



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE INGENIERÍA AGRÍCOLA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



**EVALUACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PRODUCTO DE
PRECIPITACIÓN PISCO EN LA MODELIZACIÓN
HIDROLÓGICA DE LA CUENCA DEL RÍO RAMIS**

TESIS

PRESENTADA POR:

Bach. TOMAS GREGORIO CENTENO JARITA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO AGRÍCOLA

PUNO – PERÚ

2022



DEDICATORIA

*A Dios: **el Señor es mi pastor**, él me guía, y con él tengo y soy valiente. Todo gracias a su amor por mí y al amor que me da. Padre nuestro, estás en mi corazón, aunque sea imperfecto, no me dejes nunca. Quiero rezar por ti, de todo corazón.*

*A mi Madre **Elena Jarita Flores**, que me hizo compañía durante mis largas horas de estudio. En los días de cansancio, me ayudaba a recuperarme de mi agotamiento con el alimento que sólo una madre puede proporcionar. Madrecita, me apoyaste cuando más te necesitaba y me guiaste por el camino correcto. Gracias a ti que he llegado hasta aquí. Me has enseñado a ser valiente y seguir adelante, sean cuales sean las circunstancias. Eres mi ejemplo de lucha y de vida. Te quiero Madrecita Linda.*

*A mi Padre **Gregorio Centeno Huanca**, que siempre hizo lo mejor por mi vida y me mantuvo anhelante. Por todos sus consejos y por todas las enseñanzas que me han guiado a lo largo de mi vida, tus palabras siempre me han dado consuelo en los momentos de angustia. Te quiero Papito lindo.*

*A mi Hermanita **Sonaly Centeno Jarita**, que con su ternura iluminó mis momentos más sombríos, compartió parte de mis penas, sufrimientos, alegrías y es parte de este ansiado sueño. Trato de ser siempre un Ejemplo de superación para ella.*

Para mí, por todos mis esfuerzos, sacrificios y por resistir los embates de la vida, he llegado a verme como un peregrino de la vida que ama la belleza y disfruta de los pequeños momentos y las pequeñas cosas. Un caminante que conoce la importancia de la amistad y el diálogo sincero. Un amante eterno. Un eterno soñador con los pies en la tierra. Un eterno optimista que cree y confía en la nobleza del corazón humano. Y Aprendí que no solo se debe enseñar, sino también se debe educar.

Tomas Gregorio CENTENO JARITA



AGRADECIMIENTOS

A mi Alma Mater, la **Universidad Nacional del Altiplano de Puno**, en sus aulas aproveché los conocimientos intelectuales y humanísticos de todos los **Catedráticos de mi querida Facultad de Ingeniería Agrícola**.

Al M. Sc. **Carlos A. Fernández Palomino** por su tutela, sus consejos cruciales, sus inestimables sugerencias y su plena colaboración en la génesis y desarrollo de esta Tesis. Al D. Sc. **German Belizario Quispe** por su dirección, consejos, asesoramiento, evaluación y el apoyo en la realización de esta Tesis. A mis **Jurados** por sus aportes en la culminación de esta Tesis. Al M. Sc. **Roberto Alfaro Alejo** por su invaluable contribución, me ayudó a ver el alcance de las discusiones de la investigación desde una perspectiva diferente. Al Ing. **Gary Chota Loayza** (Docente de HidroTierra-Bolivia), por su desprendimiento en la enseñanza de SWAT, y, como resultado, me inspiró a continuar investigando. Al M. Sc. **Audberto Millones Chafloque** por su motivación constante y por la oportunidad de desarrollarme académicamente y profesionalmente.

Mi estima especial a la **Obstetra Julissa Mogollón Quiroz**, por su afecto, apoyo y motivación constante, y por enseñarme que la Oración lo cambia todo.

A mis hermanos **Yony, Leonardo, Oscar** y mis hermanas **Elsa, Silvia, Lucia**, mi aprecio, por su motivación y contribución a mi formación profesional.

Con respeto a mi hermano Ing. **Leonardo A. Centeno Vilca**, por su motivación en mi vida Universitaria y por darme la oportunidad de desarrollarme en los primeros años después de la graduación.

A **Marco Zapana Ríos, Moisés Quispe, David Gomero** y **amigos(as)** por los momentos de valor académico, social y amistad a lo largo del desarrollo de mi Tesis.

Tomas Gregorio CENTENO JARITA



ÍNDICE GENERAL

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTOS

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE TABLAS

ÍNDICE DE FIGURAS

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

RESUMEN 16

ABSTRACT..... 17

CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES..... 18

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA..... 19

1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN 20

1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN 21

1.4.1 Objetivo general 21

1.4.2 Objetivos específicos 21

CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES 22

2.1.1 Antecedente de nivel internacional..... 22

2.1.2 Antecedente de nivel nacional..... 23

2.1.3 Antecedente de nivel regional 26

2.2 CICLO HIDROLÓGICO..... 29

2.2.1 Precipitación 31



2.2.2	Evapotranspiración	31
2.2.3	Infiltración	31
2.2.4	Percolación	31
2.2.5	Escorrentía superficial	31
2.2.6	Escorrentía sub-superficial	32
2.3	MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA	32
2.3.1	Modelización de cuencas hidrográficas.....	32
2.3.2	Conceptos de modelización	33
2.3.3	Resolución temporal de la modelización.....	33
2.4	MODELOS HIDROLÓGICOS.....	34
2.4.1	Clasificación de los modelos hidrológicos	35
2.4.2	Modelos distribuidos frente a modelos agregados	36
2.4.3	Etapas de la aplicación de un modelo hidrológico	38
2.5	ELECCIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO.....	38
2.6	MODELO SWAT.....	39
2.6.1	Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT.....	40
2.6.2	Componentes del modelo SWAT	41
2.6.3	Enfoque del modelo SWAT	42
2.6.4	Proceso de modelización hidrológica con SWAT.....	53
2.7	PRODUCTO PISCO.....	54
2.7.1	Conjunto de datos pluviométricos	54
2.7.2	Control de calidad.....	55
2.7.3	Relleno de datos	56
2.7.4	Desarrollo de PISCO _{p_{clim}}	57
2.7.5	Evaluación de PISCOp	57



2.7.6 Aspectos concluyentes sobre PISCO.....	59
--	----

CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO	61
3.1.1 Descripción general de la cuenca del río Ramis.....	61
3.2 MATERIALES.....	66
3.2.1 Datos necesarios para la modelización hidrológica.....	66
3.2.2 Información de la cartografía temática del área de estudio	67
3.2.3 Información topográfica	68
3.2.4 Información del producto PISCO	71
3.2.5 Información de cobertura del suelo.	75
3.2.6 Información de tipo de suelo	76
3.2.7 Información del generador meteorológico	78
3.2.8 Información hidrológica histórica	79
3.2.9 Materiales de escritorio	80
3.2.10 Materiales y equipos de campo	80
3.2.11 Materiales y equipos de gabinete	80
3.2.12 Programas de cómputo	80
3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	84
3.3.1 Método científico.....	84
3.3.2 Tipo de investigación	85
3.3.3 Nivel de investigación	85
3.3.4 Población y muestra	85
3.3.5 Enfoque metodológico.....	86
3.3.6 Sistematización de la información requerida.....	86



3.3.7 Análisis de la información hidrológica.....	90
3.3.8 Configuración y parametrización del modelo	103
3.3.9 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo.....	104

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)	110
4.1.1 Hidrograma de caudales históricos.....	110
4.1.2 Análisis exploratorio de datos (AED)	110
4.1.3 Análisis de independencia serial.....	119
4.1.4 Análisis de estacionariedad	119
4.1.5 Análisis de cambio en la media	120
4.2 PRODUCTO PISCO.....	120
4.2.1 Precipitación del producto PISCO.....	120
4.2.2 Temperatura mínima del producto PISCO	122
4.2.3 Temperatura máxima del producto PISCO	123
4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT	125
4.3.1 Discretización espacial en el modelo SWAT	125
4.3.2 Definición de la unidad de respuesta hidrológica.....	131
4.3.3 Definición de la información meteorológica.....	132
4.4 SIMULACIÓN INICIAL DEL MODELO.....	133
4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD GLOBAL	134
4.6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN.....	137
4.6.1 Parámetros calibrados.....	137
4.6.2 Calibración y validación.....	139
4.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN.....	142



4.7.1 Visualización de resultados a nivel de subcuencas	144
4.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	147
4.8.1 Bases de datos utilizadas	147
4.8.2 Simulación inicial	149
4.8.3 Análisis de sensibilidad	150
4.8.4 Enrutamiento hidrológico	152
4.8.5 Producto PISCO en la modelización hidrológica con SWAT.....	153
4.8.6 Evapotranspiración por el método de Hargreaves.....	155
4.8.7 Alcance y utilidad.....	156
V. CONCLUSIONES.....	157
VI. RECOMENDACIONES	159
VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	162
ANEXOS.....	174
Anexo A. Serie histórica de caudales	174
Anexo B. Código en “RStudio” para extraer la información del producto PISCO.....	175
Anexo C. Precipitación media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis)	176
Anexo D. Temperatura mín. media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis).....	179
Anexo E. Temperatura máx. media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis)	182
Anexo F. Contacto y materiales complementarios.....	185

ÁREA: Ingeniería y Tecnología

LÍNEA: Recursos Hídricos

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 04 de agosto de 2022



ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Relación entre el paso de tiempo de la modelización y el área de la cuenca... 34	34
Tabla 2. Tipo de dato, resolución y fuente de datos 67	67
Tabla 3. Estación hidrológica utilizada..... 68	68
Tabla 4. Imágenes MDE SRTM v4.1 adquiridas..... 70	70
Tabla 5. Mosaicos adquiridos de globeland30..... 75	75
Tabla 6. Adecuación de los datos de globallandcover30 a la base de datos de SWAT. 89	89
Tabla 7. Adecuación de los datos de la FAO a la base de datos de SWAT..... 90	90
Tabla 8. Parámetros seleccionados 106	106
Tabla 9. Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT..... 109	109
Tabla 10. Prueba estadística de puntos cambiantes para la estación puente Ramis 119	119
Tabla 11. Prueba estadística de Mann Kendall para la estación puente Ramis 119	119
Tabla 12. Prueba estadística de CUSUM para la estación puente Ramis 120	120
Tabla 13. Distribución con las características respecto al uso de suelo, suelos, y pendiente en la cuenca del río Ramis. 130	130
Tabla 14. Parámetros sensibles en orden de prioridad..... 137	137
Tabla 15. Valores óptimos de los parámetros de SWAT calibrados 138	138
Tabla 16. Estadísticas de medida en la fase de calibración y validación a paso diario 140	140
Tabla 17. Estadísticas de medida en la fase de calibración y validación a paso mensual 140	140
Tabla 18. ETP y ET distribuidos por subcuencas del río Ramis 147	147



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. El ciclo del agua.	30
Figura 2. Clasificación de los modelos hidrológicos.....	35
Figura 3. Los modelos hidrológicos y tres conceptos de parametrización diferentes. ..	38
Figura 4. Resumen del desarrollo histórico de SWAT y modelos de adopción	41
Figura 5. Componentes del modelo SWAT.....	41
Figura 6. Representación del ciclo hidrológico en SWAT	44
Figura 7. Representación de los movimientos del agua en SWAT	45
Figura 8. Procesos de corriente modelados por SWAT.....	52
Figura 9. Diagrama del proceso de modelización con SWAT	53
Figura 10. a) Estaciones utilizadas en PISCO, y distribución espacial de la precipitación. b) Distribución espacial de estaciones de Aforo seleccionadas.....	55
Figura 11. Resumen esquemático del desarrollo de PISCOp.....	58
Figura 12. Ubicación de la cuenca del río Ramis y su estación hidrológica	62
Figura 13. Principales ríos en la cuenca Ramis	64
Figura 14. Portal de descargas del MDE srtm v4.1	69
Figura 15. Ubicación de las imágenes MDE srtm v4.1 descargadas.....	70
Figura 16. Portal de descarga del producto PISCO en IRI.....	71
Figura 17. Script para la extracción de PISCO en la interfaz del software RStudio	73
Figura 18. Precipitación diaria del producto PISCO a nivel nacional.....	73
Figura 19. Temperatura mínima diaria del producto PISCO a nivel nacional	73
Figura 20. Temperatura máxima diaria del producto PISCO a nivel nacional.....	74
Figura 21. Portal de descarga del producto PISCO en GEE.....	74
Figura 22. Portal de descarga de globeland30	75
Figura 23. Ubicación de los mosaicos descargados.....	76



Figura 24. Pasos para la obtención de la cobertura de suelo de globeland30.....	76
Figura 25. Portal de descarga de la FAO	77
Figura 26. Información de tipo de suelo para todo el mundo.....	78
Figura 27. Portal de descarga de CFSR para SWAT.....	79
Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología	87
Figura 29. MDE para la cuenca del río Ramis.....	88
Figura 30. Histograma para un conjunto de datos.	92
Figura 31. Boxplot para un conjunto de datos.	93
Figura 32. Partes de un boxplot (Anotado).....	94
Figura 33. Distribución para un conjunto de datos.....	95
Figura 34. Datos normalmente distribuidos.....	96
Figura 35. Datos no normalmente distribuidos.....	97
Figura 36. Datos sesgados a la izquierda para la distribución normal.....	98
Figura 37. Datos sesgados a la derecha para la distribución normal	98
Figura 38. Conjunto de datos con "colas gruesas"	99
Figura 39. Conjunto de datos con "colas delgadas"	99
Figura 40. Hidrograma de caudales medios diarios históricos (1981-2016).....	110
Figura 41. Hidrogramas de caudales medios históricos mensualizados (1981-2016). 111	
Figura 42. Histograma de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)	112
Figura 43. Histograma de caudales con curva normal.....	113
Figura 44. Boxplots de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)	115
Figura 45. Q-Q plot de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)	116
Figura 46. Distribución de los caudales (1981-2016) en relación con su media su cerca interna y cerca externa.	118
Figura 47. Mapas espaciales de precipitación del producto PISCO para Perú.....	121



Figura 48. Precipitación promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (Periodo 1981-2016)	121
Figura 49. Mapas espaciales de temperatura mínima del producto PISCO para Perú	122
Figura 50. Temperatura mínima promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (periodo 1981-2016).....	123
Figura 51. Mapas espaciales de temperatura máxima del producto PISCO para Perú	124
Figura 52. Temperatura máxima promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (periodo 1981-2016).....	124
Figura 53. Red de drenaje y puntos de salida (stream-outlet)	126
Figura 54. Cuencas hidrográficas delimitadas (watershed).....	127
Figura 55. Mapa de usos de suelo en la cuenca del río Ramis	128
Figura 56. Mapa de suelos en la cuenca del río Ramis.....	129
Figura 57. Mapa de pendientes en la cuenca del río Ramis.....	130
Figura 58. HRUs generadas en la cuenca del río Ramis.....	132
Figura 59. Hidrograma de la simulación inicial del modelo SWAT	134
Figura 60. Análisis de sensibilidad global de los parámetros.....	136
Figura 61. Hidrograma simulado versus observado a paso diario del modelo SWAT (fase de calibración).....	141
Figura 62. Hidrograma simulado versus observado a paso diario del modelo SWAT (fase de validación).....	141
Figura 63. Hidrograma simulado versus observado a paso mensual del modelo SWAT (fase de calibración).....	141
Figura 64. Hidrograma simulado versus observado a paso mensual del modelo SWAT (fase de validación)	142



Figura 65. Representación esquemática del balance hídrico de la cuenca del río Ramis (fase de calibración).....	143
Figura 66. Representación esquemática del balance hídrico de la cuenca del río Ramis (fase de validación).....	144
Figura 67. ETP media anual por subcuencas del río Ramis (fase de calibración).....	145
Figura 68. ETP media anual por subcuencas del río Ramis (fase de validación).....	145
Figura 69. ET media anual por subcuencas del río Ramis (fase de calibración).....	146
Figura 70. ET media anual por subcuencas del río Ramis (fase de validación).....	146
Figura 71. Distribución mundial de los perfiles de suelo utilizados para generar el producto soilgrids1km (https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992.g002)	149
Figura 72. Red de estaciones del SENAMHI (lado izquierdo), estaciones virtuales del producto PISCO (lado derecho).....	155



ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

AED	: Análisis Exploratorio de Datos
CFSR	: Climate Forecast System Reanalysis
CGIAR-CSI	: Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research
CN	: Curva Numérica
CRC	: Cooperative Research Centre
ET	: Evapotranspiración Real
ETP	: Evapotranspiración Potencial
FAO	: Food and Agriculture Organization of the United Nations
GEE	: Google Earth Engine
HRU	: Unidades de Respuesta Hidrológica
IRI	: International Research Institute for Climate and Society
MDE	: Modelo Digital de Elevación
netCDF	: network Common Data Form
NSE	: Coeficiente de Eficiencia de Nash-Sutcliffe
NYSKIP	: Número de Años a Saltar (Periodo de Calentamiento)
OMM	: Organización Meteorológica Mundial
PBIAS	: Porcentaje de sesgo
PISCO	: Peruvian Interpolated Data of the Senamhi's Climatological and Hydrological Observations



PISCOpd	: PISCO precipitación diaria
PISCOt	: PISCO temperatura
QGIS	: Quantum GIS
QSWAT	: QGIS interfaz para SWAT
R²	: Coeficiente de determinación
SCS	: Servicio de Conservación de Suelos
SENAMHI	: Servicio Nacional de Meteorología e hidrología del Perú
SIG	: Sistema de Información Geográfica
SRTM	: Shuttle Radar Topography Mission
SUFI-2	: Sequential Uncertainty Fitting 2
SWAT	: Soil and Water Assessment Tool
UNESCO	: Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura
Warm-Up	: Calentamiento (Periodo de Calentamiento)



RESUMEN

La cuenca del río Ramis se encuentra en la región del Altiplano de Perú, donde se ha observado una progresiva desertificación, debido principalmente a la disminución de las precipitaciones, siendo así imprescindible conocer la base de Datos PISCO como una herramienta importante de datos de precipitación y de temperatura de libre disponibilidad, así en la presente investigación se realiza la modelización hidrológica mediante el modelo SWAT teniendo como data forzante el producto PISCO. Se efectuó un análisis exploratorio de la data hidrológica, se determinó la evapotranspiración potencial y la modelización hidrológica con PISCO. En el desarrollo metodológico, el análisis exploratorio de datos hidrológicos no encontró valores atípicos ni diferencias estadísticamente significativas. Se extrajo la data de PISCO, se configuró y parametrizó el modelo SWAT, se delimitó las subcuencas y la red de flujo con el MDE, las HRU se definió combinando el uso de suelo, tipo de suelo y pendiente, la evapotranspiración potencial se determinó por el método de Hargreaves y la esorrentía superficial por el método del número de curva SCS. El modelo se calibró y validó ajustando 20 parámetros, con periodos de NYSKIP (Warm-Up) de 1981 a 1983, calibración de 1984 a 2003 y validación de 2004 a 2016. Los resultados muestran rendimientos satisfactorios a muy buenos en la etapa de calibración y validación en referencia a las estadísticas de eficiencia NSE (0.72 y 0.69) y PBIAS (-8.9% y 2.2%) a paso diario. A paso mensual son de satisfactorio a muy buenos en la fase de calibración y validación con referencia a NSE (0.78 y 0.77) y PBIAS (-18.7% y 5.3%), dando lugar a que el producto PISCO muestre un satisfactorio desempeño prometedor como insumo forzante en la modelización hidrológica para la cuenca del río Ramis.

Palabras clave: PISCO, precipitación diaria grillada, análisis exploratorio de datos, valores atípicos, SWAT.



ABSTRACT

The Ramis river basin is located in the Altiplano region of Peru, where a progressive desertification has been observed, mainly due to the decrease in precipitation, thus being essential to know the PISCO database as an important tool for precipitation and temperature data of free availability, so in this research the hydrological modeling is carried out using the SWAT model with the PISCO product as forcing data. An exploratory analysis of the hydrological data was carried out, the potential evapotranspiration and the hydrological modeling with PISCO were determined. In the methodological development, the exploratory analysis of hydrological data found no outliers or statistically significant differences. PISCO data was extracted, the SWAT model was configured and parameterized, sub-basins and the flow network were delimited with the DEM, HRU was defined by combining land use, soil type and slope, potential evapotranspiration was determined by the Hargreaves method and surface runoff by the SCS curve number method. The model was calibrated and validated by adjusting 20 parameters, with NYSKIP (Warm-Up) periods from 1981 to 1983, calibration from 1984 to 2003 and validation from 2004 to 2016. The results show satisfactory to very good performances in the calibration and validation stage in reference to NSE (0.72 and 0.69) and PBIAS (-8.9% and 2.2%) efficiency statistics at daily step. At monthly step they are satisfactory to very good at the calibration and validation stage with reference to NSE (0.78 and 0.77) and PBIAS (-18.7% and 5.3%), resulting in the PISCO product showing satisfactory promising performance as a forcing input in hydrological modeling for the Ramis river basin.

Keywords: PISCO, gridded daily rainfall, exploratory data analysis, outliers, SWAT.



CAPÍTULO I

INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

A medida que aumenta la demanda mundial de agua, el crecimiento demográfico, la industrialización, el uso del suelo y el cambio climático pueden reducir la cantidad de los recursos hídricos disponibles en muchas regiones. Por lo tanto, la cuantificación de los recursos hídricos es esencial para proporcionar la información estratégica necesaria para la planificación de la seguridad hídrica a largo plazo.

Hoy en día, los modelos hidrológicos son una valiosa herramienta para abordar una amplia gama de problemas relacionados con los recursos hídricos. Además, los avances en teledetección y sistemas de información geográfica (SIG) han facilitado el uso de modelos hidrológicos y han creado una nueva dimensión en la modelización hidrológica distribuida espacialmente para investigar el comportamiento hidrológico de una cuenca y su relación directa con el clima, la topografía, la geología y el uso del suelo. Sin embargo, los avances en la simulación hidrológica se han visto limitados por la dificultad de medir la variabilidad espacio-temporal de la información necesaria. En cualquier caso, una mejor información no sólo mejora el conocimiento hidrológico, sino que también proporciona una base para una mejor toma de decisiones.

Esta situación apunta a la necesidad de contar con otras fuentes de información pluviométrica por su impacto en el ciclo hidrológico, y el uso de la pluviometría grillada es una alternativa. Partiendo de esta premisa, el objetivo de este estudio fue utilizar los productos de precipitación PISCO (Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) V2.0 y Temperatura (máxima y mínima) V1.1 a la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis.



Por lo tanto, esta investigación utiliza el producto PISCO y el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool), que tiene la capacidad de simular espacialmente el balance hídrico, teniendo en cuenta el tipo de suelo, el uso de la tierra, la topografía y las condiciones climáticas. SWAT se ha utilizado en conferencias internacionales y es aceptada internacionalmente como una sólida herramienta de modelización multidisciplinar de cuencas, como se ha demostrado en cientos de artículos científicos.

1.2 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

La precipitación es la principal componente forzante del ciclo hidrológico y su correcta evaluación es esencial para comprender diversos procesos hidrológicos como la gestión del agua, la modelización de cuencas hidrográficas, la vigilancia de sequías e inundaciones y la recarga de aguas subterráneas. Además, la cuenca del Ramis se encuentra en la región del Altiplano, donde se ha observado un proceso gradual de desertificación, debido principalmente a la disminución de las precipitaciones.

Por ello es imprescindible conocer la base de Datos PISCO como una herramienta base importante de datos de precipitación y de temperatura de libre disponibilidad, los cuales pueden ser utilizados para estudios ligados al análisis hidrológico, así en la presente investigación se propone la utilización del producto PISCO en la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis y con la finalidad de realizar la evaluación del producto PISCO el cual permitirá dar a conocer su desempeño eficiente como data forzante en la generación de caudales diarios y mensuales mediante el modelo hidrológico semi-distribuido SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y además de que los resultados podrán ser utilizados para estudios de balance hidrológico, monitoreo de sequías de la cuenca y de utilidad para los tomadores de decisión.



1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

La precipitación es la forzante más importante del ciclo hidrológico y su correcta estimación es crucial para comprender diversos procesos hidrológicos, por ejemplo, la gestión de los recursos hídricos, la modelización de las cuencas hidrográficas, el seguimiento de las sequías e inundaciones y la recarga de las aguas subterráneas.

Además, la cuenca del río Ramis se encuentra en la región del Altiplano, donde los estudios paleohidrológicos y fósiles han confirmado que el nivel de agua del lago Titicaca está cambiando de húmedo a seco, lo que indica que la desertificación está avanzando gradualmente. Los estudios de la capa de hielo del Glaciar Quelcaya muestran que, entre los años 1000 y 1400 d.C., la zona adyacente a la cordillera cercana al lago Titicaca experimentó un aumento de la temperatura de entre 0.5°C y 1°C, esto principalmente a la disminución de las precipitaciones.

Este cambio climático fue un fenómeno global. Esta información sirvió de base a la hipótesis de algunos investigadores de que el cambio climático, en forma de reducción sostenida de las precipitaciones y de sequía crónica desde el año 1000 d.C., desencadenó el colapso de la agricultura (Rivasplata Varillas, 2012).

La Asamblea General de la ONU, mediante la resolución A/RES/68/232 adoptada el 20 de diciembre de 2013, declaró 2015 como el Año Internacional de los Suelos, destacando que "la desertificación, la degradación de las tierras y la sequía son problemas mundiales y siguen suponiendo un serio desafío para el desarrollo sostenible de todos los países, especialmente los países en desarrollo" (Ministerio del Ambiente del Perú, 2016).

Por lo tanto, es imprescindible conocer la base de datos PISCO como una herramienta importante con datos de precipitación y temperatura de libre acceso que pueden utilizarse para el análisis hidrológico y estudios relacionados. Por lo tanto, esta



investigación propone el uso del producto PISCO para la modelización hidrológica en la cuenca del río Ramis, donde su evaluación permita conocer su desempeño como data forzante y de importancia en la generación de caudales diarios y mensuales por el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) y, además los resultados podrán ser útiles para los estudios de balance hidrológico, monitoreo de sequías en la cuenca y de utilidad en la toma de decisiones.

1.4 OBJETIVOS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo general

Evaluar el desempeño del producto de precipitación PISCO (Peruvian Interpolated Data of the Senamhi's Climatological and Hydrological Observations) en la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis.

1.4.2 Objetivos específicos

- Validar los datos hidrométricos disponibles en la cuenca del río Ramis mediante el análisis exploratorio de datos (AED).
- Determinar la evapotranspiración potencial utilizando información de temperatura máxima y mínima del producto PISCO.
- Modelizar la cuenca del río Ramis utilizando los datos grillados diarios del producto PISCO y data observada de caudal.



CAPÍTULO II

REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 ANTECEDENTES

2.1.1 Antecedente de nivel internacional

Stisen & Tumbo (2015), realizan un estudio con el nombre “interpolation of daily rain gauge data for hydrological modeling in data sparse regions using pattern information from satellite data” cuya finalidad y principales resultados se describen a continuación:

Con el fin de hacer frente a una severa reducción de la red de pluviómetros en la cuenca del río Great Ruaha en los últimos 30 años, por lo que han evaluado un esquema de interpolación que utiliza patrones espaciales de imágenes de satélite como covariables. La interpolación basada en regresión intenta combinar las ventajas de las cantidades de lluvia precisas de los registros de pluviómetros con la información de patrones espaciales únicos obtenida de las estimaciones de lluvia basadas en satélites. Los resultados del análisis de patrones espaciales revelan que la simple interpolación de la red de pluviómetros de corriente dispersa se compara muy mal con el patrón que se origina en la red histórica mucho más densa. En contraste, los conjuntos de datos de lluvia que incluyen patrones de datos satelitales muestran una buena correlación con el patrón histórico. La evaluación basada en modelos hidrológicos mostró un desempeño similar y bueno para todos los productos de lluvia, incluidos los registros de pluviómetros, mientras que el producto basado exclusivamente en satélites tuvo un desempeño deficiente. La información espacial obtenida por los datos satelitales es valiosa para soportar las redes de pluviómetros, pero no puede reemplazar observaciones reales.



Oo et al. (2020) indican que la comprensión del cambio climático es crucial para la seguridad de las condiciones hidrológicas de las cuencas de los ríos y es muy importante estudiar los impactos del cambio climático en el caudal mediante el análisis de los diferentes escenarios climáticos con la ayuda de los modelos hidrológicos. El objetivo principal de este estudio es:

Proyectar el impacto climático futuro en el flujo de agua utilizando el modelo SWAT. Las proyecciones de modelos múltiples indicaron que es probable que la cuenca superior del río Ayeyarwady se vuelva más caliente en la estación seca con una baja intensidad de lluvia y una temperatura creciente y que se vuelva más húmeda pero más cálida tanto en la estación lluviosa como en el invierno debido a la alta intensidad de las lluvias con el aumento de la temperatura en el futuro.

2.1.2 Antecedente de nivel nacional

Fernández (2015), realiza un estudio con el nombre de “generación de base de datos de precipitación mensual grillada de alta resolución a nivel nacional (1981-2013)” mediante el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y su Dirección General de hidrología y Recursos Hídricos con los fines y resultados siguientes:

Generar una base datos de precipitación mensual grillada de alta resolución espacial (0.05°) a nivel nacional, para el periodo de enero de 1981 hasta diciembre del 2013. La interpolación de la precipitación es generada mediante la aplicación del método geostatístico denominado Kriging con Deriva Externa (KED) usando como covariable el producto de precipitación estimado por satélite denominado CHIRPS. Los resultados indican que los datos grillados (CHIRPS y PISCO) con respecto a los datos de precipitación pluviométrica observada donde se ha encontrado claramente que el producto PISCO (coeficiente de determinación



promedio = 0.88) explica mejor la variabilidad espacial de la precipitación observada frente a CHIRPS (coeficiente de determinación promedio = 0.63). Finalmente menciona que el producto PISCO-precipitación permitió generar la climatología de la precipitación mensual a nivel nacional y que será una herramienta útil en múltiples estudios como son las caracterizaciones hidroclimatológicas, riesgos (inundaciones y sequías) y para comprender los procesos hidrológicos en las cuencas hidrológicas del Perú.

Aybar et al. (2019), realizan una investigación con el nombre de “Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for peru from 1981 to the present day” con el apoyo de SENAMHI y CLIMANDES cuya finalidad y resultados se describen a continuación:

La generación de un nuevo conjunto de datos de lluvia cuadrículados para Perú, llamado PISCOp (Datos interpolados peruanos de las observaciones climatológicas e hidrológicas del SENAMHI). PISCOp se ha desarrollado para el período de 1981 al presente, con una latencia promedio de ocho semanas a una resolución espacial de 0.1° . El algoritmo de fusión se basa en métodos de interpolación geoestadística y determinista que incluyen tres fuentes de lluvia diferentes: (i) el conjunto de datos nacionales de pluviómetros controlados y de calidad, (ii) climatologías de precipitación fusionadas con medidor de radar y (iii) la precipitación infrarroja del Grupo de Riesgos Climáticos (CHIRP) estimaciones. Los resultados de la validación sugieren que las estimaciones de precipitación son aceptables y muestran el rendimiento más alto para la costa del Pacífico y el flanco occidental de los Andes. Además, un meticuloso control de calidad y un procedimiento de relleno de huecos nos permitió reducir la formación de inhomogeneidades (interrupciones no climáticas). El conjunto de datos está



disponible públicamente en <https://PISCOprec.github.io/> y está destinado a respaldar estudios hidrológicos y prácticas de gestión del agua.

Así mismo RISCO SENCE et al. (2019) modeló 26 cuencas en el Pacífico y 4 cuencas en la vertiente del Titicaca. Las conclusiones principales son las siguientes:

Que, en este estudio se ha utilizado los datos de precipitación y evapotranspiración potencial del producto PISCO. Con el modelo calibrado se procedió a reconstruir la esorrentía para el periodo 1981-2015 en las cuencas integrales de las cuencas del Pacífico y Titicaca, además de las subcuencas, el modelo ha respondido satisfactoriamente para la generación de esorrentía mensual con una semi-cuenca. enfoque distribuido, representa una herramienta importante para la gestión de cuencas hidrográficas dentro de las cuencas del Pacífico y Titicaca.

Asurza Véliz & Lavado Casimiro (2020) presentan la aplicación y regionalización de SWAT a cuencas del pacifico peruano. Indican que, los parámetros regionalizados reducen la subestimación inicial que se refleja en una mejor cuantificación de los caudales diarios, y mejoran el comportamiento de los caudales bajos. Los resultados son los siguientes:

El modelo SWAT representa correctamente el balance hídrico y la estacionalidad de los principales componentes del ciclo hidrológico. Sin embargo, el modelo no cuantifica correctamente las altas tasas de flujo durante los períodos húmedos. Estos hallazgos brindan información de apoyo para los estudios de balance hídrico y gestión del agua en el drenaje del Pacífico peruano. El enfoque y los métodos desarrollados se pueden replicar en cualquier otra región del Perú.



Fernandez-Palomino et al. (2021) indica que generó un nuevo producto sobre precipitación diaria llamado RAIN4PE (for ‘Rain for Peru and Ecuador’). Las conclusiones de la investigación son:

Que, SWAT fue calibrado y validado en 72 secciones de río para cada conjunto de datos utilizando una variedad de métricas de rendimiento, incluida la bondad de ajuste del hidrograma y las firmas de la curva de duración del flujo. Los resultados mostraron que los conjuntos de datos de precipitación corregidos por calibre superaron a los no corregidos para la simulación de caudales. Sin embargo, CHIRPS, MSWEP y PISCO mostraron limitaciones para la simulación de caudales en varias cuencas que desembocan en el Océano Pacífico y el río Amazonas.

2.1.3 Antecedente de nivel regional

Fernández Palomino (2017), realiza el estudio de “modelamiento hidrológico de la región hidrográfica del Titicaca” mediante el SENAMHI y su dirección de hidrología, siendo el propósito y resultados concluyentes siguientes:

Con el propósito de investigar la variabilidad espacio-temporal del potencial hídrico de sus principales ríos utilizando el modelo hidrológico SWAT (Soil and Water Assessment Tool) considerando condiciones de tipo de suelo, uso de suelo, topografía y clima, en el que se ha utilizado los datos grillados correspondiente a la precipitación, temperatura máxima y mínima del producto PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations) versión 2.0 del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Teniendo como enfoque metodológico las etapas de configuración y parametrización del modelo y análisis de sensibilidad, calibración



y validación del modelo SWAT. Los resultados obtenidos indican que tanto en la etapa de calibración y validación del modelo, el desempeño de SWAT en la simulación de descargas diarias es bueno en términos del coeficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE entre 0.65 - 0.75) en todas las cuencas de estudio y de acuerdo a la medida estadística del porcentaje de Bias (PBIAS) se tiene un desempeño muy bueno ($PBIAS < 10\%$) del modelo en las cuencas del río Huancané, Coata e Ilave; y un desempeño bueno ($PBIAS$ entre 10-15%) en la cuenca del río Ramis. El desempeño del modelo en la simulación de descargas mensuales aún es mucho mejor, siendo estos muy buenos de acuerdo a ambas medidas de eficiencia ($NSE > 0.75$ y $PBIAS < 10\%$). Además del buen desempeño del modelo en la simulación de descargas, se verificó que el modelo tiene la capacidad de cuantificar la contribución de la escorrentía superficial y el flujo base en términos del índice de flujo base (IBF) en todas las cuencas de estudio. En consecuencia, la cuenca con mayor rendimiento hídrico es la cuenca del río Coata, seguida por Huancané, Ramis e Ilave. Siendo muy apreciable el bajo rendimiento hídrico de la cuenca del río Ilave ubicado al sur de la región hidrográfica del Lago Titicaca.

Traverso Yucra (2018), realiza una investigación con el nombre de “generación de caudales medios mensuales a partir de las características hidrológicas de la cuenca del río Huancané” cuya finalidad y resultados son las siguientes:

Determinar un modelo matemático de precipitación – escorrentía capaz de generar caudales medios mensuales, que se aproxime a los caudales observados y los caudales obtenidos a partir del modelo estocástico Lutz Scholz, en el cual se ha utilizado la base datos PISCO (Peruvian Interpolated Data of the Senamhi’s Climatological and Hydrological Observations) de estaciones existentes y a la



vez ha generado estaciones ficticias, con la finalidad de tener una mejor representatividad de la precipitación en la cuenca de estudio. En su análisis de calidad de información mediante la metodología del vector regional, concluye que, la información pluviométrica proporcionada por el producto PISCO, es consistente, del mismo modo que la cuenca del río Huancané pertenece a una misma región de precipitación, a una misma zona climatológica, con ello se obtuvo los resultados de que el segundo modelo propuesto modelo hidrológico Auto Regresivo (ART2) presenta un ajuste aceptable con respecto a los caudales observados con valores de coeficiente de calibración es $r=0.78$, criterio de Schulz $D=2.98$, eficiencia de Nash-Sutcliffe $E=0.61$, y error de balance de masas 1.21%, posteriormente se aplicó las medidas de bondad de ajuste a los caudales del modelo Lutz Scholz y el modelo propuesto (ART2) donde se obtuvo los siguientes valores de coeficiente de calibración $r=0.92$, criterio de Schulz $D=4.71$, eficiencia de Nash-Sutcliffe $E=0.81$, error de balance de masas 8.59%, se concluye que el segundo modelo (ART2) es el más aceptable y de aplicación no compleja nivel de la cuenca; por consiguiente se constituye la secuencia metodológica para la aplicación del Modelo hidrológico Auto Regresivo (ART2) para su aplicación en cuencas, subcuencas, microcuencas y/o puntos de interés donde la información de caudales medios mensuales es necesaria.

Véliz Asurza et al. (2020) presentaron una metodología para la estimación de parámetros regionales a escala nacional utilizando el modelo SWAT (Soil and Water Assessment Tools), con el objetivo de estimar el caudal para tres regiones hidrográficas del Perú: el Pacífico, Titicaca y Amazonas. Siendo los resultados siguientes:

Los modelos hidrológicos se calibraron utilizando datos de descarga observados, que son escasos y están mal distribuidos en Perú. En este contexto, diseñaron una



estimación de parámetros regionales. La cuenca del Pacífico se agrupó en 6 regiones, en las cuales los resultados de las estimaciones de caudales diarios mostraron un buen desempeño (KGE varía entre -0.89 y 0.79) con algunas excepciones en la zona central; y resultados aceptables en la estimación de caudal bajo (logNSE varía entre -1.66 y 0.82), cuyo rendimiento decae en algunas estaciones de las zonas norte y sur. Por otro lado, las cuencas hidrográficas del Amazonas y Titicaca se agruparon en 7 y 1 región respectivamente. La calibración en la Amazonía dio como resultado un muy buen desempeño en la parte andina ($KGE > 0.5$ y $LogNse > 0.3$), sin embargo, en el norte (región compartida con Ecuador), los resultados son moderadamente satisfactorios (KGE varía 0.0 y 0.4). En la región del Titicaca se obtuvieron valores de calibración KGE muy aceptables ($KGE > 0.75$, $LogNSE > 0.6$).

2.2 CICLO HIDROLÓGICO

“El Ciclo hidrológico no tiene un inicio ni un final y los procesos que ocurren en ella se dan en forma continua como se puede ver en la **Figura 1**” (Chow et al., 1988).

Se define como la secuencia de cambios que sufre el agua en la naturaleza en forma de sólido, líquido, gases y también en sus formas de aguas superficiales y subterráneas. El ciclo hidrológico es claramente irregular y los humanos luchan contra esta irregularidad. Así lo demuestran los periodos en los que la demanda de agua se satisface con diversas actividades, otros periodos de sequía y periodos de inundación (Villon Bejar, 2002).

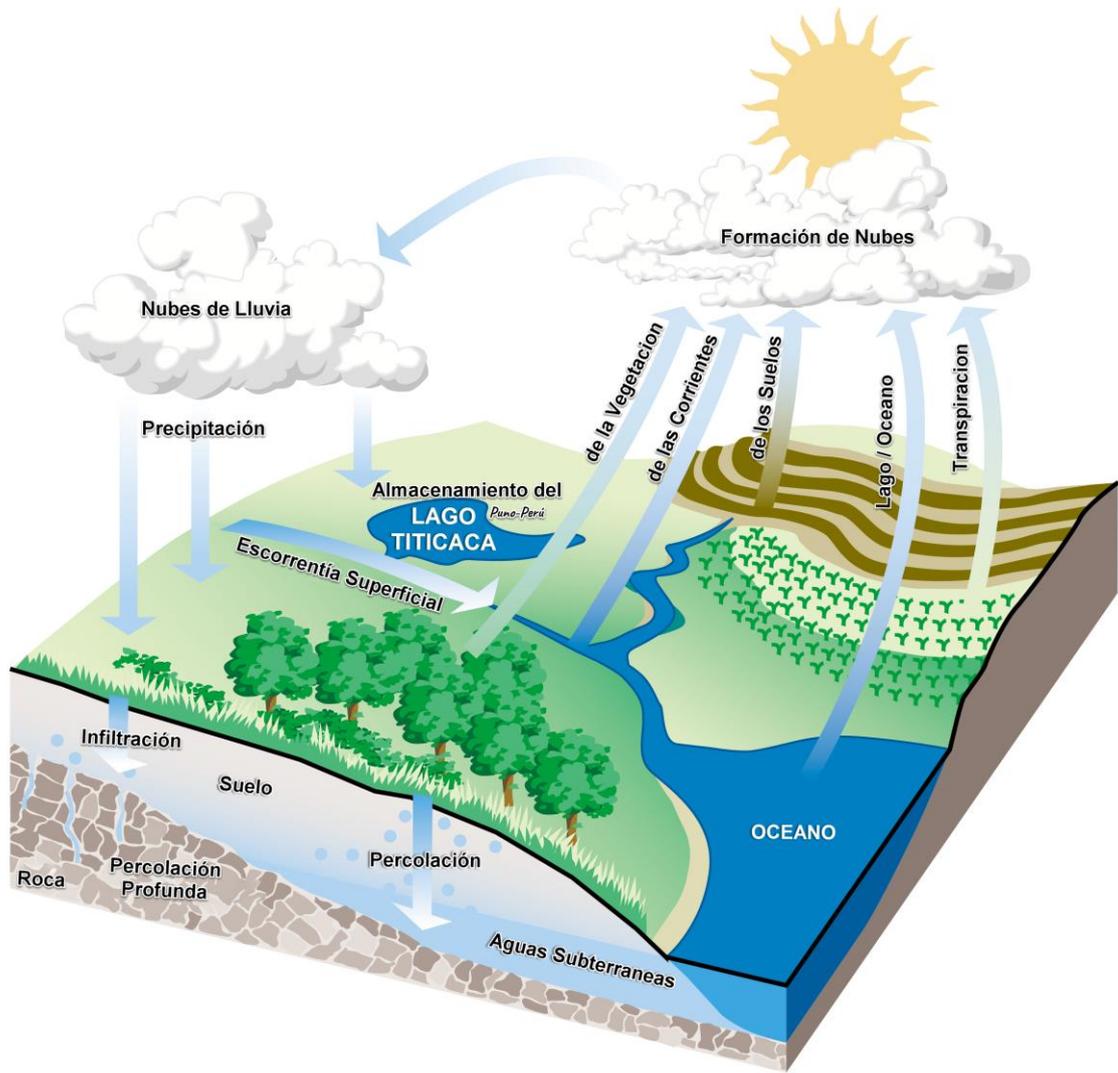


Figura 1. El ciclo del agua.

Fuente: Diseñado en base a The Federal Interagency Stream Restoration Working Group (1998)

El movimiento del agua es continuo, desde las precipitaciones a las aguas superficiales y subterráneas, al almacenamiento y la escorrentía, y finalmente a la atmósfera.

Está conformado por los siguientes componentes:



2.2.1 Precipitación

“La precipitación es el agua que fluye desde las nubes y cae al suelo en algún estado físico. En las latitudes medias, las formas de precipitación varían según las condiciones meteorológicas, como llovizna, lluvia, granizo, nieve, rocío y escarcha” (Linsley et al., 1977).

2.2.2 Evapotranspiración

La evapotranspiración es un proceso que se produce mediante una combinación de pérdida de agua por transpiración y evaporación directa del suelo. Corresponde al fenómeno físico que se produce en la naturaleza cuando el agua pasa de líquido a gas, y depende de la disponibilidad de agua para la vegetación, ya que el proceso requiere una gran cantidad de energía (Del Carmen Hämmerly, 2001).

2.2.3 Infiltración

“La infiltración está definida como el flujo del agua, que se da a través de la superficie del suelo y hacia adentro del mismo, el cual ha sido producido por la acción de las fuerzas gravitacionales y capilares” (Aparicio Mijares, 1989).

2.2.4 Percolación

La percolación se refiere al movimiento del agua en el medio permeable del suelo, es decir, dentro del suelo. Además, la infiltración y el flujo de percolación están estrechamente relacionados, y la infiltración sólo puede continuar si se produce el flujo de percolación (Fernández Palomino, 2017).

2.2.5 Escorrentía superficial

La escorrentía es una lámina de agua que fluye libremente sobre la superficie del suelo.



2.2.6 Escorrentía sub-superficial

También se conoce como flujo subsuperficial o interflujo. Esto significa que una parte de la precipitación que se filtra en el suelo fluye lateralmente hacia el río en las capas superiores del suelo, mientras que el resto acaba recargando el acuífero por infiltración, lo que da lugar a la escorrentía subsuperficial (Fernández Palomino, 2017).

2.3 MODELIZACIÓN HIDROLÓGICA

2.3.1 Modelización de cuencas hidrográficas

Una cuenca hidrográfica es un área donde existen canales de drenaje naturales en común. En otras palabras, es un área drenada por un río o arroyo con procesos hidrológicos integrados. El concepto de modelización de una cuenca hidrográfica está integrado en las interrelaciones entre el suelo, el agua, el clima y el uso de la tierra y se expresa mediante abstracciones matemáticas. El comportamiento de cada proceso está controlado no sólo por sus propias características sino también por su interacción con otros procesos activos en la cuenca. Los principales procesos hidrológicos son la lluvia, el deshielo, la interceptación, la evapotranspiración, la infiltración, la escorrentía superficial, la infiltración y el flujo de aguas subterráneas.

A lo largo de los últimos 40 años, los investigadores se han dedicado a construir diversos modelos matemáticos para representar los diferentes procesos habituales en las cuencas hidrográficas. Existen varios modelos matemáticos en la literatura. Estos modelos van desde los empíricos para evaluar los eventos de inundación, pasando por los simples que incluyen algún grado de fisicidad, hasta los modelos probabilísticos de varios tipos y, finalmente, los modelos distributivos más recientes (Sakka, 2010).



2.3.2 Conceptos de modelización

A la hora de elegir entre los enfoques, hay que tener en cuenta que el modelo debe ser capaz de tener en cuenta tanto la influencia del uso del suelo como la diversidad aérea en la hidrología de la cuenca. Al menos en teoría, es posible alcanzar un alto nivel de comprensión de la hidrología de la cuenca utilizando un modelo semidistribuido y totalmente distribuido, que describa por separado cada pequeña subzona de la cuenca mediante formulaciones y parámetros físicamente coherentes relacionados con las propiedades medidas de la cuenca.

En las últimas cuatro décadas se han desarrollado y aplicado modelos hidrológicos por ordenador a un ritmo cada vez mayor. Las razones principales son dos: a) la comunidad investigadora está mejorando continuamente los modelos y las metodologías, y b) la demanda de herramientas mejoradas aumenta con la creciente presión sobre los recursos hídricos.

Los modelos hidrológicos representan el ciclo hidrológico de una cuenca y estudian la respuesta de la cuenca a las condiciones climáticas y físicas. Los modelos hidrológicos son muy importantes para analizar los efectos del cambio climático y el equilibrio de los recursos hídricos. La evaluación de los diversos impactos de los recursos hídricos y de los resultados seleccionados puede facilitar la gestión de los recursos hídricos (Sakka, 2010).

2.3.3 Resolución temporal de la modelización

Los procesos hidrológicos se producen en una amplia gama de escalas, desde flujos no saturados en perfiles de suelo de 1 m hasta inundaciones en sistemas fluviales de millones de kilómetros cuadrados, desde inundaciones repentinas de pocos minutos hasta flujos de acuíferos de cientos de años. Algunos modelos de lluvia-escurrimiento

representan estos procesos en pasos de tiempo de minutos, horas, días o incluso hasta un año (Sakka, 2010). La elección del paso temporal de la modelización depende de:

- Las características de entrada de la cuenca, por ejemplo, la tormenta dominante en la zona. Las zonas con tormentas convencionales comunes y las tormentas individuales sólo pueden modelizarse en pasos de tiempo inferiores a un día.
- La estructura del modelo en la representación de la escala temporal de los procesos hidrológicos. Los modelos que tienen en cuenta la tasa de infiltración del suelo suelto deben calcularse en una escala de tiempo de minutos. Los pasos de tiempo están interrelacionados con la superficie de la cuenca estudiada. Esta relación está ampliamente representada en la **Tabla 1**.
- Alcance del modelo (objetivos).

Tabla 1. Relación entre el paso de tiempo de la modelización y el área de la cuenca.

Average size of basin (km ²)		$0,5 \cdot 10^2$	10^2	10^3	10^4	$>10^4$				
Time (log t)	Hours	5	10	20	30					
	Days			1	3	5	7	10	50	70
	Weeks					1	3	5	7	9
	Months								1	2

Fuente: Adaptado de Sakka (2010)

2.4 MODELOS HIDROLÓGICOS

Los modelos hidrológicos son una herramienta importante y necesaria para la representación simplificada de los sistemas reales de las cuencas hidrográficas con el fin

de generar caudales sobre una base física. El análisis de sistemas hidrológicos es el estudio del comportamiento de un sistema y la predicción de su salida (Chow et al., 1988).

Los modelos hidrológicos intentan simplificar la complejidad del mundo real seleccionando los aspectos fundamentales que determinan el funcionamiento del sistema hidrológico modelado; en general, cuanto más simple es el modelo, menos precisos son los resultados. Los sistemas hidrológicos están formados por una serie de procesos físicos, químicos y biológicos que actúan sobre las variables de entrada y las transforman en variables de salida (Clarke, 1973).

2.4.1 Clasificación de los modelos hidrológicos

En la Ingeniería hidrológica, se tiene cuatro tipos de modelos (Ponce, 2014): (a) determinista, (b) probabilístico, (c) conceptual y (d) paramétrico. Ver **Figura 2**.

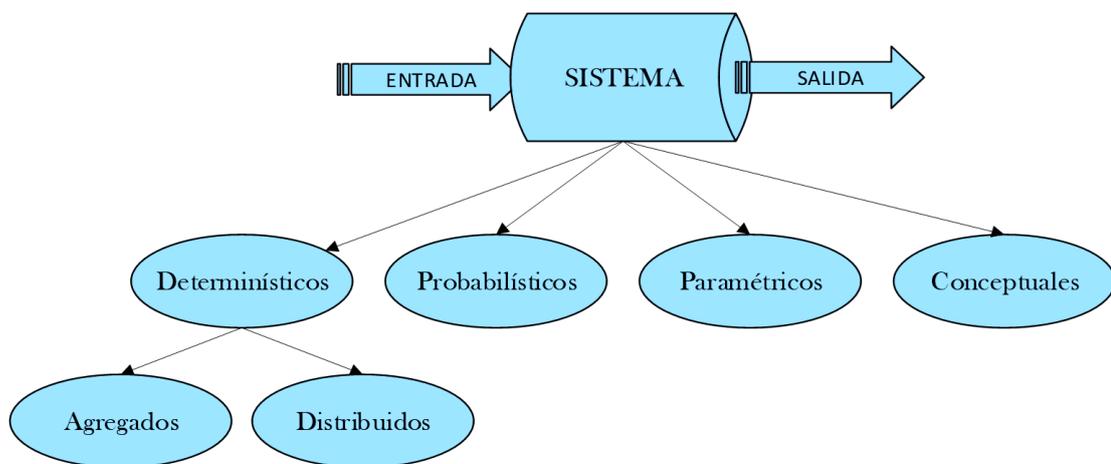


Figura 2. Clasificación de los modelos hidrológicos.

Fuente: Adaptado de Ponce (2014)

a) Los modelos determinísticos

Las leyes de los procesos físicos y químicos se describen y formulan en términos de ecuaciones diferenciales. Los modelos deterministas se formulan con un conjunto de variables, parámetros y sus ecuaciones asociadas. Implica una relación causa-efecto entre



los valores de los parámetros seleccionados y debe proporcionar el mejor detalle posible en la simulación de un proceso físico o químico.

b) Los modelos probabilísticos

Se subdividen en modelos estadísticos o estocásticos y se rigen por las leyes del azar o la probabilidad. Los modelos estadísticos se ocupan de las muestras observadas, mientras que los modelos estocásticos se centran en las propiedades aleatorias de una serie temporal hidrológica concreta.

c) Los modelos conceptuales

Son representaciones simplificadas de los procesos físicos, obtenidas mediante la agrupación de variaciones espaciales y/o temporales y descritas mediante ecuaciones diferenciales ordinarias o algebraicas. El uso generalizado de modelos conceptuales en la ingeniería hidrológica refleja la complejidad inherente del fenómeno y la viabilidad práctica de considerar componentes deterministas en todos los casos. Los modelos conceptuales son, por tanto, una alternativa útil y práctica a los modelos deterministas.

d) Los modelos paramétricos

Representan los procesos hidrológicos mediante ecuaciones algebraicas que contienen parámetros clave que se determinarán empíricamente. La aplicabilidad de los modelos paramétricos está limitada a la gama de datos utilizados para determinar los valores de los parámetros. Los modelos paramétricos son útiles cuando los modelos conceptuales, deterministas o probabilísticos son poco prácticos o demasiado caros.

2.4.2 Modelos distribuidos frente a modelos agregados

Los modelos hidrológicos deterministas pueden subdividirse en modelos agregados y distribuidos (Carpenter & Georgakakos, 2006), que se distinguen por su división del área de estudio en unidades básicas de análisis.



Una diferencia sustancial entre los modelos agregados y distribuidos se fundamenta en que un modelo agregado no considera la variabilidad espacial de los parámetros el cual recurre a utilizar valores medios sobre la cuenca, mientras que un modelo distribuido permite la variabilidad espacial de los parámetros.

Además, debemos precisar que en los estudios hidrológicos desde una perspectiva espacial existe una particular diferencia que implica la subdivisión de la cuenca.

El modelo distribuido se discretiza en elementos regulares e irregulares, y el agua fluye de un punto a otro de la malla, de modo que el agua drena a través de toda la zona de captación, lo que permite que los diferentes procesos de cada celda generada interactúen entre sí. Sin embargo, requiere una gran cantidad de datos potencialmente inexistentes o incompletos, más parámetros para la calibración, un tiempo de ajuste significativo y recursos computacionales considerables (Tellez Rojas, 2016).

Cabe señalar que también es posible aplicar un modelo agregado en divisiones o subcuencas naturales de la cuenca hidrográfica; y, si bien se sabe que las variables y los parámetros no pueden mantenerse constantes en toda la unidad, es necesario utilizar los valores medios disponibles como aproximación a los valores reales.

Para superar las dificultades de los modelos distribuidos, se han desarrollado modelos semidistribuidos (**Figura 3**), que son un intermedio entre los modelos agregados y los distribuidos, en los que la cuenca hidrográfica se divide en diferentes subcuencas o celdas más grandes que la malla del modelo distribuido, que a su vez se tratan como una sola celda cuando se combinan. Están estructurados para tener una mejor base física que los modelos agregados y requieren menos datos de entrada que los modelos distribuidos (Tellez Rojas, 2016).

	Estructura del Modelo	Estructura de Parámetros
Agregado		<p>θ: Conjunto de Parámetros Únicos</p>
Semi Distribuido		<p>Conjunto de Parámetros de la Subcuenca θ_i: $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_{n-1} \neq \theta_n$ n: Número de Subcuencas</p>
Distribuido		<p>Conjunto de Parámetros de la Grilla θ_i: $\theta_1 \neq \theta_2 \neq \dots \neq \theta_{n-1} \neq \theta_n$ n: Numero de Grillas</p>

Figura 3. Los modelos hidrológicos y tres conceptos de parametrización diferentes.

2.4.3 Etapas de la aplicación de un modelo hidrológico

La aplicación de los modelos hidrológicos, independientemente de la finalidad específica del modelo, requiere tres etapas distintas:

- Selección o construcción del modelo
- Calibración
- Validación

2.5 ELECCIÓN DE UN MODELO HIDROLÓGICO

En general, la revisión de la literatura permite limitar el rendimiento de los modelos existentes según tu objetivo principal, siendo la elección final de un modelo hidrológico después de hacerse un análisis crítico de algunos criterios (Sakka, 2010):

- Escala espacial
- Escala de tiempo



- Módulos relevantes
- Vinculación con el SIG
- Accesibilidad de los datos
- Cambio Climático y Gestión de los escenarios de uso del suelo.

2.6 MODELO SWAT

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

El modelo simula la producción de agua y sedimentos en cuencas hidrográficas a gran escala con topografía compleja, diferentes suelos, distintos usos de la tierra y diferentes condiciones de gestión durante un periodo de más de un año, y también simula el impacto de la calidad del agua en las prácticas agronómicas mediante el uso de pesticidas y fertilizantes (S. L. Neitsch et al., 2011).

SWAT suele utilizar la interfaz ArcSWAT (Arcgis & SWAT) para crear sus entradas; ArcSWAT es un modelo de dominio público que se ejecuta en un entorno con licencia de ArcGIS; también existe una interfaz, QSWAT, que está escrita en el lenguaje de programación Python y utiliza varias características del sistema SIG de código abierto QGIS. La interfaz QGIS tiene la funcionalidad es similar a la de ArcSWAT, pero con mejoras adicionales como la visualización estática y dinámica de los resultados (Dile et al., 2016).

La implementación del modelo hidrológico SWAT considera el uso de información espacial como: cobertura vegetal, red hidrológica, tipo de suelo y pendiente; e información temporal como: clima (precipitación diaria, temperaturas máximas y



mínimas diarias, caudal diario "obligatorio") (sedimento, radiación solar, velocidad del viento y evaporación "opcional").

2.6.1 Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT

J. G. Arnold, Kiniry, et al. (2012) mencionan que, “desde el inicio del modelo se han incluido componentes del modelo del USDA-ARS, además de otros modelos sobre el transporte de plaguicidas, la hidrología y el crecimiento de los cultivos”.

Estos componentes incluyen el modelo GLEAMS para los impactos de las aguas subterráneas en los sistemas de gestión agrícola; el modelo CREAMS para los productos químicos, la escorrentía y la erosión de los sistemas de gestión agrícola; y el modelo integrado de política climática y medioambiental, que se incorporó inicialmente al SWRRB (Simulador para el Agua Recursos en Cuencas Rurales) (J. G. Arnold, Kiniry, et al., 2012).

Las rutinas de enrutamiento y transporte de contaminantes se han ampliado para incluir los impactos en embalses, estanques, humedales, fuentes puntuales y fosas sépticas, así como las rutinas de enrutamiento y transporte cinético de sedimentos del modelo QUAL2E. Las modificaciones adicionales incorporadas a SWAT incluyen una rutina mejorada del ciclo del carbono basada en el modelo CFARM. La **Figura 4** ilustra las mejoras de las rutinas hidrológicas, incluidas las mejoras en la representación de los métodos de infiltración de la humedad verde, las prácticas de gestión y los efectos temporales del cambio de uso de la tierra, el drenaje subsuperficial, las franjas filtrantes, las vías de agua con césped, el riego y otras prácticas de gestión de la conservación (Fernández Palomino, 2017).

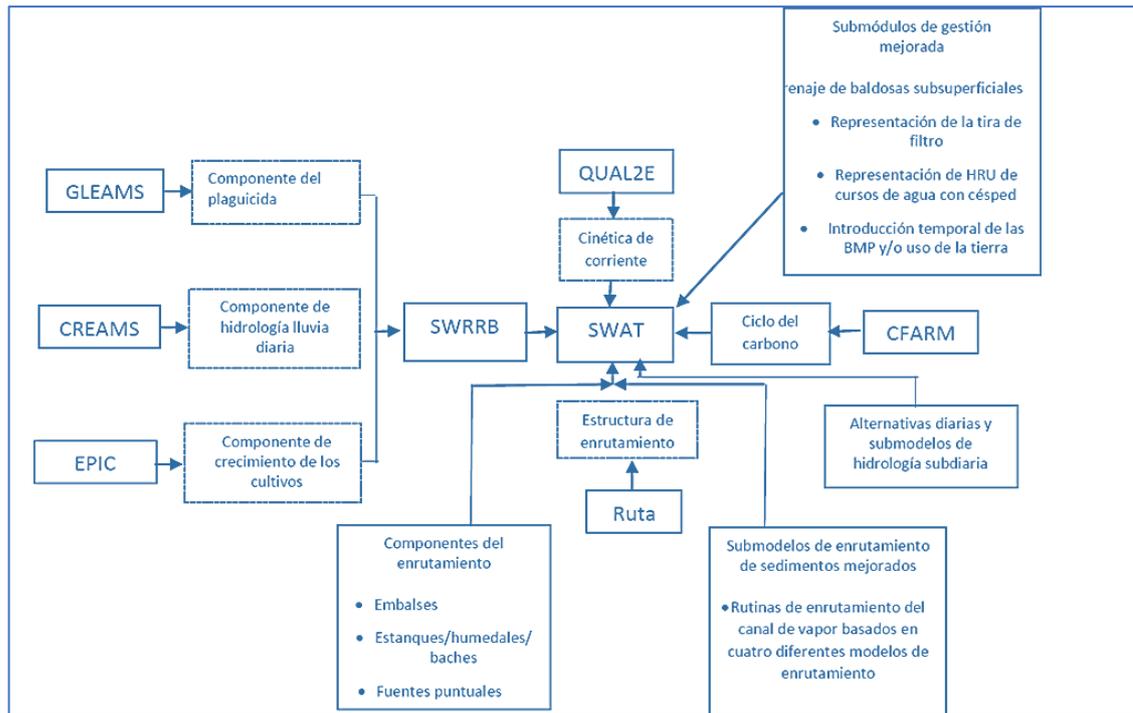


Figura 4. Resumen del desarrollo histórico de SWAT y modelos de adopción

Fuente: Fernández Palomino (2017)

2.6.2 Componentes del modelo SWAT

Los componentes integrados en el modelo SWAT son todos los elementos y procesos que se desarrollan de forma natural dentro de la cuenca y como resultado de las actividades humanas, son: el componente hidrológico, el clima, los sedimentos, los nutrientes, la gestión de los cultivos, el componente de transporte y la transferencia de agua y sedimentos en el almacenamiento. Los componentes anteriores pueden verse en la **Figura 5** y a continuación sólo se analiza el componente hidrológico, ya que es el único que nos ocupa en esta investigación (Fernández Palomino, 2017).



Figura 5. Componentes del modelo SWAT

Fuente: Modificado de Mociño Velásquez (2015)



2.6.3 Enfoque del modelo SWAT

SWAT utiliza un modelo digital de elevación (MDE) para subdividir la cuenca y, a su vez, subdividirla en HRU (unidades de respuesta hidrológica) con características homogéneas como el tipo de suelo, el uso del suelo y la pendiente.

“Las HRU son la base para el cálculo del balance hídrico. El agua de cada HRU puede almacenarse en cuatro niveles: cubierta de nieve, perfil del suelo (0-2 m), acuífero poco profundo (2-20 m) y acuífero profundo” (Fernández Palomino, 2017).

“Si se tiene una única HRU para cada subcuenca, esta única HRU dentro de cada subcuenca no puede representar adecuadamente las características de las subcuencas, por ello es preciso utilizar múltiples HRUs” (Vilaysane et al., 2015).

En SWAT, los cálculos del balance hídrico se simulan en dos componentes separados del ciclo hidrológico: la fase terrestre y la fase de enrutamiento. La fase terrestre controla la carga de agua, sedimentos, nutrientes y plaguicidas en la corriente principal de cada subcuenca, mientras que la fase de enrutamiento define el movimiento de agua, sedimentos y nutrientes desde la red fluvial hasta la salida de la cuenca. (S. L. Neitsch et al., 2011).

Las rutinas hidrológicas de SWAT pueden simular los procesos de flujos superficiales y subsuperficiales, la infiltración, la evaporación y evapotranspiración de las plantas, el flujo lateral, la filtración y la producción de sedimentos. Estas rutinas se aplican a todas las subcuencas generadas por el modelo y pueden dar cuenta de forma independiente de las diferencias en sus características hidrológicas (Fernández Palomino, 2017).



a) Fase terrestre del ciclo hidrológico

“SWAT puede simular todos los procesos que componen el ciclo del agua y calcular el balance hídrico de toda la cuenca. El ciclo del agua controla la cantidad de agua y sedimentos que fluyen desde la subcuenca hacia la red de drenaje” (Fernández Palomino, 2017), como se muestra en la **Figura 6**

El ciclo hidrológico simulado por SWAT se basa en el balance hídrico, tal como se muestra en la ecuación (1) (S. L. Neitsch et al., 2011).

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

- SW_t : Contenido final de agua en el suelo en mm de H₂O,
- SW_0 : Contenido inicial de agua del suelo (mm)
- R_{day} : Cantidad de precipitación (mm)
- Q_{surf} : Cantidad de escorrentía de la superficie (mm)
- ET_a : Cantidad de evapotranspiración real (mm)
- W_{seep} : Cantidad de agua que se infiltra en el perfil del suelo (mm)
- Q_{gw} : Cantidad de flujo de retorno (mm)

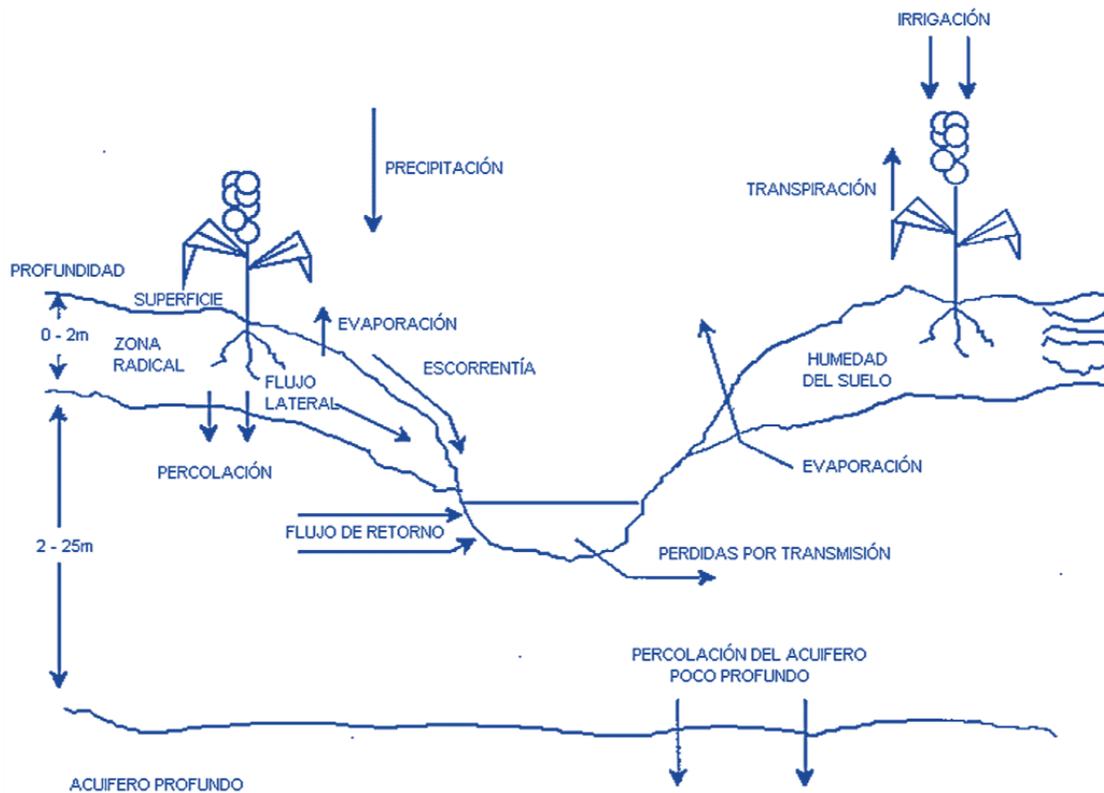


Figura 6. Representación del ciclo hidrológico en SWAT

Fuente: Neitsch et al. (2011)

La subdivisión de las cuencas hidrográficas permite que el modelo refleje las diferencias en las tasas de evapotranspiración debidas a las diferencias en los cultivos y los suelos. La escorrentía de cada HRU se predice individualmente y se procesa para obtener la escorrentía total de la cuenca. Esto añade seguridad y proporciona una representación física más clara del balance hídrico. Los diferentes aportes y procesos de esta etapa del ciclo del agua se resumen en los siguientes apartados:

Clima

El clima de la cuenca controla el balance hídrico y proporciona aportes de humedad y energía, determinando la importancia relativa de los diferentes componentes del ciclo del agua. Las variables climáticas requeridas por SWAT son la precipitación

diaria, las temperaturas máximas y mínimas, la radiación solar, la velocidad del viento y la humedad relativa (Fernández Palomino, 2017).

Hidrología

Cualquier precipitación puede ser interceptada y contenida en la copa (dosel) de los árboles o caer al suelo. El agua de la superficie del suelo puede infiltrarse en la capa de suelo o fluir por la superficie en forma de escorrentía. La escorrentía fluye con relativa rapidez hacia el río y contribuye al caudal en un corto período de tiempo. El agua infiltrada puede quedar contenida en el suelo y luego evaporarse, o entrar lentamente en el sistema de aguas superficiales a través de canales subterráneos (Fernández Palomino, 2017). Las vías potenciales de movimiento del agua simuladas por SWAT en la HRU se muestran en la **Figura 7**.

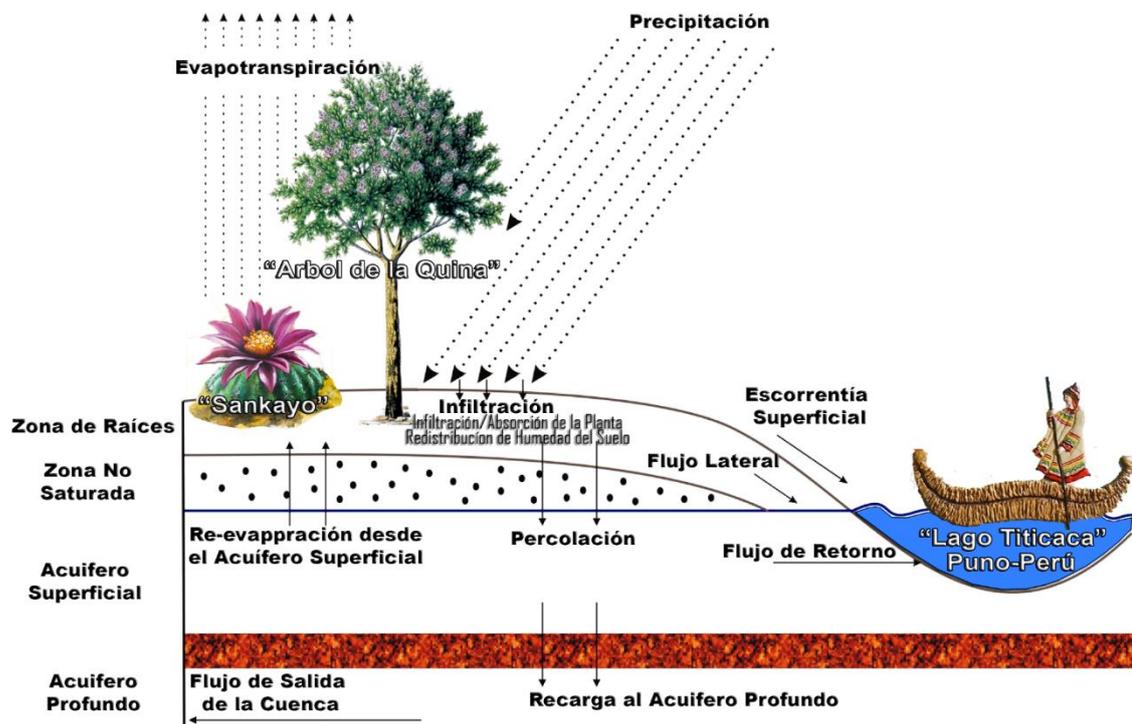


Figura 7. Representación de los movimientos del agua en SWAT



Almacenamiento en el dosel

El almacenamiento en el dosel es la retención del agua interceptada por la superficie vegetal (dosel) para que esté disponible para la evaporación. Cuando se calcula la escorrentía superficial mediante el método de la curva numérica CN, se tiene en cuenta el almacenamiento de la cubierta al calcular el área de escorrentía. Sin embargo, al modelizar la infiltración y la escorrentía con métodos como el de Heber Green & Ampt (1911), el almacenamiento en el dosel debe modelizarse por separado; SWAT permite introducir la cantidad máxima de agua que puede almacenarse en el dosel en el índice de superficie foliar máxima de la cubierta terrestre. Este valor y el índice de área foliar son utilizados por el modelo para calcular la cantidad máxima de almacenamiento en diferentes momentos del ciclo de desarrollo del dosel/cultivo. Para calcular la evaporación, primero se extrae el agua del depósito de la cubierta.

Evapotranspiración

La evapotranspiración es el término general para el proceso por el cual el agua en fase líquida y sólida cerca de la superficie del suelo se convierte en vapor en la atmósfera. La evapotranspiración incluye la evaporación desde los ríos, lagos, el suelo desnudo y las superficies de las plantas, la evaporación desde el interior de las hojas de las plantas (transpiración) y la sublimación desde las superficies de hielo y nieve. El modelo calcula la evaporación del suelo y de las plantas por separado. La transpiración real del agua del suelo se estima como una función exponencial de la profundidad y el contenido de humedad del suelo. La transpiración de las plantas se simula como una función lineal de la evapotranspiración potencial y del índice de área foliar (Fernández Palomino, 2017).



Evapotranspiración potencial

La evapotranspiración potencial es la evapotranspiración que se produciría en una gran superficie con un suministro ilimitado de agua terrestre y una cobertura uniforme de vegetación en crecimiento. Se supone que esta proporción no se ve afectada por el microclima debido a procesos como la advección y el almacenamiento de calor. El modelo SWAT tiene tres opciones para estimar la evapotranspiración potencial: Hargreaves (George H. Hargreaves & Zohrab A. Samani, 1985), Priestley-Taylor (Priestley & Taylor, 1972) y Penman-Monteith (Monteith, 1965).

Escorrentamiento superficial

La escorrentía superficial, o flujo por tierra, es el flujo que se produce a lo largo de una superficie inclinada; SWAT utiliza las precipitaciones diarias o sub-diarias para simular la escorrentía superficial y la escorrentía máxima media de cada HRU. Se calcula utilizando el método de la curva numérica del USDA modificado (USDA-SCS, 2004) o el método de infiltración de Heber Green & Ampt (1911). En el método de la curva numérica, la curva varía de forma no lineal con el contenido de humedad del suelo. La curva numérica disminuye a medida que el suelo se acerca al punto de marchitamiento y aumenta hasta aproximadamente 100 cuando se acerca al punto de saturación (Fernández Palomino, 2017).

El método de Green y Ampt requiere menos de un día de datos de precipitación y calcula la infiltración en función del frente de humedad potencial aguas arriba y de la conductividad hidráulica efectiva; SWAT tiene la capacidad de estimar la escorrentía de los suelos congelados, que se definen como congelados si la temperatura de la primera capa del suelo es inferior a 0°C. La escorrentía superficial se basa en el método del

número de curva propuesto por el Servicio de Conservación del Suelo (USDA-NRCS, 1999) y se expresa mediante las ecuaciones (2), (3) y (4).

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

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

Donde:

- Q_{surf} = Escurrimiento medio (mm)
- P = Precipitación por evento (mm)
- S = Retención máxima potencial (mm)

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

Donde:

- S = Potencial máximo de retención (mm)
- CN = Numero de Curva o Curvas numéricas (adimensional)

Es especialmente importante utilizar datos de precipitación diaria en el método de la curva numérica, ya que en muchos lugares no existen datos de precipitación para intervalos de tiempo inferiores a un día. Además, el tratamiento de los datos de precipitación y el cálculo de la escorrentía superficial es más eficaz con datos diarios que con intervalos cortos (Fernández Palomino, 2017).

Infiltración

La infiltración es el flujo de agua hacia la capa de suelo en la superficie. A medida que la infiltración avanza, el suelo se humedece progresivamente y la tasa de infiltración media disminuye con el tiempo y alcanza un valor constante. La tasa de infiltración inicial depende del contenido de humedad del suelo antes de que el agua se introduzca en la



superficie. La tasa de infiltración final es igual a la conductividad hidráulica saturada del suelo. La cantidad de agua que entra en la capa del suelo se calcula como la diferencia entre la precipitación y la escorrentía superficial. El método de infiltración de Heber Green & Ampt (1911) modela la infiltración directamente, pero requiere datos de precipitación en una escala temporal menor.

Redistribución

La redistribución es el movimiento continuo del agua dentro de una capa del suelo tras la entrada de agua (precipitación o riego). La redistribución se debe a las diferencias en el contenido de agua del perfil; la función de redistribución de SWAT predice el flujo a través de cada capa del suelo en la zona principal utilizando el método del indicador de almacenamiento. El flujo descendente, o infiltración, se produce cuando se supera la capacidad espacial de una capa del suelo y la capa subyacente no está saturada. La velocidad de flujo está determinada por la conductividad eléctrica saturada de la capa de suelo. La redistribución está influida por la temperatura del suelo. Si la temperatura de una capa desciende por debajo de 0°C, la redistribución en esa capa no es posible (Fernández Palomino, 2017).

Percolación

El componente de percolación de SWAT utiliza la metodología de almacenamiento para predecir el flujo a través de cada capa del suelo en la zona de las raíces. El flujo descendente se produce cuando se supera la capacidad de campo (CC) de la capa del suelo y la capa subyacente no está saturada. La velocidad de descenso se rige por la conductividad de la capa de suelo en su estado saturado. El afloramiento se produce cuando la capa inferior supera la CC. El movimiento del agua desde la capa inferior a la



adyacente se rige por el coeficiente de humedad del suelo CC de las dos capas (Fernández Palomino, 2017).

Flujo lateral subsuperficial

El flujo lateral de agua subterránea, interflujo o flujo lateral de poros, es la entrada de flujo que se produce por debajo de la superficie y por encima de las zonas en las que la roca está saturada de agua. El flujo lateral de agua subterránea dentro del perfil del suelo (0-2 m) se calcula simultáneamente con la redistribución. Un modelo de almacenamiento cinemático se utiliza para predecir el flujo lateral en cada capa de suelo (Fernández Palomino, 2017).

Flujo de retorno

El flujo de retorno (flujo de base) es el volumen de agua subterránea procedente de la capa freática, y SWAT divide el agua subterránea en dos sistemas acuíferos. Es decir, el acuífero libre poco profundo proporciona flujo de retorno a los ríos dentro de la cuenca y el acuífero más profundo proporciona flujo de retorno a los ríos fuera de la cuenca (Jeffrey G. Arnold et al., 1993). El agua que pasa por el fondo de la zona radicular se divide en dos fracciones, cada una de las cuales proporciona recarga al acuífero. El agua almacenada en el acuífero superficial no sólo vuelve al río, sino que también puede reponer la humedad del perfil del suelo en condiciones muy secas o ser absorbida directamente por las plantas.

Para ralentizar el flujo del acuífero al río, se utiliza una constante de recesión derivada de los datos del flujo diario.

Pérdidas por transmisión

Las pérdidas por transmisión son las debidas a la lixiviación de los flujos superficiales a través de un curso de agua. Este tipo de pérdida se produce en arroyos de



corta duración o intermitentes en los que los aportes de agua subterránea se producen sólo en determinadas épocas del año, o no se producen en absoluto. SWAT ha utilizado la Guía de hidrología del Servicio de Conservación de Suelos del USDA (USDA-SCS, 2007) El método de Lane, descrito en el capítulo 19, se utiliza para estimar las pérdidas de transmisión. La pérdida de agua del canal es una función de la anchura y la longitud del canal y del tiempo de flujo. Tanto las relaciones de volumen como las máximas se ajustan para tener en cuenta las pérdidas de transmisión en los afluentes (Fernández Palomino, 2017).

Deshielo de nieve

El componente de fusión del hielo del modelo SWAT estima la escorrentía y la precipitación como una función lineal de la temperatura, de forma similar al modelo CREAMS, y desplaza la fusión de la nieve a los días con temperaturas máximas superiores a 0°C, así como la precipitación. Sin embargo, se supone que la energía de las precipitaciones es nula y la escorrentía máxima se estima suponiendo una distribución uniforme de las precipitaciones en un período de 24 horas (Fernández Palomino, 2017).

Estanques y/o reservorios

Los estanques son estructuras de almacenamiento de agua en pequeñas cuencas que interceptan la escorrentía superficial. La capacidad de almacenamiento de un estanque es una función de la capacidad del estanque, de las entradas y salidas diarias, de la infiltración y de la evaporación. Se supone que el embalse sólo tiene un aliviadero de emergencia. Los datos necesarios son la capacidad de almacenamiento y la superficie del estanque cuando está lleno. El área debajo de la capacidad se estima como una función no lineal del volumen de almacenamiento (Fernández Palomino, 2017).

b) Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico

Una vez que SWAT ha determinado las cargas de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas en el río principal, las cargas se dirigen a través de la red fluvial de la cuenca utilizando una estructura ordinal similar a la de HYMO (Williams & Hann, 1972). La **Figura 8** muestra los distintos procesos fluviales modelados por SWAT. “El enrutamiento del canal principal puede dividirse en cuatro componentes: agua, sedimentos, nutrientes y productos químicos orgánicos. En este estudio, sólo se describe el enrutamiento del flujo de agua” (Fernández Palomino, 2017).

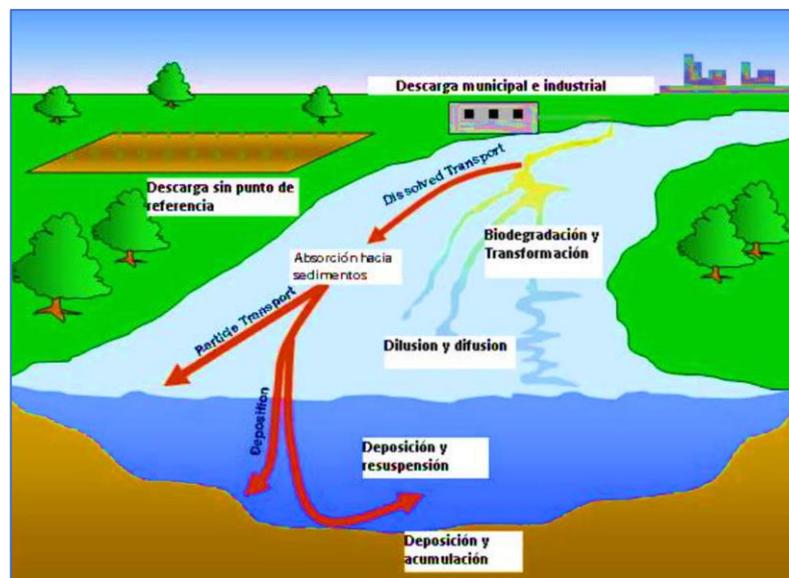


Figura 8. Procesos de corriente modelados por SWAT

Fuente: Neitsch et al. (2011)

Enrutamiento de flujo

A medida que el agua se desplaza río abajo, parte del agua puede evaporarse o perderse debido a la permeabilidad de las capas del canal. Otra pérdida potencial es la extracción de agua del canal para uso agrícola o humano. Los flujos pueden ser complementados por la lluvia y/o la escorrentía de fuentes puntuales que entran directamente en el curso de agua. El caudal se encamina hacia el río utilizando el método

del coeficiente de almacenamiento variable (Williams R., 1969) o el método de enrutamiento de Muskingum (Fernández Palomino, 2017).

2.6.4 Proceso de modelización hidrológica con SWAT

El proceso de Modelización para la implementación del modelo hidrológico en SWAT y su posterior simulación hidrológica requiere de las siguientes etapas bien definidas:

- Recopilación de información.
- Simulación
- Proceso de Calibración
- Ajuste de Parámetros
- Validación
- Análisis de las salidas del modelo

En la **Figura 9** se puede apreciar el Diagrama del proceso de Modelización con SWAT.



Figura 9. Diagrama del proceso de modelización con SWAT

Fuente: Diseñado en base a Galván González (2011)

2.7 PRODUCTO PISCO

“Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (PISCO) es un nuevo conjunto de datos pluviométricos reticulados disponibles para el Perú, el cual ha sido desarrollado para el período 1981 al 2016 con una resolución espacial de 0.1°” (Aybar et al., 2019), en la presente investigación se ha utilizado la V2.0 de Precipitación el cual ha sido utilizado ampliamente en investigación ligadas a la investigación hidrológica y V1.1 de Temperatura (máxima y mínima).

El algoritmo de fusión se basa en métodos de interpolación geoestadística y determinista que involucran tres fuentes de precipitación diferentes:

- (i) un conjunto de datos de precipitación nacional de calidad controlada y rellenada,
- (ii) un clima de precipitación fusionado por radar y
- (iii) estimaciones de precipitación infrarroja del Grupo de Riesgo Climático (CHIRP)

“La mayoría de los pluviómetros están situados en zonas de recarga de las montañas, lo que constituye una condición importante para la simulación de las precipitaciones y la escorrentía en las cuencas del Pacífico y de los Andes” (**Figura 10**) (Aybar et al., 2019).

2.7.1 Conjunto de datos pluviométricos

Los datos pluviométricos brutos consisten en 945 observaciones diarias proporcionadas por el SENAMHI (**Figura 10**). Los datos de los pluviómetros abarcan el período comprendido entre 1981 al 2016. Aunque la información de metadatos hubiera ayudado a realizar el control de calidad de los datos, esta no se utilizó debido a su limitada disponibilidad. Por lo tanto, el análisis en los datos pluviométricos se centró

principalmente en la detección de errores gruesos y en los métodos de relleno de lagunas (Aybar et al., 2019).

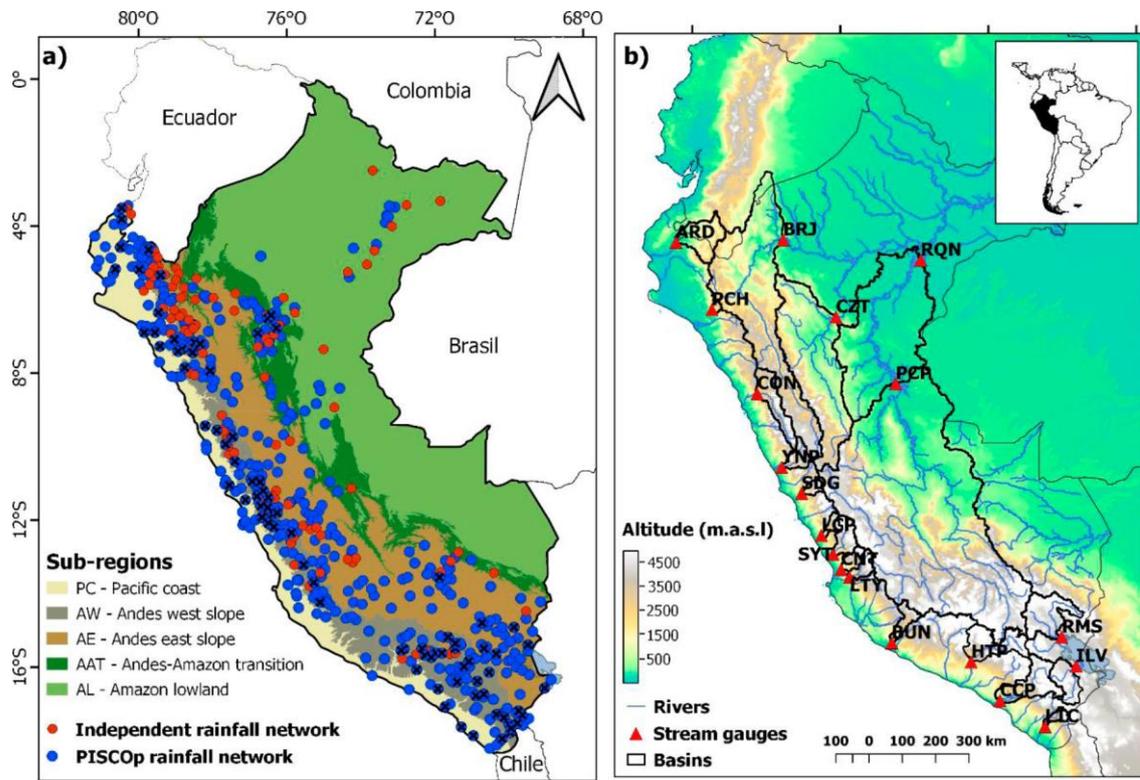


Figura 10. a) Estaciones utilizadas en PISCO, y distribución espacial de la precipitación.
b) Distribución espacial de estaciones de Aforo seleccionadas.

Fuente: Aybar et al. (2019)

2.7.2 Control de calidad

La mayoría de los métodos para el control de calidad de las observaciones pluviométricas están diseñados para redes de estaciones densas; como era de esperar, asegurar la calidad de un conjunto de datos es más problemático para las regiones con escasez de datos debido a un número reducido de estaciones vecinas (Aybar et al., 2019).

Teniendo en cuenta este hecho y la falta de un sistema de gestión de calidad establecido en Perú, los métodos que se aplicaron según Aybar et al. (2019) son:



a) Comprobación de problemas generales (automática)

El primer paso consistió en eliminar los valores no coherentes evidentes, como las precipitaciones negativas y no físicas, los errores relacionados con el punto decimal, las fechas repetitivas, los valores consecutivos repetitivos y los cambios inesperados en las coordenadas de latitud y longitud.

b) Comprobación espacial de los valores extremos (automática)

En segundo lugar, se utilizó un umbral de período de retorno de 200 años para detectar eventos de precipitación extrema. Si los valores atípicos ocurren en al menos dos medidores vecinos (< 50 km) para la misma fecha, se conservaron, de lo contrario se eliminaron. Este procedimiento se realizó de forma automática.

c) Comprobación de segmentos rotos y malos (manual)

Se realizó un control visual para reconocer los segmentos con patrones de redondeo asimétricos y con incompatibilidades evidentes.

2.7.3 Relleno de datos

En primer lugar, basándose en los pluviómetros vecinos, se aplicó el método de imputación espacio-temporal CUTOFF, para ello, cada pluviómetro se agrupó con otros pluviómetros si se cumplían las siguientes condiciones (1) Una distancia < 100 km, (2) Compartir como mínimo 10 años de datos, y (3) Una relación lineal diaria (mensual) > 0.5 (> 0.8). En segundo lugar, si no se cumplía la condición anterior, se realizó los mapeos de cuantiles ("quantile mapping").

Tras el control de calidad de los datos, sólo se seleccionaron 441 de las 945 estaciones pluviométricas para la gestación de los datos.

2.7.4 Desarrollo de PISCO_p_{clim}

Para Perú, el producto de radar de precipitación TRMM 2A25 (TPR) ha demostrado ser la mejor fuente de datos de precipitación para identificar la variabilidad espacial y los patrones estacionales de precipitación, incluso en la zona de precipitación orográfica ubicada en los Andes Orientales. A partir de este conjunto de datos, se construyó climatologías mensuales con una resolución espacial de 0.1°. Los datos de TPR están disponibles desde 1998 hasta 2013, con la excepción de 2014 debido a una actividad anómala de desmantelamiento de satélites en ese año (Aybar et al., 2019).

El procedimiento de construcción de PISCO_p_{clim} (**Figura 11**) se resume como sigue (Aybar et al., 2019):

- Se extraen los píxeles con sospecha de precipitación > 300 mm/h.
- El conjunto de datos TPR se agrega a una estimación climática media para cada mes natural, considerando la clasificación de píxeles TPR propuesta.
- Se aplica un filtro de umbral de sesgo espacial para reemplazar los píxeles con una relación alta (valor medio >5) con el valor medio del kernel 3x3 circundante.
- Suavización de la tasa de lluvia mediante interpolación cubic spline.
- Fusión con el conjunto de datos pluviométricos mensuales de largo plazo utilizando kriging ordinario residual.

2.7.5 Evaluación de PISCO_p

El proceso de evaluación del rendimiento de PISCO_p se realizó en el periodo 1981-2016 mediante dos pasos: En primer lugar, se realizó una evaluación píxel a píxel utilizando una red pluviométrica independiente (ID) que consta de 100 pluviómetros no utilizados previamente para el desarrollo de PISCO_p. Se seleccionaron todos los



amplia; está prevista una nueva versión de PISCOp, que utilizará nuevas fuentes de datos existentes, como IMERG y pluviómetros transfronterizos, para mejorar la complementariedad de las series temporales de precipitaciones (Aybar et al., 2019).

2.7.6 Aspectos concluyentes sobre PISCO

El producto grillado se crea integrando los datos de observación continua, los datos CHIRP, la climatología basada en el radar y los métodos de interpolación geoestadística y determinista.

La calidad del PISCOp se evaluó en seis subregiones hidrometeorológicas con redes pluviométricas independientes. Además, se evaluó el rendimiento del PISCOp en una zona más amplia mediante la estimación de los coeficientes de escorrentía en 19 cuencas.

Por primera vez, PISCOp proporciona una radiografía completa del estado del conjunto de datos pluviométricos de Perú desde 1981 hasta 2016.

Los vacíos en las series temporales de precipitaciones se han identificado como el problema más importante para construir una malla pluvial temporalmente coherente.

El estudio muestra que la combinación de CUTOFF y Q_m es un método conservador y eficaz para rellenar con éxito los vacíos de datos, especialmente para los grandes vacíos de datos observados en los primeros años de PISCOp. Sin embargo, se ha comprobado que este método depende en gran medida de la proximidad del pronosticador y del pluviómetro. Por lo tanto, se espera que la aplicación de este método en zonas con baja densidad de estaciones y escaso rendimiento del CHIRP mejorado sea insatisfactoria.

Una evaluación independiente del balance hídrico confirmó que el PISCOp era el mejor producto para representar las estimaciones de las precipitaciones en la región, con



la excepción de las tierras bajas del Amazonas, donde CHIRPM obtuvo mejores resultados.

El uso de datos grillados cubiertos espacial y temporalmente completos como PISCOp parece ser muy atractivo, en lugar de toda la heterogeneidad inherente a este producto fusionado, como se muestra en este estudio. Por lo tanto, al igual que con otros productos fusionados, está prevista una nueva versión de PISCOp, que se espera que mejore el relleno de los datos de las series temporales de precipitación con nuevas fuentes de datos como el IMERG y los pluviómetros transfronterizos (Aybar et al., 2019).



CAPÍTULO III

MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 CARACTERIZACIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Este capítulo se centra en una descripción general de la cuenca del río Ramis, describiendo su ubicación geográfica, los aspectos físicos más importantes como la climatología y la hidrología, una descripción general de los elementos biológicos y, por último, las características socioeconómicas más importantes de la cuenca. Esto permitirá comprender mejor las formas de ocupación de la tierra en la cuenca.

3.1.1 Descripción general de la cuenca del río Ramis

a) Ubicación geográfica

La cuenca del río Ramis forma parte de la Región Hidrográfica del Titicaca y pertenece a los sistemas hídrico TDPS del Titicaca, Desaguadero, Popo y Salar de Coipasa. Limita al norte con la cuenca del Inambari, al este con las cuencas del Huancané y del Suches, al sur con la cuenca del río Coata y al oeste con las cuencas del Alto Apurímac y del Urubamba.

Geográficamente, la cuenca del río Ramis se encuentra entre los 14°00' y 15°30' de latitud sur y los 69°20' y 71°20' de longitud oeste. En cuanto a la elevación, se encuentra entre los 3775 m sobre el nivel del mar en la desembocadura del lago Titicaca y los 5755 m sobre el nivel del mar hacia su divisoria (Ver **Figura 12**).

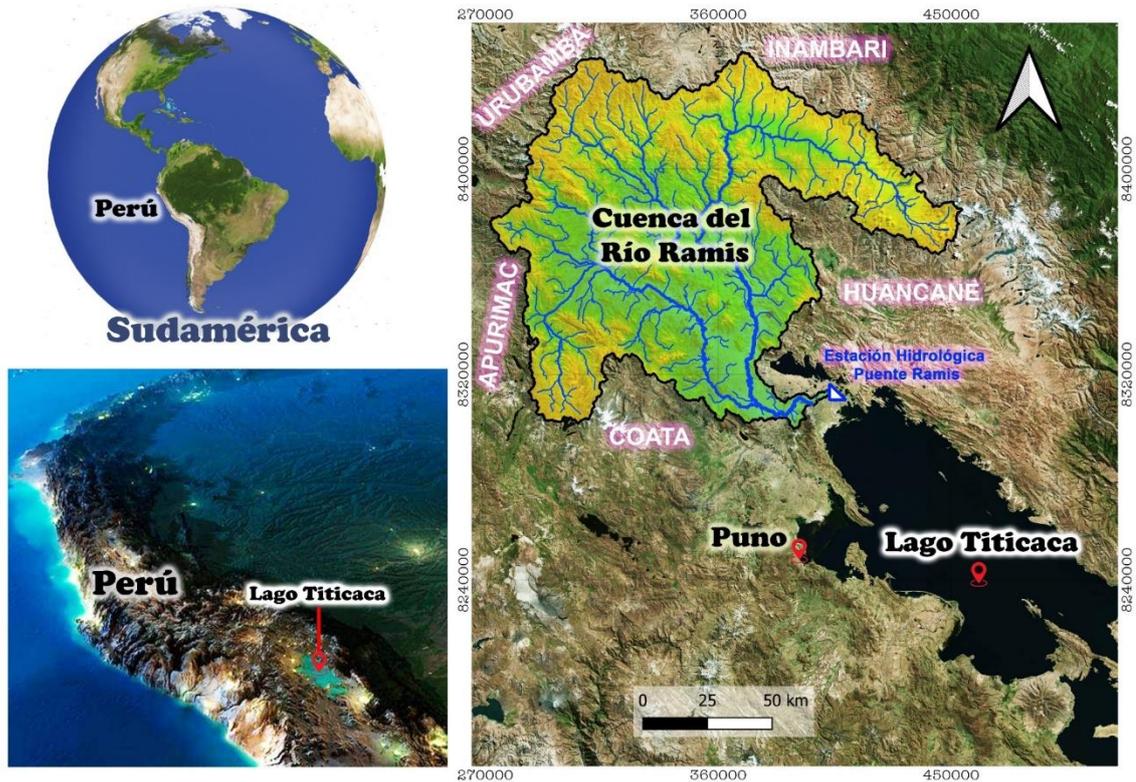


Figura 12. Ubicación de la cuenca del río Ramis y su estación hidrológica

b) Aspectos físicos

La cuenca presenta una estación húmeda (diciembre - marzo), una estación seca (mayo - agosto) y dos periodos de transición (septiembre y abril).

La vertiente del Titicaca es una típica cuenca montañosa endorreica, formada por amplias zonas de meseta y laderas muy irregulares de pendiente media y alta en las laderas orientales y occidentales circundantes. Las montañas y colinas, compuestas por rocas sedimentarias, volcánicas y metamórficas, están ampliamente diseminadas, siendo las partes superiores, en particular, grandes acumulaciones de sedimentos especialmente de fluvioglacial.

El río Ramis es la principal fuente de agua del lago Titicaca y su cuenca es la más grande del Altiplano de la Puna. Sus cabeceras se encuentran en las laderas de la Cordillera de Carabaya y el nudo de Vilcanota, y sus ríos y arroyos fluyen por los



provincias de San Antonio de Putina, Sandía, Carabaya, Azángaro, Melgar, Lampa, San Román y Huancané y son la principal fuente de agua para muchos pueblos (Giraldo Malca, 2020).

El curso principal de agua está conformado por tres secciones (**Figura 13**) que detallamos a continuación:

a. El río Ramis se forma a una altitud de 3845 m, a 6 km de la ciudad de Calapuja (en la confluencia de los ríos Azángaro y Pucara) y fluye 61 km en dirección oeste-este, con una pendiente media de 0.07% y un caudal medio de 76 m³/s hasta la desembocadura en el lago Titicaca (3808 m de altitud). Debido a esta baja pendiente, el curso del río presenta una serie de meandros. **b.** El río Azángaro nace en la confluencia de los ríos Nuñoa y Carabaya, a 7 km al noreste de Asillo, a una altitud de 3890 metros desde este cruce, la pendiente media es del 0.06% en una distancia de 76 km. **c.** El río Carabaya (comúnmente conocido como Crucero), principal afluente y fuente del río Azángaro, nace a una altitud de 4800 m cercana a la localidad de Cerro Lunar, al pie del nevado Ananea, con una longitud total de 122 km y una pendiente media de 0.075%. En última instancia, desemboca en el lago Titicaca en las tierras de la comunidad campesina de Ramis, donde forma un ecosistema biodiverso de totora y constituye una zona altamente productiva. Como tal, constituye un refugio natural para una variada gama de aves autóctonas y migratorias, razón por la cual fue considerada parte de la Reserva Nacional del Titicaca en 1978 y parte del lago en 1997, fue designado sitio RAMSAR (llamado así por haberse firmado en la ciudad del mismo nombre en Irán, una convención intergubernamental que sirve de marco para la acción nacional y la cooperación internacional para la conservación y el uso racional de los humedales y sus recursos), ya que es un importante lugar de descanso para las aves migratorias que atraviesan varios países de América (Giraldo Malca, 2020).

Aguas abajo, por debajo de Achaya, el río Ramis serpentea en promedio de oeste a este. Las comunidades de Caminaca, Samán y Taraco están situadas en la orilla del río antes de que éste desemboque en el lago Titicaca y están con cierta conexión por filtración con la laguna de Arapa y las tierras circundantes en algunas partes.

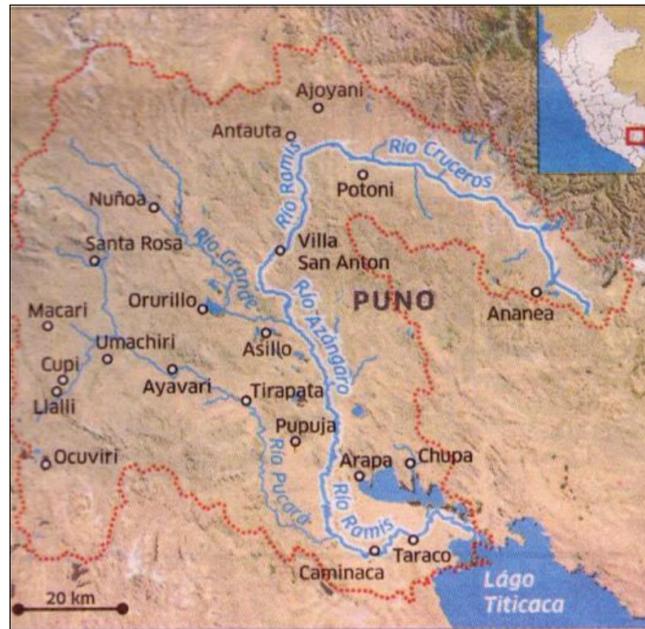


Figura 13. Principales ríos en la cuenca Ramis

c) Aspectos biológicos

La cuenca del río Ramis tiene una rica biodiversidad en comparación con el resto del Altiplano, principalmente debido a la ubicación de la cuenca (cerca de la Cordillera Oriental), ya que parte de la humedad del Amazonas cae sobre la cresta de la cordillera en la cuenca, proporcionando una gran cantidad de agua para el ecosistema y la red de canales. En consecuencia, las condiciones son propicias para el desarrollo de actividades económicas como la agricultura, la ganadería y la minería. Con ecosistemas más productivos, como mejores pastos y praderas de mayor capacidad de carga, las provincias de Azángaro y Melgar están considerados como uno de los principales productores de leche y carne a nivel nacional. Los ecosistemas de la cuenca del río Ramis son típicos de las regiones montañosas tropicales, con especies endémicas de fauna y flora silvestres de



distribución limitada (especies que sólo se encuentran en determinados lugares) y microhábitats especialmente sensibles a los cambios ambientales provocados por las actividades humanas (Giraldo Malca, 2020).

En la cuenca del río Ramis se pueden distinguir hasta cinco zonas de vida, según un mapa ecológico elaborado por la ONERN en 1976, desarrollado por el Dr. Leslie R. Holdridge:

- Bosque húmedo–montano subtropical (bh-MS)
- Páramo muy húmedo-subalpino subtropical (pmh-SaS)
- Páramo Pluvial – Subalpino Subtropical (pp-SaS)
- Tundra Pluvial – Alpino SubTropical (tp-AS)
- Nivel Subtropical (NS)

d) Aspectos socioeconómicos

Para analizar la composición socioeconómica de la cuenca del río Ramis, partimos del conocimiento de los distritos asociados territorialmente en la cuenca, tales como Azángaro, Ayaviri, Chupa, Asillo, Taraco, Samán, Ananea, Nuñoa, Arapa, Orurillo, Potoni, entre los principales. Las dos principales actividades socioeconómicas de la cuenca del río Ramis son la agricultura y la ganadería, siendo esta última el eje de desarrollo de otras actividades productivas como el transporte, el comercio y el consumo. La agricultura es el principal medio de vida en el cauce del río y en los alrededores del lago Titicaca, mientras que la ganadería es el principal medio de vida en las zonas remotas. Esto se debe a que en la zona predominan los pastos naturales, que no son aptos para los cultivos debido a los riesgos climáticos (sequía, heladas, bajas temperaturas). Así, las aguas superficiales de la cuenca del río Ramis son importantes para el desarrollo socioeconómico de la región de Puno (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2008).

3.2 MATERIALES

3.2.1 Datos necesarios para la modelización hidrológica

La modelización hidrológica puede llevarse a cabo utilizando diferentes conjuntos de datos (tipo de suelo, uso del suelo, etc.). Sin embargo, es preciso señalar que, para tener un buen modelo hidrológico que sea útil para los tomadores de decisiones, hay que tener en cuenta los siguientes aspectos importantes según Aybar Camacho (2016):

a) El flujo del agua

El más importante es el modelo digital de elevaciones de la zona de estudio, que nos permitirá conocer la procedencia de los flujos de agua, es decir, esta información, al ser preprocesada, nos proporcionará información sobre la dirección que probablemente tomen los flujos de agua y, con la correcta aplicación de los umbrales, se podrá estimar la red de drenaje.

b) Cantidad de agua que fluye

Los cálculos complejos requieren como datos de entrada las precipitaciones, la evapotranspiración, las características de la cubierta vegetal y el tipo de suelo. Si se considera el flujo de aguas subterráneas, también puede incluirse una descripción de las características hidrogeológicas del terreno, la humedad del suelo y las propiedades hidrogeológicas del acuífero. El resultado final de este paso es la cantidad de agua disponible después de la lluvia en cada una de las unidades de respuesta hidrológica (HRU, por sus siglas en inglés) o celdas (dependiendo del modelo hidrológico predictivo).

c) Caudal generado

Este último aspecto se refiere al caudal producido por el flujo de salida en el punto de interés del canal y es el resultado final de la modelización hidrológica. Para ello se utilizan métodos de enrutamiento. En el presente estudio se utiliza el modelo SWAT que

utiliza el método del coeficiente de almacenamiento variable desarrollado por Williams R. (1969).

3.2.2 Información de la cartografía temática del área de estudio

La información utilizada se presenta en la **Tabla 2**, que muestra el tipo, la resolución y la fuente de datos empleados para la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis; situada en la región hidrográfica del Titicaca. Además, los datos requeridos de descarga media diaria disponibles desde 1981 hasta el 2016 el cual corresponde a la estación hidrométrica administrada por SENAMHI (**Tabla 3**) y la ubicación de esta estación se muestra en la **Figura 12**.

Los datos grillados utilizados en esta investigación fueron los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima) del producto PISCO de SENAMHI versión 2.0 (precipitación) y versión 1.1 (temperatura máxima y mínima).

Tabla 2. Tipo de dato, resolución y fuente de datos

Tipo de dato	Resolución	Fuente	Enlace
Datos hidrométricos	Diaria	SENAMHI	http://www.senamhi.gob.pe/
Precipitación, temperatura máxima y mínima	Diaria 0.05° (1981-2016)	PISCO - SENAMHI	https://iridl.ldeo.columbia.edu/
DEM	90 m	CGIAR-CS	http://srtm.csi.cgiar.org/
Uso de suelo	30 m	GlobeLand30	http://globallandcover.com
Mapa de suelo	30 m	FAO 1995, 2003	https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?id=14116#/home

Tabla 3. Estación hidrológica utilizada

Id estación	Nombre	Río	Latitud (S)	Longitud (W)	Altitud (m.s.n.m.)	Estado
210101	Puente Ramis	Ramis	15°15'19.11"	69°52'25.63"	3825	Funcionando

3.2.3 Información topográfica

a) Modelo digital de elevación (MDE)

El conocimiento de la topografía de la zona es fundamental para entender los diferentes procesos que tienen lugar en la superficie. Existen tres productos que proporcionan información de alto nivel de libre acceso en nuestra zona de estudio y en Perú en general.

- Mapa nacional del IGN a escala 1:100000
- MDE con tecnología interferométrica de la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM).
- DEM con tecnología estereoscópica, ASTER (Advance Space Borne Thermal Emission and Reflection Radiometer).

A pesar de que la información anteriormente citada presenta rangos de precisiones conocidos, muchos autores señalan que esta dependerá finalmente de las condiciones de la zona de estudio (Nikolakopoulos et al., 2006; Kiamehr & Sjöberg, 2005; Schumann et al., 2008)

De la data anterior mencionada, pudimos trabajar con cualquiera de ellos, finalmente se optó por utilizar el producto SRTM debido a su mayor uso en aplicación de investigaciones hidrológicas, por tener precisión en terrenos escarpados (Ludwig &

Schneider, 2006; Satgé et al., 2015) y también ha sido evaluado su uso en la modelación hidrológica utilizando el modelo SWAT (Tan et al., 2015).

El modelo digital de elevación (MDE) de 90 m de resolución del producto SRTM v4.1 está disponible en el sitio web del CGIAR-CSI (Consortium for Spatial Information of the Consultative Group of International Agricultural Research) en <http://srtm.csi.cgiar.org/> (ver **Figura 14**). Esta versión incorpora el método de interpolación descrito por Reuter et al. (2007) para complementar la información que falta debido a las sombras muy oscuras y los huecos. El formato descargado corresponde al formato GeoTIFF para mosaicos de 5°x5° en coordenadas geográficas de latitud-longitud con referencia al geoide GCS_WGS_1984. Los detalles de las imágenes utilizadas se pueden encontrar en la **Tabla 4** y la posición del mosaico alineado a una sola imagen en la **Figura 15**.

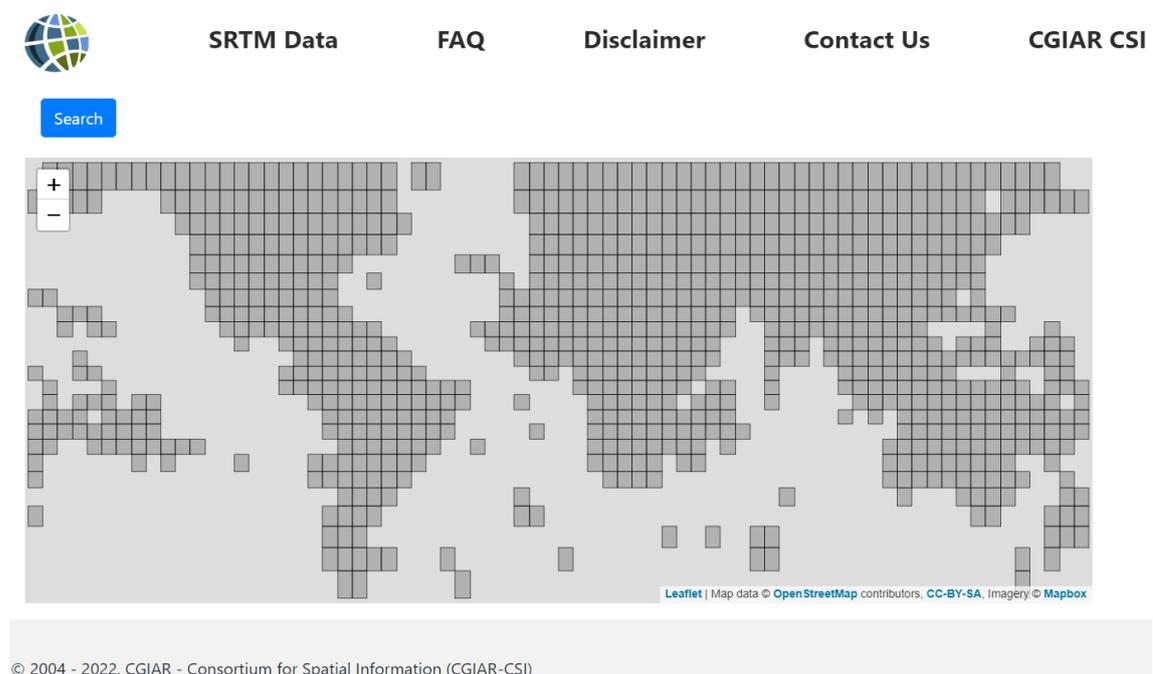


Figura 14. Portal de descargas del MDE srtm v4.1



Figura 15. Ubicación de las imágenes MDE srtm v4.1 descargadas

Tabla 4. Imágenes MDE SRTM v4.1 adquiridas

Data File Name	Latitude		Longitude		Center Point	
	Min	Max	Min	Max	Lat.	Long.
srtm_22_16.zip	75 S	70 S	20 W	15 W	72.5 S	17.5 W
srtm_23_16.zip	70 S	65 S	20 W	15 W	67.5 S	17.5 W
srtm_23_15.zip	70 S	65 S	15 W	10 W	67.5 S	12.5 W
srtm_22_15.zip	75 S	70 S	15 W	10 W	72.5 S	12.5 W

3.2.4 Información del producto PISCO

Los datos grillados utilizados en esta investigación se obtuvieron del producto PISCO del SENAMHI, versión 2.0 para la precipitación y versión 1.1 para los datos meteorológicos de temperatura máxima y mínima.

La información está disponible en la Biblioteca de Datos del IRI (Instituto Internacional de Investigación sobre el Clima y la Sociedad), un potente almacén de datos y herramienta de análisis en línea de acceso gratuito que permite a los usuarios acceder a datos estándar. Permite a los usuarios ver, analizar y descargar cientos de terabytes de datos relacionados con el clima mediante un navegador web. El enlace de descarga es <https://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/> (ver **Figura 16**).

Biblioteca de Datos
IRI SENAMHI HSR PISCO

Descripción Modo Experto

SOURCES SENAMHI HSR PISCO

SENAMHI HSR PISCO

SENAMHI HSR PISCO: Peruvian Interpolated data.

Documentos

[overview](#) an outline showing sub-datasets of this dataset

Bases de Datos y Variables

[PET](#) Potential Evapotranspiration.
[Prec](#) Precipitation.
[Streamflow](#) Streamflow.
[Temp](#) Temperature.

Última Actualización: Thu, 23 Jul 2020 17:31:41 GMT

Figura 16. Portal de descarga del producto PISCO en IRI

El formato descargado corresponde a un formato netCDF (network Common Data Form) el cual puede ser obtenida mediante las siguientes opciones:

a) Extracción de PISCO con RStudio

Consiste en un Script para leer puntos de interés de datos PISCO de precipitación, temperatura máxima y mínima. Para extraer dichos puntos de interés (estaciones), estos deben estar almacenados en un archivo de formato .csv. El script fue desarrollado por los especialistas del SENAMHI Adrian Huerta y Waldo Lavado. La versión del software utilizada en la presente investigación corresponde a R V3.6.3 y RStudio V1.3.959, el script se muestra en el **Anexo B**.

A continuación, se menciona la secuencia de pasos para descargar la data de precipitación y de temperatura ya sea mensual o diario de PISCO con la ejecución del Script (ver **Figura 17**) y su distribución grillada a nivel nacional (en formato raster) se puede ver en las figuras **Figura 18**, **Figura 19** y **Figura 20**.

- Descargar datos PISCO del portal de IRI.
- Establecer el directorio de trabajo o ruta de la carpeta donde esté el producto PISCO y los puntos de interés a extraer en formato .csv.
- Instalar los Paquetes "raster" y "ncdf4".
- Leer el archivo de los puntos de Interés en formato .csv.
- Ensamblaje de los datos .nc de PISCO.
- Asignación de coordenadas a los puntos de Interés.
- Igualar las proyecciones de los datos .nc (raster) y de los puntos a extraer
- Extracción de los valores de los puntos de Interés.
- Guardar la data extraída en formato .csv

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
~/code/jeerPISCOpoints.R
Source on Save
1 ## Leer puntos de estaciones de datos PISCO de prec a partir de
2 # puntos de estaciones que estan almacenados en un archivo *.csv
3 # Autores: Adrian Huerta & Waldo Lavado
4 setwd("C:\\Users\\PC\\Desktop\\Lee_PISCO") # Esta es la ruta de la carpeta donde esta PISCO
5 # y deben estar el archivo *.csv con los puntos a extraer
6 # ojo que es / no \
7 # Descargar datos PISCO de: http://www.senamhi.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones
8 # En la parte inferior ir a la carpeta Datos SONICS (DESCARGAS)
9 # bajar de preferencia los datos de la carpeta PISCO_v2.0
10 # ftp://ftp.senamhi.gob.pe/PISCO_v2.0/ ## PISCO_Pd_v2.0 son diarios y
11 # PISCO_Pm_v2.0 son mensuales
12 # Este ejemplo es para los datos mensuales PISCOpm.nc
13 rm(list = ls())
14 install.packages("raster") # Instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
15 install.packages("ncdf4") # Instalar el paquete comentar # si ya esta instalado
16 library(raster) # cargar el paquete
17 library(ncdf4) # cargar el paquete
18 ## Leer el archivo long_lat.csv (ver el archivo ejemplo)
19 ## para agregar solo disminuya o incremente las coordenadas de las filas
20 ## xx Longitud e YY Latitud
21 long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
22 ## Ensamblamos los datos *.nc
23 raster_pp <- raster::brick("data.nc")
24 ## Asignamos las coordenadas
25 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
26 # Igualamos las proyecciones del raster y de los puntos a extraer
27 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
28 # Extraemos los valores
29 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
30 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
31 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
32 # Guardamos los datos como "data_long_lat.csv" Ud puede cambiar el nombre
33 # Las filas son los datos mensuales en este caso y las columnas son los puntos seleccionados
34 # ojo que el orden esta de acuerdo al archivo long_lat.csv, de la columna NN
35 write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)
36
```

Figura 17. Script para la extracción de PISCO en la interfaz del software RStudio

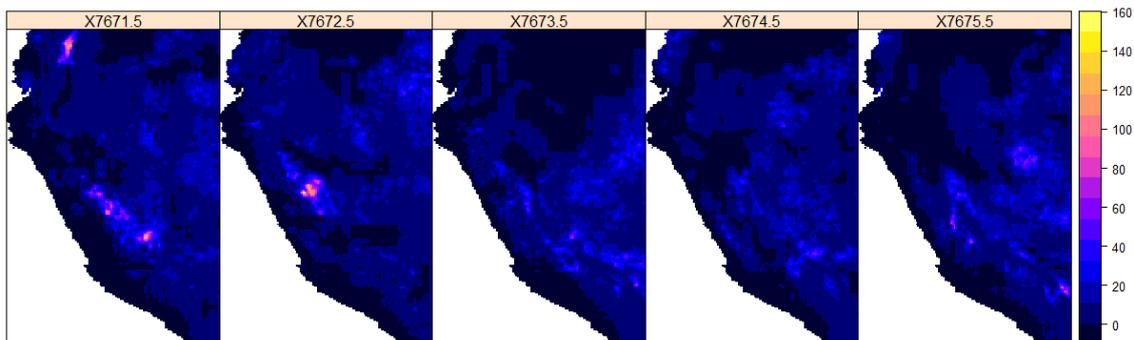


Figura 18. Precipitación diaria del producto PISCO a nivel nacional

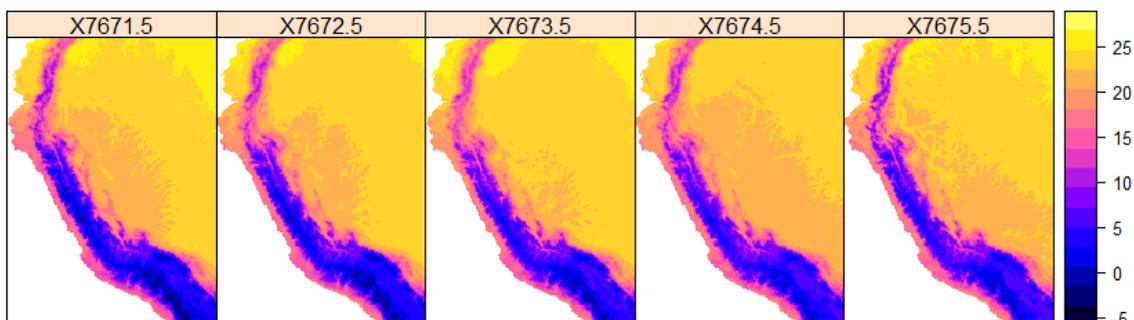


Figura 19. Temperatura mínima diaria del producto PISCO a nivel nacional

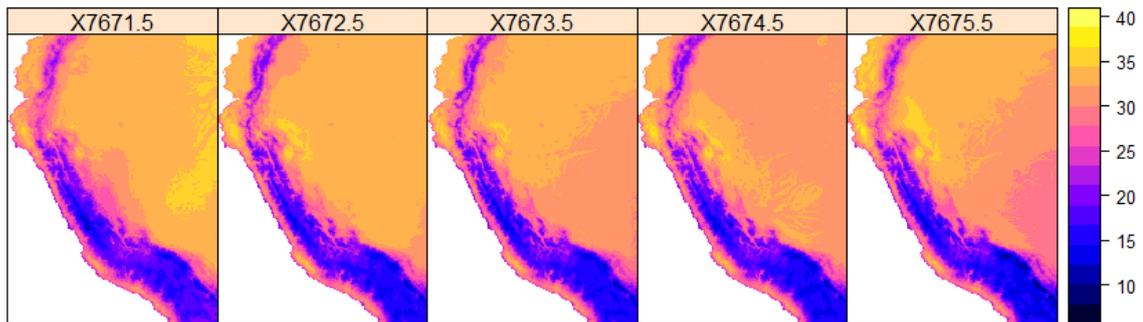


Figura 20. Temperatura máxima diaria del producto PISCO a nivel nacional

b) Extracción de PISCO usando Google Earth Engine (GEE)

Consiste en un Script para leer puntos de interés de datos PISCO de precipitación diaria y mensual. Para extraer dichos puntos de interés (estaciones), la información de PISCO debe estar almacenado en la cuenta propia de GEE. El script fue desarrollado por el especialista Cesar Aybar y se puede acceder mediante el enlace <https://PISCOprec.github.io/> (Aybar et al., 2019); el portal de GEE con el script se puede apreciar en la **Figura 21**.

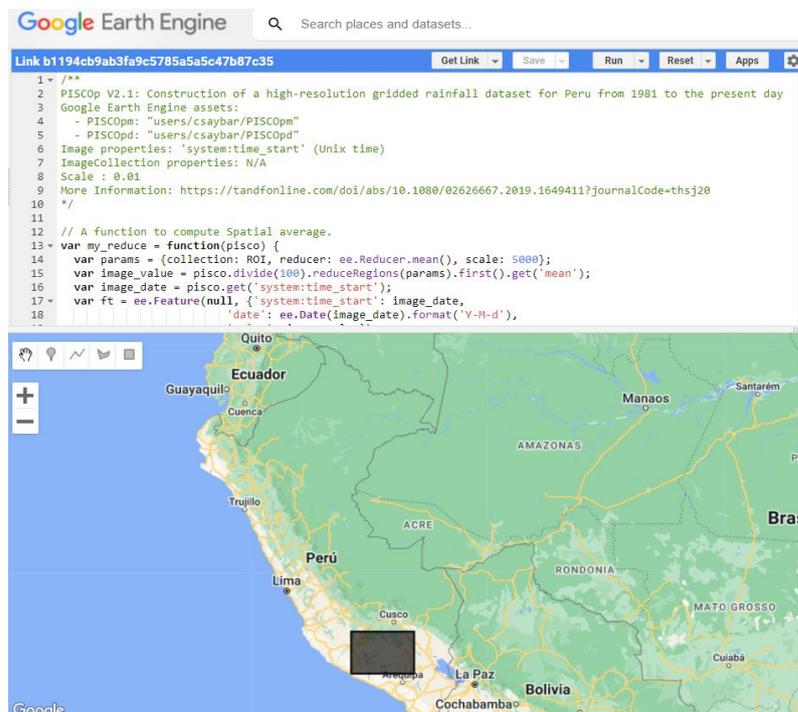


Figura 21. Portal de descarga del producto PISCO en GEE.

Para la presente investigación se ha obtenido la información del producto PISCO con la utilización el software RStudio.

3.2.5 Información de cobertura del suelo.

La información de cobertura del suelo fue obtenida a partir del producto GlobalLand30 (Chen et al., 2015), las imágenes corresponden para la fecha 2020 y fueron obtenidos del siguiente enlace <http://www.globallandcover.com/> (ver **Figura 22**), cuyo formato corresponde a un raster GeoTIFF, dichos mosaicos son provistos de 5° x 6°. Los detalles de las imágenes empleadas pueden verse en la **Tabla 5** y la ubicación de los mosaicos en la **Figura 23**.



Figura 22. Portal de descarga de globeland30

Tabla 5. Mosaicos adquiridos de globeland30

Number	Mapsheet	FileType
1	S19_15	zip
2	S19_10	zip

El portal Globeland30 está dirigido a investigadores, instituciones de investigación y organizaciones de bienestar público y puede descargarse gratuitamente en línea una vez registrado.

Los pasos para la descargar y obtención de los mosaicos de GlobalLand30 se puede apreciar en la **Figura 24**.

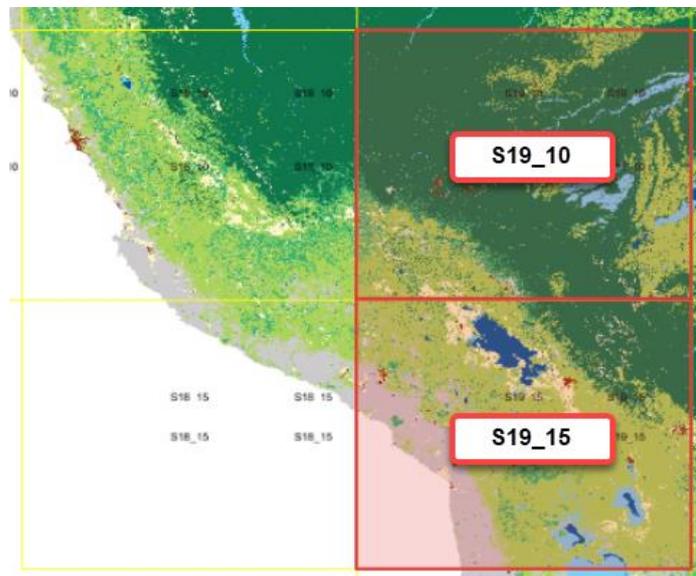


Figura 23. Ubicación de los mosaicos descargados

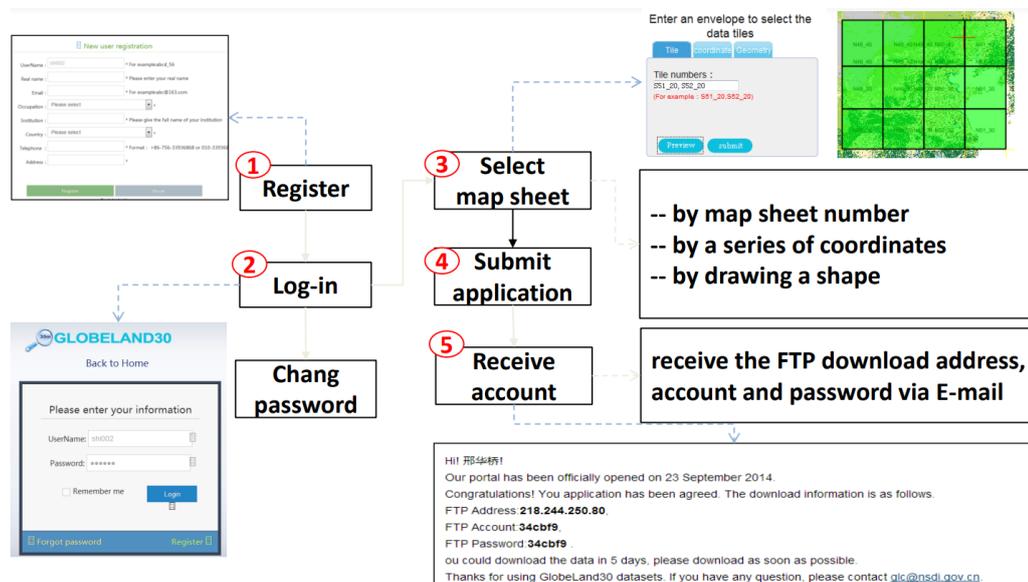


Figura 24. Pasos para la obtención de la cobertura de suelo de globeland30

Fuente: Chen et al. (2015)

3.2.6 Información de tipo de suelo

Los datos sobre el suelo son probablemente la información más difícil de obtener, más aún si se trata de las propiedades hidráulicas del suelo. La obtención de esta

información in situ requiere costes elevados y un extenso trabajo de campo. Por lo tanto, para este estudio se seleccionó el Mapa Digitalizado de Suelos del Mundo (DSMW, por sus siglas en Inglés), que incluye las propiedades hidráulicas del suelo de la FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura) (Sanchez et al., 2009).

Esta información global sobre propiedades físicas y suelos se proporciona a escala 1:5 millones, con proyección geográfica (latitud y longitud) interceptada con una plantilla que incluye formas del terreno relacionadas con el agua (costas, lagos, glaciares y ríos de doble ruta). El Mapa Digital del Suelo del Mundo (excepto el continente africano) se cruzó con el mapa de Fronteras de Países del Banco Mundial de Datos II (con los límites de los países actualizados a enero de 1994 a escala 1:3 000 000), obtenido del Gobierno de los Estados Unidos (FAO, 2007).

Los datos de la FAO pueden obtenerse del siguiente enlace <https://www.FAO.org/geonetwork/srv/en/metadata.show?id=14116> (Figura 25), estos datos se encuentran en formato Shapefile (SHP). La información de tipo de suelo para todo el Mundo puede apreciarse en la **Figura 26**.

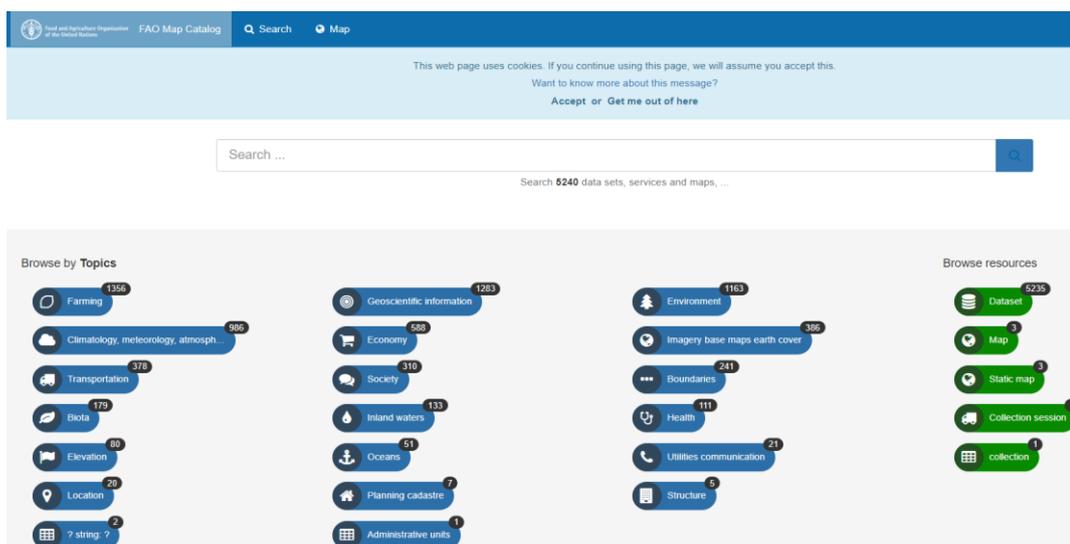


Figura 25. Portal de descarga de la FAO

Digital Soil Map of the World

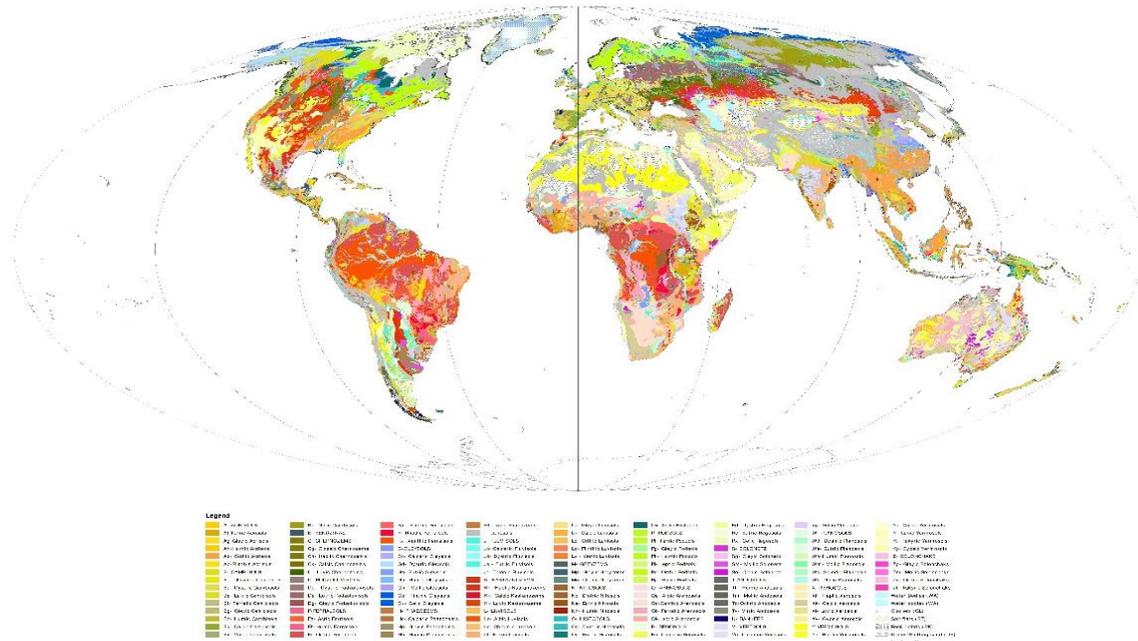


Figura 26. Información de tipo de suelo para todo el mundo.

3.2.7 Información del generador meteorológico

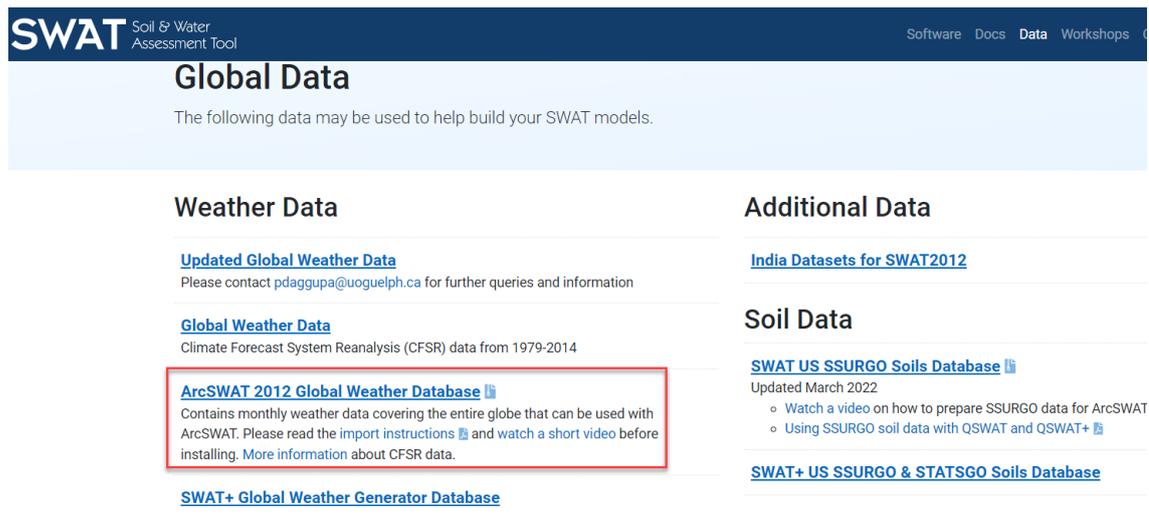
Los datos meteorológicos son necesarios para los procesos hidrológicos de SWAT. Los datos de lluvia, temperatura, humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento pueden ser definidos por el usuario o, alternativamente, SWAT puede funcionar con datos generados por un generador meteorológico incorporado.

El generador meteorológico también puede utilizarse para rellenar datos vacíos. Los datos climáticos y meteorológicos pueden obtenerse en el sitio web de SWAT mediante el enlace <https://SWAT.tamu.edu/data/> (ver Figura 27). Los datos disponibles son los datos diarios del producto Climate Forecast System Reanalysis (CFSR) desarrollado por la National Centres for Environmental Prediction (NCEP) y están disponibles tanto en un formato para SWAT como en formato .csv.

Los datos disponibles son las precipitaciones diarias, la temperatura, la velocidad del viento, la humedad relativa y la radiación solar, los cuales están disponibles para el período comprendido entre el 1/1/1979 y el 31/7/2014 (Karlie, 2020).

También se tiene del Proyecto Water Weather Energy Ecosystem Project (<https://www.2w2e.com/>), datos climáticos históricos globales CRU para su uso en SWAT, dicha información corresponde a la precipitación y temperatura disponible de 1979 a 2005 (Karlie, 2020).

En la presente investigación se ha usado el producto CFSR como “Motor Climático” para SWAT, debido a que se ha usado el método de Hargreaves para determinar la evapotranspiración potencial.



The screenshot shows the 'Global Data' section of the SWAT (Soil & Water Assessment Tool) website. The page title is 'Global Data' and it states 'The following data may be used to help build your SWAT models.' There are two main columns: 'Weather Data' and 'Additional Data'. Under 'Weather Data', there are links for 'Updated Global Weather Data', 'Global Weather Data', 'ArcSWAT 2012 Global Weather Database' (highlighted with a red box), and 'SWAT+ Global Weather Generator Database'. Under 'Additional Data', there are links for 'India Datasets for SWAT2012' and 'Soil Data', which includes 'SWAT US SSURGO Soils Database' and 'SWAT+ US SSURGO & STATSGO Soils Database'.

Figura 27. Portal de descarga de CFSR para SWAT

3.2.8 Información hidrológica histórica

La información hidrológica utilizada en este estudio corresponde a los datos históricos de la estación del puente de Ramis. Los datos son datos de escorrentía media diaria disponibles desde 1981 hasta 2016. La estación hidrológica está gestionada por el SENAMHI (véase la **Tabla 3**) y está situada en la salida de la cuenca del río Ramis, como se muestra en la **Figura 12**.



3.2.9 Materiales de escritorio

Papel bond A4, memoria USB de 64 GB, tinta para impresora, material de papelería (bolígrafos, gomas de borrar, rotuladores, etc.)

3.2.10 Materiales y equipos de campo

Cámara digital, GPS Garmin, cinta métrica de 50 m.

3.2.11 Materiales y equipos de gabinete

La bibliografía necesaria, fotografías digitalizadas, impresora multifuncional Epson L4260 de sistema continuo, plotter y el equipo (dispositivo electrónico) utilizado para el almacenamiento de la información y para su posterior muestra en una interfaz para nuestra disposición (hardware y software), es la siguiente:

- Computador Portátil : TOSHIBA Satellite S55t-A
- Procesador : Intel(R) Core(TM) i7-4700MQ - 2.40GHz (8 CPUs)
- Memoria RAM : 16384 MB
- Almacenamiento : 1 TB
- Tarjeta Gráfica : Intel(R) HD Graphics 4600 – 2048 MB
- Pantalla TV : 42 pulgadas
- Pantalla TV : 24 pulgadas

3.2.12 Programas de cómputo

Los diversos cálculos y el manejo de la información se realizaron mediante varios softwares, tales como:



a) SWAT v2012 (Soil and Water Assessment Tool)

Soil and Water Assessment Tool (SWAT, por sus siglas en inglés) es decir, herramienta de evaluación de suelos y aguas, es un modelo que se utiliza para simular la calidad y la cantidad de las aguas superficiales y subterráneas y para predecir el uso de la tierra, las prácticas de gestión de la tierra y los impactos ambientales del cambio climático.

b) QGIS v3.18 (anteriormente Quantum GIS, actualmente QGIS)

QGIS es un sistema de información geográfica de código abierto, creado en mayo de 2002 y establecido como proyecto de SourceForge en junio del mismo año. Desde entonces, se ha centrado en hacer que el software SIG, que solía ser un costoso software propietario, esté disponible para cualquier persona con un ordenador. QGIS funciona ahora en la mayoría de las plataformas Unix, Windows y macOS.

c) QSWAT3 v1.1.1

QSWAT es una interfaz QGIS para el modelo de simulación hidrológico SWAT del Servicio de Investigación del Departamento de Agricultura de los Estados Unidos de Norte América (USDA - ARS). A partir del 2008 el modelo puede residir en la plataforma Quantum Gis (QGIS - QSWAT,) que es un SIG de código libre.

d) R v3.6.3 y RStudio v1.3.959

R es un lenguaje y un entorno para la computación estadística y los gráficos. R proporciona una variedad de métodos estadísticos (modelización lineal y no lineal, pruebas estadísticas clásicas, análisis de series temporales, clasificación, agrupación, ...) y gráficos) y es altamente escalable. A menudo se utiliza como una opción para la investigación de metodología estadística. R está disponible como software libre en forma de código fuente bajo la Licencia Pública General GNU de la Fundación de Software



Libre. Se ejecuta en los sistemas FreeBSD, Linux, Windows y MacOS.R es disponible para su descarga en CRAN.

RStudio es un entorno de desarrollo integrado (IDE) para R, cuenta con una consola, un editor de resaltado de sintaxis que admite la ejecución directa del código y herramientas de rastreo, historial, depuración y gestión del espacio de trabajo.

e) GEE (Google Earth Engine)

Es un servicio de procesamiento geoespacial. Se puede realizar el procesamiento geoespacial a escala, con tecnología de Google Cloud Platform. Además, es un catálogo de datos públicos, infraestructura informática, API geoespaciales y un servidor de aplicaciones interactivo. El propósito de Earth Engine es:

- Proporcionar una plataforma interactiva para el desarrollo de algoritmos geoespaciales a escala.
- Habilite la ciencia de alto impacto basada en datos.
- Lograr avances sustantivos en los desafíos globales que involucran grandes conjuntos de datos geoespaciales.

f) TREND v1.0.2 (trend/change detection software)

TREND está diseñado para facilitar las pruebas estadísticas de tendencia, cambio y aleatoriedad en datos hidrológicos y otras series temporales. TREND cuenta con 12 pruebas estadísticas, basadas en el Taller de Expertos de la Organización Meteorológica Mundial (OMM) y la Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO) sobre Detección de Tendencias/Cambios y en la publicación del Cooperative Research Centre (CRC) para hidrología de cuencas hidrográficas 'Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology' de Grayson et al. (1996).



TREND está diseñado para hidrólogos, científicos ambientales, consultores e investigadores para facilitar las pruebas estadísticas de tendencia, cambio y aleatoriedad en los datos de series temporales, es decir se puede utilizar para probar los cambios en los datos hidrológicos causados por el cambio climático, el cambio en el uso de la tierra, el cambio en las prácticas de gestión, etc.

g) SWATCUP2019 (calibration and uncertainty programs for SWAT)

SWATCUP-2019 es un programa para la calibración de modelos SWAT. El programa realiza calibración, validación, análisis de sensibilidad (uno a la vez y global) y análisis de incertidumbre. Además, el programa vincula los algoritmos SUFI2, GLUE, ParaSol, MCMC y PSO a SWAT. 11 criterios de rendimiento del modelo (por ejemplo, R2, NS, Pbias) se pueden utilizar como funciones objetivas para calibrar y validar los modelos SWAT. El programa tiene un módulo gráfico para mostrar resultados de simulación. Se tiene una versión de libre uso (SWAT-CUP) y otra bajo una licencia de pago (SWAT-CUP Premium).

h) SWAT Output Viewer

Es un programa de Windows para ver rápidamente los resultados de un modelo SWAT. Las principales características incluyen un mapa temático, un gráfico de series temporales, estadísticas de rendimiento, comparación de modelos y comparación de escenarios. La creación de esta aplicación ha sido posible, en parte, gracias a una beca de visita del Consejo Nacional de Ciencia e Ingeniería para Zhiqiang Yu que fue financiada por Agriculture and Agri-Food Canada (AAFC) a través del siguiente proyecto: Aplicación de la modelización de la calidad del agua para desarrollar y evaluar escenarios de cambio de uso del suelo y aplicación de prácticas de gestión beneficiosas en cuencas



hidrográficas específicas de los ríos Red y Assiniboine (Proyecto Red-Assiniboine-Fase2).

i) Microsoft office 2016 (con licencia estudiantil)

Microsoft Office es una suite ofimática que comprende aplicaciones de escritorio, servidor y servicio para los sistemas operativos Microsoft Windows, Mac OS X, iOS, Android y Linux.

3.3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.3.1 Método científico

Según Charaja Cutipa (2018), la ciencia como proceso es el método de investigación científica que utilizamos para producir nuevos conocimientos. Es un conjunto de pasos de carácter racional, lógico, secuencial y sistemático que debemos ejecutar para hallar los nuevos conocimientos.

En síntesis, considera el método como un conjunto de procedimientos organizados que establecen el camino para alcanzar los objetivos que nos proponemos.

Existen dos métodos: el método general, que consiste en seguir las etapas de la investigación desde la observación de la realidad dada por el problema hasta los resultados, y los métodos específicos, que se utilizan para probar las hipótesis o, en otras palabras, para alcanzar los objetivos de la investigación (Charaja Cutipa, 2018).

En la presente investigación se seguirá el método general de la investigación científica y el método específico de investigación factual, ya que implica recoger los datos requeridos directamente de la realidad a través de la observación o percepción directa, con nuestros sentidos o con la ayuda de máquinas o instrumentos. Siendo como método general de investigación específico la observación.



3.3.2 Tipo de investigación

Esta investigación se refiere a los estudios descriptivos y comparativos, ya que el objetivo central es describir las características de un fenómeno; por tanto, medir una o varias variables dependientes de una población definida (Charaja Cutipa, 2018). Es decir, se compara los caudales registrados por el SENAMHI con los caudales de la cuenca del río Ramis simulados obtenidos en la modelización hidrológica utilizando el modelo SWAT y el producto PISCO como insumo forzante y de importancia.

3.3.3 Nivel de investigación

Charaja Cutipa (2018) considera que los niveles de investigación deben estar directamente relacionados con los niveles educativos universitarios. Como se sabe, los niveles académicos universitarios son tres: nivel Bachiller, Maestría y Doctorado.

En la presente investigación debido al criterio de la naturaleza del problema de investigación, el nivel académico es el Bachillerato y el nivel de investigación es el descriptivo y explicativo simple, donde los problemas son comparativos y explicativos (causa y efecto).

3.3.4 Población y muestra

a) Población

En este estudio de Investigación, se consideraron como población todos los datos meteorológicos diarios grillados con una resolución de 10 x 10 km para la cuenca del río Ramis correspondientes al producto PISCO del SENAMHI.

b) Muestra

En esta investigación, una muestra de los datos recogidos en las estaciones virtuales se extrajo aleatoriamente teniendo en cuenta el centroide de cada subcuenca, lo que dio lugar a un total de 15 estaciones virtuales.

Los datos recogidos de PISCO consisten en 36 años de datos meteorológicos, incluidas las precipitaciones y las temperaturas máximas y mínimas, procesados diariamente desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016.

c) Técnica

La técnica consiste en comparar los caudales registrados por el SENAMHI con los obtenidos a partir de la modelización hidrológica en la cuenca del río Ramis a paso diario y mensual.

3.3.5 Enfoque metodológico

El enfoque metodológico utilizado en esta investigación se muestra en la **Figura 28** y cada una de las tres fases se explica con más detalle a continuación:

- Sistematización de la Información requerida
- Análisis de la información hidrológica
- Configuración y parametrización del modelo
- Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT.

3.3.6 Sistematización de la información requerida

a) MDE para el ámbito de estudio

El modelo digital de elevación (Ver ítem **3.2.3**), ha sido utilizado para delimitar las subcuencas y la distribución de la red hídrica del área de estudio en la interfaz de QSWAT. El sistema de coordenadas para la elaboración del MDE es el: “Projected

Coordinate Systems UTM WGS 1984 UTM Zone 19S”, el MDE para el ámbito de estudio puede verse en la **Figura 29**.

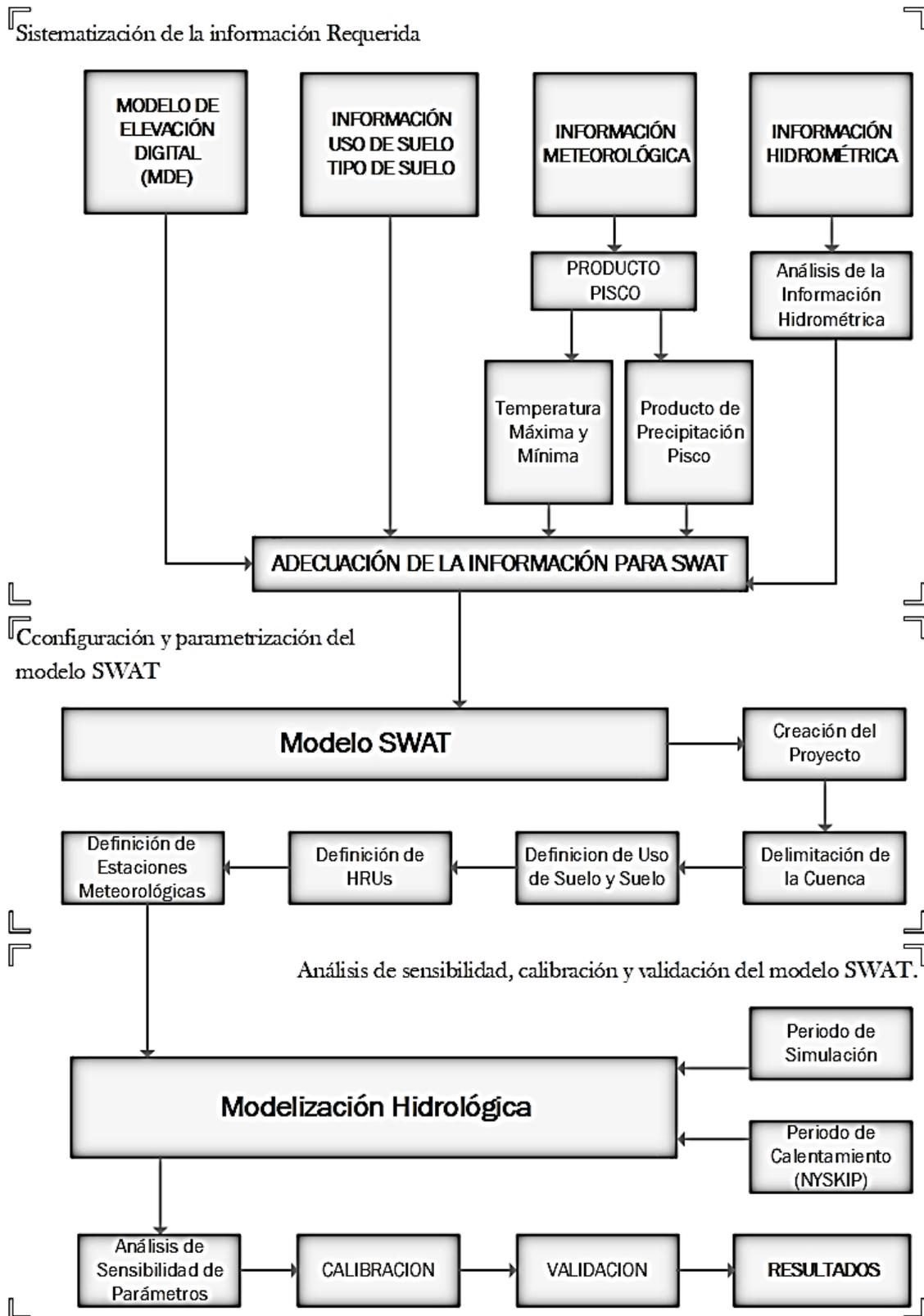


Figura 28. Diagrama de flujo de la metodología

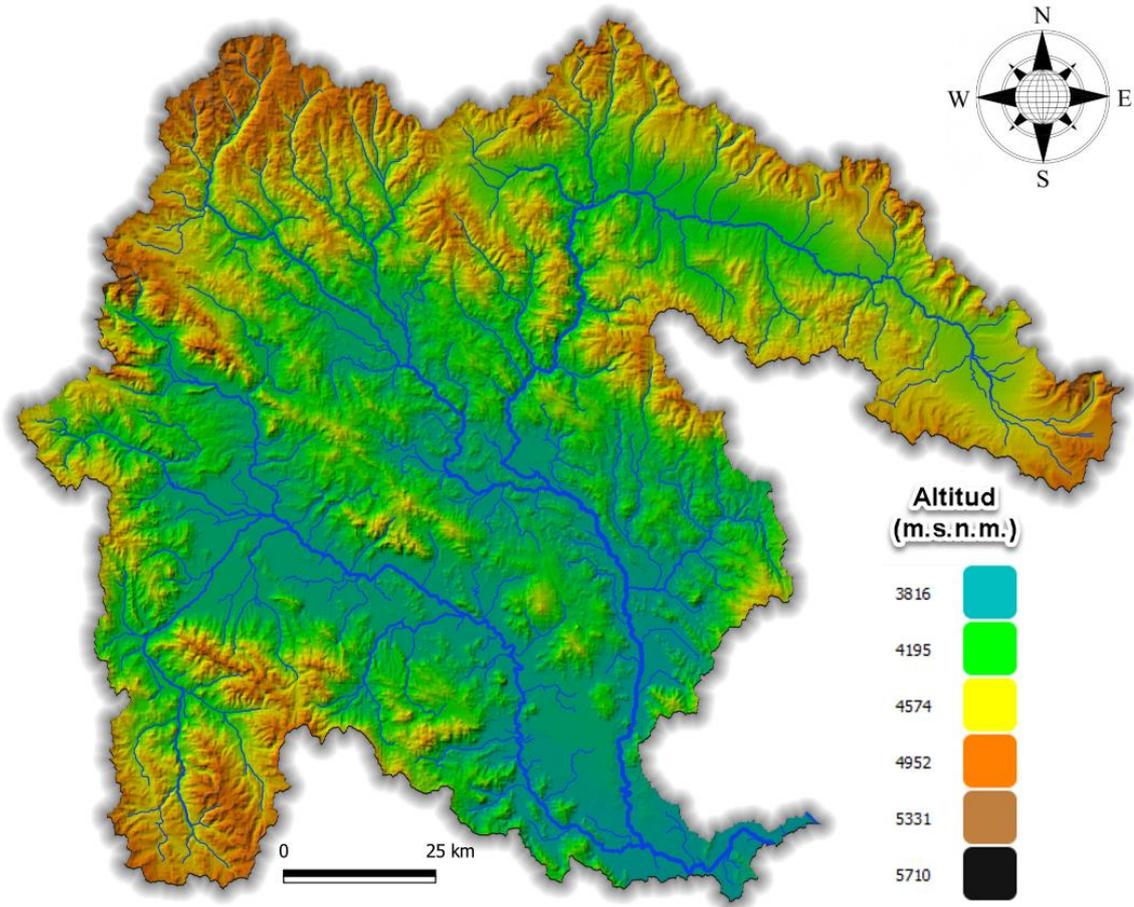


Figura 29. MDE para la cuenca del río Ramis

b) Adecuación de la base de datos de cobertura del suelo para el modelo SWAT

Las clases encontradas en la clasificación de las imágenes del producto GlobalLand30 (ver ítem 3.2.5) han sido relacionadas con la base de datos SWAT, que se compone de los tipos de cultivos y coberturas más comunes (véase la **Tabla 6**); esta información es importante porque tiene una influencia significativa en la evapotranspiración, la interceptación y la erosión superficial.

c) Adecuación de la base de datos de tipo de suelo para el modelo SWAT.

Las clases de tipos de suelos encontradas corresponden a la clasificación de suelos de la FAO (su obtención se explica en el ítem 3.2.6). La base de datos de suelos utilizada

por QSWAT contiene información sobre las propiedades físicas de los suelos que rigen el movimiento del agua y el aire a través del perfil, que tienen un importante impacto en el ciclo hidrológico. QSWAT se basa en los tipos de suelo clasificados por la FAO.

Tabla 6. Adecuación de los datos de globallandcover30 a la base de datos de SWAT

	Descripción de clases encontradas	Código SWAT	Descripción SWAT
	Tierras utilizadas para cultivos.	AGRL	Tierras cultivadas
	Tierras cubiertas de árboles.	FRST	Bosque
	Tierras cubiertas por césped natural (pajonal-barbecho)	PAST	Pastizales
	Tierras cubiertas de arbustos (arbustos de montaña)	FRSD	Arbustos
Uso de Suelo	Aguas poco profundas o suelos húmedos, los humedales de llanuras aluviales de ríos.	WETL	Humedal
	Áreas cubiertas de agua (ríos, lagos, embalses, estanques, etc.)	WATR	Cuerpos de agua
	Superficies construidas por el hombre (urbanas y rurales)	URBN	Superficies artificiales
	Terrenos naturales cubiertos (rocas desnudas)	BARR	Lecho rocoso

En la cuenca del río Ramis se encontraron cuatro tipos de suelos predominantes, I-Bh-Tv-c, I-Bh-c, Th8-a y Glaciar, correspondientes a la simbología sudamericana de la FAO (FAO-UNESCO, 1971). Se preparó una tabla que resume las características del suelo de la cuenca (véase la **Tabla 7**).

Tabla 7. Adecuación de los datos de la FAO a la base de datos de SWAT

	Símbolo	Vegetación	Litología	"Value" SWAT	"NAME" SWAT
	I-Bh-Tv-c	Bosque higrofitico nuboso de alta montaña, bosque de Polylepis, páramo, tundra alpina	Cenizas cuaternarias y corrientes de lava, depósitos glaciales, rocas ígneas ácidas; rocas clásticas y calcáreas mesozoicas	5518	I-Bh-Tv-c
Tipo de Suelo	I-Bh-c	Páramo subalpino y tundra alpina	Rocas ligeramente metamorfizadas del paleozoico anterior, rocas calcáreas y clásticas permocarboníferas, rocas clásticas, rocas clásticas cretáceas y depósitos glaciales del cuaternario	5519	I-Bh-c
	Th8-a	Lago Titicaca: estepa del altiplano y praderas fluviales	Lago Titicaca: depósitos volcánicos, aluviales y lacustres cuaternarios	5672	Th8-a
	GLACIER	Descripción: Zonas cubiertas de nieve y glaciares		6998	GLACIER

3.3.7 Análisis de la información hidrológica

a) Análisis exploratorio de datos (AED)

El análisis exploratorio de datos (AED) se originó con el trabajo de Tukey (1977) y desde entonces su uso se ha incrementado debido a la necesidad de investigación preliminar de los datos. Este análisis requiere mucho tiempo y a menudo los analistas de datos no lo tienen en cuenta. A menudo, incluso las tareas aparentemente triviales e intrascendentes son esenciales para el análisis estadístico.

La utilización directa de los datos sin evaluar su estructura, consistencia, presencia de valores atípicos, relaciones entre variables, etc., constituye un enfoque de caja negra y aumenta el grado de incertidumbre sobre la validez de los resultados obtenidos. El AED abarca una amplia gama de temas, pero incluye la organización y la preparación de los datos, la detección de fallos de diseño y de muestreo en la recogida de datos, el tratamiento y la evaluación de los datos que faltan, la identificación de los valores atípicos y la comprobación de los valores supuestos que subyacen a la mayoría de los métodos estadísticos mediante técnicas gráficas sencillas (Lobo et al., 2006).

El AED es un primer paso crítico en el análisis de los datos mediante el análisis gráfico y no gráfico de un experimento (Seltman, 2018).

A continuación, se presentan las técnicas gráficas utilizadas sobre los datos de caudal observado correspondientes a la zona de estudio:

Histogramas

La única de estas técnicas que tiene sentido para los datos categóricos es el histograma (básicamente un diagrama de barras de la tabulación de los datos). Un gráfico circular es equivalente, pero no se utiliza a menudo.

El gráfico más básico es el histograma, que es un diagrama de barras en el que cada barra representa la frecuencia (conteo) o la proporción (conteo/conteo total) de casos para un rango de valores. Normalmente, las barras son verticales y el eje de recuento (o proporción) es vertical. Para construir manualmente un histograma, defina el rango de datos para cada barra (llamado **bin**), cuente cuántos casos caen en cada **bin** y dibuje las barras lo suficientemente altas para indicar el conteo (Seltman, 2018). Para un conjunto de datos, el histograma se muestra en la **Figura 30**.

Este tipo de gráficos muestran en relación con los datos:

- El centro
- La dispersión
- La asimetría
- La presencia de valores atípicos
- La aparición de múltiples modas

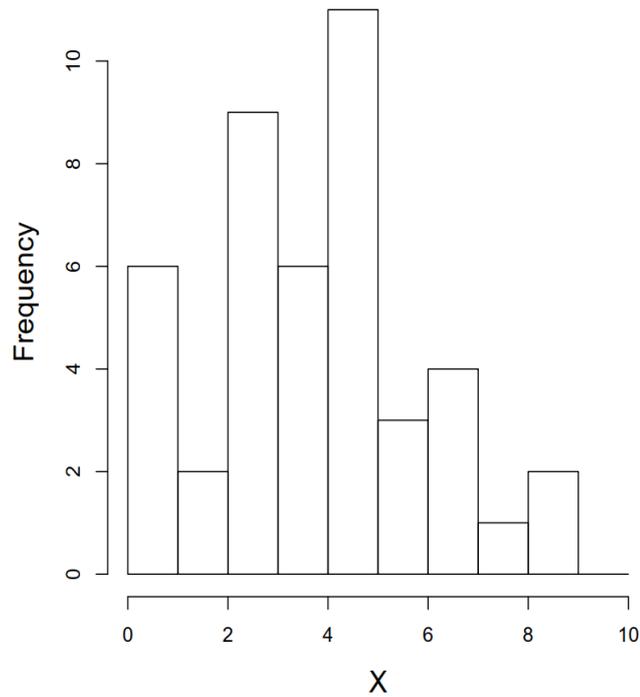


Figura 30. Histograma para un conjunto de datos.

Diagrama de caja y bigotes o boxplots

El Boxplot se describirá aquí en su formato vertical, que es el más común, pero también es posible un formato horizontal.

Un ejemplo de Boxplot se muestra en la **Figura 31**.

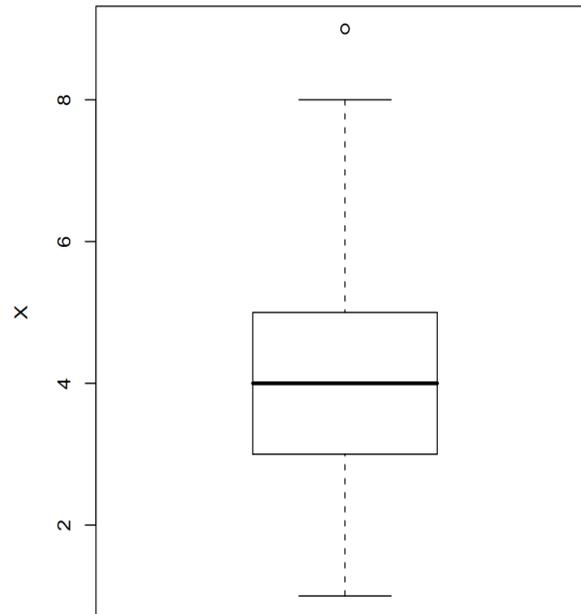


Figura 31. Boxplot para un conjunto de datos.

Los boxplots son muy buenos para presentar información sobre la tendencia central, la simetría y la inclinación, así como los valores atípicos, aunque pueden ser engañosos sobre aspectos como la multimodalidad. Uno de los mejores usos de los boxplots es en forma de boxplots de lado a lado.

La **Figura 32** es una versión anotada de la **Figura 31**. Aquí puede ver que el boxplot consiste en una caja rectangular delimitada arriba y abajo por "bisagras" que representan los cuartiles Q3 y Q1 respectivamente, y con una línea horizontal de la "mediana" que la atraviesa. También se pueden ver los "bigotes" superior e inferior, y un punto que marca un "valor atípico". El eje vertical está en las unidades de la variable cuantitativa.

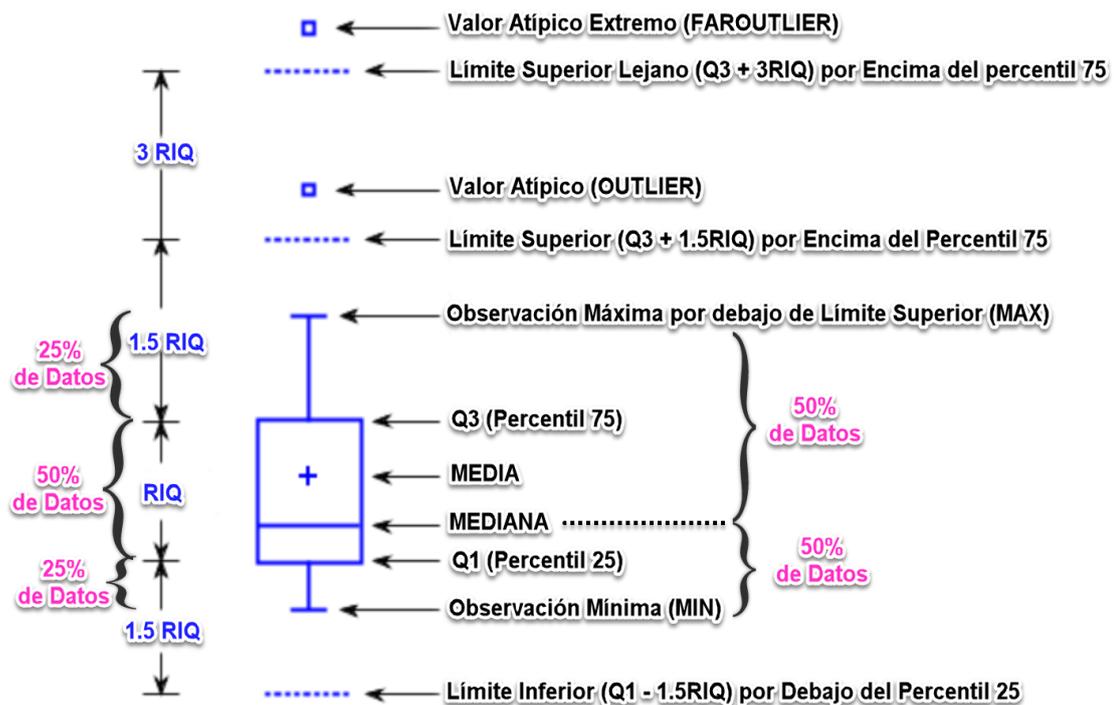


Figura 32. Partes de un boxplot (Anotado)

Respecto a la distribución de los datos, el eje horizontal abarca todos los valores posibles de los datos. La parte de la caja cubre el 50% central de los valores del conjunto de datos. Este 50% de los datos se encuentra entre Q1 y Q3 y su rango es el Rango Intercuartílico ($RIQ = Q3 - Q1$).

Los bigotes cubren cada uno el 25% de los valores de los datos. El bigote inferior cubre todos los valores de los datos desde el valor mínimo hasta Q1, es decir, el 25% más bajo de los valores de los datos. El bigote superior cubre todos los valores de los datos entre Q3 y el valor máximo, es decir, el 25% más alto de los valores de los datos.

La mediana se sitúa dentro de la caja y representa el centro de los datos. El 50% de los valores de los datos se sitúan por encima de la mediana y el 50% por debajo de la misma.

La interpretación de los bigotes y los valores atípicos es un poco más complicada. Cualquier valor de los datos que esté más de 1.5 RIQ más allá de su correspondiente

bisagra en cualquier dirección se considera un "valor atípico" y se traza individualmente. A veces, los valores más allá de 3.0 RIQ se consideran "valores atípicos extremos" y se trazan con un símbolo diferente, suelen indicarse con el símbolo de la "estrella". Si hay uno o más valores atípicos en un conjunto de datos, para dibujar el gráfico de caja y bigotes, tomamos el mínimo y el máximo como los valores mínimos y máximos del conjunto de datos excluyendo los valores atípicos.

Gráfico de probabilidades

Este tipo de gráfico puede utilizarse para determinar si ciertos datos siguen una distribución determinada, como una distribución normal. Al comparar los datos con una distribución teórica, los puntos son aproximadamente lineales y la distancia de la línea recta indica la desviación de la distribución dada. El coeficiente de correlación asociado a un ajuste lineal de los datos en dicho gráfico es un indicador de la bondad del ajuste (Lobo et al., 2006). Un ejemplo de ello se muestra en la **Figura 33**.

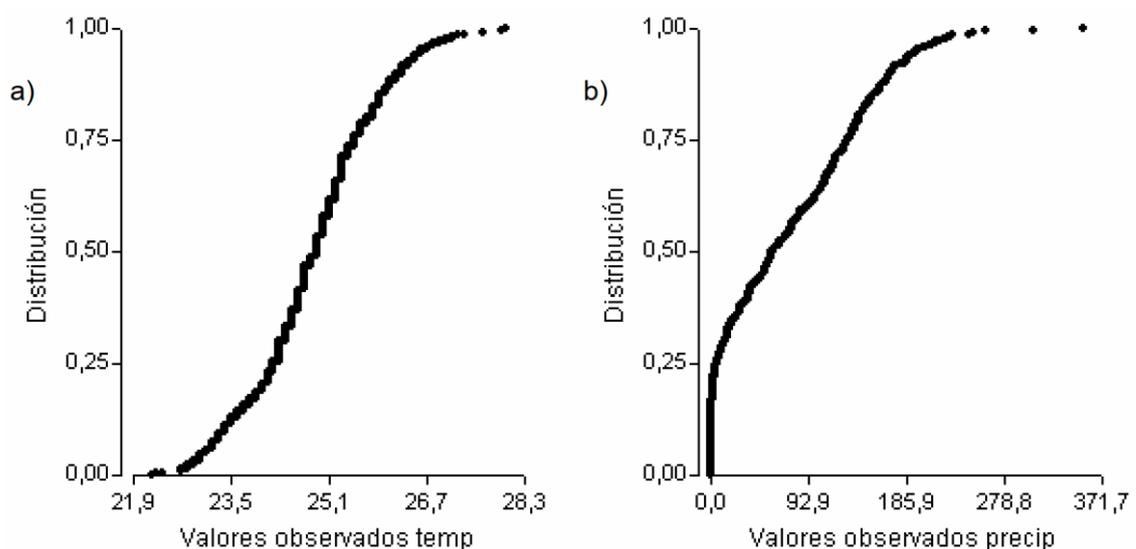


Figura 33. Distribución para un conjunto de datos

Fuente: Lobo et al. (2006)

Diagramas cuantílicos o Q-Q plots

La última técnica gráfica de AED es la más complicada. Se denomina gráfico cuantílico o Q-N, o de forma más general, gráfico cuantílico-cuantílico o Q-Q. Se utiliza para ver hasta qué punto una muestra concreta sigue una determinada distribución teórica. Aunque puede utilizarse para cualquier distribución teórica. Examinando un gráfico cuantílico-normal podemos detectar la asimetría izquierda o derecha.

El ejemplo de la **Figura 34** muestra un conjunto de datos, donde si todos los puntos trazados en el gráfico se encuentran perfectamente en una línea recta, entonces podemos decir claramente que esta distribución es normalmente distribuida porque está alineada uniformemente con la variable normal estándar, que es el concepto simple de la gráfica Q-Q. No confunda un gráfico cuantílico-normal con un simple gráfico de dispersión de dos variables. El título y las etiquetas de los ejes son fuertes indicadores de que se trata de un gráfico cuantílico-normal. En muchos programas informáticos, la palabra "cuantil" también aparece en las etiquetas de los ejes (Seltman, 2018).

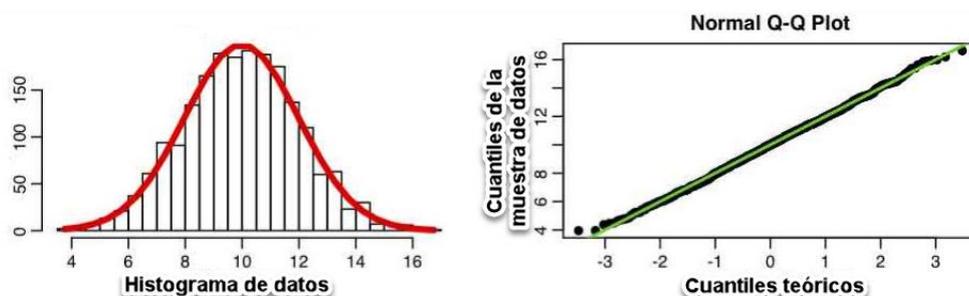


Figura 34. Datos normalmente distribuidos.

Fuente: Adaptado de Towers (2013)

Datos No Normalmente Distribuidos: Los datos también no pueden parecer a una distribución normal como en la **Figura 35**, para ello tenemos que centrarnos en los extremos de la línea recta. Si los puntos en los extremos de la curva formada a partir de los puntos no están cayendo en una línea recta, sino que están dispersos

significativamente desde las posiciones, entonces no podemos concluir una relación entre los ejes x e y que signifique claramente que nuestros valores ordenados que queríamos calcular no están normalmente distribuidos.

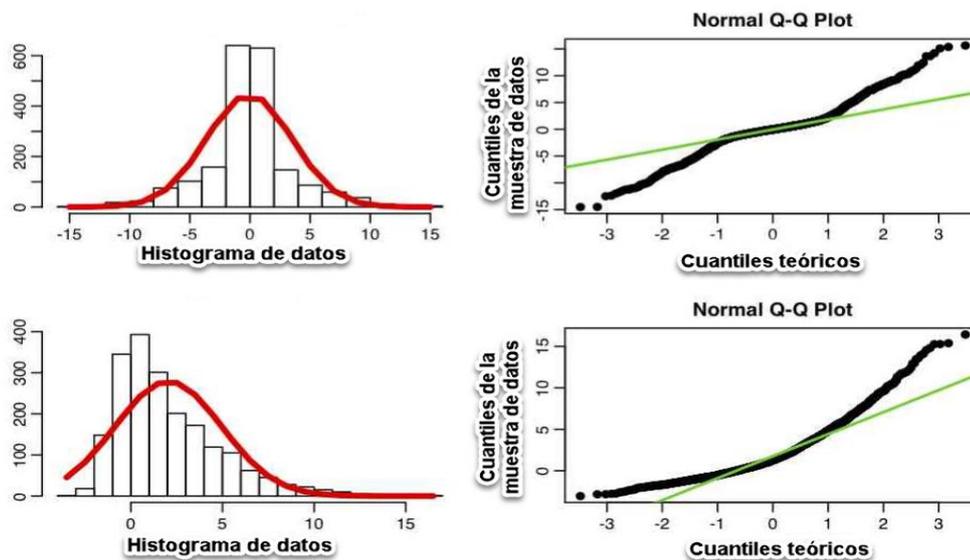


Figura 35. Datos no normalmente distribuidos

Fuente: Adaptado de Towers (2013)

Gráficos Q-Q sesgados: Los gráficos Q-Q también se utilizan para determinar la asimetría de una distribución. Cuando trazamos los cuantiles teóricos en el “eje x” y los cuantiles de la muestra cuya distribución queremos conocer en el “eje y”, entonces vemos una forma muy peculiar de un gráfico Q-Q de distribución normal para la asimetría. Si el extremo inferior del gráfico Q-Q se desvía de la línea recta pero el extremo superior no, entonces podemos decir claramente que la distribución tiene una cola más larga a su izquierda o simplemente es sesgada a la izquierda (o negativamente sesgada) (ver **Figura 36**); pero cuando vemos que el extremo superior del gráfico Q-Q se desvía de la línea recta y el inferior sigue una línea recta, entonces la curva tiene una cola más larga a su derecha y es sesgada a la derecha (o positivamente sesgada) (ver **Figura 37**).

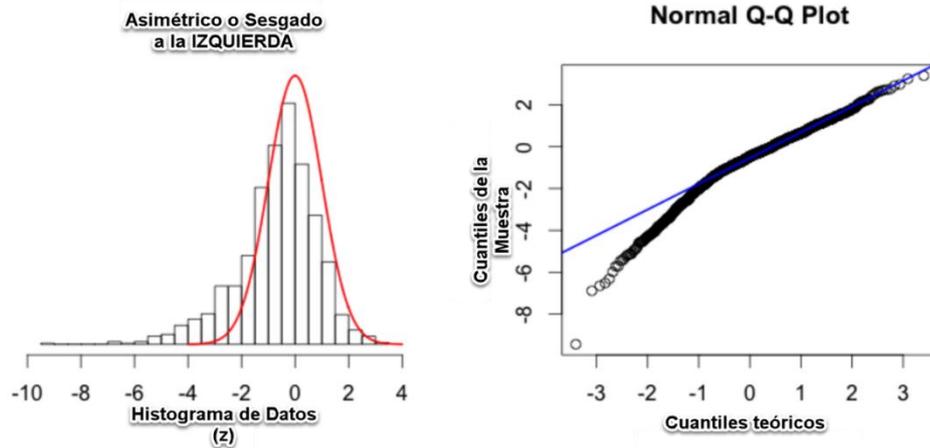


Figura 36. Datos sesgados a la izquierda para la distribución normal

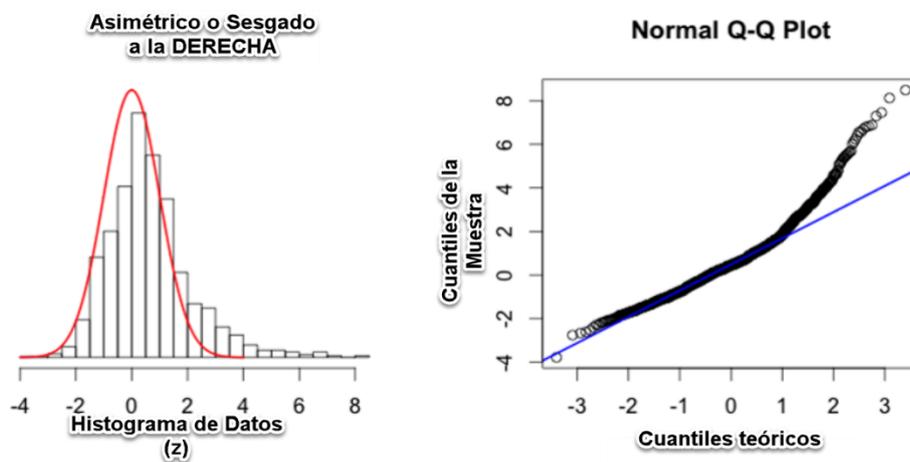


Figura 37. Datos sesgados a la derecha para la distribución normal

Q-Q de las “colas” (Tailedness): Del mismo modo, podemos hablar de la curtosis (una medida de la "Tailedness") de la distribución simplemente observando su gráfico Q-Q. La **Figura 38** muestra un conjunto de datos con "colas gruesas", lo que significa que, en comparación con la distribución normal, hay más datos situados en los extremos de la distribución y menos datos en el centro de la misma. En términos de cuantiles, esto significa que el primer cuantil es mucho menor que el primer cuantil teórico y el último cuantil es mayor que el último cuantil teórico. Esta tendencia se refleja en el correspondiente gráfico Q-Q. La **Figura 39** muestra el fenómeno contrario, en el que hay más datos concentrados en el centro de la distribución y menos datos en las colas.

Estas "colas delgadas" corresponden a los primeros cuantiles que se encuentran en valores mayores de los esperados y a los últimos cuantiles que se encuentran en valores menores de los esperados.

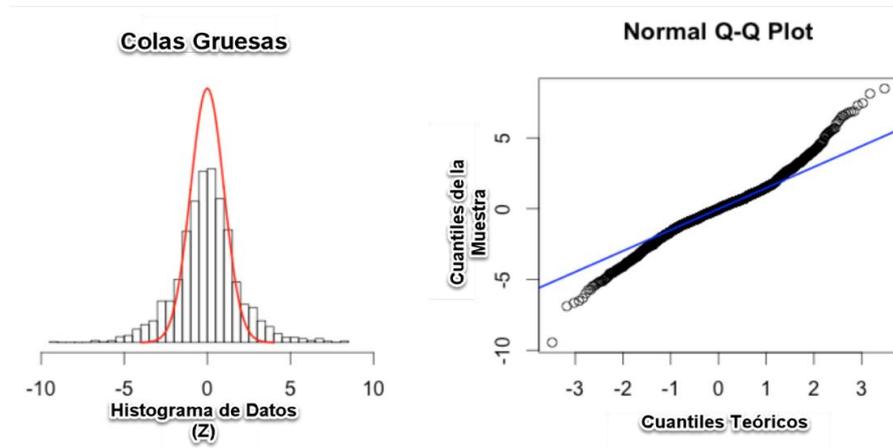


Figura 38. Conjunto de datos con "colas gruesas"

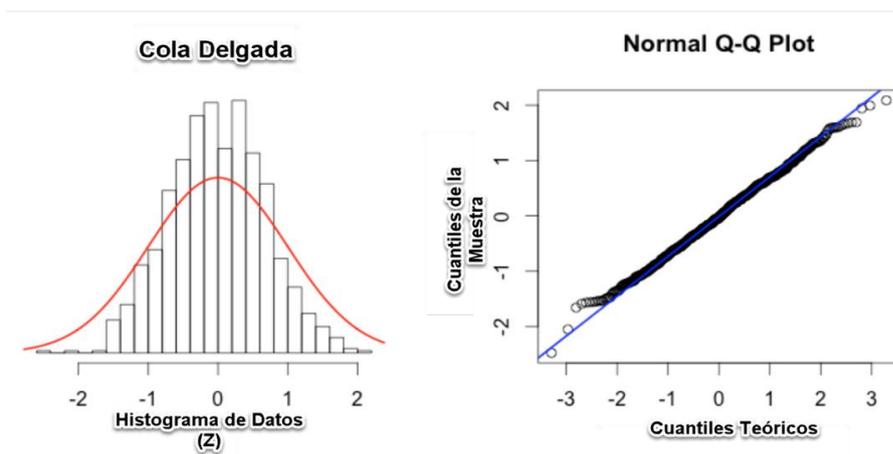


Figura 39. Conjunto de datos con "colas delgadas"

En resumen, los valores de los datos reales ordenados se comparan con los "Valores normales esperados", y se añade algún tipo de línea diagonal para ayudar a dirigir la mirada hacia una línea recta perfecta en el gráfico cuantílico que representaría una forma de campana perfecta para los datos observados. En caso contrario, cuando los datos no siguen una distribución normal, es decir donde no se forma la campana de Gauss



(cuando los valores no se ajustan a una recta), entonces, se debe pensar en trabajar en algún momento con Test de Pruebas NO Paramétricas.

b) Pruebas estadísticas no paramétricas

Las pruebas estadísticas paramétricas deben utilizarse cuando se utilizan variables cuantitativas continuas, la media aritmética y la desviación estándar de la muestra se distribuyen normalmente, las varianzas son comparables (homogéneas) y el tamaño de la muestra es suficiente (30 o más casos). Si no se cumplen estos requisitos, especialmente si la normalidad de la distribución de la variable en estudio es dudosa y el tamaño de la muestra es menor, se sugiere el uso de pruebas no paramétricas (Gómez Gómez et al., 2003).

Para la elección de las pruebas estadística No Paramétricas fue necesario considerar ciertos supuestos (Kundzewicz & Robson, 2000):

- Si la serie temporal sigue una distribución específica
- Y su aleatoriedad.

Estos supuestos se identificaron mediante el AED. El paquete computacional que se empleó para realizar las pruebas estadísticas ha sido TREND, así como su manual de referencia (Chiew & Siriwardena, 2005). En esta investigación, se utilizaron las siguientes pruebas estadísticas no paramétricas (los cuales son de uso en datos hidrológicos y otras series temporales):

Análisis de independencia serial

Se utilizó la prueba estadística no paramétricas de Puntos Cambiantes (Turning Points, por sus siglas en inglés) para analizar la independencia de las series de los datos de precipitación observados.



El método consiste en que a los n valores de la serie temporal se asignan a 1 si $x_i - 1 < x_i > x_{i+1}$ o $x_{i-1} > x_i < x_{i+1}$, en caso contrario se asignan a 0.

El número de veces que aparece 1 (m^*) se distribuye aproximadamente de forma normal con:

$$\mu = 2(n - 2) / 3 \quad (5)$$

$$\sigma = (16n - 29) / 90 \quad (6)$$

Por lo tanto, el estadístico z es (los valores estadísticos críticos de la prueba para varios niveles de significación pueden obtenerse de las tablas de estadísticas de T de Student)

$$z = | m^* - \mu | / \sigma^{0.5} \quad (7)$$

Donde: μ =media muestral, σ =variancia

Análisis de estacionariedad

El criterio de estacionariedad implica que los datos deben carecer de tendencia a lo largo del periodo de observación. Sólo se puede decir que una serie temporal de datos hidrológicos es estrictamente estacionaria si sus propiedades estadísticas (media, varianza y momentos de orden superior) no se ven afectadas por la elección del momento de origen de la serie de datos (Dahmen & Hall, 1990).

En esta investigación, se utilizó la prueba estadística no paramétrica de Mann Kendall para detectar tendencias significativas en las series temporales. La prueba no paramétrica de Mann Kendall se presenta a continuación:

Los n valores de las series temporales ($X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$) se sustituyen por sus rangos relativos ($R_1, R_2, R_3, \dots, R_n$) (empezando por **1** para el más bajo hasta **n**).

La estadística de prueba S es:

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \left[\sum_{j=i+1}^n \operatorname{sgn}(R_j - R_i) \right] \quad (8)$$

Donde:

$$\operatorname{sgn}(x) = 1 \text{ for } x > 0$$

$$\operatorname{sgn}(x) = 0 \text{ for } x = 0$$

$$\operatorname{sgn}(x) = -1 \text{ for } x < 0$$

Si la hipótesis nula H_0 es verdadera, entonces S se distribuye aproximadamente de forma normal con:

$$\mu = 0 \quad (9)$$

$$\sigma = n(n-1)(2n+5)/18 \quad (10)$$

Por lo tanto, el estadístico z es (los valores estadísticos críticos de la prueba para varios niveles de significación pueden obtenerse de las tablas estadísticas de T de Student)

$$z = |S| / \sigma^{0.5} \quad (11)$$

Un valor positivo de S indica que hay una tendencia creciente y viceversa.

Análisis de cambio en la media

Se utilizó la prueba no paramétrica de distribución libre CUSUM. Es una prueba basada en la clasificación de los datos observados, es decir, este método comprueba si las medias de dos partes de un registro son diferentes (para un tiempo de cambio desconocido).

Dados los datos de una serie temporal $(x_1, x_2, x_3, \dots, x_n)$, la estadística de la prueba se define como:

$$V_k = \sum_{i=1}^k \operatorname{sgn}(x_i - x_{\text{median}}) \quad k = 1, 2, 3, \dots, n \quad (12)$$

Donde:

$$\text{sgn}(x) = 1 \text{ for } x > 0$$

$$\text{sgn}(x) = 0 \text{ for } x = 0$$

$$\text{sgn}(x) = -1 \text{ for } x < 0$$

La distribución de V_k sigue el estadístico de Kolmogorov-Smirnov de dos muestras ($KS = (2/n) \max|V_k|$) con los valores críticos de $\max|V_k|$ dados por:

$$\alpha = 0.10 \quad 1.22\sqrt{n} \quad \text{(13)}$$

$$\alpha = 0.05 \quad 1.36\sqrt{n} \quad \text{(14)}$$

$$\alpha = 0.01 \quad 1.63\sqrt{n} \quad \text{(15)}$$

Un valor negativo de V_k indica que la última parte del registro tiene una media más alta que la parte anterior y viceversa.

3.3.8 Configuración y parametrización del modelo

Se desarrolló un modelo hidrológico de la cuenca del río Ramis en SWAT 2012 utilizando la interfaz QSWAT. Por lo tanto, a partir del MDE, se extrajo la cuenca de estudio y la red fluvial utilizando la herramienta de extracción automática de cuencas de QSWAT, siguiendo el procedimiento utilizado por S. L. Neitsch et al. (2002). Para toda la cuenca de estudio, la red de drenaje y el número de subcuencas se definieron en base al criterio de área mínima de drenaje de 40 000 ha. En función de la heterogeneidad espacial de las pendientes de la cuenca, se clasificaron en cinco clases (<10%, 10-20%, 20-30%, 30-40% y >40%). A continuación, se definieron las HRU (Unidades de Respuesta Hidrológica) mediante el análisis de superposición y la combinación única de tipos de suelo, usos del suelo y pendientes específicas. Se excluyeron los tipos de suelo, el uso de la tierra y las pendientes inferiores al 5% de la cuenca para evitar la sobreparametrización del modelo.



Debido a la limitada disponibilidad de variables meteorológicas como la humedad relativa, la velocidad del viento y la radiación solar, se utilizó el método de Hargreaves para estimar la evapotranspiración potencial (ETP). El uso de este método fue evaluado por (Aouissi et al., 2016) utilizando el método de estimación ETP (Penman-Monteith [PM], Hargreaves [HA]. Priestly-Taylor [PT]) en una cuenca semiárida en Túnez para evaluar su impacto en las predicciones de flujo por SWAT. Se informó de que PM era la mejor opción para los cálculos de ETP, mientras que HA se utilizó para la estimación de ETP y dio un rendimiento superior ($NSE=0.90$) para las previsiones de flujo mensual.

La escorrentía superficial se estimó mediante el método del número de curva SCS. El flujo lateral de las capas no saturadas del suelo se estimó utilizando un modelo de almacenamiento cinemático, mientras que los flujos de retorno de los acuíferos superficiales y profundos se simulaban según (J. G. Arnold et al., 1998). Se utilizó el método de almacenamiento variable para el enrutamiento del agua hacia la red hidrográfica. El balance hídrico de la cuenca en la fase terrestre viene dado por la ecuación de balance hídrico del suelo para cada día de simulación.

Es preciso señalar que la modelización hidrológica se llevó a cabo a paso diario y mensual.

3.3.9 Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo

Dada la disponibilidad de datos meteorológicos desde 1981, el periodo de simulación del modelo SWAT se fijó en 1981-2016, con los tres primeros años (1981-1983) como periodo de calentamiento del modelo (también conocido como NYSKIP o Warm-Up) para mitigar las condiciones iniciales desconocidas. Mientras tanto, los registros de caudal medio diario de las estaciones hidrológicas se utilizaron como



referencia para la calibración del modelo (1984-2003) y la validación (2004-2016) en la cuenca de estudio.

a) Análisis de sensibilidad de parámetros para el modelo hidrológico

Dado que los modelos hidrológicos SWAT son complejos y tienen un gran número de parámetros de calibración, es habitual enfrentarse al reto de qué parámetros deben calibrarse para que la respuesta del modelo se asemeje a los datos observados y represente lo más fielmente posible las condiciones reales de la cuenca.

Este análisis es útil para identificar y clasificar los parámetros que tienen un impacto significativo en los datos específicos del objetivo simulado por el modelo, para limitar el número óptimo de parámetros en el modelo y para evitar que el proceso de calibración sea complejo y largo.

El modelo SWAT tiene más de 30 parámetros. Arnold et al. (2012) categorizaron los parámetros del modelo SWAT por procesos como la escorrentía superficial, el flujo base, los sedimentos, los nutrientes y pesticidas utilizando el informe de los parámetros de entrada en la calibración del modelo SWAT para 64 estudios de cuencas seleccionadas.

En la presente Investigación, tras una exhaustiva revisión de la literatura y además considerando referencias recientes [(Arnold et al. (2012), Fernández Palomino (2016), Aybar Camacho (2016), Fernández (2017) y Arias Baltazar (2020)], se seleccionaron 20 parámetros para la simulación del modelo en pasos de tiempo diarios. Los parámetros seleccionados se muestran en la **Tabla 8** con su respectiva descripción. Se observó que el uso de dichos parámetros tuvo un efecto significativo en el proceso de simulación del caudal.

Se realizó un análisis de sensibilidad de los parámetros seleccionados utilizando el software SWAT-CUP para determinar el grado de influencia y la conveniencia con criterio de utilizarlos como parámetros de calibración.

Tabla 8. Parámetros seleccionados

Nº	Nombre del Parámetro	Descripción del Parámetro
1	ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo
2	CN2.mgt	Número de Curva inicial de la escorrentía SCS para condición de humedad II
3	ALPHA_BF.gw	Flujo base Factor Alfa (días)
4	GW_DELAY.gw	Tiempo de retraso de las aguas subterráneas (días)
5	GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo para que se produzca el flujo de retorno (mm H ₂ O)
6	CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la Cubierta (Dosel) (mm)
7	CH_K2.rte	Conductividad hidráulica del canal principal (mm/h)
8	CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para el canal principal
9	EPCO.bsn	Factor de compensación de la absorción de la planta
10	GW_REVAP.gw	Coefficiente de "revap" de las aguas subterráneas
11	REVAPMN.gw	Profundidad umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca el "revap" o la percolación (mm)
12	SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible de una capa de suelo (mm H ₂ O / mm Suelo)
13	SOL_K().sol	Conductividad del suelo saturado de la capa (mm/h)
14	SURLAG.bsn	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial
15	CH_N1.sub	Valor "n" de Manning para el canal tributario afluente
16	CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal tributario (mm/h)
17	SLSOIL.hru	Longitud de la pendiente para el flujo lateral del subsuelo (m)
18	LAT_TTIME.hru	Tiempo de viaje del flujo lateral (días)
19	HRU_SLP.hru	Pendiente media de la ladera (mm)
20	SLSUBBSN.hru	Longitud media del pendiente (m)

b) Calibración y validación del modelo hidrológico

El análisis de incertidumbre tanto en la calibración y validación del modelo SWAT fue llevado a cabo utilizando el algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting 2” (SUFI-2) implementado en la plataforma SWAT-CUP.

Para evaluar el desempeño del producto PISCO, se utilizaron tres índices estadísticos (Moriassi et al., 2007) para evaluar el rendimiento del modelo SWAT durante la fase de calibración y validación: el índice de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE), el índice de sesgo (PBIAS), el coeficiente de determinación (R^2) y los caudales simulados y observados. El rendimiento del modelo se evaluó en m^3/s para todas las series comparando los caudales simulados y observados.

El coeficiente de determinación (R^2)

R^2 se interpreta como la proporción de la varianza de la variable dependiente que puede predecirse a partir de las variables independientes. En otras palabras, se utiliza como una prueba de bondad de ajuste entre la simulación y la observación, con valores que varían entre 0 y 1, donde 0 indica un mal ajuste y 1 un ajuste perfecto y está definida como se muestra en la Ecuación (16).

$$R^2 = 1 - \frac{[\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})(Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})]^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2 \sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - \bar{Q}_{sim})^2} \quad (16)$$

Coefficiente de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE)

El NSE determina la magnitud relativa de la variación residual en comparación con la variación de los datos observados, reflejando el ajuste global de un hidrograma. Es decir, el NSE fue usado para estimar la eficiencia del modelo, ya que indica que tan bien es el ajuste valor por valor entre lo simulado y lo medido. Este estadístico oscila entre $-\infty$

y 1, donde $NSE = 1$ indica un ajuste perfecto del modelo. El NSE se define mediante la Ecuación (17).

$$NSE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})^2}{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - \bar{Q}_{obs})^2} \quad (17)$$

Porcentaje de sesgo (PBIAS)

Porcentaje de Sesgo (PBIAS, por su sigla en inglés) indica la tendencia media del modelo a sobrestimar o subestimar los valores simulados. Por lo tanto, el valor óptimo de PBIAS es 0%, cuando el modelo, en promedio, está prediciendo la variable sin sesgo. En otras palabras, el PBIAS se utilizó para evaluar si los valores simulados eran superiores o inferiores a los medidos. Aquí, un valor positivo de PBIAS indica que el modelo subestima el valor medido, mientras que un valor negativo indica que el modelo sobreestima el valor. PBIAS se define mediante la Ecuación (18).

$$PBIAS = 100 \times \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{obs,i} - Q_{sim,i})}{\sum_{i=1}^n Q_{obs,i}} \quad (18)$$

En las ecuaciones [(16), (17) y (18)], n es el número de datos observados, $Q_{obs,i}$ es el caudal observado en el día o mes i , Q_{obs} es el caudal medio observado, $Q_{sim,i}$ es el caudal simulado en el día o mes i y Q_{sim} es el caudal medio simulado.

En la **Tabla 9** presenta un resumen de los criterios utilizados para evaluar el rendimiento del modelo SWAT. Se basa en el resumen de Moriasi et al. (2007), quienes derivaron estos criterios basándose en una amplia revisión bibliográfica de los informes de rendimiento utilizados en los modelos hidrológicos.

Por último, cabe señalar que durante la fase de validación se evalúa la capacidad del modelo SWAT para simular adecuadamente y con precisión el caudal con los parámetros obtenidos durante la fase de calibración. Por lo tanto, PISCO se probará

comparando los caudales observados y simulados con los parámetros finales obtenidos en el periodo de calibración, validando así el modelo y, por lo tanto, el desempeño del producto PISCO.

Tabla 9. Esquema de clasificación del desempeño del modelo SWAT

Estadística Recomendada	Valoración del Rendimiento			
	Insatisfactorio	Satisfactorio	Bueno	Muy bueno
NSE	< 0.50	0.50 – 0.65	0.65 – 0.75	> 0.75
± PBIAS (%)	> 25	15 - 25	10 – 15	< 10

Fuente: Fernández Palomino (2017)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 ANÁLISIS EXPLORATORIO DE DATOS (AED)

4.1.1 Hidrograma de caudales históricos

La **Figura 40** muestra el hidrograma de caudales medios diarios históricos que registra la estación de aforo puente Ramis para el periodo de 1981 – 2016.

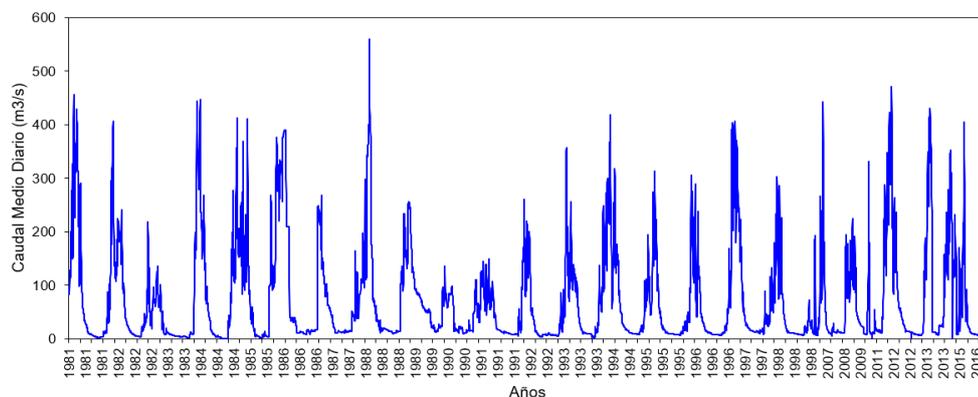


Figura 40. Hidrograma de caudales medios diarios históricos (1981-2016)

Así también, se presenta los hidrogramas de caudales medios históricos a nivel mensualizado de la estación de aforo puente Ramis para el periodo de 1981 – 2016 (**Figura 41**).

4.1.2 Análisis exploratorio de datos (AED)

La serie temporal de datos hidrométricos de la estación de puente Ramis se analizó mediante el AED (en sus diferentes técnicas gráficas) para visualizar el comportamiento de esta variable a lo largo del tiempo. Los principales resultados obtenidos se presentan a continuación.

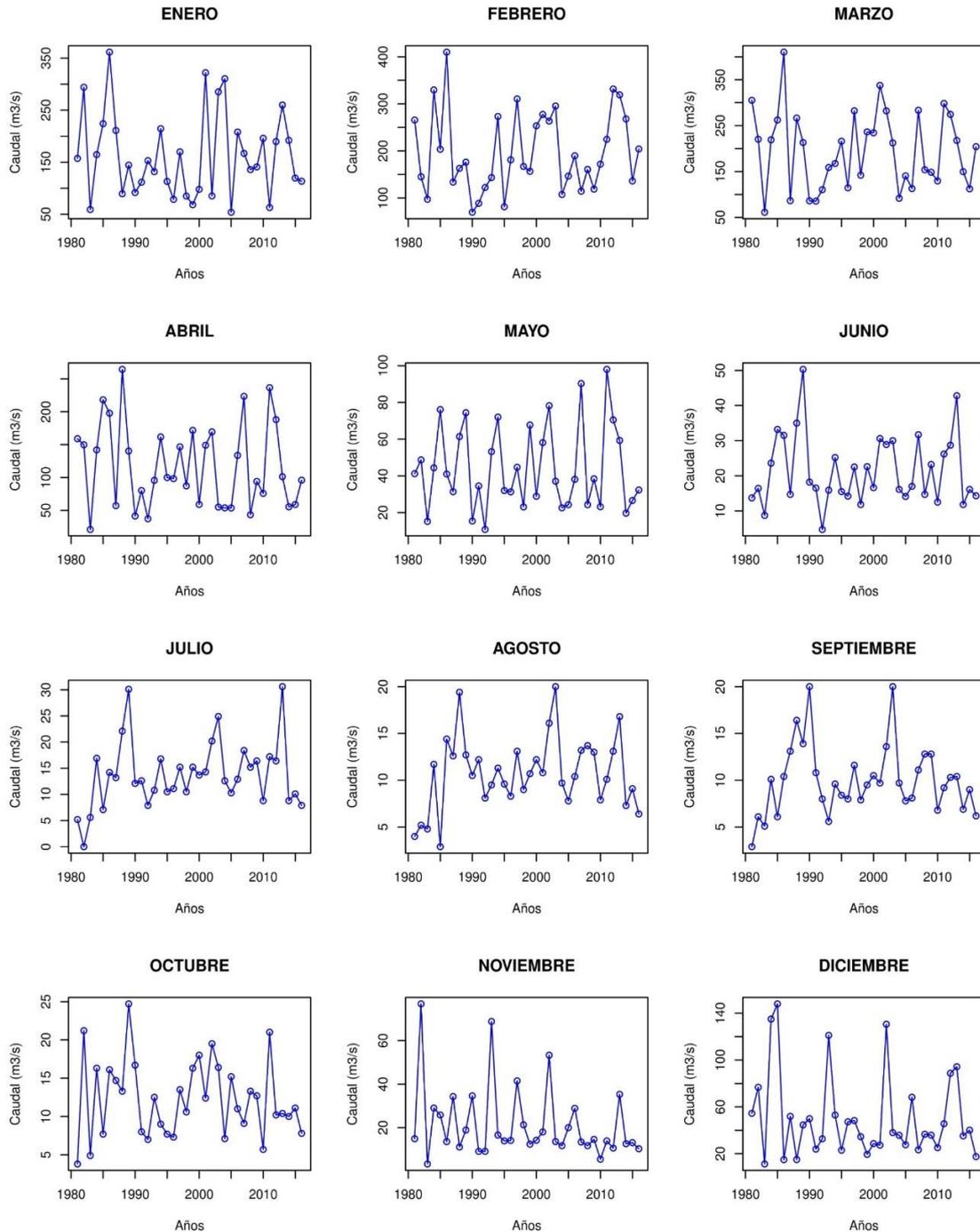


Figura 41. Hidrogramas de caudales medios históricos mensualizados (1981-2016)

a) Histogramas

La **Figura 42** muestra el histograma de los caudales medios mensuales de la estación hidrométrica puente Ramis. Se puede apreciar el régimen de estos registros (en el altiplano hay dos estaciones distintas), una estación húmeda de noviembre a marzo,

una estación seca de junio a agosto, así como los periodos de transición de septiembre - octubre y abril - mayo.

Además, se puede apreciar que los Caudales que más predominan son de 50 a 200 m³/s en los meses de enero a abril, así mismo se tiene caudales predominantes en el mes de mayo entre 20 a 40 m³/s, en junio y julio de 10 a 20 m³/s, en agosto y septiembre se tiene caudales de 6 a 14 m³/s, en octubre de 5 a 15 m³/s, en noviembre de 10 a 20 m³/s y en diciembre de 20 a 60 m³/s.

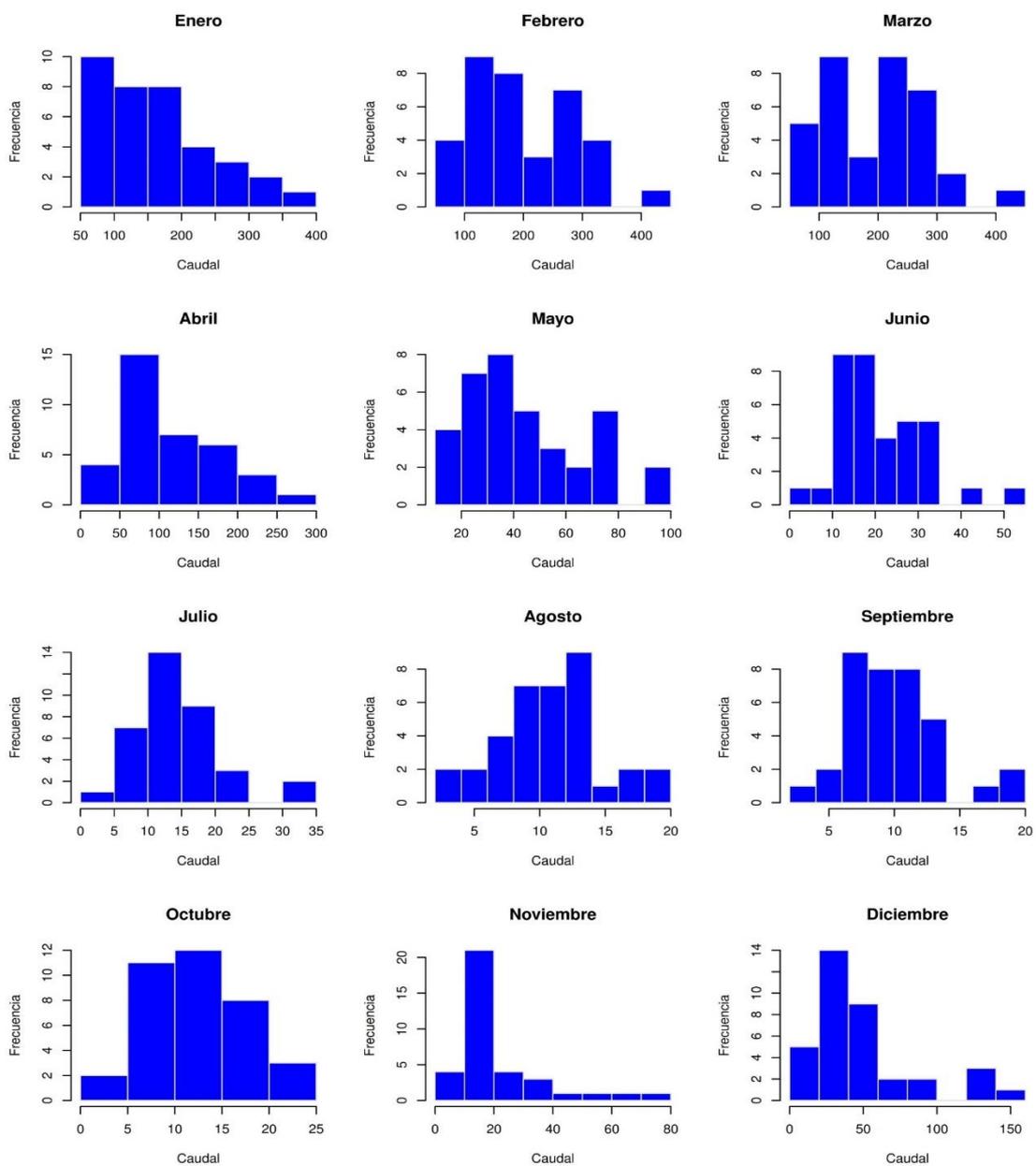


Figura 42. Histograma de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)

Seguidamente representamos gráficamente los histogramas de caudales y la función de Curva Normal (o de densidad), en combinación de ambos en una única figura. Así en la **Figura 43** podemos visualizar que los Datos de Caudal No están Normalmente Distribuidos. En los meses de noviembre a abril se puede observar que los valores de caudales se distribuyen de forma sesgada hacia la derecha, también podemos visualizar que en los meses de mayo a octubre hay más datos concentrados en el centro de la distribución y menos datos en las colas, es decir se tiene “colas delgadas” (Thin Tails).

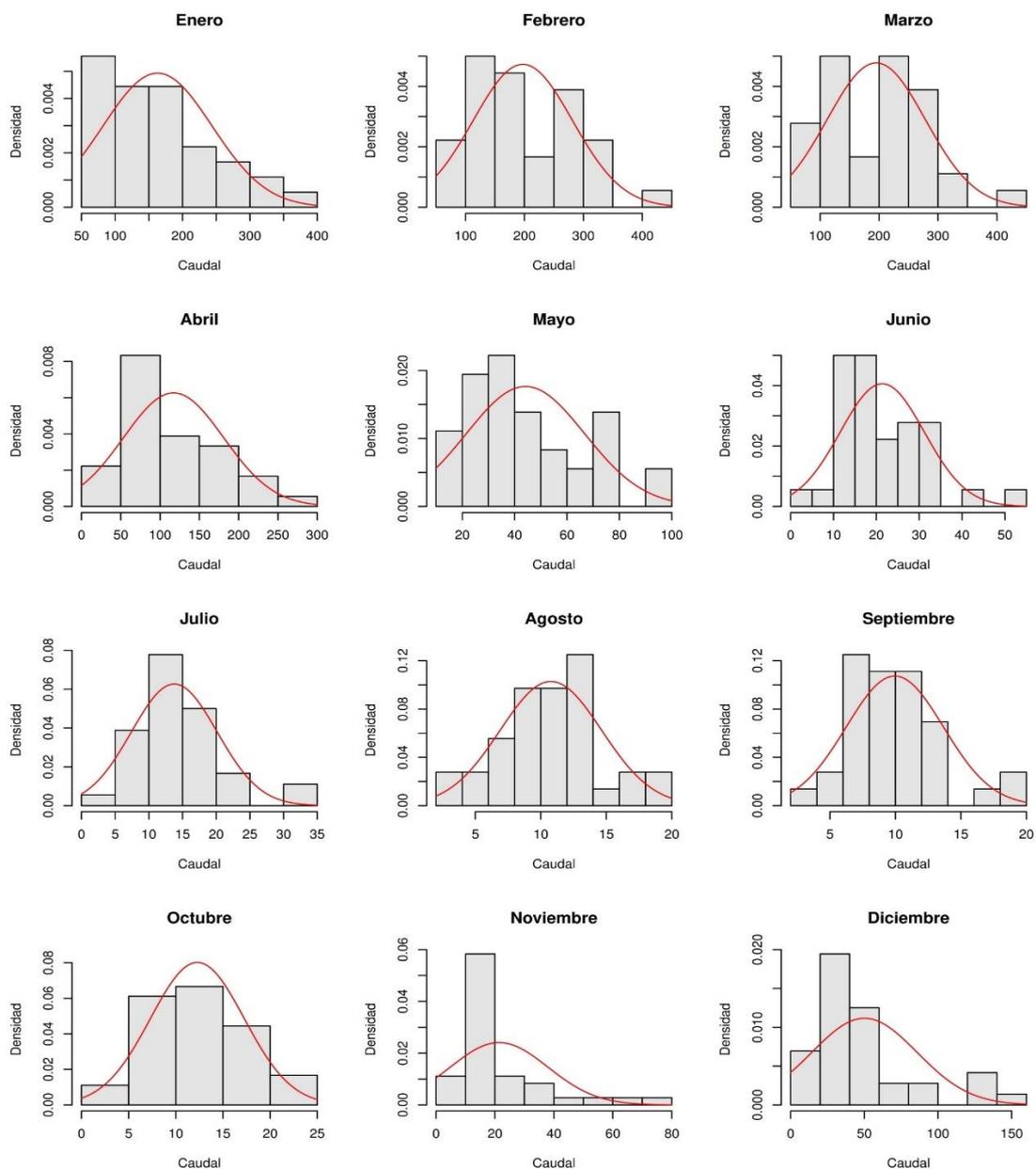


Figura 43. Histograma de caudales con curva normal.

b) Diagrama de caja y bigotes (boxplots)

La **Figura 44** muestra un diagrama de caja y bigotes de los caudales medios mensuales observados en la estación de aforo puente Ramis. A partir de estos registros, se puede observar una tendencia estacional, siendo de noviembre a marzo la estación húmeda, de junio a agosto la estación seca y de abril a mayo y de septiembre a octubre la estación de transición.

Las líneas azules gruesas y continuas de cada caja representa el valor mediano de los datos observados, las líneas discontinuas que se extienden hacia los dos extremos representan los valores máximos y mínimos, y los símbolos grises redondos representan los llamados valores atípicos.

El diagrama de cajas y bigotes también muestra que los valores observados durante la estación húmeda tienden a agruparse en una distribución de desviaciones positivas, mientras que los registros pertenecientes a la estación seca no siguen una distribución específica. La tabla adjunta a la misma figura proporciona información sobre los percentiles P 25 (25%), P 50 (Media-50%) y P 75 (75%) a nivel mensual; por ejemplo, para el mes de enero, los valores máximos y mínimos de los caudales totales mensuales fueron 361.5 y 53.9 m³/s respectivamente, y el 25% (P 25) y el 75% (P 75) de los datos están por debajo de 96.35 y 208.75 m³/s, y estos mismos valores son los umbrales donde se encuentra el 50% (Media - P 50) de los registros observados.

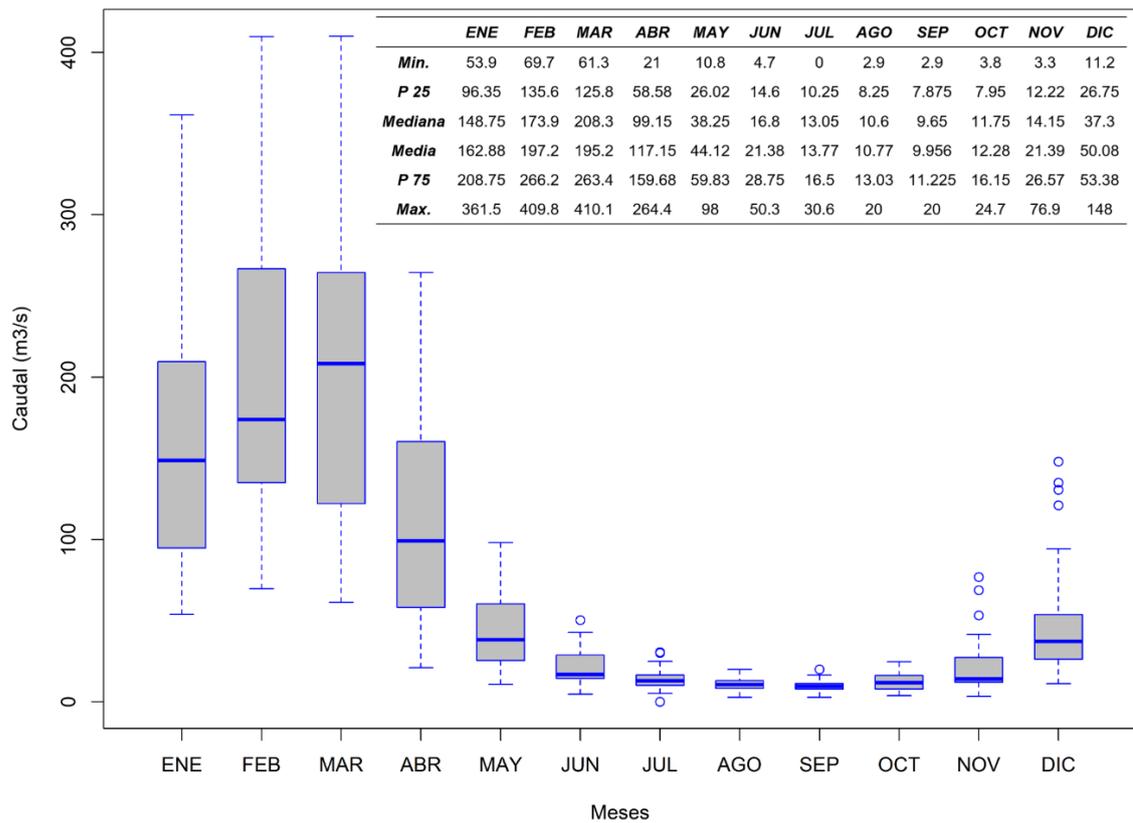


Figura 44. Boxplots de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)

c) Gráfico de probabilidades y diagramas cuantílicos (Q-Q plots)

Un diagrama de probabilidad normal o diagrama Q-Q normal es una herramienta gráfica para comprobar si un conjunto de datos puede considerarse derivado de una distribución normal. La **Figura 45** muestra un gráfico Q-Q de los puntos de observación del puente de Ramis, donde las cruces azules representan los datos observados normalizados y la línea roja sólida representa la línea recta teórica de una distribución normal.

Durante los meses de noviembre a abril, se puede observar que los valores de caudal se distribuyen de forma sesgada hacia la derecha, también podemos visualizar que en los meses de mayo a octubre hay más datos concentrados en el centro de la distribución y menos datos en las colas, es decir, hay "colas delgadas" (Thin Tails). En general, los

registros observados no se ajustan a la distribución normal teórica. Por lo que evaluaremos mediante Pruebas estadísticas No Paramétricas.

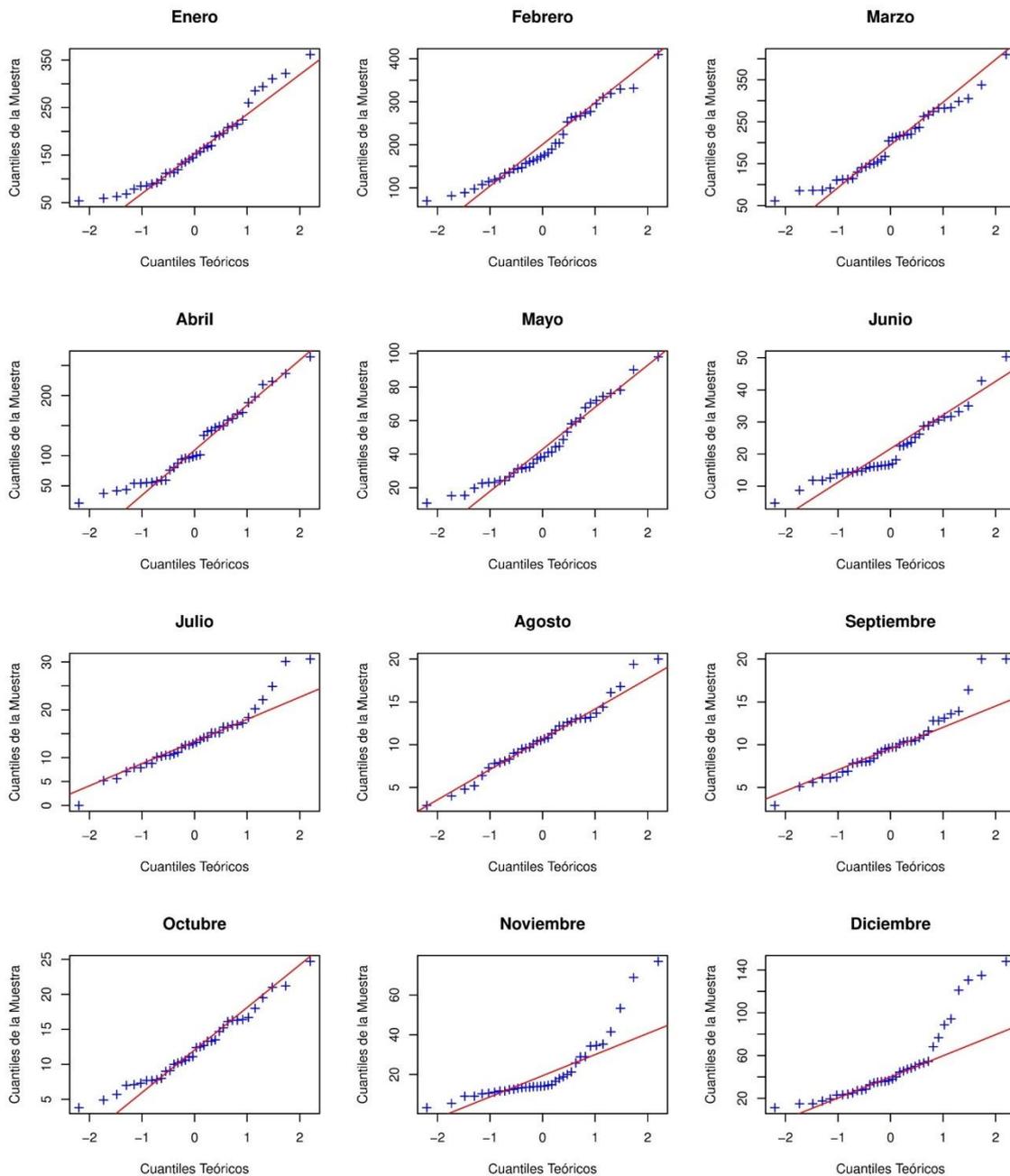


Figura 45. Q-Q plot de caudales. Estación puente Ramis (1981-2016)

d) Identificación de valores atípicos (outliers)

Los valores atípicos son observaciones que tienen características diferentes de otras observaciones. Los valores atípicos no pueden clasificarse como útiles o

problemáticos, sino que deben considerarse en el contexto del análisis y evaluarse por el tipo de información que pueden aportar. Su principal problema es que son elementos que pueden no ser representativos de la población y pueden distorsionar significativamente el comportamiento de las pruebas estadísticas. Por otro lado, también pueden indicar características válidas de la población, aunque difieran de la mayoría de la muestra, lo que puede indicar que la muestra no es representativa (Lobo et al., 2006).

Después de una revisión exhaustiva de la literatura y además considerando las referencias de Tukey (1977), Lobo et al., (2006) y Lavado Casimiro (2020) para la identificación de estos valores se ha seguido la siguiente metodología:

- Ordenar los datos en **una sola Columna**
- Determinar la medida estadística “**MEDIA**”
- Cálculo del Primer Cuartil “**Q1**” (**P 25%**)
- Cálculo del Tercer Cuartil “**Q3**” (**P 75%**)
- Cálculo Del Rango Intercuartil “**RIQ**”

$$\mathbf{RIQ = Q3 - Q1}$$

- Calcular el Paso: Paso = **2.0 * RIQ**
- Cálculo de las Cercas Internas (inferior y superior) y las Cercas Externas (inferior y superior).

$$\text{Cerca Interna inferior: } \mathbf{CIi = Q1 - Paso}$$

$$\text{Cerca Interna superior: } \mathbf{CI s = Q3 + Paso}$$

$$\text{Cerca Externa inferior: } \mathbf{CEi = Q1 - 2*Paso}$$

$$\text{Cerca Externa superior: } \mathbf{CEs = Q3 + 2*Paso}$$

Los valores situados entre la media y las cercas internas (inferior y superior) se consideran adyacentes, los valores situados entre las cercas internas y externas se consideran lejanos y los valores situados fuera de las cercas externas (inferior y superior) se consideran muy lejanos. Los valores situados fuera de las cercas externas se consideran generalmente como Valores Atípicos (Lobo et al., 2006). Así, en la **Figura 46** se presenta la distribución de los caudales de la estación puente Ramis (1981-2016) en relación con su media y sus cercas interna y externa. En dicho gráfico se muestra claramente que hay valores de caudales que superan la cerca interna superior (CIs) pero no a la cerca externa superior (CEs), por lo que sólo hay valores adyacentes a la Media (datos situados entre la media y la CIs) y alejados de la media (datos situados entre la CIs y la CEs), ningún valor está por encima de la CEs para ser considerado como valores atípicos. En resumen, no se tiene la presencia de valores atípicos en los registros observados, pero debido al AED estos registros no se ajustan a la distribución normal teórica, por lo que evaluaremos mediante pruebas estadísticas No Paramétricas.

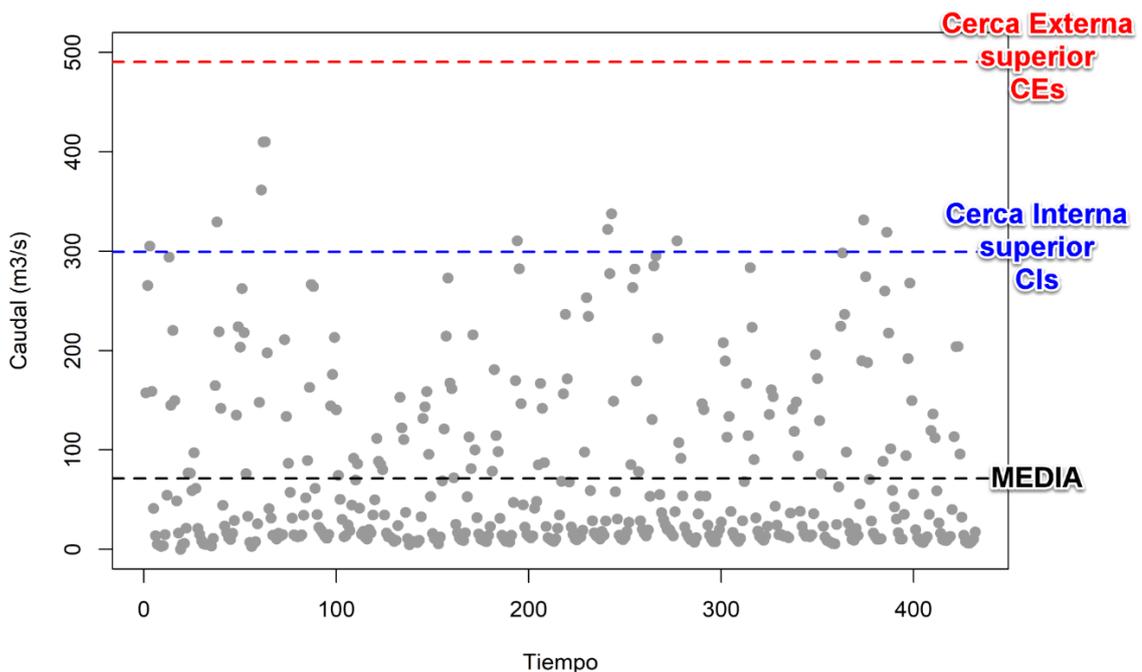


Figura 46. Distribución de los caudales (1981-2016) en relación con su media su cerca interna y cerca externa.

4.1.3 Análisis de independencia serial

Para analizar la independencia serial de los registros de caudal observados se utilizó la prueba estadística Turning Points (Turning Points por sus siglas en ingles). Según el **Tabla 10**, el estadístico Z-Calculado (Z-Estadístico) es Inferior al Z-Tabular a un nivel de significación del 5%, por lo que puede afirmarse que los datos no proceden de un proceso aleatorio.

Tabla 10. Prueba estadística de puntos cambiantes para la estación puente Ramis

Estación	$\alpha = 0.05$			
	Test Estadístico	Z-Estadístico	Z-Tabular	Significancia
puente Ramis	Turning Point	-19.973	1.96	NS

4.1.4 Análisis de estacionariedad

Se utilizó una prueba no paramétrica de Mann Kendall para determinar si las series temporales de caudal tenían una tendencia significativa con un nivel de confianza del 95%; según el AED, se eligió esta prueba estadística porque los registros observados no siguen una distribución normal. La **Tabla 11** presenta los resultados obtenidos según la prueba estadística de Mann Kendall. Los valores del estadístico Z Calculado (Z-Estadístico) son inferiores al Z-Tabular para un nivel de significación del 5%, por lo que podemos afirmar que los datos no muestran ninguna tendencia estadísticamente significativa.

Tabla 11. Prueba estadística de Mann Kendall para la estación puente Ramis

Estación	$\alpha = 0.05$			
	Test Estadístico	Z-Estadístico	Z-Tabular	Significancia
Puente Ramis	Mann-Kendall	-0.428	1.96	NS

4.1.5 Análisis de cambio en la media

Se utilizó la prueba estadística de suma acumulada (CUSUM por sus siglas en inglés) para detectar cambios en la media y así identificar los años de cambio o salto en la serie temporal de caudales, utilizando un nivel de significación del 5%. En la **Tabla 12** se presenta los resultados obtenidos según la prueba estadística de CUSUM, en lo que el estadístico Z (Z-Estadístico) es menor que el Z-Tabular, es decir, los datos no muestran un salto de paso estadísticamente significativo.

Tabla 12. Prueba estadística de CUSUM para la estación puente Ramis

Estación	$\alpha = 0.05$			
	Test Estadístico	Z-Estadístico	Z-Tabular	Significancia
Puente Ramis	CUSUM	11	28.267	NS

4.2 PRODUCTO PISCO

4.2.1 Precipitación del producto PISCO

Las precipitaciones que se obtuvieron corresponden al producto de precipitación PISCO, esta información se encuentra en el formato de archivo netCDF (formato de archivo destinado a almacenar datos científicos, estos representan una superposición de datos multidimensionales con extensión .nc) y su visualización de su registro puede expresarse en series de tiempo. La **Figura 47** muestra 10 conjuntos de archivos netCDF de un total de 13 149, cuyos valores corresponden a las precipitaciones en unidades de milímetros para Perú (territorio Peruano). Así mismo en la **Figura 48**, se presenta la serie de tiempo de Precipitación Promedio Areal para la Subcuenca 15 (En esta subcuenca se encuentra la estación de aforo). La distribución de la precipitación para esta subcuenca varía de 0 mm a 31.826 mm, donde el 50% de los datos están por debajo de 0.285 mm y

el 75% de los datos están por debajo de 2.514 mm. En Anexos se presenta la Precipitación Promedio Areal para cada Subcuenca del río Ramis.

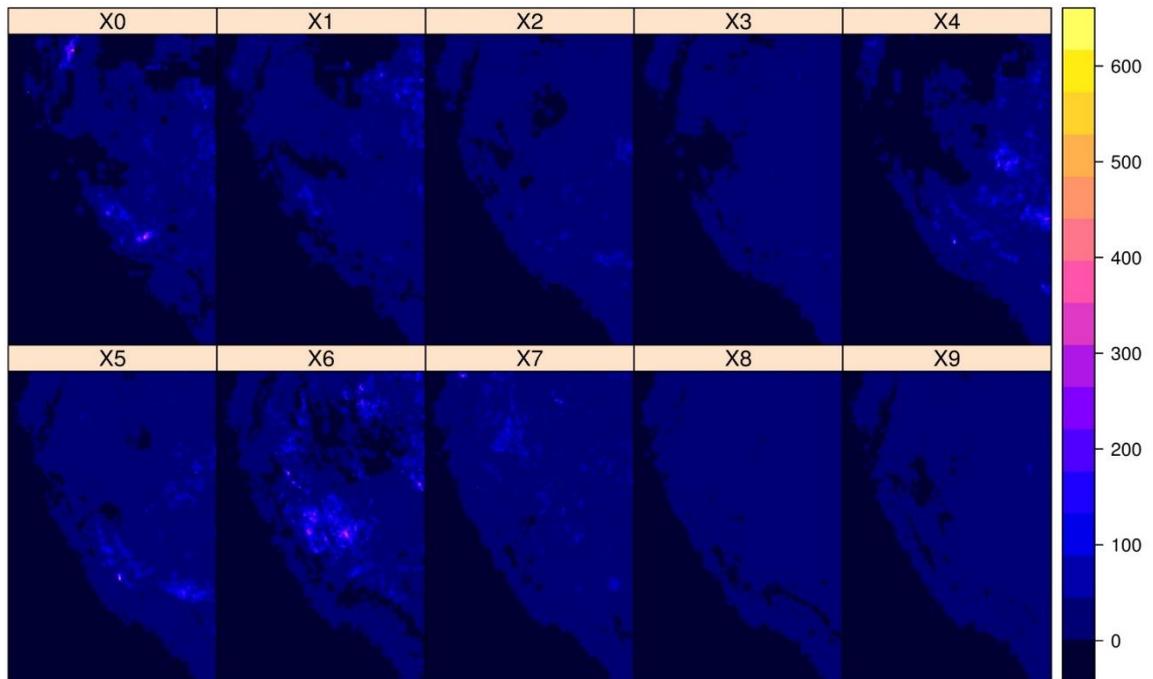


Figura 47. Mapas espaciales de precipitación del producto PISCO para Perú

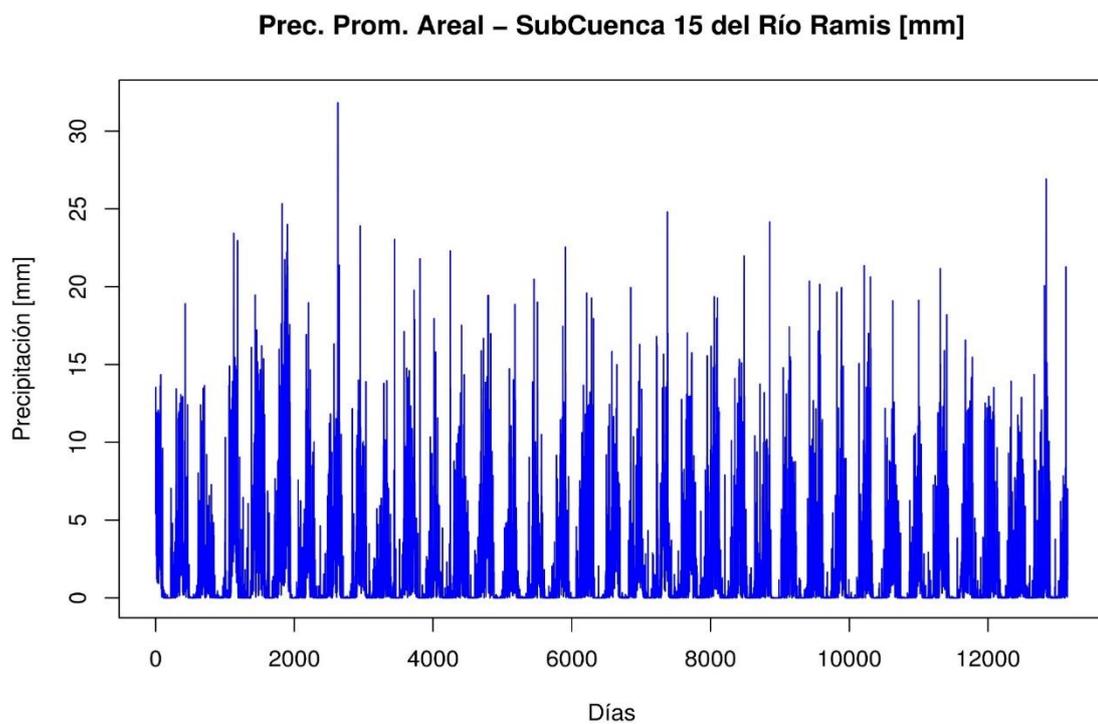


Figura 48. Precipitación promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (Periodo 1981-2016)

4.2.2 Temperatura mínima del producto PISCO

La temperatura mínima que se obtuvo a través del producto PISCO, corresponde a la versión V1.1, esta información se encuentra en el formato de archivo netCDF (formato de archivo destinado a almacenar datos científicos, estos representan una superposición de datos multidimensionales con **extensión .nc**) y también puede visualizarse su registro expresado en series de tiempo. Así, en la **Figura 49** se aprecian un conjunto de archivos netCDF cuyos valores corresponden a la temperatura mínima en unidades de milímetros para Perú (territorio Peruano), aquí se presenta 8 archivos netCDF de un total de 13 149. La **Figura 50** presenta la serie de tiempo de temperatura mínima promedio areal para la Subcuenca 15 del río Ramis, en ella se encuentra ubicada la estación de aforo puente Ramis. La distribución de la temperatura mínima para esta subcuenca varía de -12.234 a 8.245 °C, donde el 25% de los datos está por debajo -2.116 °C y el 75% de los datos están por debajo de 4.685 °C. En Anexos se presenta la temperatura mínima Promedio Areal para cada Subcuenca del río Ramis.

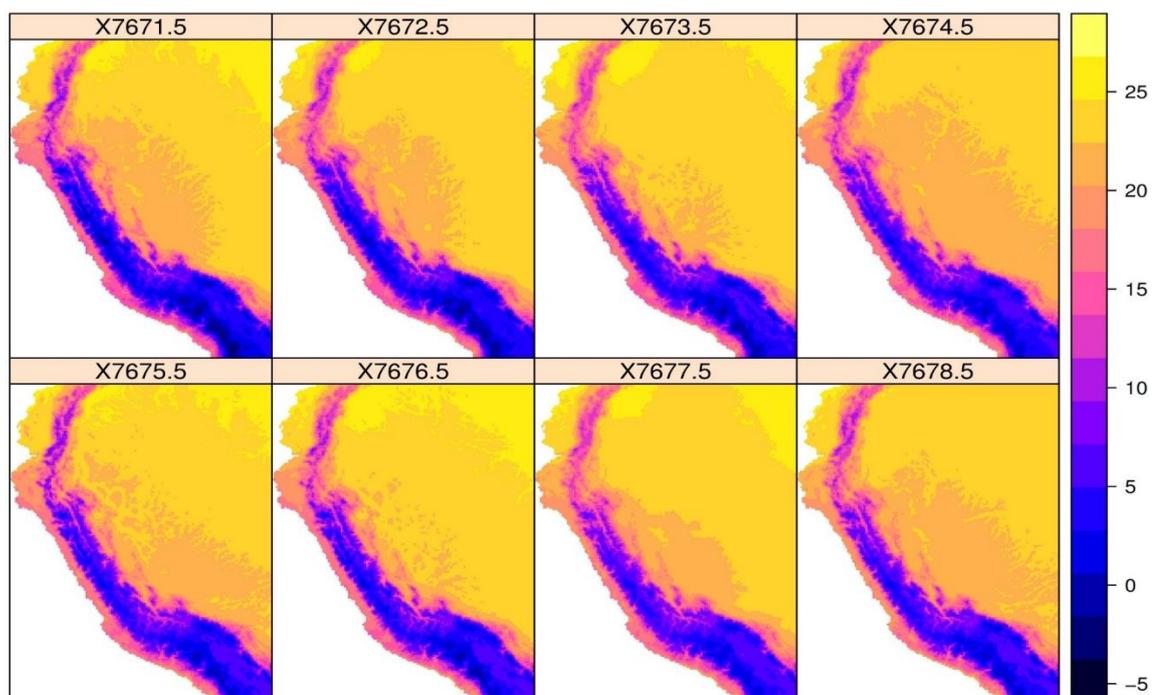


Figura 49. Mapas espaciales de temperatura mínima del producto PISCO para Perú

Temp. Mínima Prom. Areal – Subcuenca 15 del Río Ramis [mm]

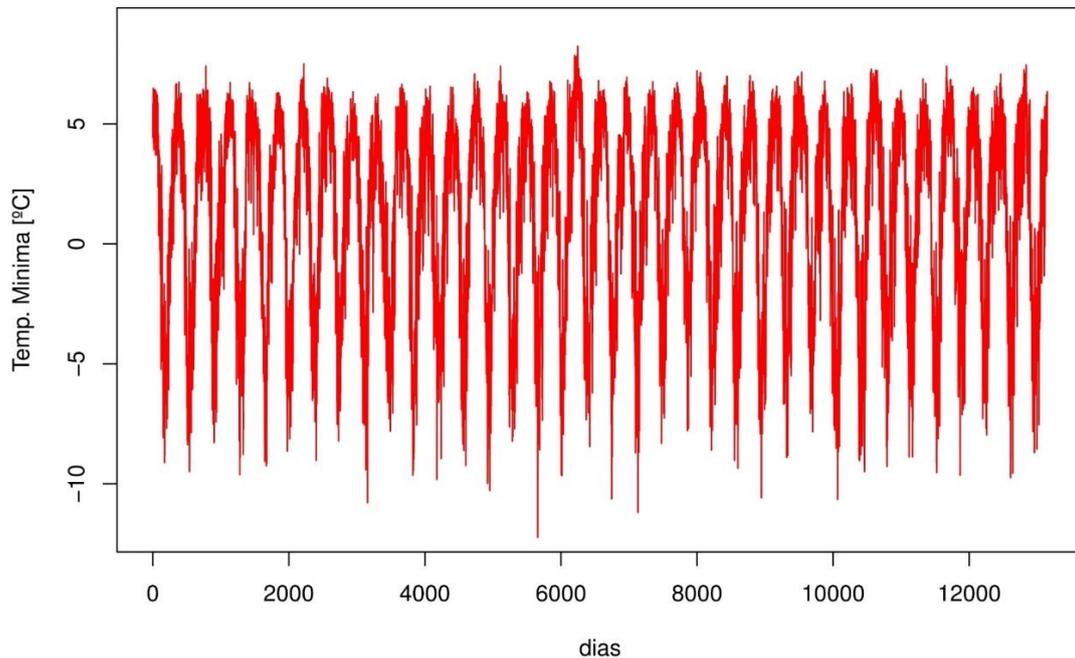


Figura 50. Temperatura mínima promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (periodo 1981-2016)

4.2.3 Temperatura máxima del producto PISCO

La temperatura máxima obtenida a través del producto PISCO corresponde a la versión V1.1, esta información se encuentra en el formato de archivo netCDF (formato de archivo diseñado para almacenar datos científicos, estos representan una superposición de datos multidimensionales con **extensión .nc**) y además es posible visualizar su registro expresado en series de tiempo. Así, la **Figura 51** muestra un conjunto de archivos netCDF cuyos valores corresponden a la temperatura máxima en unidades de milímetros para Perú (Territorio Peruano), aquí hay 8 archivos netCDF de un total de 13 149. En la **Figura 52** se muestra la serie temporal de **temperatura máxima Areal Promedio** para la **subcuenca 15 del río Ramis** (subcuenca en el que se ubica la estación de aforo puente Ramis). La distribución de la temperatura máxima para esta subcuenca oscila entre 8.616 °C y 21.478 °C, donde el 25% de los datos está por debajo de 15.062 °C y el 75% de los datos está por

debajo de 17.124 °C. En Anexos se presenta la temperatura máxima media areal para cada subcuenca del río Ramis.

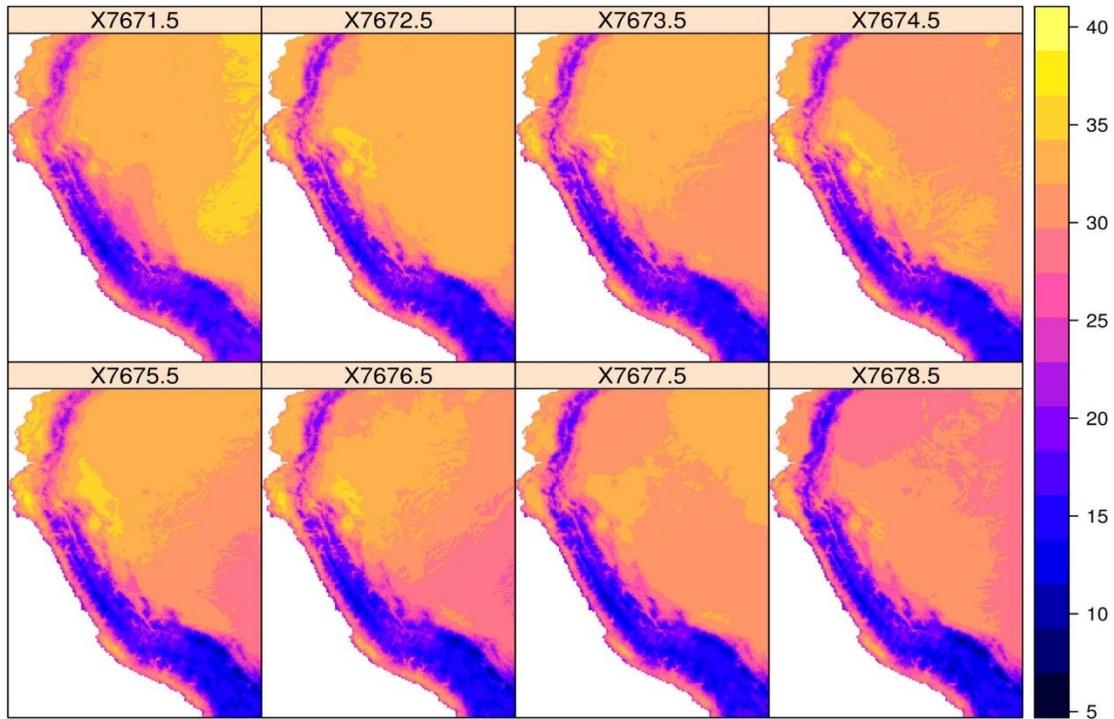


Figura 51. Mapas espaciales de temperatura máxima del producto PISCO para Perú

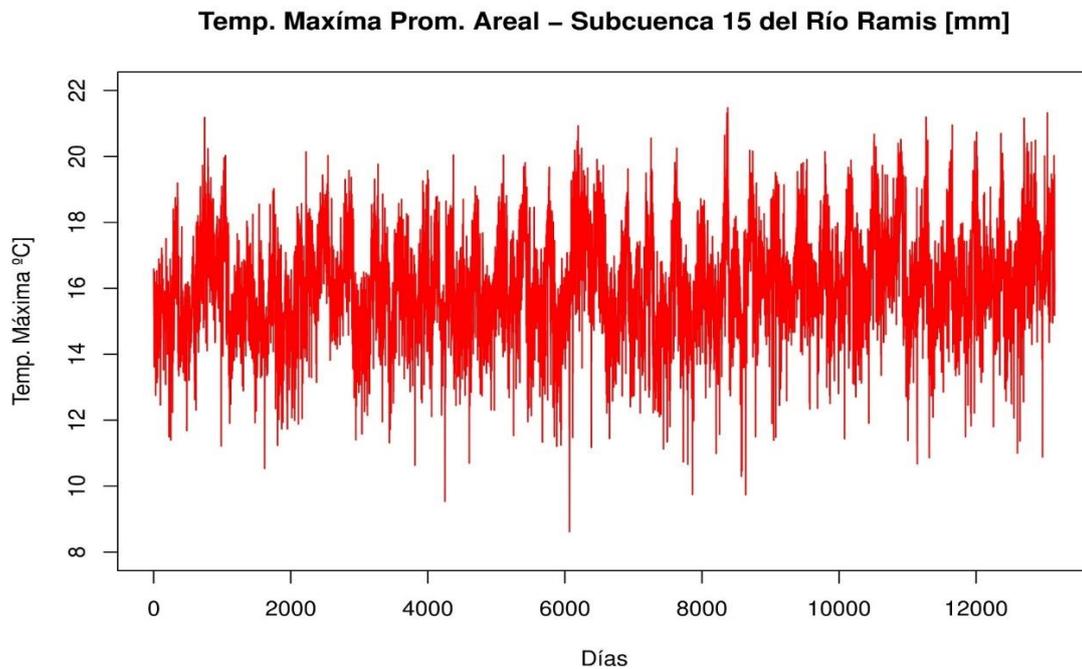


Figura 52. Temperatura máxima promedio areal del producto PISCO para la subcuenca 15 del río Ramis (periodo 1981-2016)



4.3 IMPLEMENTACIÓN DEL MODELO SWAT

El modelo se implementó en SWAT 2012 utilizando la interfaz QSWAT. Por lo tanto, esta sección describe el funcionamiento del modelo hidrológico SWAT en la cuenca del río Ramis. También se describen los procedimientos y supuestos utilizados para las simulaciones y la posterior calibración y validación con SWAT-CUP.

4.3.1 Discretización espacial en el modelo SWAT

La discretización espacial es la primera etapa de la ejecución del modelo SWAT, tomando en cuenta la información sistematizada descrita en el **CAPÍTULO III**. Con la información puesta en SWAT se obtiene los siguientes resultados:

a) Delimitación de la cuenca y subcuencas

Consiste en extraer del MDE los límites de la cuenca del río Ramis y su red hidrográfica según la estación de aforo del puente de Ramis. En SWAT, el procedimiento de delimitación está automatizado.

Lo primero que hay que hacer es indicar la ubicación del MDE que se va a utilizar para la delimitación. A continuación, el cálculo de la delimitación en QSWAT se realiza como sigue:

- Introducir el MDE
- Definición del umbral de área para un número de celdas (define threshold)
- Creación de las corrientes (Create streams)
- Relleno de los puntos bajos “sumideros” (fill-proceso interno)
- Determinación de las direcciones y acumulaciones de flujo (Flow direction and accumulation-proceso interno)
- Creación de las corrientes y puntos de salida (Stream network-proceso interno)

- Definición del punto de aforo (outlets)
- Reconocimiento del punto de salida (Review snapped)
- Creación de las cuencas hidrográficas (Create watershed)

Con el proceso seguido, se dio lugar a la creación de 15 subcuencas (ver **Figura 54**) con un área total de la cuenca de 15408,027 km².

En cada intersección de la red de drenaje, el modelo colocó una salida (color magenta, ver **Figura 53**) y, por lo tanto, creó una subcuenca, siendo la subcuenca 15 en la que se encuentra ubicada la estación de aforo (nótese que la red lleva consigo el mismo código de número de la cuenca).

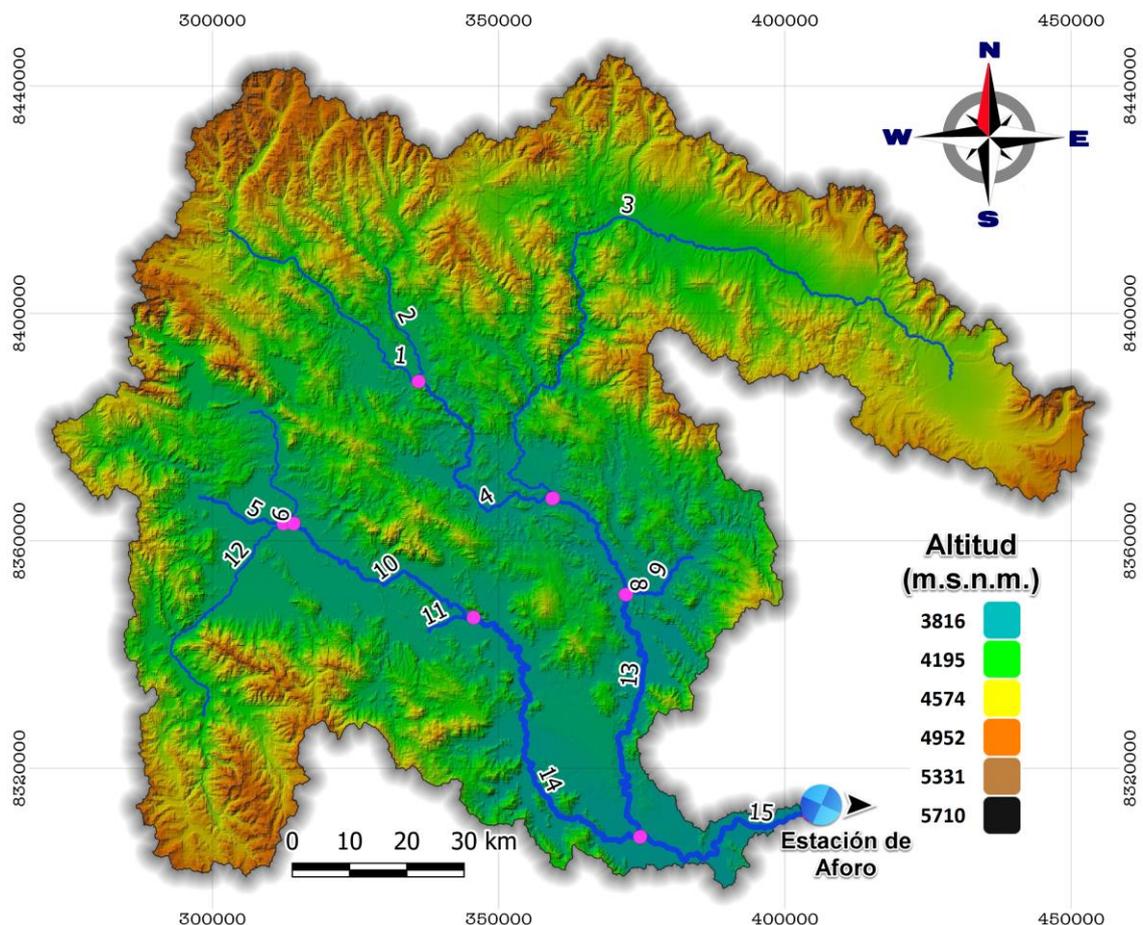


Figura 53. Red de drenaje y puntos de salida (stream-outlet)

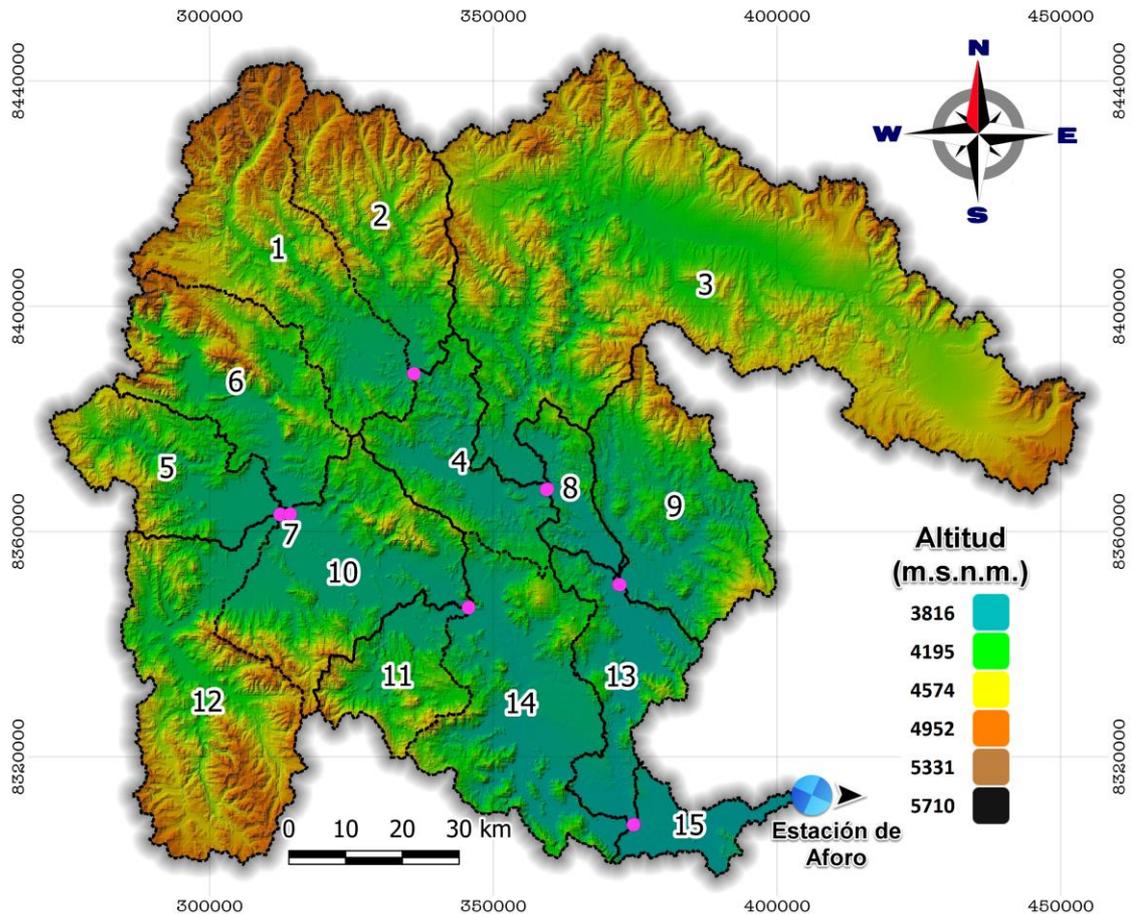


Figura 54. Cuencas hidrográficas delimitadas (watershed)

b) Integración de los datos de suelo, uso del suelo y clase de pendiente

Una vez determinada la red hidrográfica y extraídos los límites de la cuenca, con SWAT integramos los datos de suelo, uso del suelo y clase de pendiente. En cuanto a la información utilizada, es la descrita en el **CAPÍTULO III**, teniendo cuidado de presentar la información siempre en el mismo sistema de coordenadas (Projected Coordinate Systems UTM WGS 1984 UTM Zone 19S) y tomando en cuenta los límites de la cuenca previamente establecidos.

Así, en la **Figura 55** se muestra la distribución espacial de los parámetros de usos de suelo discretizados en la cuenca del río Ramis, tomando en cuenta el producto GlobeLand30, que para su digitalización fue necesario establecer la correspondencia

entre los usos de suelo del mapa y su tabla de adecuación de cobertura de suelos para SWAT previamente rellena. La información del mapa de suelo corresponde al.

La caracterización del uso del suelo basada en el producto GlobeLand30 para la cuenca del río Ramis comprende Pastizales (66.47%), Tierras cultivadas (14.74%) Bosque (7.69%), Arbustos (7.32%), Lecho Rocoso (1.51%), Humedal (0.98%), Cuerpos de agua (0.78 %) y Superficies artificiales (0.51%).

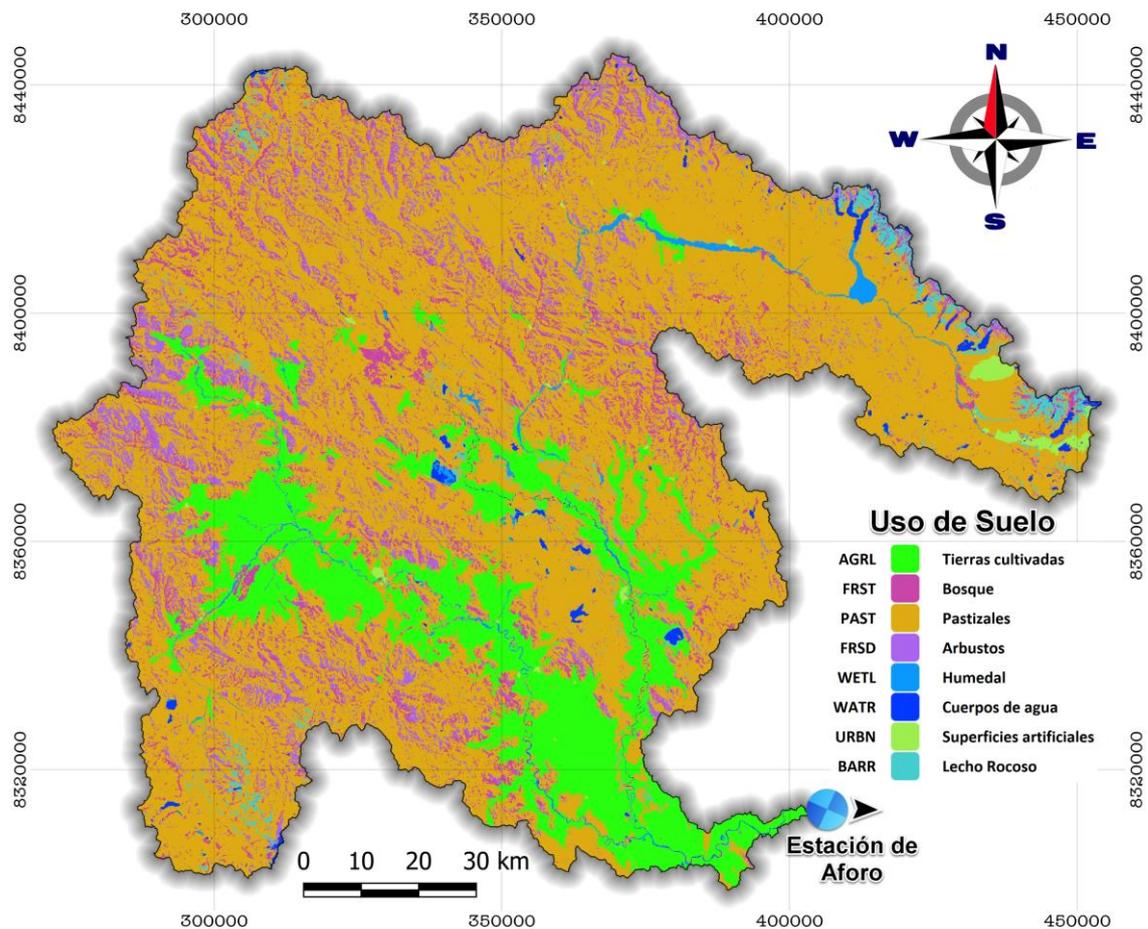


Figura 55. Mapa de usos de suelo en la cuenca del río Ramis

En cuanto a la distribución espacial de los parámetros de Suelos (tipos de suelo) discretizados en la cuenca del río Ramis (la información corresponde a símbolos de la FAO en el mapa mundial de suelos), funciona de la misma manera que el mapa de Uso de Suelos. La ubicación de la capa del mapa de suelos digitalizada (**Figura 56**) se indicó mediante la asignación de su tabla de adecuación de tipos de suelos para SWAT. Los

resultados mostraron que el tipo de suelo más común son los Litosoles (65.17%) y seguido por Andosoles húmicos (30.38%).

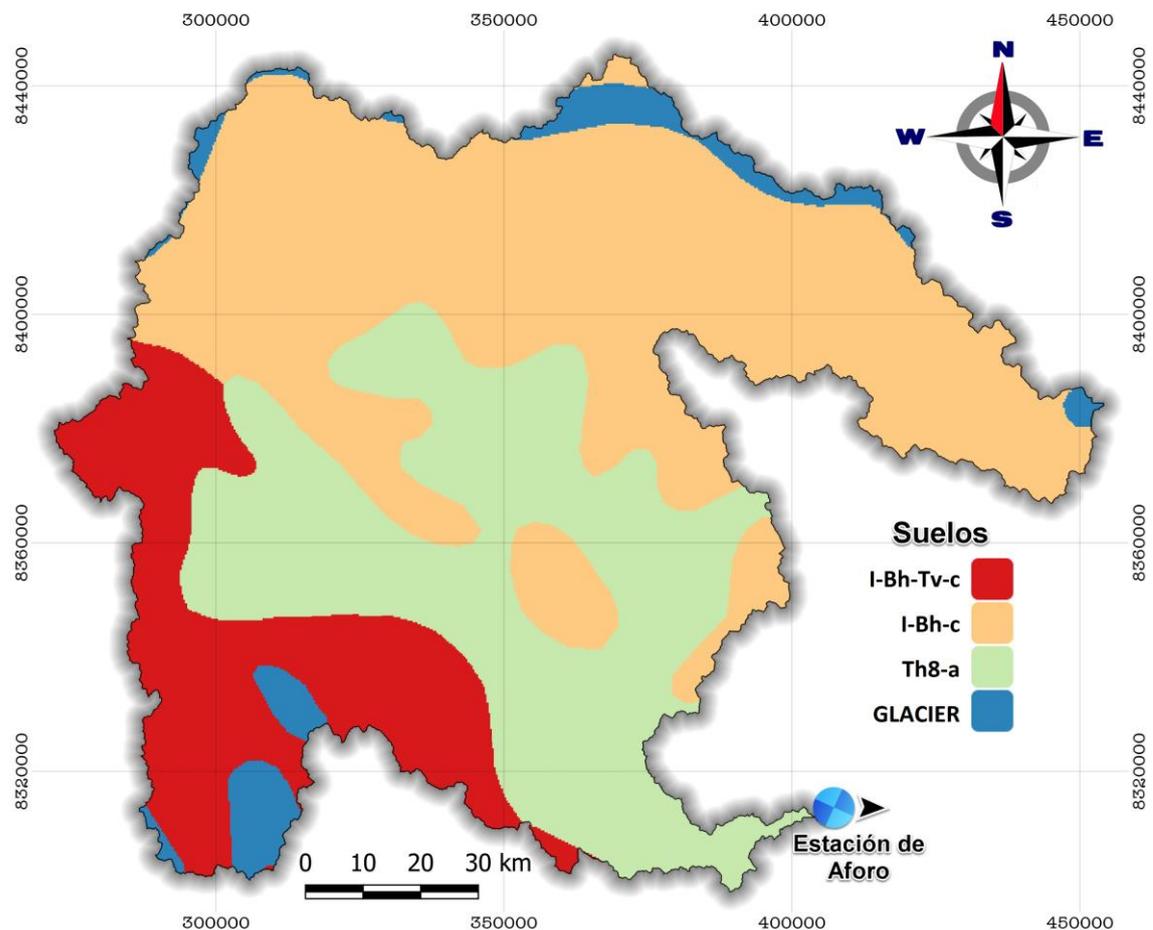


Figura 56. Mapa de suelos en la cuenca del río Ramis

En cuanto a las clases de pendientes, se obtuvo del MDE (la información corresponde al producto SRTM v4.1) para que SWAT nos permita clasificar las pendientes de acuerdo con el objetivo del estudio o criterios propios del investigador. Para ello, se decidió agrupar las pendientes en 5 clases (0 - 10%, 10 - 20%, 20 - 30%, 30 - 40% y > 40%) los cuales se presentan en la **Figura 57**. La clasificación de las pendientes muestra que el 7.45% de la cuenca tiene pendientes muy pronunciadas (>40%), mientras que las zonas restantes se distribuyen en el rango 0-10% (35.33%), 10-20% (25.68%), 20-30% (20.72%) y 30-40% (10.82%).

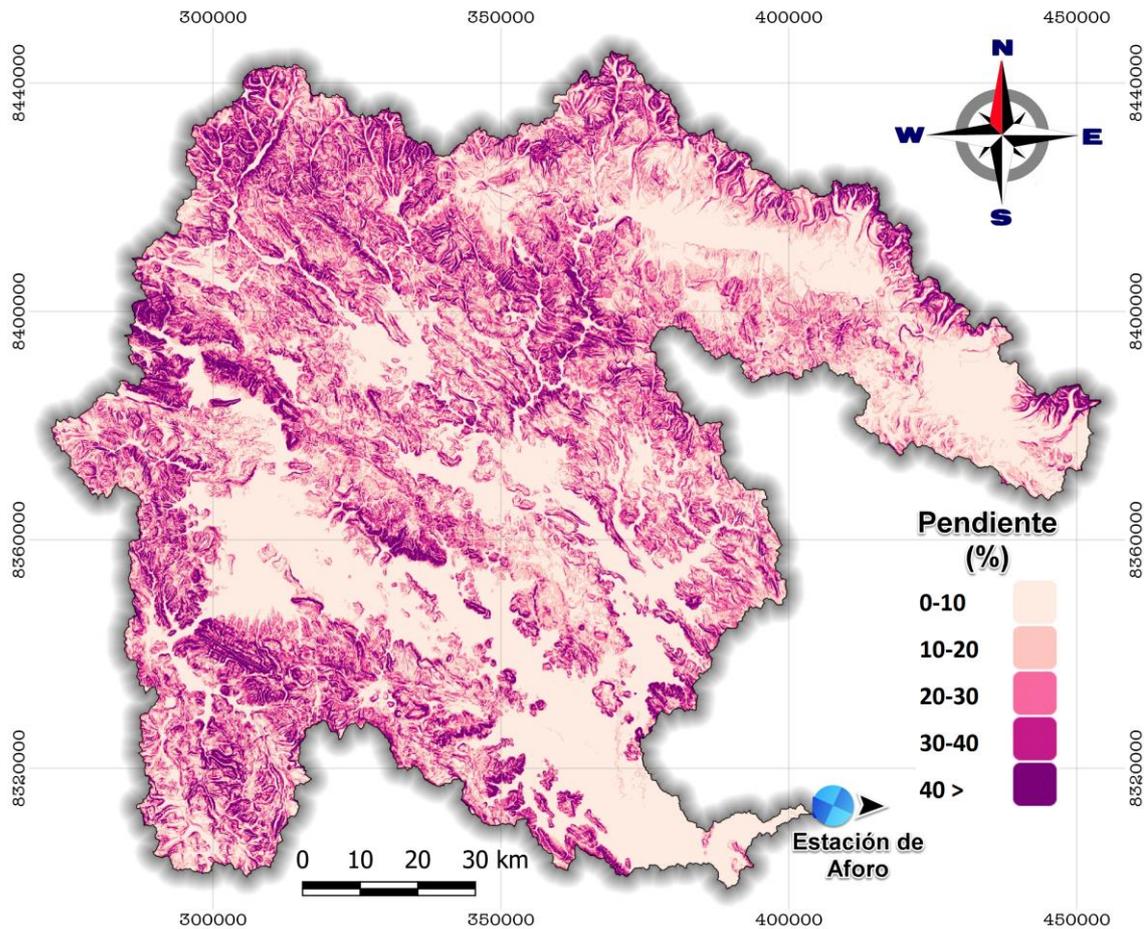


Figura 57. Mapa de pendientes en la cuenca del río Ramis

En la **Tabla 13** se presenta el resumen de la distribución con las características respecto al uso de suelo, suelos (tipo de suelo) y pendiente en la cuenca del río Ramis.

Tabla 13. Distribución con las características respecto al uso de suelo, suelos, y pendiente en la cuenca del río Ramis.

Código	Descripción	Área [km ²]	Área que ocupa respecto a la cuenca [%]
USO DE SUELO			
AGRL	Tierras cultivadas	2153.92	14.74
FRST	Bosque	1123.27	7.69
PAST	Pastizales	9712.99	66.47
FRSD	Arbustos	1069.81	7.32

Código	Descripción	Área [km ²]	Área que ocupa respecto a la cuenca [%]
WETL	Humedal	142.96	0.98
WATR	Cuerpos de agua	113.81	0.78
URBN	Superficies artificiales	74.29	0.51
BARR	Lecho rocoso	220.82	1.51
SUELOS			
GLACIER	Glaciar	649.39	4.44
I-Bh-c	Litsoles, Cambisoles húmicos	7063.97	48.34
I-Bh-Tv-c	Litsoles, Cambisoles húmicos, Andosoles vítricos	2459.00	16.83
Th8-a	Andosoles húmicos	4439.49	30.38
PENDIENTE			
0-10		5162.78	35.33
20-30		3752.96	25.68
20-30		3027.26	20.72
30-40		1580.87	10.82
40-9999		1087.99	7.45

4.3.2 Definición de la unidad de respuesta hidrológica

SWAT espacializa los tipos de respuestas para modelizar mejor los diversos procesos, teniendo en cuenta la falta de uniformidad del entorno. El modelo calcula valores cuantitativos para diferentes procesos en cada unidad espacial. La unidad básica de cálculo es la Unidad de Respuesta Hidrológica (HRU, por sus siglas en Ingles). Esta discretización en subunidades corresponde a la combinación, para una subcuenca, de un tipo de uso del suelo, un tipo de suelo y una clase de pendiente de cuyos parámetros influyen en los procesos hidrológicos (escorrentía, infiltración, evapotranspiración...). Por lo tanto, una HRU tiene su propio comportamiento hidrológico homogéneo. El caudal de agua se calcula en base a esta unidad y se suma para dar un valor global a la salida de la cuenca. El control de la distribución de las HRU de SWAT permitió obtener 361 HRUs para la cuenca del río Ramis (**Figura 58**).

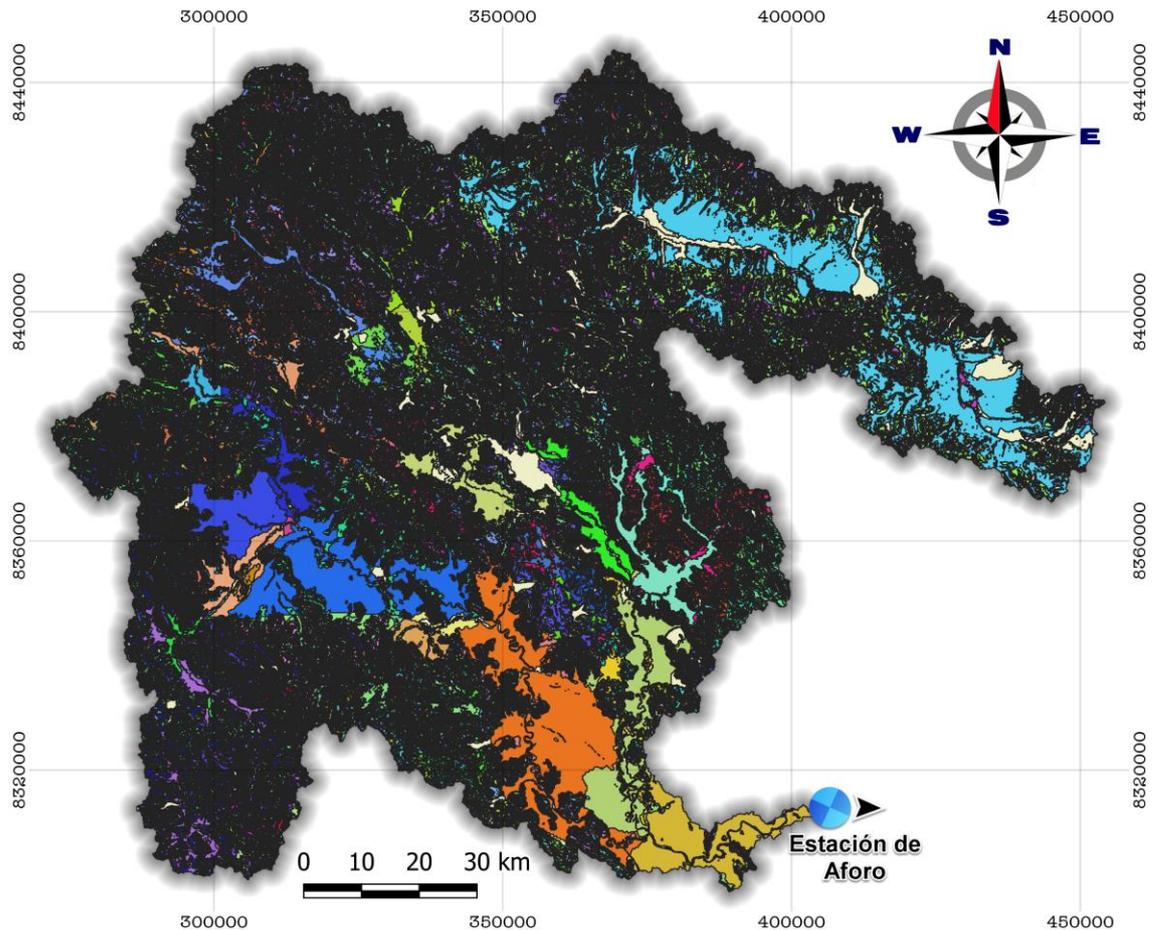


Figura 58. HRUs generadas en la cuenca del río Ramis

4.3.3 Definición de la información meteorológica

SWAT permite la integración de varias estaciones meteorológicas en la modelización. En el caso de que falten algunos parámetros o aparezca un periodo de vacío de datos, SWAT permite realizar una simulación de estos parámetros a partir de los datos mensuales de referencia de la estación.

Los principales datos empleados en la presente Investigación tuvieron en cuenta los datos del producto PISCO.

También es posible introducir los valores medios diarios de la humedad relativa, radiación y la velocidad del viento, pero no se han utilizado debido principalmente a la

utilización del método de la Evapotranspiración Potencial (ETP) de Hargreaves y por la falta de datos.

4.4 SIMULACIÓN INICIAL DEL MODELO

A partir de los ajustes y la parametrización por defecto del modelo SWAT (a excepción de la selección del método para la determinación de la ETP por Hargreaves), se integraron los datos en el modelo y se iniciaron las simulaciones. Las simulaciones se realizaron a partir de un periodo de calentamiento de 3 años (1981-1983), a continuación, teniendo en cuenta que las mediciones de caudal en la cuenca eran diarias, las simulaciones se eligieron también en el paso temporal diario para el periodo de 1981 a 2016. La salida de los resultados generados para caudal por el modelo hidrológico SWAT se encuentra en el archivo **watout.dat**.

La comparación de los resultados de la simulación inicial con la estación hidrométrica de puente Ramis muestra resultados insatisfactorios con $NSE=0.47$ a paso diario (**Figura 59**) y $NSE=0.66$ a paso mensual, lo que indica la necesidad de ajustar los parámetros. Además, los estadísticos $PBIAS=-24.7\%$ (a paso diario) y $PBIAS=-23.1\%$ (a paso mensual) indican que el modelo sobrestima los caudales observados.

También puede apreciarse que el estadístico de coeficiente de determinación $R^2 = 0.53$ (diario) y 0.7 (mensual) indica que no se tiene un buen ajuste, es decir; el 53% (diario) y 70% (mensual) de la variabilidad de los datos queda explicado con una asociación moderada, el cual es un indicio de que el modelo puede ser calibrado y posteriormente validado.

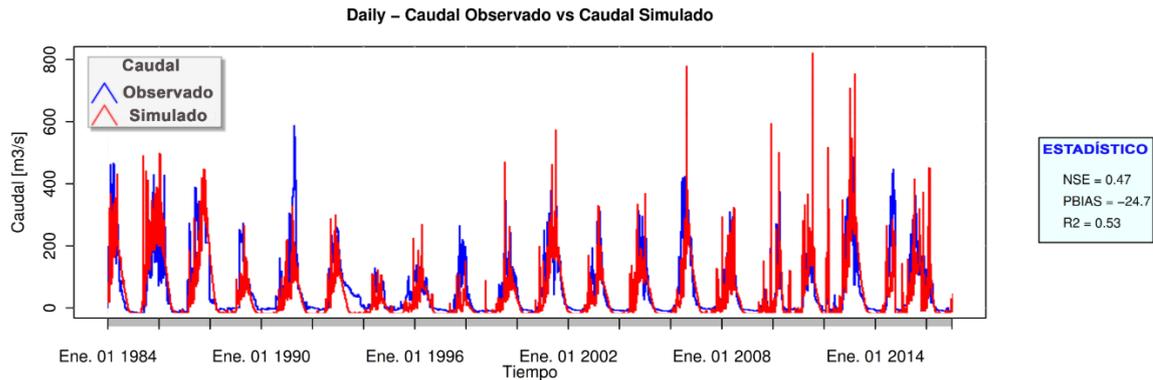


Figura 59. Hidrograma de la simulación inicial del modelo SWAT

4.5 ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD GLOBAL

Se elaboró el análisis de sensibilidad global considerando los parámetros de la **Tabla 8**, la justificación de su selección se da en el ítem **3.3.9**, pero cabe destacar que se seleccionaron los parámetros más utilizados para el análisis del escurrimiento superficial. Para ello, se utilizó SWAT-CUP (una interfaz desarrollada para SWAT, ver ítem **3.2.12**) y su algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting 2” (SUFI-2) para obtener los parámetros más sensibles realizando dos iteraciones, la primera de 30 simulaciones y la segunda de 100 simulaciones y una tercera de 500 simulaciones.

En SWAT-CUP, las estadísticas de sensibilidad de los parámetros se obtienen mediante un análisis de regresión múltiple. **t-Stat** es el coeficiente de un parámetro dividido por su error estándar. Es una medida de la precisión de los coeficientes de regresión. Si el coeficiente es "mayor" que el error estándar, es más probable que sea diferente de cero y que el parámetro sea sensible. Comparando el estadístico t del parámetro con los valores de la tabla de la distribución t de Student (la distribución t de Student describe cómo se espera que se comporte la media de una muestra con un número determinado de observaciones), se puede determinar el **valor p-value** (el número real que hay que mirar).



El valor p-value de cada término pone a prueba la hipótesis nula de que su coeficiente es cero (sin efecto); un valor p-value bajo (< 0.05) indica que se puede rechazar la hipótesis nula. En otras palabras, es más probable que una variable de predicción con un valor p-value bajo se añada significativamente al modelo, ya que los cambios en el valor de la variable de predicción están relacionados con los cambios en la variable de respuesta. Por el contrario, un valor p-value alto sugiere que los cambios en el predictor no están asociados a los cambios en la respuesta. Por lo tanto, este parámetro no es muy sensible. El valor p-value < 0.05 es un punto generalmente aceptado para rechazar la hipótesis nula (es decir, que el coeficiente de ese parámetro es diferente de 0). Si el valor p-value es 0.05, sólo hay un 5% de posibilidades de que los resultados que se observan se hayan producido en una distribución aleatoria, por lo que se puede decir que hay un 95% de probabilidad de que la variable tenga algún efecto (Abbaspour, 2015).

La **Figura 60** muestra el análisis de sensibilidad para el conjunto de los parámetros, siendo los más sensibles, el umbral profundidad del agua en el acuífero superficial requerida para el flujo de retorno (GW_QMN), número de curva (CN2), longitud de la pendiente para el flujo lateral del subsuelo SLSOIL, factor de compensación de la evaporación del suelo (ESCO), el coeficiente de "revaporación" de las aguas subterráneas (GW_REVAP) y el tiempo de retraso de las aguas subterráneas (GW_DELAY).

El análisis en SWAT-CUP mostró un coeficiente de determinación de $R^2=0.74$ con la puesta de los 20 parámetros, lo que indica que son altamente relevantes, por lo que se decidió considerar estos 20 parámetros en la fase de calibración y validación para la presente investigación.

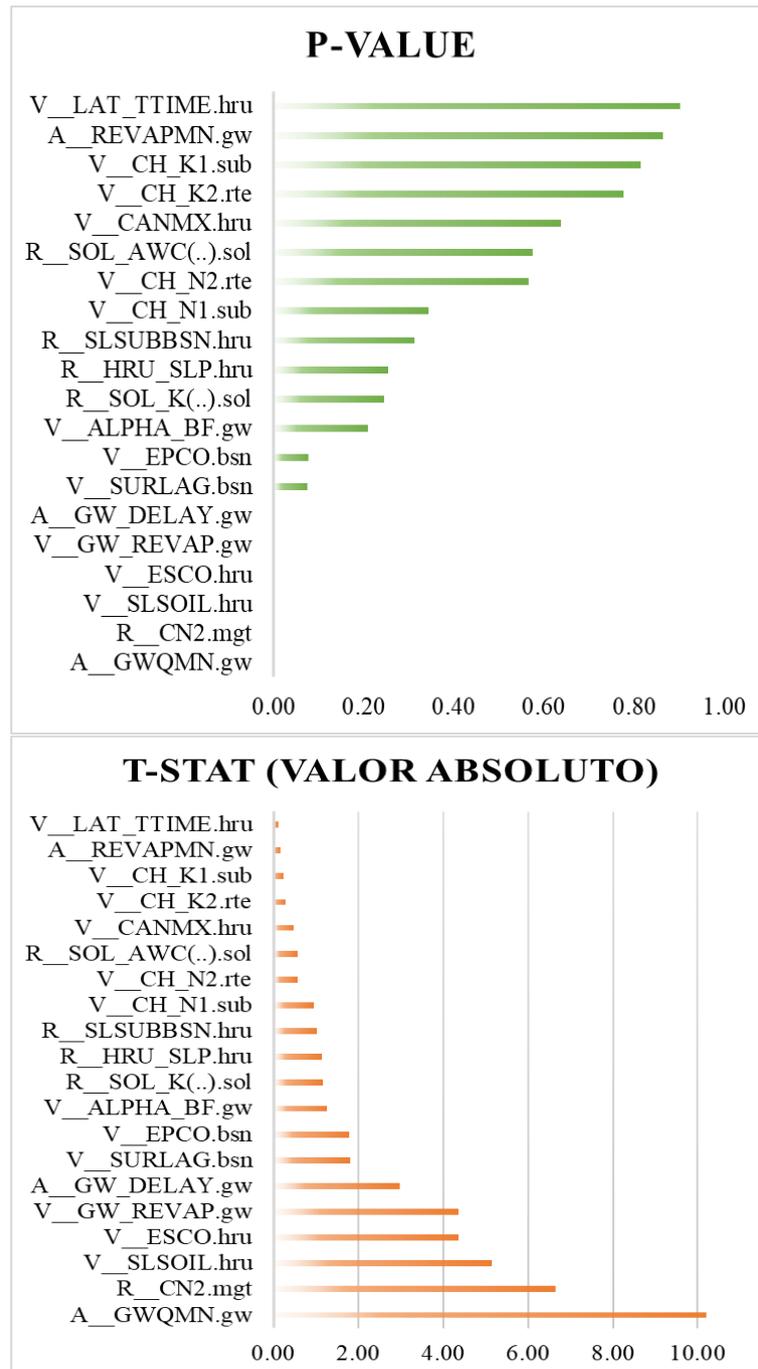


Figura 60. Análisis de sensibilidad global de los parámetros

La **Tabla 14** muestra los parámetros más sensibles por orden de prioridad, lo que permite, por ejemplo, distinguir algunos parámetros relacionados con las aguas subterráneas (GWQMN, GW-REVAP, GW_DELAY), la escorrentía superficial (CN2, SURLAG) y la evapotranspiración (ESCO), confirmando así que los caudales dependen de diferentes procesos hidrológicos.

Tabla 14. Parámetros sensibles en orden de prioridad

Orden de prioridad	Parámetro	t-Stat (Valor absoluto)	p-value
1	A__GWQMN.gw	10.2134320	0.000000000000000004
2	R__CN2.mgt	6.6563717	0.0000000033661161
3	V__SLSOIL.hru	5.1570116	0.0000018149480117
4	V__ESCO.hru	4.3668810	0.0000378482910367
5	V__GW_REVAP.gw	4.3632767	0.0000383539622735
6	A__GW_DELAY.gw	2.9802431	0.0038263052745206
7	V__SURLAG.bsn	1.8080675	0.0744017472808150
8	V__EPCO.bsn	1.7921006	0.0769455880061007
9	V__ALPHA_BF.gw	1.2623160	0.2105488690042910
10	R__SOL_K(..).sol	1.1725419	0.2445032027934420
11	R__HRU_SLP.hru	1.1457816	0.2553444948943920
12	R__SLSUBBSN.hru	1.0149750	0.3132162385205540
13	V__CH_N1.sub	0.9536593	0.3431650932948940
14	V__CH_N2.rte	0.5768553	0.5656773507291890
15	R__SOL_AWC(..).sol	0.5644644	0.5740373676374580
16	V__CANMX.hru	0.4717857	0.6383802680889830
17	V__CH_K2.rte	0.2854134	0.7760744468745570
18	V__CH_K1.sub	0.2368999	0.8133476565223240
19	A__REVAPMN.gw	0.1724251	0.8635442806216420
20	V__LAT_TTIME.hru	0.1240170	0.9016168044193520

4.6 CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

4.6.1 Parámetros calibrados

Los valores óptimos de los parámetros SWAT obtenidos en el proceso de calibración de SWAT-CUP se muestran en la **Tabla 15**, que muestra los 20 parámetros calibrados en la cuenca del río Ramis, lo que ilustra la manera más robusta de calibrar por el modelo SWAT. De la tabla se debe tomar en cuenta que V = Sustituido por el valor ajustado, R = 1 + multiplicar por el valor ajustado y A = añadido sobre el valor ajustado.

Tabla 15. Valores óptimos de los parámetros de SWAT calibrados

Código SWAT	Parámetro	Descripción	Valor ajustado
v__	ESCO.hru	Factor de compensación de la evaporación del suelo	0.86
r__	CN2.mgt	Número de Curva inicial de la escorrentía SCS para condición de humedad II	0.20
v__	ALPHA_BF.gw	Flujo base Factor Alfa (días)	0.54
a__	GW_DELAY.gw	Tiempo de retraso de las aguas subterráneas (días)	-12.45
a__	GWQMN.gw	Profundidad umbral de agua en el acuífero poco profundo para que se produzca el flujo de retorno (mm H ₂ O)	-510.00
v__	CANMX.hru	Almacenamiento máximo de la Cubierta (Dose) (mm)	15.15
v__	CH_K2.rte	Conductividad hidráulica del canal principal (mm/h)	6.45
v__	CH_N2.rte	Valor "n" de Manning para el canal principal	0.19
v__	EPCO.bsn	Factor de compensación de la absorción de la planta	0.52
v__	GW_REVAP.gw	Coefficiente de "revap" de las aguas subterráneas	0.11
a__	REVAPMN.gw	Profundidad umbral del agua en el acuífero poco profundo para que se produzca el "revap" o la percolación (mm)	950.00
r__	SOL_AWC().sol	Capacidad de agua disponible de una capa de suelo (mm H ₂ O / mm suelo)	-0.02
r__	SOL_K().sol	Conductividad del suelo saturado de la capa (mm/h)	-0.02
v__	SURLAG.bsn	Coefficiente de retraso de la escorrentía superficial	18.60
v__	CH_N1.sub	Valor "n" de Manning para el canal tributario afluente	0.08
v__	CH_K1.sub	Conductividad hidráulica efectiva en el aluvión del canal tributario (mm/h)	3.63
v__	SLSOIL.hru	Longitud de la pendiente para el flujo lateral del subsuelo (m)	119.25
v__	LAT_TTIME.hru	Tiempo de viaje del flujo lateral (días)	48.75
r__	HRU_SLP.hru	Pendiente media de la ladera (mm)	0.16
r__	SLSUBBSN.hru	Longitud media del pendiente (m)	0.08

4.6.2 Calibración y validación

El procedimiento de calibración y validación fue a través de SWAT-CUP (ver ítem 3.2.12) y su algoritmo “Sequential Uncertainty Fitting 2” (SUFI-2) para que los flujos de flujo resultantes coincidieran con los flujos de entrada observados.

El modelo se calibró para el periodo comprendido entre el 1 de enero de 1981 y el 31 de diciembre de 2003, con un periodo de calentamiento (NYSKIP o Warm-Up por sus siglas en inglés) de 3 años comprendido desde 1 de enero de 1981 al 31 de diciembre de 1983 con cuatro iteraciones de 30, 100, 250 y 500 simulaciones. El modelo se calibró a paso diario y a paso mensual en la salida de la cuenca donde se encuentra la estación de aforo puente Ramis, del cual se utilizó sus datos observados de caudal diario. Los parámetros utilizados para la calibración corresponden a la **Tabla 14**.

La validación se llevó a cabo para evaluar la idoneidad del modelo y determinar si el periodo de calibración confirma que el modelo funciona satisfactoriamente. Para este propósito, se consideró el periodo comprendido entre 1 de enero del 2004 y el 31 de diciembre del 2016, tomando en cuenta los 20 parámetros con valores ajustados en el periodo de calibración.

En la **Tabla 16** se presenta los indicadores de rendimiento de SWAT en la caracterización de los caudales medios diarios durante la fase de calibración y validación del modelo. Aquí, el modelo muestra un buen rendimiento con respecto al factor de eficiencia NASH (NSE = 0.72) para la fase de calibración (**Figura 61**) y un NASH (NSE = 0.69) para la fase de validación (**Figura 62**). Mientras tanto, respecto al porcentaje de Bias (PBIAS) se tiene un desempeño satisfactorio (PBIAS = -18.9 %) para la fase de calibración y muy buen desempeño (PBIAS = 2.2) en la fase de validación.

En la **Tabla 17** se muestra el desempeño del modelo SWAT en la caracterización de las descargas medias mensuales son muy buenas con respecto a NASH (NSE =0.78) en la fase de calibración (**Figura 63**) y un NASH (NSE =0.77) en la fase de validación (**Figura 64**). Respecto al porcentaje de Bias (PBIAS) se tiene un desempeño satisfactorio (PBIAS = -18.7 %) para la fase de calibración y muy buen desempeño (PBIAS = 5.3) en la fase de validación. El buen desempeño del modelo en la caracterización de la dinámica de las descargas observados sugiere que el modelo es adecuado para la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis.

Tabla 16. Estadísticas de medida en la fase de calibración y validación a paso diario

Cuenca	Estación	Calibración (1984 – 2003)			Validación (2004 -2016)		
		NSE	PBIAS	R2	NSE	PBIAS	R2
Ramis	puente Ramis	0.72	-18.9	0.74	0.69	2.2	0.72

Tabla 17. Estadísticas de medida en la fase de calibración y validación a paso mensual

Cuenca	Estación	Calibración (1984 – 2003)			Validación (2004 -2016)		
		NSE	PBIAS	R2	NSE	PBIAS	R2
Ramis	Puente Ramis	0.78	-18.7	0.8	0.77	5.3	0.78

En general, los caudales simulados por el modelo SWAT dan una buena representación de la dinámica de los caudales observados de la estación hidrométrica puente Ramis durante las fases de calibración y validación del modelo.

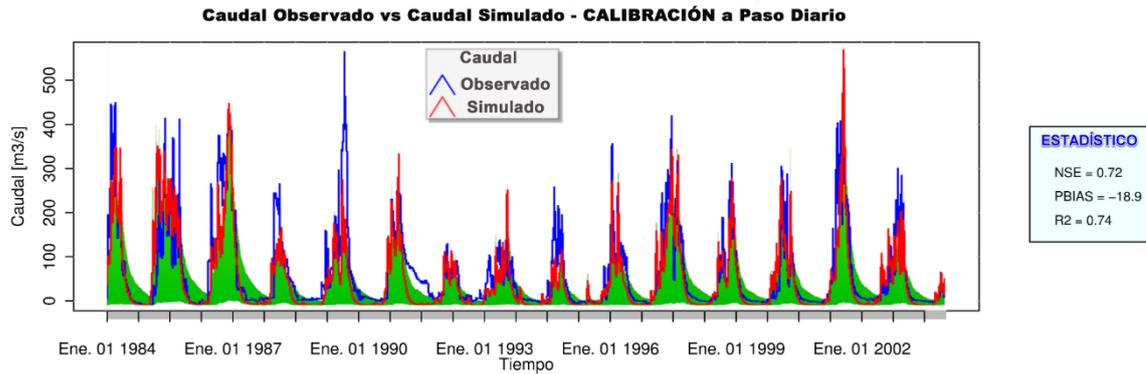


Figura 61. Hidrograma simulado versus observado a paso diario del modelo SWAT (fase de calibración)

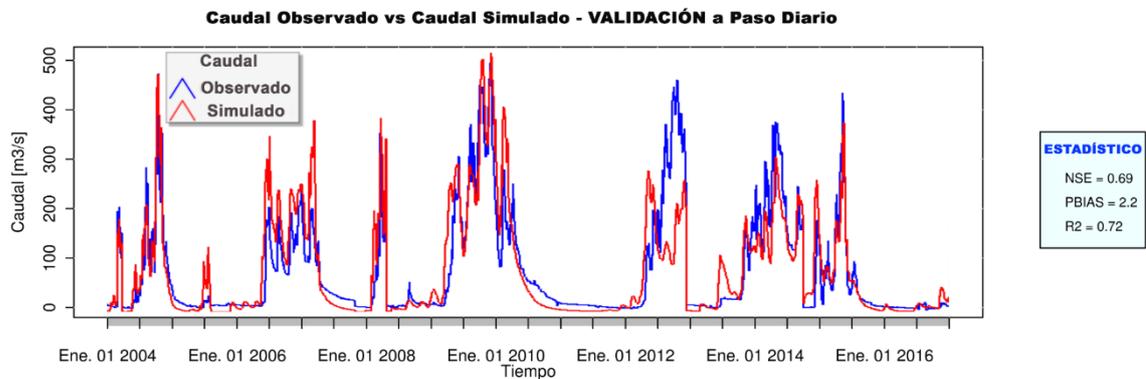


Figura 62. Hidrograma simulado versus observado a paso diario del modelo SWAT (fase de validación)

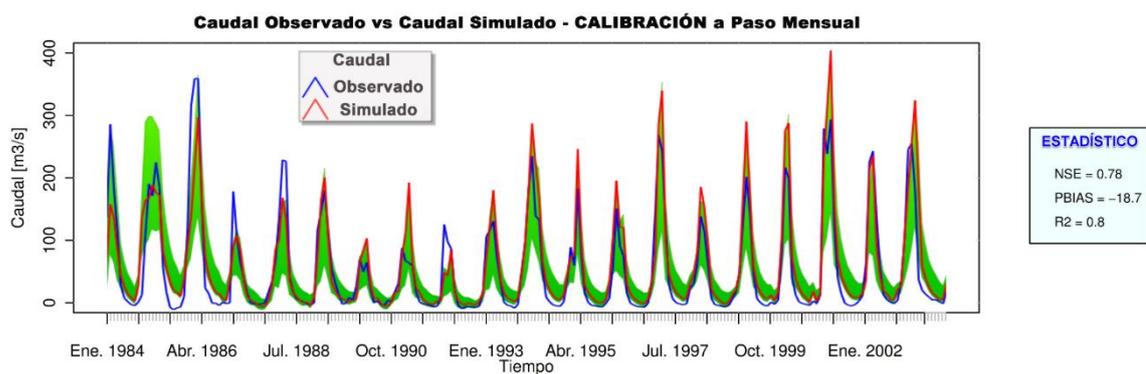


Figura 63. Hidrograma simulado versus observado a paso mensual del modelo SWAT (fase de calibración)

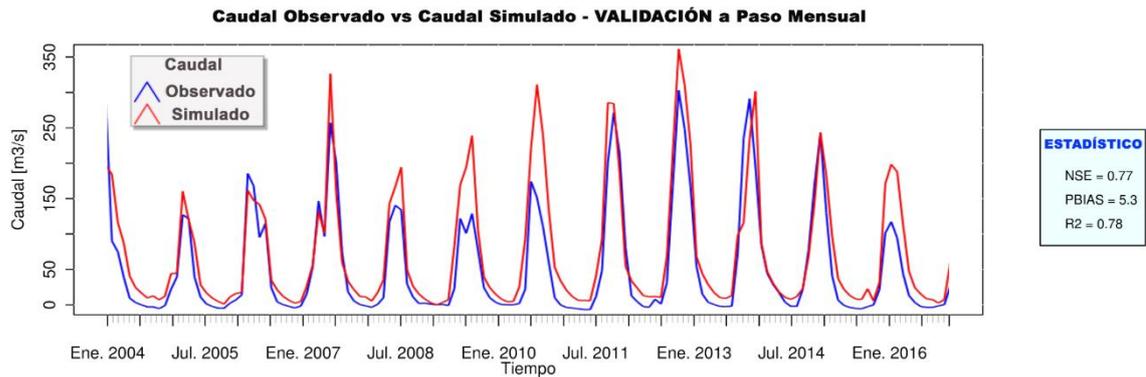


Figura 64. Hidrograma simulado versus observado a paso mensual del modelo SWAT (fase de validación)

4.7 EVAPOTRANSPIRACIÓN

“Los datos más importantes en los estudios hidrológicos se refieren a la cantidad de agua que recibe una cuenca a través de las precipitaciones y la cantidad de agua que vuelve a la atmósfera a través de la evapotranspiración” (Galván González, 2011). “La evapotranspiración es el principal mecanismo de extracción de agua de las cuencas. Alrededor del 62% de las precipitaciones que caen en el continente son evapotranspiradas” (S. Neitsch et al., 2005). El modelo SWAT caracteriza los distintos procesos que son los componentes más importantes del balance hídrico: precipitación, escorrentía superficial, flujo base (flujo lateral más el flujo de retorno de los acuíferos) y la evapotranspiración.

La ETP se estimó mediante el método de Hargreaves debido a las limitadas y escasas variables disponibles; SWAT dispone del método de Hargreaves, que sólo requiere datos de temperatura, y este método se aplicó a la cuenca del río Ramis. Así se ha determinado que la ETP media anual para la cuenca del río Ramis para la fase de calibración es de 1,167.1 mm (**Figura 65**) y para la fase de validación de 1,212.3 mm (**Figura 66**). Así mismo, se muestra la distribución espacial de la ETP media anual en la

Figura 67 y **Figura 68** por subcuencas del río Ramis para la fase de calibración y validación respectivamente.

De la representación esquemática del balance hídrico de la cuenca del río Ramis en la fase de calibración (**Figura 65**) se puede apreciar principalmente que el mayor aporte de agua al sistema lo proporcionan las precipitaciones (661 mm). Principalmente podemos mencionar que el 78.68% de la precipitación se pierde del sistema a la atmósfera a través de la evapotranspiración real ($ET = 520.1$ mm) y su distribución espacial se puede apreciar en la **Figura 69**, mientras que la escorrentía superficial representa el 18.16% como parte de su contribución del total de las precipitaciones.

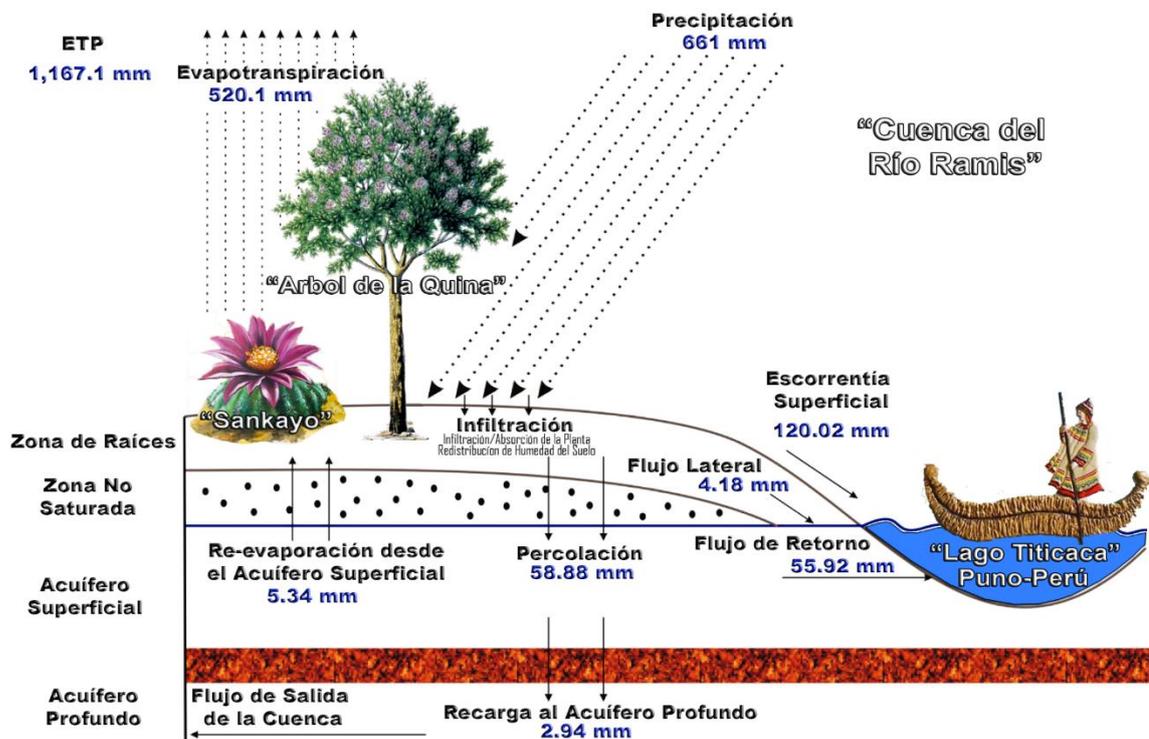


Figura 65. Representación esquemática del balance hídrico de la cuenca del río Ramis (fase de calibración)

Del mismo modo, la figura esquemática del balance hídrico en la cuenca del río Ramis durante la fase de validación (**Figura 66**) muestra que la mayor aportación de agua al sistema la proporcionan las precipitaciones (675.4 mm). Principalmente podemos

mencionar que el 77.49% de la precipitación se pierde del sistema a la atmósfera a través de la evapotranspiración real ($ET = 523.4 \text{ mm}$) y su distribución espacial se puede apreciar en la **Figura 70**, mientras que la escorrentía superficial (135.07 mm) representa el 20.0% como parte de su contribución del total de las precipitaciones.

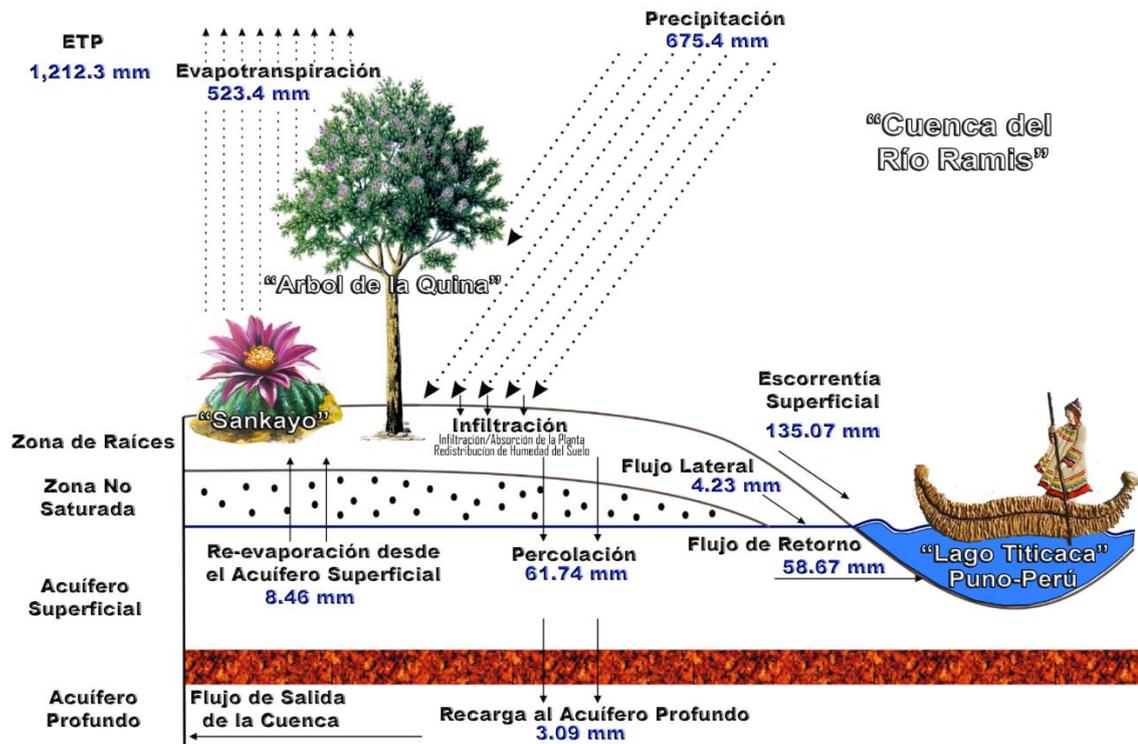


Figura 66. Representación esquemática del balance hídrico de la cuenca del río Ramis (fase de validación)

4.7.1 Visualización de resultados a nivel de subcuencas

Adicionalmente la distribución espacial de los componentes ETP y ET puede visualizarse en la **Figura 67**, **Figura 68**, **Figura 69** y **Figura 70**. En la **Tabla 18** se presentan los resultados obtenidos por el modelo a nivel de subcuenca y sus valores respectivos para la fase de calibración y validación en la cuenca del río Ramis.

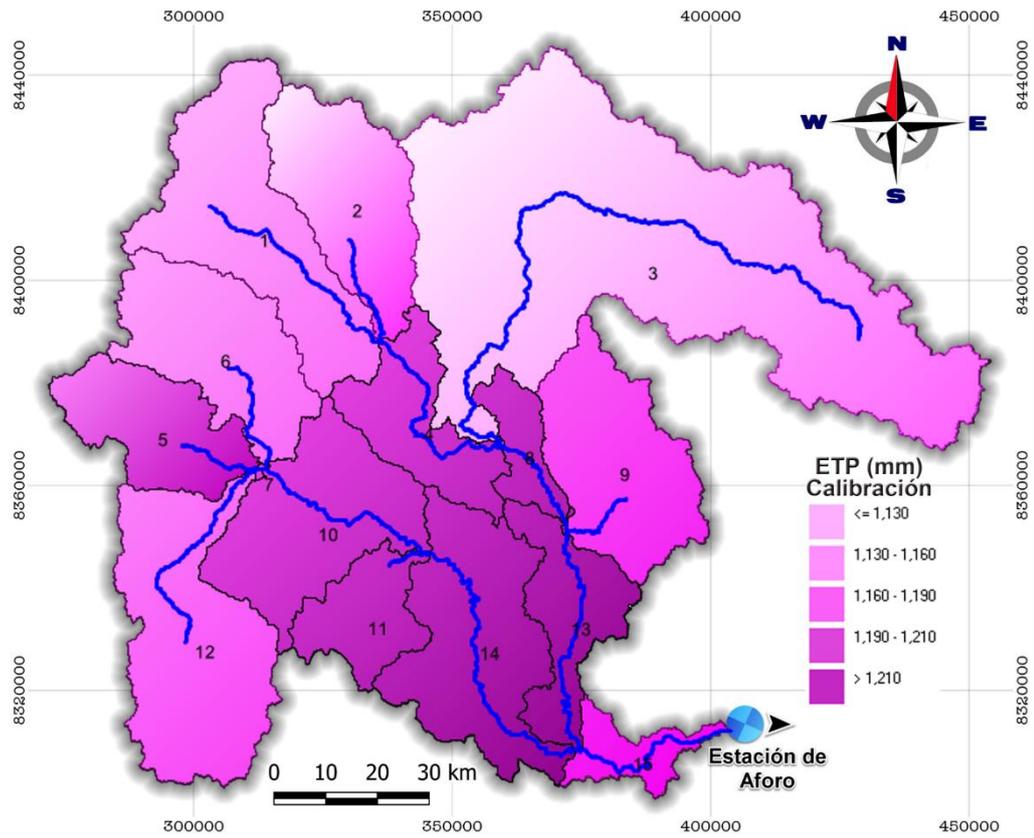


Figura 67. ETP media anual por subcuencas del río Ramis (fase de calibración)

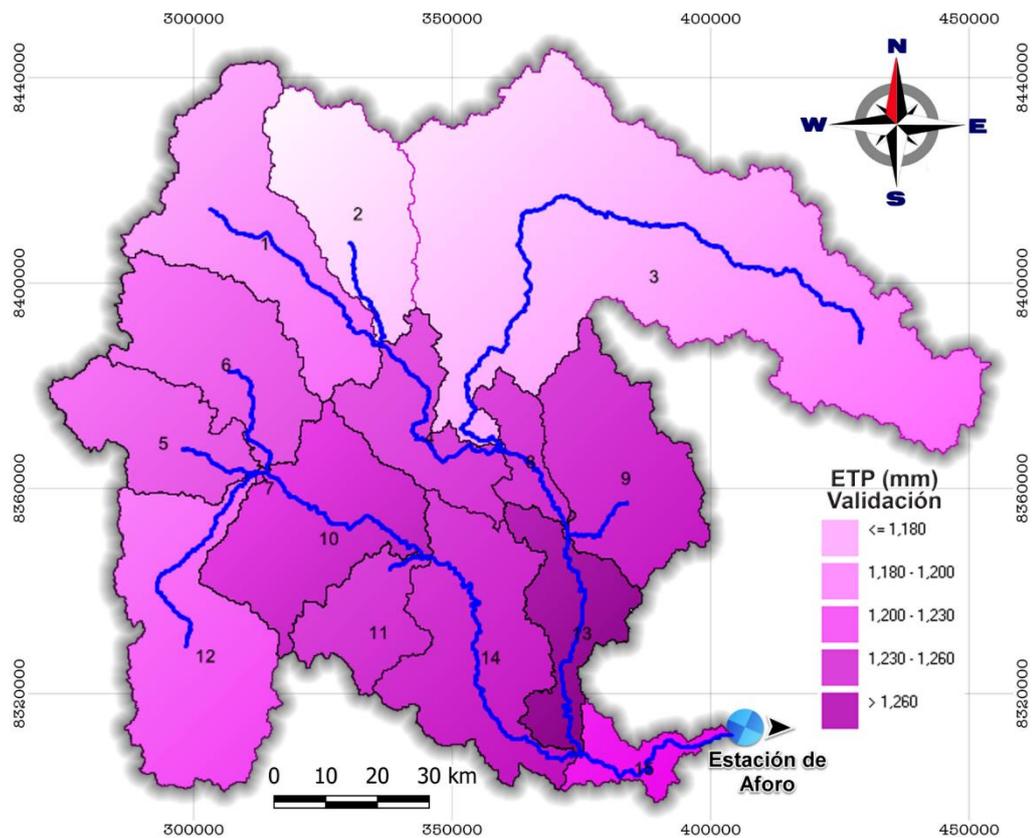


Figura 68. ETP media anual por subcuencas del río Ramis (fase de validación)

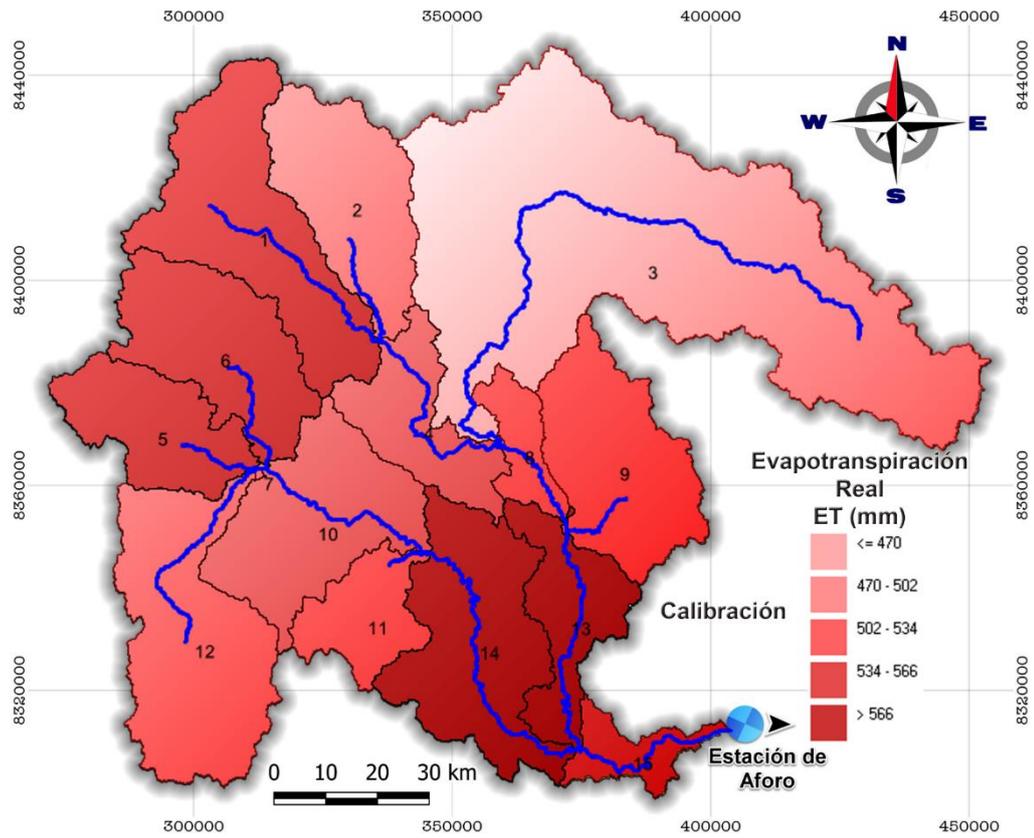


Figura 69. ET media anual por subcuencas del río Ramis (fase de calibración)

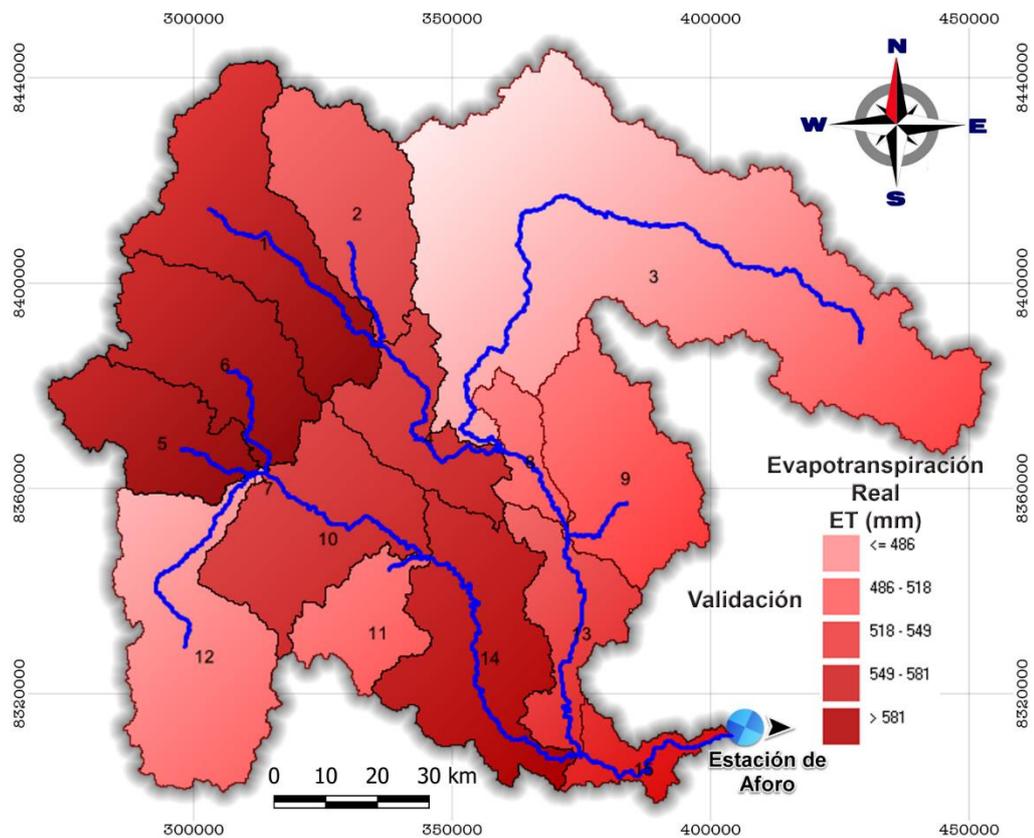


Figura 70. ET media anual por subcuencas del río Ramis (fase de validación)

Tabla 18. ETP y ET distribuidos por subcuencas del río Ramis

Subcuenca	Evapotranspiración potencial (ETP)		Evapotranspiración real (ET)	
	Fase calibración ETP (mm)	Fase validación ETP (mm)	Fase calibración ET (mm)	Fase validación ET (mm)
1	1174.5	1219.0	573.1	598.3
2	1132.2	1177.3	529.6	562.6
3	1104.7	1152.3	438.1	454.3
4	1212.8	1257.7	560.5	561.8
5	1198.3	1241.6	597.9	604.8
6	1189.2	1233.5	594.5	612.6
7	1236.6	1270.8	525.8	528.6
8	1213.8	1258.6	512.9	492.3
9	1186.1	1232.9	519.7	488.3
10	1239.9	1281.4	552.0	549.4
11	1211.0	1254.5	522.9	509.5
12	1171.2	1216.8	507.8	499.7
13	1224.1	1267.6	572.6	539.1
14	1215.4	1259.3	578.3	558.2
15	1164.9	1206.5	558.2	526.6

4.8 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Este ítem se centra en la evaluación analítica de los resultados obtenidos en los capítulos anteriores. El objetivo principal es discutirlos y compararlos con estudios similares a priori, teniendo en cuenta el contexto geográfico, los datos y la metodología utilizados. Además, se discuten el alcance, la fiabilidad y las cuestiones abiertas de los resultados obtenidos.

4.8.1 Bases de datos utilizadas

La creación de una base de datos es el punto de partida de todas las actividades relacionadas con la modelización hidrológica y la caracterización de las clases de cobertura del suelo. Para obtener resultados satisfactorios, los datos deben ser lo más parecidos posible a las condiciones reales del campo. Sin embargo, esta tarea es costosa



y hay que tener en cuenta los supuestos a realizar y las prioridades de escala a la hora de seleccionar los métodos de recojo de datos.

En cuanto a la información necesaria para la modelización hidrológica, hay que tener en cuenta que la presente investigación se concentra únicamente en la comprensión del funcionamiento sistémico de la esorrentía y en la utilización del producto PISCO como data forzante para la modelización de la cuenca del río Ramis, por lo que se puede prestar menos atención a los otros procesos hidrológicos que se producen en la cuenca. Por lo tanto, motivado por la facilidad de disponibilidad, las mediciones continuas y el dominio de la experiencia, por lo que se propone el uso de la información obtenida a través de productos para estimar la elevación, usos de suelo y suelos (tipos de suelos) de información utilizados en investigaciones [Aybar et al. (2019), Zapana Arpasi, (2019), Traverso Yucra (2018), Fernández (2017), Fernández Palomino (2016), Fernández Palomino (2016), Aybar Camacho (2016)] ligadas a la modelización hidrológica. “De hecho, las estimaciones de la variabilidad de la precipitación mediante sistemas satelitales no son lo suficientemente precisas como para tener en cuenta los pasos temporales diarios” (Ramos Fernández, 2013), pero, siendo la precipitación la data forzante de la presente investigación y el objetivo principal, se propone utilizar el producto PISCO para precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima del SENAMHI en la cuenca del río Ramis tomando en cuenta la red de estaciones meteorológicas favorables que se distribuyen en el ámbito de la cuenca.

La información de elevación proporcionada por el MDE SRTM resultó ser más que suficiente para delimitar correctamente la cuenca hidrográfica del río Ramis y establecer eficazmente las HRU. Sin embargo, la información sobre el tipo de suelo, que es un punto importante en la modelización de la hidrología en su concepción física (principalmente porque interviene en la tasa de infiltración y recarga del sistema

subsuperficial), se obtuvo de la base datos del DSMW de la FAO a una escala de 1:50km, pero es muy subjetiva debido a que no es una escala robusta y esto se corrobora con el estudio realizado por Aybar Camacho (2016), Zapana Arpasi (2019) que han utilizado los productos de SoilGrids1km (Hengl et al., 2014) y el DSMW para la cuenca del río Vilcanota y Huancané respectivamente, pero que han producido resultados satisfactorios en la modelización hidrológica. De ello podemos concluir que dichos productos no son aplicables a estudios detallados, y esto se debe a los pocos estudios realizados en Perú como por ejemplo en el caso de SoilGrids1km (véase la **Figura 71**), siendo aún una información de mejor escala que el producto DSMW de la FAO. En cuanto a la pertinencia del uso de suelo y los datos (uso de suelos, tipo de suelos) para adecuar al formato SWAT, no es un problema importante debido a la naturaleza genérica de las categorías definidas.

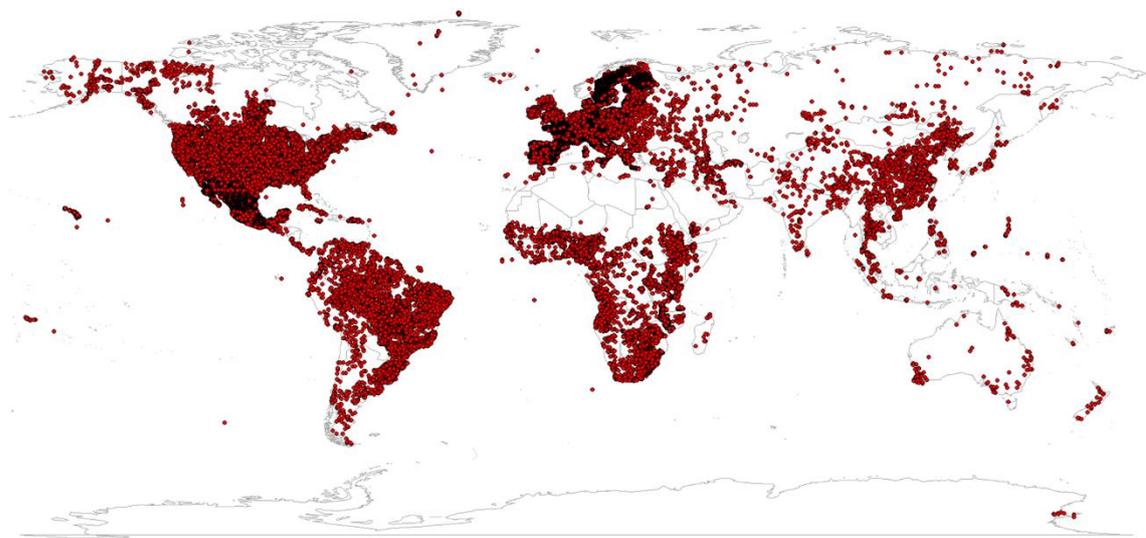


Figura 71. Distribución mundial de los perfiles de suelo utilizados para generar el producto soilgrids1km (<https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992.g002>)

4.8.2 Simulación inicial

Para analizar la eficacia del ajuste entre los caudales observados y los simulados durante el periodo descrito en el **CAPÍTULO III** ítem **3.3.9**, se utilizaron diferentes

índices de bondad de ajuste descritos en el **CAPÍTULO III ítem 3.3.9b**), los caudales simulados fueron capaces de representar la estacionariedad de las series de caudales observados con un pequeño desfase, incluso antes de la calibración (simulación inicial del modelo SWAT en la cuenca del río Ramis). Esto se ilustra al analizar el coeficiente de determinación R^2 (un estimador de la varianza de la variable dependiente que puede predecirse a partir de las variables independientes) que presenta valores de $R^2 = 0.53$ (a paso diario) y 0.7 (a paso mensual) los cuales representan que el 53% (a paso diario) y el 70% (a paso mensual) de la variabilidad de los datos queda explicado con una asociación moderada, es decir, no se tiene un buen ajuste, pero que es un indicio de que el modelo puede ser calibrado y posteriormente validado al tener un $R^2 > 0.5$.

Además, la comparación de los resultados de la simulación inicial con la estación hidrométrica de puente Ramis en referencia al estadístico NSE muestra resultados insatisfactorios, con un $NSE=0.47$ a paso diario y un $NSE=0.66$ a paso mensual, lo que indica la necesidad de ajustar los parámetros. Así mismo el estadístico $PBIAS=-24.7\%$ (a paso diario) y $PBIAS=-23.1\%$ (a paso mensual) indica que el modelo sobrestima los caudales observados, corroborando y comprobando lo descrito anteriormente.

4.8.3 Análisis de sensibilidad

En cuanto al análisis de sensibilidad, el análisis realizado mediante el algoritmo Sequential Uncertainty Fitting 2 (SUFI-2) mostró una cierta robustez del modelo hidrológico SWAT, es decir, que el valor final del caudal se debe a la interacción de los diferentes parámetros y no depende de un solo parámetro. Como las primeras simulaciones mostraron que hay variabilidad en los datos que explican la asociación moderada por el estadístico $R^2 = 0.53$ (a paso diario) y $R^2=0.7$ (a paso mensual), decidimos seleccionar 20 parámetros ya que el estadísticos R^2 mostró que el modelo podía calibrarse y validarse (véase la **Tabla 14**).



Otro aspecto que se ha tomado en cuenta para la selección de los parámetros es tras una exhaustiva revisión de la literatura, se ha considerado referencias recientes [(Arnold et al. (2012), Fernández Palomino (2016), Aybar Camacho (2016), Fernández (2017) y Arias Baltazar (2020)] para optar por dichos parámetros. Los parámetros seleccionados se muestran en la **Tabla 8** con su respectiva descripción. Se observó que el uso de dichos parámetros tuvo un efecto significativo en el proceso de simulación del caudal.

Dentro de los principales parámetros calibrados, identificamos y reportamos el principal parámetro GWQMN del modelo que fue muy sensible de los acuíferos que tuvo influencia en la respuesta hidrológica desde el acuífero superficial; así también el número de la curva CN2 permitió separar la precipitación efectiva de la precipitación total, y por ende tiene un efecto directo en el cálculo de la escurrentía. SLSOIL alcanzó significación en el valor p-value, ya que el flujo de agua subterránea no se reduce significativamente debido a la no compactación del suelo y a la no impermeabilización, lo que era de esperar debido a la naturaleza agrícola de los usos del suelo en la cuenca. El coeficiente de compensación de la evaporación del suelo ESCO reguló las pérdidas por evapotranspiración. Mientras que el coeficiente de GW_REVAP fue sensible porque se describe como el agua que es movida del acuífero superficial a la zona de raíz por un coeficiente de re-evaporación (GW_REVAP); este parámetro es sensible porque nos permitió simular las condiciones variadas de temperaturas máximas que se presentan en la cuenca y que remueven rápidamente el agua del suelo, sustituyendo estos poros con agua del acuífero. Por lo que, GW_REVAP está relacionado con la variación de las características morfológicas de la cuenca, donde la vegetación favorece la infiltración en la cuenca que es una región montañosa. Esta coincidencia está relacionada con el uso de la tierra en la cuenca, en particular con áreas cubiertas por vegetación, donde se hizo más



probable que el agua de los acuíferos poco profundo se pierda por evapotranspiración. El parámetro GW_DELAY nos indica que el acuífero responde moderadamente a la recarga y una influencia no menos importante es el de retardo de la escorrentía superficial SURLAG, que afectó en la variación de la ocurrencia temporal de los caudales picos. La sensibilidad de GWQMN, GW_REVAP y GW_DELAY, revela la importancia del sistema de agua subterránea en la hidrología de la cuenca del río Ramis.

En general, se encontró que los parámetros calibrados más sensibles difieren de los parámetros sugeridos por Fernández (2017), Asurza Véliz & Lavado Casimiro (2020), lo que puede atribuirse a las diferentes condiciones que se dan entre cuencas con cierta similitud en cuencas del Altiplano y más aún en comparación a otras regiones hidrográficas. Sin embargo, el buen desempeño en la fase de calibración y muy buen desempeño en la fase de validación, obtenido en la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis para representar registros diarios de caudales constituye un buen ejemplo que un modelo con enfoque Semi-Distribuido como SWAT, puede realizar con suficiente éxito la simulación de caudales, como también se reveló en distintos estudios realizados sobre el modelo SWAT (Vilaysane et al., 2015; Oñate-Valdivieso et al., 2016; Fernández, 2017; Asurza Véliz & Lavado Casimiro, 2020; Oo et al., 2020; Wei et al., 2021).

4.8.4 Enrutamiento hidrológico

Los caudales para los diversos puntos para la Modelización hidráulica se obtienen observando los tramos y cuencas, verificándose por ejemplo que para la subcuenca 15 zona de Taraco (desembocadura al lago), en el cual se sitúa la estación hidrométrica de puente Ramis, considerando la subrutina diaria de enrutamiento hidrológico de almacenamiento variable (Nguyen et al., 2018; Williams R., 1969), este tránsito permitió calcular los caudales a la salida de la cuenca, los cuales sobreestiman en un 18.9% (PBIAS) en la fase de calibración y subestiman en la fase de validación en un 2.2%

(PBIAS) en relación a los valores observados de la estación hidrométrica (ver **Tabla 16** y **Tabla 17**); la sobrestimación está relacionado con la variabilidad de lluvias (P. W. Gassman et al., 2007), la presencia de acuíferos (Tufford et al., 2013) y la subestimación en general está asociada a la producción de agua bajos (inferiores a 1 mm), asociados a los días sin lluvia (Carmona T., 2007), además estudios previos han observado que el modelo SWAT subestima los bajos caudales en períodos secos y húmedos (Asurza Véliz & Lavado Casimiro, 2020; Pfannerstill et al., 2014). Esto se debe también a que el río Ramis llega realmente al sistema hídrico superficial con un flujo de agua subterránea limitado debido a la baja transmisividad y al bajo gradiente, además de que los caudales se reducen en gran medida en los valles inferiores debido a la infiltración y posterior evaporación desde los acuíferos aluviales (Zabala Carrión & Guerrero Bohorquez, 2006).

4.8.5 Producto PISCO en la modelización hidrológica con SWAT

Para la evaluación hidrológica de los productos PISCO, se calibró el modelo SWAT basándose en los resultados de la calibración de los parámetros enumerados en la **Tabla 15** y sus valores óptimos. La tabla muestra, por tanto, los 20 parámetros relevantes que rigen la respuesta hidrológica de la cuenca del río Ramis. Cabe destacar que la complejidad del modelo SWAT permite calibrar estos parámetros. Esto demuestra la robustez del modelo para determinar la respuesta hidrológica de la cuenca del río Ramis, con la capacidad de simular la escorrentía utilizando el producto PISCO como datos de entrada.

Se encontró que el desempeño del producto PISCO en la modelización hidrológica del río Ramis fue ligeramente superior a los resultados obtenidos por Fernandez-Palomino et al. (2018) y Fernández (2017). Así podemos decir que la calibración del modelo SWAT mediante SWAT-CUP y su algoritmo SUFI-2 de los parámetros seleccionados en la etapa de análisis de sensibilidad presento resultados buenos a paso



diario con una eficiencia de Nash-Sutcliffe que aumenta a 0.72 y resultados muy buenos con un $NSE=0.78$ a paso mensual, el éxito de los resultados puede ser comprobado también al observar los hidrogramas en la **Figura 61** y **Figura 62** entre los datos observados frente a los simulados del cual se puede observar que se obtuvo R^2 de 0.74 a paso diario y 0.8 a paso mensual. Respecto al porcentaje de Bias (PBIAS) se tiene en general un desempeño satisfactorio de $PBIAS = -18.9 \%$ a paso diario y un $PBIAS = -18.7 \%$ a paso mensual. La validación del modelo SWAT mediante SWAT-CUP y su algoritmo SUFI-2 de los parámetros seleccionados, en esta etapa de análisis presento resultados buenos a paso diario con una eficiencia de Nash-Sutcliffe de 0.69 y resultados muy buenos con un $NSE=0.77$ a paso mensual, el éxito de los resultados puede ser comprobado también al observar los hidrogramas en la **Figura 63** y **Figura 64** entre los datos observados frente a los simulados del cual se tiene un R^2 de 0.72 a paso diario y 0.78 a paso mensual. Respecto al porcentaje de Bias (PBIAS) se tiene en general un desempeño **muy bueno** de $PBIAS = 2.2 \%$ a paso diario y un $PBIAS = 5.3 \%$ a paso mensual, con ello podemos decir que el modelo subestima por muy poco ya que se tiene valores <10 de PBIAS, con lo que se confirma lo indicado en un inicio. La ligera variación a favor puede atribuirse al número de parámetros utilizados, al método de calibración y, en menor medida, al periodo de evaluación; además, aunque el modelo hidrológico puede proporcionar información sobre el mecanismo lluvia-escorrentía, sigue siendo abstracciones de un sistema real, y no se puede suponer que ninguno de ellos genere información precisa para cuencas hidrográficas y condiciones hidrológicas específicas (Seiller et al., 2012). Sin embargo, el buen desempeño durante la fase de calibración y el muy buen desempeño en la fase de validación obtenidos en la modelización hidrológica de la cuenca del río Ramis nos permitió obtener los valores óptimos para los parámetros analizados tal como se puede ver en la **Tabla 15**. De aquí, en efecto encontramos que el

desempeño en el uso del producto PISCO como entrada clave en la modelización hidrológica utilizando el modelo SWAT en una cuenca como la del río Ramis, en la que hace falta aún red de estaciones meteorológicas (parte alta del lado norte, sur-oeste y sur-este) por parte de SENAMHI, que en comparación con las estaciones virtuales del producto PISCO se cubre ello (**Figura 72**), frente a esto, el producto PISCO es muy prometedor como insumo y esto constituye como un modelo con un enfoque Semi-Distribuido como SWAT puede tener un buen rendimiento para la simulación de caudales diarios y mensuales. Como también, se reveló en distintos estudios sobre el uso del producto PISCO y el modelo SWAT en el altiplano Peruano (Aybar Camacho, 2016; Fernandez-palomino et al., 2018; Fernández, 2017; TRAVERSO et al., 2019; Zapana Arpasi, 2019) en la región del Pacifico Peruano (Asurza Véliz & Lavado Casimiro, 2020).

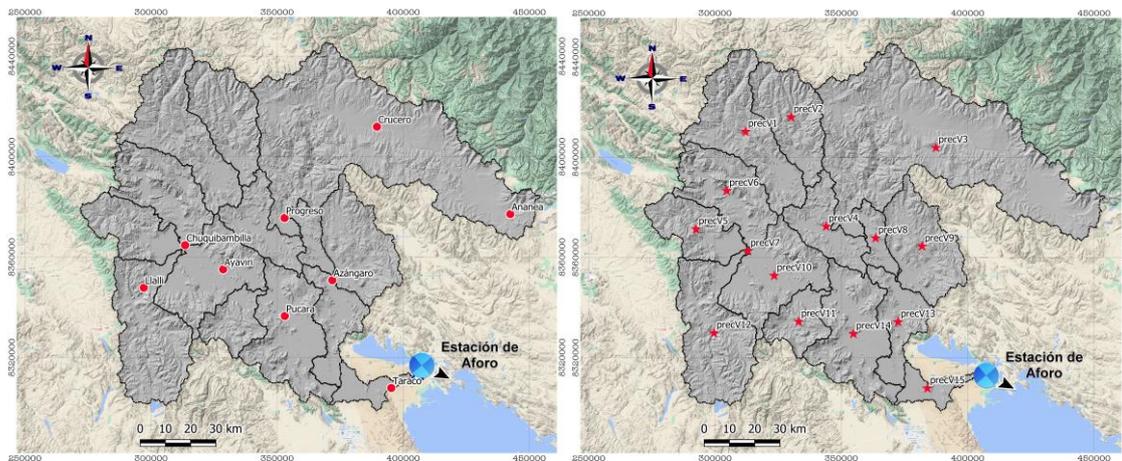


Figura 72. Red de estaciones del SENAMHI (lado izquierdo), estaciones virtuales del producto PISCO (lado derecho)

4.8.6 Evapotranspiración por el método de Hargreaves

El diagrama esquemático del balance hídrico en la cuenca del río Ramis durante la fase de calibración (**Figura 65**) muestra que la mayor aportación de agua al sistema procede principalmente de las precipitaciones (661 mm). El 78.68% de la precipitación se pierde del sistema a la atmósfera a través de la evapotranspiración real ($ET = 520.1$



mm). La escorrentía superficial representa el 18.16% como parte de su contribución a la precipitación total. Del mismo modo, el diagrama esquemático del balance hídrico en la cuenca del río Ramis durante la fase de validación (**Figura 66**) muestra que la mayor aportación de agua al sistema procede de las precipitaciones (675.4 mm). El 77.49% de la precipitación se pierde del sistema a la atmósfera a través de la evapotranspiración real (ET = 523.4 mm). La escorrentía superficial (135.07 mm) representa el 20.0% como parte de su contribución a la precipitación total. Los resultados se asemejan a lo encontrado por Fernández Palomino (2017).

4.8.7 Alcance y utilidad

El Altiplano peruano sigue siendo una gran zona de actividades económicas como la agricultura de secano a pesar de su alta evapotranspiración (Condori Apaza et al., 2021). En este sentido, la agricultura es el sector económico más amenazado por las fluctuaciones pluviométricas y de caudales, lo que hace importante que la agricultura de regadío sea una alternativa en aumento progresivo (Omran, 2018). Esta investigación puede ayudar a comprender la variabilidad espacio-temporal de las precipitaciones, especialmente en las zonas con pocos datos, donde el producto PISCO puede desempeñarse de manera prometedora como una base datos clave de libre disponibilidad para su uso y que posteriormente pueda proporcionar información útil para los estudios del balance hídrico, la previsión del agua y el seguimiento de la sequía en la cuenca, lo que puede proporcionar información útil para los responsables de la toma de decisiones.

V. CONCLUSIONES

La cuenca del río Ramis es una de las cuencas montañosas de Perú que se está desertificando paulatinamente, debido principalmente a la reducción de las precipitaciones. En este estudio, se utilizó el producto PISCO como entrada principal para caracterizar la variabilidad de la esorrentía superficial en el modelo hidrológico de la cuenca del río Ramis; el desempeño del producto PISCO resultó eficiente y muy prometedor como dato forzante en la generación de caudales diarios y mensuales mediante el modelo hidrológico SWAT.

A continuación, las tres conclusiones objetivas específicas que han conducido a la conclusión general anterior descrita, son las siguientes:

Objetivo específico 1: validar los datos hidrométricos disponibles en la cuenca del río Ramis mediante el análisis exploratorio de datos (AED).

La validación de los datos hidrométricos mediante el AED de la estación puente Ramis, mostró el régimen de los registros con una estación húmeda de noviembre a marzo, una estación seca de junio a agosto, así como los periodos de transición de septiembre - octubre y abril – mayo. En general, no se tiene la presencia de valores atípicos en los registros observados, pero estos no se ajustan a la distribución normal teórica, evaluándose así mediante pruebas estadísticas No Paramétricas, que nos indican que, mediante el Análisis de Independencia Serial (Turning Points) los datos de caudales no proceden de un proceso aleatorio, del análisis de estacionariedad mediante Mann Kendall se afirma que los datos no muestran ninguna tendencia estadísticamente significativa y del Análisis de Cambio en la Media (CUSUM) los datos no muestran un salto de paso estadísticamente significativo; validando así los datos hidrométricos en la cuenca del río Ramis.



Objetivo específico 2: determinar la evapotranspiración potencial utilizando información de temperatura máxima y mínima del producto PISCO.

La determinación de la ETP fue estimada por el método de Hargreaves revelando un valor medio anual de 1,167 mm (1,212.3 mm) para la fase de calibración (validación), a la vez se encontró que el 78.68% (fase de calibración) y el 77.49% (fase de validación) de la precipitación se pierde del sistema a la atmósfera a través de la ET.

Objetivo específico 3: modelizar la cuenca del río Ramis utilizando los datos grillados diarios del producto PISCO y data observada de caudal.

La cuenca del río Ramis ha sido modelizado hidrológicamente mediante SWAT y ha sido capaz de reproducir los registros históricos de caudales tras la calibración y validación de los parámetros que podrían provocar cambios significativos. Por lo tanto, el producto PISCO de SENAMHI muestra un desempeño muy prometedor, ya que representa bien la elevada evapotranspiración potencial en relación con las precipitaciones y el comportamiento del flujo de la cuenca del río Ramis.



VI. RECOMENDACIONES

Al final de este trabajo de investigación, se considera necesario establecer los temas omitidos y reconstruir nuevas líneas de investigación. Estas se detallan a continuación:

Aumentar la densidad de las estaciones meteorológicas e hidrológicas en la zona de estudio. Es necesario rediseñar la red para captar la especificidad y la precisión de las variables meteorológicas, especialmente las precipitaciones, con el fin de comprender mejor las fuentes de escorrentía superficial que se forman en la cuenca.

Mejora de la información sobre el tipo de suelo: como se detalla en esta investigación, la información sobre el tipo de suelo era uno de los puntos de mayor subjetividad en la modelización hidrológica. La única manera de identificar correctamente el tipo de suelo es a través de extensas campañas de recogida de datos mediante calicatas.

Respecto a los usos de suelo; para obtener resultados más precisos, se recomienda desarrollar una metodología más robusta para el cambio de la cobertura del suelo, por ejemplo, basada en algoritmos de clasificación y reflectancia, complementada con estudios de campo e imágenes de satélite con mayor resolución espacial para una evaluación más fina, y así contrastar y verificar la información obtenida en este estudio.

Las subrutinas de enrutamiento hidrológico de SWAT, el almacenamiento variable y Muskingum debe realizarse su evaluación con ambas subrutinas en la modelización para el enrutamiento hidrológico, especialmente importante para los estudios centrados en (1) cuencas con tramos cortos, y/o (2) simulación de caudales bajos, (3) simulación basada en eventos, y/o (4) cuencas en regiones (semi) áridas, donde la evaporación es alta pero las pérdidas de transmisión del canal pueden ser significativas.



Pocos estudios han proporcionado valores para los parámetros utilizados para calibrar el modelo, lo que dificulta el establecimiento de valores recomendados según las características de la cuenca. Por lo tanto, teniendo en cuenta la importancia del sistema de aguas subterráneas en la hidrología de la cuenca del río Ramis identificada en este estudio, se recomienda realizar un re - análisis de sensibilidad de los parámetros utilizando otros métodos. Dado que los parámetros de las aguas subterráneas varían en diferentes condiciones, se destacó que se necesitan valores de referencia para la producción de agua a fin de ajustar las simulaciones y obtener un régimen adecuado de magnitud y distribución temporal.

Dado que las rutinas de aguas subterráneas en SWAT son muy simplistas, se recomienda la necesidad de investigaciones detalladas de las aguas subterráneas a nivel de cuenca para mejorar la interpretabilidad física de los parámetros relacionados con las aguas subterráneas, para luego evaluarlas en el modelo MODFLOW vinculado a SWAT y así también mejorar las contribuciones de flujo de los acuíferos.

Debido a que la cuenca (en la parte baja) está expuesta a la ocurrencia de fenómenos naturales generadores de desastres (inundaciones y sequías), se recomienda realizar un diagnóstico para determinar la vulnerabilidad futura del espacio físico de la cuenca y determinar su sensibilidad que tienen ante el cambio climático.

Se recomienda evaluar y comparar los datos de precipitación V2.1 y V2.0 del producto PISCO en el modelo hidrológico de la cuenca del río Ramis para contrastar y verificar la información obtenida en este estudio.

Los datos grillados del producto PISCO proporcionan una valiosa información que está disponible de forma gratuita, recomendándose para futuras investigaciones, pero que también se recomienda un análisis más con datos de observación para reducir el grado



de incertidumbre para estudios detallados. Así también los aspectos no estadísticos, como los componentes del balance hídrico deben considerarse en la modelización hidrológica.

Aunque **SWAT+** se anuncia como la próxima generación de SWAT, todavía hay muchos usuarios de SWAT que trabajan con modelos SWAT existentes. Por lo tanto, también se sugieren verificaciones de otras funciones de SWAT para disminuir la incertidumbre de la estructura del modelo.



VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbaspour, K. C. (2015). SWAT-CUP SWAT Calibration and Uncertainty Programs - A User Manual. *Eawag (Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology) Aquatic Research*.
- Aouissi, J., Benabdallah, S., Lili Chabaâne, Z., & Cudennec, C. (2016). Evaluation of potential evapotranspiration assessment methods for hydrological modelling with SWAT—Application in data-scarce rural Tunisia. *Agricultural Water Management*, 174, 39–51. <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.03.004>
- Aparicio Mijares, F. J. (1989). *Fundamentos de hidrología de superficie* (Grupo Noriega Editores (ed.)). LIMUSA.
- Arias Baltazar, L. (2020). *Modelamiento hidrológico con SWAT y calibración con SWAT-CUP. [Material del aula]*. Instituto de Estudios Profesionales de Ingeniería (IEPI). Capítulo de Ingeniería Agrícola-CIP Ayacucho.
- Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., Williams, J. R., Haney, E. B., & Neitsch, S. L. (2012). Soil & Water Assessment Tool. Input/Output Documentation. Version 2012. *Texas Water Resources Institute*, 649. <http://swat.tamu.edu/media/69296/SWAT-IO-Documentation-2012.pdf>
- Arnold, J. G., Moriasi, D. N., Gassman, P. W., Abbaspour, K. C., White, M. J., Srinivasan, R., Santhi, C., Harmel, R. D., Van Griensven, A., Van Liew, M. W., Kannan, N., & Jha, M. K. (2012). SWAT: model use, calibration, and validation. *Transactions of the ASABE*, 55(4), 1491–1508.
- Arnold, J. G., Srinivasan, R., Muttiah, R. S., & Williams, J. R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: model development. *American Water Resources Association*, 34(1), 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752->



1688.1998.tb05961.x

- Arnold, Jeffrey G., Allen, P. M., & Bernhardt, G. (1993). A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, 142(1–4), 47–69. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(93\)90004-S](https://doi.org/10.1016/0022-1694(93)90004-S)
- Asurza Véliz, F. A., & Lavado Casimiro, W. S. (2020). Regional parameter estimation of the SWAT model: Methodology and application to river basins in the Peruvian pacific drainage. *Water*, 12(11), 1–25. <https://doi.org/10.3390/w12113198>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the present day. *Hydrological Sciences Journal*, 65(5), 770–785. <https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>
- Aybar Camacho, C. L. (2016). Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: caso de estudio río Vilcanota. In *Tesis de Pregrado*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Carmona T., A. (2007). *Ajuste de la Producción de Agua Simulada por el Modelo SWAT y Análisis de Sensibilidad ante Características Hidrológicas del Suelo en una Cuenca Pequeña de Alta Pendiente* (Issue March). Universidad Central de Venezuela.
- Carpenter, T. M., & Georgakakos, K. P. (2006). Intercomparison of lumped versus distributed hydrologic model ensemble simulations on operational forecast scales. *Journal of Hydrology*, 329(1–2), 174–185. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.013>
- Charaja Cutipa, F. (2018). *EL MAPIC en la Investigación Científica* (3rd ed.). Corporación SIRIO EIRL - Puno.



- Chen, J., Chen, J., Liao, A., Cao, X., Chen, L., Chen, X., He, C., Han, G., Peng, S., Lu, M., Zhang, W., Tong, X., & Mills, J. (2015). Global land cover mapping at 30 m resolution: A POK-based operational approach. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, *103*, 7–27. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.09.002>
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). trend: trend / change detection software (USER GUIDE). In *CRC for Catchment Hydrology*.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1988). *Hidrología aplicada*. Mc GrawHil.
- Clarke, R. T. (1973). A review of some mathematical models used in hydrology, with observations on their calibration and use. *Journal of Hydrology*, *19*(1), 1–20. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(73\)90089-9](https://doi.org/10.1016/0022-1694(73)90089-9)
- Condori Apaza, V., Mamani Luque, O. R., Alfaro Alejo, R., Laqui, W., & Condori, W. F. (2021). Analysis and impact of meteorological droughts in the agriculture of Puno region, Peru. *E3S Web of Conferences*, *304*, 03002. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202130403002>
- Dahmen, E. R., & Hall, M. J. (1990). Screening of Hydrological Data: Tests for Stationarity and Relative Consistency. *International Institute for Land Reclamation and Improvement/ILRI*, 58.
- Del Carmen Hämmerly, R. (2001). *Modelación de la Evapotranspiración con métodos de balance de agua*. Universidad Nacional del Litoral.
- Dile, Y. T., Daggupati, P., George, C., Srinivasan, R., & Arnold, J. (2016). Introducing a new open source GIS user interface for the SWAT model. *Environmental Modelling and Software*, *85*, 129–138. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2016.08.004>
- FAO-UNESCO. (1971). Mapa Mundial de Suelos 1 : 5 000 000. Volúmen IV: América del Sur. *Unesco, IV América*, 217.



- FAO. (2007). *FAO Digital Soil Map of the World* (Issue January 1994).
<https://data.apps.fao.org/map/catalog/srv/eng/catalog.search?id=14116#/metadata/446ed430-8383-11db-b9b2-000d939bc5d8>
- Fernandez-Palomino, C. A., Hattermann, F. F., Krysanova, V., Lobanova, A., Vega-Jácome, F., Lavado, W., Santini, W., Aybar, C., & Bronstert, A. (2021). A Novel High-Resolution Gridded Precipitation Dataset for Peruvian and Ecuadorian Watersheds: Development and Hydrological Evaluation. *Journal of Hydrometeorology*, 23(3), 309–336. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-20-0285.1>
- Fernandez-palomino, C. A., Hattermann, F. F., Lavado-casimiro, W. S., Vega-jacome, F., Aybar-Camacho, C. L., Lobanova, A., & Wortmann, M. (2018). *Evaluation of future climate change impacts on hydrologic processes in the Peruvian Altiplano region using SWAT*. 2018.
- Fernández, C. (2015). *Generación de base de datos de precipitación mensual grillada de alta resolución a nivel nacional*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Fernández Palomino, C. (2016). Asimilación y evaluación en base a satélite en modelamiento hidrológico en la cuenca del río Vilcanota. *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología Del Perú (SENAMHI)*.
- Fernández Palomino, C. (2017). *Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI).
- Galván González, L. (2011). *Modelización hidrológica del río Odiel: aplicación al estudio de la contaminación por drenaje ácido de minas*. Universidad de Huelva.
- George H. Hargreaves, & Zohrab A. Samani. (1985). Reference Crop Evapotranspiration from Temperature. *Applied Engineering in Agriculture*, 1(2), 96–99.



<https://doi.org/10.13031/2013.26773>

- Giraldo Malca, U. F. (2020). *Minería informal en la cuenca alta del río Ramis - impactos en el paisaje y evolución del conflicto socioambiental* (Pontificia Universidad Católica del Perú-Escuela de Posgrado (ed.); Primera ed).
- Gómez Gómez, M., Danglot Banck, C., & Vega Franco, L. (2003). Sinopsis de pruebas estadísticas no paramétricas. Cuándo usarlas. *Revista Mexicana de Pediatría*, 70(2), 91–99.
- Grayson, R. B., Argent, R. M., Nathan, R. J., McMahon, T. A., & Mein, R. G. (1996). *Hydrological Recipes: Estimation Techniques in Australian Hydrology* (1 ed.). Cooperative Research Centre for Catchment Hydrology.
- Heber Green, W., & Ampt, G. A. (1911). Studies on Soil Physics. *The Journal of Agricultural Science*, IV. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Hengl, T., De Jesus, J. M., MacMillan, R. A., Batjes, N. H., Heuvelink, G. B. M., Ribeiro, E., Samuel-Rosa, A., Kempen, B., Leenaars, J. G. B., Walsh, M. G., & Gonzalez, M. R. (2014). SoilGrids1km - Global Soil Information Based on Automated Mapping. *PLoS ONE*, 9(8). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0105992>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (2008). *Actualización del Balance Hídrico de la Cuenca del río Ramis* (Vol. 1). <http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/581.pdf>
- Karlie, M. (2020). *Attribution of the 2015-2016 hydrological drought in KwaZulu-Natal to anthropogenic climate change*. University of Cape Town.
- Kiamehr, R., & Sjöberg, L. E. (2005). Effect of the SRTM global DEM on the determination of a high-resolution geoid model: A case study in Iran. *Journal of Geodesy*, 79(9), 540–551. <https://doi.org/10.1007/s00190-005-0006-8>



- Kundzewicz, Z. W., & Robson, A. (2000). Detecting Trend and Other Changes in Hydrological Data. *World Climate Programme - Water*, May, 158. <http://water.usgs.gov/osw/wcp-water/detecting-trend.pdf>
- Lavado Casimiro, W. (2020). *Metodos Estadisticos en Hidrologia*. Universidad Nacional Agraria La Molina. <https://sites.google.com/site/mehepgirhunalm/home?authuser=0>
- Linsley, K., Kohler, A., & Paulhus, L. (1977). *Hidrología para ingenieros* (Segunda Ed). McGraw-Hill.
- Lobo, D., Gabriels, D., Ovalles, F., Santibañez, F., Moyano, M., Aguilera, R., Pizarro, R., Sanguesa, C., & Urra, N. (2006). Guía metodológica para la elaboración del mapa de zonas áridas, semiáridas y subhúmedas secas de América Latina y El Caribe. In *Publicado por el Programa Hidrológico Internacional (PHI) de la Organización de las Naciones Unidas para la Educación (UNESCO) y el Centro del Agua para Zonas Áridas de América Latina y el Caribe (CAZALAC)*.
- Ludwig, R., & Schneider, P. (2006). Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 60(5), 339–358. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2006.05.003>
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2016). *Estrategia Nacional de lucha contra la desertificación y la sequía 2016-2030*. 178.
- Mociño Velásquez, K. G. (2015). *La cobertura y uso del suelo en la producción de sedimentos y escurrimientos superficiales en la cuenca el Tejocote, México, mediante el modelo hidrológico SWAT*. Universidad Autonoma del Estado de Mexico.
- Monteith, J. L. (1965). Evaporation and environment. *Symposia of the Society for*



- Experimental Biology*, 19, 205–234.
- Moriassi, D. N., Arnold, J. G., Van Liew, M. W., Bingner, R. L., Harmel, R. D., & Veith, T. L. (2007). Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, 885–900. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- Neitsch, S., Arnold, J., & Kiniry, J. (2005). Herramienta de evaluación de suelo y agua documentación teórica. *Agricultural Research Service*, 415. <http://swatmodel.tamu.edu/media/46964/swat2005-theo-doc-spanish.pdf>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., Srinivasan, R., & Williams, J. R. (2002). Soil and Water Assessment Tool User's Manual. In *TWRI Report TR-192*. <http://swat.tamu.edu/media/1294/swatuserman.pdf>
- Neitsch, S. L., Arnold, J. G., Kiniry, J. R., & Williams, J. R. (2011). Soil & Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009. *Texas Water Resources Institute, TR-406*, 1–647. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.11.063>
- Nguyen, V. T., Dietrich, J., Uniyal, B., & Tran, D. A. (2018). Verification and Correction of the Hydrologic Routing in the soil and Water Assessment Tool. *Water (Switzerland)*, 10(10). <https://doi.org/10.3390/w10101419>
- Nikolakopoulos, K. G., Kamaratakis, E. K., & Chrysoulakis, N. (2006). SRTM vs ASTER elevation products. Comparison for two regions in Crete, Greece. *International Journal of Remote Sensing*, 27(21), 4819–4838. <https://doi.org/10.1080/01431160600835853>
- Omran, E. S. E. (2018). Hydrological Simulation of a Rainfed Agricultural Watershed Using the Soil and Water Assessment Tool (SWAT). In: Negm, A.M., Abu-Hashim, M. (Eds) *Sustainability of Agricultural Environment in Egypt: Part I. The Handbook*



- of Environmental Chemistry*, 76, 317–347. https://doi.org/10.1007/698_2018_338
- Oñate-Valdivieso, F., Bosque-Sendra, J., Sastre-Merlin, A., & Ponce, V. M. (2016). Calibration, validation and evaluation of a lumped hydrologic model in a mountain area in Southern Ecuador. *Agrociencia*, 50(8), 945–963.
- Oo, H. T., Zin, W. W., & Thin Kyi, C. C. (2020). Analysis of streamflow response to changing climate conditions using SWAT model. *Civil Engineering Journal*, 6(2), 194–209. <https://doi.org/10.28991/cej-2020-03091464>
- P. W. Gassman, M. R. Reyes, C. H. Green, & J. G. Arnold. (2007). The Soil and Water Assessment Tool: Historical Development, Applications, and Future Research Directions. *Transactions of the ASABE*, 50(4), 1211–1250. <https://doi.org/10.13031/2013.23637>
- Pfannerstill, M., Guse, B., & Fohrer, N. (2014). A multi-storage groundwater concept for the SWAT model to emphasize nonlinear groundwater dynamics in lowland catchments. *Hydrological Processes*, 28(22), 5599–5612. <https://doi.org/10.1002/hyp.10062>
- Ponce, V. M. (2014). *Engineering Hydrology, principles and practices*. Prentice Hall.
- Priestley, C. H. B., & Taylor, R. J. (1972). On the Assessment of Surface Heat Flux and Evaporation Using Large-Scale Parameters. *Monthly Weather Review*, 100(2), 81–92. [https://doi.org/10.1175/1520-0493\(1972\)100<0081:otaosh>2.3.co;2](https://doi.org/10.1175/1520-0493(1972)100<0081:otaosh>2.3.co;2)
- Ramos Fernández, L. (2013). *Estudio de la utilidad de la lluvia estimada de satélite en la modelación hidrológica distribuida* (PhD thesis).
- Reuter, H. I., Nelson, A., & Jarvis, A. (2007). An evaluation of void-filling interpolation methods for SRTM data. *International Journal of Geographical Information Science*, 21(9), 983–1008. <https://doi.org/10.1080/13658810601169899>



- Risco Sence, E., Lavado Casimiro, W., & Mejia Marcacuzco, A. (2019). Runoff generation at sub-basin scale in Peru (Pacific and Titicaca basins). *38th IAHR World Congress*, 38, 4702–4710. <https://doi.org/10.3850/38wc092019-1568>
- Rivasplata Varillas, P. E. (2012). *Desertificación y desertización en el antiplano andino peruano: Comparación de manejo del territorio por las sociedades pretéritas*. Universidad Internacional de Andalucía.
- Sakka, M. (2010). *Application and Comparison of Two Analytical Tools of Decision Support for the Management of Resources in a River Basin in Tunisia*. Tuscia University of Viterbo - Italy.
- Sanchez, P. A., Ahamed, S., Carré, F., Hartemink, A. E., Hempel, J., Huising, J., Lagacherie, P., McBratney, A. B., McKenzie, N. J., De Lourdes Mendonça-Santos, M., Minasny, B., Montanarella, L., Okoth, P., Palm, C. A., Sachs, J. D., Shepherd, K. D., Vågen, T. G., Vanlauwe, B., Walsh, M. G., ... Zhang, G. L. (2009). Digital soil map of the world. *Science*, 325(5941), 680–681. <https://doi.org/10.1126/science.1175084>
- Satgé, F., Bonnet, M. P., Timouk, F., Calmant, S., Pillco, R., Molina, J., Lavado-Casimiro, W., Arsen, A., Crétaux, J. F., & Garnier, J. (2015). Accuracy assessment of SRTM v4 and ASTER GDEM v2 over the Altiplano watershed using ICESat/GLAS data. *International Journal of Remote Sensing*, 36(2), 465–488. <https://doi.org/10.1080/01431161.2014.999166>
- Schumann, G., Matgen, P., Cutler, M. E. J., Black, A., Hoffmann, L., & Pfister, L. (2008). Comparison of remotely sensed water stages from LiDAR, topographic contours and SRTM. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 63(3), 283–296. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2007.09.004>



- Seiller, G., Anctil, F., & Perrin, C. (2012). Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, *16*(4), 1171–1189. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1171-2012>
- Seltman, H. J. (2018). Experimental Design and Analysis. In *College of Humanities and Social Sciences at Carnegie Mellon University*.
- Stisen, S., & Tumbo, M. (2015). Interpolation of daily raingauge data for hydrological modelling in data sparse regions using pattern information from satellite data. *Hydrological Sciences Journal*, *60*(11), 1911–1926. <https://doi.org/10.1080/02626667.2014.992789>
- Tan, M. L., Ficklin, D. L., Dixon, B., Ibrahim, A. L., Yusop, Z., & Chaplot, V. (2015). Impacts of DEM resolution, source, and resampling technique on SWAT-simulated streamflow. *Applied Geography*, *63*, 357–368. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2015.07.014>
- Tellez Rojas, A. F. (2016). *Modelación Hidrológica del Sistema de Eplotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro mediante el modelo de precipitación-escorrentoa HBV*.
- The Federal Interagency Stream Restoration Working Group. (1998). Stream Corridor Restoration: Principles, Processes, and Practices. In *Engineering Approaches to Ecosystem Restoration* (Issue 0120). [https://doi.org/10.1061/40382\(1998\)55](https://doi.org/10.1061/40382(1998)55)
- Towers, S. (2013). *Review of Probability Distributions, Basic Statistics, and Hypothesis Testing*. <https://sherrytowers.com/2013/08/29/aml-610-fall-2013-module-ii-review-of-probability-distributions/>
- Traverso, K. A., Mamani, J. A., & Alfaro, R. (2019). Generation of monthly average flow rates from the Hydrological characteristics in the Huancane river basin. *38th IAHR*



- World Congress - "Water: Connecting the World,"* 38, 4682–4691.
<https://doi.org/10.3850/38wc092019-1617>
- Traverso Yucra, K. arnold. (2018). *Generación de caudales medios mensuales a partir de las características hidrológicas de la cuenca del río Huancané.*
- Tufford, D., Samadi, S., & Carbone, G. (2013). Incorporating shallow aquifer uncertainty to streamflow prediction in a forested wetland Coastal Plain watershed. *GSA Annual Meeting*. https://gsa.confex.com/gsa/2013AM/finalprogram/abstract_228731.htm
- Tukey, J. W. (1977). Exploratory Data Analysis. In F. Mosteller (Ed.), *ADDISON-WESLEY* (Vol. 33). <http://www.jstor.org/stable/2529486>
- USDA-NRCS. (1999). *Engineering Hydrology Training Series: Module 2015 SCS Runoff Equation.*
- USDA-SCS. (2004). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook Chapter 10 Estimation of Direct Runoff from Storm Rainfall. *National Engineering Handbook.*
- USDA-SCS. (2007). Part 630 Hydrology National Engineering Handbook Chapter 19 Transmission Losses. *National Engineering Handbook,* 203–210.
<https://doi.org/10.2307/j.ctv1b0fwj1.22>
- Véliz Asurza, F. A., Traverso-Yucra, K. A., Lavado-Casimiro, W. S., Obando, O. F., Montesinos-Cáceres, C. A., & Llauca-Soto, H. O. (2020). Surface water resources assessment in Peru through SWAT hydrological model. *EGU General Assembly 2020, EGU2020-63*. <https://doi.org/https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-6308>
- Vilaysane, B., Takara, K., Luo, P., Akkharath, I., & Duan, W. (2015). Hydrological Stream Flow Modelling for Calibration and Uncertainty Analysis Using SWAT Model in the Xedone River Basin, Lao PDR. *Procedia Environmental Sciences,*



- 28(Sustain 2014), 380–390. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2015.07.047>
- Villon Bejar, M. (2002). *Hidrologia general - Maximo Villon.pdf*. Instituto Tecnológico de Costa Rica.
- Wei, X., Garcia-Chevesich, P., Alejo, F., García, V., Martínez, G., Daneshvar, F., Bowling, L. C., Gonzáles, E., Krahenbuhl, R., & McCray, J. E. (2021). Hydrologic Analysis of an Intensively Irrigated Area in Southern Peru Using a Crop-Field Scale Framework. *Water*, 13(3), 1–27. <https://doi.org/10.3390/w13030318>
- Williams, J. R., & Hann, R. W. (1972). Hymo, A problem-oriented computer language for building hydrologic models. *Water Resources Research*, 8(1), 79–86. <https://doi.org/10.1029/WR008i001p00079>
- Williams R., J. (1969). Flood Routing With Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Transactions of the ASAE*, 12(1), 0100–0103. <https://doi.org/10.13031/2013.38772>
- Zabala Carrión, B., & Guerrero Bohorquez, C. (2006). *Estudio Geoambiental Cuenca Rio Ramis-Boletín N°30 serie C-Geodinámica e Ingeniería Geológica*. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/282>
- Zapana Arpasi, J. W. (2019). *Incidencia de Precipitación grillada en la respuesta Hidrológica semidistribuida de la cuenca Huancané*. Universidad Nacional del Altiplano de Puno.



ANEXOS

Anexo A. Serie histórica de caudales

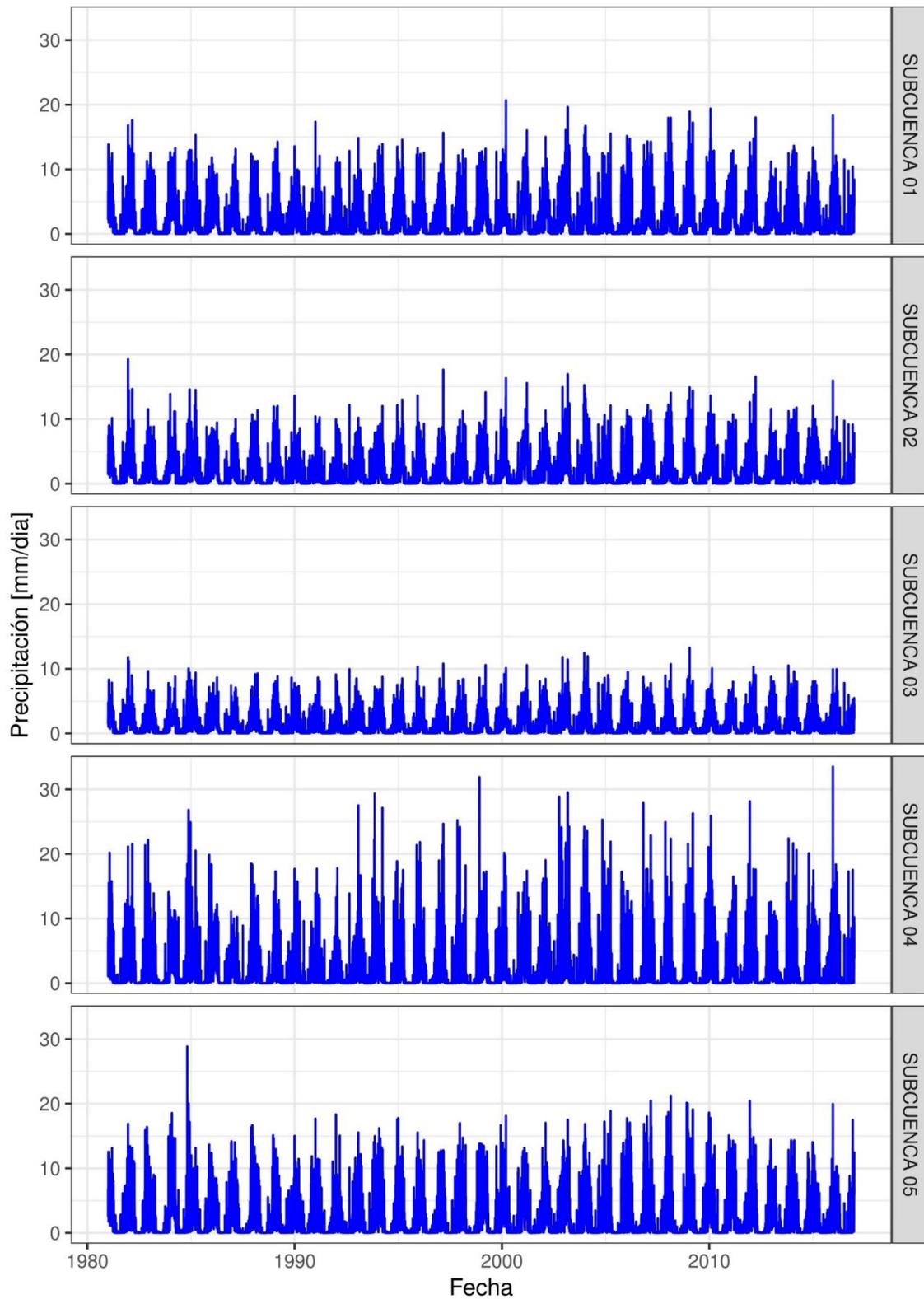
REGISTRO DE CAUDAL MEDIO MENSUAL (m ³ /s)														
Estacion	:	PUENTE RAMIS	Latitud :	15°15'19.11" S	S	Departamento	:	PUNO						
Id	:	210101	Long.:	69°52'25.63" W	W	Provincia	:	Huancane						
			Altitud :	3,825	msnm	Distrito	:	Taraco						
Nº REG	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
1	1,981	157.4	265.6	305.2	159.0	41.2	13.7	5.2	4.0	2.9	3.8	14.9	54.5	1,027.4
2	1,982	294.0	145.1	220.4	149.8	48.7	16.4	0.0	5.2	6.1	21.2	76.9	76.7	1,060.5
3	1,983	59.1	97.3	61.3	21.0	15.2	8.7	5.6	4.8	5.1	4.9	3.3	11.2	297.5
4	1,984	164.7	329.5	219.1	142.0	44.4	23.6	16.9	11.7	10.1	16.3	29.0	135.0	1,142.3
5	1,985	224.1	203.5	262.3	218.2	76.1	33.2	7.1	2.9	6.1	7.7	25.8	148.0	1,215.0
6	1,986	361.5	409.8	410.1	197.8	41.0	31.5	14.2	14.4	10.4	16.1	13.6	14.9	1,535.3
7	1,987	211.0	133.7	86.5	57.3	31.4	14.7	13.2	12.6	13.1	14.7	34.3	51.9	674.4
8	1,988	89.4	163.0	266.5	264.4	61.4	35.0	22.1	19.4	16.4	13.3	11.1	15.0	977.0
9	1,989	144.5	176.0	213.2	140.3	74.4	50.3	30.1	12.7	13.9	24.7	18.9	44.6	943.6
10	1,990	91.7	69.7	86.2	41.5	15.4	18.2	12.1	10.5	20.0	16.7	34.6	49.9	466.5
11	1,991	111.6	88.6	85.5	80.2	34.5	16.5	12.6	12.2	10.8	8.0	9.1	23.9	493.5
12	1,992	153.0	122.3	110.5	37.3	10.8	4.7	7.9	8.1	8.0	7.0	9.1	32.7	511.4
13	1,993	131.8	143.4	158.8	95.7	53.2	15.9	10.8	9.5	5.6	12.5	68.8	121.1	827.1
14	1,994	214.5	273.1	167.5	161.7	72.0	25.2	16.8	11.3	9.6	9.0	16.6	53.0	1,030.3
15	1,995	113.1	81.3	216.0	100.0	32.0	15.5	10.5	9.6	8.4	7.7	13.9	23.0	631.0
16	1,996	78.7	181.0	114.5	98.3	31.3	14.2	11.1	8.3	8.0	7.3	14.1	47.2	614.0
17	1,997	169.9	310.4	282.3	146.7	44.7	22.5	15.2	13.1	11.6	13.5	41.5	48.3	1,119.7
18	1,998	85.0	166.9	142.0	87.3	23.1	11.8	10.5	9.0	7.9	10.6	21.3	34.5	609.9
19	1,999	68.4	156.6	236.4	171.7	67.7	22.6	15.2	10.7	9.5	16.3	12.4	19.4	806.9
20	2,000	97.9	253.4	234.4	59.1	28.9	16.6	13.7	12.2	10.5	18.0	14.2	28.6	787.5
21	2,001	321.9	277.4	337.7	149.1	58.1	30.6	14.3	10.8	9.7	12.4	18.0	27.3	1,267.3
22	2,002	85.3	263.4	282.2	169.4	78.2	28.9	20.2	16.1	13.6	19.5	53.3	130.6	1,160.7
23	2,003	285.2	295.4	212.4	55.1	37.1	30.0	24.9	20.0	20.0	16.4	13.6	38.0	1,048.1
24	2,004	310.5	107.5	91.7	53.9	22.6	16.1	12.6	9.7	9.7	7.1	11.7	35.7	688.8
25	2,005	53.9	146.6	140.6	53.7	24.3	14.1	10.3	7.8	7.8	15.2	20.0	27.6	521.9
26	2,006	208.0	189.6	112.9	133.7	38.1	17.0	12.9	10.4	8.1	11.0	28.9	68.2	838.8
27	2,007	167.0	114.4	283.5	223.4	90.3	31.7	18.4	13.2	11.1	9.1	13.4	23.3	998.8
28	2,008	135.8	160.6	153.8	43.4	24.3	14.7	15.2	13.7	12.8	13.3	11.7	36.6	635.9
29	2,009	141.0	118.8	148.4	94.1	38.4	23.2	16.4	13.0	12.8	12.7	14.6	35.8	669.2
30	2,010	196.0	171.9	129.6	75.9	23.2	12.5	8.8	7.9	6.8	5.7	5.5	25.1	668.9
31	2,011	63.0	224.5	298.3	236.6	98.0	26.2	17.2	10.1	9.2	21.0	13.9	45.6	1,063.6
32	2,012	189.7	331.5	274.4	188.1	70.5	28.7	16.4	13.1	10.3	10.2	10.6	88.7	1,232.2
33	2,013	259.9	319.1	217.7	101.3	59.3	42.8	30.6	16.8	10.4	10.4	35.3	94.3	1,197.9
34	2,014	192.0	267.9	149.6	55.5	19.7	11.8	8.8	7.3	6.9	10.0	12.6	35.2	777.3
35	2,015	119.5	136.2	112.3	59.0	26.6	16.1	10.1	9.1	9.0	11.1	13.1	40.1	562.2
36	2,016	113.5	204.0	204.2	96.0	32.3	14.3	7.9	6.4	6.2	7.8	10.3	17.5	720.4
Nº Datos		36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36	36
Media		162.9	197.2	195.2	117.2	44.1	21.4	13.8	10.8	10.0	12.3	21.4	50.1	856.2
Desv. Estandar		80.90	84.32	83.50	63.68	22.60	9.82	6.37	3.88	3.72	4.97	16.56	35.75	281.84
Coef. Variacion		0.50	0.43	0.43	0.54	0.51	0.46	0.46	0.36	0.37	0.40	0.77	0.71	0.33
Caudal. Max.		361.5	409.8	410.1	264.4	98.0	50.3	30.6	20.0	20.0	24.7	76.9	148.0	410.1
Caudal. Min.		53.9	69.7	61.3	21.0	10.8	4.7	0.0	2.9	2.9	3.8	3.3	11.2	0.0
FUENTE : SENAMHI														



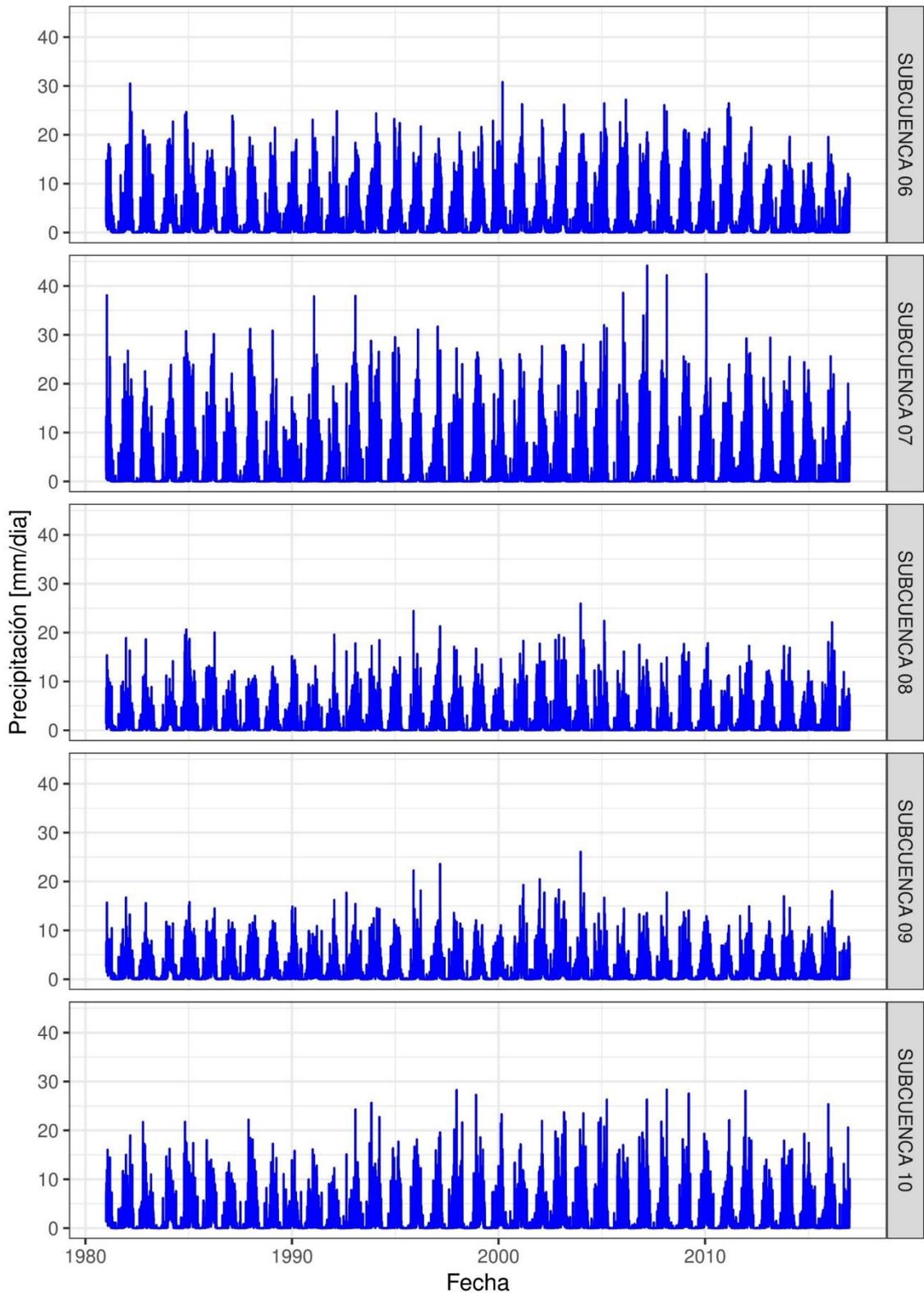
Anexo B. Código en “RStudio” para extraer la información del producto PISCO

```
## Leer puntos de estaciones de datos PISCO de prec a partir de
# puntos de estaciones que estan almacenados en un archivo *.csv
# Autores: Adrian Huerta & Waldo Lavado
setwd("C:\\Users\\PC\\Desktop\\Lee_PISCO") # Esta es la ruta de la
carpeta donde esta Pisco
1 # y deben estar el archivo *.csv con los puntos a extraer
2 # ojo que es / no \
3 # Descargar datos PISCO de:
4 http://www.SENAMHI.gob.pe/?p=observacion-de-inundaciones
5 # En la parte inferior ir a la carpeta Datos SONICS (DESCARGAS)
6 # bajar de preferencia los datos de la carpeta PISCO_v2.0
7 #ftp://ftp.SENAMHI.gob.pe/PISCO_v2.0/ ## PISCO_Pd_v2.0 son diarios
8 y
9 # PISCO_Pm_v2.0 son mensuales
10 # Este ejemplo es para los datos mensuales PISCOpm.nc
11 rm(list = ls())
12 install.packages("raster") #Instalar el paquete comentar # si ya
13 esta instalado
14 install.packages("ncdf4") #Instalar el paquete comentar # si ya esta
15 instalado
16 library(raster) #cargar el paquete
17 library(ncdf4) #cargar el paquete
18 ## Leer el archivo long_lat.csv (ver el archivo ejemplo)
19 ## para agregar solo dismnya o incremente las coordenadas de las
20 filas
21 ## XX Longitud e YY Latitud
22 long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
23 ### Ensamblamos los datos *.nc
24 raster_pp <- raster::brick("data.nc")
25 ## Asignamos las coordenadas
26 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
27 # Igualamos las proyecciones del raster y de laos puntos a extraer
28 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
29 # Extraemos los valores
30 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat,
31 cellnumbers = T)[,1]
32 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
33 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
34 # Guardamos los datos como "data_long_lat.csv" Ud puede cambiar el
35 nombre
# Las filas son los datos mensuales en este caso y las columnas son
los puntos seleccionados
# Ojo que el orden esta de acuerdo al archivo long_lat.csv, de la
columna NN
write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)
```

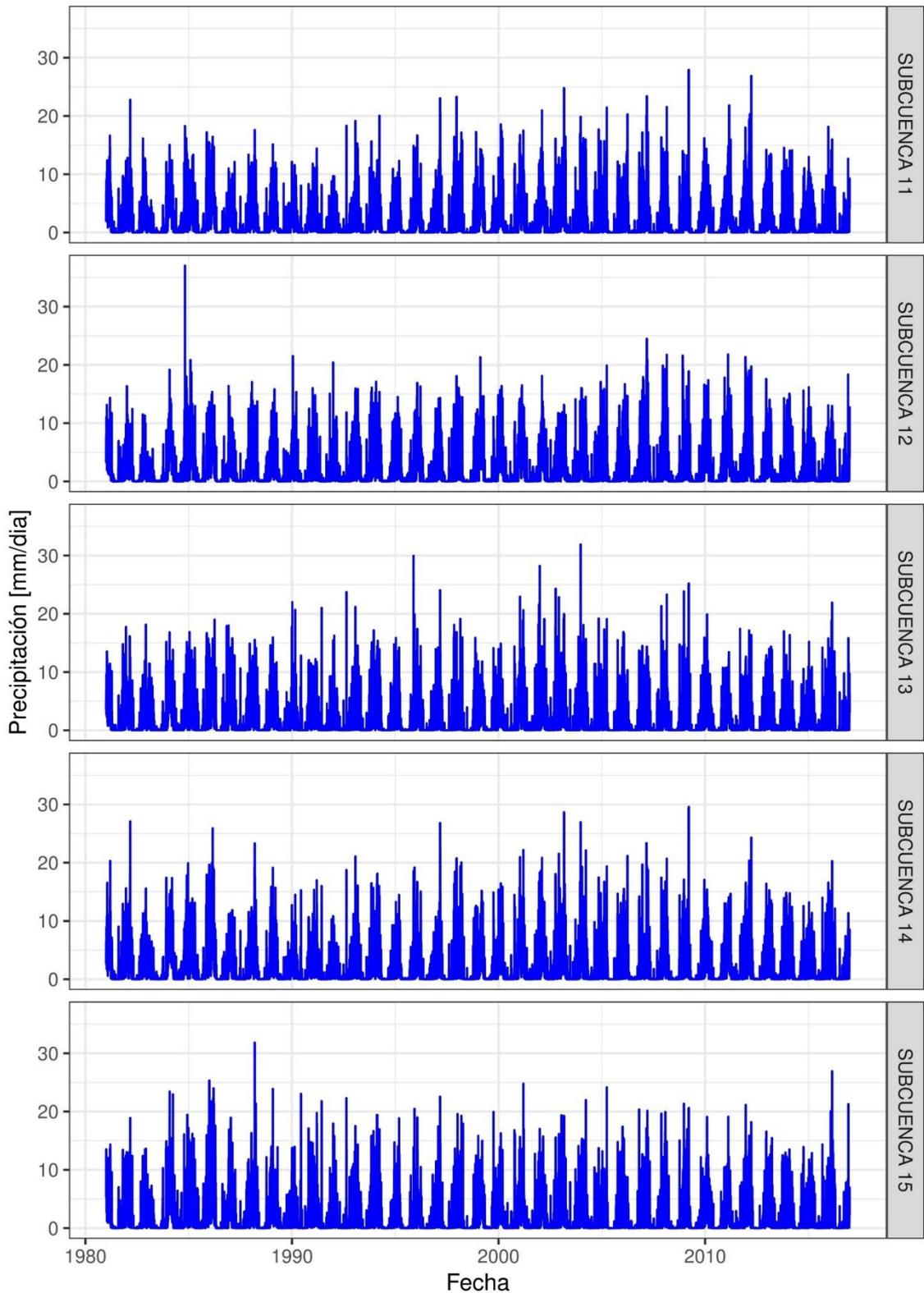
Anexo C. Precipitación media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis)



Precipitación Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 01, 02, 03, 04 y 05 del río Ramis (Periodo 1981-2016)

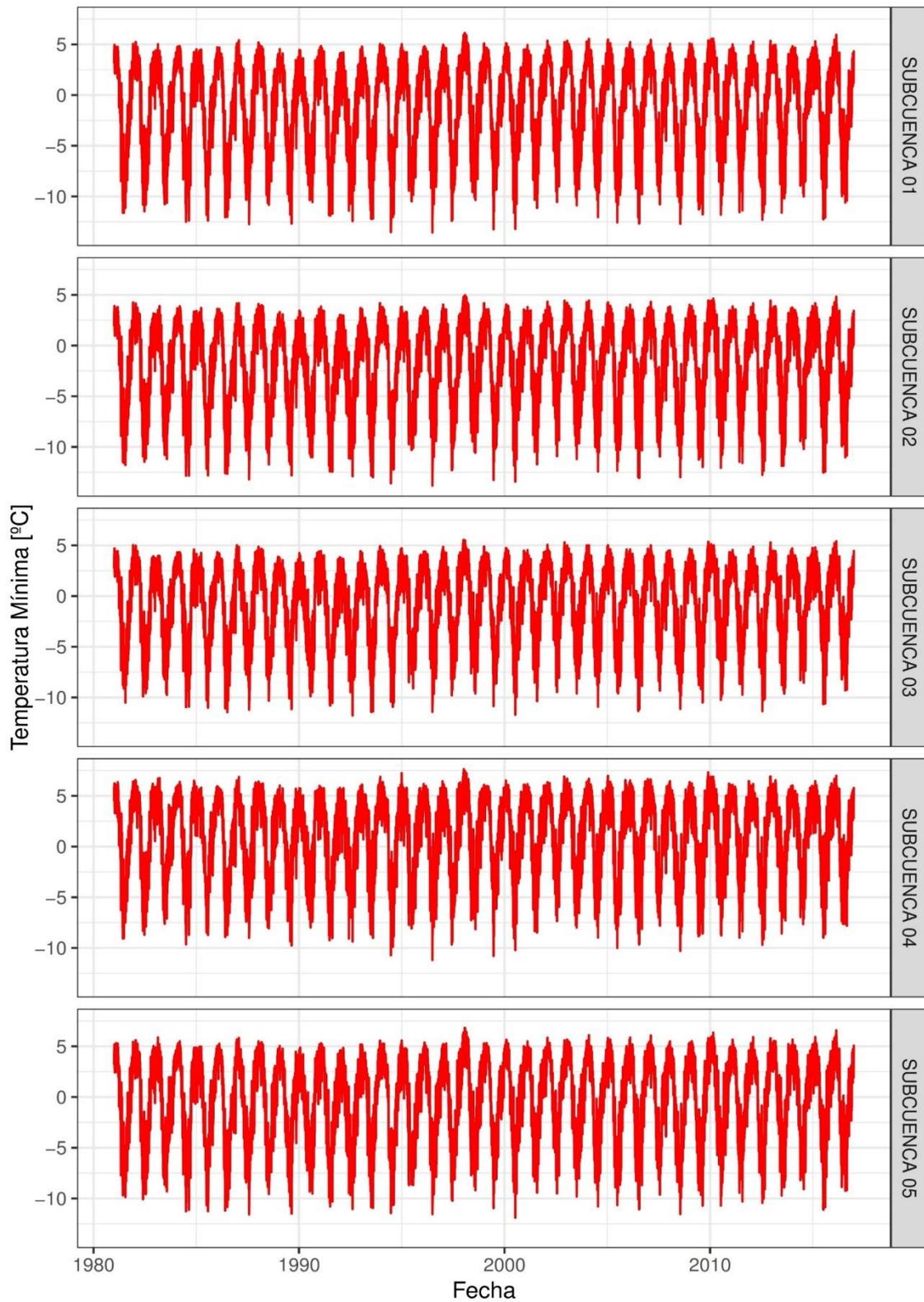


Precipitación Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 06, 07, 08, 09 y 10 del río Ramis (Periodo 1981-2016)

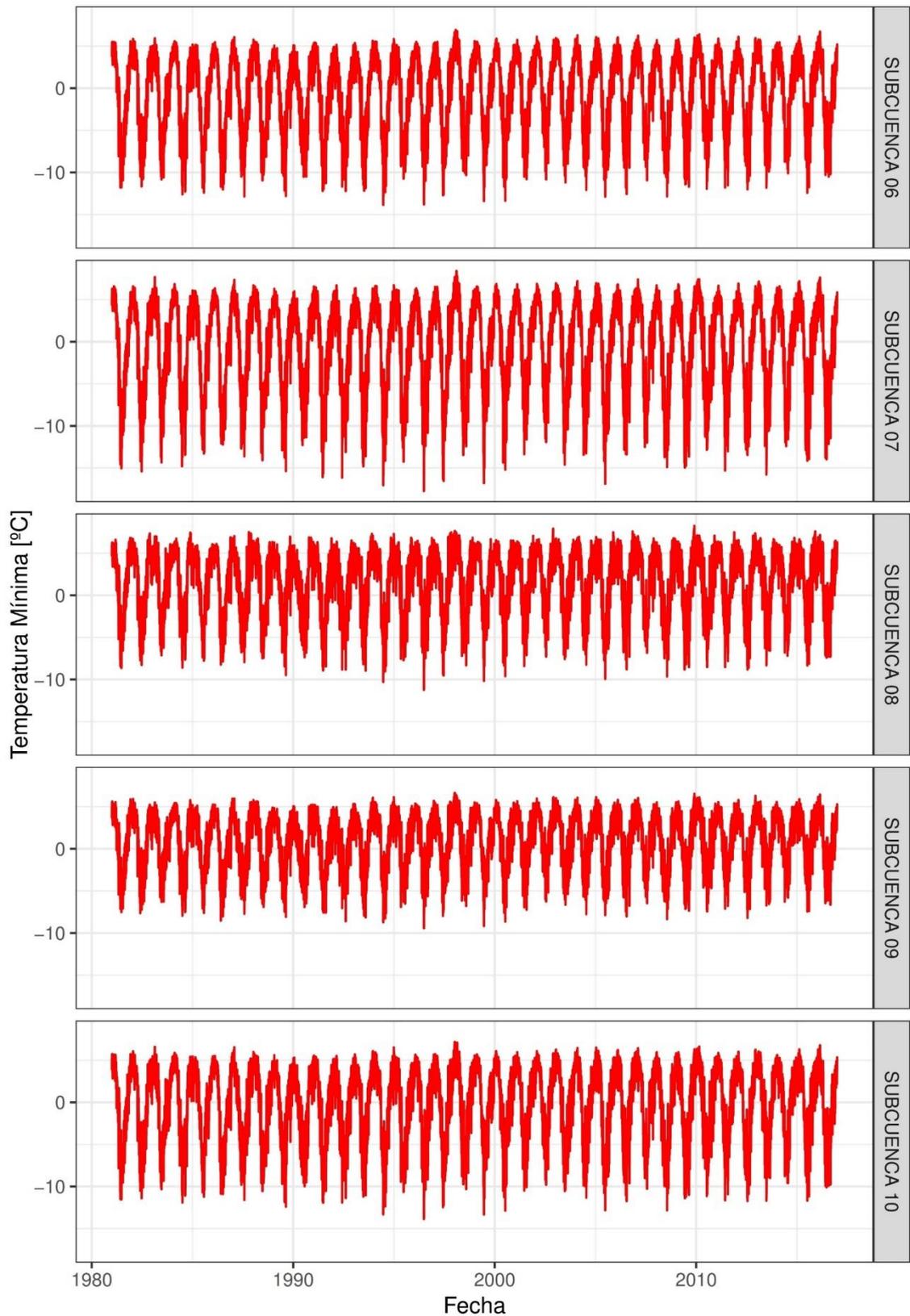


Precipitación Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 11, 12, 13, 14 y 15 (En la Subcuenca 15 se encuentra la Estación de Aforo) del río Ramis (Periodo 1981-2016)

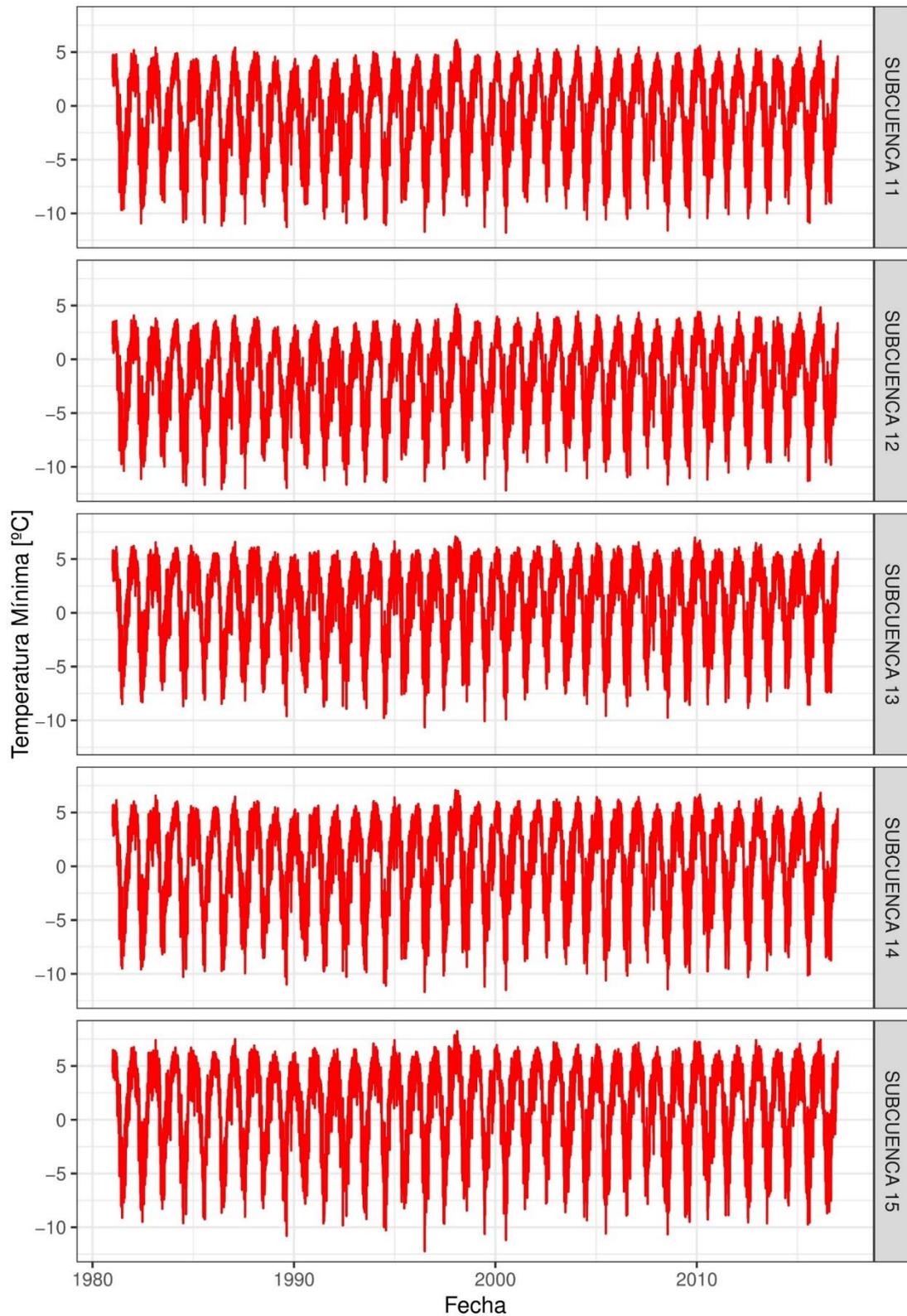
Anexo D. Temperatura mín. media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis)



Temperatura mínima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 01, 02, 03, 04 y 05 del río Ramis (Periodo 1981-2016)

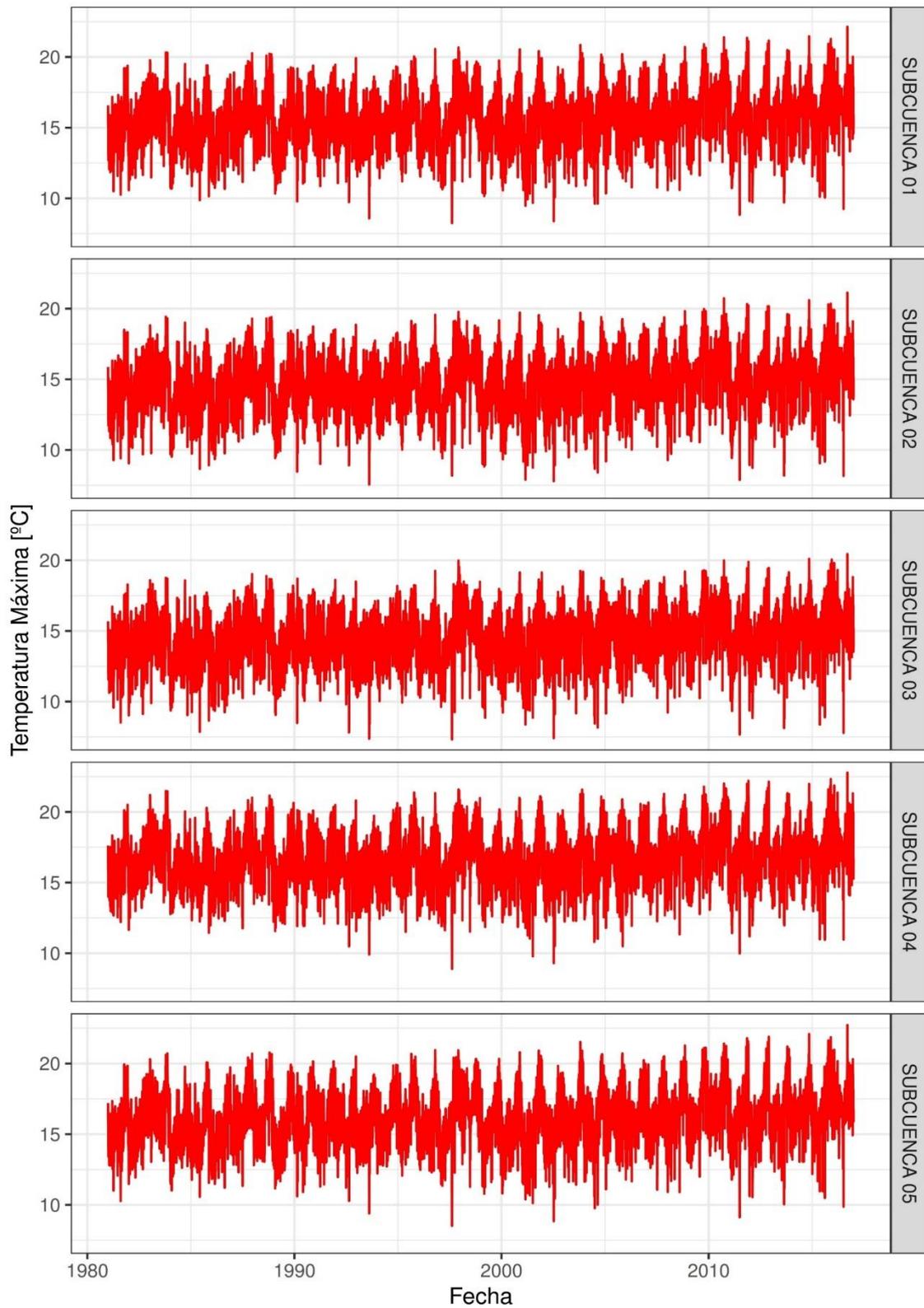


Temperatura mínima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 06, 07, 08, 09 y 10 del río Ramis (Periodo 1981-2016)

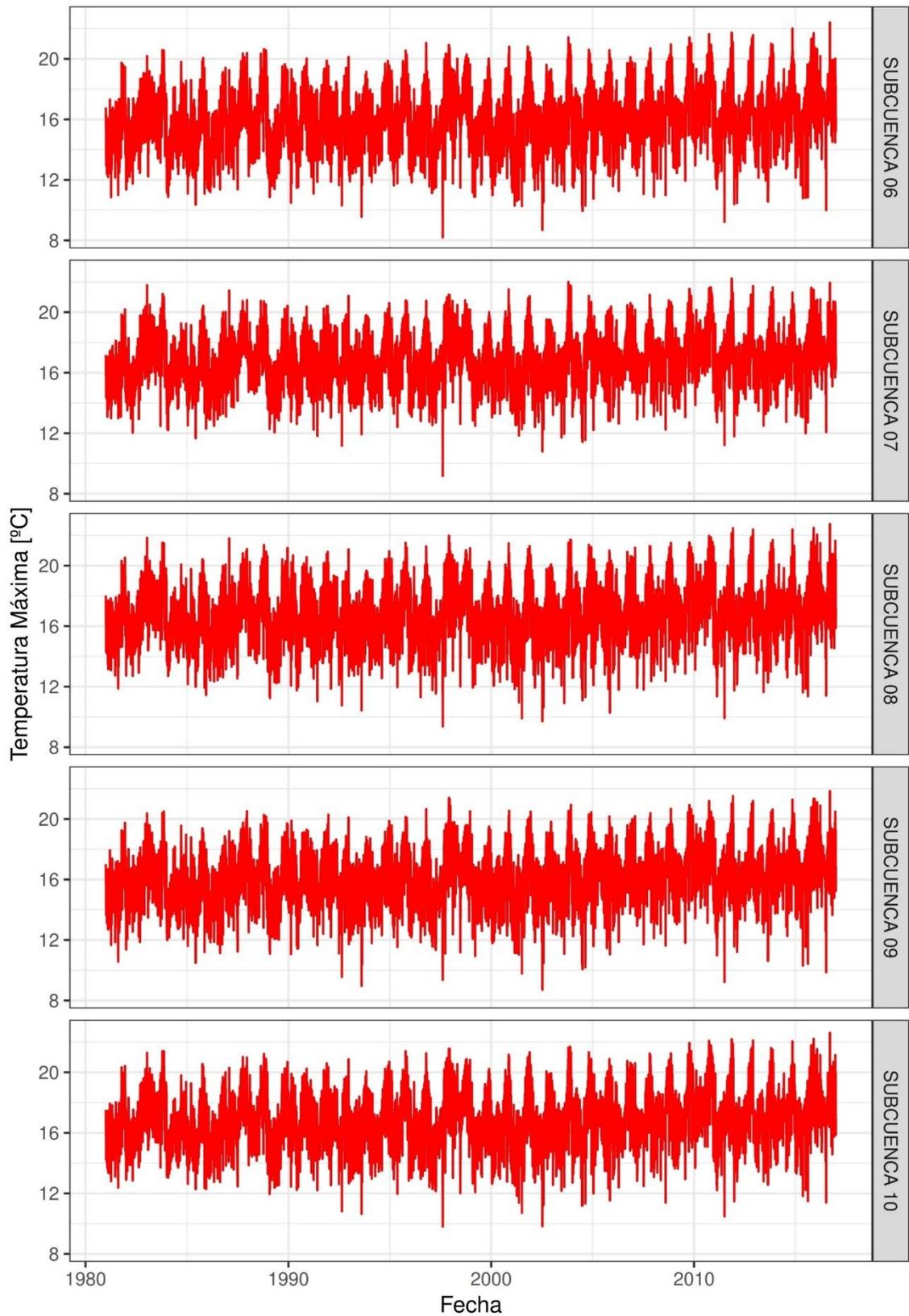


Temperatura mínima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 11, 12, 13, 14 y 15 (En la Subcuenca 15 se encuentra la Estación de Aforo) del río Ramis (Periodo 1981-2016)

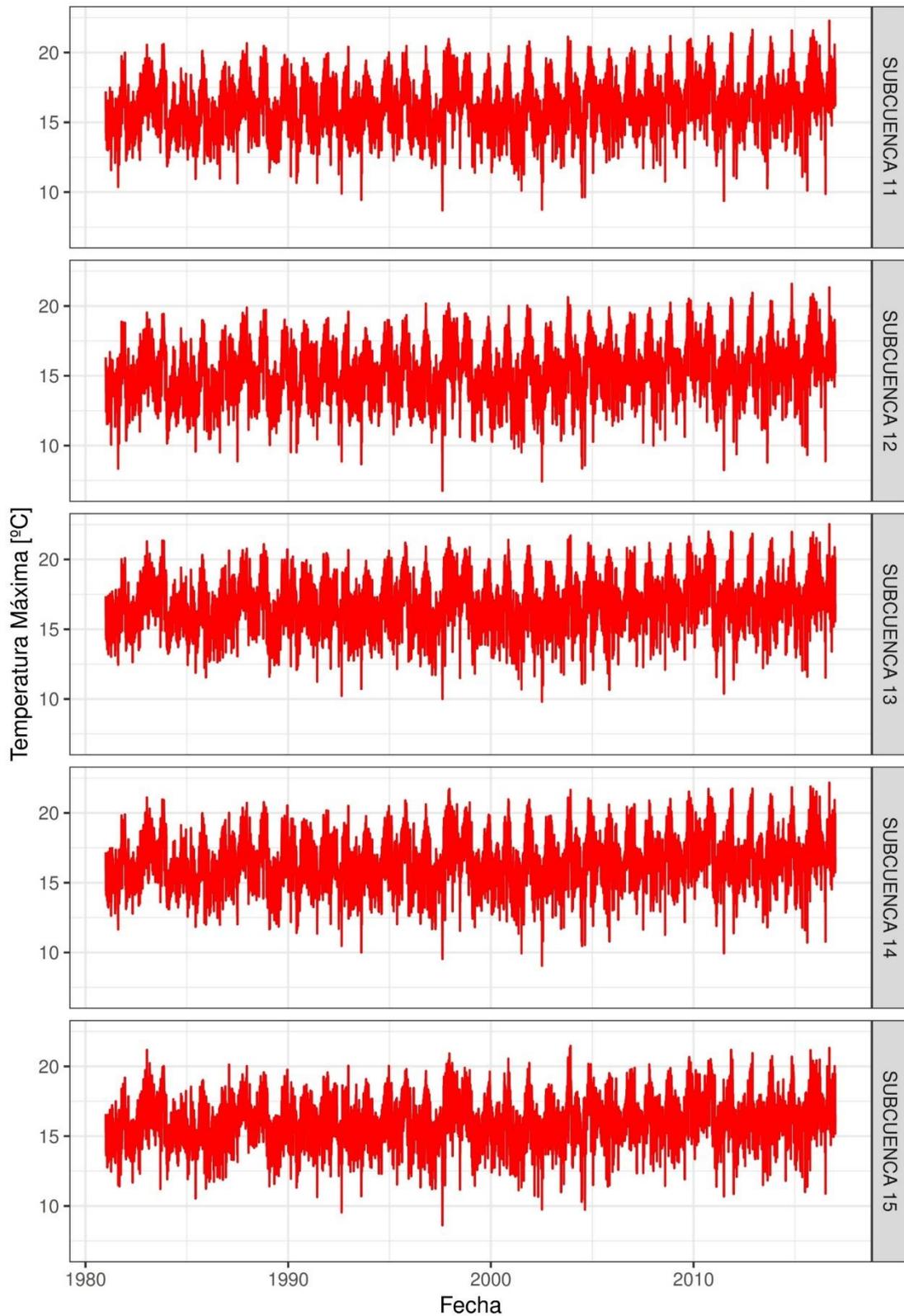
Anexo E. Temperatura máx. media areal de PISCO (subcuencas del río Ramis)



Temperatura máxima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 01, 02, 03, 04 y 05 del río Ramis (Periodo 1981-2016)



Temperatura mínima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 06, 07, 08, 09 y 10 del río Ramis (Periodo 1981-2016)



Temperatura máxima Promedio Areal del producto PISCO para las Subcuencas 11, 12, 13, 14 y 15 (En la Subcuenca 15 se encuentra la Estación de Aforo) del río Ramis (Periodo 1981-2016)



Anexo F. Contacto y materiales complementarios

El Autor puede ser contactado en línea mediante:

Correo: tcentenoj@gmail.com

Los metadatos están disponibles en línea en:

CENTENO JARITA, TOMAS (2022): PISCO_SWAT_Cuenca_Ramis_CJTG.

figshare. Dataset.

<https://doi.org/10.6084/m9.figshare.20147192.v7>

The screenshot shows the Figshare interface for a dataset named 'tables_Ramis'. At the top, there is the Figshare logo, a 'Browse' button, and a search bar with the text 'Search on figshare...'. Below the header, there is a 'Hide files' button. The dataset is displayed as a list of files:

- tables_Ramis.rar (3.63 MB)
- shapefiles_Ramis.rar (52.88 kB)

The dataset details section shows the following files:

- SUBBASIN OUTPUT FILE_main_CAL.csv
- PISCO_Tmin_areal - RAMIS.csv
- PISCO_Tmax_areal - RAMIS.csv
- PISCO_PP_areal - RAMIS.csv
- MAIN CHANNEL OUTPUT FILE_FLOW_OUT_RAMIS_CAL.csv
- AVE MONTHLY BASIN VALUES_average annual watershed monthly values_CAL.csv
- AVE ANNUAL BASIN VALUES_CAL.csv