidrométricas, limitó el proceso de la calibración, validación y análisis del efecto del cambio climático en la cuenca baja y media del río Cachi, la cual se recomienda implementar más estaciones *in situ* de caudales, para validar el modelo hidrológico para toda la cuenca, con el objetivo de obtener una representación eficaz en el área de estudio.
2. La herramienta CMhyd se utilizó para reducir el sesgo y obtener el clima simulado histórico y futuro de los 10 modelos climáticos; bajo 2 técnicas de corrección, ante ello se recomienda implementar los modelos climáticos, como los modelos globales CMIP6; de igual forma se recomienda aplicar las cinco técnicas de corrección para la fiabilidad de los datos de un modelo.
3. En el presente estudio, el mapa de la cobertura de suelos corresponde al 2020 y se asumió como constante para las décadas del 2060 (2046 – 2070) y 2090 (2075 – 2099). Por consiguiente, se recomienda utilizar escenarios futuros de cobertura de uso de suelos. En este estudio se ha ignorado parámetros de agua subterránea en la zona saturada (acuífero profundo), por lo tanto, futuras investigaciones deberían combinar MODFLOW y SWAT para cuencas donde el rendimiento hídrico proviene del acuífero profundo.
4. Realizar estudios de cambio climático, para lograr definir los cambios posibles del clima y su efecto en la disponibilidad de flujos de agua azul y verde en cuencas alta andina, afín de establecer medidas de adaptación y/o mitigación ante los efectos adversos del cambio del clima.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. C. 2007. *SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs*. University TEXAS: abbaspour@eawag.ch. [https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual\\_swatcup.pdf](https://swat.tamu.edu/media/114860/usermanual_swatcup.pdf)
- Avalos, G., Llacza, A., Jácome, G., & Barreto, C. 2013. *Evaluación de los modelos CMIP5 del IPCC en el Perú: Proyecciones al año 2030 en la Región Ucayali*. Ucayali: Equipo Técnico del SENAMHI – Perú. [https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/222/Evaluacion-modelos-CMIP5-IPCC-Peru-proyecciones-a%C3%B1o-2030-region-Ucayali\\_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://repositorio.senamhi.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12542/222/Evaluacion-modelos-CMIP5-IPCC-Peru-proyecciones-a%C3%B1o-2030-region-Ucayali_2013.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Aybar, C., Fernández, C. H., Lavado, W., Vega, F., & Felipe, O. 2019. Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 1-50. <http://mc.manuscriptcentral.com/hsj>
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. 2017. *Uso del producto grillado PISCO de precipitación en estudios, investigaciones y sistemas operacionales de monitoreo y pronóstico hidrometeorológico*. Lima: Nota tecnica 001 SENAMHI-DHI-2017. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>
- Cabrera, J. 2017a. *Calibración de Modelos Hidrológicos*. Lima: Universidad Nacional de Ingeniería - Facultad de Ingeniería Civil. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf)
- Center for climate and Resiliencie Research(CR2). 2018. *Simulaciones climaticas regionales y marco de evaluación de la vulnerabilidad*. Chile: Equipo CR2. [http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2018/01/Proy-simulaciones-clima%CC%81ticas-MMA-CR2-M.Rojas\\_.pdf](http://www.cr2.cl/wp-content/uploads/2018/01/Proy-simulaciones-clima%CC%81ticas-MMA-CR2-M.Rojas_.pdf)
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. 1994. *Hidrología Aplicada*. UnitedStates: McGRAW-HILL. <https://www.libreriaingeniero.com/2017/12/hidrologia-aplicada-ven-te-chow.html>
- Climate Lab Book. 2021. Comparing CMIP5 y observations. *Open climate science*. [https://www.climate-lab-book.ac.uk/comparing-cmip5-observations/?fbclid=IwAR3xEbusx-PUb\\_5Cb-XYeujedhsQ9fK55Vcx0tH-E9FtP3v1-FK6Bgrp19A](https://www.climate-lab-book.ac.uk/comparing-cmip5-observations/?fbclid=IwAR3xEbusx-PUb_5Cb-XYeujedhsQ9fK55Vcx0tH-E9FtP3v1-FK6Bgrp19A)
- Dijkashoom, K., Huting, J., & Tempel, P. 2005. *Update of the 1:5 million Soil and Terrain Database for Latin America and the Caribbean (SOTERLAC; version*



- 2.0). Wageningen: ISRIC - World Soil Information.  
<https://www.isric.org/explore/soter>
- El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático(IPCC). 2013. *Cambio climático*. Noruega: IPCC.  
[https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5\\_SummaryVolume\\_FINAL\\_SPANISH.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/03/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf)
- Eslamian, S. 2014. *Handbook of Engineering Hydrology : modeling, climate change, and variability*. Florida, US: CRC Press is an imprint of Taylor & Francis Group, an Informa business.
- Falkenmark, M., & Rockstrom, J. 2006. The New Blue and Green Water Paradigm: Breaking New Ground for Water Resources Planning and Management. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 129-132. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9496\(2006\)132:3\(129\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9496(2006)132:3(129))
- Fang, G., Yang, J., Chen, Y., & Zammit, C. 2015. Comparing bias correction methods in downscaling meteorological variables for a hydrologic impact study in an arid area in China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2547-2559. DOI: <https://doi.org/10.5194/hess-19-2547-2015>
- Fazeli, I., Asghar, A., Reza, M., & Hassan, M. 2019. Assessment of the impact of climate change on spatiotemporal variability of blue and green water resources under CMIP3 and CMIP5 models in a highly mountainous watershed. *Theoretical and Applied Climatology*, 169-184. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00704-018-2474-9>
- Fernández, C. 2017. *Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del títicaca*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-44.pdf>
- Ferreira, A., Teixeira, D., Silva, C., & Sayuri, M. 2020. Desempenho das Simulações do Projeto Cordex Quanto à Representação dos Padrões de Variação da Precipitação no Século XX sobre o Município de Fortaleza, Ceará. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 387-396. DOI: <https://www.scielo.br/j/rbmet/a/b5rs4YXSGbnnJt47jNVvxcs/?lang=pt>
- Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático(IPCC). 2007. *Cambio Climático 2007, Informe Técnico*. Suiza: Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático, 2008. [https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4\\_syr\\_sp.pdf](https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ar4_syr_sp.pdf)
- Jaclyn Tech Texas & AgriLife Research. 2019. *SWAT+ Editor 1.2.0 Documentation*. Texas: AgriLife Research. <https://swatplus.gitbook.io/docs/user/io>

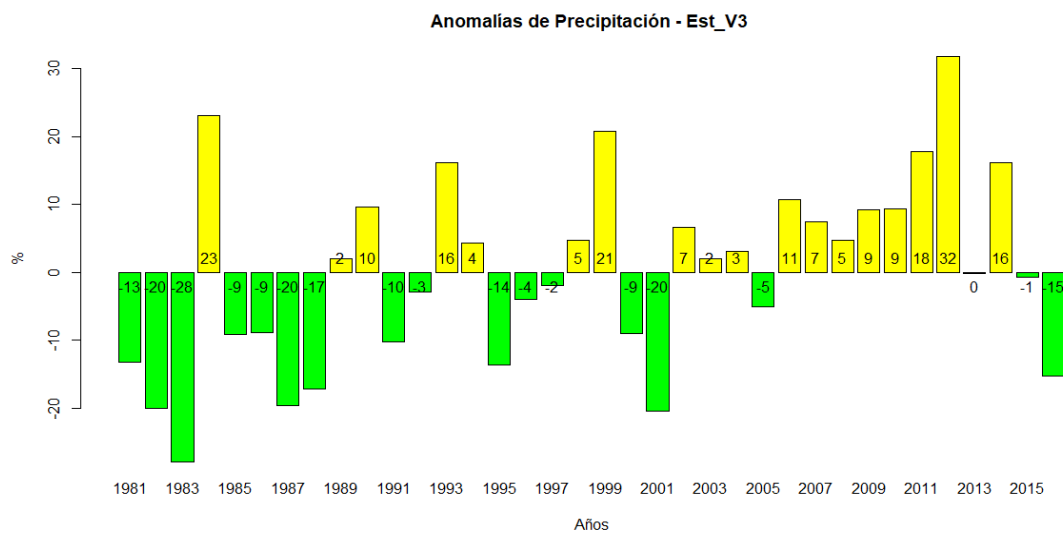
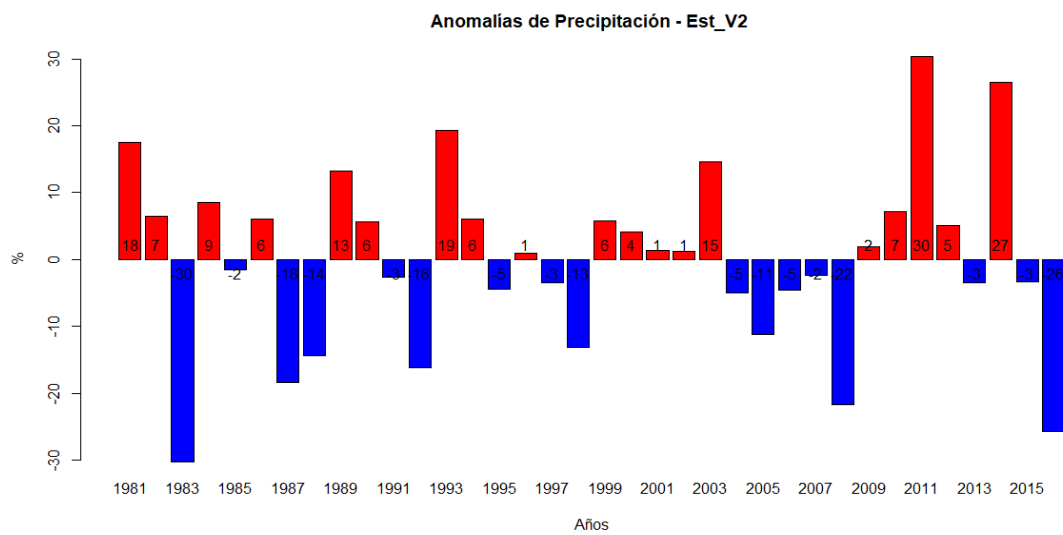
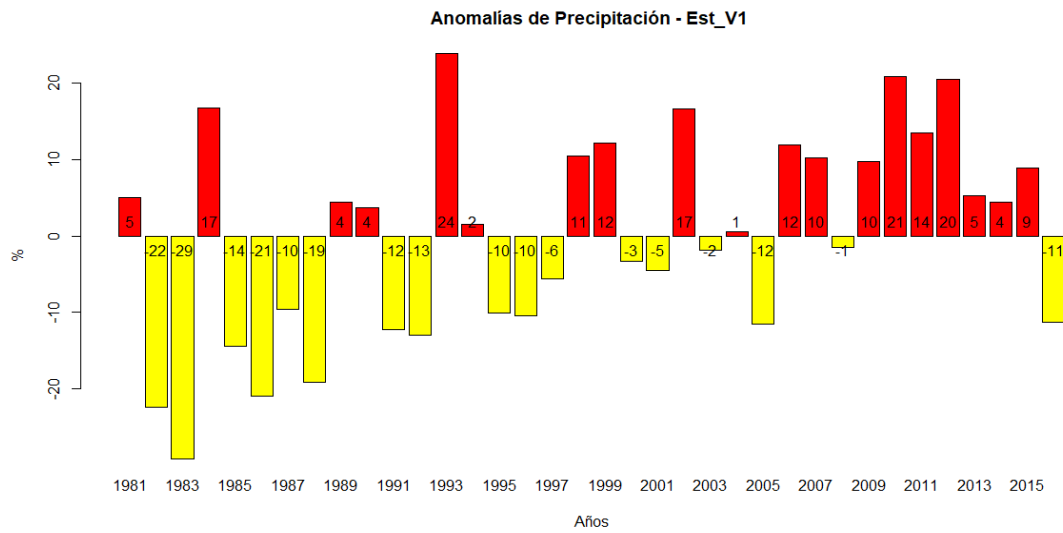
- Jiang, J., Lyu, L., Han, Y., & Sun, C. 2021. Effect of Climate Variability on Green and Blue Water Resources in a Temperate Monsoon Watershed, Northeastern China. *Sustainability*, 1-13. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13042193>
- Jodar-Abellan, A., Ruiz, M., & Meljarejo, J. 2018. Evaluación del impacto del cambio climático sobre una cuenca hidrológica en régimen natural (SE, España) usando un modelo SWAT. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 35(3), 240-253. DOI: <https://doi.org/10.22201/cgeo.20072902e.2018.3.564>
- Kiprotich, P., Wei, X., Zhang, Z., Ngigi, T., Qiu, F., & Wang, L. 2021. Assessing the Impact of Land Use and Climate Change on Surface Runoff Response Using Gridded Observations and SWAT+. *hydrology*, 1-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/hydrology8010048>
- León Ochoa, R. F., Portuguez Maurtua, D. M., & Chávarri Velarde, E. A. 2019. Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura - Perú, considerando la incidencia del cambio climático. *Revista de Investigaciones Altoandinas*, 21(3), 182-193. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2019.476>
- Martínez, C. 2014. *Impacto del cambio climático en la hidrología de la Cuenca del río Ica*. Lima, Perú. <https://1library.co/document/yr20077z-impacto-cambio-climatico-hidrologia-cuenca-rio-ica.html>
- Mediero, L. 2007. *Pronóstico probabilístico de caudales de avenida mediante redes bayesianas aplicadas sobre un modelo hidrológico distribuido*. España: Departamento de Ingeniería Civil: Hidráulica y Energética. [http://oa.upm.es/669/1/LUIS\\_MEDIERO\\_ORDU%C3%91A.pdf](http://oa.upm.es/669/1/LUIS_MEDIERO_ORDU%C3%91A.pdf)
- Melese Gemechu, T., Zhao, H., Bao, S., Yangzong, C., Liu, Y., Li, F., & Li, H. 2021. Estimation of Hydrological Components under Current and Future Climate Scenarios in Guder Catchment, Upper Abbay Basin, Ethiopia, Using the SWAT. *Sustainability*, 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/su13179689>
- Moriasi, D., Pai, N., Gitau, M., & Daggupati, P. 2016. Hydrologic and Water Quality Models: Performance Measures and Evaluation Criteria. *Transactions of the ASABE (American Society of Agricultural and Biological Engineers) · December 2015*, 58(6), 1763-1785. <https://elibrary.asabe.org/abstract.asp?aid=46548&t=3&dabs=Y&redir=&redirTtype=>
- Neitsch, Arnold, Kiniry, & Williams. 2011. *Soil and Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009*. . Texas: Texas Water Resources Institute Technical Report No. 406.

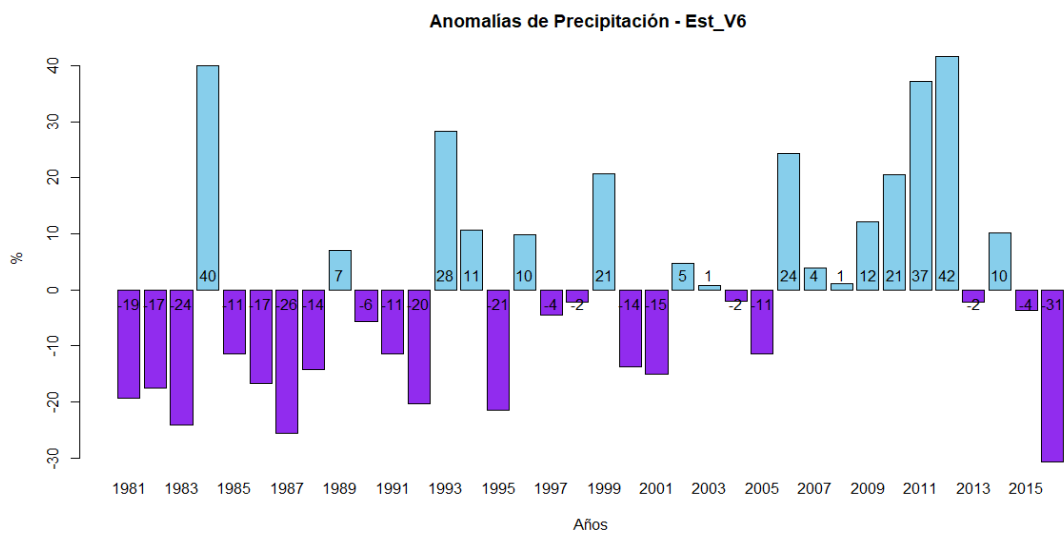
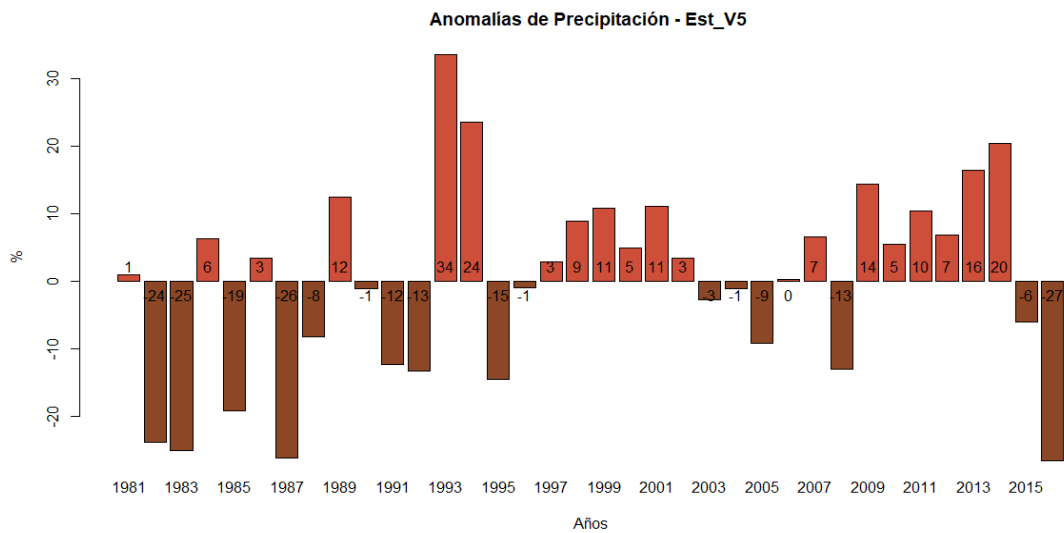
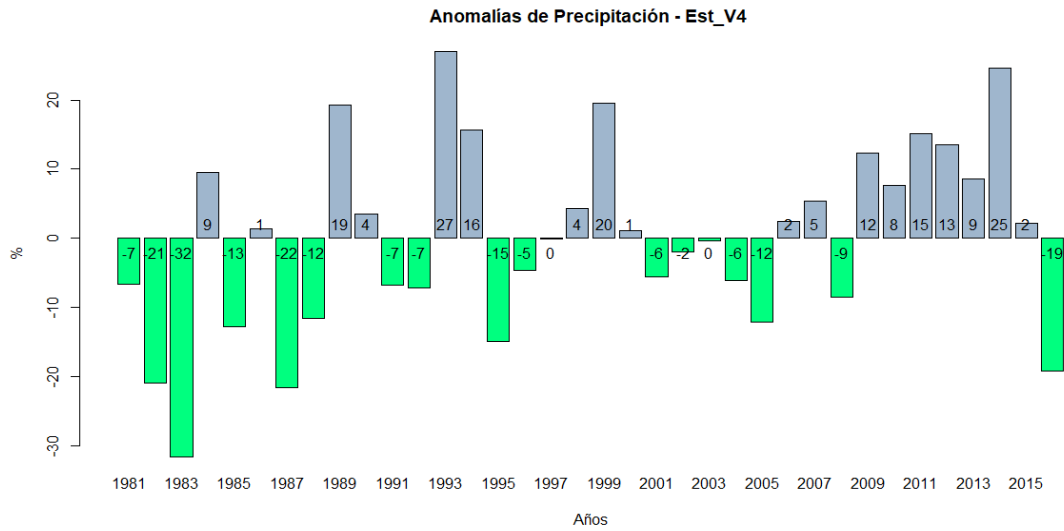
- Ordoñez, J. 2011. *Cartilla Técnica : Ciclo Hidrológico*. Lima: Sociedad Geográfica de Lima. [https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwp-sam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf)
- Oviedo, B., & León, G. 2010. *Guía de procedimiento para la generación de escenarios de Cambio Climático Regional y Local a partir de los Modelos Globales*. Bogotá: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM. <http://www.ideam.gov.co/documents/21021/21138/Gu%C3%ADa+Escenarios+Cambio+Climatico.pdf/72eae24f-04ea-4ce2-9a4b-e551559c48fc>
- Pascual, J., & Díaz, M. 2016. *Guía práctica sobre la modelización hidrológica y el modelo HEC-HMS*. Madrid: Parque Científico Tecnológico de la Universidad de Alcalá. [https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos%20de%20Geoma%CC%81tica%204\\_b.pdf](https://www.agua.imdea.org/sites/default/files/pdf/news/20161215/Cuadernos%20de%20Geoma%CC%81tica%204_b.pdf)
- Peña, J. 2006. *Sistemas de Información Geográfica aplicados a la gestión del territorio*. Chile: Alicante: Editorial Club Universitario, 2006. 310 p.
- Quintana, P. 2018. *Aplicación de los modelos hidrológicos para estimar el caudal promedio mensual en la subcuenca del río Shullcas*. Huancayo - Perú: Universidad Peruana los Andes.
- Rathjens, H., Bieger, K., Srinivasan, R., Chaubey, I., & G. Arnold, J. 2016. CMhyd User Manual : Documentation for preparing simulated climate change data for hydrologic impact studies. *CMhyd User Manual*, 1-16. <https://swat.tamu.edu/software/cmhyd/>
- Siwila, S., Quevauviller, P., Teferi, M., & Willems, P. 2013. Climate Change Impact Investigation on Hydro-Meteorological Extremes on Zambia ' s Kabompo Catchment. *ResearchGate*, 124-136. DOI: 10.4409/Am-057-13-0050
- Stehr, A., Debels, P., Larumi, J., Alcayaga, H., & Romero, F. 2010. Modelación de la respuesta hidrológica al cambio climático: experiencias de dos cuencas de la zona centro-sur de Chile. *Tecnología y ciencias del agua.*, 37-58. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-24222010000400002&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222010000400002&lng=es&nrm=iso)
- Teichmann, C., Jacob, D., Thomas, R., Recca, A., & Bunttemeyer, L. 2020. Assessing mean climate change signals in the global CORDEX-CORE ensemble. *Climate Dynamics*, 1-17. DOI: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00382-020-05494-x>

- Uribe, N. 2010. *Conceptos básicos y guía rápida para el usuario Versión SWAT2005*. Colombia: Centro Internacional de Agricultura Tropical CIAT. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Vargas, N., Loaiza, J., Acosta, J., Urrego, J., Plazas, C., Valencia, M., . . . Bernal, F. 2018. *Protocolo de Modelación Hidrología y Hidráulica*. Bogotá, Colombia: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales – IDEAM. [http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo\\_Modelacion\\_HH.pdf](http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023833/Protocolo_Modelacion_HH.pdf)
- Velasquez, J., & Troin, M. 2020. Incertidumbre en la evaluación del impacto del cambio climático en dos cuencas mexicanas. *Tecnología y ciencias del agua.*, 1-36. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_abstract&pid=S2007-24222020000100001&lng=es&nrm=iso&tIng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_abstract&pid=S2007-24222020000100001&lng=es&nrm=iso&tIng=es)
- Vrugt, J., Mac Hyman, J., & ter Braak, C. 2008. Treatment of input uncertainty in hydrologic modeling: Doing hydrology backward with Markov chain Monte Carlo simulation. *Water Resources Research*, 1-49. DOI: <https://doi.org/10.1029/2007WR006720>
- Yuan, Z., Xu, J. M., Wang, Y., Yan, B., & Hong, X. 2019. Impact of Climate Variability on Blue and Green Water Flows in the Erhai Lake Basin of Southwest China. *Water*, 1-19. DOI: <https://doi.org/10.3390/w11030424>
- Zhang, B., Kumar Shrestha, N., Daggupati, P., Rudra, R., Shukla, R., Kaur, B., & Hou, J. 2018. Quantifying the Impacts of Climate Change on Streamflow Dynamics of Two Major Rivers of the Northern Lake Erie Basin in Canada. *Sustainability*, 1-23. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10082897>
- Zhang, Y., Tang, C., Ye, A., Zheng, T., Nie, X., Tu, A., . . . Zhang, S. 2020. Impacts of Climate and Land-Use Change on Blue and GreenWater: A Case Study of the Upper Ganjiang River Basin, China. *water*, 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/w12102661>
- Zhao, A., Liu, X., Zhu, X., & Pan, Y. 2016. Impacts of land use change and climate variability on green and blue water resources in the Weihe River Basin of northwest China. 318-327. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.09.018>

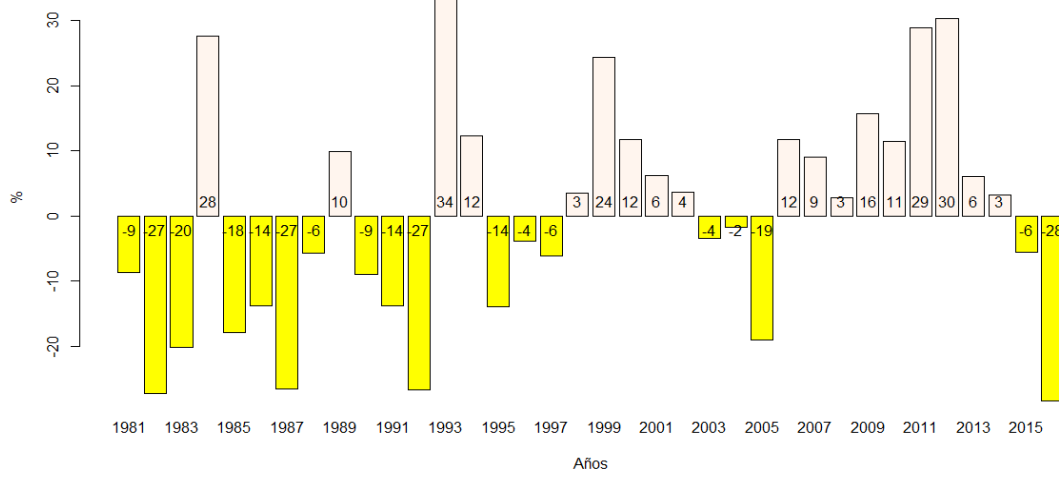
# ANEXOS

## Anexo 1. Anomalías de precipitación sobre la cuenca del río Cachi

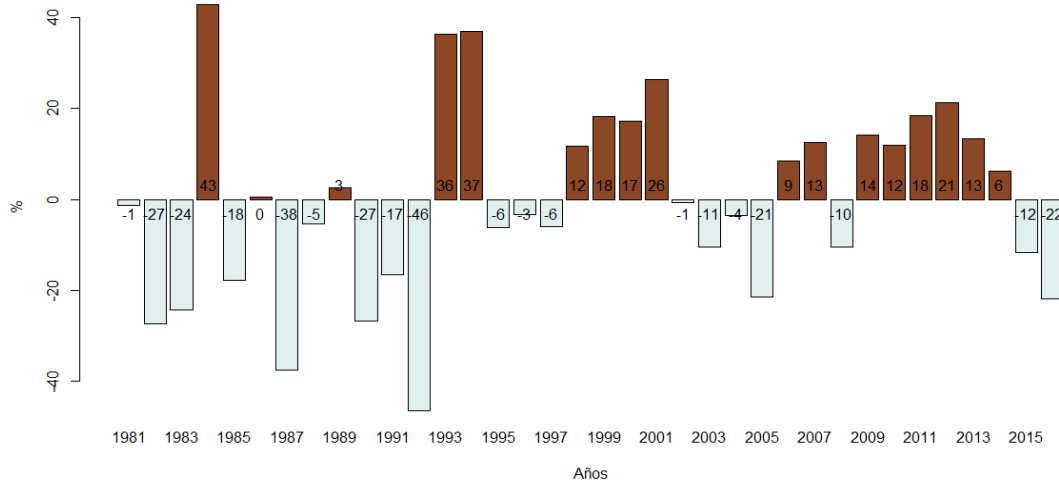




Anomalías de Precipitación - Est\_V7



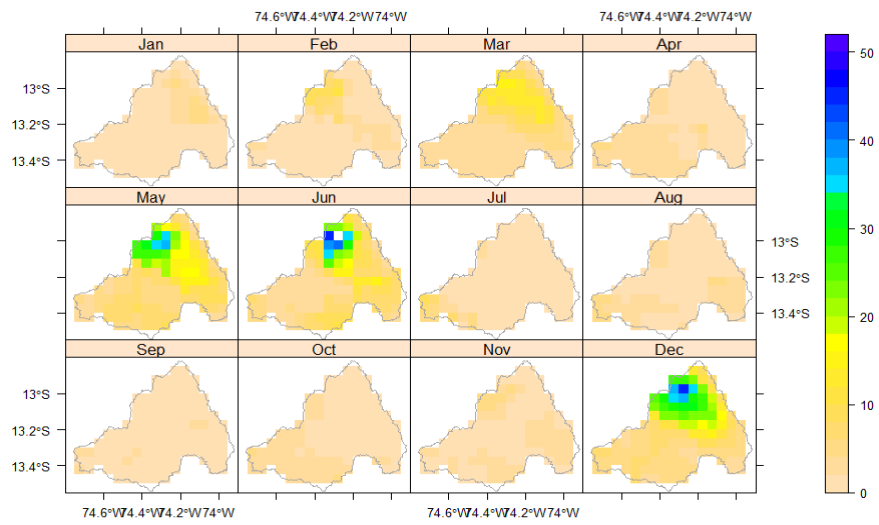
Anomalías de Precipitación - Est\_V8



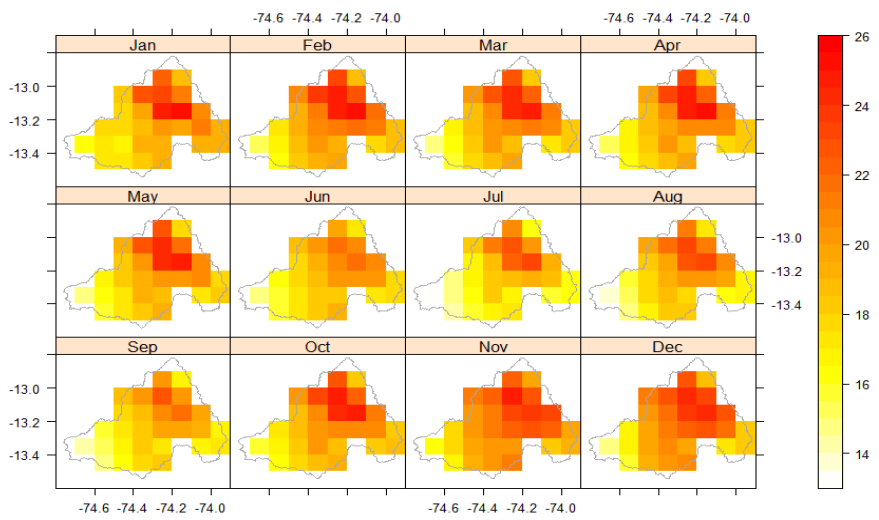


## Anexo 2. Distribución espacial de la climatología diaria de la cuenca del río Cachi

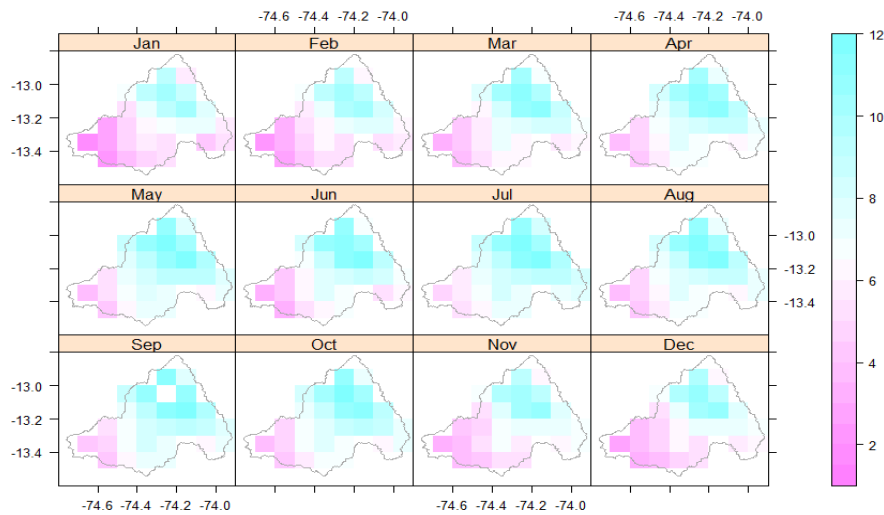
(a) Precipitación (mm)



(b) Temperatura máxima (C°)



(c) Temperatura mínima (C°)



### Anexo 3. Atributos del tipo del suelo requeridos por el SWAT

Nombre de la variable	Descripción
Snam	Nombre del suelo
Nlayers	Numero de capa en el suelo
Hydgrp	Grupo hidrológico del suelo
Sol_ZMX	Profundidad máxima de raíces (mm)
Anion_EXCL	(Opcional) porosidad (espacio vacío) de la cual se excluyen los aniones
Sol_CRK	(Opcional) Volumen potencial del perfil del suelo
Texture	(Opcional) Textura de la capa del suelo (mm)
Sol_Z	Profundidad del suelo (mm)
Sol_BD	Densidad aparente de suelo húmedo (Mg/m <sup>3</sup> o g/cm <sup>3</sup> )
Sol_AWC	Capacidad de retención de agua del suelo (mm/H <sub>2</sub> O)
Sol_K	Conductividad hidráulica saturada (mm/hr)
Sol_CBN	Contenido de carbono orgánico (% peso del suelo)
Clay	Contenido de arcilla (% peso del suelo)
Silt	Contenido de limo (% peso del suelo)
Sand	Contenido de arena (% peso del suelo)
Rock	Contenido de fragmento de roca (% peso del suelo) (diámetro > 2mm)
Sol_ALB	Albedo húmedo del suelo
Usle_K	Factor de erodabilidad del suelo de la ecuación de USLE (K)
Sol_EC	Conductividad eléctrica (Ds/m)

**Anexo 4. Qmed mensual observado en la estación hidrométrica**

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Set</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
1988				6.90	3.28	1.57	0.32	0.12	0.06	0.13	0.17	0.34
1989	3.32	4.59	5.47	3.85	0.80	0.55	0.27	0.30	0.20	0.33	0.46	0.22
1990												
1991	2.37	5.48	3.36	2.09	0.78	0.44	0.13	0.10	0.15			
1992	0.37	1.49	2.04	0.36	0.16	0.17	0.14	0.14	0.13	0.31	0.19	0.22
1993	2.37	3.94	6.44	2.67	1.17	0.53	0.61	0.20	0.19	0.67	2.95	6.01
1994	4.18	6.91	6.51	2.93	0.72	0.27	0.20	0.13	0.13	0.13	0.26	0.42
1995		2.80	6.97	1.80	0.35	0.19	0.17	0.13	0.15	0.15	0.31	0.88
1996	4.58	6.65	3.72	3.65	0.97	0.29	0.17	0.14	0.12	0.12	0.17	0.56
1997	2.24	5.71	3.24	0.73	0.32	0.21	0.17	0.27	0.35	0.36	0.84	2.12
1998	6.69	6.14	3.15	4.97	0.24	0.20	0.16	0.14	0.62	1.62	1.93	2.07
1999	2.08	9.19	7.06	4.75	1.27	1.47	0.21	0.14	0.15	0.54	0.23	0.88
2000	4.98	9.97	6.84	1.03	0.38	0.30	0.22	0.21	0.17	0.59	0.21	1.18
2001	5.12	3.10	3.67	1.15	0.80	0.29	0.22	0.15	0.19			
2002	1.13	6.77	5.60	1.56	0.61	0.42	0.48	0.37	0.53	0.45	0.66	1.38
2003	7.71	10.16	10.88	2.53	0.66	0.34						
<b>Media</b>	<b>3.63</b>	<b>5.92</b>	<b>5.35</b>	<b>2.73</b>	<b>0.83</b>	<b>0.48</b>	<b>0.25</b>	<b>0.18</b>	<b>0.22</b>	<b>0.43</b>	<b>0.67</b>	<b>1.27</b>

Registro histórico de caudales medios mensuales aforados en la estación hidrométrica de la bocatoma Chicllarazo de la Irrigación cachi. Fuente: Red Hidrometeorológica del Gobierno Regional de Ayacucho

## Anexo 5. Definición y rango de parámetros para análisis de sensibilidad

### (a) Definición de parámetros

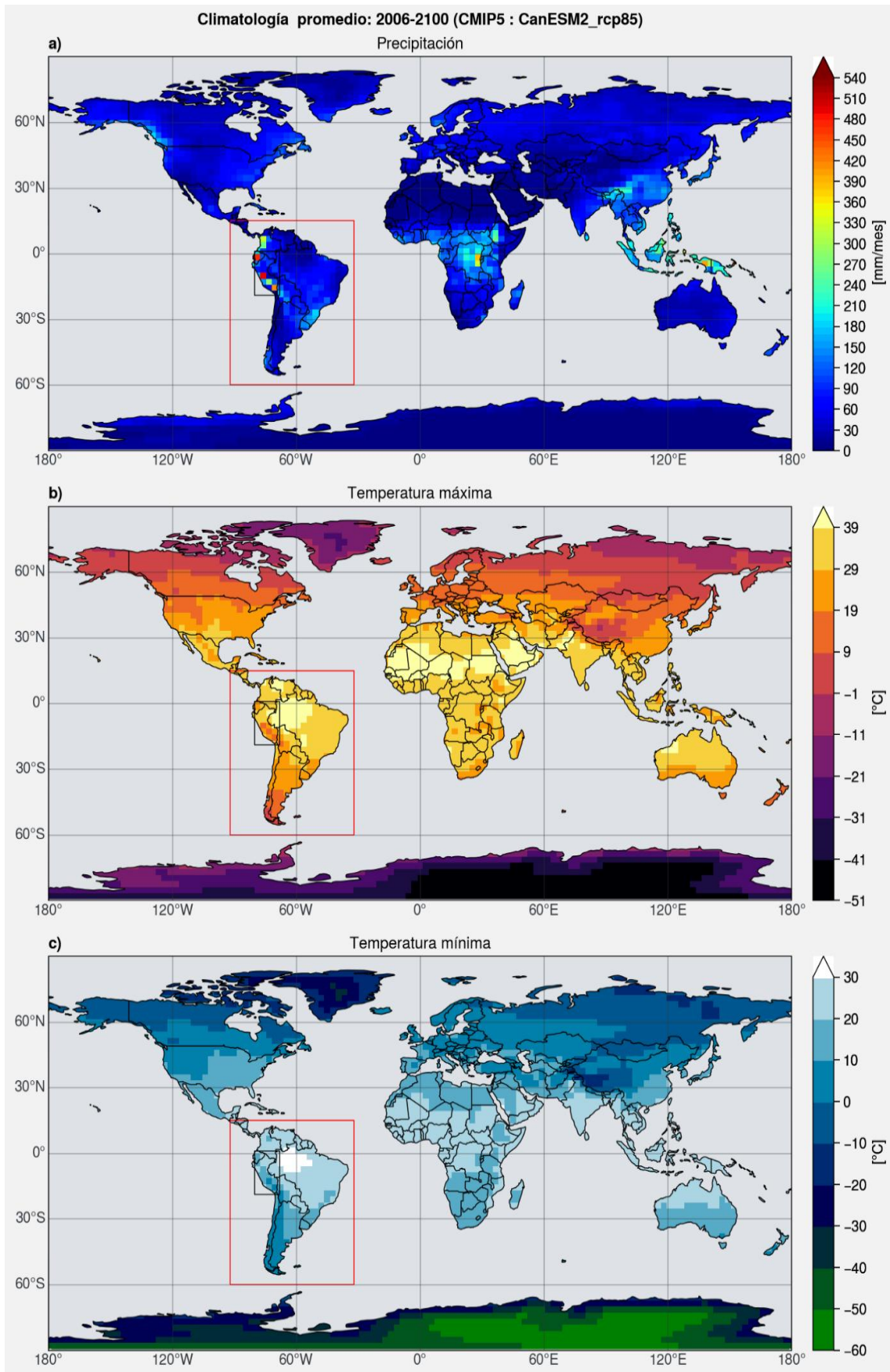
Parámetro	Definición
r _ CN2.mgt	Número de curva para condición de humedad II
v _ ALPHA_BF.gw	Factor alfa de la curva de recesión de agua subterránea del acuífero profundo (1/días)
a _ GW_DELAY.gw	Tiempo de retardo del agua subterránea (días)
a _ GWQMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero bajo requerido para que ocurra el flujo de retorno (mm H <sub>2</sub> O)
v _ CH_K2.rte	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal principal (mm/h)
v _ CH_N2.rte	Coefficiente "n" de Manning para el canal principal
v _ EPCO.hru	Factor de compensación de absorción de plantas
v _ ESCO.hru	Factor de compensación de evaporación del suelo
v _ GW_REVAP.gw	Coefficiente "revap" de aguas subterráneas (agua extraída del acuífero por evaporación o plantas con raíces profundas)
a _ REVAPMN.gw	Umbral de profundidad del agua en el acuífero poco profundo para "revap" o percolación al acuífero profundo (mm H <sub>2</sub> O)
r _ SOL_AWC ().sol	Capacidad de agua disponible en el suelo, (mm H <sub>2</sub> O/mm de suelo)
r _ SOL_K ().sol	Conductividad hidráulica saturada (mm/h)
v _ SURLAG.bsn	Coefficiente de retraso de escorrentía superficial
v _ OV_N.hru	Valor "n" de Manning para flujo terrestre
v _ RCHRG_DP.gw	Coefficiente de percolación al acuífero profundo
v _ CANMX.hru	Máximo almacenamiento en el dosel.

### (a) Rangos óptimos de parámetros

Parámetro	Rango		Proceso
	Min	Max	
r _ CN2.mgt	-0.1	0.1	Escorrentía
v _ ALPHA_BF.gw	0.0	1.0	Agua subterránea
a _ GW_DELAY.gw	-30	60	Agua subterránea
a _ GWQMN.gw	-1000	1000	Agua subterránea
v _ CH_K2.rte	0	10	Canal
v _ CH_N2.rte	-0.01	0.2	Canal
v _ EPCO.bsn	0.01	1	Evaporación
v _ ESCO.hru	0.5	0.95	Evaporación
v _ GW_REVAP.gw	0.02	0.2	Agua subterránea
a _ REVAPMN.gw	-1000	1000	Agua subterránea
r _ SOL_AWC ().sol	-0.05	0.05	Suelo
r _ SOL_K ().sol	-0.05	0.05	Suelo
v _ SURLAG.bsn	0.01	24	Escorrentía
v _ OV_N.hru	0.01	30	Canal
v _ RCHRG_DP.gw	0	1	Agua subterránea
v _ CANMX.hru	0	100	Suelo

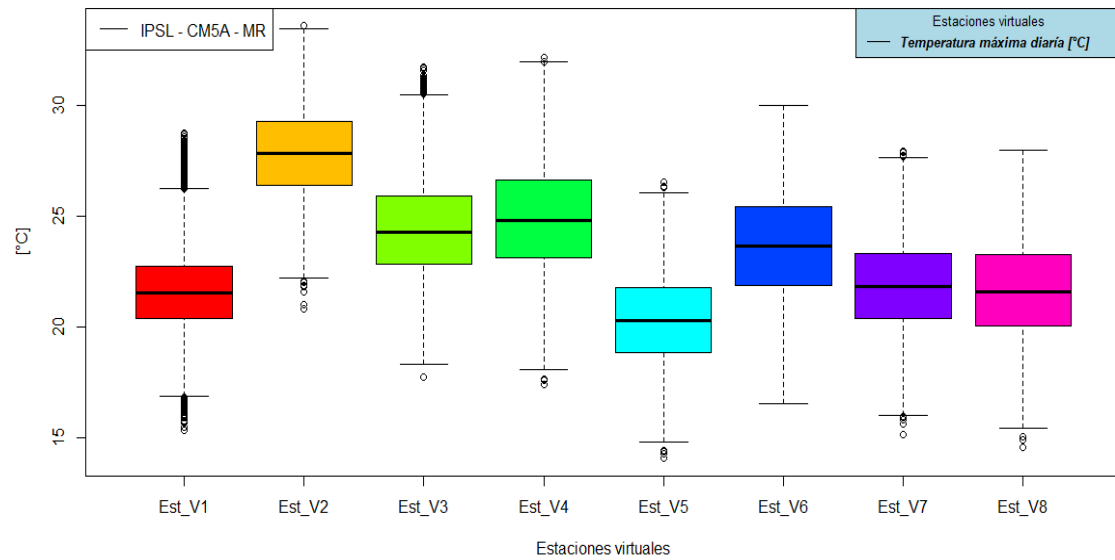
Fuente: SWAT - CUP User's Manual

**Anexo 6.** Distribución espacial de la climatología global del modelo CMIP5\_RCP8.5

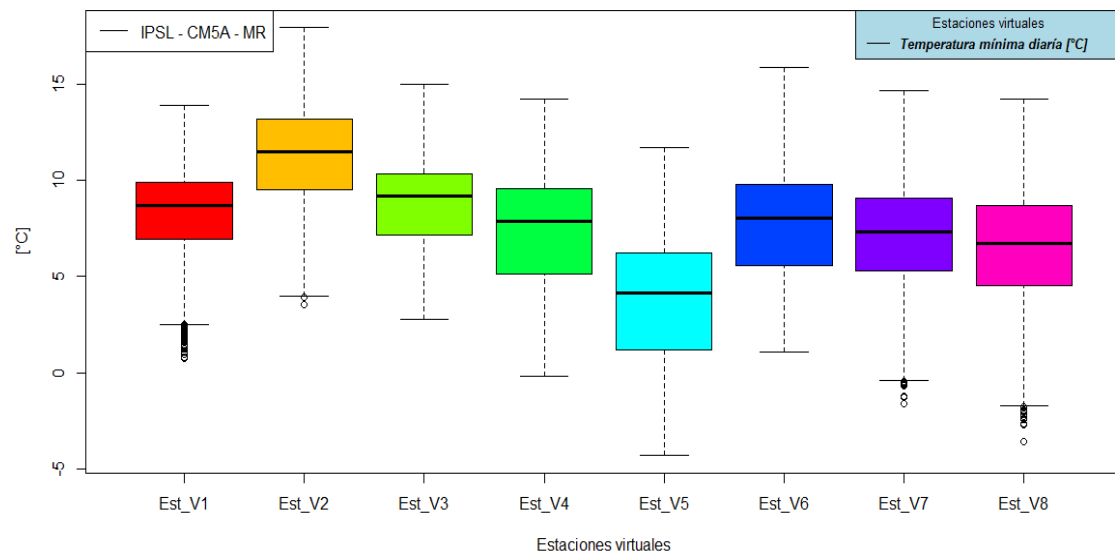


**Anexo 7.** Diagrama de cajas de las temperaturas (máx, min) sobre la cuenca del río Cachi, del modelo IPSL-CM5A-MR

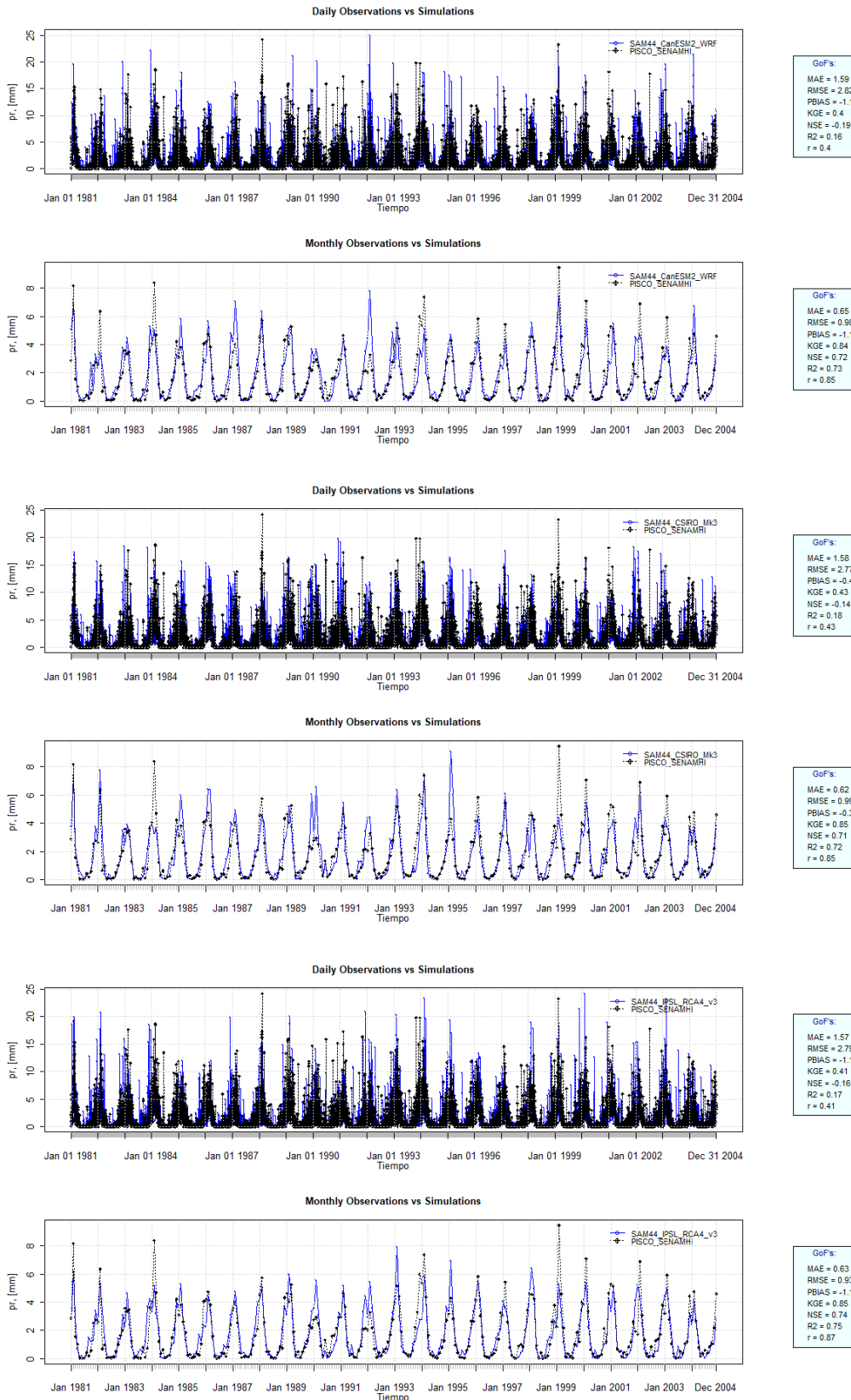
(a) Temperatura máxima (C°)

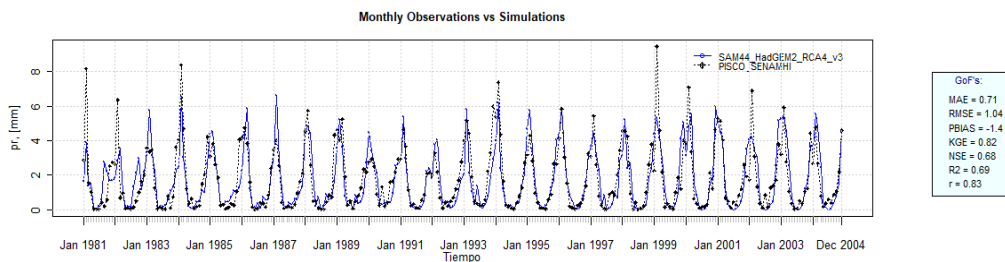
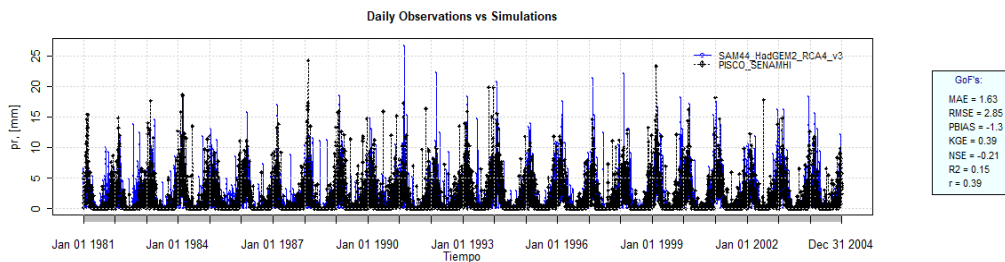
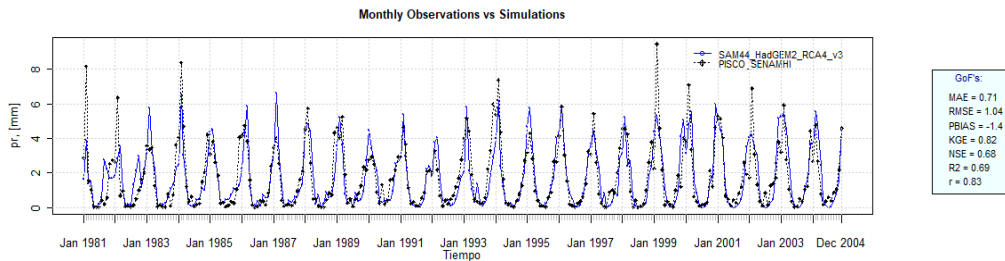
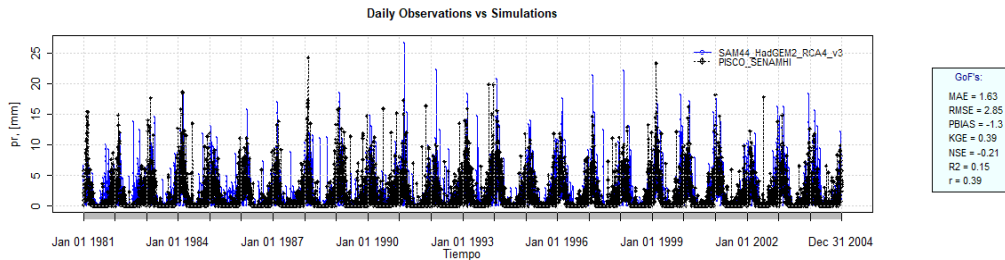
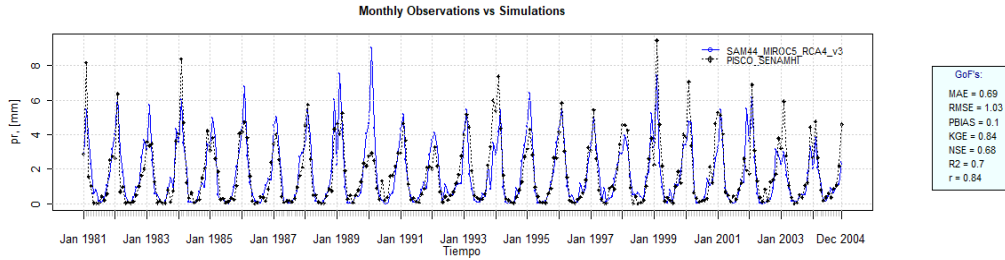
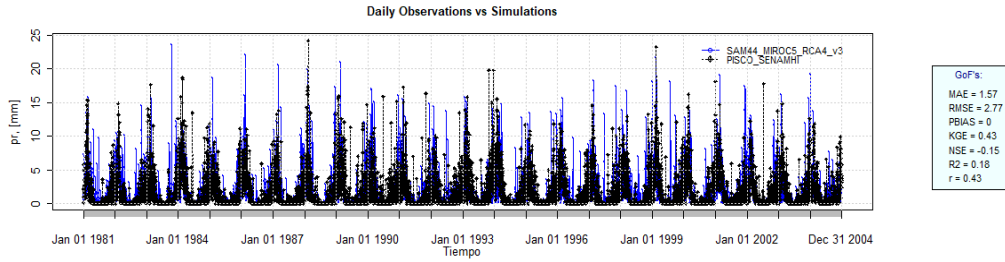


(b) Temperatura mínima (C°)

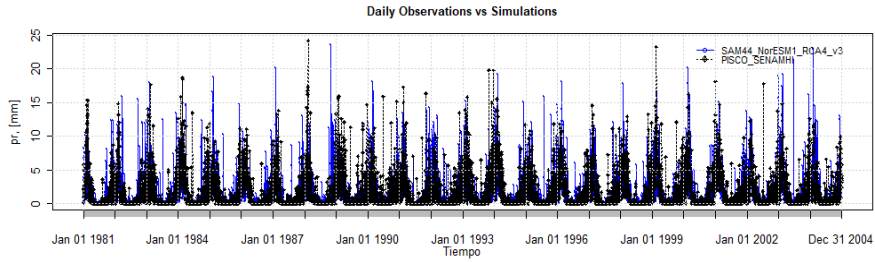


## Anexo 8. Calibración de la precipitación diaria y mensual de modelos climáticos regionales con datos observados grillados del producto PISCO\_SENAMHI



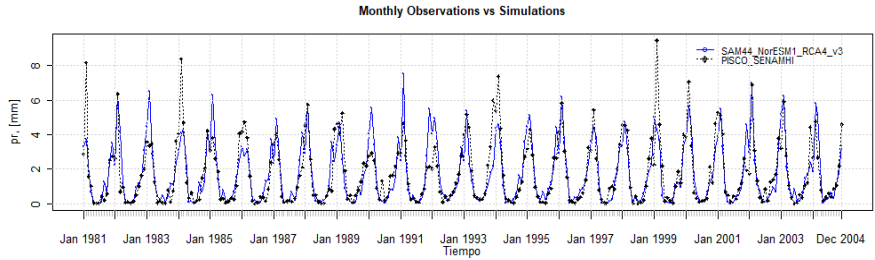






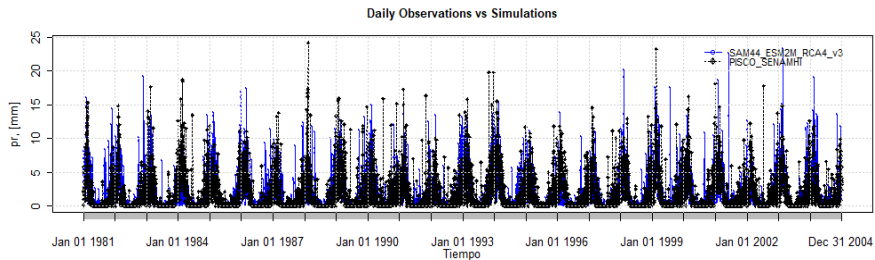
GoFs:

- MAE = 1.58
- RMSE = 2.81
- PBIAS = -1.5
- KGE = 0.4
- NSE = -0.18
- R2 = 0.16
- r = 0.4



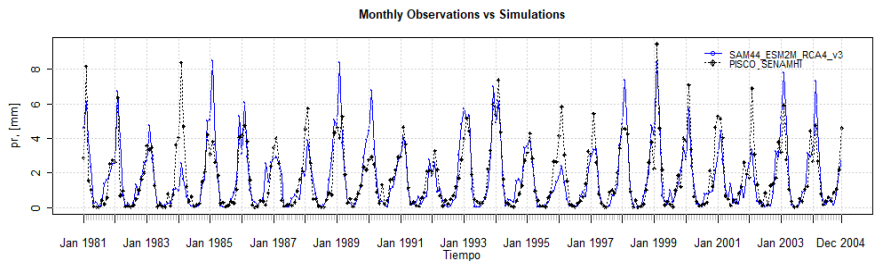
GoFs:

- MAE = 0.66
- RMSE = 1.03
- PBIAS = -1.5
- KGE = 0.82
- NSE = 0.68
- R2 = 0.7
- r = 0.83



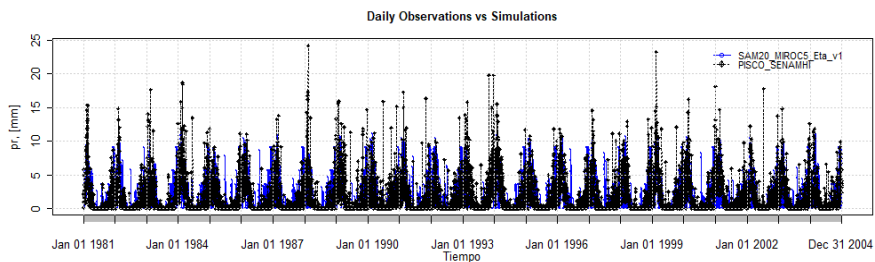
GoFs:

- MAE = 1.6
- RMSE = 2.8
- PBIAS = -1.1
- KGE = 0.41
- NSE = -0.17
- R2 = 0.17
- r = 0.41



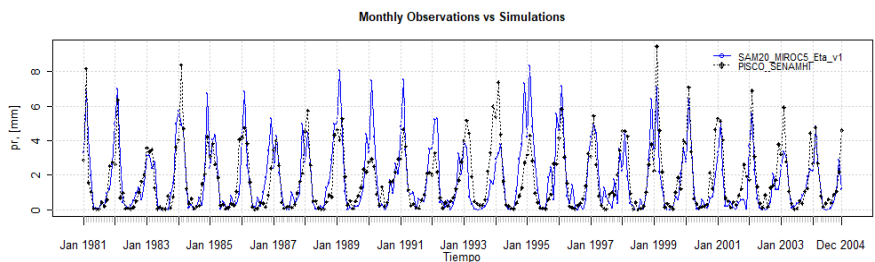
GoFs:

- MAE = 0.71
- RMSE = 1.12
- PBIAS = -1.1
- KGE = 0.82
- NSE = 0.63
- R2 = 0.67
- r = 0.82



GoFs:

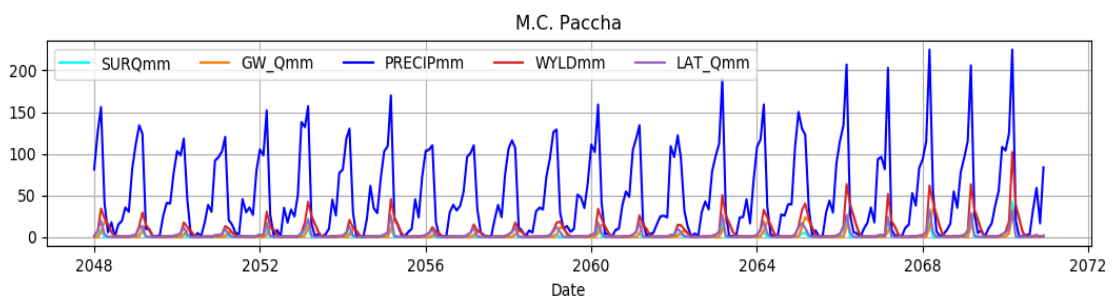
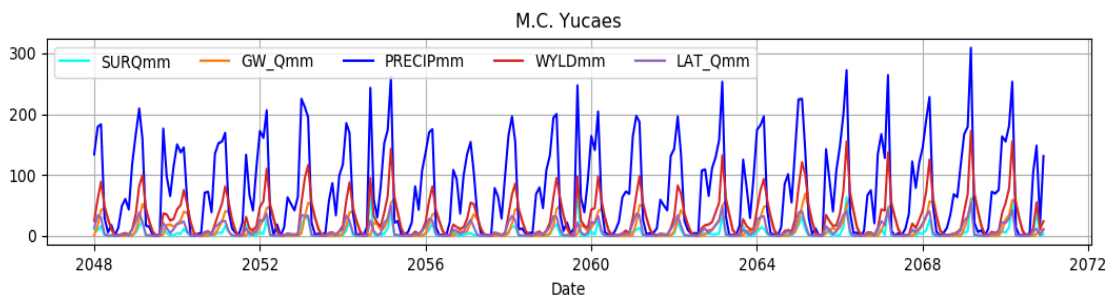
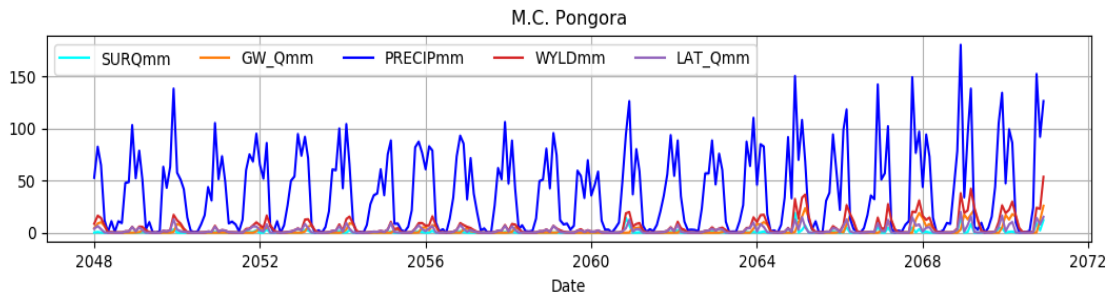
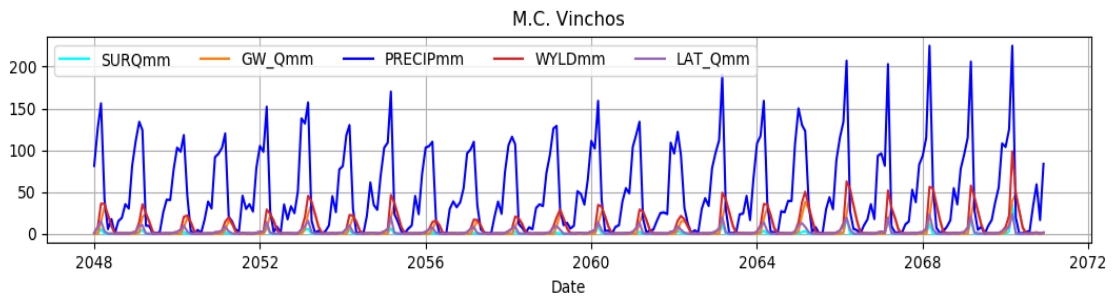
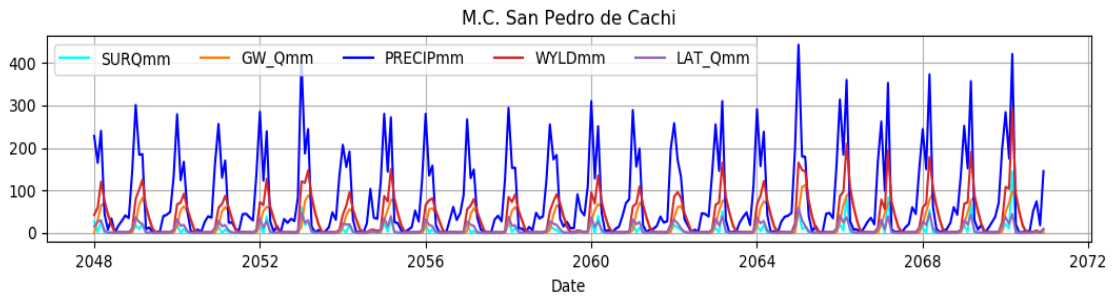
- MAE = 1.88
- RMSE = 3.01
- PBIAS = 0.6
- KGE = 0.36
- NSE = -0.35
- R2 = 0.15
- r = 0.38

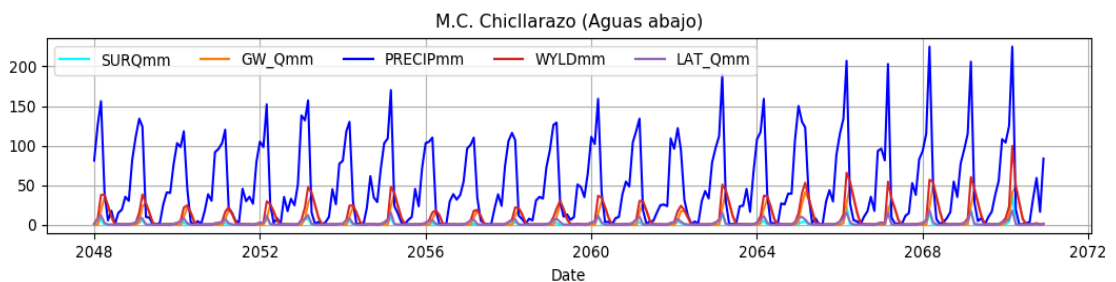
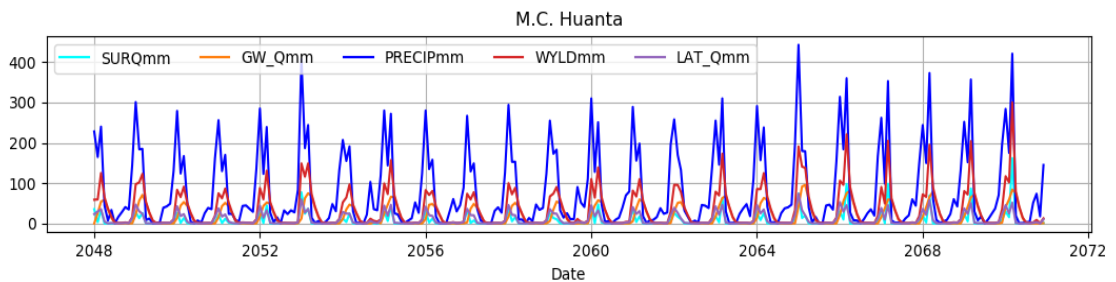
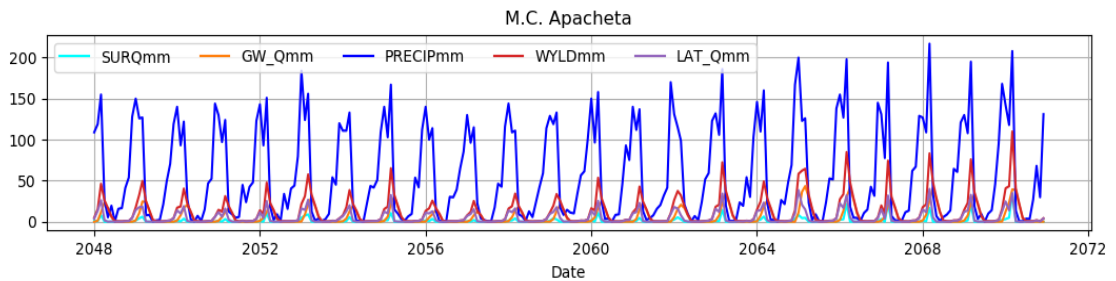
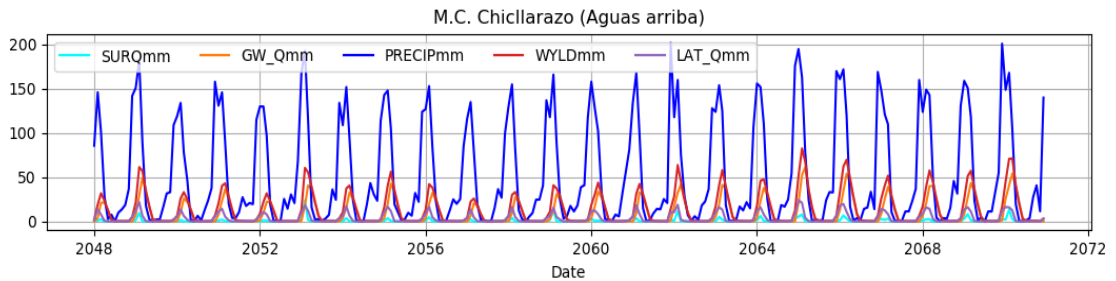
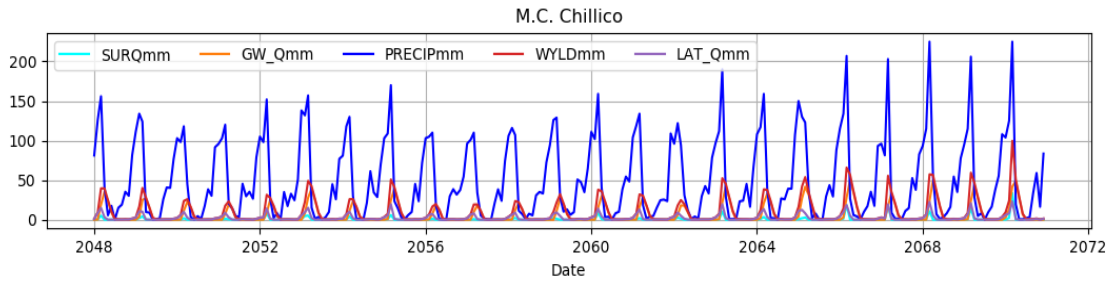
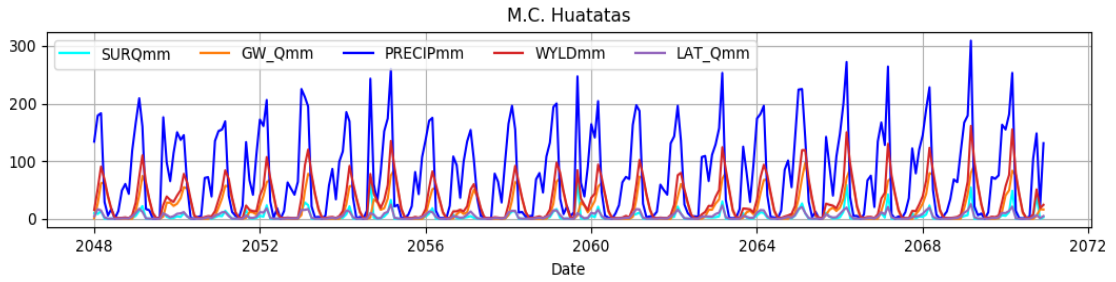


GoFs:

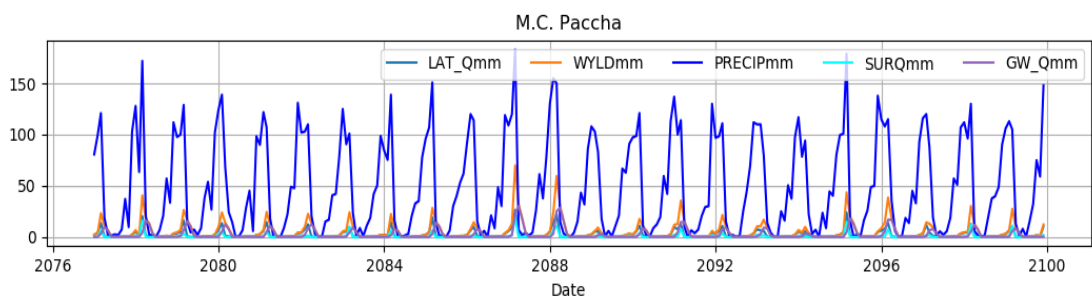
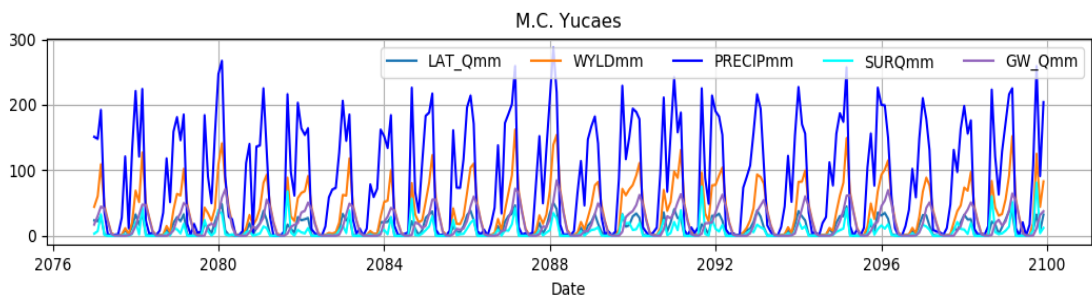
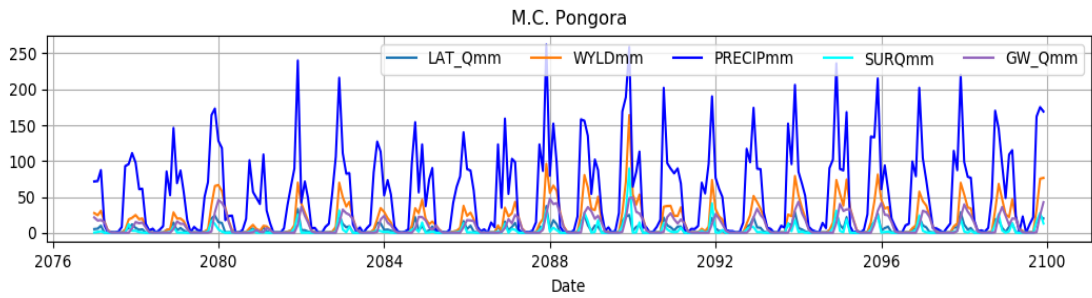
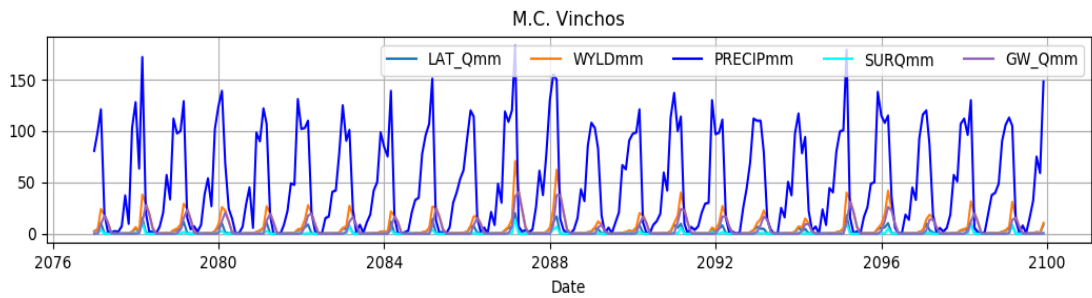
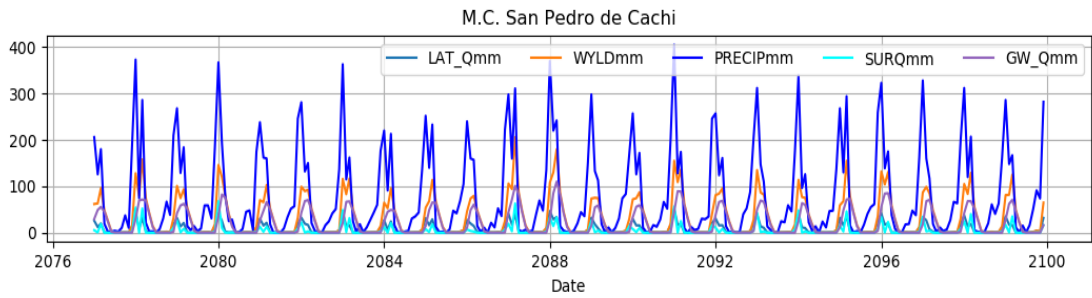
- MAE = 0.85
- RMSE = 1.27
- PBIAS = -0.6
- KGE = 0.77
- NSE = 0.52
- R2 = 0.6
- r = 0.78

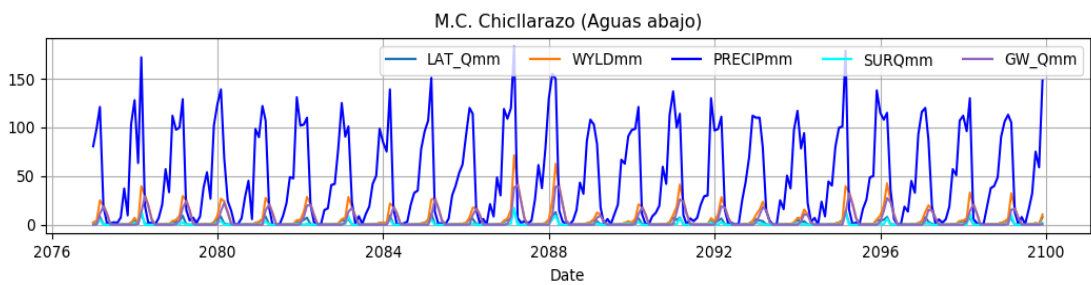
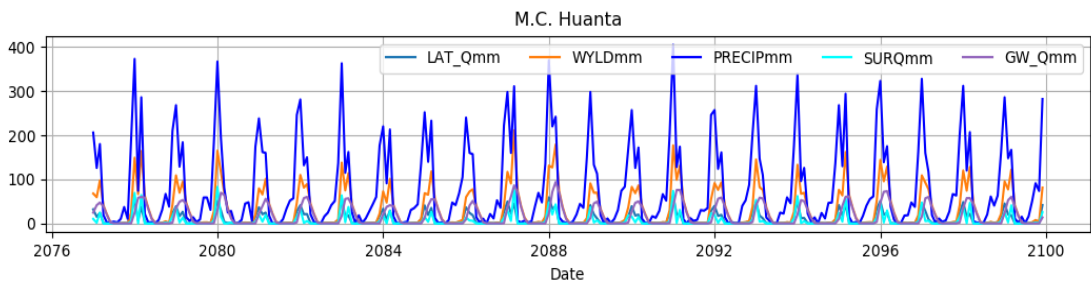
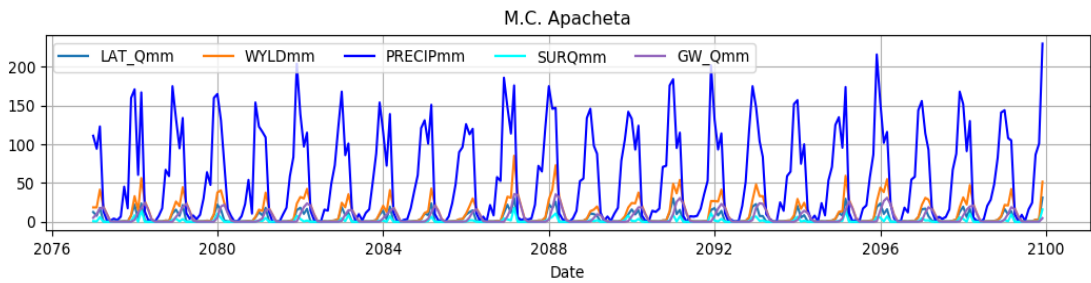
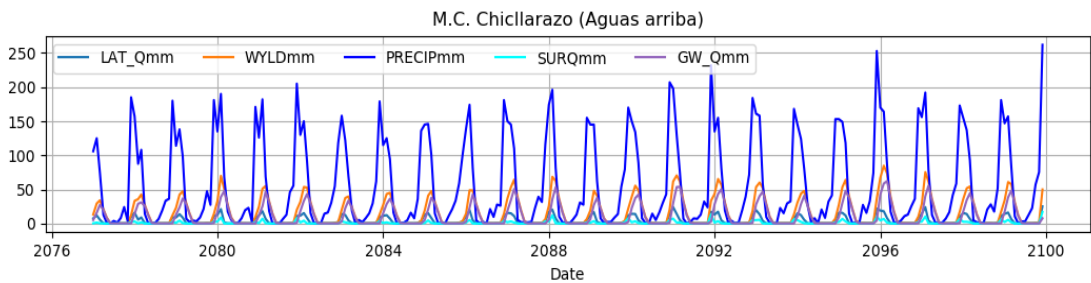
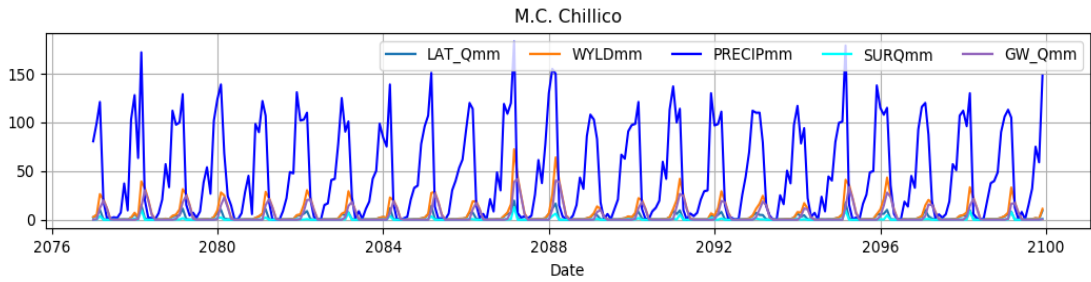
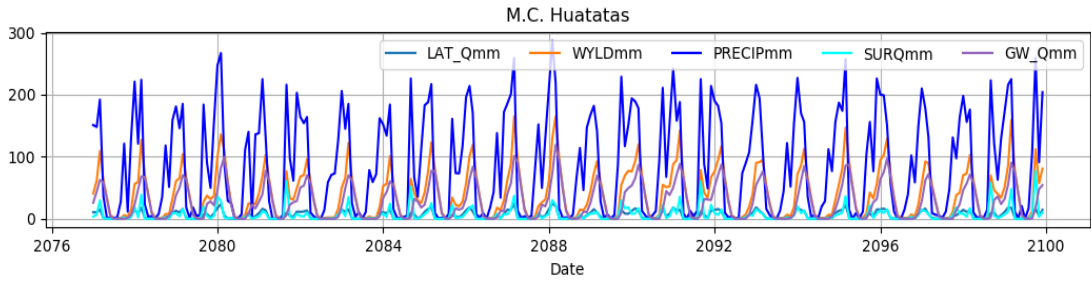
**Anexo 9.** Variación interanual de los componentes hidrológicos para la década del 2060 (2046 – 2070)





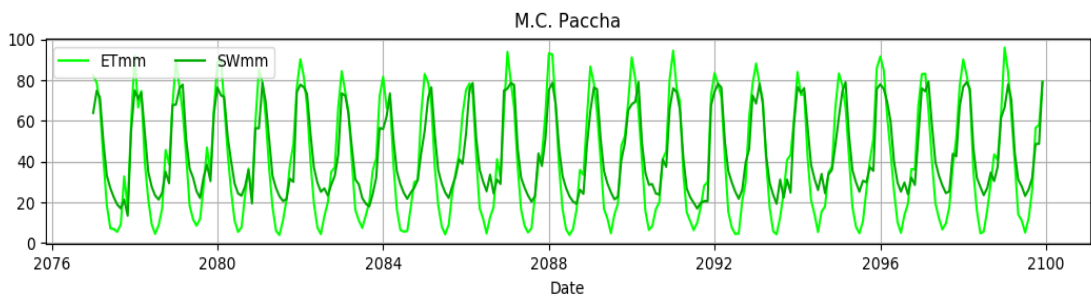
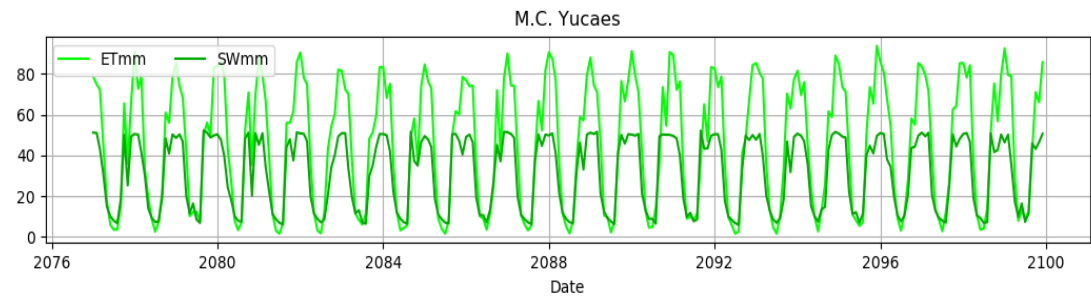
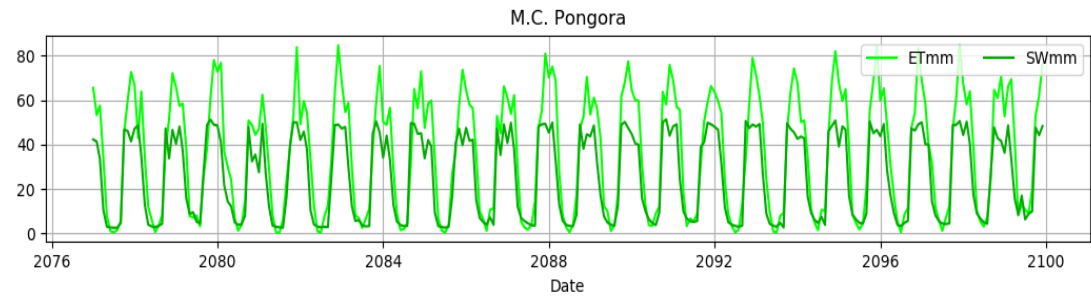
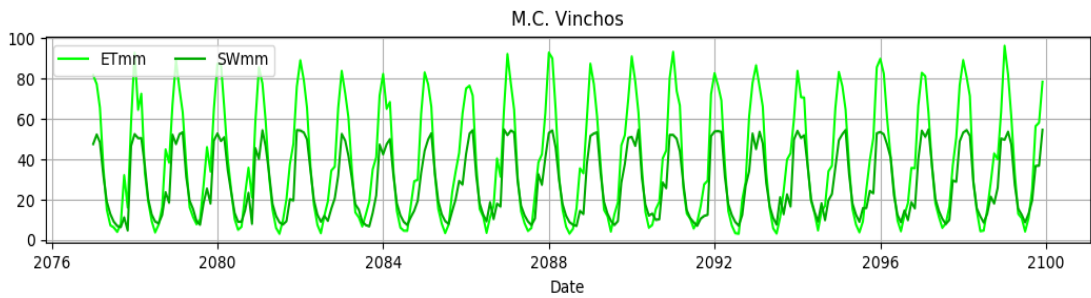
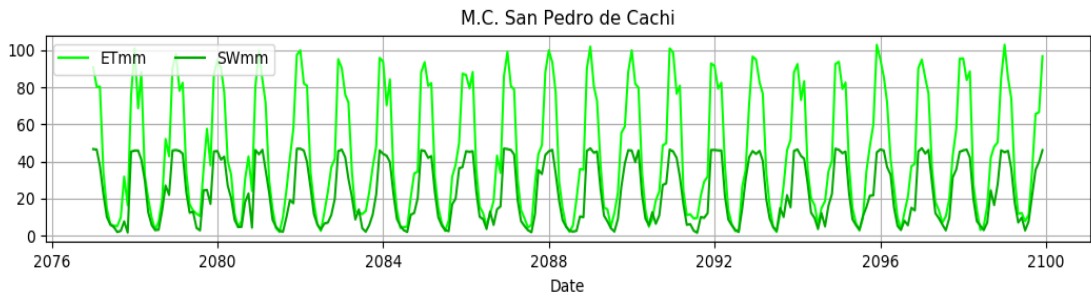
**Anexo 10.** Variación interanual de los componentes hidrológicos para la década del 2090 (2075 – 2099)

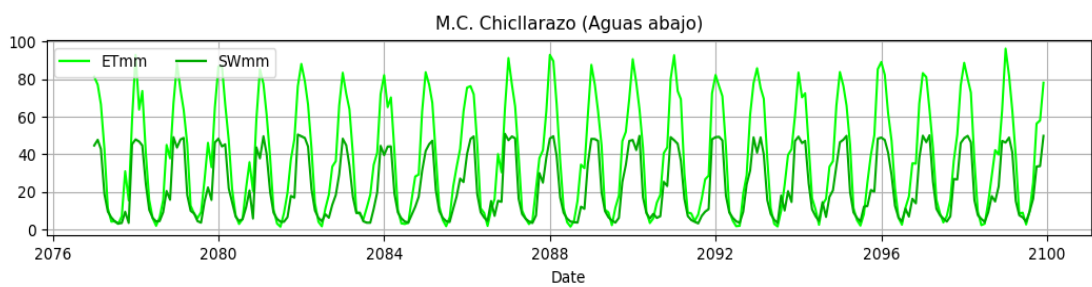
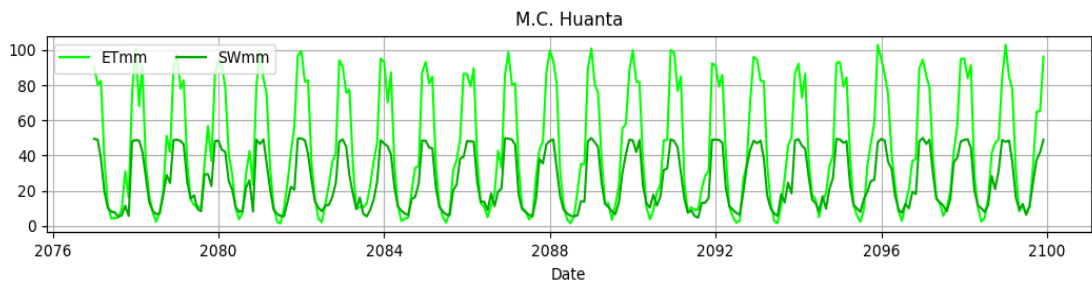
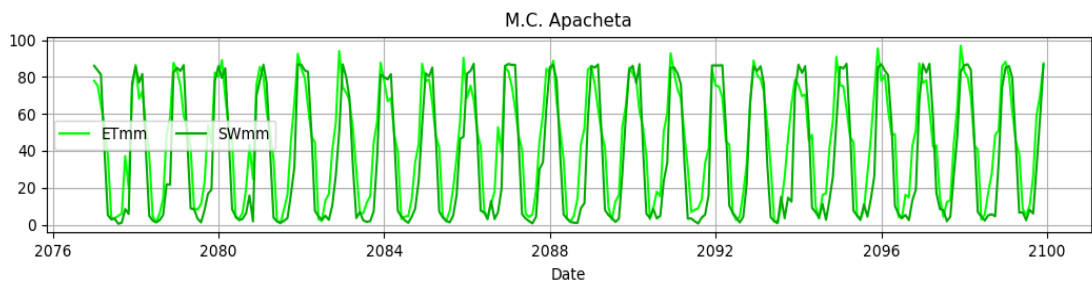
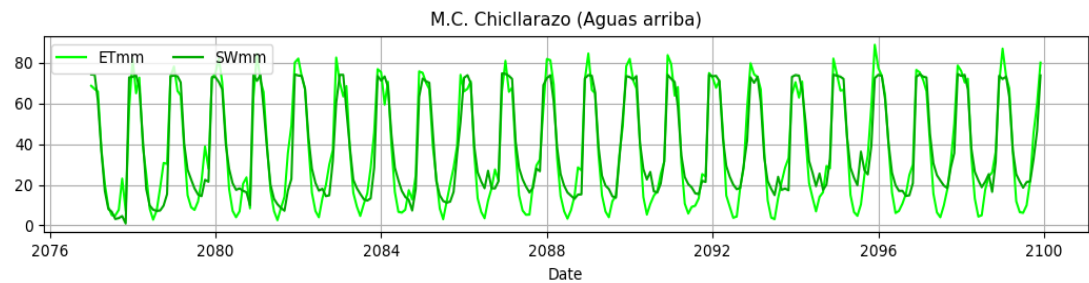
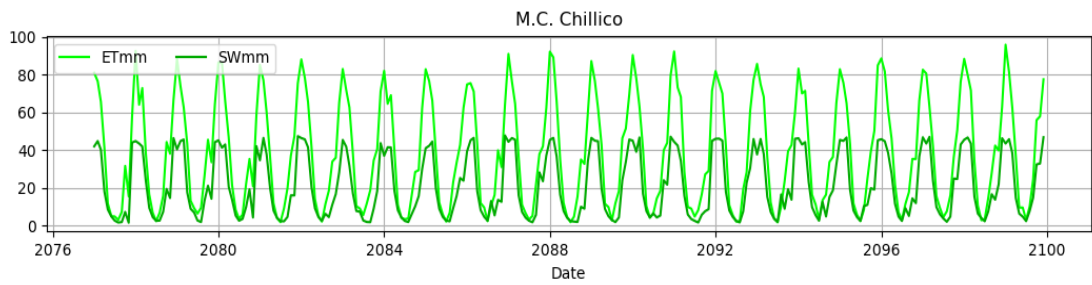
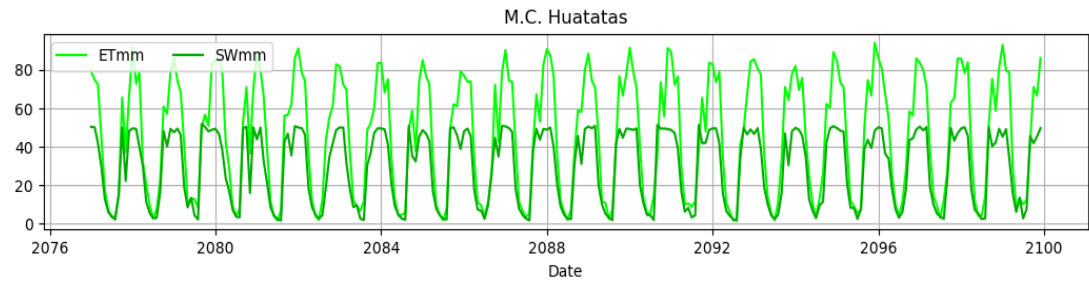




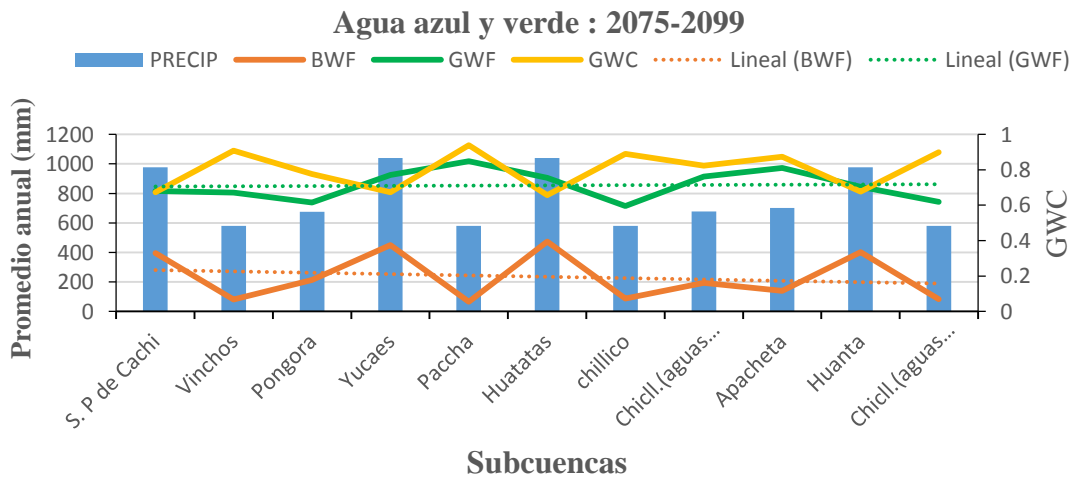
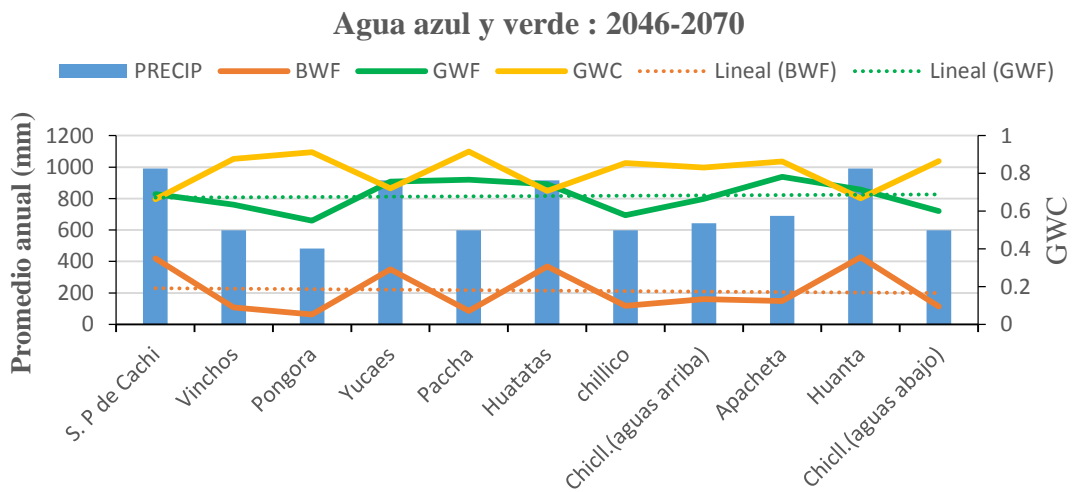
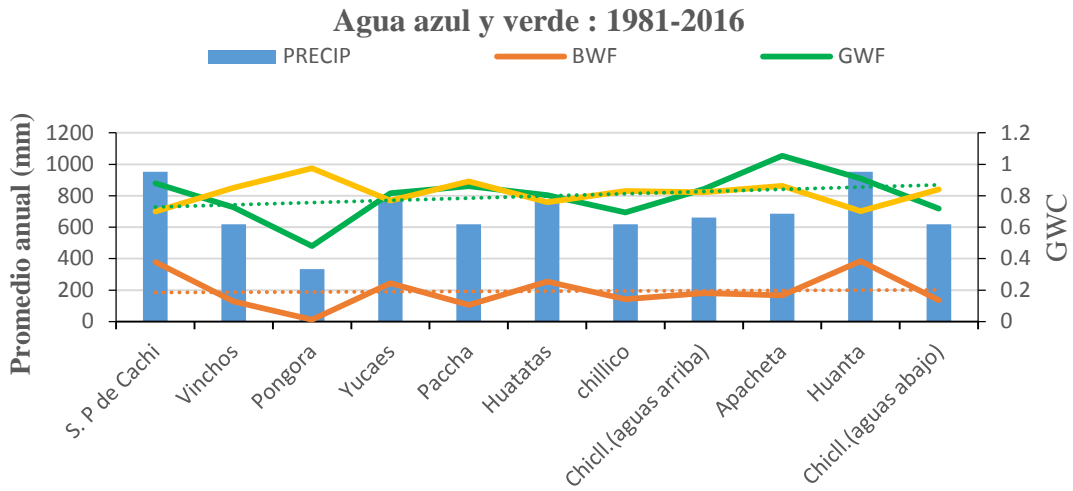


**Anexo 11.** Variación interanual de los componentes hidrológicos del GWF para la década del (2075 – 2099)



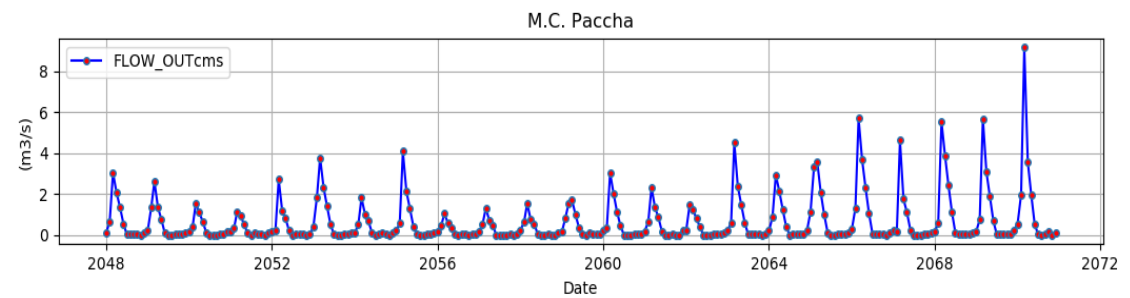
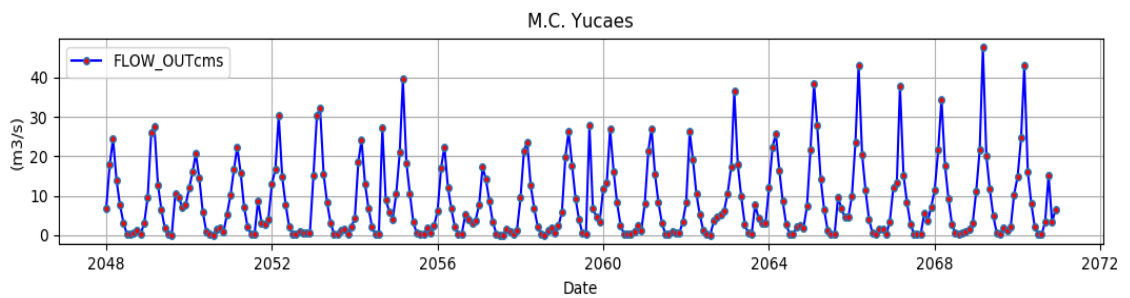
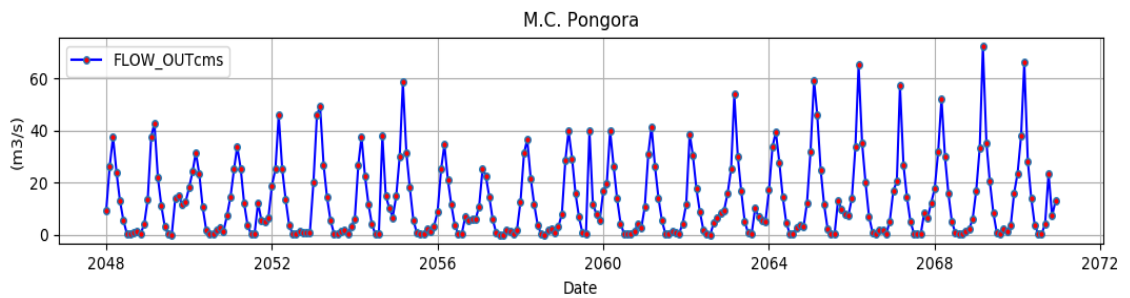
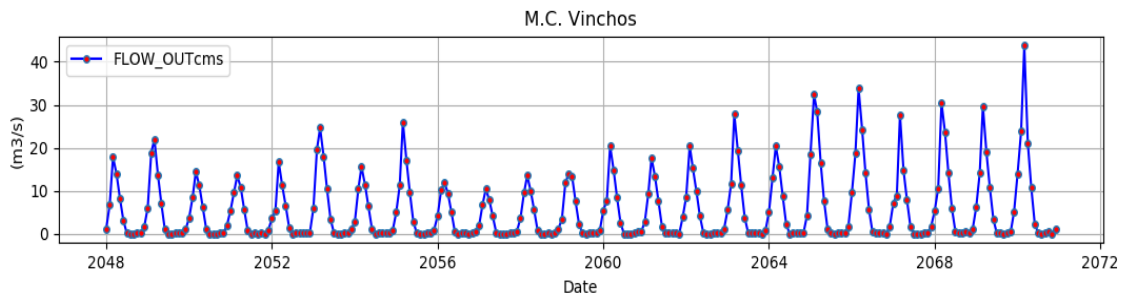
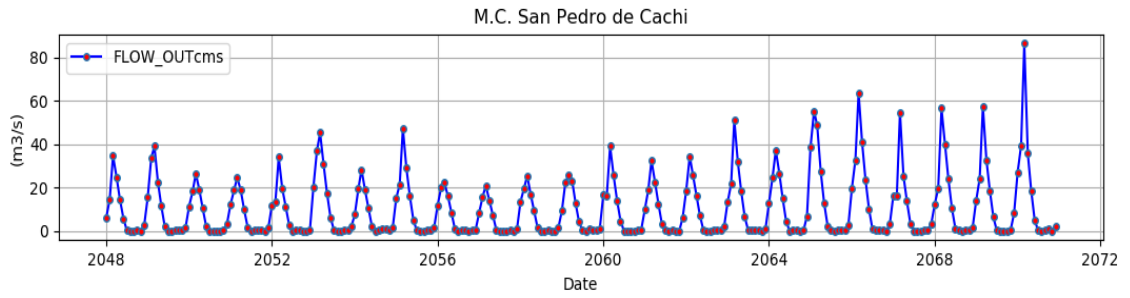


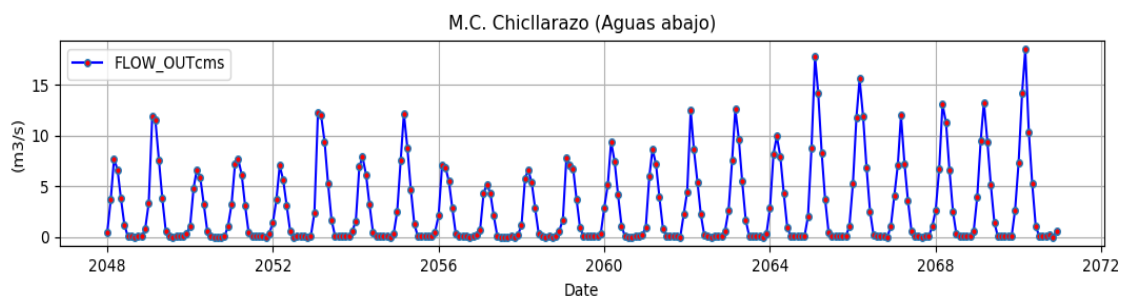
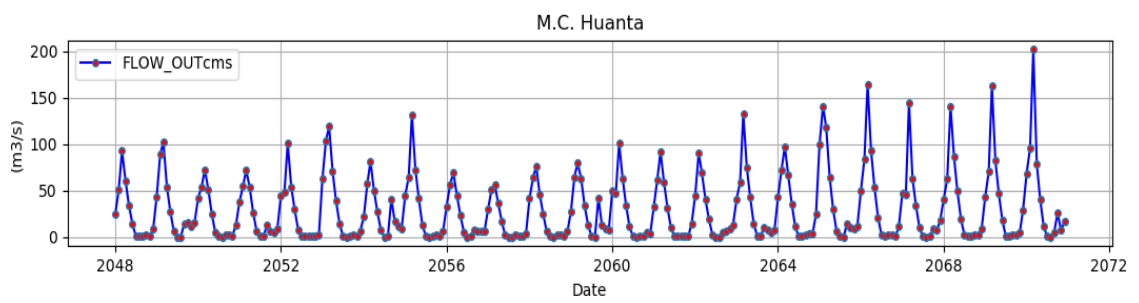
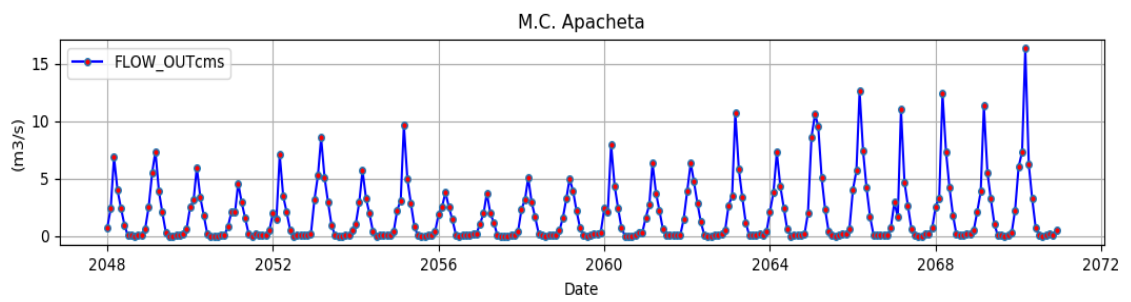
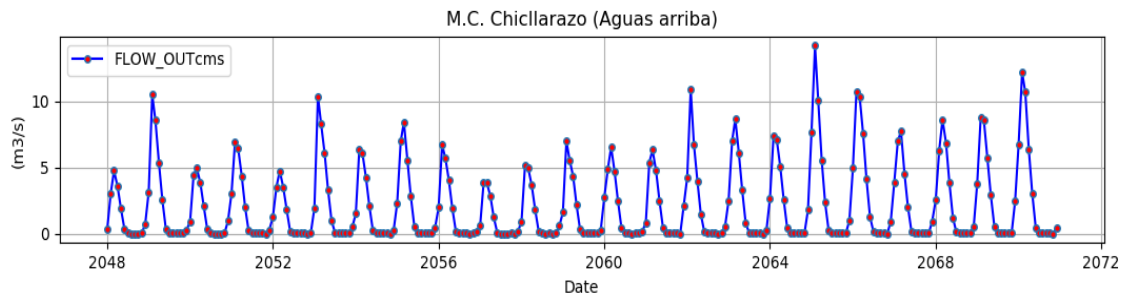
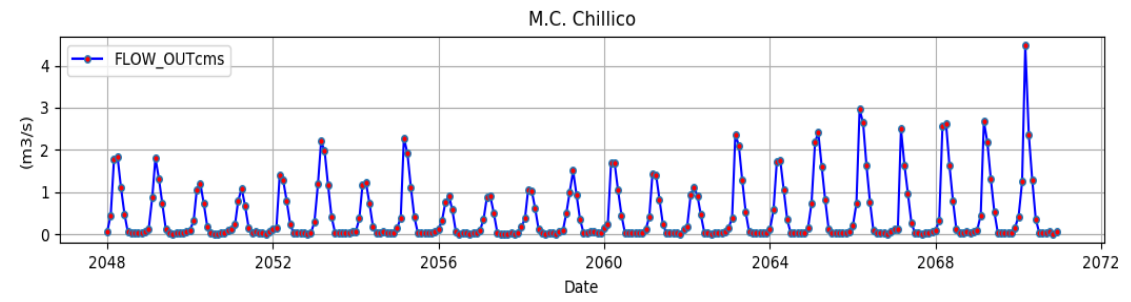
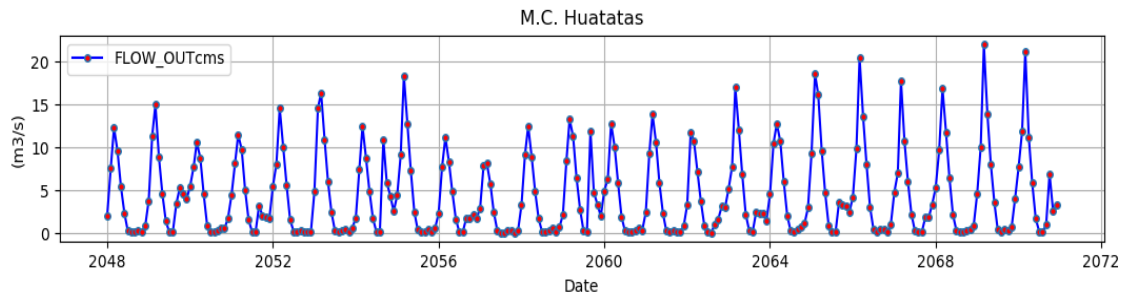
## Anexo 12. Variación del BFW y GWF en la cuenca del río Cachi



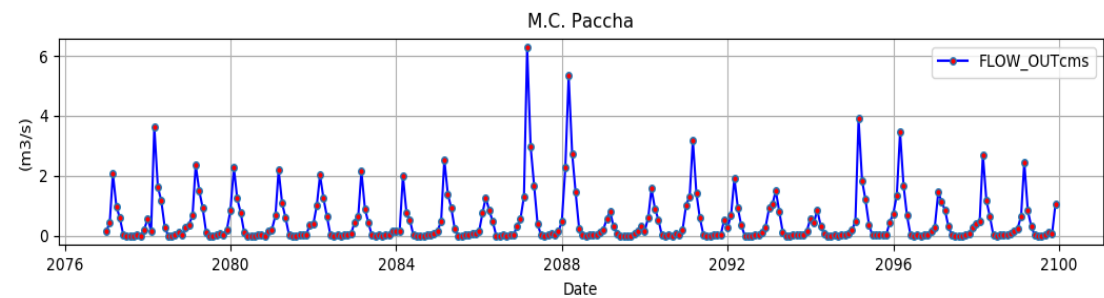
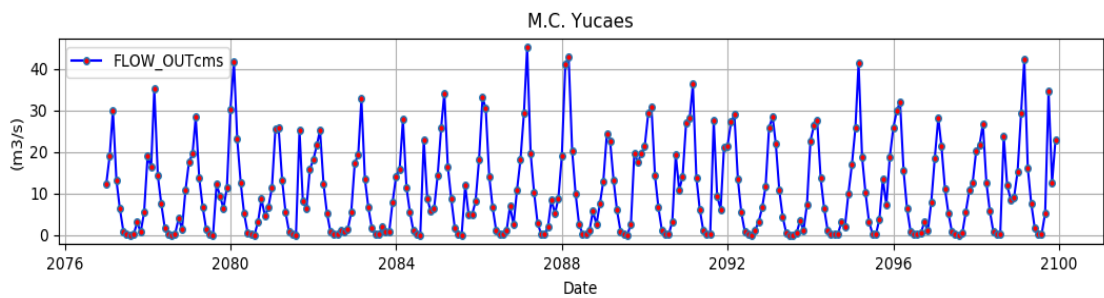
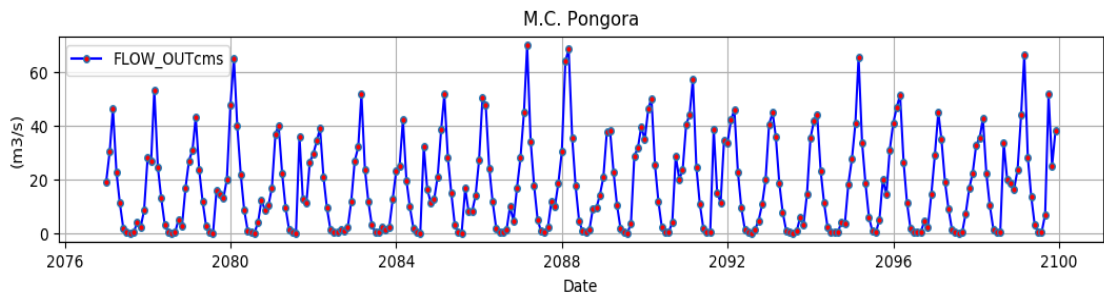
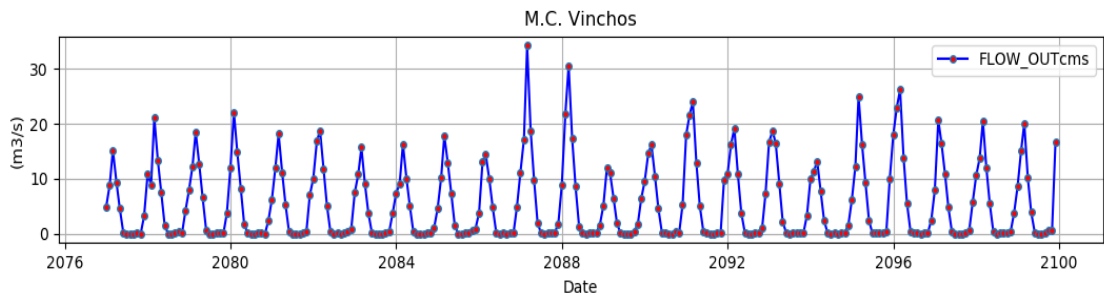
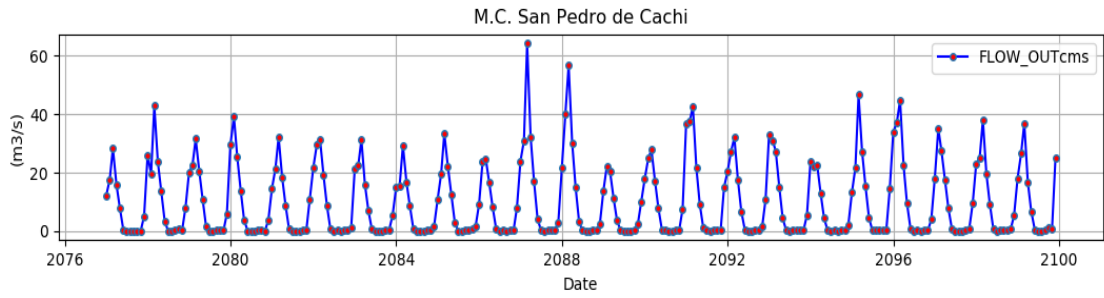


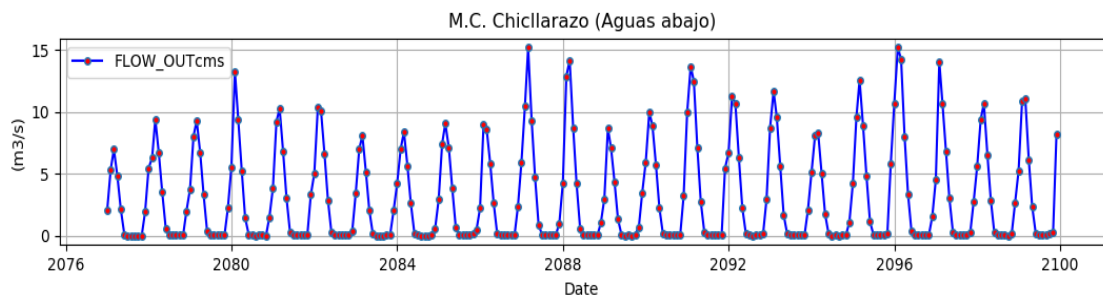
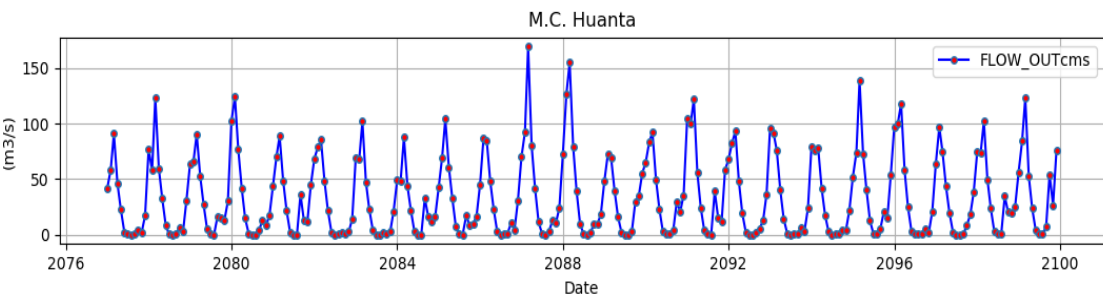
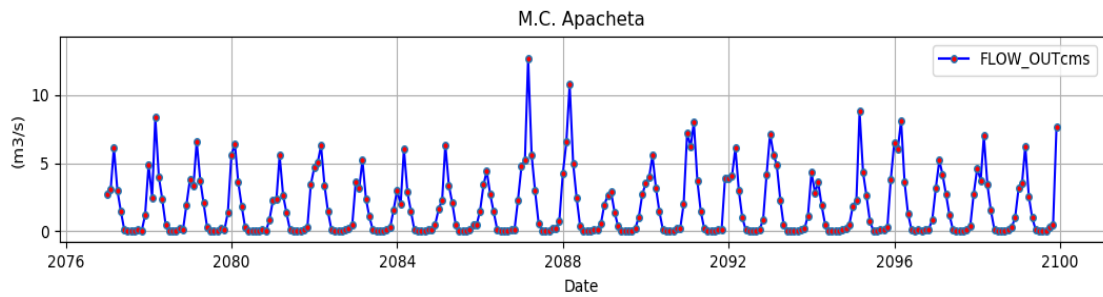
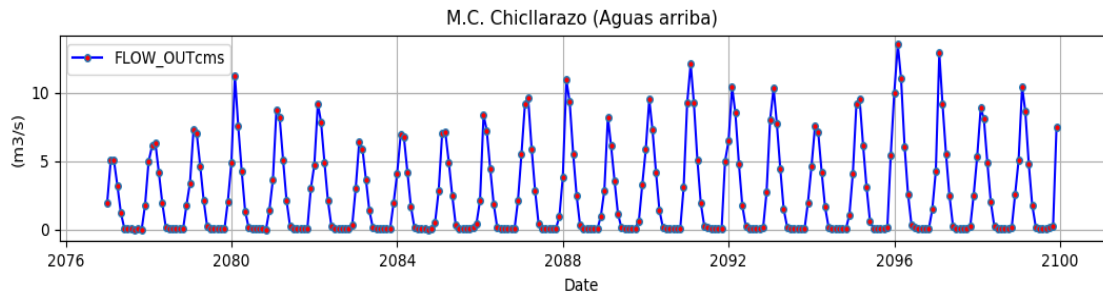
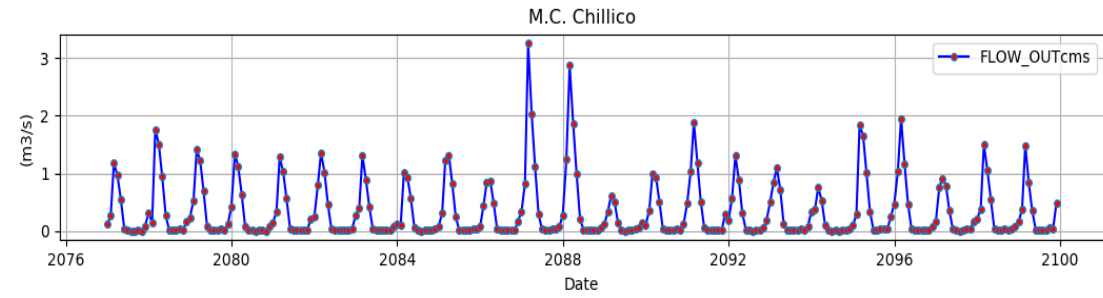
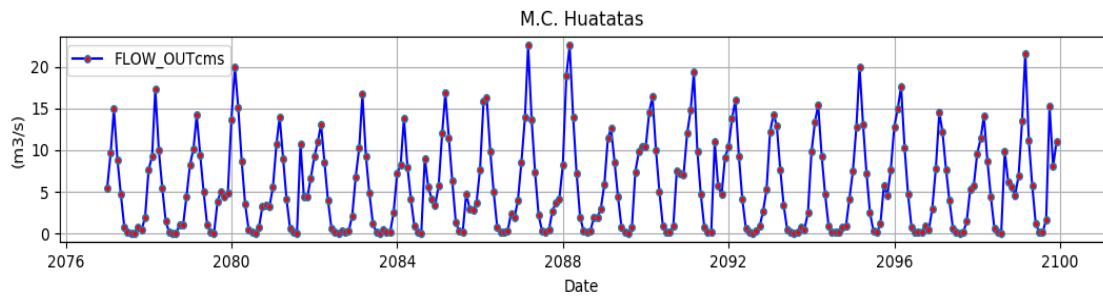
### Anexo 13. Caudal mensual promedio a nivel de subcuencas para la década del 2070





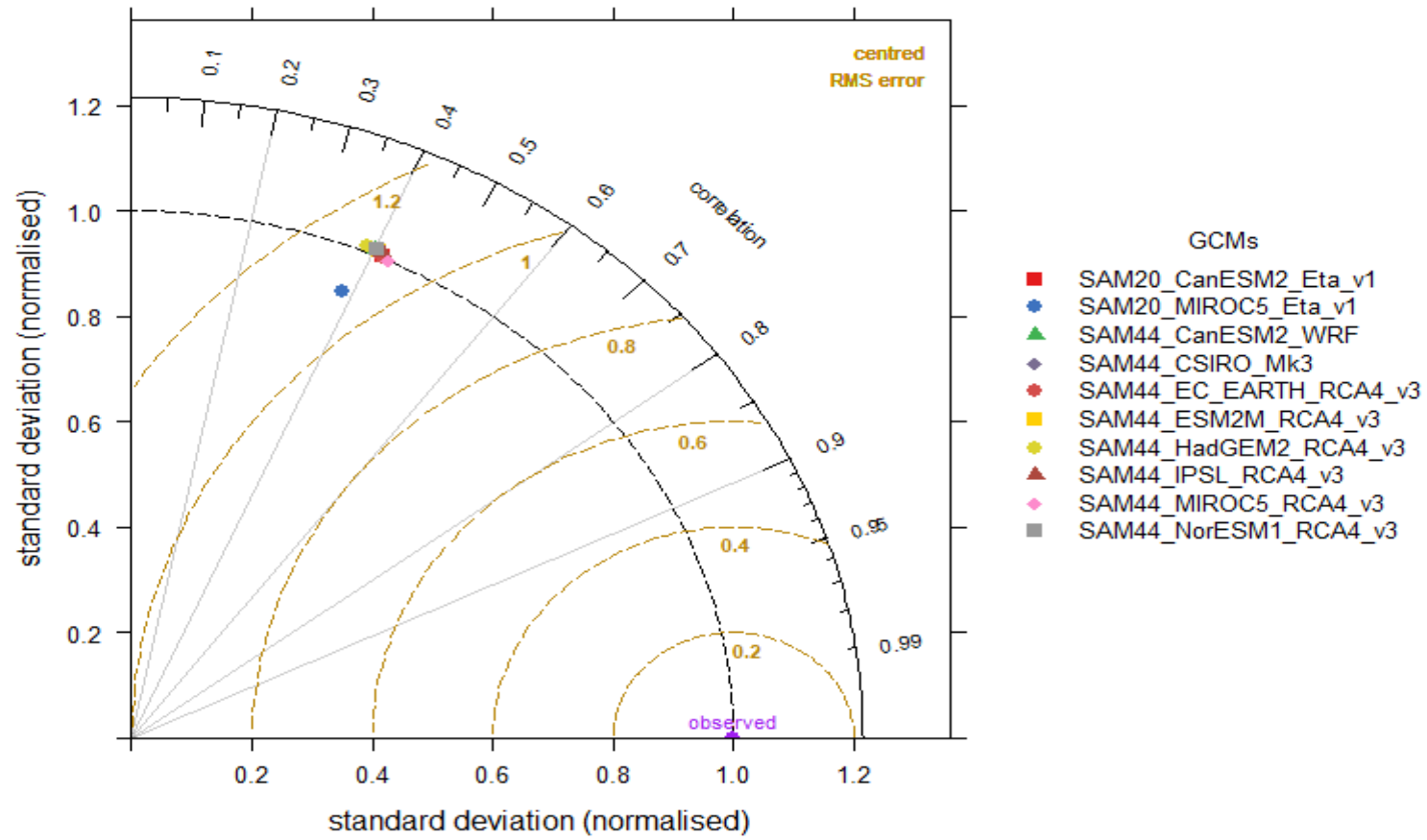
## Anexo 14. Caudal mensual promedio a nivel de subcuencas para la década del 2090





Anexo 15. Diagrama de Taylor para los modelos GCMs-RCMs

Taylor Diagram





**UNSCH**

FACULTAD DE CIENCIAS  
**AGRARIAS**

## **CONSTANCIA DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS**

El presidente de la comisión de docentes instructores responsables de operativizar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de tesis de la Facultad de Ciencias Agrarias, deja constancia que el trabajo de tesis titulado;

**“Respuesta hidrológica con cambio climático en flujos de agua azul y verde, cuenca del río Cachi, Ayacucho 2021”**

Autor : Elmer Jonatan Moreno Villafuerte

Asesor : Sandra Del Águila Ríos

Ha sido sometido al análisis del sistema antiplagio TURNITIN concluyendo que presenta un porcentaje de 22 % de similitud.

Por lo que, de acuerdo al porcentaje establecido en el Artículo 13 del Reglamento de originalidad de trabajos de investigación de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, es procedente otorgar la Constancia de Originalidad.

Ayacucho, 19 de agosto de 2022

---

**Ing. WALTER AUGUSTO MATEU MATED**  
**Presidente de comisión**

# RESPUESTA HIDROLOGICA CON CAMBIO CLIMATICO EN FLUJOS DE AGUA AZUL Y VERDE, CUENCA DEL RÍO CACHI, AYACUCHO 2021

*por Elmer Jonatan Moreno Villafuerte*

---

**Fecha de entrega:** 19-ago-2022 11:40a.m. (UTC-0500)

**Identificador de la entrega:** 1884440882

**Nombre del archivo:** Tesis\_Jonatan\_Moreno777.pdf (11.54M)

**Total de palabras:** 28201

**Total de caracteres:** 153756

# RESPUESTA HIDROLOGICA CON CAMBIO CLIMATICO EN FLUJOS DE AGUA AZUL Y VERDE, CUENCA DEL RÍO CACHI, AYACUCHO 2021

## INFORME DE ORIGINALIDAD

22%

INDICE DE SIMILITUD

22%

FUENTES DE INTERNET

6%

PUBLICACIONES

8%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

## FUENTES PRIMARIAS

1	<a href="https://repositorio.lamolina.edu.pe">repositorio.lamolina.edu.pe</a> Fuente de Internet	5%
2	<a href="https://hdl.handle.net">hdl.handle.net</a> Fuente de Internet	3%
3	<a href="https://vdocuments.mx">vdocuments.mx</a> Fuente de Internet	1%
4	<a href="https://es.scribd.com">es.scribd.com</a> Fuente de Internet	1%
5	<a href="https://www.senamhi.gob.pe">www.senamhi.gob.pe</a> Fuente de Internet	1%
6	<a href="https://documentacion.ideam.gov.co">documentacion.ideam.gov.co</a> Fuente de Internet	1%
7	<a href="https://asa.crs.org">asa.crs.org</a> Fuente de Internet	1%
8	<a href="https://repositorio.unsch.edu.pe">repositorio.unsch.edu.pe</a> Fuente de Internet	1%



9	<a href="http://www.scielo.org.mx">www.scielo.org.mx</a> Fuente de Internet	1 %
10	<a href="http://www.scielo.org.pe">www.scielo.org.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
11	<a href="http://www.agua.imdea.org">www.agua.imdea.org</a> Fuente de Internet	<1 %
12	<a href="http://revistatyca.org.mx">revistatyca.org.mx</a> Fuente de Internet	<1 %
13	<a href="http://repository.udistrital.edu.co">repository.udistrital.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
14	<a href="http://swat.tamu.edu">swat.tamu.edu</a> Fuente de Internet	<1 %
15	<a href="http://www.repositorio.usac.edu.gt">www.repositorio.usac.edu.gt</a> Fuente de Internet	<1 %
16	<a href="http://repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr">repositorio.bibliotecaorton.catie.ac.cr</a> Fuente de Internet	<1 %
17	<a href="http://doi.org">doi.org</a> Fuente de Internet	<1 %
18	<a href="http://zagan.unizar.es">zagan.unizar.es</a> Fuente de Internet	<1 %
19	<a href="http://www.unesco.org">www.unesco.org</a> Fuente de Internet	<1 %
20	<a href="http://ri.uaemex.mx">ri.uaemex.mx</a> Fuente de Internet	<1 %

21	<a href="http://repositorio.uap.edu.pe">repositorio.uap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
22	<a href="http://tesis.ucsm.edu.pe">tesis.ucsm.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
23	<a href="http://repositorio.unap.edu.pe">repositorio.unap.edu.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
24	<a href="http://slideplayer.es">slideplayer.es</a> Fuente de Internet	<1 %
25	<a href="http://documentop.com">documentop.com</a> Fuente de Internet	<1 %
26	<a href="http://dokumen.pub">dokumen.pub</a> Fuente de Internet	<1 %
27	<a href="http://www.ideam.gov.co">www.ideam.gov.co</a> Fuente de Internet	<1 %
28	Submitted to Universidad San Ignacio de Loyola Trabajo del estudiante	<1 %
29	<a href="http://vsip.info">vsip.info</a> Fuente de Internet	<1 %
30	<a href="http://datateca.unad.edu.co">datateca.unad.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
31	<a href="http://core.ac.uk">core.ac.uk</a> Fuente de Internet	<1 %
32	<a href="http://cooperacion.org.pe">cooperacion.org.pe</a> Fuente de Internet	<1 %

---

33	<a href="http://www.um.es">www.um.es</a> Fuente de Internet	<1 %
34	<a href="http://congresocambioclimatico.com">congresocambioclimatico.com</a> Fuente de Internet	<1 %
35	<a href="http://pt.scribd.com">pt.scribd.com</a> Fuente de Internet	<1 %
36	<a href="http://tel.archives-ouvertes.fr">tel.archives-ouvertes.fr</a> Fuente de Internet	<1 %
37	<a href="http://repositorio.ana.gob.pe">repositorio.ana.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
38	<a href="http://bibliotecadigital.udea.edu.co">bibliotecadigital.udea.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %
39	<a href="http://link.springer.com">link.springer.com</a> Fuente de Internet	<1 %
40	Submitted to Universidad Continental Trabajo del estudiante	<1 %
41	<a href="http://cdn.www.gob.pe">cdn.www.gob.pe</a> Fuente de Internet	<1 %
42	<a href="http://repositorio.unesum.edu.ec">repositorio.unesum.edu.ec</a> Fuente de Internet	<1 %
43	<a href="http://bdigital.unal.edu.co">bdigital.unal.edu.co</a> Fuente de Internet	<1 %

---

44	docplayer.es Fuente de Internet	<1 %
45	www.mdpi.com Fuente de Internet	<1 %
46	www.sid.ir Fuente de Internet	<1 %
47	Brigadier Libanda, Heiko Paeth. "Modelling wind speed across Zambia: Implications for wind energy", International Journal of Climatology, 2022 Publicación	<1 %
48	docplayer.net Fuente de Internet	<1 %
49	ocw.um.es Fuente de Internet	<1 %
50	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Trabajo del estudiante	<1 %
51	catarina.udlap.mx Fuente de Internet	<1 %
52	depositonce.tu-berlin.de Fuente de Internet	<1 %
53	oa.upm.es Fuente de Internet	<1 %

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Apagado