

**UNIVERSIDAD CATÓLICA SEDES SAPIENTIAE**  
**FACULTAD DE INGENIERÍA AGRARIA**



Simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el  
comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha –  
Junín

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE  
INGENIERO AMBIENTAL

AUTOR

Olimber Fagustino Hurtado Carlos

ASESOR

José Víctor Ruíz Ccancece

Tarma, Perú

2022

**METADATOS COMPLEMENTARIOS****Datos del autor**

Nombres	Olimber Fagustino
Apellidos	Hurtado Carlos
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	75048331
Número de Orcid (opcional)	

**Datos del asesor**

Nombres	José Víctor
Apellidos	Ruiz Ccancce
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	10150044
Número de Orcid (obligatorio)	0000-0002-2804-6233

**Datos del Jurado****Datos del presidente del jurado**

Nombres	Oswaldo Clever
Apellidos	Villena Carpio
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	29671838

**Datos del segundo miembro**

Nombres	Eduardo Josué
Apellidos	Oyague Passuni
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	10772196

**Datos del tercer miembro**

Nombres	Claudia Daniela
Apellidos	Ramos Delgado
Tipo de documento de identidad	DNI
Número del documento de identidad	43118973

**Datos de la obra**

Materia*	Hidrología, variabilidad climática, modelo hidrológico SWAT +, teledetección, superficie de espejo y redes neuronales.
Campo del conocimiento OCDE Consultar el listado: <a href="#">enlace</a>	<a href="https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11">https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11</a>
Idioma (Normal ISO 639-3)	SPA - español
Tipo de trabajo de investigación	Tesis
País de publicación	PE - PERÚ
Recurso del cual forma parte (opcional)	
Nombre del grado	Ingeniero Ambiental
Grado académico o título profesional	Título Profesional
Nombre del programa	Ingeniería Ambiental
Código del programa Consultar el listado: <a href="#">enlace</a>	521066

\*Ingresar las palabras clave o términos del lenguaje natural (no controladas por un vocabulario o tesoro).

# ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

ACTA N° 024 - 2022/UCSS/FIA/DI

Siendo las 11:00 a. m. del día 13 de julio de 2022 - Universidad Católica Sedes Sapientiae, el Jurado de Tesis, integrado por:

- |                                  |                 |
|----------------------------------|-----------------|
| 1. Oswaldo Clever Villena Carpio | presidente      |
| 2. Eduardo Josué Oyague Passuni  | primer Miembro  |
| 3. Claudia Daniela Ramos Delgado | segundo Miembro |
| 4. José Víctor Ruiz Ccance       | asesor          |

Se reunieron para la sustentación de la tesis titulada **Simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha-Junín** que presenta el bachiller en Ciencias Ambientales, **Olimber Fagustino Hurtado Carlos** cumpliendo así con los requerimientos exigidos por el reglamento para la modalidad de titulación; la presentación y sustentación de un trabajo de investigación original, para obtener el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.

Terminada la sustentación y luego de deliberar, el Jurado acuerda:

APROBAR

DESAPROBAR

La tesis, con el calificativo de **BUENA** y eleva la presente Acta al Decanato de la Facultad de Ingeniería Agraria, a fin de que se declare **EXPEDITA** para conferirle el **TÍTULO** de **INGENIERO AMBIENTAL**.

Lima, 13 de julio de 2022.



Oswaldo Clever Villena Carpio  
PRESIDENTE



Eduardo Josué Oyague Passuni  
1° MIEMBRO



Claudia Daniela Ramos Delgado  
2° MIEMBRO



José Víctor Ruiz Ccance  
ASESOR

## **DEDICATORIA**

La presente tesis está dedicada antes que nada a Dios, quien es el forjador de mi sendero, por estar conmigo en los instantes menos simples, brindándome todo su amor y las fuerzas para enfrentar cada percance encontrado en el desarrollo de mi formación académica; de igual modo por estar en momentos de triunfos.

A mis padres, porque siempre estuvieron conmigo, brindándome su acompañamiento y sus consejos para hacer de mí una mejor persona.

A mis hermanos, sobrinos y familiares que me han ofrecidos su amor, su compañía y por el apoyo incondicional.

Olimber Fagustino, Hurtado Carlos

## **AGRADECIMIENTOS**

Quisiera manifestar mi agradecimiento a Dios, que continuamente colma mi vida con su bendición y también agradecer a mi familia, que siempre está ahí conmigo.

A mis progenitores Elsa Carlos Cristóbal y Welmer Hurtado Toribio; por ser mi pilar fundamental y haberme apoyado incondicionalmente, pese a las adversidades e inconvenientes que se presentaron.

A mis hermanos por colmar de alegría día tras día, por todos los consejos brindados, por compartir momentos de diversión, estudios y deportes.

A mis amigos (as), con todos los que compartí dentro y fuera de las aulas. Aquellos que se convirtieron como hermanos (as), gracias por todo su apoyo y diversión.

Agradezco a mi asesor de tesis Mg. Sc. José Víctor Ruíz Ccance, quien con su experiencia, conocimiento y motivación me orientó en la investigación.

Agradezco al Ing. Joel Antonio Espíritu Rojas, Especialista de SENAMHI, por su dedicación y compromiso, para la ejecución de esta investigación.

Agradezco a la plana docente de la Universidad Católica Sedes Sapientiae, con sus sabidurías, conocimientos y apoyos, motivaron a formarme como persona y profesional.

El autor

# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
Índice general .....	vii
Índice de tablas .....	ix
Índice de figuras .....	x
Índice de apéndices.....	xiii
Resumen .....	xiv
Abstract.....	xvi
Introducción.....	1
Objetivos.....	4
<b>CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Bases teóricas especializadas.....	16
1.2.1. Recurso Hídrico.....	16
1.2.2. Clasificación del Agua.....	17
1.2.3. Ciclo hidrológico .....	18
1.2.4. Componentes del ciclo hidrológico .....	19
1.2.5. Modelos hidrológicos .....	22
1.2.6. Clasificación de los modelos hidrológicos .....	23
1.2.7. Sistema de Información Geográfica (SIG) en los Recursos Hídricos .....	24
1.2.8. Modelo SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL).....	26
1.2.9. Técnicas de aprendizaje computacional .....	35
1.2.10. Cambio climático.....	37
<b>CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
2.1. Diseño de la investigación .....	39
2.1.1. Lugar y fecha.....	39
2.1.2. Características generales del área de estudio .....	39
2.1.3. Materiales .....	53
2.1.4. Población y muestra .....	55
2.1.5. Descripción de la Investigación .....	55

2.1.6. Identificación de variables y su mensuración .....	79
2.1.7. Análisis de datos.....	80
<b>CAPÍTULO III. RESULTADOS .....</b>	<b>81</b>
3.1. Determinación de la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha a través de la modelización en el periodo 1981 - 2018.....	81
3.2. Influencia de la variabilidad climática sobre la variación de los caudales .....	92
3.3. Análisis de la variación de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha.....	95
3.4. Estimación del comportamiento hídrico mediante redes neuronales.....	100
<b>CAPÍTULO IV. DISCUSIONES .....</b>	<b>104</b>
4.1. Determinación de la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha a través de la modelización en el periodo de 1981 – 2018.....	105
4.2. Influencia de la variabilidad climática sobre la variación de los caudales .....	107
4.3. Análisis de la variación de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha.....	109
4.4. Estimación del comportamiento hídrico mediante redes neuronales.....	110
<b>CAPÍTULO V. CONCLUSIONES .....</b>	<b>112</b>
<b>CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES.....</b>	<b>114</b>
<b>REFERENCIAS .....</b>	<b>115</b>
<b>TERMINOLOGÍA .....</b>	<b>128</b>
<b>APÉNDICES .....</b>	<b>131</b>

## ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha.....	48
Tabla 2. Población total en la cuenca del lago Chinchaycocha .....	51
Tabla 3. Tierra y actividad agropecuaria de las comunidades campesinas ubicadas al entorno del lago Chinchaycocha .....	52
Tabla 4. Softwares manipulados.....	54
Tabla 5. Información geográfica proporcionada en SWAT .....	57
Tabla 6. Reclasificación de coberturas reconocidas por el modelo SWAT.....	60
Tabla 7. Clasificación de Pendientes .....	63
Tabla 8. Ubicación de estaciones meteorológicas del estudio.....	66
Tabla 9. Parámetros empleados en el análisis de sensibilidad.....	70
Tabla 10. Criterios para la evaluación del desempeño del modelo hidrológico y sus pertinentes distribuciones.....	72
Tabla 11. Resumen de Imágenes Landsat.....	73
Tabla 12. Variable y su Mensuración.....	79
Tabla 13. Resultado del análisis de sensibilidad de los parámetros usando JAMES + .....	83
Tabla 14. Parámetros de eficiencia del Modelo a paso mensual de caudales .....	84
Tabla 15. Resultado del parámetro calibrado.....	87
Tabla 16. Análisis de Varianza (ANOVA) para la variable del área de espejo del lago.....	96
Tabla 17. Estimación de los caudales por red neuronal al año 2028.....	102
Tabla 18. Registro de datos meteorológicas de la estación de Cerro de Pasco -2017.....	135
Tabla 19. Registro de datos meteorológicas de la estación de Cerro de Pasco - 2018.....	135
Tabla 20. Registro de datos meteorológicas de la estación de Junín - 2017 .....	136
Tabla 21. Registro de datos meteorológicas de la estación de Junín - 2018.....	136
Tabla 22. Datos de Caudal observado ( $m^3/mes$ ) en la salida de la presa para la etapa de enero de 2014 a diciembre de 2018.....	137
Tabla 23. Datos de caudales simulados ( $m^3/mes$ ) para el periodo de enero de 1981 a diciembre del 2018 .....	138

## ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Ciclo hidrológico del agua.....	19
<i>Figura 2.</i> Mecanismo de formación de la precipitación.....	20
<i>Figura 3.</i> Parámetros requeridos para el cálculo de la evapotranspiración.....	21
<i>Figura 4.</i> Tipificación de la modelación hidrológica.....	23
<i>Figura 5.</i> Sistema de Información Geográfica. ....	25
<i>Figura 6.</i> Componentes del modelo SWAT.....	27
<i>Figura 7.</i> Procesos del ciclo del agua en SWAT.....	28
<i>Figura 8.</i> Simulación de movimiento del agua en SWAT.. ....	31
<i>Figura 9.</i> Procesos de corriente modelados por SWAT.....	35
<i>Figura 10.</i> Redes Neuronales Artificiales.. ....	36
<i>Figura 11.</i> Unidades hidrográficas.....	42
<i>Figura 12.</i> Mapa Geológico de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).....	44
<i>Figura 13.</i> Mapa Geomorfológico de la cuenca del lago Chinchaycocha. ....	45
<i>Figura 14.</i> Mapa de zonas de vida de la cuenca del lago Chinchaycocha. ....	47
<i>Figura 15.</i> Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha.. ....	49
<i>Figura 16.</i> Diagrama de flujo de la metodología. ....	56
<i>Figura 17.</i> Variación altitudinal de la cuenca del lago Chinchaycocha.....	58
<i>Figura 18.</i> Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha. ....	59
<i>Figura 19.</i> Portal de descargas de GeoNetwork.....	61
<i>Figura 20.</i> Mapa de tipo de suelos en la cuenca del lago Chinchaycocha.....	62
<i>Figura 21.</i> Mapa de Pendientes de la cuenca del lago Chinchaycocha.....	64
<i>Figura 22.</i> Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas de la zona de estudio.....	67
<i>Figura 23.</i> Recorte por el perímetro del área de influencia.....	74
<i>Figura 24.</i> Imagen Landsat con nube.....	75
<i>Figura 25.</i> Imagen Landsat sin nube. ....	75
<i>Figura 26.</i> Imagen Landsat sin presencia de nubes.....	76
<i>Figura 27.</i> Imagen Landsat 7 corregido. ....	77
<i>Figura 28.</i> Imagen Landsat 7 bandeado. ....	77

<i>Figura 29.</i> Imagen Landsat convertida de ND a Radiancia. ....	77
<i>Figura 30.</i> Subcuencas generadas por QSWAT +. ....	82
<i>Figura 31.</i> Series de caudales mensuales observados y simulados para el período de calibración.....	85
<i>Figura 32.</i> Prueba de correlación de Pearson, con el comando cor.test en R. ....	85
<i>Figura 33.</i> Series de caudales mensuales observados y simulados para el período de validación.....	86
<i>Figura 34.</i> Prueba de correlación de Pearson, con el comando cor.test en R.. ....	87
<i>Figura 35.</i> Precipitación y serie de caudales simulados en el periodo 1981-2018. . ....	88
<i>Figura 36.</i> Precipitación en la estación Junín en los años 2017 – 2018, obtenidos de PISCO inestable y de la estación. ....	89
<i>Figura 37.</i> Precipitación en la estación Cerro de Pasco en los años 2017 – 2018, obtenidos de PISCO inestable y de la estación. ....	90
<i>Figura 38.</i> Mapa de Caudal medio anual de la zona de estudio del periodo 1981-2018.. ....	91
<i>Figura 39.</i> Descomposición de series de tiempo de la variable precipitación.. ....	92
<i>Figura 40.</i> Descomposición de series de tiempo de la variable temperatura máxima.. ....	92
<i>Figura 41.</i> Descomposición de series de tiempo de la variable temperatura mínima.....	93
<i>Figura 42.</i> Descomposición de series de tiempo de la caudal.....	93
<i>Figura 43.</i> Correlación de las variables evaluadas.....	94
<i>Figura 44.</i> Variación de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha (2014-2018).. ....	95
<i>Figura 45.</i> Boxplot de la variable superficie de espejo del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018.....	97
<i>Figura 46.</i> Boxplot de la variable Caudal (Simulado) en el periodo 2014-2018.....	97
<i>Figura 47.</i> Boxplot de la variable Volumen en el periodo 2014-2018.. ....	98
<i>Figura 48.</i> Boxplot de la variable Niveles en el periodo 2014-2018.. ....	98
<i>Figura 49.</i> Matriz de correlación entre las variables evaluadas.. ....	99
<i>Figura 50.</i> Caudal observado vs caudal predicho. ....	100
<i>Figura 51.</i> Predicción del caudal al 2028.....	101
<i>Figura 52.</i> Ubicación Política - geográfica en el ámbito nacional. ....	131
<i>Figura 53.</i> Ubicación Administrativa de la Cuenca del lago Chinchaycocha.....	132
<i>Figura 54.</i> Red vial de la Cuenca del lago Chinchaycocha e Intercuencas.....	133

<i>Figura 55.</i> Mapa Vial de La Cuenca del lago Chinchaycocha.....	134
<i>Figura 56.</i> Script para extraer datos PISCO.....	139
<i>Figura 57.</i> Script para interpolación de caudal observado, utilizando la herramienta interpolación lineal. ....	139
<i>Figura 58.</i> Script para la prueba de bondad de ajuste en la Calibración y Validación del modelo SWAT +.....	140
<i>Figura 59.</i> Script para la Calibración y Validación del modelo SWAT +. ....	140
<i>Figura 60.</i> Script para eliminar las nubes mediante la aplicación de la herramienta RasterStack.. ....	141
<i>Figura 61.</i> Generación del área de entrenamiento en el Software QGIS – Tabla de Atributos. ....	141
<i>Figura 62.</i> Script para Clasificación no Supervisada.....	142
<i>Figura 63.</i> Mapas de la clasificación Supervisada del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018 en la época de estiaje. . ....	147
<i>Figura 64.</i> Script para estimación de Caudales.....	148
<i>Figura 65.</i> Script para Análisis de Tendencias.....	149
<i>Figura 66.</i> Script para Coeficiente de Correlación.....	149
<i>Figura 67.</i> Script para Análisis de Varianza de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha.....	150
<i>Figura 68.</i> Script de Correlación de Variables.....	150
<i>Figura 69.</i> Solicitud de datos hidrológicos del lago Chinchaycocha a la Administración Local de Agua Pasco.....	151

## ÍNDICE DE APÉNDICES

	Pág.
Apéndice 1. Ubicación Política de la Cuenca del lago Chinchaycocha .....	131
Apéndice 2. Ubicación Administrativa de la Cuenca del lago Chinchaycocha .....	132
Apéndice 3. Red vial de la Cuenca del lago Chinchaycocha e Intercuencas .....	133
Apéndice 4. Mapa Vial de La Cuenca del lago Chinchaycocha .....	134
Apéndice 5. Registros de datos Meteorológicas.....	135
Apéndice 6. Datos de caudales observados y estimados (m <sup>3</sup> /mes) .....	137
Apéndice 7. Scripts en la aplicación del modelo hidrológico y en la aplicación de la teledetección.....	139
Apéndice 8. Mapas de la Clasificación Supervisada del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018 en la época de estiaje.....	142
Apéndice 9. Script para estimar el comportamiento hídrico con redes neuronales.....	148
Apéndice 10. Script para determinar la variabilidad climática y la influencia sobre el recurso hídrico en el periodo 1981-2018 .....	149
Apéndice 11. Scripts para determinar la variación de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018, en la época de estiaje .....	150
Apéndice 12. Solicitud de datos hidrológicos (1988-2018) del lago Chinchaycocha a la Administración Local de Agua Pasco .....	151

## RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo evaluar la simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, mediante la aplicación de un modelo determinístico. El estudio ha sido de tipo descriptivo e investigación no experimental, de corte longitudinal, puesto que se enfocó fundamentalmente en la observación, recolección de datos, análisis estadísticos y explicación de los cambios encontrados, a través de periodos en el tiempo. Para simular el comportamiento hidrológico en el periodo comprendido entre 1981-2018, se empleó el modelo hidrológico SWAT + (Herramienta de Evaluación de Suelo y Agua); dicho modelo fue calibrado, obteniendo valores de  $R^2$  de 0,59 y p-value de  $1,284e-05$ , y validado obteniendo valores de PBIAS de 18,5 y p-value de 0,0501. Asimismo, los procesos de calibración y validación fueron comparados con datos observados de la salida de la represa Upamayo, siendo estos caudales regulados. Por otro lado, los componentes empleados para el modelo fueron las variables hidrometeorológicas y geográficas. En el presente estudio, para analizar la incidencia de la variabilidad climática sobre el recurso hídrico en el periodo de interés (1981-2018) se utilizó las principales variables meteorológicas (temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación) obtenidos de los datos PISCO (*Peruvian Interpolation of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Stations*) y los dos últimos años de las estaciones de SENAMHI. Por otro lado, se empleó la teledetección, para percibir el cambio de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha (2014-2018) en la época de estiaje. Los resultados de la simulación mostraron que, el caudal de escurrimiento superficial máximo anual fue de 16 200  $m^3/año$  corresponde al año 2017 y el mínimo anual fue de 1 610  $m^3/año$  corresponde al año 1981. Por otro lado, la variable precipitación y el caudal simulado tuvo un  $R^2$  de 0,81, en cambio las temperaturas máximas y mínimas mostraron correlación negativa con el caudal. Asimismo, los dos últimos años evaluados mostraron una variabilidad en la precipitación, provocando alteraciones en el recurso hídrico. Además, la superficie del espejo del lago Chinchaycocha en el periodo y época evaluada, no presenta diferencias significativas en promedio, lo cual indica que no hubo cambio en el comportamiento hídrico superficial. Finalmente se proyectó el comportamiento hídrico de la cuenca en base a los resultados de la simulación, mediante redes neuronales al año 2028. El caudal máximo fue de 2 354  $m^3/mes$  con un intervalo de 95 % en el

mes de enero del año 2021. Asimismo, el mínimo caudal que alcanzó es en el mes de agosto del año 2019, oscilando entre 278 m<sup>3</sup>/mes con intervalo de 95 %.

**Palabras clave:** Hidrología, variabilidad climática, modelo hidrológico SWAT +, teledetección, superficie de espejo y redes neuronales.

## ABSTRACT

This research aimed Its objective was to evaluate the simulation of the impact of climatic variability on the hydrological behavior of the Chinchaycocha - Junín lake basin, through the application of a deterministic model. The study is a descriptive and non experimental longitudinal research, since it is mainly focused on observation, data collection, statistical analysis and explanation of the changes found, through periods of time. To simulate the hydrological behavior in the period between 1981-2018, the SWAT + hydrological model (Soil and Water Assessment Tool) was used. The model was calibrated obtaining an  $R^2$  value of 0,59 and a p-value of 1,284e-05, and validated obtaining a PBIAS value of 18,5 and a p-value of 0,0501. Likewise, the calibration and validation processes were compared with data observed from the outlet of the Upamayo dam, these flows being regulated. On the other hand, the components used for the model were the hydrometeorological and geographical variables. In this study, the main meteorological variables (maximum temperature, minimum temperature, and precipitation) obtained from PISCO data (Peruvian Interpolation of the SENAMHIs Climatological and Hydrological Stations) and from SENAMHI stations (for the last two years) were used to analyze the incidence of climate change on water resources in the period of interest (1981-2018). On the other hand, remote sensing data was used to perceive the change in the mirror surface of Lake Chinchaycocha (2014-2018) in the dry season. The results of the simulation showed that the maximum annual surface runoff flow is 16 200 m<sup>3</sup>/year corresponding to the year 2017 and the minimum annual is 1 610 m<sup>3</sup>/year corresponding to the year 1981. On the other hand, the precipitation variable and the simulated flow had an  $R^2$  of 0,81, while the maximum and minimum temperatures showed a negative correlation with the flow. Likewise, the last two years evaluated showed a variability in precipitation, causing alterations in the water resource. In addition, the mirror surface of lake Chinchaycocha in the period and time evaluated does not present significant differences on average, which indicates that there was no change in surface water behavior. Finally, the water behavior of the basin, was projected based on the results of the simulation, through neural networks to the year 2028. The maximum flow was 2 354 m<sup>3</sup>/month with an interval of 95% in the month of January of the year 2021. Likewise, the minimum flow that it reached is in the month of August of the year 2019, oscillating between 278 m<sup>3</sup>/month with an interval of 95%.

**Keywords:** Hydrology, climate change, hydrological model SWAT +, remote sensing, mirror surface and neural networks.

## INTRODUCCIÓN

Según la Ley General de Recursos Hídricos N° 29338, menciona que el agua es vital, vulnerable y estratégicamente importante para el desarrollo sostenible, preservando los recursos naturales de todo el ecosistema para la seguridad de la nación (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2009). Asimismo, la gestión y la planificación de recursos hídricos en todo el mundo se ha convertido en una tarea desafiante debido a las incertidumbres del cambio climático (Ficklin *et al.*, 2013).

El cambio climático hoy es un problema global, preocupante por los efectos que producen en la disponibilidad hídrica en muchas regiones (Mahmoud *et al.*, 2014). En los últimos años, la variabilidad del clima ha aumentado, influyendo en el comportamiento hídrico de las lagunas, lagos y nevados. Damonte *et al.* (2017, p. 18), refieren que "si estos cambios son más pronunciados, significa que cada año es más probable que tengamos días más fríos y cálidos o que la lluvia sea más fuerte". En este sentido, es necesario evaluar estos cambios, principalmente en regiones con escasez de recursos hídricos, alta sensibilidad climática y desarrollo socioeconómico dinámico.

En Perú, la variabilidad climática ha provocado cambios significativos en varios ecosistemas terrestres y marinos, que afectan a los glaciares tropicales, lo que se conoce como retroceso glaciar. Por otro lugar, en las montañas altas, las lagunas proglaciales y periglaciales presentan comportamientos dinámicos que tienen dimensiones y volúmenes versátiles (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2014). Además, el impacto climático en los últimos años ha afectado los ecosistemas de alta montaña. Los cambios en la precipitación anual varían: en algunos lugares con más precipitación y en otros con menos precipitación, pero con una estacionalidad más pronunciada; es decir, sequías prolongadas y cortos periodos de lluvia, muchos de los cuales son torrenciales (ANA, 2014). Asimismo, en los Andes, hay una mayor variabilidad en la presencia de heladas y sequías, lo cual representa un problema grave para las actividades agropecuarias y la conservación de la biodiversidad (Damonte *et al.*, 2017).

La cuenca del lago Chinchaycocha se encuentra ubicada en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes Centrales del Perú. La precipitación pluvial, en una extensa red de microcuenas, da lugar a la escorrentía que alimenta el lago Chinchaycocha, lo cual resulta importante para el desarrollo de la biodiversidad, ya que es un hábitat de relevancia para aves acuáticas en los altos Andes (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2012). Su variabilidad temporal de la precipitación pluvial presenta dos períodos claramente diferenciados: el período de avenidas que corresponde entre los meses de noviembre - abril con ocurrencia de lluvias intensas y grandes descargas de los ríos y quebradas; y el período de estiaje, que corresponde entre los meses de mayo - octubre, donde la escorrentía, en la mayoría de ríos y quebradas, corresponde sólo al caudal base. Por su parte en la cuenca del lago Chinchaycocha se presentan demandas de agua para satisfacer los requerimientos de diversos sectores, entre los que destacan los sectores minero y energético y en menor grado se presentan las demandas de uso agrícola, acuícola, pesquero, industrial y doméstico (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2018).

En los últimos años se ha desarrollado en hidrología, una técnica prevista como modelamiento hidrológico. La mencionada técnica intenta reproducir a través de un modelo (principalmente matemático) el comportamiento de las transformaciones hidrológicas en una región específica. Asimismo, los usos de estos modelos cubren áreas tales como: control de calidad de agua, erosión del suelo, deposición y transporte de sedimentos, diseño y operación de sistemas de caudales hídricos, sistema de alerta de inundaciones y evaluación de opciones manejo de suelos (Arnold *et al.*, 1998).

Los modelos hidrológicos son herramientas excelentes para analizar y evaluar comportamientos de las cuencas. Dichos modelos admiten simular escorrentía inducida por la lluvia durante largos intervalos de tiempo. Esto permite analizar cambios en el comportamiento y la calidad hídrica de una cuenca debido a diversos factores, como cambios en el régimen de precipitaciones de un área, cambios en la cobertura del suelo y otras causas antrópicas. Por lo tanto, el uso de estos modelos permitirá una planificación racional de las actividades de gestión de los recursos hídricos y la toma de decisiones. Por otro lado, en los últimos años, los modelos hidrológicos se

han transformado en una herramienta importante para resolver los problemas de recursos hídricos (Arnold *et al.*, 1998).

En el presente estudio se empleó el modelo hidrológico SWAT. Dicho modelo, al ser calibrado apropiadamente proporciona información útil para gestionar estos recursos en las cuencas. En consecuencia, se ha empleado como un robusto instrumento para modelar los efectos de la variabilidad climática en los ciclos hidrológicos y biogeoquímicos en diferentes cuencas de todo el globo terráqueo (Arnold *et al.*, 1998). Más aún, dicho modelo fue aplicado en la institución pública (SENAMHI) y en investigaciones científicas a nivel nacional e internacional.

Es así la importancia de la aplicación del modelo determinístico, ya que fueron empleadas para investigaciones tales como: “modelación hidrológica con SWAT de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático”, “modelación hidrológica de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT” y “modelamiento hidrológico de la zona hidrográfica del Titicaca”. Las investigaciones mencionadas son claro ejemplo de la vital importancia de la aplicación del modelo en simulación hídrica con fines propias de cada investigador.

En la presente investigación se evaluó la simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, mediante la aplicación del modelo hidrológico en el periodo de 1981 al 2018. La metodología empleada se basó en la aplicación del modelo hidrológico SWAT +, aplicación de la teledetección, análisis estadísticos y la estimación del comportamiento hídrico mediante redes neuronales al año 2028 en base a los resultados de la simulación. En definitiva, la investigación brindará soporte en las decisiones precisas y fundadas con diferentes perspectivas para afrontar y prevalecer los retos de las actividades de la gestión del agua que a un futuro se pueda exhibir en la cuenca intrínsecamente del contexto de la problemática variabilidad climática, respondiendo la permanencia y sostenibilidad del recurso hídrico en ella.

## **OBJETIVOS**

### **Objetivo general**

Evaluar la simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, mediante la aplicación de un modelo determinístico.

### **Objetivos específicos**

1. Determinar la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha a través de la modelización en el periodo de 1981 – 2018.
2. Analizar la influencia de la variabilidad climática sobre la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha, durante el periodo de 1981 – 2018.
3. Analizar la variación de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha en el tiempo de estiaje, con aplicación de la teledetección en el periodo 2014 - 2018.
4. Predecir el comportamiento hídrico de la cuenca del lago Chinchaycocha al año 2028.

## CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO

### 1.1. Antecedentes

#### Internacional

Kraemer *et al.* (2011) realizaron un estudio sobre “La aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la pampa ondulada” en Buenos Aires, Argentina. El objetivo del estudio fue analizar el uso del modelo determinístico SWAT en la microcuenca agrícola. La metodología empleada fue el uso del modelo hidrológico SWAT. Las variables empleadas fueron; datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, humedad media e intensidad de vientos), datos geográficos (digital elevation model (DEM), suelos y uso de la tierra) y dato hidrométrico (caudal). La muestra evaluada fue la microcuenca agrícola de la pampa ondulada, con una superficie de 300 ha en un período de los años 2000 a 2006. El análisis estadístico para la evaluación de la eficacia del modelo fue empleado el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la medida de eficiencia de Nash–Suttcliffe (ENS), para dicho análisis fue empleado el software SWAT CUP. Los resultados mostraron que la más importante eficacia del modelo SWAT fue obtenido a nivel diario al validar el modelo, en comparación con los datos a nivel mensual. Los autores concluyeron que los modelos hidrológicos fueron calibrados y validados satisfactoriamente manipulando productos de escurrimientos medidos in situ, obteniendo buenos rendimientos a nivel diario ( $R^2$ : 0,55;  $R^2$  ENS: 0,52) y muy deficientes a nivel mensual ( $R^2$ : 0,34;  $R^2$  ENS: 0,04).

Castañeda (2014) realizó un estudio sobre “Análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna el Sonso por medio de imágenes satelitales Landsat” en el departamento del Valle, Colombia. El objetivo del estudio fue determinar el cambio en el sector de la superficie de agua

de la laguna con la ayuda de programas de categorización supervisada por medio del programa PCI Geomática. La metodología empleada fue los conceptos de teledetección e interpretación de imágenes satelitales utilizando el software ArcGIS. La variable evaluada fue el cuerpo de agua de la laguna del Sonso. Los resultados mostraron que el comportamiento percibido en las aguas de la laguna el Sonso durante un periodo de 23 años, desde 1991 alcanzó un aumento en el cuerpo de la laguna de alrededor del 8 % al 2001, sin embargo, para el año 2014 existió una disminución de más del 28 %. La investigación concluyó que los cambios en la composición de la laguna están claramente influenciados por las intervenciones antrópicas en el medio, que conduce al deterioro de las zonas de amortiguamiento, por lo tanto, determinar los cambios graduales en el comportamiento de un área de laguna significa volver a planificar y tratar los diversos ecosistemas en el futuro para lograr su conservación.

Alzate *et al.* (2015) realizaron una investigación sobre “Cambio Climático y Variabilidad Climática para los años 1981-2010 en las regiones de los ríos Zulia y Pamplonita, norte de Santander” en Colombia. El estudio tuvo como objetivo desarrollar, identificar y dar cuenta del cambio climático y los cambios más posibles en los anomalos del cambio climático asociados al ciclo ENSO para la etapa 1981-2010. El método utilizado fue el análisis de señales de cambio climático que respondieron a nivel regional y local con el fin de cuantificar las tendencias identificadas y estimar la magnitud del cambio climático. En la investigación se utilizaron las estadísticas no paramétricas y una expansión de interpolación utilizando el método de distancia inversa ponderada (IDW). El instrumento empleado fue el R Project y Microsoft Office Excel. Las variables evaluadas fueron la precipitación y temperatura. Los resultados mostraron que la temperatura media en el área de estudio cambió entre 0,1 y 0,4 °C por período, la precipitación aumentó de 0 a 250 mm/período y los ciclos ENSO diferenciaron cambios en la versatilidad del clima a nivel estacional e interanual. Los autores llegaron a la conclusión que las regiones de los ríos Pamplonita y Zulia están expuestas a cambios en el presente y a futuras fluctuaciones climáticas.

Gonzales y Gonzales (2015) realizaron una investigación sobre “Análisis multitemporal de la superficie hídrica óptico en la laguna de Fúquene para los años de 1985 a 2015” en los departamentos de Cundinamarca y Boyacá, Colombia. El objetivo del estudio fue realizar un análisis multitemporal de la superficie del agua del estanque, teniendo en cuenta variables ambientales medibles, para determinar su secado desarrollado, el estado actual y estimar el estado de la zona sensible en el futuro. La metodología utilizada fue fundamentada por los conceptos de teledetección e interpretación de imágenes. El instrumento empleado fue el software ERDAS, IMAGINE y ArcGIS. Las variables evaluadas fueron temperatura, precipitación, evaporación y el espejo de agua de la laguna. Los resultados indicaron que la evolución de la superficie del agua en el año 1985 presentó 1 864,08 ha, mientras que la superficie del agua en el año 2000 presentó 862,99 ha, en cambio el año 2015 presentó la superficie del agua 470,75 ha. Asimismo, el comportamiento de la temperatura, la evaporación y la precipitación afectó directamente al cuerpo de agua. En conclusión, la laguna de Fúquene ha sufrido cambios drásticos en su entorno, considerando que en su área en el año 1933 constaba con alrededor de 10 265 ha en comparación con el año 2015, el cálculo de la superficie del agua según el análisis desarrollado fue 471 ha.

Ortiz *et al.* (2017) realizaron una investigación sobre “Análisis estadístico de variables climáticas en la ciudad de Cúcuta”, en Cúcuta, Colombia. Tuvieron como objetivo presentar una estadística descriptiva de las variables climáticas examinando conocer cuál es su interrelación y cómo ésta se ha mantenido en el período, estableciendo así posibles aplicaciones de estas variables en distintas áreas. La metodología del estudio fue basada en dos etapas: (i) residió en la recolección y organización de datos horarios y mensuales de las dos estaciones meteorológicas desarrolladas y (ii) fundamentó en el análisis estadístico de las variables meteorológicas señaladas en las bases de datos de las estaciones. El instrumento empleado fue un software estadístico especializado Minitab. Las variables empleadas fueron: temperatura ambiente, brillo solar, radiación solar, velocidad del viento y humedad relativa. Los resultados mostraron que las variables climáticas están relacionadas entre sí, por lo que se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, donde las variables de precipitación, temperatura ambiente, radiación solar, humedad relativa, y velocidad del viento se encuentran

correlacionadas inversas y directamente entre ellas. Asimismo, el brillo solar mostró valores de correlación muy bajos respecto a las demás variables, esto suscitó a que la ciudad de Cúcuta inviste un clima tropical. Los autores concluyeron que, las variables climáticas analizadas: precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento presentaron una buena correlación entre ellas, a excepción del brillo solar. Por otro lado, el comportamiento de las lluvias en los últimos períodos se ha sostenido en el tiempo.

Rojas (2017) desarrolló una investigación “Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat del cambio de la cobertura vegetal y su impacto en la desecación del espejo de agua en la laguna de Tota para el periodo de 1991 al 2017”, en el departamento de Boyacá, Colombia. El objetivo fue desarrollar una comparación multitemporal de la evolución de la cubierta de la planta de los últimos 26 años de la superficie hídrica y de la zona propio a la cuenca lagunar de Tota. La metodología empleada fue basada en la aplicación de imágenes satelitales Landsat y un procesamiento basado en la teledetección. El software empleado fue el software ERDAS. La variable evaluada fue el espejo de agua de la laguna de Tota. Los resultados expusieron que ha habido un aumento en el área de la agricultura, fundamentalmente labranza de cebolla larga, también de la misma forma el aumento de las áreas urbanas, reflejando la gradual presión antropogénicas sobre el hábitat, la reducción de las áreas boscosas y el daño de la extensión del lago debido a desarrollos de secamiento que aborda la brecha entre las acciones productivas y los regímenes naturales. El autor llegó a la conclusión que la laguna de Tota sufrió una reducción en su superficie en un 0,35 % (32,20 ha), a causa del desarrollo de secado y extracción, siendo el lago el almacenamiento hídrico para las actividades productivas en la extensión. Por otro lado, el impacto en el cuerpo hídrico alcanzó a la ampliación del límite agrario, en particular las siembras de cebolla situado a márgenes del lago, lo que con llevan una falta de protección de la superficie terrestre y una importante obligación de bienes agroquímicos que perturban la característica del recurso hídrico.

Sánchez *et al.* (2017) realizaron un estudio sobre “Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT” en México. El objetivo de la investigación fue la

calibración y validación del modelo SWAT, para entablar parámetros útiles en la estimación hidrológica y las elecciones de las mismas, utilizando diez años de información climática (1975-1985). La metodología empleada fue el uso del modelo hidrológico SWAT. Las variables utilizadas fueron los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), datos geográficos (DEM, pendiente, cobertura vegetal y suelos) y el caudal. La muestra evaluada fue la cuenca del río sordo con una extensión de 77 5142 ha. El análisis estadístico para la evaluación de la eficiencia del modelo fue empleado el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y la medida de eficiencia de Nash–Sutcliffe (ENS), para dicho análisis fue utilizado el software SWAT CUP. Los resultados mostraron que la calibración mensual de producción de sedimentos mostró un ajuste aceptable, con valores de 0,59 y 0,51 para  $R^2$  y NSE, respectivamente, y en el caudal medio mensual fue obtenida con un buen ajuste en la calibración de 0,70 y 0,81, para  $R^2$  y NSE. En conclusión, el modelo ha sido calibrado y validado con éxito en la cuenca del estudio. Para calibrar y validar SWAT fueron proyectados el coeficiente de determinación ( $R^2$ ) y el índice de eficacia Nash-Sutcliffe (NSE). Asimismo, dicho modelo de desarrollo vegetativo ha sido calibrado de manera eficiente, accediendo una buena valoración en la cobertura vegetal de la cuenca. Por otro lado, el modelo de crecimiento vegetativo ha sido calibrado de manera eficiente, aprobando un desarrollo excelente en la estimación de la producción de biomasa en la cobertura vegetal del área. El modelo estimó los flujos de caudales mensuales de manera aceptable, expresados por los coeficientes de determinación y el índice de eficiencia de Nash y Sutcliffe en los procesos de calibración y validación. El modelo hidrológico permitió una buena estimación la producción de sedimentos, no obstante, en una mínima medida a comparación de la simulación del caudal.

Ramírez (2018) en el trabajo de investigación “Análisis comparativo del cuerpo de agua del embalse del Sisga, a partir imágenes sentinel 1” en el municipio de Chocontá Cundinamarca, Colombia. El objetivo del estudio fue conocer la alteración del cuerpo de agua del embalse del Sisga, entre los años 2016 y 2018, a partir de imágenes Radar. La metodología empleada fue fundamentada en las significaciones de percepción remota e interpretación de imágenes. El software empleado fue Geomatica\_2018 de la casa PCI Geomatics. La variable evaluada fue el cuerpo de agua del embalse. Los resultados mostraron que la laguna ha reducido su superficie

en 129,59 ha, mientras que las áreas donde ha ampliado su dominio suman solo 2,4 ha distribuidas en 45 polígonos; esto último puede deberse al alto nivel freático en el área que bordea la laguna. El autor llegó a la conclusión que, en dos años, la laguna ha sufrido una variación, donde la pérdida de área del cuerpo de agua es 50 veces mayor al área donde se encuentra la laguna extendida.

Salamanca (2018) desarrolló una investigación sobre “Análisis multitemporal sobre la pérdida del espejo de agua sobre el humedal laguna la Herrera por efectos antrópicos asociados a la minería” en el municipio de Mosquera, Colombia. El objetivo del estudio fue realizar un análisis sobre las modificaciones que ha sufrido el recurso hídrico en la laguna y comprobar si este método puede ser utilizada como un registro de la buena gestión del recurso hídrico como los humedales. La metodología empleada fue basada en los conceptos de percepción remota e interpretación de imágenes. El instrumento empleado fue el PCI geomatics. La variable evaluada fue el espejo de agua. Los resultados mostraron que el cambio del espejo de agua ha aumentado para el año 1999, mientras que para el año 2018 vuelve a disminuir y sin parar, donde fue apreciado que la correlación ha descendido, cubriendo solo un 18,6 % de la superficie hídrica del humedal, más por lo contrario, hay un incremento suficiente formidable en la zona predestinada a la extracción del componente de la naturaleza. En conclusión, el espejo de la superficie hídrica ha disminuido, debido a que el humedal está expuesto por la proporción de material orgánica, haciendo que la eutrofización perturbe al recurso hídrico.

Beltrán y Díaz (2019) trabajaron la investigación “Oscilaciones macroclimáticas que afectan el suministro de agua en la cuenca del río Gachaneca, Boyacá”, en Colombia. El objetivo del estudio fue analizar los efectos de las fluctuaciones macroclimáticas en la cuenca del río Gachaneca. La metodología empleada fue la recolección de los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima) y evaluaron la relación de las variables involucradas con los eventos de la Oscilación Cuasi-Bienal (OCB), la Oscilación del Atlántico Norte (OAN) y el Niño Oscilación Sur (ENOS). Los instrumentos empleados fueron el software ArcGIS y Microsoft Excel. Las variables utilizadas fueron las meteorológicas ya

mencionadas anteriormente. Los resultados manifestaron que la varianza más alta está representada por las fluctuaciones totales en diciembre - febrero fluctuaron entre 34 y 38 %, en marzo - mayo entre 15 y 20 %, en junio - agosto entre 15 y 25% y en septiembre - noviembre entre 21 y 34 %. ENOS mostró un mayor dominio, seguido de OAN. Durante los meses de diciembre, enero y febrero (DEF) el área objetivo persistió más exhibida a acontecimientos áridos, lo que generó el riesgo del agotamiento del agua debido al período cálido del Niño. Los autores concluyeron que ENOS y la OAN afectaron el clima del territorio indagado, fundamentalmente en DEF. Asimismo, en lo específico cuando Oceanic Niño Index (ONI) toma valores extremos y OAN negativos se forman los contextos que más benefician de la reducción de lluvias.

## **Nacional**

Martínez (2014) realizó un estudio sobre “Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica” en el departamento de Ica, Perú. El objetivo del estudio fue determinar el impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca mencionada, mediante el modelo SWAT. El método empleado fue fundamentado en tres procesos (1) la aplicación del modelo en la cuenca que fue estudiada, (2) calibración del modelo y (3) la generación de datos meteorológicos futuros proyectados. Las variables evaluadas fueron datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, evapotranspiración y caudal observada) e información geográfica (topografía, cobertura vegetal, suelos y cartografía). Los resultados expusieron que en la estación mencionada proyectada de escorrentia mostraron un incremento promedio de 30,53 hasta 53,97 % en la oferta anual hídrica, tomando en consideración la variación de la producción de agua a nivel mensual. El autor llegó a la conclusión que, la calibración del modelo hidrológico obtuvo valores de 0,59, 0,59 y 12,31 % para R<sup>2</sup>, NSE y PBIAS. Asimismo, para la validación fueron obtenidos valores de 0,62, 0,55 y 2,84 % para R<sup>2</sup>, NSE y PBIAS.

Palomino (2015) realizó un estudio sobre “Efectos del Cambio Climático en la Hidrología de la Cuenca Chancay – Huaral” en el departamento de Lima, Perú. El objetivo fue reconocer y

evaluar las consecuencias del cambio climático en la hidrología objetiva de la cuenca. La metodología utilizada fue fundamentada en la recolección y procesamiento de información básica y la preparación de insumos. El instrumento empleado fue modelo hidrológico TETIS. Las variables evaluadas fueron datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), datos geográficos (topografía, Cobertura vegetal, Suelos y Geología) y el caudal. Los resultados mostraron que los pronósticos de escorrentía indicaron alteraciones promedio entre -9 % y 70 % en el suministro periódico del agua. Dado los cálculos mensuales, el considerable aumento fue calculado para septiembre (166 %) y el mínimo para febrero (-11 %). Para el balance del flujo, fue establecido el suministro de agua del 90 %, la demanda resultó terminante por exigencias hídricas para el uso de la agricultura y de la población. En conclusión, para la etapa húmeda fue alcanzado un flujo mensual promedio del 29 %, en el mes de marzo donde fue ocasionado la mayor variación (54 %). Del mismo modo, está a la espera de un aumento promedio del 103 % para el período seco. Dado que el cambio climático generará un aumento en la temperatura media en la zona de estudio y por ende una mayor evaporación como resultado de la cuenca, también es posible atenuar dichos efectos con aumentos en las precipitaciones durante los períodos secos, lo cual fue provocado por su incremento de las precipitaciones totales anuales y el caudal medio anual en la cuenca baja.

León (2017) realizó una investigación sobre “Modelación de la disponibilidad hídrica del río Piura, considerando la incidencia del cambio climático” en el departamento de Piura, Perú. El objetivo fue evaluar los cambios futuros en el suministro de agua en la parte media y superior del río Piura, durante el cambio climático, a través de modelos hidrológicos a través de la Herramienta de Evaluación de Suelos y Aguas (SWAT). El método utilizado fue fundamentado en tres procesos (1) el uso del modelo hidrológico SWAT en la zona investigada (2) la generación de datos climáticos proyectados en escenarios optados; y (3) evaluación de los efectos de la variabilidad climática. Las variables evaluadas fueron datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima y caudal observado) e información geográfica (DEM, capacidad de uso mayor, suelos y pendiente). Los resultados mostraron que la tendencia promedio en las proyecciones generales aumentaron en la escorrentía de + 71,8 % para la temporada de lluvias, que concurrió aproximadamente de 55,9 m<sup>3</sup>/s, dichos aumentos

fueron originados en los meses de octubre, noviembre y diciembre. Por otro lugar, en el tiempo de estiaje fue disminuido en un  $-66,1\%$ , lo que corresponde aproximadamente a un declive de  $12\text{ m}^3/\text{s}$ , registrados en los meses de julio, agosto y septiembre, hasta el  $-80,8\%$ ,  $-78\%$  y  $-79,3\%$ , respectivamente. En conclusión, la calibración del modelo hidrológico obtuvo valores de  $0,90$  y  $0,89$  para  $R^2$  y NSE. Asimismo, para la validación fueron obtenidos valores de  $0,81$  y  $0,76$  para  $R^2$  y NSE. Por otro parte, la tendencia promedio de las proyecciones totales para la temporada de lluvias mostraron un aumento de la esorrentía de  $+71,8\%$ , que corresponde a unos  $55,9\text{ m}^3/\text{s}$ ; presentando mayores aumentos en octubre, noviembre y diciembre. En el tiempo de estiaje también fue reducido en un  $-66,1\%$ , lo que corresponde a una disminución de  $12\text{ m}^3/\text{s}$ , registrados en los meses de julio, agosto y septiembre de hasta  $-80,8\%$ ,  $-78\%$  y  $-79,3\%$  correspondientemente.

Rodríguez (2017) realizó una investigación sobre “Pronóstico del caudal más alto del río Huaura por modelos ARIMA y redes neuronales” en el departamento de Lima, Perú. El objetivo del estudio fue conocer la eficacia de los modelos ARIMA en el pronóstico del caudal más alto del río Huaura frente a las redes neuronales. La metodología fue basada en la aplicación de Box – Jenkins. La variable evaluada fue el caudal máximo (volumen máximo de agua que pasa por una determinada sección transversal en la unidad de tiempo). La población y muestra fueron los caudales máximos mensuales del río Huaura en el periodo hidrológico enero de 1960 hasta el año 2016. El análisis estadístico fue basado en datos recolectados, empleados a un  $90\%$  para el modelado y el  $10\%$  para el pronóstico. Asimismo, para dicho análisis fueron empleados los programas; EVIEWS 9, IBM SPSS STATISTICS 24 y Microsoft Excel 2016. Los resultados mostraron que el modelo más eficiente fueron las redes neuronales, obteniendo errores de pronóstico  $DAM= 5,68$ ,  $EMC= 42,28$ ,  $PEMA= 24\%$  y  $PME= -8\%$ . Estos valores de error mostraron que el pronóstico en particular no fue sesgado porque el PEMA y el PME son bajos y cercanos a cero. En conclusión, los modelos de redes neuronales fueron más eficientes que los modelos ARIMA, logrando errores de pronóstico más bajos.

Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2017) desarrolló un estudio sobre “Modelamiento hidrológico de la zona hidrográfica del Titicaca” en el departamento de Puno, Perú. El objetivo fue realizar un modelado hidrológico de las cuencas de las laderas del Titicaca manejado el modelo hidrológico SWAT. El enfoque metodológico empleado fue basado en dos procesos: (1) Configuración y parametrización del modelo y (2) análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo SWAT. Las variables empleadas fueron los datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), datos geográficos (DEM, cobertura vegetal y suelos) y el caudal. Los resultados del modelo en la fase de calibración y validación, en las simulaciones del caudal diario fue óptimo en expresión del factor de eficiencia de Nash-Sutcliffe (NSE entre 0,65 – 0,75), (PBIAS) hay muy buen desempeño (PBIAS < 10%). Por otro lado, la simulación de descargas mensuales fue mucho mejor, siendo estos muy buena según las dos medias de eficiencia (NSE > 0,75 y PBIAS < 10 %). Asimismo, fue estrechamente apreciada la baja producción de agua en la cuenca del río Ilave, ubicada al sur de la cuenca del río Titicaca. En conclusión, la calibración y validación del modelo tanto diaria como mensual fue aceptable. De este modo, la cuenca con mayor precipitación fue la cuenca del río Coata y la menor fue la cuenca Ilave.

Valladares (2017) realizó un estudio sobre “Respuesta hidrológica de la cuenca del río Santa en condiciones de cambio climático” en el departamento de Áncash, Perú. El objetivo del estudio fue estimar la obtención de caudales y sedimentos mediante el modelo SWAT mediante el escenario de emisiones rcp 4,5. El método empleado fue fundamentado en tres procesos (1) la aplicación del modelo SWAT en la cuenca que fue estudiada, (2) calibración del modelo y (3) la generación de datos meteorológicos futuros proyectados. Las variables evaluadas fueron datos hidrometeorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, caudal observado y sedimentos) e información geográfica (Topografía, Cobertura vegetal, suelos y pendiente). Los resultados expusieron que en la estación mencionada proyectada al (2050 - 2059), la cuenca obtendrá un caudal de 180,13 m<sup>3</sup>/s; cabe destacar que el área de estudio originaría un 19 % más de agua la década observada (2005 - 2015). Por otro lado, los sedimentos proyectados para los años (2050 – 2059) bajo escenario rcp 4,5; el promedio de los modelos expone un aumento del + 9,25 %; resaltando que, mientras en la etapa próximo generaría 10,23

millones de toneladas, en comparación con los 9,37 millones de toneladas de la etapa presente 2006 a 2015. El autor llegó a la conclusión que en la fase de calibración y validación el modelo resulta ser lo suficiente idóneo para la simulación de los flujos a nivel mensual. Por otro lado, la estación Condorcerro proyecta un caudal de 180,13 m<sup>3</sup>/s en la época de (2050 – 2059), produciendo un 19 % más agua que el decenio observado (2005 - 2015). Finalmente, la proyección de sedimentos para el periodo (2050 – 2059) en el escenario rcp 4,5; un aumento del + 9,25 %; resaltando que, en el tiempo posterior originarían 10,23 millones de toneladas frente a los 9,37 millones de toneladas visualizadas en la etapa presente 2006 – 2015.

Milla (2018) en el trabajo de investigación sobre “Efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río santa - año 2013” en el departamento de Áncash, Perú. El objetivo fue ponderar la predominación del cambio climático en la disponibilidad del recurso agua en la cuenca alta del río santa por medio del empleo de la predisposición y correlación entre las variables de la temperatura con la precipitación y caudales. El diseño de la investigación fue de corte longitudinal explicativa, de tipo correlacional. La población fue conformada por el departamento de Ancash y la muestra fue la cuenca alta del río Santa. La metodología empleada fue basada en la aplicación de la percepción remota y la aplicación del modelamiento hidrológico. La herramienta empleada fue el software ArcGIS. Las variables evaluadas fueron el cambio climático y el recurso hídrico. El análisis estadístico para la evaluación de la eficacia del modelo fue empleado el coeficiente de correlación ( $r$ ), y la medida de eficiencia de Nash–Suttcliffe ( $E$ ), Raíz del error cuadrático medio (RMSE) y Criterio de Bias (PBIAS). Los resultados de la contratación de las hipótesis mostraron por el análisis de regresión que las variables de precipitación y temperatura no tiene una correlación significativa, mientras que los variables temperatura y caudal poseen una correlación. En conclusión, el modelo ha sido calibrado, con los datos históricos registrados en la estación la Balsa, obteniendo unos factores de evaluación  $r$ ,  $E$ , RMSE y PBIAS aceptables. Finalmente, en la prueba de correlación y tendencia temperatura – precipitación de los años 2000 al 2014, no presentó una correlación significativa, mientras que la temperatura – caudal, mostró una correlación significativa.

Huere *et al.* (2019) realizaron una investigación sobre “Efectos de la fluctuación climática en el balance hídrico de la ciudad de Huancavelica”, en Huancavelica, Perú. El estudio tuvo como objetivo evaluar la derivación de las fluctuaciones meteorológicas en el balance hídrico de la localidad Huancavelicana en el tiempo 2018-2019. La metodología empleada se basó en recaudación de datos de las estaciones meteorológicas comunes, analizar y procesar cada una de las variables de interés. El instrumento utilizado fue estación meteorológica automatizada y fichas documentadas. La muestra de trabajo fue no probabilística con muestreo apropiado. Las variables manipuladas fueron las meteorológicas (precipitación, humedad, presión atmosférica, radiación solar, temperatura ambiental, radiación ultravioleta y velocidad del viento). Los resultados mostraron que el balance hídrico y las variables estudiadas, con mayor correlación, fueron la variable precipitación pluvial con un valor de 0,68, seguida de la humedad relativa con un valor de 0,66 y en último lugar la temperatura ambiental con un valor de 0,49. Los autores concluyeron que las variaciones de los parámetros meteorológicos mencionados intervinieron en el balance hídrico de la ciudad de Huancavelica en el tiempo estudiado.

## **1.2. Bases teóricas especializadas**

### **1.2.1. Recurso hídrico**

La historia de la gestión del agua en Perú se centraliza en la agricultura como la actividad económica más importante en el desarrollo general del país, de igual forma incluye la historia de la protección de los derechos del recurso vital que se ha consolidado en los últimos tiempos (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2013). Por otro lado, Perú es uno de los países más ricos en recursos hídricos naturales, los glaciares son el mayor potencial; donde son reservas esenciales para diversos usos, o estanques, disponibles en grandes cantidades, que pueden utilizarse como depósitos reguladores (ANA, 2013). Muchos de ellos están en funcionamiento e involucran una reserva de agua regulada naturalmente. Además, los recursos hídricos naturales fueron calculados en el Plan Nacional de Recursos Hídricos del Perú, tomando en cuenta la precipitación que no se ha evaporado y que puede circular por los canales en forma de recursos superficiales, se infiltran en los acuíferos terrestres y forman recursos subterráneos o se almacenan en lagos, estanques o embalses artificiales. Por tanto, se confirma que el Perú tiene

un potencial en recursos hídricos naturales, por lo que la autoridad competente los maneja racionalmente y los preserva (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2013).

### **1.2.2. Clasificación del agua**

#### **Clasificación del agua según su uso**

Según la ANA (2013), el uso del agua se clasifica considerando la prioridad de su concesión y ejercicio, como se detalla en lo siguiente:

**Uso primario.** Consiste en el uso continuo y real del agua en orígenes naturales y canales públicos, para brindar satisfacción a la necesidad humana primaria, tales como los preparativos de suministros, uso directo, higiene del hombre, ritos culturales y religiosas.

**Uso de la población.** Radica en la captura del fluido hídrico de un origen o red pública que ha sido propiamente tratada, para cubrir las insuficiencias humanas primordiales; como el preparativo de comestibles y las prácticas de higiene íntimo. Este uso se practica a través de los derechos de uso del recurso, concedidos por la entidad competente.

**Uso productivo.** Es el uso del recurso hídrico en o antes de los procesos de producción. Los tipos de usos son: agrícola: ganadería y agricultura, acuicultura y pesca, energía, industrial, medicinal, minería, recreativa, turismo y transporte.

#### **Clasificación del agua según su origen**

Según el Ministerio de Transición Ecológica [MITECO] (2000), la clasificación del agua según su origen son las siguientes:

**Agua superficial.** Todos son agua estancada o arroyos en las extensiones de la superficie. Estas son flujos que fluyen sobre el plano de la tierra emergida y, en general, provienen de las lluvias de todas las cuencas (MITECO, 2000). Son clasificados los tipos de agua en:

- **Aguas lóaticas o corrientes:** Formados por masas de aguas, con una fuerza de corriente que circulan en una misma dirección tales como arroyos, ríos, manantiales, etc. Asimismo, se realiza el intercambio entre la tierra, el agua y la cantidad de oxígeno contenida en el agua (MITECO, 2000).
  
- **Aguas lénticas:** Son todas las aguas continentales quietas o estancadas, como los estanques, estanques, pantanos y pantanos. Asimismo, estos cuerpos de aguas cuentan con 3 niveles bien diferenciados: (1) la zona litoral, (2) zona limnética y (3) la zona profunda (MITECO, 2000).

**Agua subterránea.** También se llama agua subterránea, para diferenciarla del agua que circula o deposita parte del volumen en la superficie. Esta agua, que fue filtrada o infiltrada en las áreas saturadas e insaturadas del subsuelo, llena de poros en el material y su distribución está controlada por las condiciones fisicoquímicas e hidráulicas de los suelos y las masas rocosas y también por la litología, estratigrafía y estructura de depósitos y formaciones geológica (García *et al.*, 2010). El flujo subterráneo puede extenderse sobre grandes áreas y actuar como una salida para el agua subterránea en el mar u otros sistemas regionales. El flujo inferior suele ser especial y un desarrollo significativo entre varios parámetros internamente del subsistema; esta corriente además alcanza a cambiar a una salida del subsistema por evapotranspiración (Breña y Jacobo, 2006).

### 1.2.3. Ciclo hidrológico

El ciclo hidrológico es un proceso de una serie de componentes hidrológicas que interrelacionan entre sí o con otras redes adyacentes (capas altas de la atmósfera y los sistemas geológicos profundos), donde estos interceden en la tendencia del recurso hídrico (Figura 1), al igual que en los cambios que tolera el sistema tanto en sus peculiaridades físicas, químicas y biológicas al moverse de diferentes formas, lo que da un cambio (Chow *et al.*, 1998).

El flujo hídrico en el planeta tierra, puede almacenar en los lagos, ríos, océanos, atmósfera, superficie terrestre, glaciares, y en los acuíferos. El recurso hídrico en la atmósfera, se desplaza desde un establecimiento a otro, por medio de los distintos procesos entre los cuales se tiene: evaporación, condensación, precipitación, sedimentación, escorrentía, infiltración, sublimación, transpiración, fusión, y flujo de agua subterránea. Los mares, proveen la mas grande parte del agua como producto de la evaporación. Del fluido evaporado, sólo el 91 % es restituido a las cuencas oceánicas a través de la precipitación, el porcentaje restante es transportado a las ubicaciones continentales donde los componentes climatológicos incitan la precipitación. El desequilibrio final entre las tasas de evaporación y precipitación, sobre la tierra y el mar, se corrige por el escurrimiento y el fluido de agua hacia los océanos (Julio, 2011).

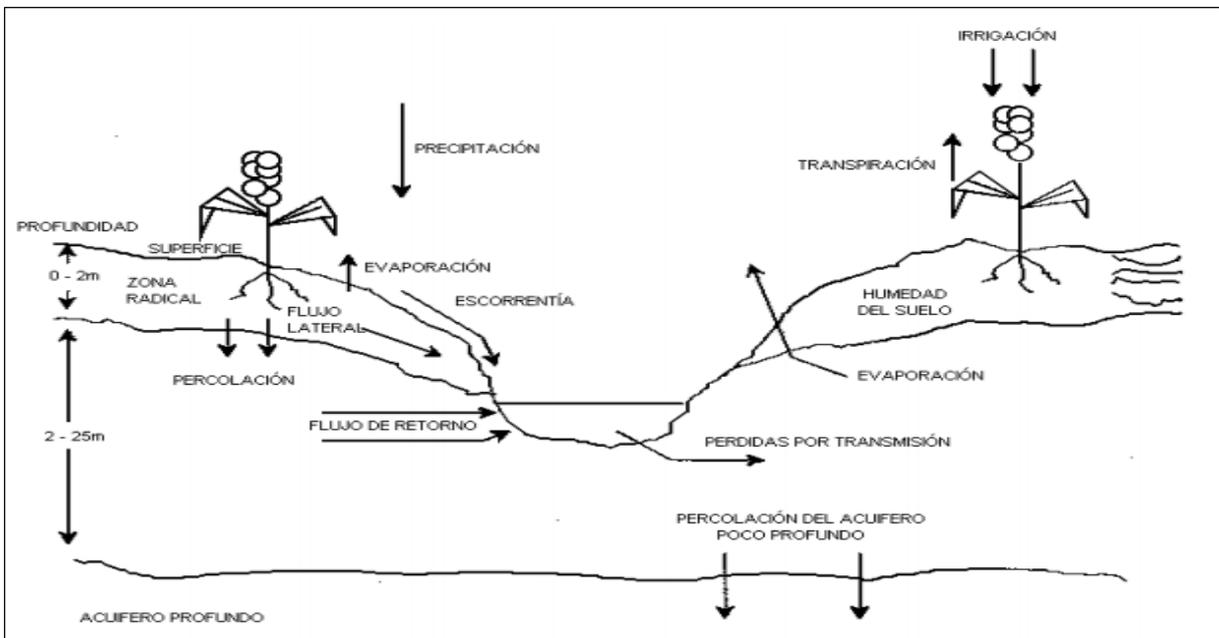


Figura 1. Ciclo hidrológico del agua. Fuente: Proaño et al. (2006).

#### 1.2.4. Componentes del ciclo hidrológico

##### Precipitación

Son agrupaciones de humedad que precipitan al espacio terrestre y marítimo, derivados de los cambios de estado de la materia, en forma tanto en líquida (llovizna y lluvia) y sólida (nieve y granizo) y las precipitaciones ocultas (rocío y la helada blanca). La precipitación es el principal aporte al sistema hidrológico y es el factor más importante para controlar dicho sistema en un

territorio. El discernimiento del comportamiento y el patrón de la precipitación en el tiempo y el espacio es crucial para comprender desarrollos como la diferenciación de la humedad de la superficie, la aumenta de las masas de agua y el flujo en los ríos (Figura 2) (Aparicio, 1989). Además, según Musy (2001), existen diferentes tipos de precipitación:

- **Precipitación convectiva:** Resulta del ascenso rápido de las masas del aire en la atmósfera. Se relacionan a las nubes cúmulos y cumulonimbus. Las precipitaciones que resultan del mencionado transcurso es ordinariamente tempestuosa, de una duración corta, con intensidad fuerte y de poca amplificación espacia.
- **Precipitación orográfica:** Se relaciona con presencia de una barrera de terreno. La peculiaridad de la precipitación orográfica es dependiente de la altitud, la pendiente y la orientación; igualmente del trayecto que aparta el principio de la masa del aire caliente del lugar de la evacuación.
- **Precipitación frontal o del tipo ciclónico:** Están asociadas a las superficies de contacto entre temperatura de la masa de aire, el gradiente térmico vertical, la humedad y por supuesto varios índices de recorrido (frente). Asimismo, los frentes fríos producen luvias cortas e intensas. El frente caliente produce luvias duraderas, pero no intensas

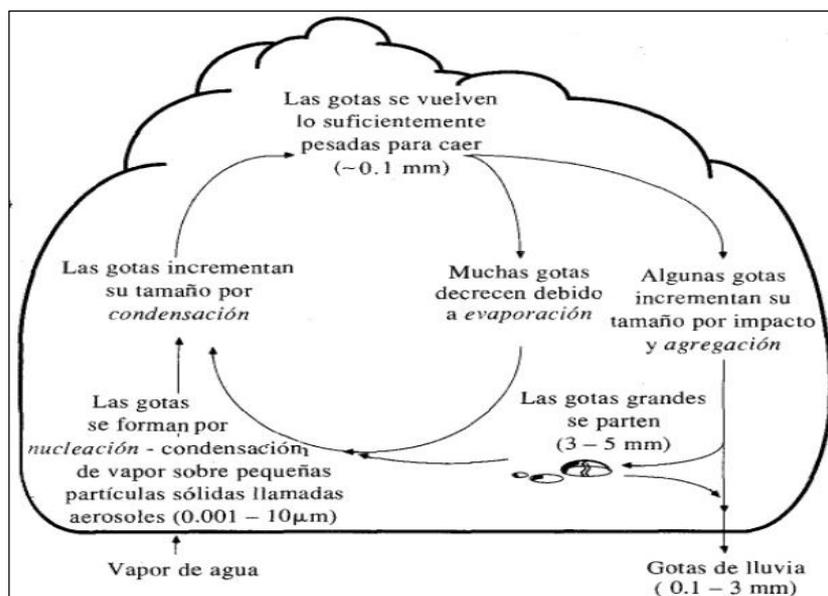


Figura 2. Mecanismo de formación de la precipitación. Fuente: Chow et al. (1998).

## Evapotranspiración

El proceso de evapotranspiración es un fenómeno compuesto de desgaste de agua a través de la transpiración y la evaporación continua del fluido hídrico terrestre (Figura 3). Incumbe al proceso físico del paso del agua del estado líquido a estado gaseoso en circunstancias naturales, necesitando la reserva del recurso hídrico para la flora y que requiere una suma significativa de energía para que la serie suceda (Del Carmen, 2001). Por otro lado, para que se desarrolle el proceso de evaporación, requiere del factor importante como son las grandes cantidades de energía (calorías de energía de calor). Asimismo, para el proceso de transpiración (evaporación a través de hojas), el proceso de fisiológico de las plantas que nutren se lleva a cabo a través del paso de determinadas cantidades de agua, llevando alimento dentro de ellas (Julio, 2011).

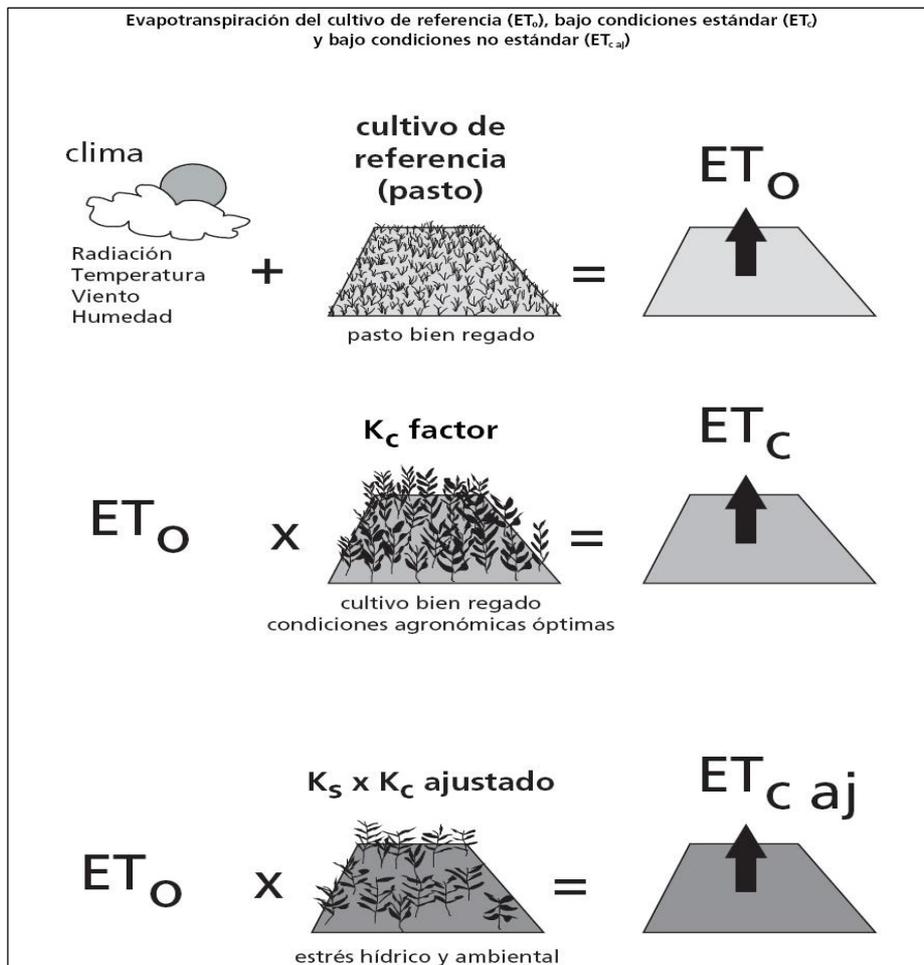


Figura 3. Parámetros requeridos para el cálculo de la evapotranspiración. Fuente: La Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO] (1981).

## **Infiltración**

Este proceso tiene lugar cuando la corriente que llega al fondo fluye por los agujeros y se hace profunda. La simetría del líquido que se infunde y circula en el espacio requiere la permeabilidad de la superficie, la pendiente (que lo impide) y la cobertura vegetal. El fragmento del líquido infiltrado regresa a la atmósfera por evaporación o más aún por transpiración de las plantas. Por otro lado, el líquido se concentra en los acuíferos, horizontes que comprende fluido detenida o movable (Vásquez, 1997).

## **Escorrentía**

El proceso está relacionado con las diferentes formas en que el fluido se discurre por la pendiente del terreno. En climas secos y no excepcionales, incluida la mayoría de los denominados desiertos, el drenaje es el medio geológico más importante de erosión y transporte (Vásquez, 1997).

## **Flujo lateral**

Es el fluido que se desplaza bajo de la extensión del suelo y por encima de la altura del acuífero que mana superficialmente y sostiene conductos de drenaje, arroyos y ríos. El líquido subterráneo adyacente se calcula junto con la percolación del perfil de la superficie, utilizando un estándar de acumulación cambiante, que utiliza la ecuación de preservación de masa con todo el perfil de la superficie como volumen de control (Proaño *et al.*, 2006).

### **1.2.5. Modelos hidrológicos**

Son modelos complejos de representaciones simplificadas de sistemas reales, ya sea en forma física o matemática. Se utilizan para analizar la correlación causa y efecto de una cuenca, utilizando datos de ingreso y salida. Asimismo, posibilita simular y predecir la acción hidrológica de la serie física de la cuenca (Salgado y Güitrón de los Reyes, 2012).

### 1.2.6. Clasificación de los modelos hidrológicos

La modelación hidrológica, según Ponce (1989), se clasifican en: modelo determinístico, modelo conceptual, modelo probabilístico y modelo paramétrico (Figura 4).

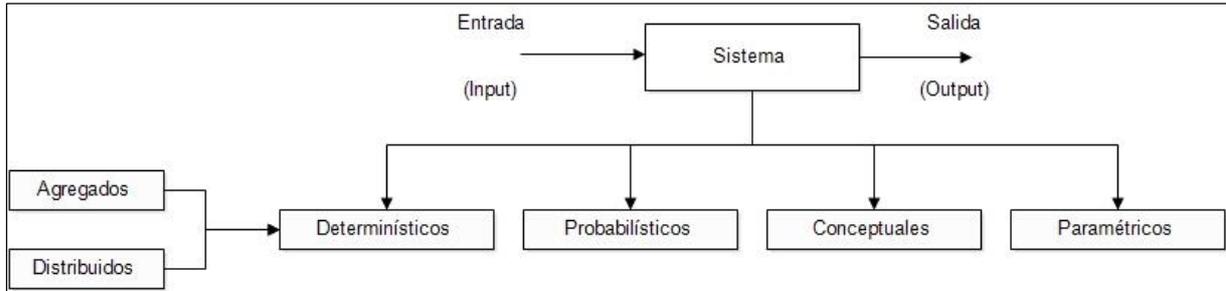


Figura 4. Tipificación de la modelación hidrológica. Fuente: Aybar (2016).

#### Modelo determinístico

El modelo determinista establece correlaciones cuantitativas de origen y consecuencia entre ingresos y salidas, utilizando la correlación continua para conseguir una respuesta debido a una restricción, utilizando una ecuación empírica. Asimismo, el modelo referido no considera aleatoriedad; una entrada siempre la misma salida. Por otra parte, los modelos hidrológicos deterministas se clasifican en modelos agregados y modelos distribuidos, la discrepancia recae en la cifra elemental de análisis en donde se fracciona el área de interés. Los modelos agregados toman en cuenta a las cuencas y subcuencas, estas son patrones de la investigación. Por otro lado, en los modelos distribuidos, los mecanismos son ordinariamente de mínima capacidad y se definen más regularmente. Además, estos patrones no presentan un significado hidrológico determinado, no simbolizan componentes hidrográficas específicos. Asimismo, las percepciones de modelos agrupados y distribuidos, no son precisamente exclusivos, puesto que los modelos concentrados se focalizan en unidades de un modelo distribuido grande (Olaya, 2004).

### **Modelo probabilístico**

El modelo probabilístico es respectivamente antónimo al modelo determinista. El mencionado modelo, expresa en función a los estatutos de la casualidad o la probabilidad. Dicho modelo puede tomar un conjunto de datos obtenidos a partir de muestras de datos cuyo uso es aleatorio. Asimismo, el modelo es de tipo matemático que emplea probabilidades y consiste en un conjunto de supuestos sobre la generación de ciertos patrones de datos, de manera que se asemejan a datos de un conjunto más grande (Sánchez, 2010).

### **Modelo conceptual**

El modelo conceptual es representación de series físicas, generalmente basados en representaciones analíticas, que simulan series complejas basados en algunas claves de parámetros conceptuales. Así mismo, su función es ser un esquema intelectual intercientífico. Dicho modelo al emplearse de forma extensiva en investigaciones hidrológicas evidencia una confusión en el objetivo planteado, también la imposibilidad al suponer elementos deterministas para los casos indagados (Mondino, 2014).

### **Modelos paramétricos**

Los modelos paramétricos son las propuestas de modelado más simples de todas. Además, el vigor del modelo mencionado consta en los parámetros empíricos, basados en los resultados. En general, dicho modelo radica en la ecuación algebraica, que consta de una unidad o más parámetros que se determinarán mediante análisis de la data base y otros medios empíricos. La aplicación del modelo paramétrico se limita al nivel de data utilizado para determinar los valores de los parámetros. (Sánchez, 2010).

#### **1.2.7. Sistema de Información Geográfica (SIG) en los recursos hídricos**

Alonso (2006) afirma que, un Sistema de Información Geográfica es la armonía de la información en formato digital y mecanismo informática, para observación con fines precisos

en función a cada objeto a estudiar (Figura 5). Asimismo, un SIG es la información georreferenciada, donde contiene su lugar en la zona empleando el método de coordenadas estandarizado, que resulta de una proyección cartográfica. Por otro lado, el SIG evolucionó en función de la asociación de diferentes características de usos informáticas.

Olaya (2004) resalta que, el uso de la informática se ha consolidado a lo largo de los años, ya que las herramientas reales con su propio valor en el modelado hidrológico sirven como un inicial perfil para la correlación entre ciencia hidrológica y el uso de computadoras en el pasado. Del mismo modo, convertirse en una herramienta fundamental para investigaciones de la hidrología, puesto que es apropiado para desarrollo de la modelación hidrológica. Por otro lado, actualmente, el desarrollo del procesamiento de datos ha transformado la investigación de sistemas hidrológicos y el manejo del recurso hídrico, por lo que la valoración del recurso hídrico y el manejo son acciones solicitadas a la gestión de varias formas de datos espaciales (Jayakrishnan *et al.*, 2005). Del mismo modo, garantiza el desarrollo sostenible del territorio y la gestión adecuada de los recursos naturales, el uso de herramientas específicas que ayudan a gestionar, planificar y tomar decisiones informadas es crucial (Giménez *et al.*, 2010). Más aun, el SIG de gestión de recursos hídricos responde a la necesidad de representar y examinar información geográfica de una manera simple y que requiere poco esfuerzo de sustento (Giménez *et al.*, 2010).

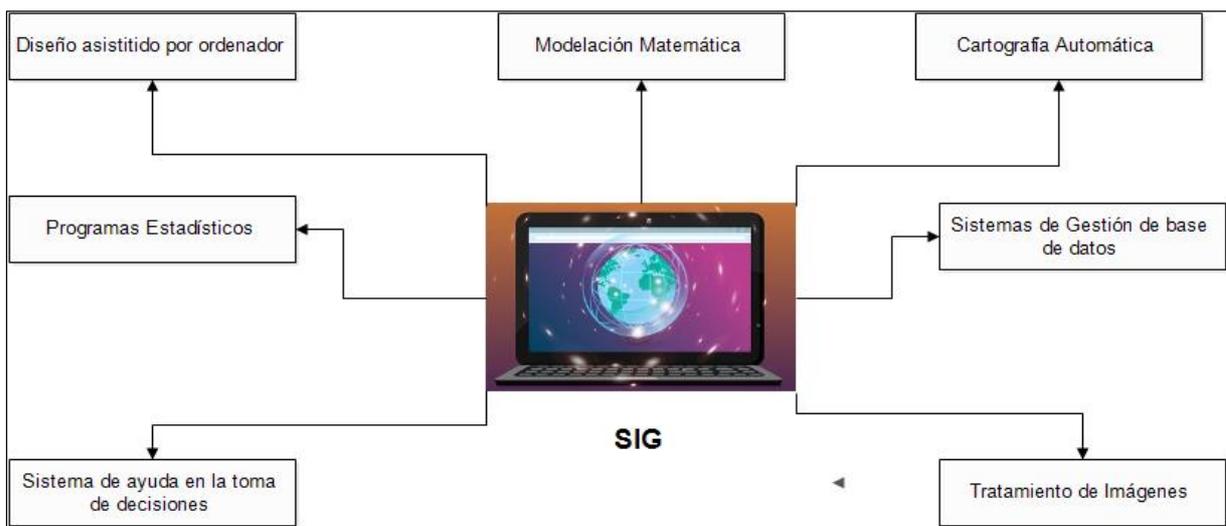


Figura 5. Sistema de Información Geográfica. Fuente: Alonso (2006).

### **1.2.8. Modelo SWAT (SOIL AND WATER ASSESSMENT TOOL)**

El modelo de la herramienta de evaluación de suelos y agua (SWAT) fue desarrollado por el Servicio de Investigación Agrícola (ARS), que pertenece al Departamento de Agricultura de los Estados Unidos (USDA) en la década de 1990 (Gassman *et al.*, 2007). Esta herramienta permite la simulación de la gestión y los impactos climáticos en los suministros de agua, sedimentos y producción de agroquímicos agrícolas en subcuencas y grandes cuencas con diferentes tipos de suelos, uso de la tierra y condiciones de manejo durante períodos largos (Neitsch *et al.*, 2011).

#### **Antecedentes del desarrollo del modelo SWAT**

El modelo desde sus inicios ha incluido elementos del modelo USDA-ARS, manejo de plaguicidas, investigación de agua y cultivos. Asimismo, incluye el modelo GLEAMS de impactos de aguas subterráneas en manejo de gestión agrícola. Por otro lado, el modelo CREAMS basado en productos artificiales, escorrentía y degradación de todos los elementos de gestión agrícola y modelo sintético del régimen climático ambiental; estos mecanismos se incorporaron inicialmente al simulador de recursos hídricos de la unidad geográfica rural (SWRRB) (Arnold *et al.*, 2012).

Actualmente, se ha agregado el transporte y el enrutamiento de la sustancia contaminante, incluidos acumulaciones, depósitos, humedales, efluentes del agua y consecuencias de cámaras de agua almacenada temporalmente, el enrutamiento de partículas sólidas y las prácticas de transferencia cinética de modelo QUAL2E. Por otro lado, este modelo SWAT admite simular el recurso hídrico y las partículas sólidas en sistema de drenaje, también el impacto de las prácticas agronómicas en la calidad del agua debido al empleo de productos químicos en la agricultura (Oñate y Aguilar, 2003). La plataforma de la herramienta SWAT está disponible de forma pública en <https://swat.tamu.edu/>.

## Elementos del modelo hidrológico

El modelo SWAT presenta elementos que lo forman, son todos los componentes y series que se desenvuelven naturalmente en la cuenca y debido a la intervención humana, que incluyen: componente hidrológico, clima, sedimentación, nutrientes, manejo de cultivos, componentes de transporte, circulación de agua y acumulación de sedimentos. Estos componentes se pueden ver en la Figura 6 (SENAMHI, 2017).

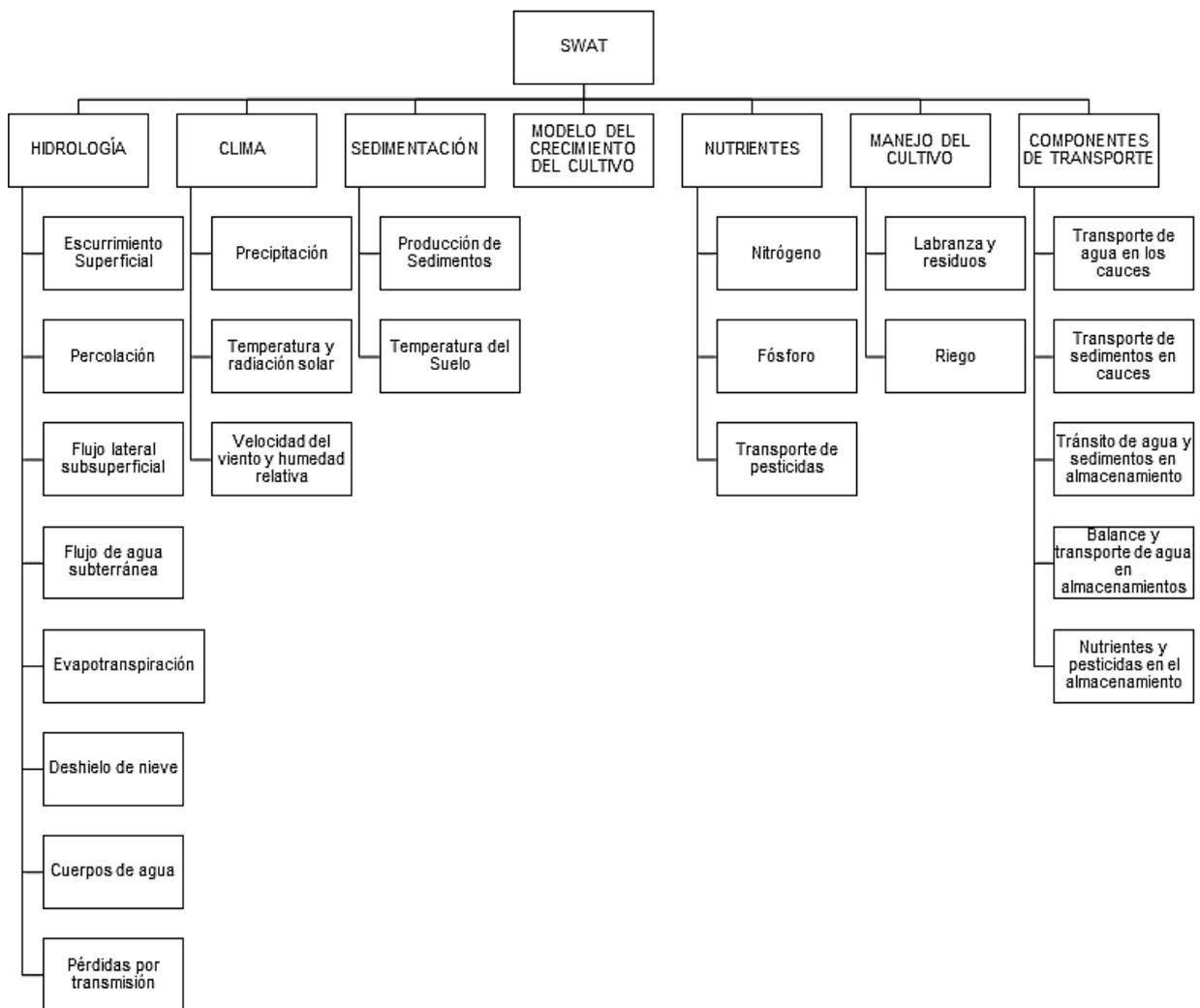


Figura 6. Componentes del modelo SWAT. Fuente: SENAMHI (2017).

## Enfoque del modelo SWAT

En SWAT, el cálculo del balance hídrico se simula en dos elementos apartados de la fase del agua: el período del terreno y el período de ruteo. El periodo terrestre verifica la cantidad hídrica, sedimento, sustancias químicas al conducto primordial en la subcuenca, prospectivamente la fase de enrutamiento define el desplazamiento del agua, sedimento y nutrientes desde el sistema del canal hacia la cuenca de drenaje (Arnold *et al.*, 1998; Neitsch *et al.*, 2011). Por otro lado, Minotini (2006) afirma que, la práctica hidrológica en el SWAT admite simular las series de escorrentía de superficie y el sustrato, infiltración, evaporación y evapotranspiración de los seres fotosintéticos, escorrentía adyacente, el paso del fluido a la capa del suelo y obtención de partículas sólidas. Dichas prácticas sujetan a las subcuencas formadas por los modelos, permitiendo considerar las discrepancias en la peculiaridad hidrológica autónoma. Así mismo, se divide en dos fases:

- **Etapa terrestre del ciclo hidrológico:** Uno de los factores del modelo SWAT incumbe a la simulación de todas las series que constituye la fase hidrológica, lo que permite la realización de un balance del agua en la cuenca; esta fase examina cantidad hídrica y partículas sólidas que circula mediante la microcuenca en dirección a los sistemas de salidas (Figura 7) (SENAMHI, 2017).

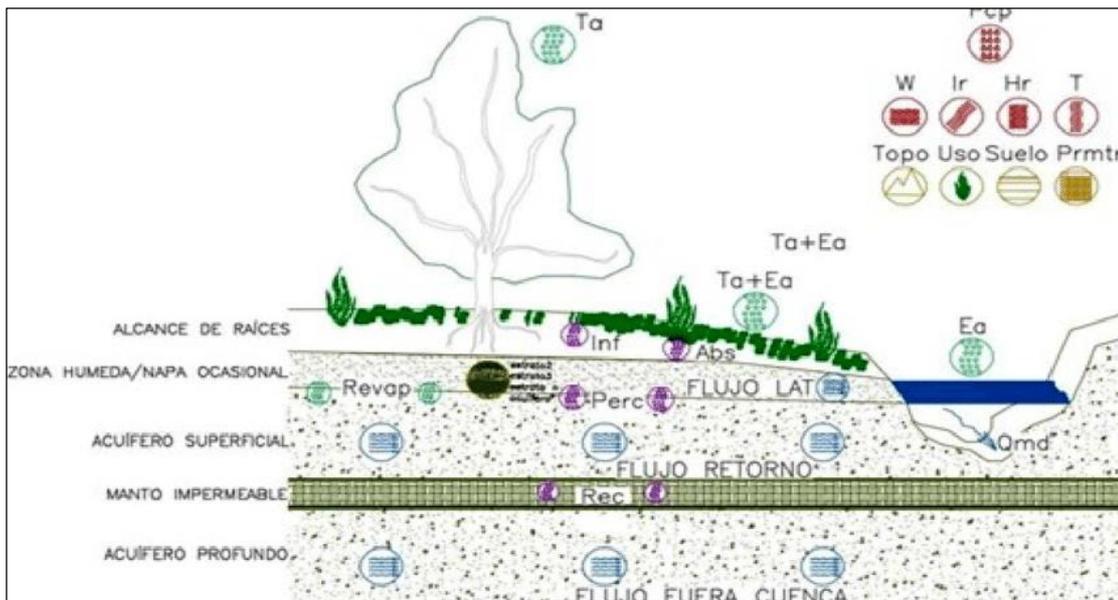


Figura 7. Procesos del ciclo del agua en SWAT. Fuente: Neitsch *et al.* (2011).

Neitsch *et al.* (2011) mencionan que; el cálculo del agua de la cuenca en la etapa de la superficie está compuesto por ecuación de balance del flujo en el territorio, mediante la simulación diaria.

$$SW_t = SW_o + \sum_{i=1}^t (R_{day} - Q_{surf} - E_{ta} - R_{day} - W_{seep} - Q_{gw})_i \dots \dots \dots \dots \dots (1)$$

En el cual:

*SW<sub>t</sub>*: capacidad terminante del fluido en la superficie en mm de H<sub>2</sub>O

*SW<sub>o</sub>*: capacidad preliminar del fluido de la superficie

*R<sub>day</sub>*: total de la variable precipitación

*Q<sub>surf</sub>*: total de escurrimiento del suelo

*E<sub>ta</sub>*: total de agua que podría evapotranspirar

*W<sub>seep</sub>*: total del fluido infiltrado en el subsuelo

*Q<sub>gw</sub>*: total de contraflujo

Según SENAMHI (2017) menciona que; la división de la cuenca en Unidad de Respuestas Hidrológicas (HRU) posibilita que el modelo refleje discrepancias en evapotranspiración para diversos cultivos y tierras. El escurrimiento se anuncia por separado para cada HRU y se dirige a obtener la esorrentía total de la cuenca. Además, acrecienta la seguridad y proporciona una superior especificación mecánica del balance hídrico. Los distintos ingresos y etapas involucradas en las series hidrológicas. A continuación, se resumen en las siguientes secciones:

a. Clima

Uribe (2010) menciona que el clima de una cuenca provee los aportes de saturación y energía, que definen la estabilización del fluido y la significación referente de distintos elementos del ciclo del agua. Por otro lado, los componentes climáticos requerido para SWAT radican en las precipitaciones por día, temperaturas máximas y mínimas del aire, velocidad del viento, radiación solar y la humedad relativa.

## b. Hidrología

Para SENAMHI (2017), las precipitaciones pueden ser obstaculizadas por las plantas o descender a la superficie. El fluido por encima del suelo penetra o se escurrirá como escurrimiento del terreno. El escurrimiento se desplaza respectivamente en forma dinámica. Dicho fluido infiltrado, se puede almacenar en la superficie y posteriormente evapotranspirar o pasar paulatinamente por medio del fluido subterráneo al sistema del recurso hídrico exterior. Las posibles trayectorias de corriente del fluido simuladas por SWAT en cada HRU se visualizan en la Figura 8.

## c. Almacenamiento de dosel

El recurso hídrico es capturado por la extensión vegetativa, manteniéndose y poniendo a disposición para el proceso físico (evaporación). Además, al emplearse el método de la curva numérica, que sirve para estimar el escurrimiento medio ( $Q$ ) a través de la cantidad de precipitación y retención máxima potencial ( $S$ ), empleando valores de curvas numéricas para calcular el escurrimiento. Por otro lado, la reserva de la superficie vegetativa considera los cálculos de escurrimiento. No obstante, el manejo de los métodos Green y Ampt, que es usado para estimar la cantidad de agua infiltrada en la superficie terrestre y el exceso hídrica que queda disponible en el suelo para el escurrimiento. El modelo utiliza este valor y el índice de área foliar para calcular el almacenamiento máximo a lo largo del tiempo en el ciclo de desarrollo del cultivo / cobertura del suelo. Cuando se calcula la evaporación, el agua se elimina primero del almacenamiento del dosel (Uribe, 2010).

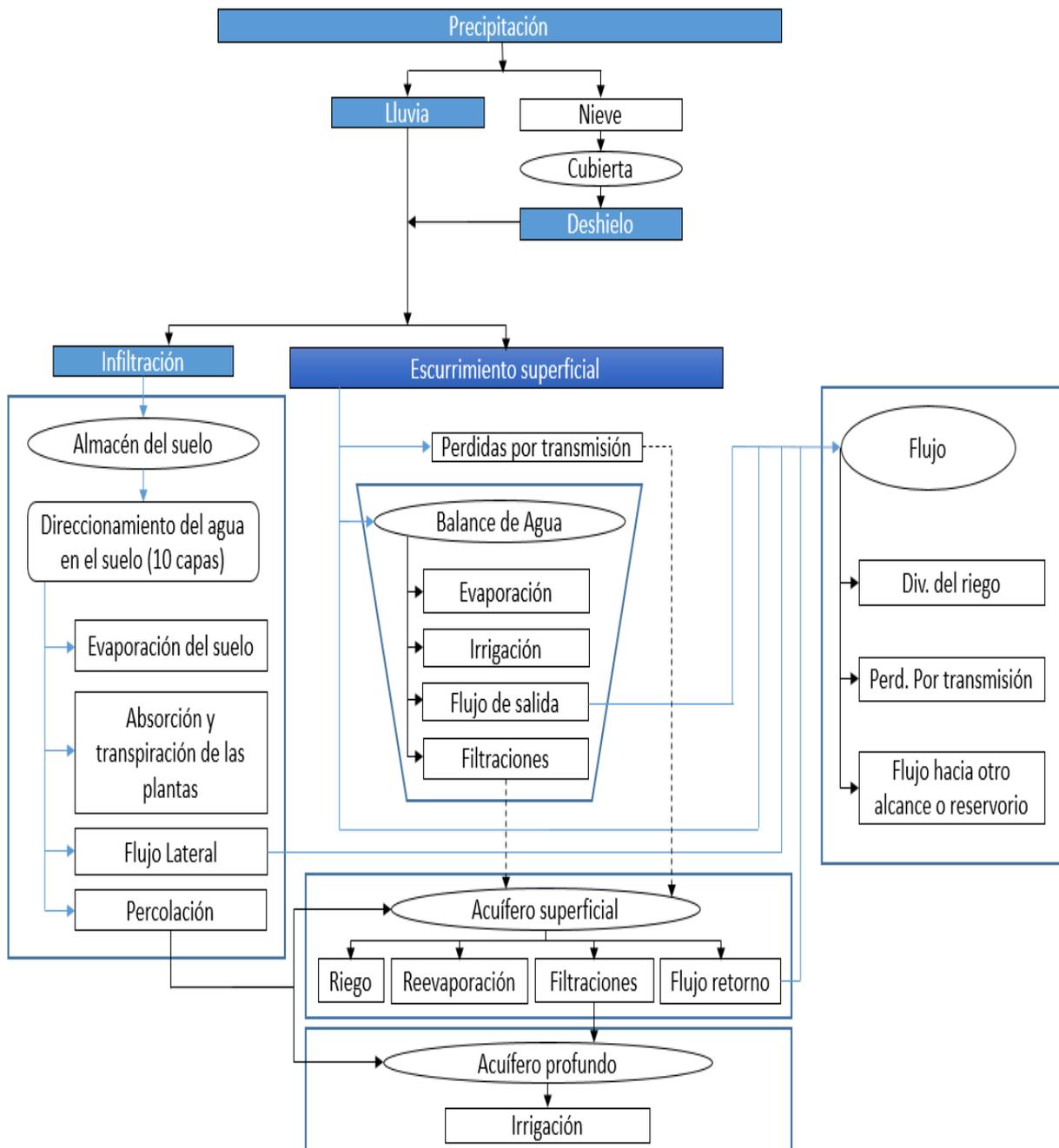


Figura 8. Simulación de movimiento del agua en SWAT. Fuente: Neitsch et al. (2011).

#### d. Evapotranspiración

Es una designación colectiva para todas las series donde el fluido en etapa líquida o sólida, se transforma en vapor atmosférico cerca de la extensión del suelo. La evapotranspiración incorpora la evaporación de superficies hídricas, tierra descubierta y extensiones vegetales; evaporación desde el interior de las hojas de los vegetales y sublimación de extensiones de nieves. Del mismo modo, dicho modelo calcula la evaporación del suelo y las extensiones vegetativas por separado. Por otro lado, la evaporación real del fluido en la superficie es estimado utilizando la función exponencial para el fondo de los suelos y la capacidad hídrica (Sánchez, 2017).

#### e. Evapotranspiración potencial

Es la velocidad en el cual se produciría la evapotranspiración en un plano grande con recubrimiento de manera uniforme, con la presencia de la flora en desarrollo que posee entrada a una provisión ilimitada del flujo terrestre. Se supone que esta proporción no se ve afectado por las consecuencias micro-climáticas de sucesiones del almacenamiento de energía. Por otro lado, SWAT presenta selecciones para la estimación de la evapotranspiración potencial: Hargreaves, Priestley-Taylor y Penman-Monteit (Sánchez, 2017).

#### f. Escurrimiento superficial

Fluido que tiene lugar a lo largo de una extensión trasversal. Usando sumas diarios o sub-diarios de precipitación, SWAT simula capacidad de extensiones de la esorrentía y máxima promedio para cada Unidad de Respuesta Hidrológica. Esto se calcula empleando una modificación del procedimiento de curva numérica del USD o el método de infiltración Green y Ampt. Por otro lado, el método Green y Ampt, requiere datos de precipitación sub-diarios y evalúa la infiltración en función del anverso de la potencia de matriz húmeda preliminar y la conducción del comportamiento del fluido segura. Dicho fluido que no se ha infiltrado se transforma en escurrimiento. SWAT contiene disposición para la estimación de la esorrentía de la superficie solidificado (Ghaffari, 2010).

#### g. Infiltración

La infiltración se describe a la entrada del fluido en el perfil del suelo de la extensión de la Tierra. A medida que continúa la infiltración, el suelo se vuelve cada vez más húmedo, lo que hace que la tasa de penetración baje con el periodo, incluso que alcance valor constante. Dicha tasa inicial necesita de la capacidad de saturación de la superficie antes de introducir el fluido en la extensión terrestre. La tasa de la última etapa de introducción es semejante a la conducción de los comportamientos de los líquidos saturados de la superficie. Por otra parte, la proporción líquida que ingresa a la silueta terrestre se automatiza como la discrepancia en medio de la proporción de la precipitación y de escurrimiento (Ghaffari, 2010).

#### h. Redistribución

Este término representa al desplazamiento constante del fluido a través de la silueta terrestre posteriormente al ingresar al fluido. Dicho proceso es ocasionado por discrepancias en la capacidad del fluido en la silueta. Cuando la capacidad líquida de la silueta sea similar, la redistribución se detendrá. Dicho elemento de redistribución SWAT utiliza una técnica de ingeniería de almacenamiento hacia una predicción del agua a través de cada perfil terrestre en el círculo primordial. El agua descendente o la infiltración ocurren cuando el contenido espacial del perfil terrestre se propaga y la capa inferior no presenta saturación. El caudal se rige por la conducción colmada de la superficie terrestre (Uribe, 2010).

#### i. Percolación

El elemento de percolación SWAT utiliza un modo acumulativo que pronostica el fluido por medio de cada estrato de la superficie terrestre. Dicho fluido descendente sucede cuando supera el contenido de campo del estrato terrestre y si el estrato debajo no presenta saturación. El caudal descendente está verificado por la conducción de impregnación en el estrato terrestre. Por otro lado, el fluido ascendente tal vez suceda cuando un estrato por debajo supera. La corriente del flujo de un estrato profundo contiguo está regularizada por un factor del líquido subterránea para los dos estratos (Mata, 2008).

#### j. Flujo lateral

Son aportaciones del fluido formados en el inferior de la extensión, sin embargo, arriba del área en el que las rocas quedan repletas de flujo. Dicho fluido profundo adyacente en la silueta de la superficie (0-2 m) se automatiza concurrentemente con la redistribución. Se utiliza un tipo de almacenamiento cinemático para predecir el flujo lateral en cada cubierta de suelo (Proaño *et al.*, 2006).

#### k. Flujo de retorno

Arnold *et al.* (1998) mencionan que, el flujo de retorno es el volumen de agua subterránea que se origina en la capa freática. SWAT distribuye el flujo subterráneo en ambos medios de almacenamiento natural del agua: un almacenamiento poco profundo e independiente, que coopera al fluido a los cursos de agua interiormente de la cuenca y un almacenamiento hídrico subterráneo y establecido que coopera al retorno de los cursos de agua externamente de la cuenca. Del mismo modo, el flujo que se infiltra más distante de la base del círculo de la cepa se fragmenta en fracciones; cada fragmento se cambia en una incrementación para cada acuífero. Además de regresar al fluido, se acumula en el acuífero superior alcanza nuevamente proporcionar saturación en la silueta terrestre en circunstancias desecadas o es absorbida naturalmente por la flora. Asimismo, se utiliza constantes de disminución del cambio constante de los datos del fluido diario para retrasar el agua del acuífero (Mata, 2008).

### **Fase de enrutamiento del ciclo hidrológico**

Williams y Hann (1972) mencionan que, cuando SWAT determina la cantidad de agua, sedimentos, nutrientes y pesticidas en el canal principal, las cargas de la red de flujo en el curso de agua se dirigen con una estructura en particular. Además de monitorear el flujo intensivo en el conducto, SWAT simula la conversión de elementos químicos en las masas del agua y en el conducto. Por otra parte, el enrutamiento del flujo es ocasionado cuando el fluido fluye aguas abajo, un fragmento puede perderse debido a la evaporación y la transmisión a través de la capa del canal (Figura 9).

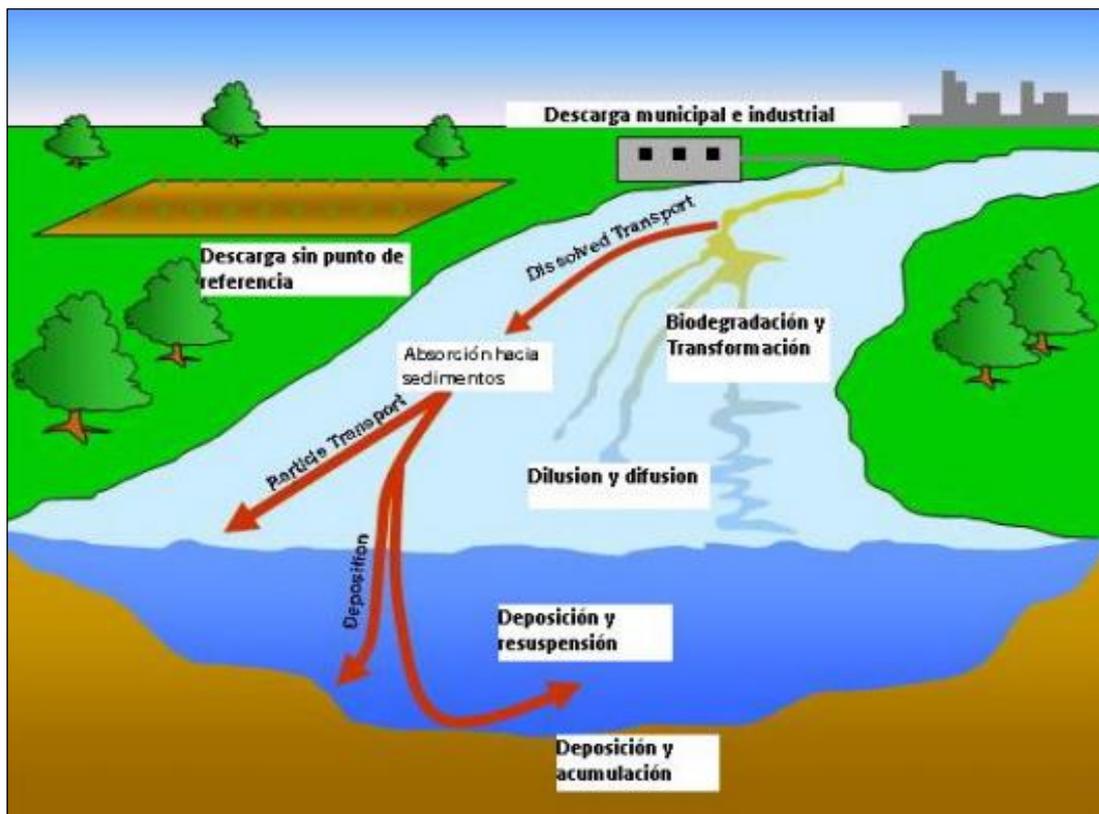


Figura 9. Procesos de corriente modelados por SWAT. Fuente: Uribe (2010).

### 1.2.9. Técnicas de aprendizaje computacional

El aprendizaje informático se usó originalmente para desarrollar técnicas que permiten que los procesadores aprendan. Como actualmente contiene sucesiones de sistemas estadísticos desarrollados para regresión y distribución, posee uso en variedades de campo (ecología, química, finanzas, ingeniería ambiental, etc), incluidos los diagnósticos hospitalarios, el descubrimiento de estafas con tarjetas de crédito, etc. Por otro lado, las condiciones subyacentes alcanzan la complejidad y se desconoce la representación puntual de la subordinación (Espino, 2017).

## Redes neuronales

Son sistemas de aprendizaje ilustrados por la función del cerebro humano. De esta manera, los sistemas que permiten relaciones no lineales entre las variables de entrada y salida son simulados e imitados (Figura 10). El primordial atributo, radica en tratar indagación equivalente en lapso existente, permitiendo el manejo en la codificación e investigación de modelos en métodos complicados (Martínez, 2014). De manera similar, las Redes Neuronales Artificiales (RNA) son herramientas que se usan ampliamente para las predicciones en tiempo real en industrias, minería, otros (Martín y De Paz, 2007). Por otro lado, debido a su exactitud, efectividad y suficiencia para modelar las relaciones no lineales, las RNA actualmente se emplean para la codificación, afirmación de modelos, el empleo de acercamiento y la ingeniosidad en diferentes usos (Jain *et al.*, 1996). Un ARN también consta en particular de capas de ingreso, varias capas reservadas y una capa de salida, cada una de ellas consta de varias neuronas. De esta manera, las variables de ingreso son signos que van por medio de capas de la RNA y finalmente producen datos de salida (Qiang y Lam, 2015).

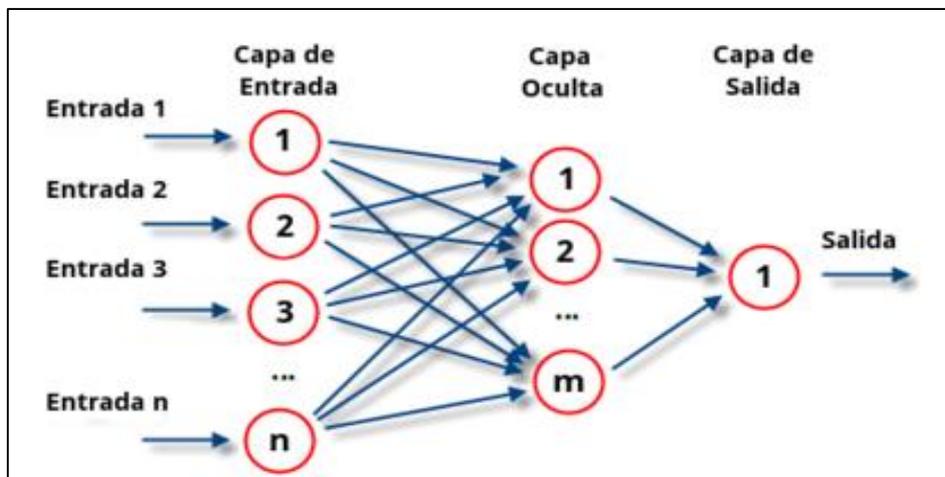


Figura 10. Redes Neuronales Artificiales. Fuente: Delgado (2018).

## Software R

Es un programa basado en la contribución abierta para computación estadística. Manipula compilaciones de funciones que se atribuyen con comandos en una ventana, facilitando la

funcionalidad del proceso de modelación. El lenguaje R brinda una gama de características estadísticas, como modelación directo, no directo, organización o agrupación. Asimismo, maneja data, ejecuta automatizaciones y traza por medio de gráficos (Espino, 2017).

### **1.2.10. Cambio climático**

La degradación ambiental es una propensión que posee discrepancias para la colectividad, las personas y la ilustración; el cambio climático es un problema latente. A lo largo del siglo XX, hubo tendencias en las cumbres de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. Las semillas de estas cumbres tuvieron lugar en 1972, en honor de la Primera Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Ambiente (Conferencia de Estocolmo); con la participación de representantes de 113 países y la participación de organizaciones gubernamentales y no gubernamentales. En ese momento, no había un concepto concreto del cambio climático, el debate cambiaba en torno a contenidos, como la polución química, ensayos de explosivos nucleares. En dicha cumbre, los líderes mundiales decidieron reunirse cada diez años para monitorear el estado ambiental y evaluar el impacto (De Vengoechea, 2012). Por otro lado, en 1979, se conmemoró la primera conferencia general acerca del Clima en Ginebra, donde el cambio climático se consideraba una advertencia seria para el astro. Dicha Conferencia favoreció una enunciación que instó a los regímenes a anticipar y prevenir eventual variación en el clima provocado por actividades antrópicas (De Vengoechea, 2012). Posteriormente, los acuerdos de la Cumbre para la Tierra se conmemoraron en Río de Janeiro, Brasil, con la participación de 178 países y casi 400 representantes de ONG, los dirigentes internacionales acogieron el plan llamado Agenda 21, un esperanzado evento de gestión mundial para el proceso sostenible. Sus planos de actividad fueron fundamentalmente la disputa frente a el cambio del clima, el amparo de la biodiversidad y la exclusión de sustancias perjudiciales liberadas. Ingresó en empuje en 1994 posteriormente al recibir la cifra necesaria de corroboración (De Vengoechea, 2012). También se resalta que una de las cumbres más importantes es el Protocolo de Kioto, que se implementó en 1997. Es aquí donde las naciones potencias en industrias llegan a acuerdos concretos y un calendario para la acción. Este fue sin duda un gran paso adelante, ya que se llegó a un acuerdo vinculante para todos los países signatarios, de modo que durante el período 2008 a 2012, las emisiones de los 6 gases de efecto invernadero más potentes

disminuyeron en un 5.2 % en comparación con 1990 (De Vengoechea, 2012). Por lo tanto, se confirma que el cambio climático es un tema transversal y preocupante para todos, a su vez, en todas las cumbres celebradas, se buscó el compromiso de todos los estados, ya que este problema es inminente y observable para lo que vivimos hoy.

El cambio climático, muy a menudo se suele ofuscar con la variabilidad que tiene el clima, el efecto invernadero o el calentamiento global. Así mismo La variabilidad del clima hace referencia a las alteraciones en las condiciones del clima promedio. En definitiva, la degradación ambiental es un hecho. Según Díaz (2012) resalta que; la variación climática se muestra con lluvias extensas, incremento de la temperatura, largos tiempos de estiaje, variación de orientación del viento, descongelación en los polos, variación en la migración de la fauna, borrascas, huracanes, maremotos y subida del nivel de las masas de agua.

### **Cambio climático en Perú**

Los efectos del cambio climático son una de las amenazas ambientales más importantes del siglo XXI en el mundo. Según el Instituto Geofísico del Perú [IGP], (2005), Perú no es ajeno a este problema, ya que se han observado eventos extremos durante la última década con mayor intensidad, como cambios significativos en las precipitaciones y temperaturas extremas, que permiten comprender el cambio en la variabilidad climática y son indicadores de posibles cambios en los patrones climáticos, como la disminución de la precipitación en la cuenca del Mantaro o el aumento de la precipitación en Urubamba, que están directa o indirectamente relacionados con el calentamiento global (IGP, 2015). También hay otros procesos que están estrechamente relacionados con el aumento de la temperatura global, como la retirada de los glaciares en Perú, que tiene alrededor del 70 % de los glaciares tropicales del mundo y da testimonio de su retirada acelerada. La desaparición de los glaciares tendría grandes repercusiones porque, además de estar incluidos en los ecosistemas de alta montaña, son una fuente de recursos hídricos para un conjunto de requisitos socioeconómicos en todas sus cuencas asociadas (IGP, 2015).

## **CAPÍTULO II: MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Diseño de la investigación**

El presente trabajo es de tipo descriptivo, con un diseño de investigación no experimental, longitudinal; debido a que es un trabajo que se realiza sin manipular deliberadamente las variables y se basa fundamentalmente en la observación, recolección de datos, análisis estadísticos y explicación de los cambios encontrados, a través de periodos en el tiempo (Hernández *et al.*, 2003).

#### **2.1.1. Lugar y fecha**

La presente investigación se desarrolló en la cuenca del lago Chinchaycocha, situada en las jurisdicciones de Junín, Carhuamayo y Ondores en la región de Junín, así también en las jurisdicciones de Vicco y Ninacaca en la región de Pasco. La investigación fue ejecutada en un tiempo aproximado de 1 año, a partir del mes de octubre del año 2019 hasta octubre del año 2020.

#### **2.1.2. Características generales del área de estudio**

##### **Ubicación política**

Políticamente, la cuenca del lago Chinchaycocha se encuentra en las regiones de Junín y Pasco. Asimismo, la unidad hidrográfica está ubicada en dos provincias (Junín y Cerro de Pasco) y en cinco distritos: Carhuamayo, Junín y Ondores en la región de Junín y Ninacaca y Vicco en la región de Pasco (Shoobridge, 2006). En el Apéndice 1, se muestra la ubicación política a nivel regional.

## **Ubicación geográfica**

La cuenca del lago Chinchaycocha está ubicada geográficamente entre los paralelos 10° 45' y 11° 15' de latitud sur y los meridianos 75° 57 ' y 76° 21' de longitud oeste. Su área total es de 1 719,86 km. Altitudinalmente, se extiende desde los 4 080 m.s.n.m., hasta los 4 700 m.s.n.m. (ANA, 2018).

## **Ubicación hidrográfica**

Según ANA (2018), la cuenca del lago Chinchaycocha tiene los siguientes límites:

**Norte:** La cuenca del río Huallaga

**Sur:** La cuenca del río Mantaro

**Este:** La cuenca del río Paucartambo

**Oeste:** La cuenca del río Huaura y Rio Chancay

## **Demarcación administrativa**

Según ANA (2018), la cuenca del lago Chinchaycocha esta demarcado administrativamente (ver Apéndice 2):

**Norte:** Administración Local del Agua Pasco

**Sur:** Administración Local del Agua Mantaro

**Este:** Administración Local del Agua Tarma

**Oeste:** Administración Local del Agua Huaura y Chancay

## **Accesibilidad**

El lago Chinchaycocha tiene muy buena accesibilidad. La forma más utilizada para acceder al Área Natural Protegida por el Estado en Junín es mediante la vía principal (ver Apéndices 3 y 4). Para llegar a la localidad de Junín es alrededor de 5 horas desde Lima. Durante la estación

de estiaje, se pueden usar rutas alternativas para alcanzar al área a través de la autopista Canta - Cordillera de La Viuda - Pasco en aproximadamente seis horas. La otra ruta alternativa menos conocida es Canta - Cordillera de La Viuda (Yantac) - Marcapomacocha - Corpacancha - Conocancha - Atocsaico - La Cima - Junín (Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado [SERNANP], s.f.).

### **Descripción y esquema fluvial de las unidades hidrográficas**

El área de investigación pertenece a la extensión general de la cuenca de Junín, la extensión es de 1 719,86 km<sup>2</sup> y las contribuciones de los ríos San Juan y Colorado, que juntas tienen un área de la cuenca de 1 316,6 km<sup>2</sup>. Asimismo, las contribuciones al lago Chinchaycocha, formado por ríos y quebradas, tienen flujos variados, dependiendo del periodo de año (Figura 11). Asimismo, en el esquema hidráulico, se presenta el trabajo de regulación hidráulica más representativo "La Represa Upamayo", que es una estructura hidráulica con un cuerpo de presa de tierra impermeabilizada, donde se regulan las descargas hacia el río Mantaro (ANA, 2018).

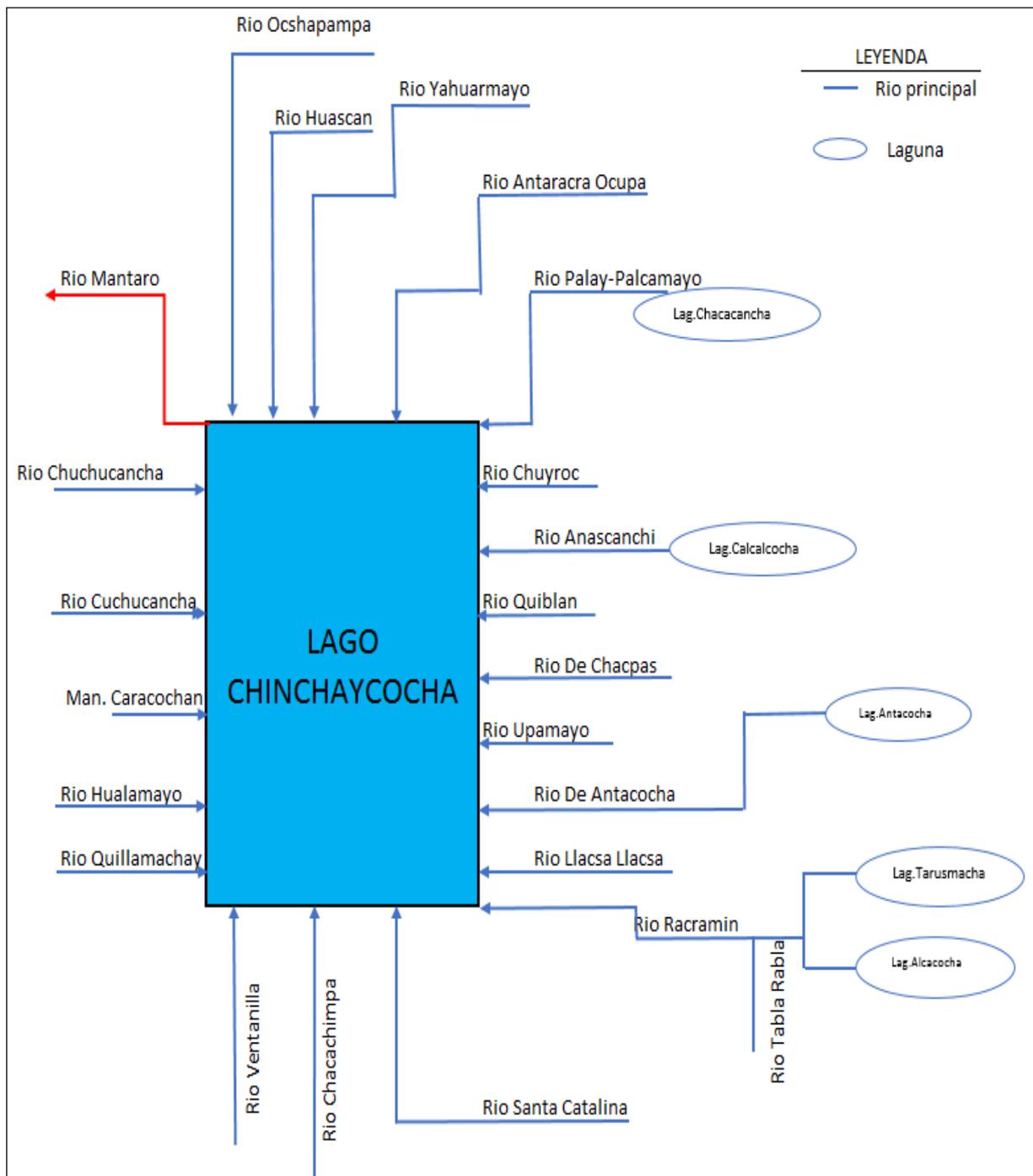


Figura 11. Unidades hidrográficas. Fuente: ANA (2018).

## **Aspectos socioambientales en el área de estudio**

La cuenca del lago Chinchaycocha está comprendida por dos aspectos importantes, que son:

**Aspectos Físico Ambiental:** Las características físicas y ambientales de la cuenca hidrográfica de lago de Chinchaycocha están definidas por diversos factores, las cuales son:

a. Geomorfología

El lago Junín o Chinchaycocha se localiza en la meseta de Bombom. El cambio de los procesos de deglaciaciones en el extremo norte y los glaciares de la montaña convergieron uno a uno a lo largo del llano, y agonizantes instalaciones establecieron un paseo en esa zona y formaron el lago Chinchaycocha (Figura 12) (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 2008).

b. Fisiografía

La fisiografía preponderante de la extensión terrestre es un terreno casi plano, que limita con las costas norte, este y sur y con pendientes de 1 a 4 %. En las litorales suroeste, oeste y noroeste es completamente diferente. Los cerros y collados que bordean el lago varían entre 50 y 150 metros sobre el nivel del agua y alcanzan pendientes de hasta un 45 % (Figura 13) (ANA, 2018).

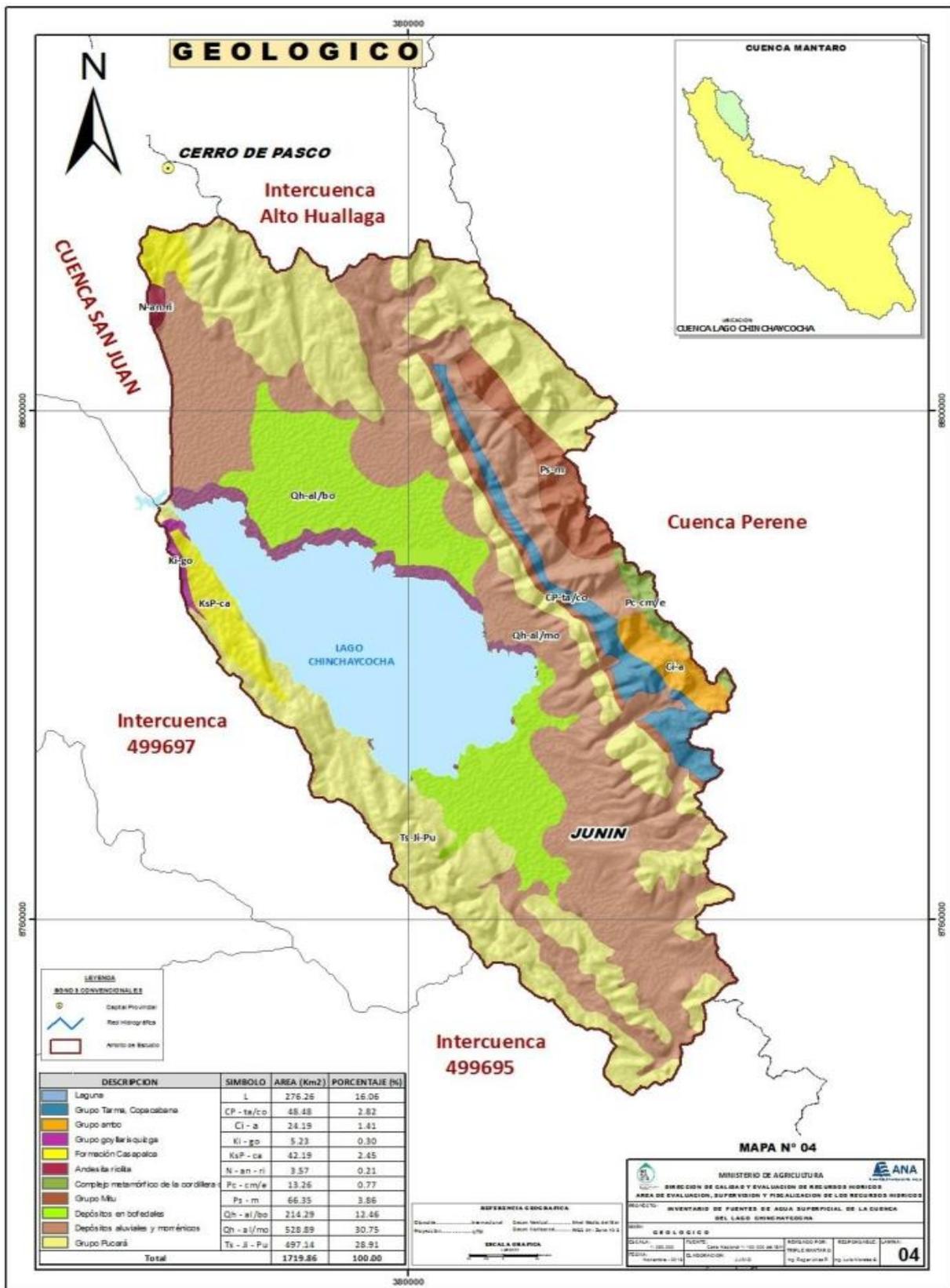


Figura 12. Mapa Geológico de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).

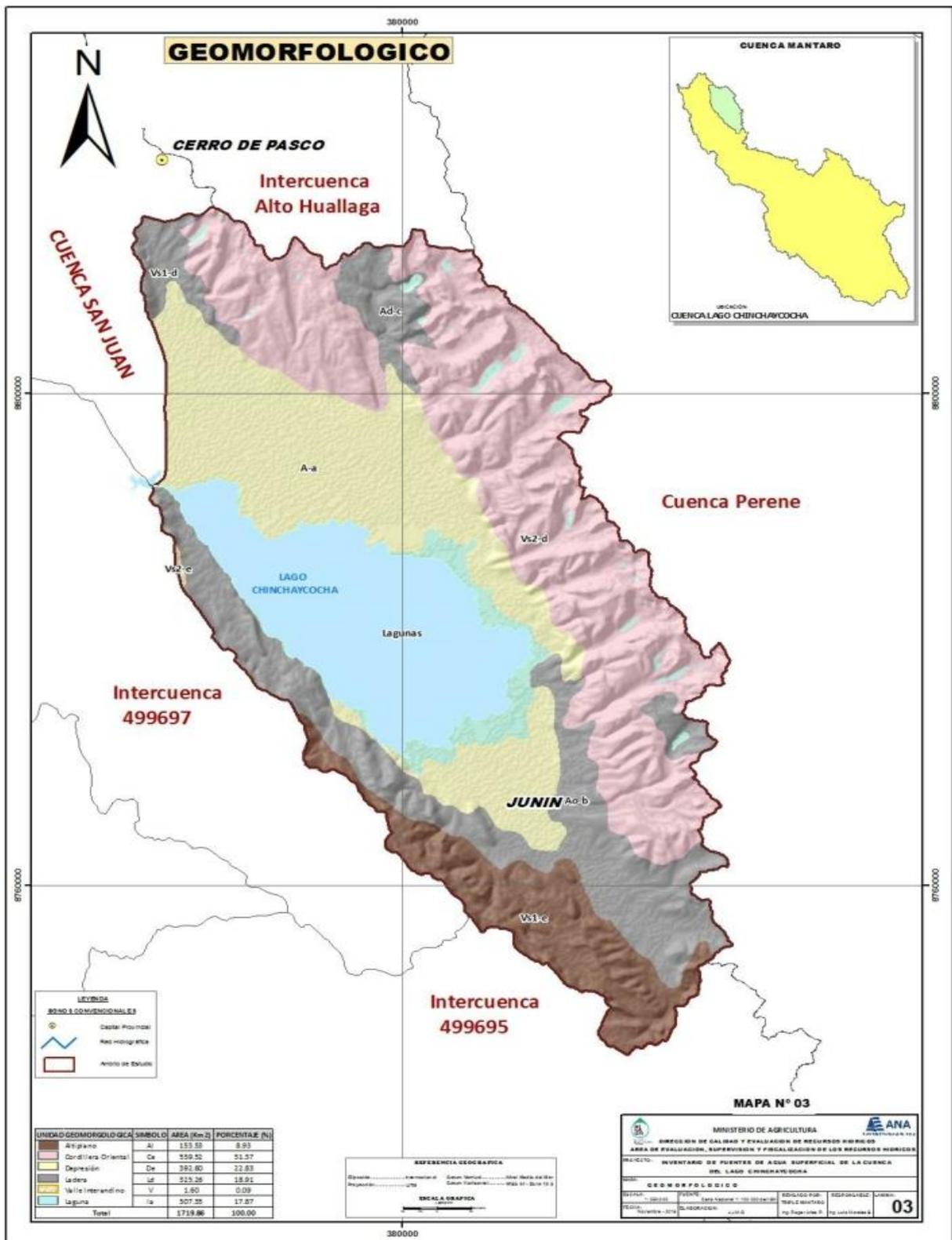


Figura 13. Mapa Geomorfológico de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).

c. Edafología

Las superficies importantes en la Reserva Nacional de Junín son Histosolesútricos, que son suelos evolucionados a través de partículas sólidas en el espacio del lago, con una topografía casi llana y con escenarios hidrofílicas intactos; Feozems, superficies derivado de la desintegración arenosa, cuarcitas y superficies de litosol, suelos evolucionados en caliza de esquisto y arenisca calizas, materia prima volcánica e intrusivo (INRENA, 2008).

d. Región Biogeográfica

La ecología de la región incumbe al contexto de montaña de la Cordillera Central de los Andes del País, distribuidos en la meseta de la reserva en el suelo más menudo, incluso sus suelos elevados en el espacio de Tundra (INRENA, 2008). En la Figura 14 se presenta un plano de zonas de vida de la cuenca del lago Chinchaycocha.

e. Hidrografía del área de estudio

El lago Chinchaycocha es sostenido primordialmente por el río San Juan, ubicado en el extremo noroeste de la Reserva Nacional, drena al punto del noroeste mediante la presa Upamayo, comenzando a operar en 1936, proporcionando salida al río Mantaro. Por otro lado, es uno de los primordiales afluentes de la cordillera de los andes de la cuenca amazónica y formando, río en la parte inferior, el valle del Mantaro, el más significativo del centro del país, por su rica actividad agrícola (ANA, 2018).

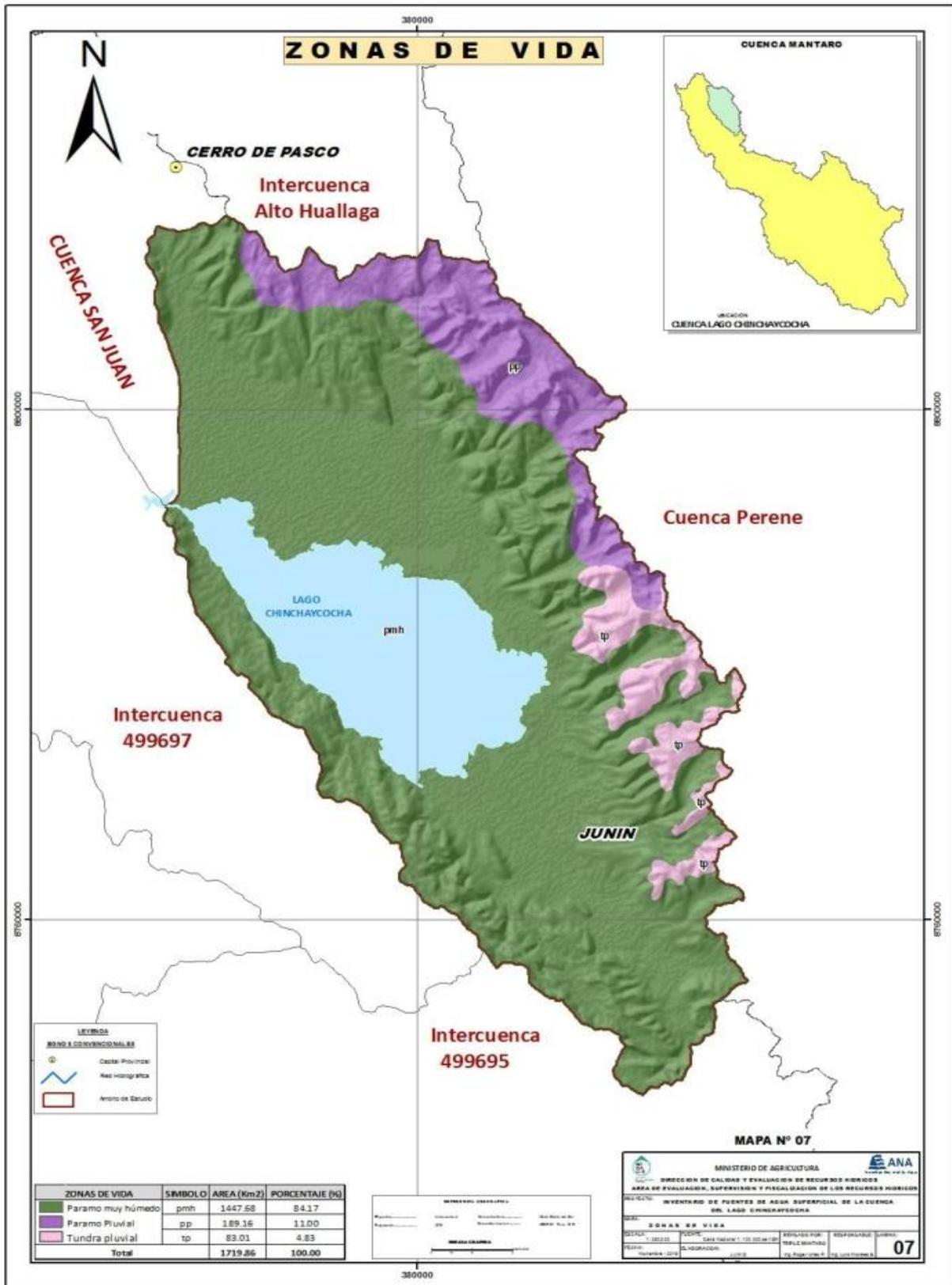


Figura 14. Mapa de zonas de vida de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).

#### f. Cobertura Vegetal

En la cuenca del lago Chinchaycocha se pueden distinguir cinco tipos de cobertura vegetal, basados en el mapa de cobertura vegetal del MINAM del 2015, las cuales son: Agricultura costera y andina (Agri), Bofedal (Bo), lagunas y/o lagos y/o cochas (L/Co), Pajonal andino (Pj), Área urbana (U); siendo los más representativos Pajonal andino con un 60,69 % del área total de la cuenca, seguido por Lagunas y/o lagos y/o cochas con 23,35 %, Bofedal con 15,08 % y área urbana con 0,51 % del área total de la cuenca (ANA, 2018). En la Tabla 1, se presentan las características de cada una de ellas. Asimismo, se visualiza en la Figura 15 la zonificación de las diferentes coberturas.

Tabla 1

*Cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha*

N°	Simbolo	Cobertura Vegetal	Área (km <sup>2</sup> )	Porcentaje
1	Agri	Agricultura costera y andina	6,39	0,37 %
2	Bo	Bofedal	259,30	15,08 %
3	L/Co	Lagunas, Lagos y cochas	401,63	23,35 %
4	Pj	Pajonal andino	1043,75	60,69 %
5	U	Área urbana	8,79	0,51 %
<b>TOTAL</b>			<b>1719,86</b>	<b>100 %</b>

Fuente: ANA (2018).

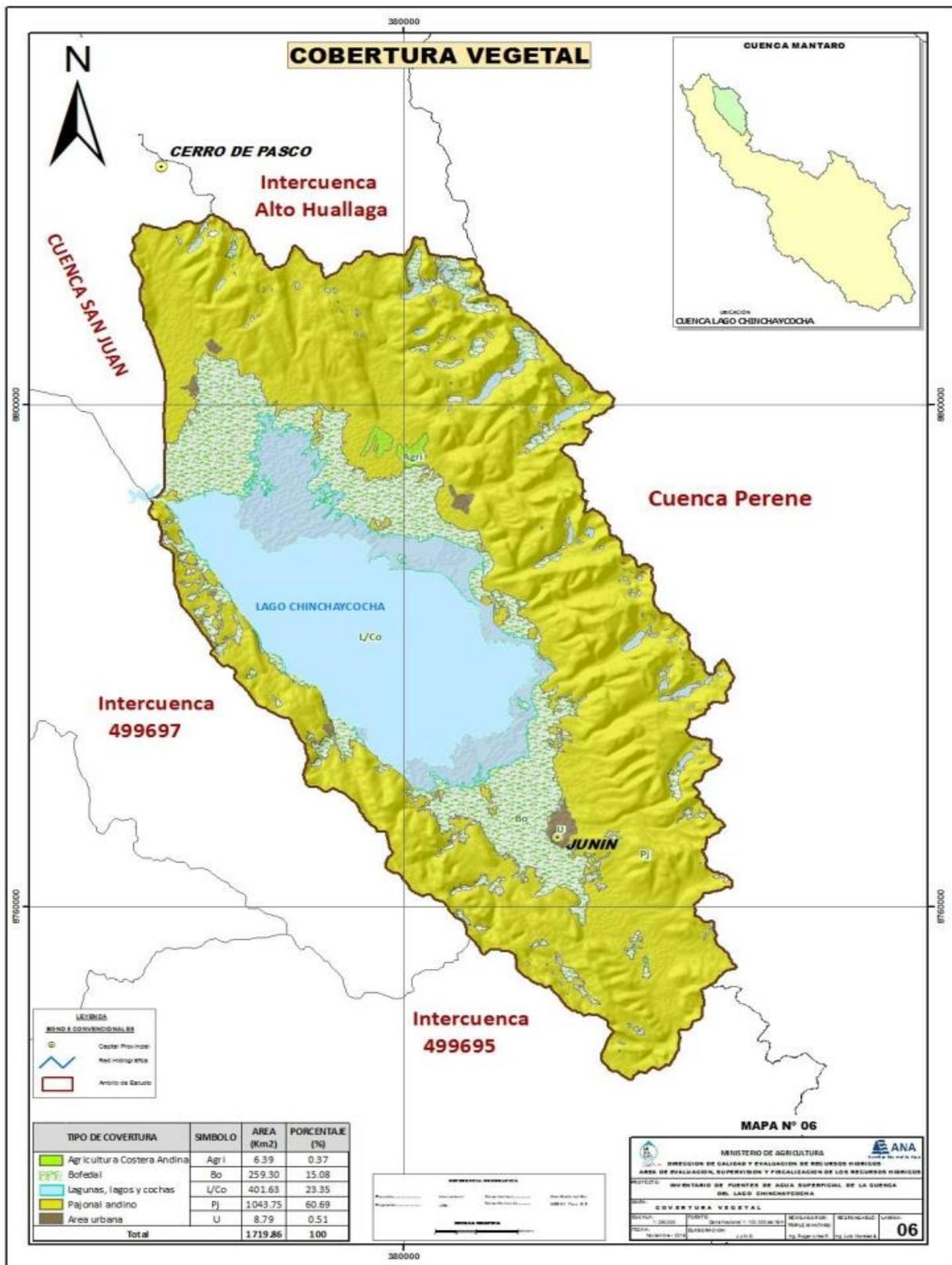


Figura 15. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).

g. Flora

Para INRENA (2008), la vegetación de la Reserva Nacional de Junín, incumbe al espacio geográfico, agregando a esta diversidad vegetaciones hídricas presente en el cuerpo hídrico. Las agrupaciones más peculiaridades son:

- Pastizales de meseta: Caracterizados especialmente por pastos frondosos y duros llamados ichus.
- Altiplánica: Compuesta por especies pequeñas, en las que hallamos pastos de hojas blandas.
- Totora: Ocurre en grandes alineaciones que establecen los márgenes del lago, formadas por las variedades de "totora": *Scirpus californicus* var. y *Juncus articus* var. La mayoría de las veces son muy densos, hasta el punto de ser casi impenetrables.
- Vegetación ribereña: Existen vegetaciones ribereñas hundidas en el lago Junín.

h. Fauna

En el lago Chinchaycocha se encuentra variedades de aves endémicas y migratorias, constituyendo un humedal importante y rico en las tierras altas peruanas. Del mismo modo, las especies de fauna y flora fueron registradas por el personal de SERNANP y los resultados del monitoreo se implementaron en el Plan de Manejo Ambiental de las Operaciones del Embalse y Desembalse del lago Chinchaycocha. Actualmente hay 150 especies entre residentes, migratorias y temporales, y a menudo hay alrededor de 70 especies durante todo el año en el lago (Asociación Ecosistemas Andinos [ECOAN], 2010).

**Aspectos socioeconómicos y culturales:** Las características socioeconómicas y culturales de la cuenca hidrográfica de lago de Chinchaycocha están definidas por diversos componentes, las cuales son:

a. Población – demografía

La población total de los 05 distritos ubicados dentro del ámbito de estudio de la cuenca del lago Chinchaycocha, según el reporte del Instituto Nacional de Estadística e Informática (INEI) es de 26 119 habitantes (Censo 2017). En la Tabla 2 se muestra la distribución por distritos, área y densidad de población por distritos, con una tasa de crecimiento aproximado de 1,2 y 1,5 % anual para las regiones de Junín y Pasco respectivamente (ANA, 2018).

Tabla 2

*Población total en la cuenca del lago Chinchaycocha*

Region	Provincia	Distrito	Altitud (m s.n.m.)	N° Población Censo 2017	Densidad Poblacional (Hab/ km <sup>2</sup> )
Región de Junín	Junín	Junín	4107	10 976	12,62
		Carhuamayo	4126	6 638	32,45
		Ondores	4100	1 236	4,27
Región de Pasco	Pasco	Ninacaca	4140	3 877	7,20
		Vicco	4114	3 392	19,79
<b>TOTAL</b>				<b>26 119</b>	<b>76,33</b>

Fuente: ANA (2018).

b. Caracterización Socioeconómica

Las características socioeconómicas están definidas por diversos factores, como son:

- Actividad Agrícola: Estas son actividades de prosperidad mínima, basada en pequeñas tierras cultivables y huertos asignados (Tabla 3). Por otro lado, la actividad mencionada está muy extendida y se gana la vida principalmente por las dificultades y escenarios climáticas de la región, especialmente en zonas de gran altura, problemas de tierras comunales, condiciones de mercado, falta de conocimientos técnicos y carencia en las

zonas donde habitan. Como resultado, su capacidad para generar excedentes también se reduce significativamente (INRENA, 2008).

- **Actividad Pecuaria:** La actividad más importante de los habitantes de la Reserva Nacional Junín es la ganadería. Dicha actividad se efectúa especialmente de manera comunitaria, principalmente ovejas y en menor medida, bovinos y camélidos. El departamento Junín es la tercera mayor productora en términos total de ovejas a nivel nacional, después de Puno y Cuzco (INRENA, 2008).

Tabla 3

*Tierra y actividad agropecuaria de las comunidades campesinas ubicadas al entorno del lago Chinchaycocha*

<b>Comunidades Campesinas</b>	<b>Extensión (ha)</b>	<b>Cultivos</b>	<b>Ganado</b>		
			<b>Ovino</b>	<b>Vacuno</b>	<b>Alpaca</b>
Villa Junín	14470	Papa, maca, avena	150	500	325
Huayre	6141	Papa(chirimauna), maca	2000	200	250
Carhuamayo	3242	Papa, maca y pastos	2300	85	550
Santa Clara de Chuiroc	1422	Papa(chiri), maca	-	-	285
Matacancha	654	Maca, papa	2000	150	30
Ondores	37767	Maca, papa	50000	18000	3000
San Pedro de Pari	14984	Maca, papa	8000	3000	1000
Vicco	25877	Maca, avena cebolla, pastos	62770	520	1488
Cochamarca	5954	Maca, pastos	5600	450	400
Ninacaca	90000	Maca, papa, olluco, oca	120000	2000	1100

*Fuente:* INRENA (2008).

- **Actividad Piscicultura y Caza:** En los últimos años, la caza y la pesca en particular han disminuido significativamente, las personas en algunas áreas del lago Junín continúan realizando esta actividad de manera artificial, principalmente cazando aves. También, la

recolección de huevos y crías se practica desde sus nidos directamente. Por otro lado, también se sigue realizando la caza de cuyes salvajes y vizcachas en el sector de Parí (INRENA, 2008).

- Minería: Las actividades mineras en la reserva nacional de Junín se han desarrollado durante más de 300 años y, a pesar de su importante responsabilidad ambiental, se han traducido en un aumento del comercio, las obras de carreteras y un apresurado trascurso de reciprocidad de cultura (INRENA, 2008).
- Recursos Turísticos: El Área Natural Protegida por el Estado, es un fragmento valioso de un potencial turismo y recreativo, incluye provincias de Lima, Huarochirí, Canta, Junín y Pasco. También incorpora al Santuario Nacional Huayllay y el Santuario Histórico de Chacamarca, que forman una significativa zona turística, con una gran potencia para fomentar la acción de turismo ecológico; experiencial, histórico - religioso y agrícola. Según el antiguo Plan Maestro 2000 - 2005, el área turística de la Reserva comprendía dos parcelas: (1) al paraje este de la reserva, la ciudad de Pariacancha y (2) al lado oeste de la ciudad de Ondores (INRENA, 2008).

### **2.1.3. Materiales**

#### **Materiales Cartográficos**

- Imágenes Satelitales: Landsat 7 y 8
- Modelo Digital de Elevación (DEM)
- Mapa de Cobertura Vegetal
- Mapa de Tipo de Suelo
- Mapas digitales en formato shapefiles de las cuencas hidrográficas

#### **Materiales Hidrometeorológicos**

- Datos meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y mínima), obtenidos de las estaciones: Junín y Cerro de Pasco.
- Datos hidrométricos (caudal, volumen, nivel), obtenido de la estación Upamayo.

## Softwares Utilizados

Tabla 4

### *Softwares Manipulados*

Softwares	Descripción y Uso
QGIS 3.12.0	Software que se manipuló para construir un sistema de información geográfico (SIG), consta con un conjunto de aplicaciones con las cuales se creó mapas, simulación hidrológica a través del interfaz QSWAT. Por otro lado, el programa Quantum Gis (QGIS) es un software de código libre, que permitió manejar formatos ráster y vectoriales, así como bases de datos.
QSWAT Plus 1.2.3	SWAT es un modelo de simulación para propiedad pública que se aplica sobre GIS para cursos de agua. El complemento SWAT es una herramienta para la evaluación del suelo y el agua para la gestión de cursos de agua, la interfaz para QGIS es QSWAT. Por otro lado, se utilizó para simular caudal en la cuenca hidrogáfica del lago Junín, durante un periodo largo.
James Plus 1.0.0	Es un programa de código libre, que se utilizó para realizar análisis de sensibilidad del modelo SWAT.
RStudio 1.3.1073	Es un software de código libre. En la presente investigación se empleó para hacer la calibración y validación del modelo hidrológico, mediante Scripts. Por otro lado, se empleó para hacer la predicción del caudal mediante regresión lineal. Asimismo, se utilizó para realizar análisis estadísticos y generar gráficos.
Microsoft Office 2016 (Excel, Word y Bloc de notas)	Microsoft Office es un grupo de aplicaciones con las que podemos realizar tareas de ofimática, podemos automatizar y lograr un nivel de rendimiento alto en tareas. En la investigación se empleó el paquete Excel, para realizar análisis estadísticos y gráficas. Por otro lado, se utilizó el paquete word para redactar el informe de tesis. Asimismo, se empleó el Bloc de notas que nos permitió hacer tareas sencillas de edición de texto como: escribir, copiar, pegar y otros.

*Fuente:* Elaboración propia.

## **Equipos**

- Computadora portátil con las sucesivas peculiaridades: Ordenador Intel CORE i5 – 1,60 GHz, Memoria RAM de 8,00 Gb, Tarjeta de video 12 Gb, Disco duro interno 500 Gb.
- Impresora.
- Otros.

### **2.1.4. Población y muestra**

La población para este estudio está conformada por las cuencas endorreicas de los departamentos de Junín y Pasco. Mientras que la muestra es la cuenca del lago Chinchaycocha.

### **2.1.5. Descripción de la Investigación**

#### **Metodología**

El enfoque metodológico utilizado en este estudio se expone en la Figura 16, comprende de cuatro procesos: la aplicación del modelo SWAT + en la cuenca en estudio (1), aplicación de análisis estadísticos (variabilidad climática – recurso hídrico) (2), aplicación de la Teledetección (3) y la aplicación de redes neuronales, para estimar el comportamiento hídrico (caudal) (4).

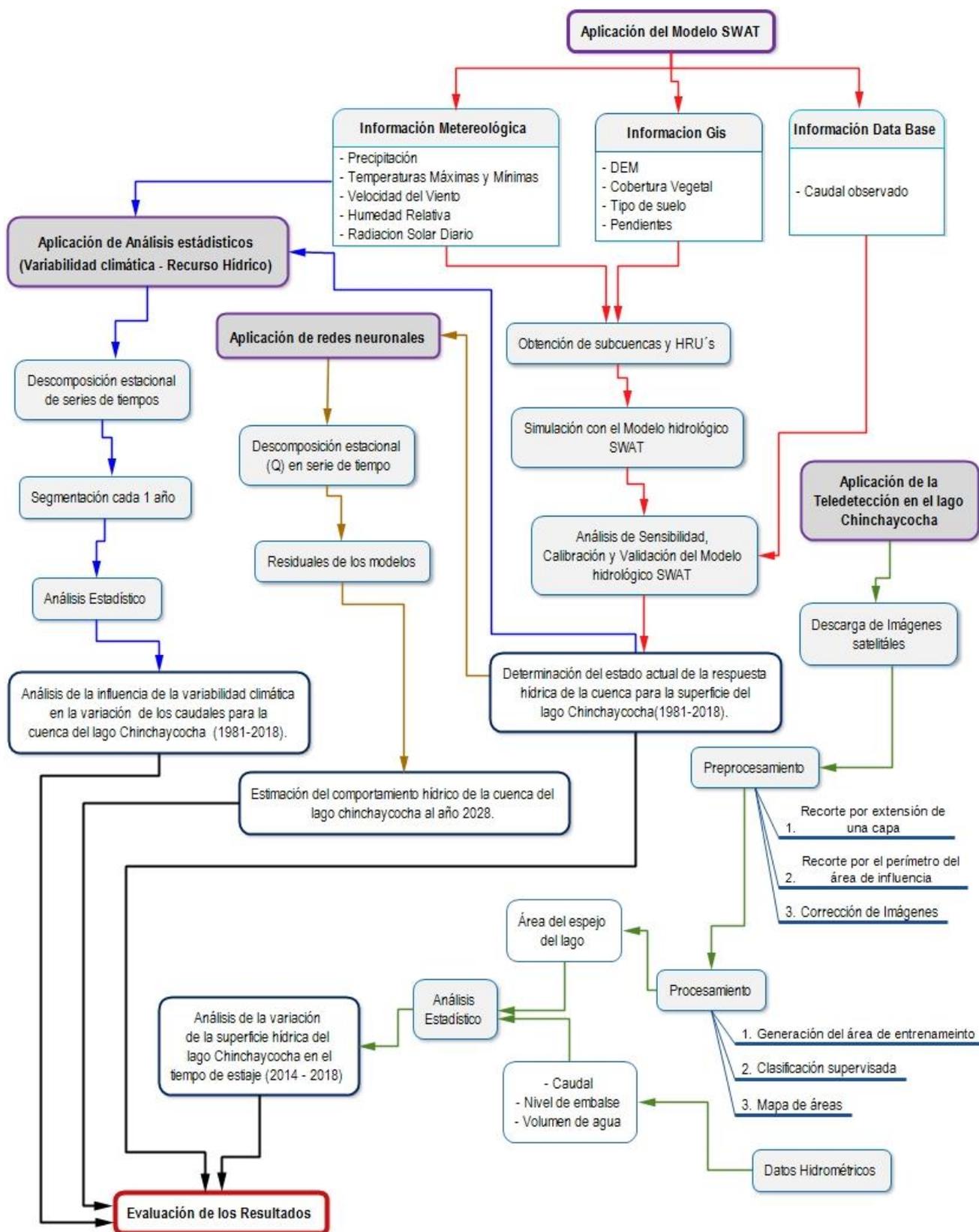


Figura 16. Diagrama de flujo de la metodología. Fuente: Elaboración Propia.

## Componentes aplicados a la elaboración del modelo

Las clasificaciones de las informaciones empleadas en el modelamiento hidrológico son:

**Información geográfica.** La información geográfica agregada (Tabla 5), ha sido organizada y examinada, para un buen ajuste del modelo hidrológico y para su respectiva utilización.

Tabla 5

*Información geográfica proporcionada en SWAT*

Informaciones	Fuentes	Detalles	Formatos
Topografía	NASA	Modelo Digital de Elevación	Ráster
Cobertura Vegetal	MINAM	Cartografía de Cobertura Vegetal de la zona de estudio	Polygon Shapefile
Suelos	FAO	Mapa de Tipo de Suelo de la cuenca del lago Chinchaycocha	Polygon Shapefile
Hidrografía	ANA	Delimitación y red de drenaje Hidrográfica, cuenca del lago Chinchaycocha.	Polygon Shapefile

*Fuente:* NASA, MINAM, FAO y ANA (2020).

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

Para la presente investigación se utilizó el modelo digital de elevación ASTERGDEM, con una resolución de 30 x 30 m el DEM empleado, se visualiza en la Figura 17. Por otro lado, permitió caracterizar las formas del relieve, para delimitar la cuenca y la distribución de la red hídrica del área de estudio. Asimismo, valió para que SWAT +, forme un ráster de la pendiente, elemento significativo para generación de las unidades respuestas hidrológicas de SWAT.

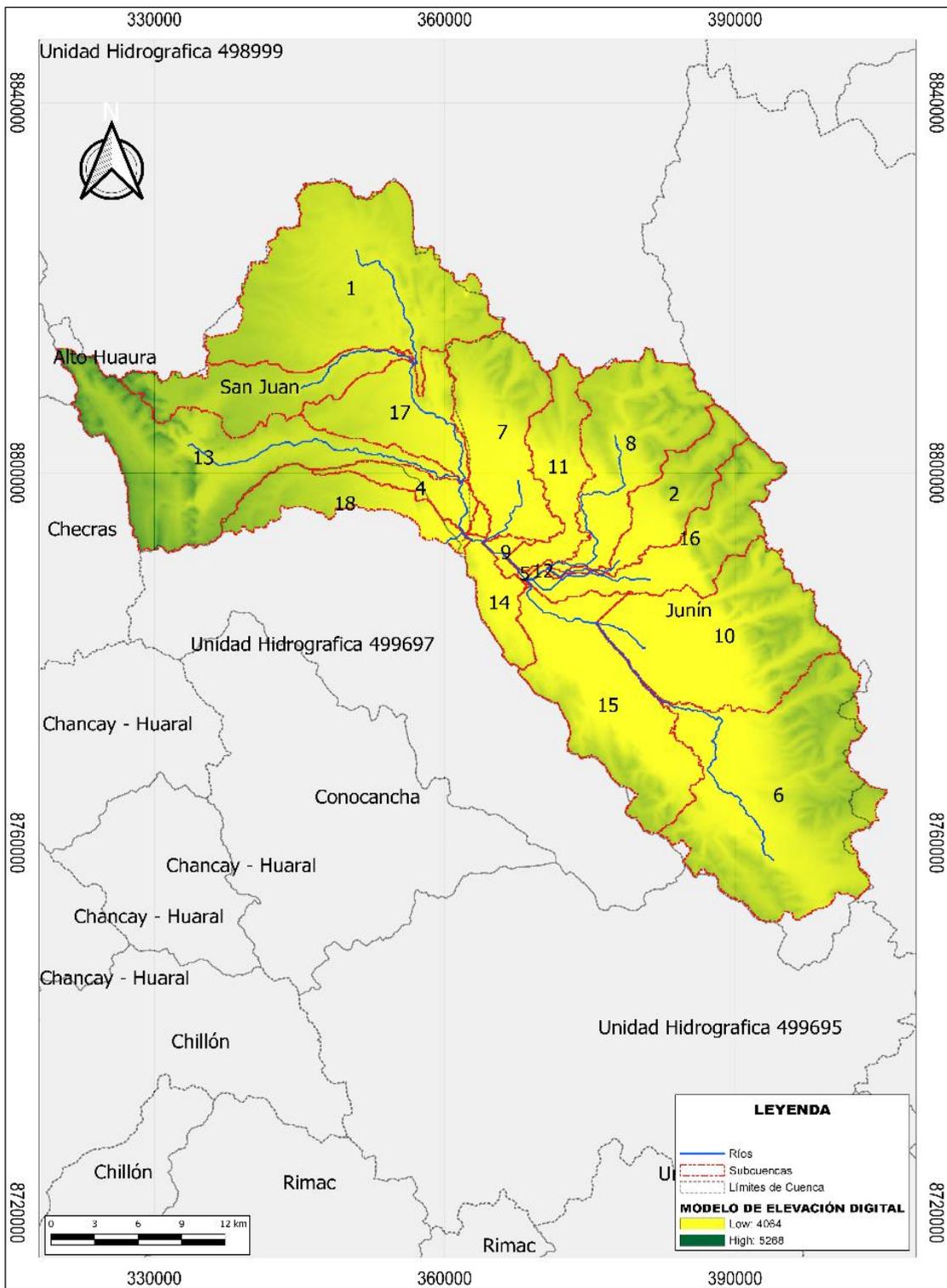


Figura 17. Variación altitudinal de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: Elaboración propia.

b. Cobertura Vegetal

En la presente indagación se empleó la cobertura vegetal, desarrollada por el Ministerio del Ambiente en el año 2015. Los elementos de este mapa fueron organizados en funcionalidad de propiedades semejantes a los cuales se les asignó coberturas equivalentes propias del modelo SWAT + y así poder ser reconocidas por el modelo hidrológico (Figura 18).

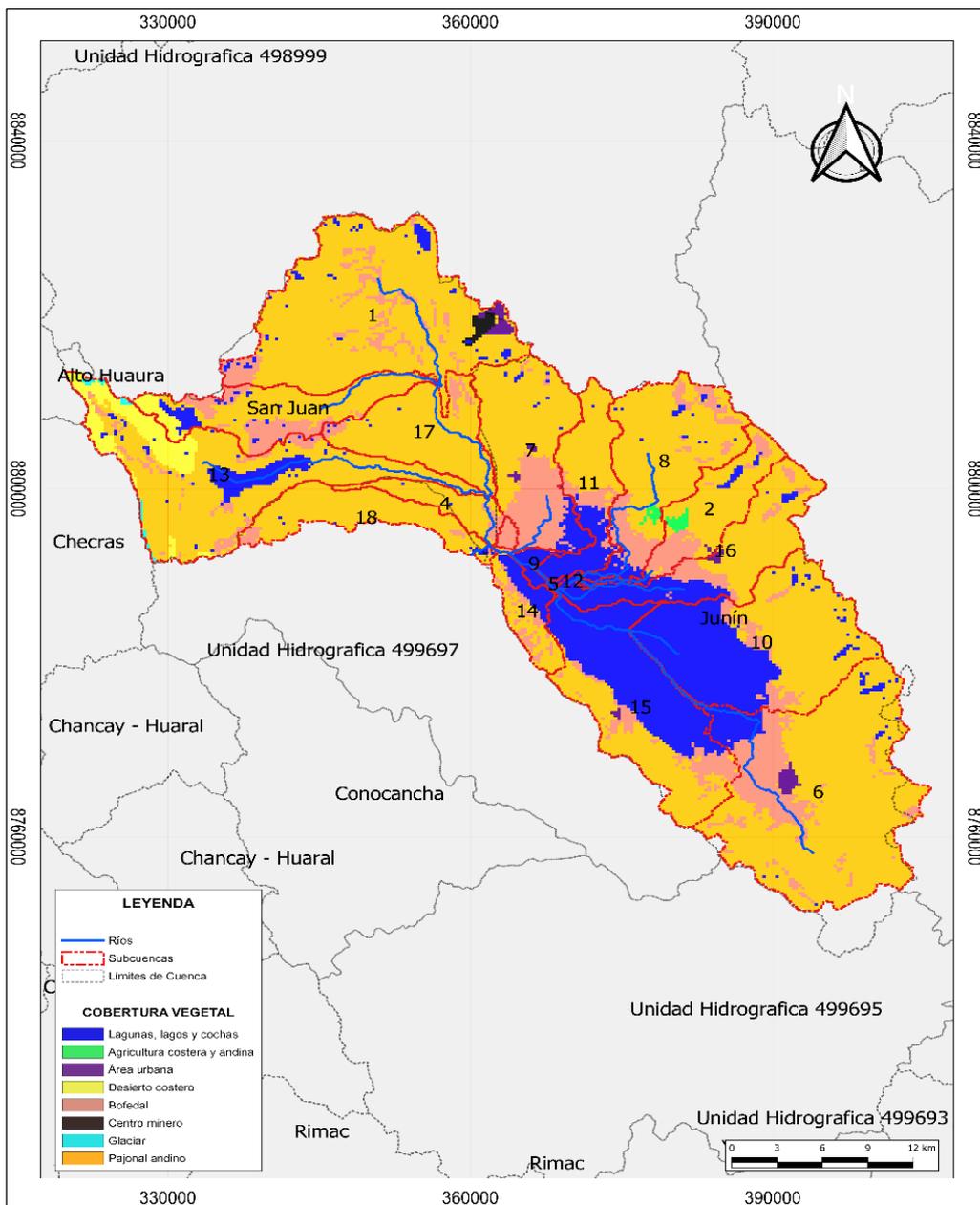


Figura 18. Mapa de cobertura vegetal de la cuenca del lago Chinchaycocha.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Tabla 6 muestra las equivalencias de la cobertura vegetal, se le asignó un código de identificación, para procesarlo con el uso de suelo en el software SWAT +.

Tabla 6

*Reclasificación de coberturas reconocidas por el modelo SWAT*

<b>Unidades</b>	<b>Cobertura Vegetal</b>	<b>Aprox. SWAT Código Uso de Suelos</b>	<b>SWAT Uso de Suelo Descripción</b>
1	Agricultura costera y andina	AGRR	Agricultural Land-Row Crops
2	Área altoandina con escasa y sin vegetación	BARR	Barren
3	Área urbana	URML	Residential-Med/Low Density
4	Bofedal	WETN	Wetlands-Non-Forested
5	Bosque relictó altoandino	FRST	Forest-Mixed
6	Bosque relictó mesoandino	FRST	Forest-Mixed
7	Bosque seco de montaña	FRSD	Forest-Deciduous
8	Cardonal	RNGB	Range-Brush
9	Centro minero	UIDU	Industrial
10	Desierto costero	BARR	Barren
11	Glaciar	WATR	Water
12	Lagunas, lagos y cochas	WATR	Water
13	Matorral arbustivo	RNGB	Range-Brush
14	Pajonal andino	RNGE	Range-Grasses
15	Plantación Forestal	PINE	Pine
16	Río	WATR	Water

*Fuente:* Valladares (2017).

c. Tipo de Suelo

Para el presente estudio se empleó el tipo de suelo (Figura 20), se obtuvo teniendo en cuenta los parámetros de la base de datos del mapa digital de suelos a escala mundial (DSWM), mediante el portal de GeoNetwork (Figura 19); elaborado por la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO] y UNESCO.



Figura 19. Portal de descargas de GeoNetwork. Fuente: Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura [FAO], 2007.

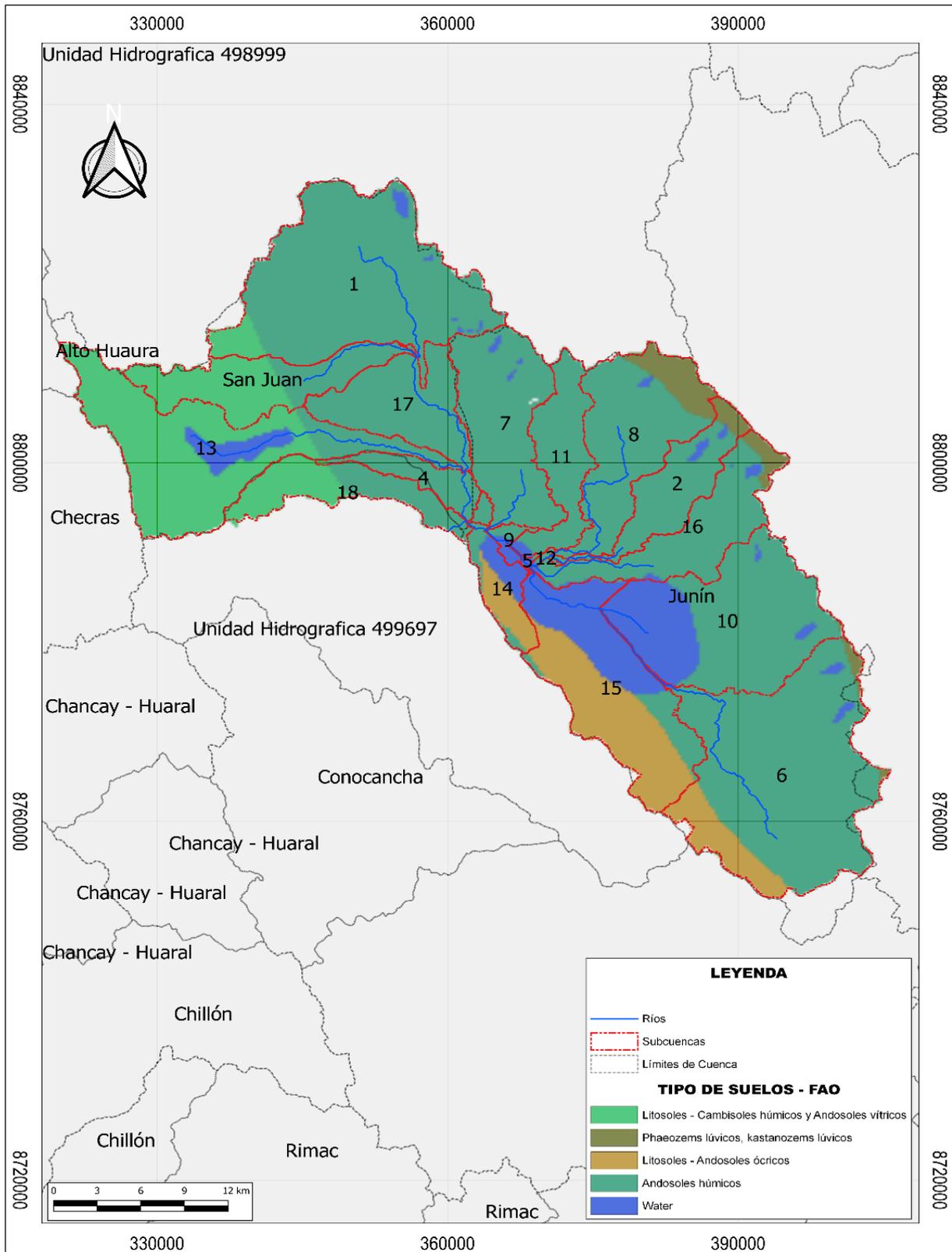


Figura 20. Mapa de tipo de suelos en la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: Elaboración propia.

d. Pendientes

La clasificación de pendientes fue otro componente importante para el modelo (Figura 21), adquirida a partir del DEM (USGS-NASA). SWAT admite clasificar las pendientes, en base al objetivo de la investigación. Por otro lado, se eligió por agrupar en 4 clases, establecidos en el Reglamento de Clasificación de Tierras (Decreto Supremo N°017-2009-AG).

Tabla 7

*Clasificación de Pendientes*

<b>Clases</b>	<b>Pendientes (%)</b>
Sutilmente / Moderadamente inclinado	0 – 12
Moderadamente inclinado	12 - 25
Algo Escarpado	25 - 50
Escarpado a muy escarpado	> 50

*Fuente:* D.S. N°017-2009-AG.

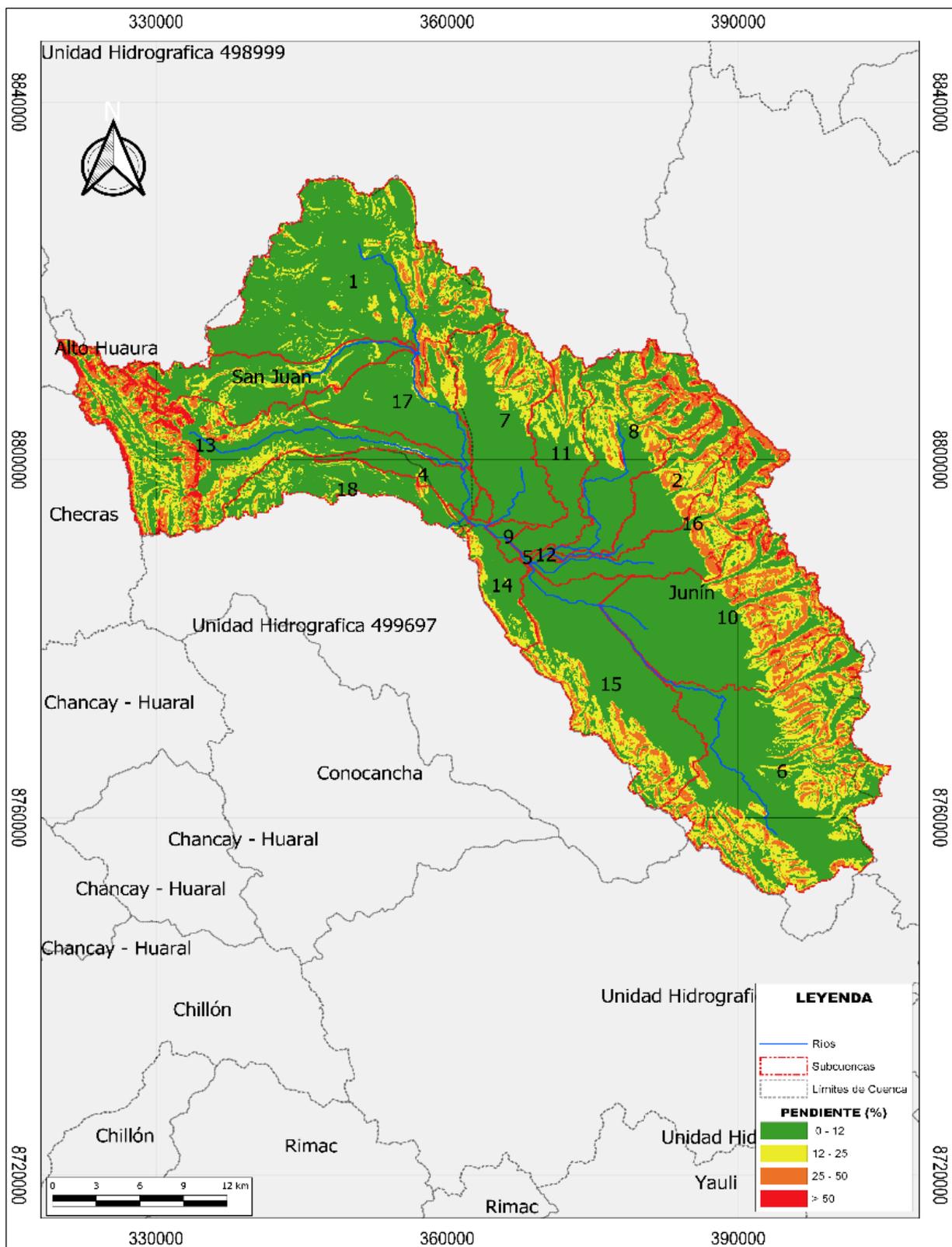


Figura 21. Mapa de Pendientes de la cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: Elaboración propia.

**Información climática.** La información climática utilizada en la presente investigación se obtuvo de las estaciones meteorológicas ubicadas dentro y cerca del área de estudio para los años 2017 y 2018, como se muestra en la Tabla 8; y cuentan con registros de precipitación, temperaturas máximas y mínimas. Asimismo, se empleó el producto grillado PISCO (Peruvian Interpolation of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Stations) para el periodo de 1981 - 2016, para escalas temporales diarias de las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima. Según SENAMHI (2020), menciona que PISCO es información interpolada de datos climatológicos e hidrológicos a nivel nacional.

Los datos generados con el producto PISCO, se basó en las estaciones de interés, dentro del área de estudio, mediante la aplicación del lenguaje estadístico R, a través de un código de extracción de datos. Se presentan con mayor detalle en Apéndice 7. Por otro lado, la carencia de datos para las variables como: humedad relativa, radiación solar y velocidad del viento, se completaron empleando el generador del clima de dicho modelo hidrológico para la simulación de dichos valores (Neitsch *et al.*, 2005).

Para la variable de temperatura, PISCOt v1.1 fue creado a partir de enero de 1981 a diciembre del 2016 a una resolución de ~10 km, resulta de la conjunción de data visto de estaciones meteorológicas comunes, data satelital (LST) y cambiantes topográficos (Z, X, Y y TDI). Dicho procedimiento para la creación de PISCOt v1.1 fue en base a la climatología acudido, e implicó primordiales procedimientos: (i) la conjunción a nivel de normal climatológica (nT); (ii) interpolaciones de las anomalías mensuales/diarias (dT) usando la alteración por mes de uniformes combinadas y (iii) adición de la habituales grilladas (G\_nT) y anomalías grilladas (G\_dT) para la creación de Temperatura. De igual modo, dichos datos se sometieron a primordiales procedimientos: control de calidad, imputación y homogeneización (Huerta *et al.*, 2018). El conjunto de datos está disponible públicamente en <http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.Temp/.v1p1/?Set-Language=es>.

Para la variable de precipitación, PISCOp V2,1 fue creado para el lapso 1981 hasta 2016, con una latencia promedio de ocho semanas a ~1 km de resolución espacial. El algoritmo de fusión se apoya en procedimientos de interpolación geostatística y determinista. introduciendo tres fuentes de lluvia diferentes: la calidad nacional pluviómetro controlado y relleno grupo de datos (1), radar de clima mezclado de precipitaciones (2) y el Grupo de Peligros Climáticos Estimaciones de precipitación infrarroja (CHIRP) (3). El grupo de datos está utilizable de forma pública en

<http://iridl.ldeo.columbia.edu/SOURCES/.SENAMHI/.HSR/.PISCO/.Prec/.v2p1/.stable/?Set-Language=es> (Aybara *et al.*, 2019).

Las variables Temperatura y Precipitación de datos PISCO obtuvieron diferentes resoluciones espaciales. SENAMHI (2018), menciona que, se podría entender que a mayor resolución los resultados serían más precisos, sin embargo, esto no siempre es así, ya que depende de la disponibilidad del número de estaciones o sensores de precipitación y temperatura existentes dentro del área evaluada. El sistema SWAT dentro de QGIS, permite trabajar a distinta resolución espacial esto no tiene efecto significativo en los resultados. Por otro lado, dichos datos PISCO son óptimos para la aplicación en modelamiento hidrológico y monitoreo de sequías e inundaciones (Aybar *et al.*, 2017).

Tabla 8

*Ubicación de estaciones meteorológicas del estudio*

Estación	Tipo	Ubicación			Coord. UTM (WGS - 84)		Altitud (m s.n.m.)
		Dpto.	Provincia	Distrito	Este	Norte	
Cerro de Pasco	Convencional	Pasco	Pasco	Chaupimarca	361746.2	8817645.5	4 260
Junín	Convencional	Junín	Junín	Junín	392029.6	8767998.1	4 120

*Fuente:* Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología [SENAMHI] (2020).

**Información Hidrométrica.** La información hidrométrica (caudal, volumen y nivel del lago) usada en el estudio fue tomada de la salida de la represa Upamayo, información que fue solicitada a la Administración Local de Agua Pasco (ver Apéndice 12). Los registros mensuales de los datos hidrométricos se presentan con mayor detalle en el Apéndice 6. Por otro lado, El registro de los caudales mensuales ( $m^3/mes$ ) se empleó para el proceso de la calibración y validación del modelo. Finalmente, los datos faltantes de los caudales observadas para ciertas fechas fueron interpoladas en el software R, con la librería Forecast y la herramienta na. Interp; de forma predeterminada, utilizando la interpolación lineal para valores perdidos en una serie de tiempo (Hyndman, s.f.). Se presentan con mayor detalle en Apéndice 7. Por otro lado, la posición de las estaciones meteorológicas e hidrológicas se visualiza en la Figura 22.

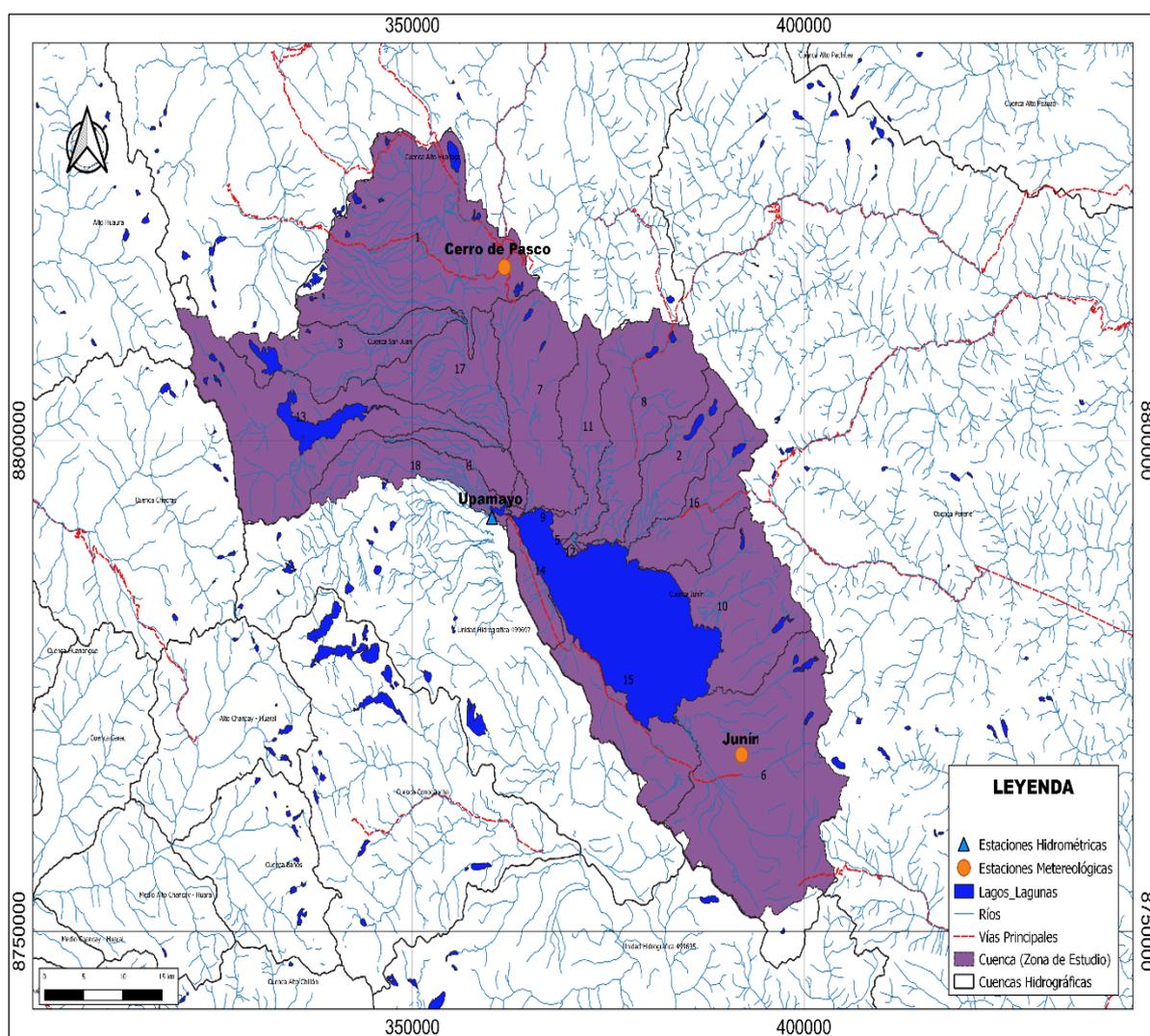


Figura 22. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas e hidrométricas de la zona de estudio. Fuente: ANA, IGN y MTC (2020).

## Aplicación del Modelo Hidrológico QSWAT +

El modelo hidrológico para la cuenca del lago Chinchaycocha, fue creado utilizando el QSWAT +. De esta forma, la delimitación de la cuenca y la red de la corriente se empleó usando utilidad de la delimitación automática en base al Modelo Digital de Elevación.

En la mencionada cuenca de estudio, ha sido definido la red de drenaje y la proporción de sub-cuencas basado en las corrientes. De igual modo, gracias a la heterogeneidad espacial de la pendiente en la cuenca; esta se ha disgregado en 4 clases (0 – 12 %, 12 – 25 %, 25 – 50 % y > 50 %). Después se llevó a cabo la definición de Unidad Hidrológica de Respuesta por medio de un análisis de superposición y conjunción exclusiva de los tipos de suelos, cobertura vegetal y la pendiente. Para cada HRU, se automatizan estos elementos hidrológicos, introduciendo las variables como; precipitación día tras día, evapotranspiración, escorrentía de la superficie, fluido del costado, fluido de retorno y cambio de humedad del suelo.

Neitsch *et al.* (2002) demostró que el deslizamiento de la superficie es estimado por apartado para cada Unidad de Respuesta Hidrológica y se orienta hacia lograr el escurrimiento general en la cuenca. La escorrentía es calculada utilizando el método de número de curva propuesta por el Servicio de Conservación del Suelo (USDA-SCS) de 1972. El número de la curva se altera no linealmente con la capacidad de agua en la extensión terrestre. El recurso hídrico no infiltrado se transforma en escurrimiento de la superficie. El volumen de escorrentía de la superficie estimado por el modelo hidrológico empleando dicho método, se muestra en la siguiente fórmula:

$$Q_{surf} = \frac{(Rday - 0.2S)^2}{(Rday + 0.8S)} ; R > 0,2S \dots\dots (2)$$

El escurrimiento solamente ocurrirá cuando  $Rday > 0,2S$ . Por otro lado,  $Q_{surf}$  es el escurrimiento acumulado de la precipitación,  $Rday$  es la plancha de precipitación para el día y  $S$  se establece como parámetro de retención, transforma de forma espacial por cambios en las

superficies, uso de suelos, los pendientes y los manejos, también se modifica temporal por el cambio en la capacidad hídrica en la superficie. Asimismo, el parámetro de conservación se precisa como:

$$S = 25,4s = 25,4\left(\frac{1000}{CN} - 10\right); \dots\dots (3)$$

CN es el dígito de curva de la jornada. El número de la curva SCS es útil de la impregnación de superficie, cubierta terrestre y los contextos de recurso hídrico de la superficie. De igual modo, el flujo, o inter-flujo profundo del costado es calculado por medio del modelo de alojamiento cinemático, que está presente en la conductividad hidráulica de la superficie, pendiente y la modificación estacional y espacial de la humedad de la superficie. Además, la captación hídrica de la vegetación se considera como un beneficio potencial de evapotranspiración, índice de sector foliar y hondura de enraizamiento; queda restringida por la capacidad hídrica en la superficie (Ghaffari, 2010).

### **Análisis de Sensibilidad, Calibración y Validación del Modelo SWAT+**

Para el presente modelo hidrológico, se realizaron los siguientes procedimientos:

**Análisis de Sensibilidad.** El análisis de sensibilidad es una serie que admitirá identificar los parámetros que forman impactos significativos en la data de determinada tendencia simulada por el modelo, el propósito es establecer el número de parámetros óptimos para el modelo y de esta manera lograr que el desarrollo de calibración se efectue de forma eficiente (Valladares, 2017). Por otro lado, mediante el software JAMES +, de libre acceso y compatible con QSWAT +, se efectuó el análisis de sensibilidad de los parámetros, descritos en la Tabla 9, con fines de visualizar el valor de predominio y la coyuntura al emplearlos como parámetros de calibración.

Tabla 9

*Parámetros empleados en el análisis de sensibilidad*

<b>PARÁMETROS</b>	<b>DETALLE</b>	<b>DESAROLLO</b>
Cn2	SCS numero de curva de escorrentía preliminar	Cobertura
Alpha_Bf	Elemento “alpha” del fluido real	Acuíferos
Gw_Delay	Tiempos retardados de aguas profundas	Acuíferos
Gw_Revap	Factor del agua profunda “revap”.	Acuíferos
Gwqmn	Umbral fondo de aguas en el acuífero (mm)	Acuíferos
Sol_Awc	Contenido de aguas útiles (mm agua/mm suelo)	Suelos
Slope	Pendientes medias (m/m)	Pendiente
Epcó	Componente de retractación de impregnación de la vegetación	Transpiración
Esco	Elemento de retractación de evaporación de la superficie	Evaporación
Canmx	Acumulación máxima del dosel (mm)	Cobertura
Ch_N2	Valor n de Manning para conducto primordial	Enrutamiento
Revapmn	Umbral de fondo de agua en el acuífero superficial “revap”. (mm)	Acuíferos

*Fuente:* Neitsch *et al.*, (2002).

**Calibración y validación del modelo.** La calibración radica en una evaluación de los parámetros del modelo, contrastando las conjeturas, hacia un grupo preciso de circunstancias, con data visualizada. Hay que conseguir un ajuste admisible entre las visualizaciones y las simuladas de la variable de salida (caudal) al cambiar ratificadamente los parámetros del modelo (León, 2017). Asimismo, se generó un Script en el programa R (mayor detalle en Apéndice 7). Por otra parte, para obtener la calibración del modelo se ajustaron los valores de los parámetros significativos; cabe resaltar, los parámetros de mayor sensibilidad, como el coeficiente de determinación ( $R^2$ ), sesgo porcentual (Percent bias - PBIAS) y la prueba de bondad de ajuste.

Las estadísticas indican la función del modelo SWAT para las etapas de calibración y validación establecidas en data históricos medidos para la cuenca del lago Chinchaycocha. Asimismo, se expresan los sucesivos factores para la evaluación de la función del modelo mencionado:

a. Coeficiente de Determinación de Pearson ( $R^2$ )

El estadístico  $R^2$  oscila entre 0 y 1, en el cual 0 muestra sin semejanza y 1 significa una correlación eficiente, y facilita una estimación aceptable de las varianzas de los valores visualizados, respondidos por los pronósticos del modelo (Neitsch *et al.*, 2002).

$$R^2 = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O}) (P_i - \bar{P})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2}} \right] \dots\dots\dots (4)$$

b. Estadístico PBIAS

PBIAS calcula la inclinación media de la data simulada a ser superiores o inferiores que los vistos. Valores auténticos del mencionado estadístico muestran sesgo hacia la sobreestimación en tanto que, por el contrario, el sesgo es hacia la subestimación. Valores contiguos a cero indica aceptación de la modelización.

$$PBIAS = \left[ \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - P_i) * 100}{\sum_{i=1}^n (O_i)} \right] \dots\dots\dots (5)$$

c. Test de bondad de ajuste: Correlación de Pearson

La correlación de Pearson busca determinar la fuerza de la relación entre dos variables numéricas (caudales observadas y simuladas) (ver Apéndice 7). Asimismo, los valores de p evalúan qué tan bien los datos de la muestra apoyan el argumento de que la hipótesis nula es verdadera. Asimismo, el nivel de significación estadística a menudo se expresa como un valor p entre 0 y 1. Cuanto menor sea el valor p, más fuerte será la evidencia de que se debe rechazar la hipótesis nula (McLeod, 2019). Por otro lado, los valores aceptables para señalar la

eficacia del modelo calibrado en SWAT se muestran mediante las evaluaciones de desempeño que se muestran en la Tabla 10.

Tabla 10

*Criterios para la evaluación del desempeño del modelo hidrológico y sus pertinentes distribuciones*

<b>Clasificación de Rendimiento</b>	<b>R<sup>2</sup></b>	<b>PBIAS Streamflow</b>
Muy bueno	-	PBIAS < ±10
Bueno	-	±10 < PBIAS < ±15
Satisfactorio	$r \geq 0,5$	±15 < PBIAS < ±25
Insatisfactorio	$0 \leq r < 0,5$	PBIAS > ±25

*Fuente:* Santhi *et al.*, (2001), Van Liew *et al.*, (2003). y Moriasi *et al.*, (2007).

Finalmente, en la etapa de validación se valoró la capacidad del modelo para ejecutar la simulación, resaltando bastante claridad, de los caudales con los parámetros conseguidos en etapa de calibración. Asimismo, se comprobó la eficiencia, contrastando los caudales reales y los simulados con los parámetros de última etapa logrados en la calibración para una etapa semejante, obteniendo aceptar que el modelo es apto de programar datos. Para ello se contrasto lo obtenido en el modelo con los autores Santhi *et al.*, (2001), Van Liew *et al.*, (2003). y Moriasi *et al.*, (2007), donde para ellos hacen la diferenciacion paa la clasiicacion para el rendimiento.

En la etapa de calibración y validación, se utilizó registros de los caudales acumulados mensuales, reguladas en la represa Upamayo. La calibración fue ejecutada con data acumulado en 2 años, tiempo entendido de enero del 2014 a diciembre del 2015 y en la fase de validación fue empelada data en 2 años, tiempo percibido de enero del 2016 a diciembre de 2017. Entre uno y otras fases el rendimiento del modelo se valora con plataforma estadística y gráfica.

## Aplicación de la teledetección

Para el análisis del comportamiento de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha, se utilizaron imágenes multispectrales del satélite Landsat, obtenidas en formato TIFF, aplicando ciertos criterios con referente a una nubosidad menor al 20 % del servidor United States Geological Survey (USGS), disponible en <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Asimismo, las principales aplicaciones permiten la identificación y clasificación de diferentes coberturas en la superficie, las cuales fueron tomadas en la época de estiaje entre los meses de mayo y noviembre en el periodo de 2014 – 2018. A continuación, se presentan en la Tabla 11 las imágenes utilizadas:

Tabla 11

### *Resumen de Imágenes Landsat*

<b>Imagen</b>	<b>Programa</b>	<b>Sensor</b>	<b>Resolución Espacial</b>
1	LANDSAT_7	ETM+	30 m (15 m)
2	LANDSAT_8	OLI_TIRS	30 m (15 m)

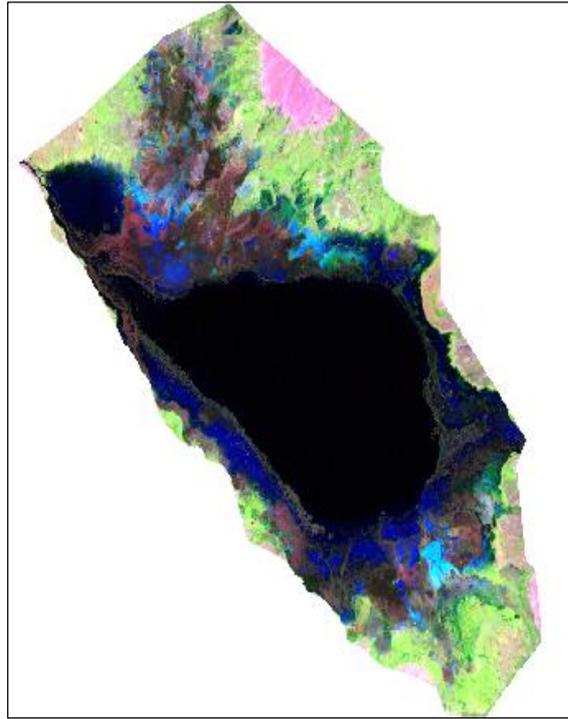
*Fuente:* USGS (2020).

Los procesos desarrollados para la aplicación de la teledetección en la zona de interés son:

**Preprocesamiento.** Los procedimientos empleados son:

- a. Extracción del área de estudio

Las imágenes digitales Landsat se desplegaron en el software R, mediante la generación de un script, para hacer la extracción del área de estudio, ya que cada imagen Landsat tiene un tamaño de escena de acorde a la Reserva Nacional de Junín, generando como resultado 6 imágenes por año.



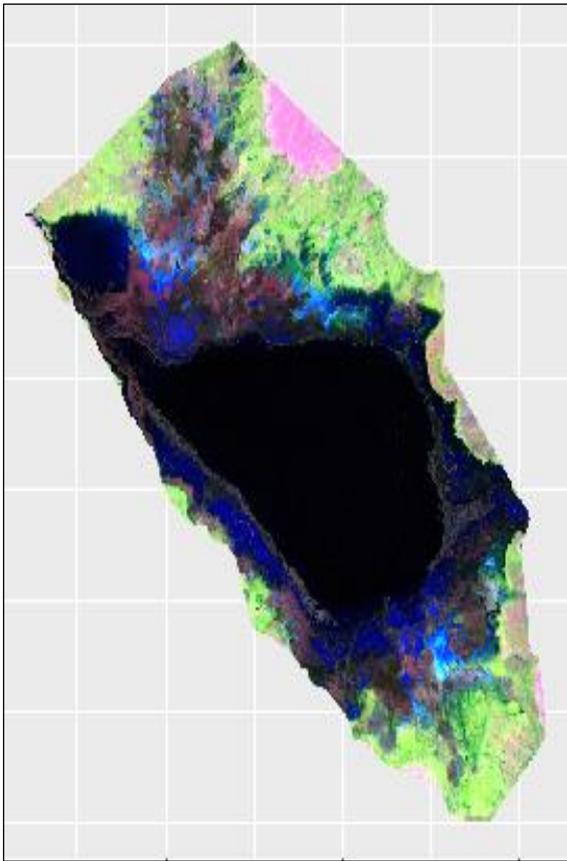
*Figura 23.* Recorte por el perímetro del área de influencia. *Fuente:* Elaboración propia.

b. Corrección de las imágenes Satelitales

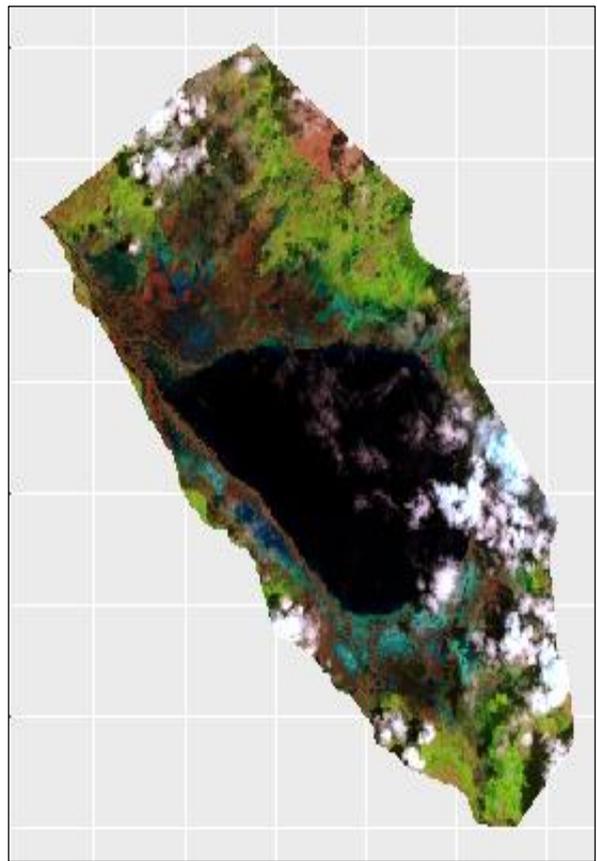
A continuación, se presentan las correcciones:

- Eliminación de Nubes: En el software R las imágenes satelitales ha utilizado la banda de valoración o de inspección de Calidad (BQA) para el descubrimiento de nubes. Cada píxel de la banda de inspección de calidad tiene dentro un valor decimal que simboliza composiciones de bits de relleno del área, la atmósfera, y situaciones del sensor, teniendo posibilidades de perjudicar a la herramienta usual de un píxel ofrecido. El archivo BQA tiene dentro los estadísticos de calidad logrados de la data del perfil e información de la máscara de nubes para el suceso. El archivo BQA, es una imagen en 16 bits con iguales extensiones que la escena original. De igual modo, las situaciones de Landsat 7 y 8 la máscara de cobertura nubosa se obtuvo por medio del desarrollo de la banda BQA (Universidad de Costa Rica, s.f.). De igual modo, se detallan ahora los procedimientos:

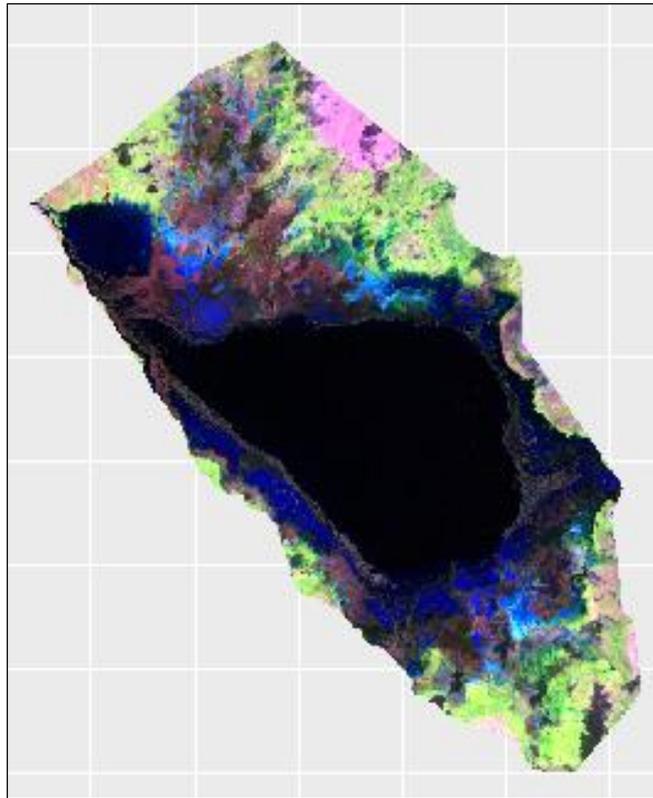
- Importar la imagen Landsat sin nubosidad del mismo mes, pero de un año diferente.
- Importar las imágenes Landsat con nubosidad de la fecha de interés.
- Aplicación de la herramienta RasterStack, para eliminar las nubes, creando una nueva mascara.



*Figura 25. Imagen Landsat sin nube.*  
*Fuente: Elaboración propia.*

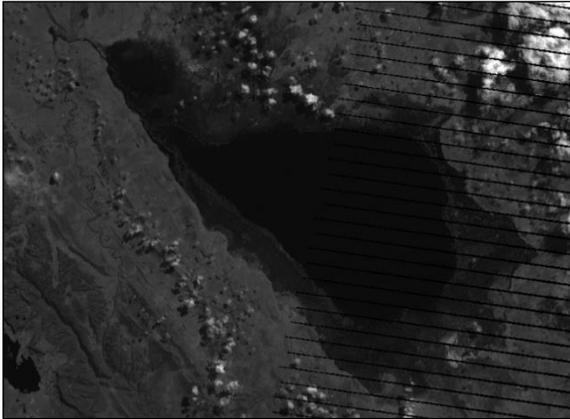


*Figura 24. Imagen Landsat con nube. Fuente:*  
*Elaboración propia.*

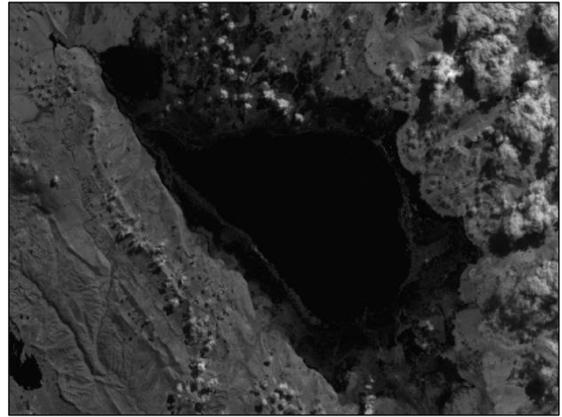


*Figura 26.* Imagen Landsat sin presencia de nubes. *Fuente:* Elaboración propia.

- Corrección radiométrica: Corrección de bandeo de imágenes Landsat 7, lo cual contiene gaps o líneas de ausencia de información con una ligera inclinación hacia los laterales mientras la zona central se muestra correctamente. Un error que genera ausencia de datos mostrando la imagen a través de un bandeo de franjas o líneas paralelas entre sí. Por otro lado, la herramienta ráster de QGIS, mediante la función de análisis (rellenar sin datos), admite la corrección de bandeo, permitiendo identificar el bandeo de líneas para interpolar valores y corregir la banda original.

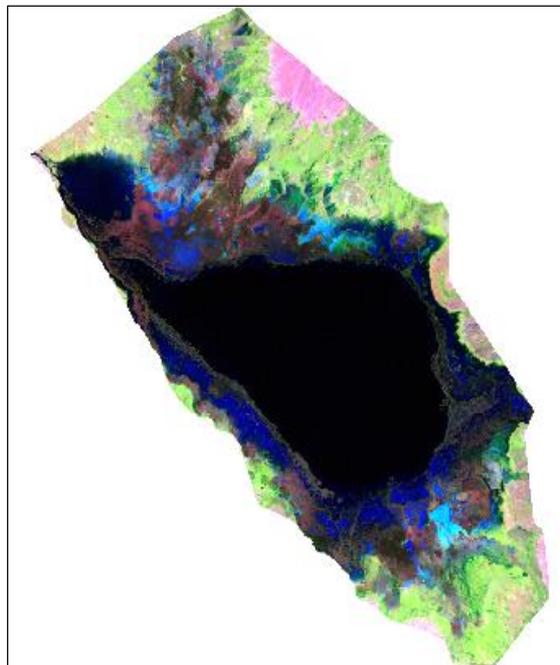


*Figura 28.* Imagen Landsat 7 bandeado.  
*Fuente:* USGS (2020).



*Figura 27.* Imagen Landsat 7 corregido.  
*Fuente:* USGS (2020).

- Niveles Digitales (ND) a radiancia: La radiancia es el Flujo de energía por ángulos consistentes, dejando un mecanismo del sector de la extensión en trayectoria cedida. Radiancia es el cálculo del sensor y es dependiente de la reflectancia (Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio [NASA], 2011). Por otro lado, este proceso, son un grupo de operaciones destinadas a cambiar los ND para aproximarlos valores obtenidos en condiciones especiales, Con la herramienta RadCor en “R”, se llevó a cabo la corrección radiométrica.



*Figura 29.* Imagen Landsat convertida de ND a Radiancia. *Fuente:* Elaboración propia.

**Procesamiento.** Los procedimientos empleados son:

a. Generación del área de entrenamiento

Se generó las áreas de entrenamiento en el software QGIS. Se construyó 64 puntos distribuidos de manera homogénea y clasificadas en 4 clases en toda el área de estudio (ver Apéndice 7). Para generar las áreas de entrenamiento se emplearon datos de la interpretación visual.

b. Clasificación no supervisada

Se elaboró una clasificación no supervisada mediante un Script desarrollado para el software R Project. En dicho software se instaló las librerías requeridas: RStoolbox, rasterVis, rgdal, ráster, grid y ggplot2; para ejecutar satisfactoriamente el proceso (ver Apéndice 7). Además, Se creó una carpeta denominada procesamiento, donde fueron almacenados los insumos requeridos en formato shapefile: áreas de entrenamiento y el perímetro del área de influencia. Finalmente se desarrolló la clasificación no supervisada con la herramienta superClass, como de regresión basada en datos de entrenamiento vectorial (puntos). Asimismo, se obtuvo las áreas con la herramienta table.

### **Estimación del comportamiento hídrico con redes neuronales**

Para la estimación del caudal se elaboró un script para el software R Project, empleando la herramienta nnetar. En el mencionado software se instaló las librerías requeridas: readxl, lubridate, Forecast, dplyr y ggplot2; para establecer favorablemente el proceso (ver Apéndice 9). Asimismo, el pronóstico está basado en el caudal base (simulado en el QSWAT +) en el periodo de 1981-2018, donde estos han sido validados. En este sentido se realizó dicha estimación al año 2028, empleando redes neuronales teniendo en cuenta los residuales, el intervalo 95 %.

## 2.1.6. Identificación de variables y su mensuración

Para la presente investigación se cuenta con las siguientes variables (Tabla 12).

Tabla 12

*Variable y su Mensuración*

<b>Variables</b>	<b>Dimensiones</b>	<b>Indicadores</b>	<b>Unidad de medida</b>
<b>Dependiente: Y1</b> Modelamiento determinístico en la cuenca del lago Chinchaycocha	Estimación de caudal de la cuenca	Variación de caudales en la cuenca 1981-2018.	m <sup>3</sup> /mes
<b>Dependiente: Y2:</b> Superficie del lago Chinchaycocha	Clasificación no supervisada	Variación del área del espejo del agua	km <sup>2</sup>
<b>Independiente: X1-1</b> Variables Meteorológicas	Datos meteorológicos de 38 años	Temperatura Máxima Temperatura Mínima Precipitación	°C °C mm
<b>Independiente: X1-2</b> Variables geográficas	Datos geográficos	Cobertura Vegetal Tipo de Suelos Topografía (DEM)	ha ha %
<b>Independiente: X2-1</b> Variables hidrométricas	Datos hidrométricas de 5 años	Caudal de salida Volumen Niveles	m <sup>3</sup> /mes hm <sup>3</sup> m s.n.m.
<b>Independiente: X2-2</b> Estacionalidad	Tiempo	Tiempo de estiaje	meses

*Fuente:* Elaboración propia.

### **2.1.7. Análisis de datos**

El análisis de datos es de tipo estadístico descriptivo, que consiste en generar gráficos, comparar, encontrar homogeneidad, encontrar datos atípicos, consistencia, correcciones con técnicas estadísticas.

Se empleó el coeficiente de correlación de Pearson para analizar la correlación de los parámetros meteorológicos y el caudal simulado. Finalmentge se realizó gráficos de descomposición de cada una de las variables mencionadas para identificar la variabilidad climática y su influencia en el recurso hídrico.

También se empleó ANOVA ( $p \leq 0,05$ ) para analizar la variación de la superficie del agua del lago Chinchaycocha, en el periodo y época evaluada. Sin embargo, no se consideró la prueba de Tukey, ya que según el resultado de ANOVA no fue significativo.

Asimismo, se realizó el análisis de correlación  $R^2$ , porcentaje de BIAS (PBIAS) y p-value para la validación y calibración del modelo SWAT +, teniendo como data observada, los caudales regulados en la salida de la represa Upamayo.

Además, se empleó los diagramas de Caja-Bigotes (Boxplots) para identificar valores atípicos (outliers) y comparar distribuciones en las variables hidrométricas y en el área del espejo de agua. Por otro lado, se realizó una correlación de Pearson de las variables mencionadas para identificar si tiene una correlación significativa. Finalmente, los datos y gráficos generados se representan en el software R y en el programa Microsoft Office Excel 2016.

## **CAPÍTULO III. RESULTADOS**

### **3.1. Determinación de la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha a través de la modelización en el periodo 1981 - 2018**

#### **3.1.1. Ejecución del Modelo QSWAT +**

El modelo QSWAT + permite la simulación hidrológica de las cuencas de carácter diario, mensual o anual para cada Unidad de Respuesta Hidrológica. En dicha investigación, en la cuenca del lago Chinchaycocha se ejecutaron constataciones de forma mensual de información, puesto que se posibilita el análisis de datos de salida, debido al conjunto de datos formados y manipulados.

El modelo QSWAT + para perfeccionar la representación del balance hídrico de la cuenca, se generó 19 subcuencas (Figura 30). Seguidamente, se ingresó la información de suelos, cobertura vegetal y clases de pendientes; para definir las HRU. Se establecieron e insertaron en la simulación en general de 297 HRU, que son zonas que tienen características físicas y climatológicas homogéneas. Asimismo, el área de evaluación delimitada fue un total de 272 663,01 ha.

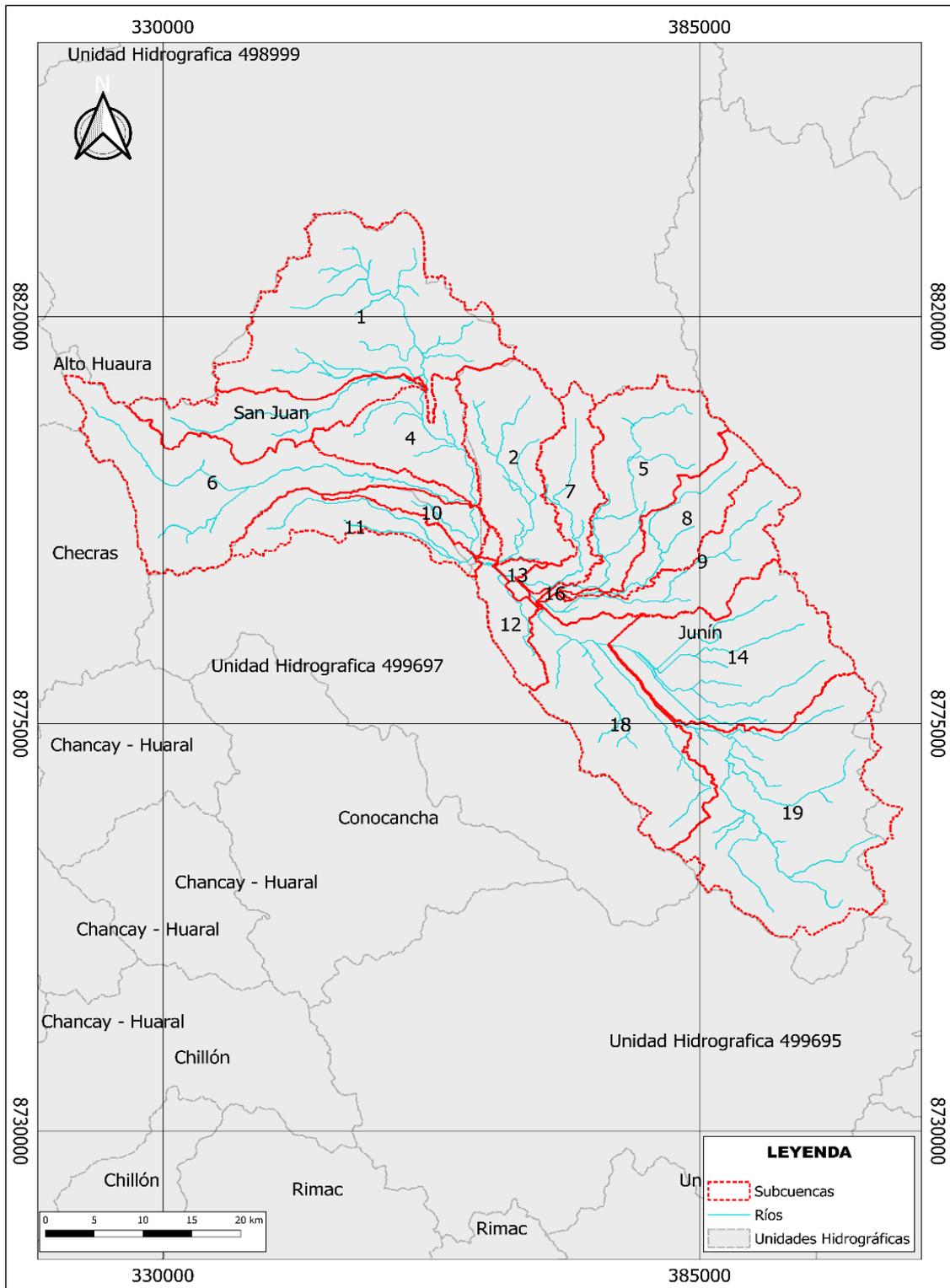


Figura 30. Subcuencas generadas por QSWAT +. Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.2. Análisis de sensibilidad, calibración y validación del modelo hidrológico

#### Análisis de Sensibilidad

El análisis de sensibilidad nos permite conocer los parámetros de ingreso, estos al percibir pequeñas modificaciones, generan cambios trascendentales en la variable dependiente (caudal). En la presente investigación, dicho análisis resaltó el parámetro que tiene un dominio significativo en los resultados del modelo con relación a los caudales reales para la cuenca: CS número de curva de escorrentía inicial (CN2).

El factor t-Stat, estipula si existe diferencia significativa entre las medias de dos grupos. Por otro lado, provee una medida de la sensibilidad, en el cual los valores absolutos ascendentes, muestran mayor sensibilidad. Asimismo, se clasifico parámetros más sensibles, obteniendo un ranking de esto, el cual se visualiza en la Tabla 13.

Tabla 13

*Resultado del análisis de sensibilidad de los parámetros usando JAMES +*

<b>Parámetros</b>	<b>Sensibilidad</b>	<b>Rango</b>
Cn2	1,98739	1
esco	0,0	2
epco	0,0	3
revap_min	0,0	4
gw_lte	0,0	5
revap_co	0,0	6
gwflow_lte	0,0	7

*Fuente:* Elaboración propia.

## Calibración y validación del modelo

El proceso de calibración consiste en el ajuste de los parámetros de la data simulada con la data real mensualmente mediante el proceso estadístico y gráfico en la cuenca de lago Chinchaycocha no se dispone de estaciones hidrométricas, salvo en la salida de la represa “Upamayo”, que registra el caudal de salida, durante los años de 2014 a 2015. Mientras que, para la validación se utilizaron los años de 2016 a 2017. Asimismo, primariamente se ejecutaron más de 8 iteraciones con más de 200 000 simulaciones en grupos de -30 hasta +30. En los primeros experimentos fueron utilizados 10 parámetros, elegidos a partir de la exploración de información secundaria (Méndez y Morales 2012, Fernández, 2016, Sánchez *et al.*, 2017 y Valverde 2018). Finalmente, el modelo fue calibrado empleando 3 parámetros.

La Tabla 14 expone la ejecución de SWAT, en la determinación del caudal acumulada mensualmente visualizadas en la fase de calibración y validación. Por otro lado, fue evaluada el desempeño aceptable del modelo en relación con el factor de Determinación de Pearson  $R^2$  ( $R^2 \geq 0,5$ ) en la etapa de calibración. Mientras tanto en la etapa de validación, en relación con el porcentaje de BIAS (PBIAS) se obtuvo un desempeño satisfactorio ( $PBIAS < 25\%$ ). Asimismo, en las dos etapas se utilizó la prueba de bondad de ajuste: Correlación de Pearson, estadísticamente significativo ( $p\text{-value} \leq 0,05$ ).

Tabla 14

*Parámetros de eficiencia del Modelo a paso mensual de caudales*

<b>Caudales Acumulados Mensualmente Upamayo</b>			
<b>Parámetros de Eficiencia</b>		<b>Calibración</b>	<b>Validación</b>
Coefficiente de Determinación de Pearson	<b>R<sup>2</sup></b>	0,59	-
Porcentaje BIAS	<b>PBIAS</b>	-	18,5
Correlación de Pearson	<b>p-value</b>	1,284e-05	0,05011

*Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 31 se muestra la calibración del modelo, en comparación de los caudales simulados frente a los caudales observados (aforados) en el punto de estudio, donde se puede apreciar la similitud en el comportamiento hídrico.

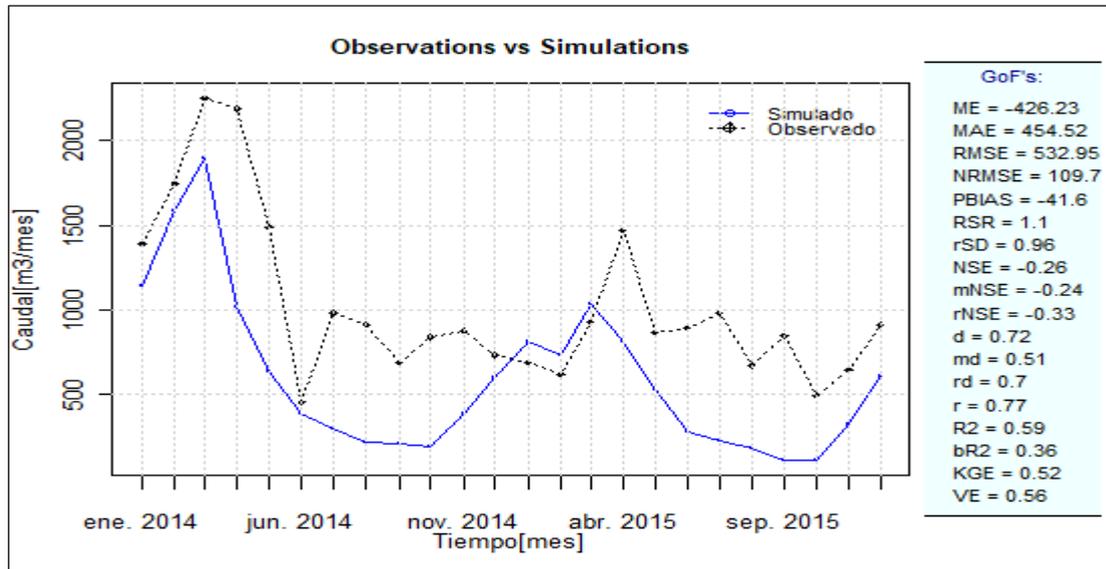


Figura 31. Series de caudales mensuales observados y simulados para el período de calibración. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 31 se observa la calibración del modelo hidrológico, en comparación de los caudales simulados frente a los caudales observados (aforados) en el punto de estudio, donde se aprecia la similitud en el comportamiento hídrico, obteniendo un Coeficiente de Determinación de Pearson de 0,59 cuyo valor indica un nivel de aceptabilidad del modelo hidrológico, tal como lo refiere Moriasi *et al.*, 2007. Por otro lado, no se tiene una perfecta relación lineal, ya que existe sobreestimación del caudal, esto es posiblemente debido a que en la cuenca de lago Chinchaycocha se tiene la presa Upamayo, siendo muy intervenida a una posible inexactitud en los datos hidrométricos, como lo menciona Sánchez *et al.* 2017.

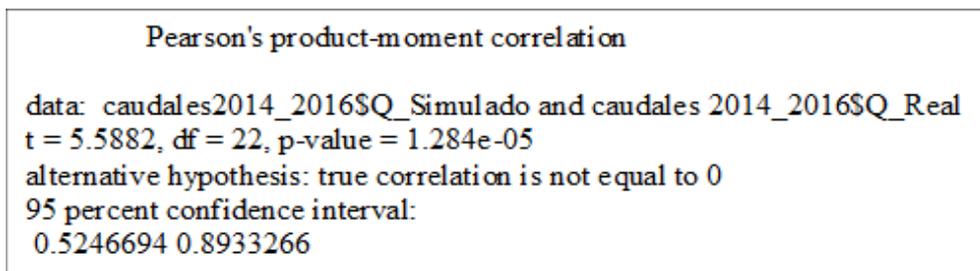


Figura 32. Prueba de correlación de Pearson, con el comando cor.test en R. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 32 se observa la prueba de correlación de Pearson, la comparación del caudal simulado y observado, indica que están correlacionados, se puede afirmar con un nivel de confianza al 95 % ( $p\text{-value} \leq 0,05$ ) de esta hipótesis.

En la Figura 33 se muestra la validación del modelo, en comparación de los caudales simulados frente a los caudales observados (aforados) en el punto de estudio, donde se puede apreciar la similitud en el comportamiento hídrico.

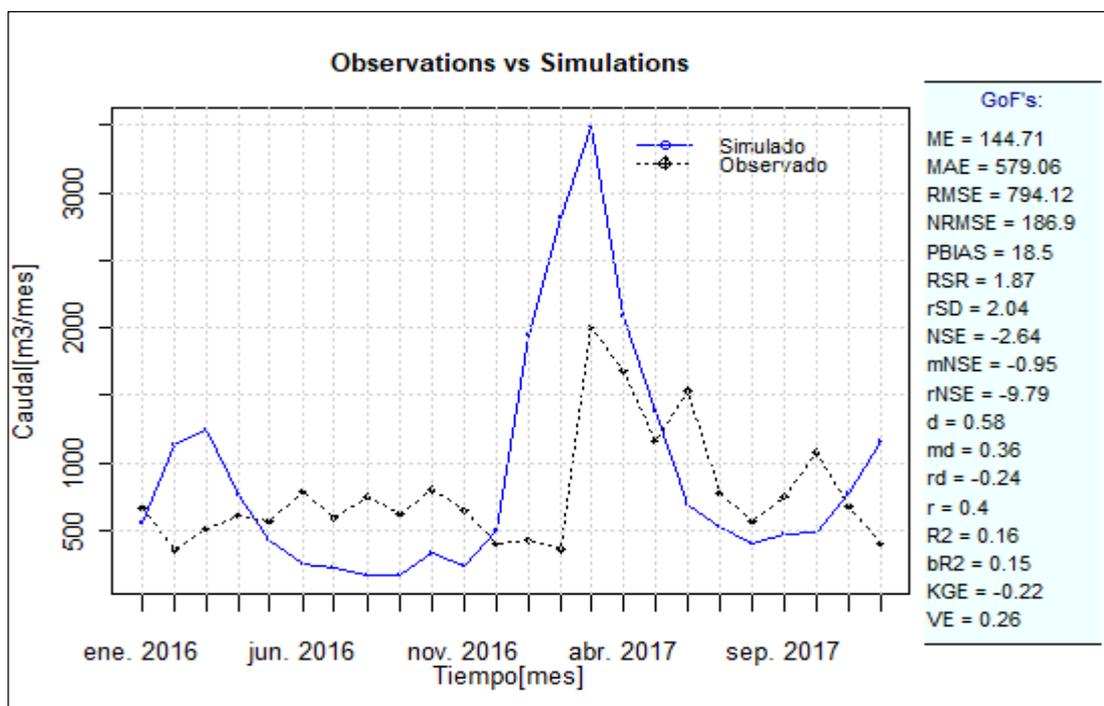


Figura 33. Series de caudales mensuales observados y simulados para el período de validación. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 33 se muestra la validación del modelo hidrológico, en comparación de los caudales simulados frente a los caudales observados (aforados) en el punto de estudio, donde se aprecia la similitud en el comportamiento hídrico, obteniendo en el porcentaje de BIAS (PBIAS) de 18,5 % cuyo valor indica un nivel de aceptabilidad del modelo hidrológico (Moriasi *et al.*, 2007). Por otro lado, no se tiene una precisión del modelo, puede ser debido a la falta de calidad de los datos de entrada, puesto que en dicha cuenca existe una represa y de ello a la salida los datos

son tomados (Orbando *et al.* 2013 y Behrends *et al.* 2011). Para esta modelación han sido utilizadas datos PISCO en los periodos de 1981 – 2016, y en los dos últimos años 2017 y 2018 que fueron tomados de estaciones meteorológicas y datos globales de suelo, lo cual hace que los resultados sean menos precisos.

```

Pearson's product-moment correlation

data: caudales2014_2016SQ_Simulado and caudales2014_2016SQ_Real
t = 2.0728, df = 22, p-value = 0.05011
alternative hypothesis: true correlation is not equal to 0
95 percent confidence interval:
 0.0009644867 0.6943789968
    
```

Figura 34. Prueba de correlación de Pearson, con el comando cor.test en R.  
Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 34 se observa la prueba de correlación de Pearson, infaliblemente la comparación del caudal simulado y observado, indica que están correlacionados, se puede afirmar con un nivel de confianza al 95 % ( $p\text{-value} \leq 0,05$ ) de esta hipótesis.

En la Tabla 15 se muestran los valores ajustados para el parámetro del modelo semidistribuido calibrado que representa el área de estudio, obteniendo una calibración y validación aceptable.

Tabla 15

*Resultado del parámetro calibrado*

<b>Parámetro</b>	<b>Rango</b>	<b>Valor inicial</b>	<b>Valor ajustado</b>
r_CN2.mgt	± 30	0	10

Nota: El atributivo (r\_) muestra que el parámetro se multiplica por 1 más el valor.  
El atributivo (v\_) representa al reemplazo del parámetro por el valor.  
El atributivo (a\_) representa a la suma del parámetro por el valor.

Fuente: Elaboración propia.

### 3.1.3. Análisis del Comportamiento Hídrico

Una vez obtenidos los caudales de PISCO estable y de estación los cuales fueron calibrados y validados, estos se presentan en la Figura 35, valores acumulados anualmente del caudal en el periodo 1981 al 2016 PISCO estable y 2017-2018 valores de estación, donde podemos apreciar que para el último hay un incremento en los valores de precipitación, los cuales fueron reportados y corroborados por SENAMHI (2020).

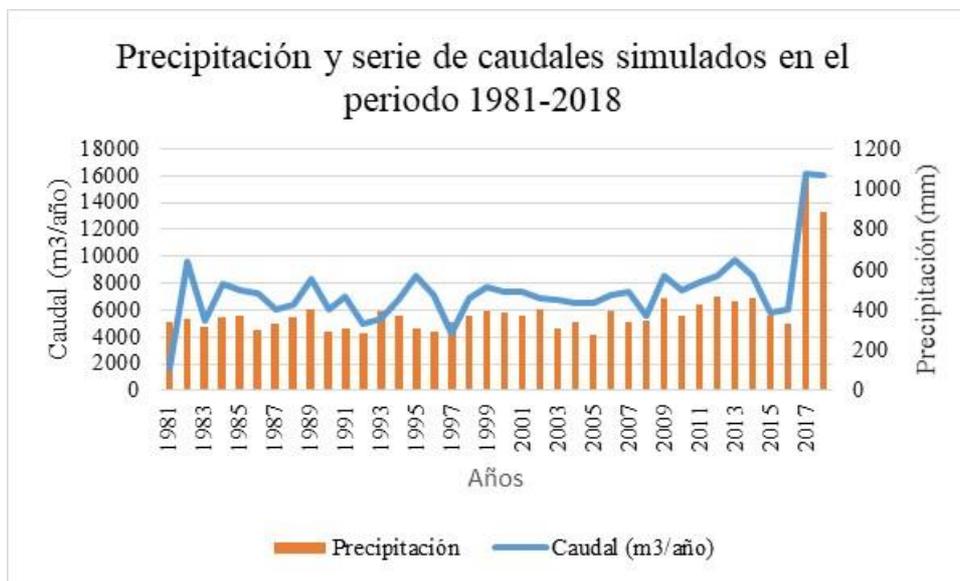


Figura 35. Precipitación y serie de caudales simulados en el periodo 1981-2018. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 35 se muestra los valores acumulados anualmente de precipitación y del caudal simulado en el periodo de 1981-2018. El caudal de escurrimiento superficial máximo anual es de 16 200 m<sup>3</sup>/año, corresponde al año 2017, donde hubo una época lluviosa excepcionalmente fuerte en la cuenca. Asimismo, el escurrimiento superficial mínimo anual es de 1 610 m<sup>3</sup>/año, corresponde al año 1981.

Así también podemos apreciar que cuando se somete los datos de estación con los valores de PISCO inestable se aprecia los mismos picos en incrementos de precipitación.

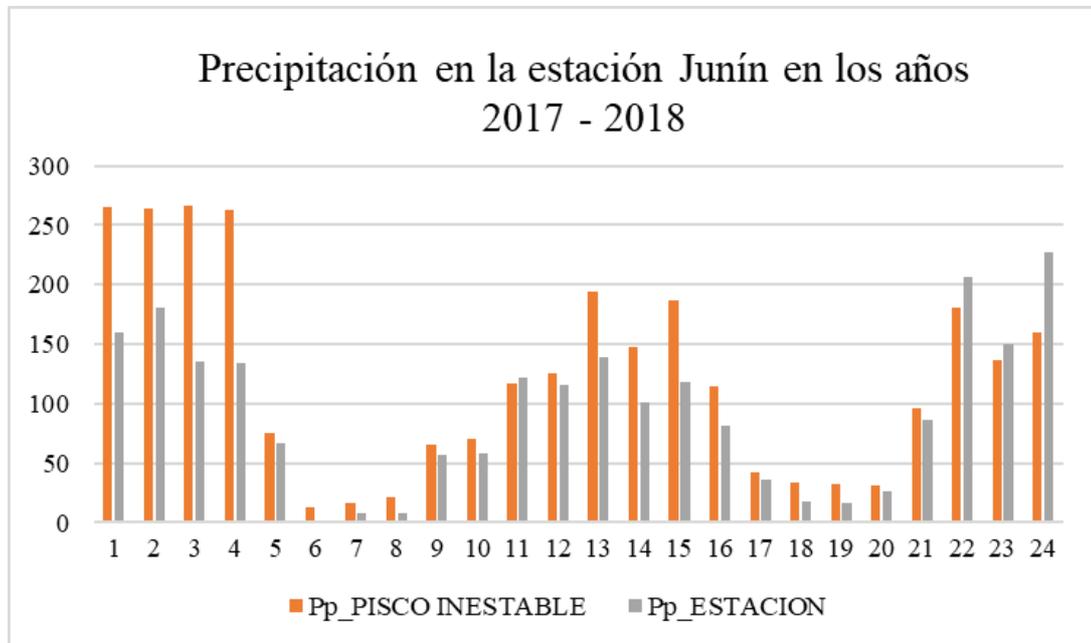


Figura 36. Precipitación en la estación Junín en los años 2017 – 2018, obtenidos de PISCO inestable y de la estación. Fuente: Elaboración propia.

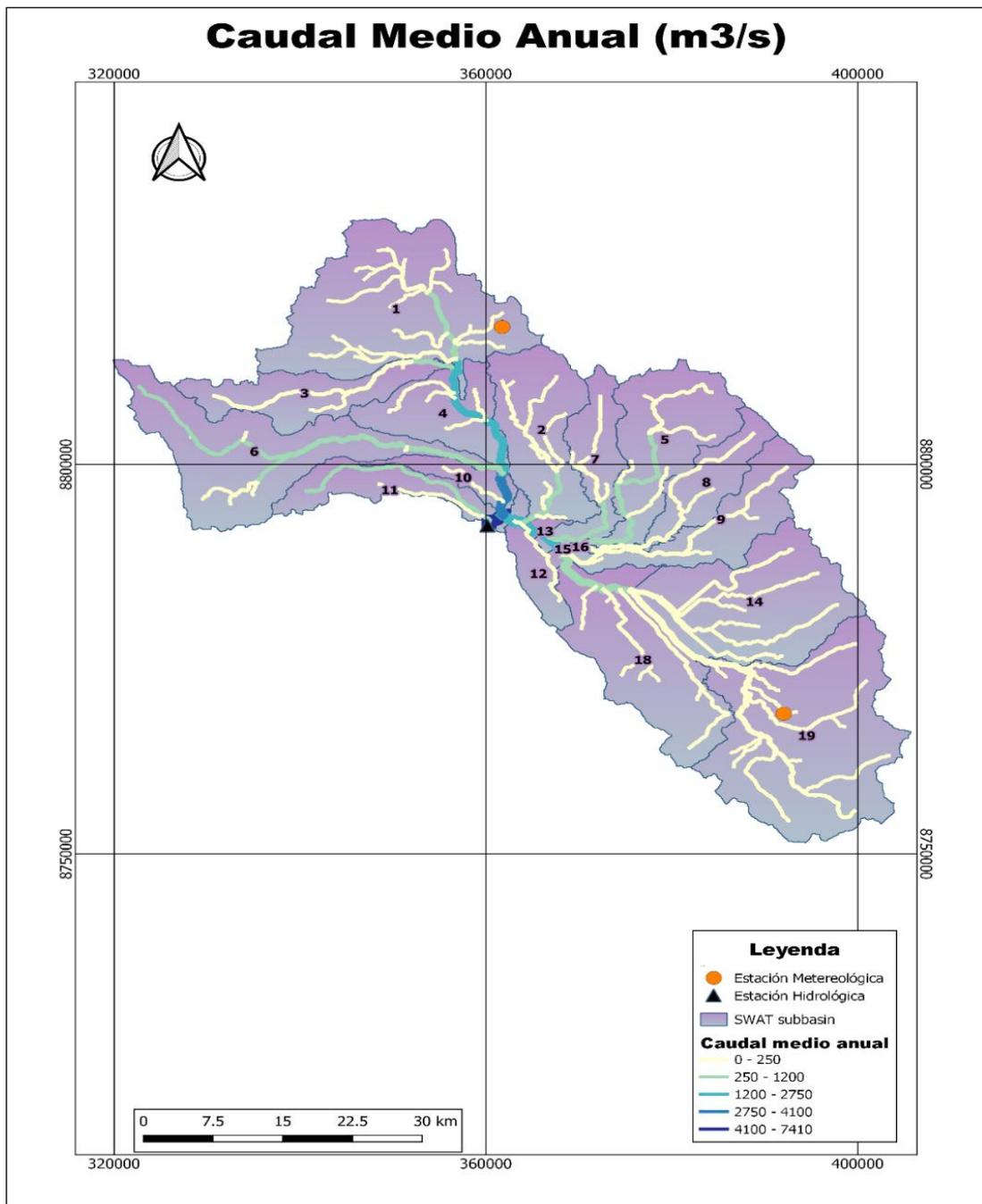
En la Figura 36 se muestra los valores acumulados anualmente de en los años 2017 – 2018, en la estación Junín. Los datos acumulados en PISCO inestable vs data de estación gráficamente muestran los mismos picos de precipitación, con diferencia que los datos acumulados de PISCO inestable muestran datos superiores al de la estación. Según SENAMHI (2018), los datos PISCO inestable no son recomendables su uso, ya que presentan sesgo. Asimismo, dichos datos de la estación fueron tomados para la presente investigación.



Figura 37. Precipitación en la estación Cerro de Pasco en los años 2017 – 2018, obtenidos de PISCO inestable y de la estación. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 37 se muestra los valores acumulados anualmente de en los años 2017 – 2018, en la estación Cerro de Pasco. Los datos acumulados en PISCO inestable vs data de estación gráficamente muestran los mismos picos de precipitación, con diferencia que los datos acumulados de estación muestran datos superiores a los datos PISCO inestable. Según SENAMHI (2018), los datos PISCO inestable no son recomendables su uso, ya que presentan sesgo. Asimismo, dichos datos de la estación fueron tomados para la presente investigación.

Por otro lado, el incremento de precipitación en el año 2017, podría atribuirse al fenómeno del Niño Costero (diciembre 2016 – mayo 2017), que generó precipitaciones pluviales de moderada a fuerte intensidad, considerado el tercer “Fenómeno El Niño” más intenso de al menos los últimos cien años para el Perú (Centro Nacional de de Estimación, Prevención y Reducción del Riesgo de Desastres [CENEPRED], 2018).



*Figura 38.* Mapa de Caudal medio anual de la zona de estudio del periodo 1981-2018. *Fuente:* Elaboración propia.

En la Figura 38 se observa el mapa el comportamiento hídrico en las subcuencas. Para ello, se hizo un promedio anual de caudal en el periodo de 1981-2018, donde se aprecia que la subcuenca 11, presenta mayor cantidad de caudal, con respecto a los demás, ya que dicha subcuenca es la salida del flujo, donde desemboca a la presa Upamayo.

## 3.2. Influencia de la variabilidad climática sobre la variación de los caudales

### 3.2.1. La descomposición estacional de series de tiempo

Este proceso se desarrolló mediante la herramienta loess acrónimo STL en el software R. A continuación, se presentan los gráficos de cada variable.

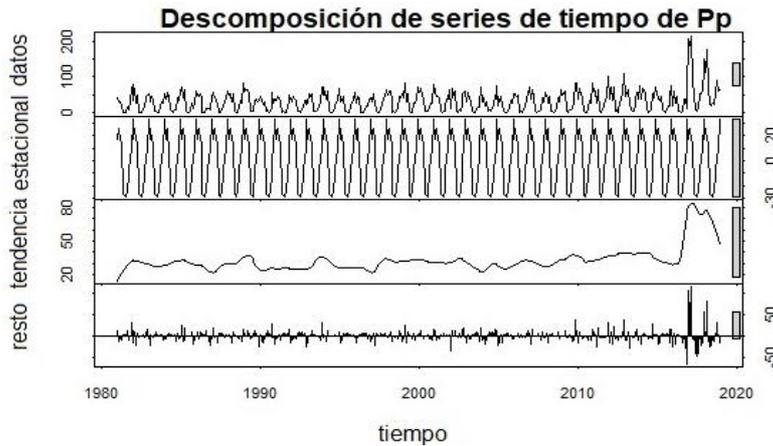


Figura 39. Descomposición de series de tiempo de la variable precipitación. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 39 se pueden apreciar los tres componentes por separado: El componente estacional cambia lentamente a lo largo del tiempo por lo que los años consecutivos tienen patrones similares. Asimismo, la tendencia muestra ascenso hacia los dos últimos años (patrones irregulares), con precipitaciones mayores. En igual forma el componente irregular que se muestra al final (remainder) es lo que sobra cuando se resta la tendencia y la estacionalidad a la serie original.

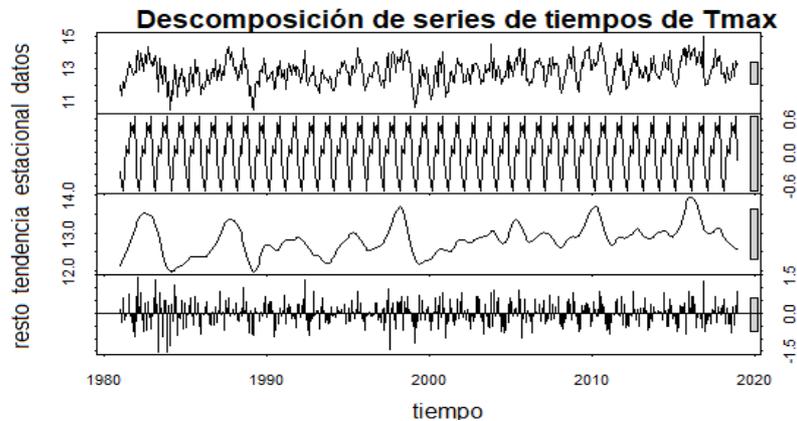


Figura 40. Descomposición de series de tiempo de la variable temperatura máxima. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 40 se visualiza que el componente estacional cambia lentamente a lo largo del tiempo por lo que los años consecutivos tienen patrones similares. Asimismo, la tendencia muestra ascenso y descenso en el periodo evaluado. En igual forma el componente irregular que se muestra al final (remainder) es lo que sobra cuando se resta la tendencia y la estacionalidad a la serie original.

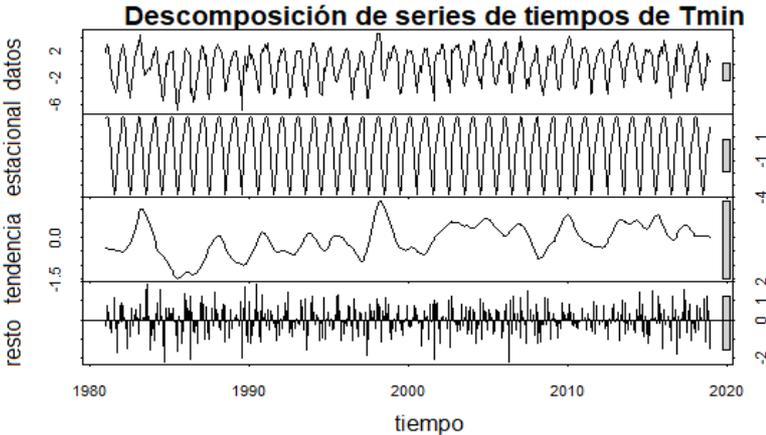


Figura 41. Descomposición de series de tiempo de la variable temperatura mínima. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 41 se puede observar que el elemento estacional cambia lentamente a lo largo del periodo, por lo que los años sucesivos obtienen patrones análogos. Asimismo, la tendencia presenta ascenso y descenso en el periodo evaluado. En igual forma el componente irregular que se muestra al final (remainder) es lo que sobra cuando se resta la tendencia y la estacionalidad a la serie original.

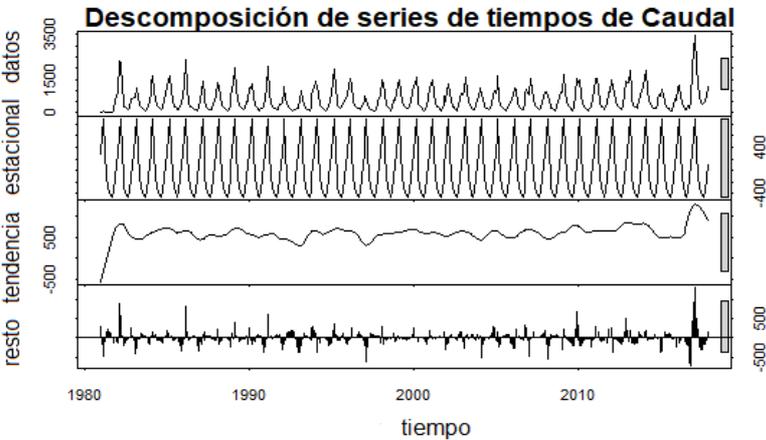
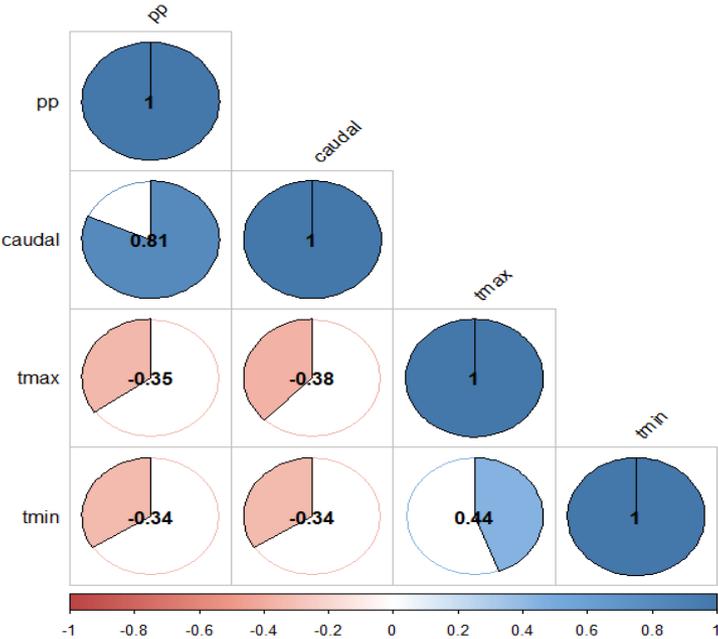


Figura 42. Descomposición de series de tiempo de la caudal. Fuente: Elaboración propia.

En la gráfica 42 se puede apreciar que el componente estacional cambia lentamente a lo largo del periodo, por lo que los años contiguos poseen patrones equivalentes. Asimismo, la tendencia presenta ascenso y descenso en el tiempo evaluado. Por otro lado, el componente irregular que se expone al final (remainder) es lo que excede cuando se disminuye la tendencia y la estacionalidad a la serie real. El incremento de caudal en los últimos años estuvo fuertemente relacionado al incremento de la precipitación.

**3.2.2. Correlación de Pearson**

La matriz de correlación se desarrolló en el lenguaje estadístico R, donde se usó el coeficiente de correlación de Pearson, con la herramienta chart. Correlation. A continuación, en la Figura 43 se visualiza dicha matriz.



*Figura 43.* Correlación de las variables evaluadas.  
*Fuente:* Elaboración propia.

En la figura 43, se visualiza de acuerdo con los coeficientes de correlación entre el caudal y los parámetros analizados, lo que presenta mayor correlación es con la variable precipitación pluvial con un valor de 0,81. Por otro lado, existe correlación negativa entre el caudal y la temperatura máxima y temperatura mínima, esto significa de que ambas variables se mueven en la dirección opuesta.

### 3.3. Análisis de la variación de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha

La combinación de bandas que hizo posible la visualización de las diferentes coberturas vegetales fue la de 5, 4, y 3 (color infrarrojo vegetación), donde estas muestran una mayor diferenciación entre el suelo y el agua (INEGI, 2010). Por otro lado, el resultado de la clasificación no supervisada muestra las coberturas presentes en el área de estudio para el periodo 2014-2018 en la época de estiaje, se visualizan en el Apéndice 8.

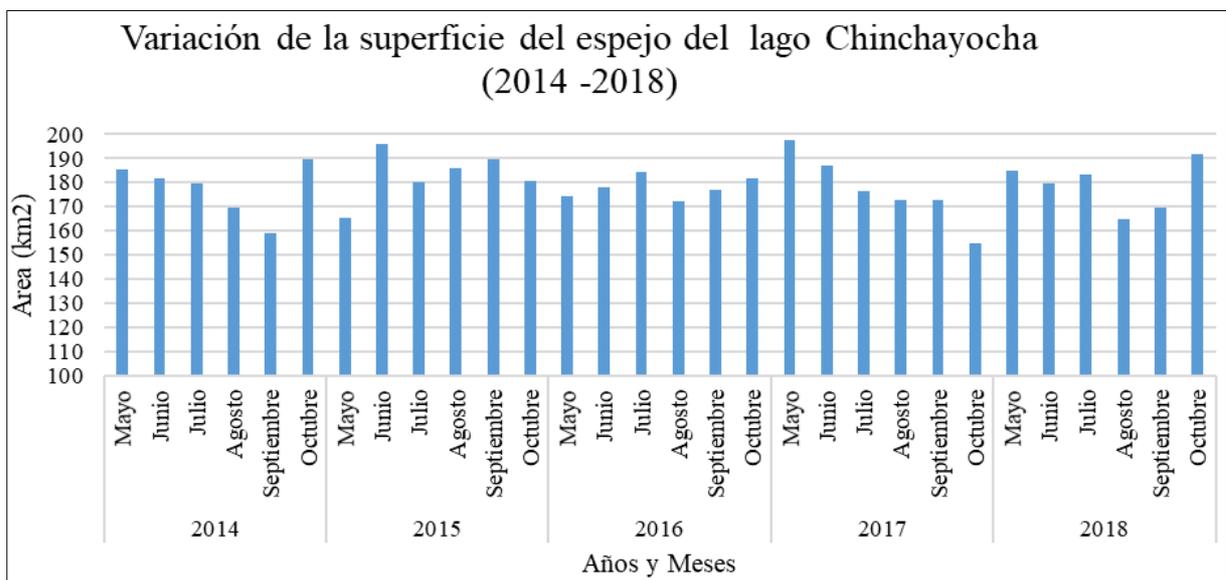


Figura 44. Variación de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha (2014-2018). Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 44 se evidencia la variación de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha, en un periodo de cinco años, en la época de estiaje. El valor máximo es de 198 km<sup>2</sup> en el mes de mayo del año 2017, mientras que el valor mínimo es de 155 km<sup>2</sup> en el mes de octubre del año 2017.

### 3.3.1. Análisis de la varianza (ANOVA)

Para el presente estudio para la variable área de espejo del lago Chinchaycocha se aplicó el análisis de varianza (ANOVA), mediante un script generado en el software RStudio (ver Apéndice 11), donde esta prueba la hipótesis de que las medias de dos o más poblaciones son iguales.

Tabla 16

*Análisis de Varianza (ANOVA) para la variable del área de espejo del lago*

	<b>Grados de libertad</b>	<b>Suma cuadrada</b>	<b>Cuadrado medio</b>	<b>F valor</b>	<b>Pr(&gt;F)</b>
Segmento del año	4	138,2	34,56	0,304	0,872
Residuales	25	2837,2	113,49		

Signif. códigos: 0 ‘\*\*\*\*’ 0,001 ‘\*\*\*’ 0,01 ‘\*\*’ 0,05 ‘.’ 0,1 ‘ ’ 1

*Fuente:* Elaboración propia.

En la Tabla 16 se observa el Análisis de Varianza del área del espejo del lago Chinchaycocha, cuyo valor de prueba F es 0,304 y el p-value es mayor al nivel de significancia, por lo tanto, se rechaza la hipótesis alterna y se acepta la hipótesis nula. Mediante esta prueba se puede afirmar que, el promedio de área de la superficie hídrica en los 5 años evaluados es igual con un 95 % de confiabilidad.

### 3.3.2. Correlación y variación de las variables hidrométricas con la superficie del espejo

#### Los diagramas de Caja-Bigotes (Boxplots)

Los diagramas de Boxplot, se desarrolló para cada variable evaluada, donde estas permiten identificar valores atípicos y comparar distribuciones evaluadas en la época de estiaje.

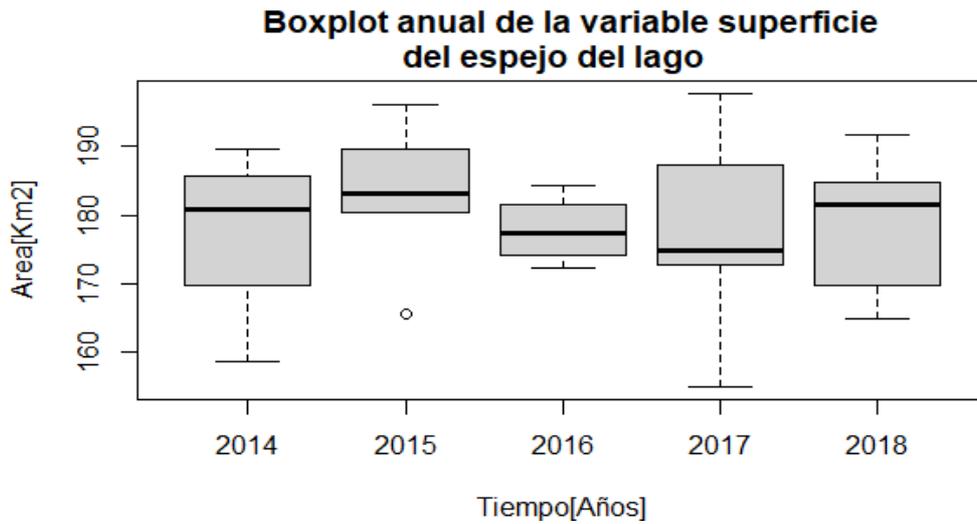


Figura 45. Boxplot de la variable superficie de espejo del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 45 se visualiza el diseño de cajas (boxplot) de la variable superficie de espejo del lago Chinchaycocha. La mayor variabilidad de la superficie se dio en el año 2017 y la menor variabilidad en el año 2016; el año donde se presentó mayor numero devalore (outlayer) extremos fue el 2015.

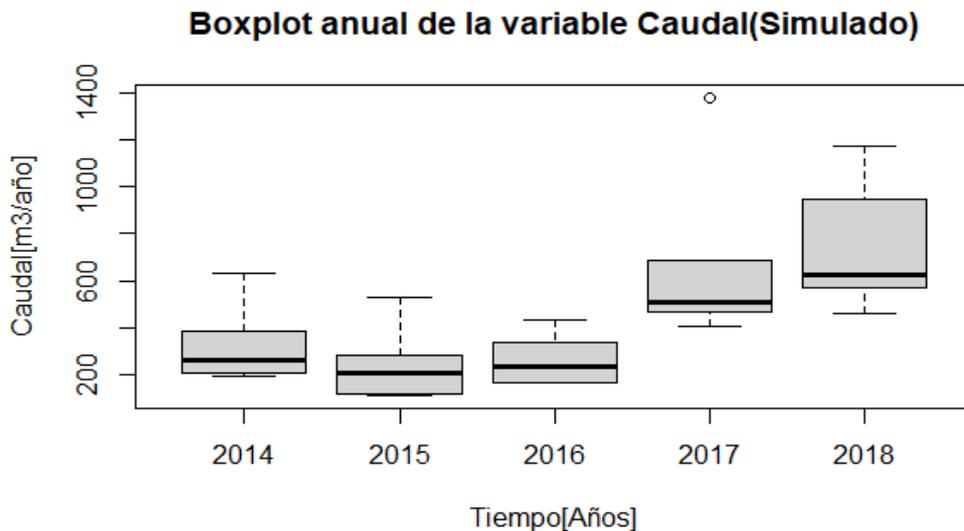


Figura 46. Boxplot de la variable Caudal (Simulado) en el periodo 2014-2018. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 46 muestra el diseño de cajas (boxplot) de la variable caudal simulado. La mayor variabilidad de caudal la se presentó en el año 2018 y la menor variabilidad en el año 2017; el año donde se mostró mayor numero devalore (outlayer) extremos fue el 2017.

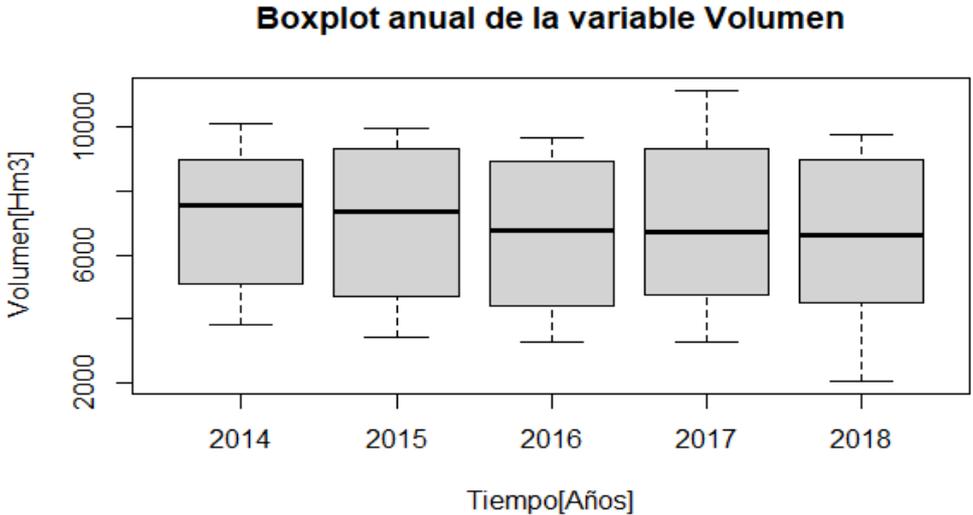


Figura 47. Boxplot de la variable Volumen en el periodo 2014-2018. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 47 muestra el diseño de cajas (boxplot) de la variable volumen. La mayor variabilidad de volumen se mostró en el año 2017 y la menor variabilidad en el año 2016.

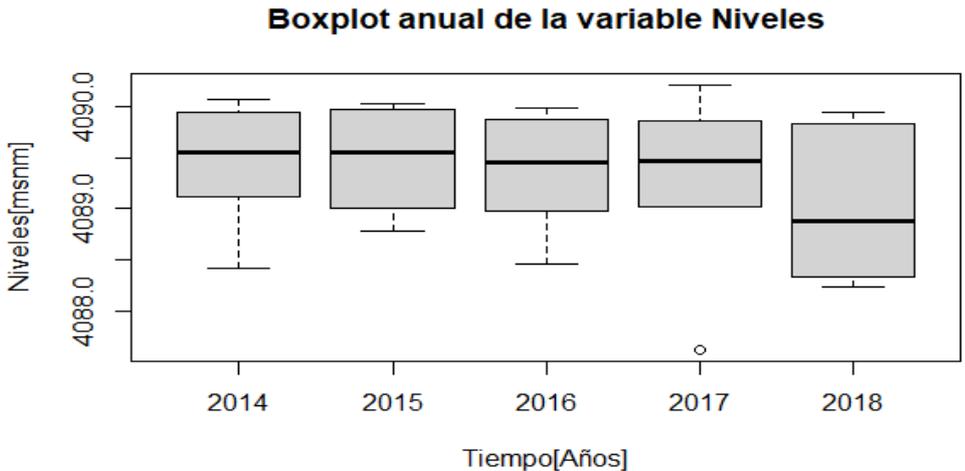


Figura 48. Boxplot de la variable Niveles en el periodo 2014-2018. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 48 se visualiza el diseño de cajas (boxplot) de la variable niveles. La mayor variabilidad de niveles se presentó en el año 2014 y la menor variabilidad en el año 2015, el año donde se mostró mayor numero devalore (outlayer) extremos fue el 2017.

### Correlación entre las variables evaluadas

La matriz de correlación se desarrolló en el lenguaje estadístico R, donde se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson, con la herramienta chart. Correlation (ver Apéndice 10). A continuación, en la Figura 49 se visualiza dicha matriz.

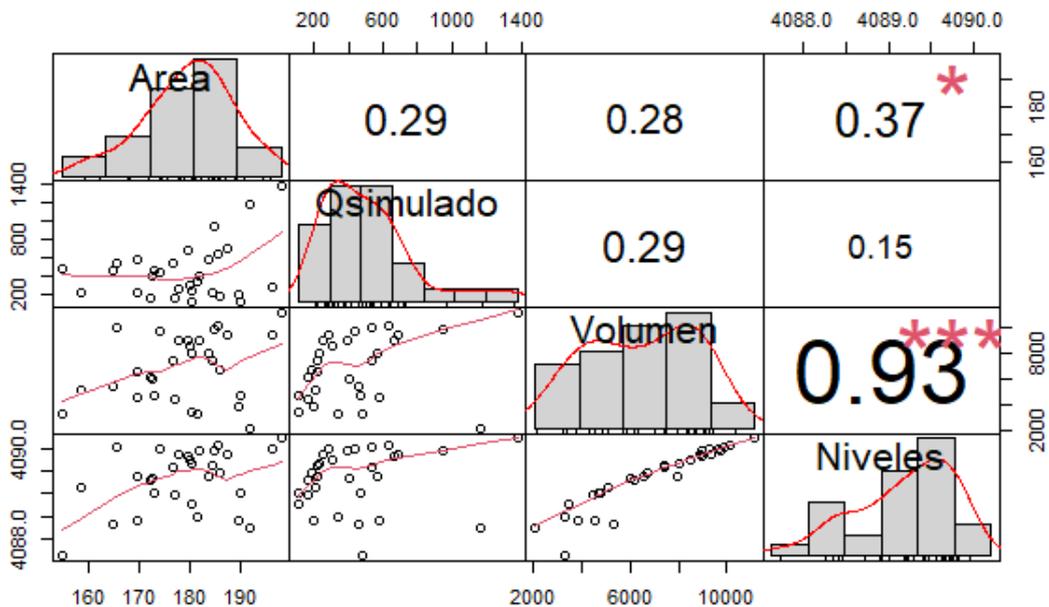


Figura 49. Matriz de correlación entre las variables evaluadas. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 49 se aprecia la matriz de correlación, entre la superficie del espejo (área) y los datos hidrométricos para el periodo evaluado, en la época de estiaje. Estos datos del área del espejo con las hidrométricas no están relacionados significativamente. Dichos resultados se deben probablemente a que las datas del área han sido trabajadas en el periodo de estiaje.

### 3.4. Estimación del comportamiento hídrico mediante redes neuronales

Las predicciones del comportamiento hídrico se realizaron en el lenguaje estadístico R, se empleó las redes neuronales.

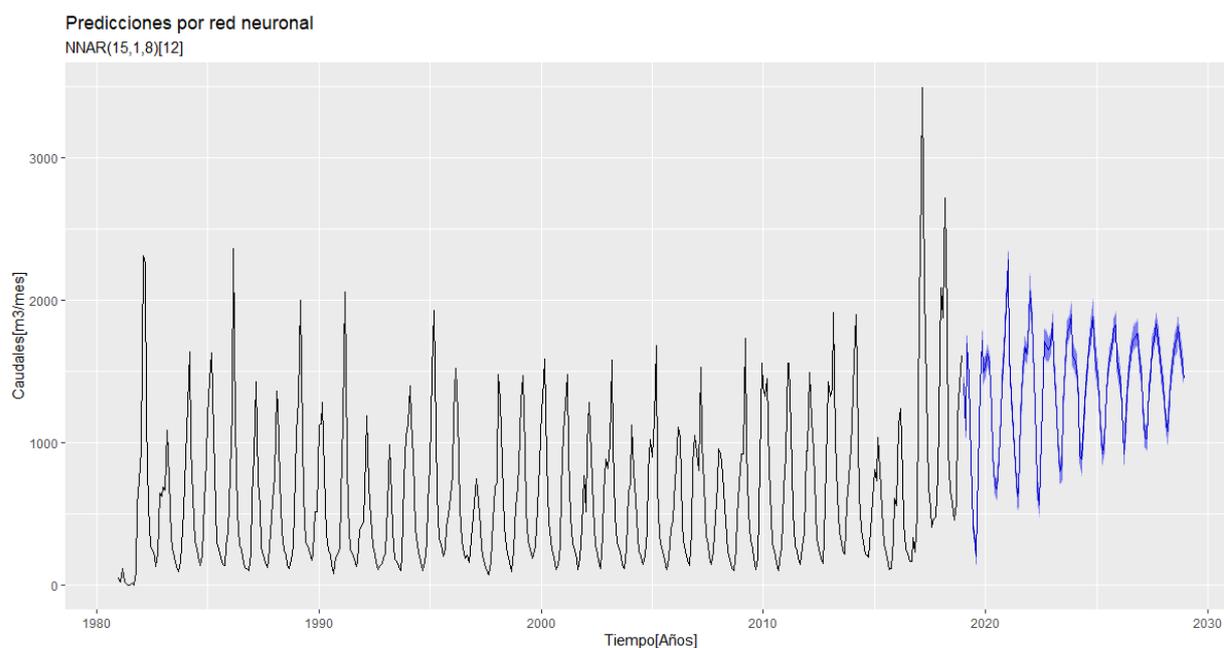


Figura 50. Caudal observado vs caudal predicho. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 50 se observa el comportamiento de los valores predichos del caudal hasta el año 2028, la línea de color negro representa la data base para la predicción y la línea en color azul representa la predicción al año en interés.

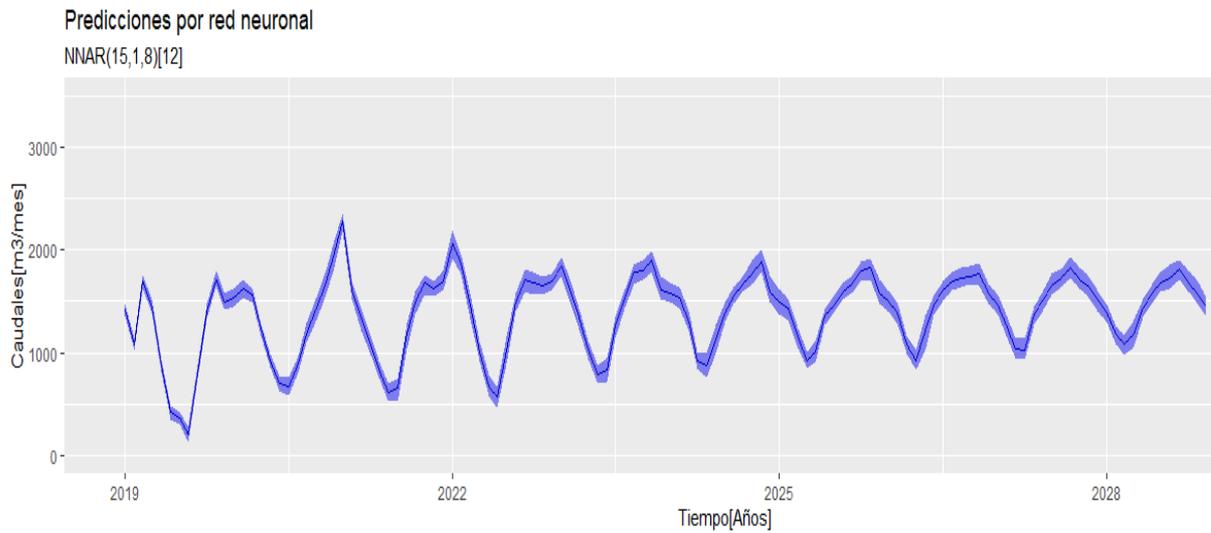


Figura 51. Predicción del caudal al 2028. Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 51 se aprecia el comportamiento de los valores predichos del caudal hasta el año 2028, la línea en color azul representa el valor medio y el intervalo de confianza de 95 % representadas en las franjas.

En la Tabla 17, se presentan los valores estimados de cada mes, el máximo caudal podrá alcanzar en el mes de enero del año 2021, oscilando entre 2 354 m<sup>3</sup>/mes con un intervalo de 95 %. Asimismo, el mínimo caudal que podrá alcanzar es en el mes de agosto del año 2019, oscilando entre 278 m<sup>3</sup>/mes con intervalo de 95 %.

Tabla 17

*Estimación de los caudales por red neuronal al año 2028*

Mes	Año	Prediccion medio	Intervalo		Mes	Año	Prediccion medio	Intervalo	
			< al 95%	> al 95%				< al 95 %	> al 95%
Jan	2019	1474,64	1416,92	1362,29	Jan	2022	2189,60	2066,82	1917,41
Feb	2019	1144,03	1083,93	1025,44	Feb	2022	1959,28	1872,16	1764,95
Mar	2019	1759,70	1698,05	1630,27	Mar	2022	1577,95	1462,68	1338,82
Apr	2019	1522,28	1454,84	1386,70	Apr	2022	1115,87	1015,18	927,55
May	2019	939,62	880,00	819,75	May	2022	784,79	676,90	579,82
Jun	2019	484,25	419,87	356,61	Jun	2022	679,10	566,52	469,22
Jul	2019	426,72	364,83	306,82	Jul	2022	1156,67	1026,77	896,86
Aug	2019	278,37	206,58	137,25	Aug	2022	1573,91	1495,61	1402,40
Sep	2019	878,29	811,35	742,73	Sep	2022	1820,06	1708,55	1587,49
Oct	2019	1479,04	1404,35	1332,80	Oct	2022	1785,71	1683,51	1558,60
Nov	2019	1794,79	1718,42	1647,30	Nov	2022	1740,07	1655,28	1564,86
Dec	2019	1575,53	1492,38	1413,11	Dec	2022	1777,07	1690,65	1606,10
Jan	2020	1626,62	1539,59	1451,22	Jan	2023	1926,66	1841,19	1739,15
Feb	2020	1711,59	1624,18	1539,28	Feb	2023	1693,11	1594,26	1477,40
Mar	2020	1629,93	1559,62	1485,73	Mar	2023	1438,73	1342,57	1235,95
Apr	2020	1293,73	1238,01	1172,85	Apr	2023	1107,27	1022,34	931,20
May	2020	988,80	923,10	856,52	May	2023	877,88	795,03	697,37
Jun	2020	777,73	705,38	624,28	Jun	2023	955,33	838,92	714,93
Jul	2020	762,14	676,94	587,76	Jul	2023	1341,59	1261,78	1137,86
Aug	2020	969,76	891,12	809,47	Aug	2023	1614,19	1536,55	1435,76
Sep	2020	1288,28	1191,17	1092,37	Sep	2023	1861,82	1784,15	1671,55
Oct	2020	1525,75	1417,71	1297,64	Oct	2023	1900,21	1805,33	1711,11
Nov	2020	1767,09	1653,48	1532,46	Nov	2023	1992,10	1895,50	1786,00
Dec	2020	2085,52	1979,02	1827,54	Dec	2023	1740,49	1615,56	1526,58
Jan	2021	2354,41	2281,63	2173,22	Jan	2024	1687,20	1587,26	1494,97
Feb	2021	1703,03	1610,52	1517,60	Feb	2024	1640,99	1536,81	1433,90
Mar	2021	1426,77	1329,00	1212,85	Mar	2024	1402,19	1305,97	1218,52
Apr	2021	1174,72	1082,63	987,48	Apr	2024	1007,92	915,67	844,72
May	2021	915,54	841,41	757,18	May	2024	1000,63	881,79	764,95
Jun	2021	697,10	622,16	522,13	Jun	2024	1268,51	1129,05	997,83
Jul	2021	750,10	652,52	533,03	Jul	2024	1492,56	1391,77	1300,41
Aug	2021	1289,37	1186,77	1038,68	Aug	2024	1645,26	1556,55	1477,51
Sep	2021	1588,12	1494,52	1376,65	Sep	2024	1742,22	1662,71	1587,60
Oct	2021	1749,78	1675,26	1567,05	Oct	2024	1897,51	1770,12	1673,11
Nov	2021	1702,74	1623,79	1551,87	Nov	2024	2005,02	1886,26	1779,10
Dec	2021	1795,94	1695,15	1605,95	Dec	2024	1762,14	1593,42	1485,96

(Continuación)

Mes	Año	Prediccion medio	Intervalo		Mes	Año	Prediccion medio	Intervalo	
			< al 95%	> al 95%				< al 95 %	> al 95%
Jan	2025	1625,64	1488,42	1382,24	Jan	2027	1563,93	1460,02	1371,92
Feb	2025	1527,87	1434,36	1320,02	Feb	2027	1368,71	1270,71	1167,61
Mar	2025	1243,57	1154,01	1061,13	Mar	2027	1137,24	1033,05	957,68
Apr	2025	1015,94	920,35	843,57	Apr	2027	1141,17	1026,61	932,11
May	2025	1116,43	1008,15	913,65	May	2027	1451,05	1374,07	1276,64
Jun	2025	1424,06	1355,67	1270,72	Jun	2027	1615,82	1522,99	1416,95
Jul	2025	1547,96	1464,34	1389,77	Jul	2027	1766,32	1656,99	1562,94
Aug	2025	1676,99	1599,32	1523,61	Aug	2027	1813,71	1726,97	1633,42
Sep	2025	1735,71	1669,44	1582,65	Sep	2027	1933,76	1831,62	1723,49
Oct	2025	1882,35	1806,26	1690,97	Oct	2027	1833,90	1718,66	1616,67
Nov	2025	1922,36	1826,57	1710,13	Nov	2027	1749,97	1656,50	1545,39
Dec	2025	1718,06	1581,09	1481,19	Dec	2027	1606,89	1514,54	1405,41
Jan	2026	1613,14	1501,63	1399,05	Jan	2028	1480,54	1394,67	1299,39
Feb	2026	1486,17	1395,11	1280,72	Feb	2028	1258,67	1178,66	1082,11
Mar	2026	1163,50	1078,31	990,80	Mar	2028	1168,73	1080,15	978,46
Apr	2026	1026,58	918,24	832,83	Apr	2028	1314,34	1191,00	1050,48
May	2026	1362,15	1219,92	1029,80	May	2028	1518,33	1434,25	1345,82
Jun	2026	1545,64	1455,97	1365,88	Jun	2028	1672,29	1577,35	1475,46
Jul	2026	1699,46	1604,45	1513,17	Jul	2028	1788,40	1687,52	1597,18
Aug	2026	1785,75	1701,52	1615,66	Aug	2028	1850,69	1729,89	1618,61
Sep	2026	1829,86	1723,77	1640,27	Sep	2028	1907,87	1813,43	1718,10
Oct	2026	1837,99	1739,83	1662,38	Oct	2028	1793,14	1676,40	1591,40
Nov	2026	1878,87	1767,14	1656,08	Nov	2028	1689,91	1567,80	1478,63
Dec	2026	1666,98	1576,78	1473,70	Dec	2028	1542,60	1447,38	1345,12

Fuente: Elaboración propia.

## CAPÍTULO IV. DISCUSIONES

### **Evaluación de la simulación del impacto de la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico de la cuenca del lago Chinchaycocha – Junín, mediante la aplicación de un modelo determinístico**

A partir de los resultados encontrados en el presente estudio, por medio de la simulación del modelo SWAT se evaluó que la variabilidad climática influyó en el comportamiento hídrico de la cuenca del lago Chinchaycocha durante el periodo 1981 - 2018, dependiendo principalmente de la precipitación. Por otro lado, en los últimos dos años se han presentado anomalías en las variables de caudal y precipitación, que ocasionaron alteraciones en la simulación del modelo hidrológico (Acosta y Viale, 2017). Dichos cambios reflejan la variabilidad climática destacada (Alvarez *et al.*, 2017). La precipitación y temperatura son datos cuya variación determina otros fundamentos importantes, como en el caso de la simulación hidrológica, además de ser los datos básicos para entender de la variabilidad meteorológica (Primo, 2015).

Estos resultados se relacionan, con lo que reportó Alzate *et al.* (2015) en la investigación cambio y variabilidad climáticos en las regiones de los ríos Zulia y Pamplonita, en la que resalta que, los recursos hídricos están altamente expuestos a impactos climáticos actuales y futuros. Asimismo, para Palomino (2015) en la investigación efectos de la variabilidad climática en la hidrología de la cuenca Chancay, el autor sostiene que el impacto potencial de la variabilidad climática generará un cambio en el comportamiento del recurso hídrico. Estos resultados son consistentes con el presente estudio, puesto que la variable evaluada es el recurso hídrico (caudal) y la influencia de la variabilidad climática sobre ello, pues en dicho estudio el comportamiento del caudal se ve afectado por el suceso de los últimos 38 años.

#### **4.1. Determinación de la variación de los caudales para la cuenca del lago Chinchaycocha a través de la modelización en el periodo de 1981 – 2018**

A partir de los resultados encontrados en la investigación durante la calibración y validación del modelo hidrológico SWAT +; en la fase de la calibración, fue obtenido el Coeficiente de Determinación de Pearson ( $R^2$ ) de 0,59, cuyo valor indica un nivel de aceptación del modelo hidrológico. Por otra parte, no se obtuvo una perfecta relación lineal, esto puede deberse al ajuste del modelo, ya que es dependiente de los datos de ingreso (caudal regulado) y en cuencas muy interferidas los procesos naturales son secundarios al realizar simulaciones (García 2006, Velez 2008 y Vargas 2010). Una variable importante que interfiere en los procesos de caudal es el uso del agua, ya que significa que se reduce la cantidad hídrica generada antes de llegar al cauce principal (Cabrera, 2012). Este factor no se tiene en cuenta para este modelo, por lo que existen deficiencias en los procesos involucrados.

Estos resultados son cercanos con lo que reportaron Sánchez *et al.* (2017) en el estudio modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo con el uso de SWAT, puesto que para la calibración mensual de caudal del modelo SWAT obtuvieron un coeficiente de determinación ( $R^2$ : 0,70), obteniendo un buen ajuste del modelo. Estos valores cercanos de  $R^2$  podría atribuirse a que se ha empleado las mismas variables meteorológicos (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima) y variables geográficas (DEM, pendiente, cobertura vegetal y suelos) en ambos estudios respectivamente. Asimismo, dichos resultados son iguales el estudio presente con la investigación realizada por Martínez (2014), en el estudio impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica, obtuvo un coeficiente de determinación ( $R^2$ : 0,59).

Por otra parte, en esta zona se localiza la presa Upamayo para producción energética, la cual la data observada fue tomada en la salida de la mencionada presa para el proceso de calibración. Esta es posiblemente una de las razones por las que el agua que se produce en la cuenca no se refleja en el caudal (García, 2008). Por otro lado, por falta de registros e información disponible, solo se emplearon dos años para calibrar dicho modelo.

Mientras que para Kraemer *et al.* (2011) en la investigación con aplicación del modelo hidrológico-SWAT en una microcuenca agrícola obtuvieron un  $R^2$ : 0,34 para la calibración mensual de caudal del modelo SWAT, el cual fue un resultado deficiente, pero cuando la calibración se realizó a un nivel diario se obtuvo un  $R^2$ : 0,55 y con ello lograron resultados eficientes. El anterior valor es muy diferente a lo encontrado en este estudio, donde la calibración se realizó de forma mensual con un  $R^2$ : 0,59, esto podría deberse a que se presentó dificultades al momento de manipular los parámetros en el análisis de sensibilidad. Según Neitsch *et al.* (2002), indica que dicho análisis admite identificar los parámetros que forman impactos significativos en la data de tendencia determinado simulado por el modelo, el propósito es restringir el número de parámetros óptimos para el modelo y de esta manera lograr que el desarrollo de calibración retorne menos confuso y amplio tal como se puede apreciar en la (Tabla 6), lo cual no afectó en este estudio. Según Santhi *et al.* (2001) y Van Liew *et al.* (2003) el coeficiente de correlación de Pearson representa el grado de colinealidad entre data simulada y observada. Tiene un rango de 0 a 1, donde  $r=0$  refiere que no existe alguna relación lineal y valores de  $r=1$  indican una perfecta relación lineal. Valores mayores a 0,5 normalmente son considerados aceptables, lo cual en este estudio de investigación se obtuvo dicho resultado.

Por otra parte, para el proceso de validación del modelo hidrológico en la investigación, fue utilizado el porcentaje de BIAS (PBIAS), obteniendo un valor de 18,5 %, esto indica un nivel de aceptación del modelo tal como lo menciona Moriasi *et al.*, (2007), los valores  $PBIAS > \pm 25$ , indica insatisfactorio, mientras que  $\pm 15 < PBIAS < \pm 25$ , indica satisfactoria, del mismo modo  $\pm 10 < PBIAS < \pm 15$  indica una aceptabilidad y finalmente un  $PBIAS < \pm 10$  indica una validación del modelo muy bueno. Por otro lado, estos resultados son cercanos con lo que reporta SENAMHI (2017), en la investigación sobre “Modelamiento hidrológico de la zona hidrográfica del Titicaca”, en el departamento de Puno; la mencionada investigación en la fase de validación del modelo obtuvo un porcentaje de  $PBIAS < 10$  %, indicando un buen desempeño del modelo, esta diferencia en el porcentaje BIAS para ambos estudios se puede atribuir a que en el presente estudio se obtuvo dificultades al momento de validar, debido a que existe una presa en la salida de la cuenca estudiada.

En algunos estudios SWAT, sobrestimó el rendimiento hídrico (Silva, 2009 y Sánchez *et al.*, 2017), lo que probablemente en este estudio se deba a la sobreestimación de caudales en la cuenca Chinchaycocha. La sobreestimación es positiva cuando el enfoque de la investigación se dirige hacia el registro de inundaciones, variabilidad hídrica y erosión debido al aumento de la escorrentía superficial, pero desfavorable cuando el enfoque está encaminado por la escases hídricas (Zuleta, 2013 y Ulloa, 2014).

De igual importancia para Sánchez *et al.* (2017) y SENAMHI (2017) señalan que utilizar los coeficientes de  $R^2$  y el valor PBIAS para el proceso de calibración y validación del caudal simulado a nivel mensual en el modelo SWAT muestra eficiencia. Esto es consistente con lo que encuentra este estudio. Donde el valor de  $R^2$  y PBIAS para las etapas de calibración y validación de los caudales observados y simulados están correlacionados; esto se puede afirmar con un nivel de confianza del 95 % ( $p\text{-value} \leq 0,05$ ) que el modelo hidrológico desarrolló una simulación hídrica eficiente para esta hipótesis.

#### **4.2. Influencia de la variabilidad climática sobre la variación de los caudales**

De acuerdo con los resultados encontrados en este estudio, los parámetros hidrometeorológicos muestran tendencias regulares. Por otro lado, en los últimos dos años se han presentado anomalías en las variables de escorrentía y precipitación, lo que ha generado cambios en las simulaciones del modelo hidrológico (Acosta y Viale, 2017). Estos cambios reflejan específicamente la variabilidad climática (Álvarez *et al.*, 2017). La precipitación y la temperatura son datos cuya variación determina otros fundamentos importantes, como en el caso de las simulaciones hidrológicas, además de ser datos fundamentales para entender la variabilidad meteorológica (Primo, 2015). Por otro lado, en el estudio desarrollado, de acuerdo con el coeficiente de correlación entre el caudal y los parámetros analizados, lo que presenta mayor correlación es con la variable precipitación pluvial con un valor de 0.81. Asimismo, existe correlación negativa entre el caudal y la temperatura máxima y temperatura mínima, esto significa que ambas variables se mueven en la dirección opuesta.

Por otra parte, para Ortiz *et al.* (2017) en la investigación análisis estadístico de variables climáticas en la ciudad Cúcuta, sostienen que las variables climáticas analizadas: precipitación, temperatura ambiente, humedad relativa y velocidad del viento presentaron una buena correlación entre ellas, a excepción del brillo solar. Por otro lado, el comportamiento de las lluvias en los últimos períodos se ha sostenido en el tiempo. Esto no es consistente con la investigación presente, puesto que solo la precipitación estuvo correlacionada con el caudal. Asimismo, la precipitación en los últimos años no se ha sostenido en el tiempo. Si bien es cierto, la variabilidad climática se presenta en cualquiera de los períodos analizados, siendo las precipitaciones y la temperatura las más anómalas (De Oliveira *et al.*, 2007).

Por otro lado, Milla (2018) en el trabajo de investigación sobre efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río Santa, el autor sostiene que el análisis de regresión para las variables de precipitación y temperatura no tiene una correlación significativa, mientras que las variables temperatura y caudal poseen una correlación, estos resultados son diferentes a lo encontrado en la presente investigación, donde la correlación de las variables hidrometeorológicas (precipitación y caudal simulado) tiene una correlación significativa, esto podría deberse a que se empleó en la simulación de caudal la herramienta Model Builder, lo cual no se utilizó en este estudio. Cabe resaltar que en dicho estudio la simulación hídrica se desarrolló con el programa SWAT. En relación con este tema, parámetros como la temperatura y precipitación son irregulares, de ellas es dependiente la escasez o abundancia hídrica en la tierra (Villegas *et al.*, 2014). Como también indica la investigación de Huere *et al.* (2019), sobre el estudio realizado efectos de la fluctuación climática en el balance hídrico, donde sostienen que, las variaciones de los parámetros meteorológicos mencionados intervinieron en el balance hídrico, dichos parámetros sirven para realizar pronósticos de la oferta y demanda hídrica donde existirán períodos de mayor o menor disponibilidad hídrica. Por otro lado, la investigación desarrollada por Beltrán y Díaz (2019) sobre oscilaciones macroclimáticas que afectan el suministro hídrico en la cuenca del río Gachaneca, sostiene que las variables meteorológicas (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima) presentaron fluctuaciones a lo largo del período evaluado.

### **4.3. Análisis de la variación de la superficie hídrica del lago Chinchaycocha**

A partir de los resultados hallados en la presente investigación, la aplicación de la teledetección y la prueba de ANOVA, para el periodo de 2014-2018 en la época de estiaje, muestran que la superficie del espejo del lago Chinchaycocha no presenta diferencias significativas en promedio ( $p > 0,05$ ), bajo este criterio se puede indicar que no hubo cambio de comportamiento hídrico superficial. Por otro lado, se consideró dicho periodo porque se tuvo limitaciones a la información hidrométrica (caudal, volumen y niveles), siendo esta una debilidad en el presente estudio, ya que con ello se realizó una correlación con el área de espejo. Asimismo, la presente investigación presentó deficiencias al momento de obtener imágenes satelitales representativas en todo el año, por tal motivo se consideró dicha época.

Estos resultados no guardan relación con los que reportó Castañeda (2014) en la investigación análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna el Sonso mediante imágenes satelitales Landsat, en la que constató que hubo una disminución considerable en el área de su cuerpo lagunar en un periodo de 23 años de un 28 %. Estos resultados son diferentes a lo encontrado en la presente investigación, podría atribuirse a que la evaluación en el lago Chinchaycocha es de un periodo muy corto (5 años), lo cual se refleja que los cambios presentes no tienen mucha relevancia. Asimismo, las épocas evaluadas son diferentes, puesto que en el estudio desarrollado por Casatañeda son épocas anuales (estiaje y avenidas).

Por otro lado, para Gonzales y Gonzales (2015) en la investigación análisis multitemporal del espejo óptico de agua en la laguna de Fúquene, constataron que la laguna evaluada sufrió cambios drásticos en su entorno, en el año 1985 presentó 1 864,08 ha, mientras que la superficie del agua en el año 2000 presentó 862,99 ha, en cambio el año 2015 presentó la superficie del agua 470,75 ha, estos resultados son diferentes a lo encontrado en el presente estudio. Además, para Rojas (2017) en la investigación análisis multitemporal a través de la teledetección de la variación de la cubierta vegetal y su alteración en la disminución de la superficie hídrica en la laguna de tota, constató que la superficie hídrica ha sufrido una disminución en un 0,35 % (32,20

ha), estos resultados son diferentes a lo encontrado en la presente investigación. Asimismo, para Ramírez (2018), en la investigación análisis comparativo del cuerpo de agua del embalse del Sisga, el autor constató que la superficie hídrica ha disminuido en su área del embalse en un 129,59 ha, estos resultados son diferentes a lo encontrado en la presente investigación.

Finalmente, para Salamanca (2018) en la investigación análisis multitemporal de la disminución hídrica de la superficie en el el humedal laguna la Herrera por actividades antropogénicas agrupados a la minería, el autor constató que la superficie hídrica ha disminuido significativamente, ya que para el año 1999 ha aumentado la superficie, mientras que para el año 2018 se ha reducido, cubriendo solo un 18,6 % de la superficie hídrica del humedal. Estos resultados son diferentes a lo encontrado en la presente investigación, podría atribuirse a que la evaluación en el lago Chinchaycocha se dio en periodo muy corto, puesto que no se logró encontrar datos históricos de las variables hidrométricas (nivel de embalse y volumen), para hacer una correlación de estas con la variable caudal y la superficie hídrica, optando así una evaluación corta y en un periodo de estiaje, a este último se consideró dicho periodo, porque en la zona de estudio no se logró encontrar imágenes satelitales representativas.

#### **4.4. Estimación del comportamiento hídrico mediante redes neuronales**

A partir de los resultados encontrados en el presente estudio, mediante redes neuronales se realizó una estimación del comportamiento hídrico en la cuenca del lago Chinchaycocha al año 2028, considerando como data base el caudal simulado en el periodo 1981-2018. Asimismo, se consideró el valor medio y su intervalo de confianza 95 % para obtener una estimación aceptable.

Estos resultados están relacionados con los reportados por Rodríguez (2017) en la investigación pronóstico del caudal máximo del río Huaura por modelos ARIMA y redes neuronales, el autor señala que las redes neuronales son eficientes al realizar pronósticos de caudales, su eficiencia del modelo podría atribuirse a que se ha empleado data base de entrenamiento y de prueba de

un periodo de más de 30 años en ambos estudios. Estos resultados son consistentes con la presente investigación, puesto que para el pronóstico se empleó redes neuronales, teniendo en consideración una data base de más de 30 años, lo cual hizo un buen desempeño del modelo al momento de realizar dicho pronóstico.

Por otro lugar, el elemento fundamental de una ARN, que la hace lo bastante eficaz, es la data de entrada. Es en esta etapa, cuando se seleccionan las variables de entrada, que se requiere un cuidado especial (Pujol, 2009). Asimismo, en la investigación presente la data base (simulados) presentan valores como máximo 3 490 m<sup>3</sup>/mes, en el mes de marzo, del año 2017, en cuanto al pronóstico, el máximo caudal podrá alcanzar en el mes de enero del año 2021, oscilando entre 2 354 m<sup>3</sup>/mes. Gráficamente se visualiza que el comportamiento hídrico en el lago Chinchaycocha, tanto los datos de entrada y el pronóstico al año 2028 tiende a mantenerse una tendencia en ascenso y descenso, es decir que en general los valores pronosticados son subestimados respecto al valor observado (Meng *et al.*, 2017).

Por lo tanto, el lago Chinchaycocha debe de ser manejado de forma integrada, siendo una importante fuente hídrica a nivel nacional, tanto por los usos que se emplea y su importancia ecosistémica a nivel internacional, reconocido como sitio Ramsar. Asimismo, Guerra y Botella (1998), menciona que la cuenca es una unidad de planificación básica natural, en la que se debe ver la acción integral de diferentes formas de uso y gestión, se debe ver desde la perspectiva del sistema, en el que cada componente puede afectar o afectarse por otros.

Por otro lado, no se concuerda con el autor referido en el presente, es que utiliza los modelos ARIMA vs las redes neuronales para pronósticos de caudales, puesto que el estudio presente no está basado en la comparación de dos modelos, solo se optó el uso de las redes neuronales para el pronóstico de caudal de la cuenca del lago Chinchaycocha, obteniendo datos aceptables y eficaces para el pronóstico.

## CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

1. En la presente investigación por medio de la simulación del modelo SWAT se evaluó que la variabilidad climática influyó en el comportamiento hídrico de la cuenca del lago Chinchaycocha durante el periodo 1981 - 2018, dependiendo principalmente de la precipitación. Asimismo, dicha simulación es útil en la medida que brindará soporte en las decisiones precisas y fundadas con diferentes perspectivas para afrontar y prevalecer los retos de la gestión hídrica.
2. Mediante la aplicación del modelo hidrológico SWAT +, se estimó el comportamiento hídrico de la cuenca, obteniendo un caudal de escurrimiento superficial máximo anual de 16 200 m<sup>3</sup>/año, correspondiente al año 2017, donde se presentó una época lluviosa excepcionalmente fuerte en la cuenca. Asimismo, el escurrimiento superficial mínimo anual es de 1 610 m<sup>3</sup>/año corresponde al año 1981.
3. Los datos de precipitación para el modelamiento hidrológico fueron obtenidos de dos fuentes diferentes, ello mostró inconsistencia en cuanto a la homogeneidad de los caudales obtenidos para los años 2017 y 2018.
4. Mediante la descomposición estacional anualmente, las variables meteorológicas (precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima), en el periodo evaluado (1981-2018) presentaron patrones similares. Por otro lado, la variable precipitación mostró ascenso hacia los dos últimos años (patrones irregulares), con precipitaciones mayores y el caudal simulado en dichas fechas también aumentaron. Asimismo, los caudales simulados con la precipitación presentaron una correlación de 0,81, esto indica que la variabilidad hídrica está en función a la variabilidad de la precipitación.

5. De acuerdo con el ANOVA, la superficie del espejo del lago Chinchaycocha en el periodo evaluado (2014-2018) y en la época de estiaje, no presenta diferencias significativas en promedio. Esto indica que no hubo cambio de comportamiento hídrico superficial, podría atribuirse a que en los periodos evaluados y en la época mencionada se tuvo una tendencia regular de precipitaciones.
6. Mediante el coeficiente de correlación de Pearson la variable superficie de espejo del lago Chinchaycocha, con las variables hidrométricas (caudal simulado, volumen y niveles) no muestran una correlación significativa, para el periodo (2014-2018) y época de estiaje evaluado.
7. La superficie de espejo del lago Chinchaycocha, en el periodo evaluado (2014-2018), durante la época de estiaje, presenta un valor máximo de 198 km<sup>2</sup> en mayo del 2017, mientras que el valor mínimo es de 155 km<sup>2</sup> en octubre del 2017.
8. La predicción de caudales presentó incertidumbres, debido a las tendencias relacionados con la precipitación, puesto que la base de datos fue obtenida de dos fuentes diferentes (PISCO y estaciones meteorológicas de SENAMHI). Por otro lado, la cuenca del lago Chinchaycocha, según predicción del caudal mediante redes neuronales al año 2028, alcanzó un valor máximo en enero del 2021, oscilando entre 2 354 m<sup>3</sup>/mes con un intervalo de confianza de 95 %. Asimismo, el caudal mínimo que se alcanzó es en agosto del 2019, oscilando entre 278 m<sup>3</sup>/mes con intervalo de confianza del 95 %.
9. Al concluir esta investigación, es necesario resaltar la presencia de diversos factores limitantes, incontrolables que intervinieron en las etapas de desarrollo, tales como: Obtención de datos hidrométricos (caudal, volumen y niveles), ya que solo se pudo adquirir de los últimos 5 años evaluados, datos faltantes de las variables hidrométricos en el tiempo mencionado y los datos de caudal fueron tomados a la salida de la presa Upamayo, siendo estos datos manipulados, interviniendo en el proceso de validación y calibración del modelo SWAT.

## **CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES**

1. La investigación realizada en la cuenca del lago Chinchaycocha, es uno de los estudios pioneros de modelamiento hidrológico bajo la influencia de la variabilidad climática, por lo que se recomienda a futuras investigaciones la ejecución del modelamiento, considerando como data de entrada (datos meteorológicos) de estaciones meteorológicas locales, en que puedan contemplar y enriquecer los resultados de la investigación.
2. En la investigación se evidencia que existe una correlación entre el caudal y la precipitación. Por otro lado, no hay una correlación significativa entre la superficie de espejo del lago con las variables de caudal, volumen y niveles en el periodo y época de estiaje evaluada. A ello también se recomienda nuevas investigaciones en la época de avenidas, en un periodo más largo, para poder relacionar las variables, las cuales puedan estar influenciando en el comportamiento hídrico.
3. Realizar un modelamiento hidrológico a nivel de unidades hidrográficas más pequeñas (microcuencas), dado que la presente investigación ha evaluado la oferta hídrica a nivel de subcuencas.
4. En la investigación ejecutada se predice los caudales en base a los datos de ingreso de dos fuentes diferentes, ello mostró con tendencias relacionadas con la precipitación, obteniendo sesgos e incertidumbres en los resultados. Para futuros estudios se recomienda extender dicha investigación con datos más estables, orientados a la base de datos que permita efectuar el proceso de homogenización de dichas series y, con ello, ampliar la cobertura de los análisis tanto en el espacio como en el tiempo.
5. Implementar estaciones hidrológicas en la cuenca, para futuras investigaciones y para la toma de decisiones en la gestión de los recursos hídricos.

## REFERENCIAS

- Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio. (2011). Landsat 7 Science Data Users Handbook Landsat Project Science Office at NASA's Goddard Space Flight Center in Greenbelt, 186. [https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7\\_Handbook.pdf](https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf)
- Alonso, F. (2006). Sistemas de información geográfica. Recuperado de <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>
- Alzate, D., Rojas, E., Mosquera, J., y Ramón, J. (2015). Cambio Climático y Variabilidad Climática para el periodo 1981-2010 en las cuencas de los ríos Zulia y Pamplonita, norte de Santander – Colombia, *Revista*, 40, 127-153. <http://www.scielo.org.co/pdf/luaz/n40/n40a10.pdf>
- American Meteorological Society. (2000). Glossary of Meteorology (en línea), segunda edición. Recuperado de <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/>
- Aparicio, F. (1989). Fundamentos de Hidrología de Superficie, México, *Editorial Limusa*.
- Arnold, J, Srinivasan, R., Muttiah, R., y Williams, J. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment – Part 1: Model development. *Water Res*, 34, 73–89. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.1998.tb05961.x>
- Arnold, J., Moriasi, D. y Gassman, P. (2012). SWAT: Model use, calibration and validation.
- Asociación Ecosistemas Andinos. (2010). Plan de manejo con fines de conservación de las especies de aves amenazadas del lago Chinchaycocha: Zambullidor de Junín (*Podiceps taczanowskii*), Gallinetita de Junín (*Laterallus tuerosii*) y Parihuana (*Phoenicopterus chilensis*), en el Ámbito de la Reserva Nacional de Junín.
- Autoridad Nacional del Agua. (2009). Ley General de Recursos Hídricos N° 29338. Diario oficial el peruano. [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/ley\\_29338\\_0.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/publication/files/ley_29338_0.pdf)

- Autoridad Nacional del Agua. (2013). Plan Nacional de Recursos Hídricos. <https://www.ana.gob.pe/sites/default/files/plannacionalrecursoshidricos2013.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). Inventario de Lagunas Glaciares del Perú. Huaraz: 1. [http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/inventario\\_de\\_lagunas\\_del\\_peru\\_parte1.pdf](http://www.ana.gob.pe/sites/default/files/normatividad/files/inventario_de_lagunas_del_peru_parte1.pdf)
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). Estudio Hidrológico del Lago Chinchaycocha. <https://es.scribd.com/document/407006813/ESTUDIO-HIDROLOGICO-CHINCHAYCOCHA-docx>
- Aybar, C. (2016). *Modelamiento de la escorrentía en cuencas de montaña: Caso de Estudio Río Vilcanota*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Recuperado de <http://cybertesis.unmsm.edu.pe/handle/cybertesis/5936>.
- Aybar, C., Lavado, W., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E. y Felipe, O. (2017). Uso del Producto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. SENAMHI-DHI, Lima, Perú.
- Aybara, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., y Obando, F. (2019). Construcción de un conjunto de datos de lluvia en cuadrícula de alta resolución para Perú desde 1981 hasta la actualidad. SENAMHI, Lima, Perú.
- Behrends, K., Chagas, C., Vázquez, A., Palacín, E., Santanatoglia, O., Castiglioni, M. y Massobrio, M. (2011). Aplicación del modelo hidrológico SWAT en una microcuenca agrícola de la Pampa Ondulada. Argentina. *SCIELO*. Vol. 29. [http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S185020672011000100008&lng=es&nrm=iso](http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S185020672011000100008&lng=es&nrm=iso).
- Beltrán, L., y Díaz, C. (2019). Oscilaciones Macroclimáticas que Afectan la Oferta Hídrica en la Cuenca del Río Gachaneca; Boyacá-Colombia. *Revista Brasileira de Meteorología*, 35 (2), 171-185. <https://doi.org/10.1590/0102-7786351012>
- Breña, A., y Jacobo, M., (2006). Principios y fundamentos de la Hidrología Superficial. [http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios\\_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf](http://www.uamenlinea.uam.mx/materiales/licenciatura/hidrologia/principios_fundamentos/libro-PFHS-05.pdf)

- Cabrera, J. (2012). Calibración de modelos hidrológicos. Universidad Nacional de Ingeniería. Facultad de Ingeniería Civil, Perú. 7 p. [http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas\\_interes/modhidro\\_2.pdf](http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf).
- Castañeda, E. (2014). Análisis multitemporal del cuerpo de agua de la laguna el Sonso mediante imágenes satelitales Landsat – Colombia. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/13442/Casta%20B1edaMoraEdgarIv%20A1n2015.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Chow, V., David, M., y Larry, M. (1998). Hidrología aplicada. *McGraw-Hill*, 573p.
- Chuvieco, E. (2002). Fundamentos de Teledetección Espacial. (2 edición). Madrid, España: RIALP
- Cohen, R. (Sin Fecha). Gestión de Recursos – FI UBA, *Pronósticos*, 1, 1-3. <http://materias.fi.uba.ar/7628/PronosticosTexto.pdf>
- Damonte, G., Cabrera, A., y Miranda, F. (2017). Problemas vinculados al cambio y variabilidad climáticos y modelos ejemplares de adaptación por regiones en el Perú. Perú. [http://www.grade.org.pe/forge/descargas/Cambio%20y%20variabilidad%20climatica\\_Gerardo%20Damonte.pdf](http://www.grade.org.pe/forge/descargas/Cambio%20y%20variabilidad%20climatica_Gerardo%20Damonte.pdf)
- De Oliveira, C., Dos Santos, L., y Alvez De Souza, C. (2007). *Comportamiento de elementos climáticos seleccionados en período de 1971 a 2003 en la ciudad de Cáceres-MT/Brasil*. Espacio y Desarrollo, 0 (19), 21–36. [http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10632documentos1/documentosJuan%20Diego/Plnaifi\\_Cuencas\\_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrografica.pdf](http://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/10632documentos1/documentosJuan%20Diego/Plnaifi_Cuencas_Pregrado/Sistema%20CuencaHidrografica.pdf).
- De Vengoechea, A. (2012). Las cumbres de las Naciones Unidas sobre Cambio Climático. Recuperado de <https://library.fes.de/pdf-files/bueros/la-energiayclima/09155.pdf>
- Decreto Supremo N° 017-2009-AG. Diario Oficial El Peruano, Lima, Perú, 02 de septiembre del 2009. pp. 401820–401836.
- Del Carmen, R. (2001). Modelación de la evapotranspiración con métodos de balance de agua.

- Delgado, R. (2018). Introducción a las Redes Neuronales Artificiales en R, *Brought to you by R Studio*. <https://rpubs.com/rdelgado/402754>
- Díaz, G. (2012). El cambio climático, *Ciencia y Sociedad*, 32 (2), 227-240. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>
- Espino, C. (2017). *Análisis predictivo: técnicas y modelos utilizados y aplicaciones del mismo - herramientas Open Source que permiten su uso*. (Tesis pregrado). Universitat Oberta de Catalunya, España.
- Farfán, J. (2016). *Impacto del cambio climático en los caudales de una cuenca de Páramo. primera aproximación – Ecuador*. (Tesis pregrado). Universidad de Cuenca, Ecuador. <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/24355>
- Fernández, C. (2016). Asimilación y evaluación de datos de precipitación en base a satélite en el modelamiento hidrológico de la cuenca del río Vilcanota. SENAMHI. Perú. 68 p. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-32.pdf>.
- Ficklin, D., Stewart I., y Maurer, E. (2013). Climate Change Impacts on Streamflow and Subbasin-Scale Hydrology in the Upper River Basin, *PLoS ONE*, 8, 8-19. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0071297>.
- García, W. (2006). El Sistema complejo de la cuenca hidrológica (en línea). 22 p. 2019. <http://www.medellin.unal.edu.co/~poboyca/documentos/-hidrográficas>
- García, D. (2008). La regulación de los caudales y su efecto en la biodiversidad. Universidad Politécnica de Madrid, España. 19 p. [https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6BS2P1\\_Diego%20G-%20JalonACC.pdf](https://www.zaragoza.es/contenidos/medioambiente/cajaAzul/6BS2P1_Diego%20G-%20JalonACC.pdf)
- García, R., Moya, F., Rocha, M., Vargas, J., Gigli, M. y García, M. (2010). El Agua Subterránea en Formosa. El Programa Esmeralda. ISBN en trámite.
- Gassman, P., Reyes, M., Green, C., y Arnold, J. (2007). The soil and water assessment tool: historical development, applications, and future research directions. *American Society of Agricultural and Biological Engineers, L* (4): 1211-1250.

- Ghaffari, G. (2010). Impacto hidrológico simulado por SWAT del cambio de uso de la tierra en la cuenca de Zanjanrood, noroeste de Irán, *Procesos hidrológicos*, 24 (7), 892–903.
- Giménez, E., Cabezón, González, F., y Rendas, R., (2010). Sistema de información geográfica para la gestión de recursos hídricos, *Revista Geográfica de América Central*, 45, 175–190.
- Gonzales, A., y Gonzales, N. (2015). *Análisis multitemporal del espejo de agua en la laguna de Fúquene para el periodo de 1985 a 2015*. (Tesis de grado). Universidad de Manizales, Colombia. <http://ridum.umanizales.edu.co:8080/xmlui/handle/6789/2507>
- Gonzales, M. (2010). *Efecto del cambio climático en la seguridad de suministro de agua potable en el gran Santiago – Chile*. (Tesis pregrado), Universidad de Chile, Chile. [http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104002/cf-gonzalez\\_ma.pdf?sequence=3&isAllowed=y](http://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/104002/cf-gonzalez_ma.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- GreenFacts. (2009). Recursos Hídricos. *Resumen del 2º Informe de las Naciones Unidas sobre el desarrollo de los recursos hídricos en el mundo*. <https://www.greenfacts.org/es/recursos-hidricos/recursos-hidricos-foldout.pdf>
- Guerra, A. y Botella, R. (1998). Erosão dos solos." En *Geomorfologia do Brasil*, organizado por Sandra Baptista Cunha e Antônio José Teixeira Guerra (pp. 181-227). Río de Janeiro: Bertrand Brasil.
- Hamel, G. (2018). Velocidad de Viento, *Geniolandia*. <https://www.geniolandia.com/13181757/que-es-la-velocidad-del-viento>
- Hernández, R., Fernández, C., y Baptista, P. (2003). *Metodología de la Investigación*. (4ta ed.) Distrito Federal, México: McGraw-hill editores.
- Huere, J., Toribio, F., Enríquez, J., y Yaulilahua, R. (2021). Efectos de la variación meteorológica en el balance hídrico de la ciudad de Huancavelica. *Ciencia Latina Revista Científica Multidisciplinar*, 5(5), 9835-9849. [https://doi.org/10.37811/cl\\_rcm.v5i5.1034](https://doi.org/10.37811/cl_rcm.v5i5.1034)
- Huerta, A., Aybar, C., y Lavado, W. (2018). PISCO temperatura v.1.1. SENAMHI - DHI, Lima-Perú.

Hyndman, R. (Sin fecha.). Interpolar valores perdidos en una serie de tiempo.  
<https://pkg.robjhyndman.com/forecast/reference/na.interp.html>

Instituto Geofísico del Perú. (2005). Vulnerabilidad Actual y futura ante el cambio climático y medidas de adaptación en la cuenca del río Mantaro, 3.  
<http://repositorio.igp.gob.pe/handle/IGP/742>

Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico. (Sin Fecha). Teledetección.  
[http://www.ingemmet.gob.pe/web/lab/imagenes\\_satelitales\\_tl](http://www.ingemmet.gob.pe/web/lab/imagenes_satelitales_tl)

Instituto Nacional de Estadística y Geografía (2010). *Aspectos técnicos de las imágenes*. [https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos\\_tecnicos\\_landsat.pdf](https://www.inegi.org.mx/temas/imagenes/imgLANDSAT/doc/Aspectos_tecnicos_landsat.pdf)

Instituto Nacional de Recursos Naturales. (2008). Plan Maestro de la Reserva Nacional de Junín 2008 – 2012.  
[http://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/publicaciones/RN\\_Junin/PlanMaestro2008-2012-RNJunin.pdf](http://old.sernanp.gob.pe/sernanp/archivos/biblioteca/publicaciones/RN_Junin/PlanMaestro2008-2012-RNJunin.pdf)

Inzunza, J. (Sin Fecha). Radiación solar y Terrestre, *Meteorología Descriptiva*.

Jain, A., Mao, J., y Mohiuddin, K. (1996). Artificial neural networks: A tutorial, *Computer*, 3,31-44.

Julio, J. (2011). Contribuyendo al desarrollo de una Cultura del Agua y la Gestión Integral de Recurso Hídrico. Lima, Perú: Zaniel I. Novoa Goicochea.  
[https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam\\_files/publicaciones/varios/ciclo\\_hidrologico.pdf](https://www.gwp.org/globalassets/global/gwpsam_files/publicaciones/varios/ciclo_hidrologico.pdf)

Jayakrishnan, R., Srinivasan, R., Santhi, C. y Arnold, J. (2005). Advances in the application of the SWAT model for water resources management, *Hydrological Processes*, 19(3), 749-762.

Kraemer, F., Chagas, C., Amábile, G., Palacín, A., Santanatoglia, J., Castiglioni, G., y Massobrio, J. (2011). Aplicación del modelo hidrológico - Swat - en una microcuenca agrícola de la pampa ondulada.  
[https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/FAUBA\\_eba6a2f3593a5562cbced4d8bd34ae0](https://repositoriosdigitales.mincyt.gob.ar/vufind/Record/FAUBA_eba6a2f3593a5562cbced4d8bd34ae0)

- León, R. (2017). *Modelación de la Disponibilidad Hídrica del Río Piura, Considerando la Incidencia del Cambio Climático*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2877/P10-L466-T.pdf?sequence=4&isAllowed=y>
- Losada, H. (2018). Glosario de términos relacionados con el riego. *Riego. Org.* <https://www.riego.org/>
- Mahmoud, A., El Naga, A., Jaber, M., y Hammouri, N. (2014). Water scarcity impacton climate change in semi-arid regions: a case study in Mujib basin, Jordan. *Arab J, Geosci*, 8, 951–959.
- Martín, Q., y De Paz, Y. (2007). Aplicación de las Redes Neuronales Artificiales a la regresión, *La muralla S.A*, 52p.
- Martínez, A., Polioptro F., y Patiño, C. (2012). Efectos del cambio climático en la disponibilidad de agua en México, *Tecnología y ciencias del agua*, 3(1), 5-20. [http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S2007-24222012000100001&lng=es&tlng=es](http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2007-24222012000100001&lng=es&tlng=es).
- Martinez, C. (2014). *Impacto del cambio climático en la hidrología de la cuenca del río Ica*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú. <https://docplayer.es/70899932-Universidad-nacional-agraria-la-molina-facultad-de-ingenieria-agricola-catalogo-general-lima-peru-catalogo-general-3.html>
- Martínez, M. (2014). Metodología basada en redes neuronales para interpretación de la resistividad del suelo en zonas urbanas, *Ingeniería Energética*, 1:59-69.
- Mata, H. (2008). *El modelo de simulación hidrológica SWAT aplicado en la cuenca del río Amajac, Hidalgo, México*. (Tesis de posgrado). Colegio de Postgraduados, México.
- Méndez, M. (2012). Calibración y validación del modelo hidrológico SWMM en cuencas hidrográficas de alta pendiente en Costa Rica. *Tecnología en Marcha*. 26 (2), 20-32.
- McLeod, SA (2019). Qué te dice un valor p sobre la significación estadística. Simplemente psicología. <https://www.simplypsychology.org/p-value.html>

- Milla, E. (2018). *Efecto del cambio climático en la disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del río santa – año 2013*. (Tesis doctoral). Universidad Nacional Federico Villareal, Perú. <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2103>
- Ministerio del Ambiente. (2012). Aprueban el Plan de Manejo Ambiental Sostenible Chinchaycocha 2012-2016. [http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/rs-002-2012-minam-plan\\_manejo\\_ambiental.pdf](http://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2013/09/rs-002-2012-minam-plan_manejo_ambiental.pdf)
- Ministerio de Transición Ecológica y el Reto Demográfico. (2000). Aguas Superficiales. España. MITECO. [https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/Categorias\\_y\\_tipos\\_de\\_masas\\_de\\_agua.aspx](https://www.miteco.gob.es/es/agua/temas/estado-y-calidad-de-las-aguas/aguas-superficiales/Categorias_y_tipos_de_masas_de_agua.aspx)
- Minotini, R. (2006). *Enfoques cualitativos y cuantitativos de microcuencas hidrográficas y áreas inundadas de un compartimento en el Mogi Medio-Superior*. (Tesis doctoral). Universidad de Federal de São Carlos, Brasil.
- Mondino, G. (2014). Modelos conceptuales y mentales: Elementos para repensar la enseñanza y el aprendizaje. *Enfoques*, XXVI (1), 57-78. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=259/25933773004>
- Moriasi, D., Arnold, J., Van Liew, M., Bingner, R., Harmel, R. y Veith, T. (2007). Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations, *American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 50, 885-900.
- Musy, A. (2001). Cours "Hydrologie générale". Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne. IATE/HYDRAM. Laboratoire d'Hydrologie et Aménagement. Capítulo 1, 2, 3, 4 y 5.
- Neitsch S., Arnold J., Kiniry J. y Williams J. (2011). Soil y Water Assessment Tool Theoretical Documentation Version 2009, *Texas Water Resour Institute*, 406,1–647.
- Neitsch, S., Arnold, J., Kiniry, J., Srinivasan, R., y Williams, J. (2002). Soil and Water Assessment Tool (SWAT). Texas: College Station.
- Olaya, V. (2004). Hidrología computacional y modelos digitales del terreno-teoría, práctica y filosofía de una nueva forma de análisis hidrológico. <http://heart.sourceforge.net/sp/index.Htm>

- Olaya. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*, 1(1).  
[https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)
- Oñate, F., y Aguilar, G. (2003). Aplicación del modelo SWAT para la estimación de caudales y sedimentos en la cuenca alta del Río Catamayo.
- Orbando, C., Morán, C. y Solarte, J. (2013). Modelación del recurso hídrico en la microcuenca Peñas Blancas, municipio de Tangua, Departamento de Nariño. Universidad de Nariño. Colombia. 28 p. <http://biblioteca.udenar.edu.co:-8085/atenea/biblioteca/89698.pdf>.
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. (2007). DIGITAL SOIL MAP OF THE WORLD. Italia. GeoNetwork.  
[http://data.fao.org/maps/wms?styles=geonetwork\\_DSMW\\_14116\\_style](http://data.fao.org/maps/wms?styles=geonetwork_DSMW_14116_style)
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura. (1981). Instituto de Hidrología de España, Guía internacional de investigación y métodos, Métodos de cálculo del balance hídrico.
- Ortiz, H., Escobar, C. y Sepúlveda S. (2017). Análisis estadístico de variables climatológicas en la ciudad de Cúcuta. *Revista Respuestas*, 23 (1), 39 – 44.  
<https://revistas.ufps.edu.co/index.php/respuestas/about>
- Palomino, H. (2015). *Efectos del Cambio Climático en la Hidrología de la Cuenca Chancay – Huaral*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.  
<http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/1870/P10.P34-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pérez, D. (2006). Introducción a los Sensores Remotos - Aplicaciones en Geología, 9,45. Universidad de Buenos Aires.
- Plan Integral de Recursos de Agua. (2008). Glosario de hidrología de Puerto Rico.  
[http://www.recursosaguapuertorico.com/APENDICE\\_D\\_GLOSARIO\\_ENERO\\_2008.pdf](http://www.recursosaguapuertorico.com/APENDICE_D_GLOSARIO_ENERO_2008.pdf)
- Primo A. (2015). *Variabilidad de la temperatura y de la precipitación, en la ciudad de Toluca, estado de México. Periodo: 1970-2013. Toluca*. Retrieved from

<http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/49235/UAEM-FAPUR-TESIS-PRIMO%20CALBERTO.pdf?sequence=1>

Proaño, M., Gavilanes, C., Valenzuela, P., y Cisneros, C. (2006). Informe Técnico: Aplicación del modelo SWAT en la subcuenca del río Ambato. Proyecto Cuencas Andinas – CODESAN –GTZ Challenge Program

Pujol, L. (2009). *Predicción de caudales en tiempo real en grandes cuencas utilizando redes neuronales artificiales*. (Tesis posgrado). Universidad Politécnica de Valencia, España. <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/6422/tesisUPV3107.pdf>

Qiang, Y., y Lam, N. (2015). Modeling land use and land cover changes in a vulnerable coastal region using artificial neural networks and cellular automata, *Environmental Monit Assess.* 187, 57.

Ramírez, N. (2018). Análisis comparativo del cuerpo de agua del embalse del Sisga, a partir de imágenes sentinel 1 – Colombia. Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. <https://repository.unimilitar.edu.co/handle/10654/20399>

Rodríguez, N. (2017). *Pronóstico del caudal máximo del río Huaura por modelos arima y redes neuronales*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional de Trujillo, Perú. <http://dspace.unitru.edu.pe/handle/UNITRU/10637>

Rojas, D. (2017). Análisis multitemporal mediante imágenes Landsat del cambio de la cobertura vegetal y su impacto en la desecación del espejo de agua en la laguna de tota para el periodo de 1991 al 2017 – Colombia.

Salamanca, M. (2018). *Análisis multitemporal sobre la pérdida del espejo de agua sobre el humedal laguna la Herrera por efectos antrópicos asociados a la minería – Colombia*. (Tesis posgrado). Universidad Militar Nueva Granada, Colombia. <https://repository.unimilitar.edu.co/bitstream/handle/10654/17890/SalamancaG%c3%b3mezMiguelAngel2018.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

Salgado, J., y Güitrón de los Reyes, A. (2012). Aplicabilidad de los modelos hidrológicos distribuidos.

Sánchez, F. (2017). Hidrología Superficial y Subterránea, *Createspace Independent Pub*, 414.

- Sánchez, M., Fernández, D., Martínez, M., Rubio, E., y Ríos, J. (2017). Modelo hidrológico de la cuenca del río Sordo, Oaxaca, México, con SWAT, *Tecnología y ciencias del agua*, 8 (5), 141-156. <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1374>
- Sánchez, S. (2010). Caracterización Morfométrica y Simulación del Balance de la Cuenca “Tres Valles SLP”. (Tesis de posgrado). Colegio de Postgraduados, México. <http://www.biblio.colpos.mx:8080/jspul/handle/10521/160>.
- Santhi, C., Arnold, J., Williams, J., Dugas, W., Srinivasan, R. y Hauck, L. (2001). Validation of the SWAT model on a large river basin with point and nonpoint sources. *J. American Water Resources Assoc*, 37 (5), 1169-1188.
- CENEPRED. (2018). Escenarios de riesgos por lluvias intensas. [https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/2018/08/Escenario\\_NACIONAL.pdf](https://cenepred.gob.pe/web/wp-content/uploads/2018/08/Escenario_NACIONAL.pdf)
- Servicio Geológico de Estados Unidos. (2020). Estados Unidos. EarthExplorer. Recuperado de <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado. (Sin fecha). Nuestras Áreas Naturales Protegidas. Lima, Perú.: SERNANP. <http://www.sernanp.gob.pe/de-junin>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (05 de enero de 2020a). Estaciones Convencionales. SENAMHI. <https://web2.senamhi.gob.pe/?p=estaciones-convencionales>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (05 de enero de 2020b). Indicadores de Sequía. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=sequias>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2013). Estudio de determinación de umbrales de temperatura y precipitación pluvial para las cuencas de los ríos Coata e Ilave-región Puno. <https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01401SENA-2.pdf>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú. (2017). Modelamiento Hidrológico de la Región Hidrográfica del Titicaca. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología. Dirección de Hidrología. <https://hdl.handle.net/20.500.12542/245>

- Silva, S. (2009). Evaluación del modelo de simulación SWAT para la producción de agua en una cuenca hidrográfica prioritaria de la región central de Venezuela, caso: cuenca media del río Pao (en línea). 122 p. <https://www.researchgate.net/-publication/48225893>.
- Shoobridge. (2006). Perfil de Área Natural Protegida Perú - Reserva Nacional de Junín. PARKSWATCH, 2-2.
- Ulloa, D. (2014). El aporte de las zonas ribereñas al control de las inundaciones: estudio de caso de la cuenca Cahocacán, Chiapas, México. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. Turrialba, Costa Rica. 72 p.
- Universidad de Costa Rica. (Sin fecha). Protocolo metodológico para el análisis de imágenes satelitales. [http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/agresta\\_et\\_al.\\_2015.a\\_-\\_protocolo\\_metodol\\_gico\\_para\\_el\\_an\\_lisis\\_de\\_im\\_genes\\_de\\_sat\\_lite.pdf](http://reddcr.go.cr/sites/default/files/centro-de-documentacion/agresta_et_al._2015.a_-_protocolo_metodol_gico_para_el_an_lisis_de_im_genes_de_sat_lite.pdf)
- Uribe, N. (2010). SWAT (Soil & Water Assessment Tool) Conceptos Básicos y Guía Rápida para el Usuario. <https://swat.tamu.edu/media/46967/swat2005-tutorial-spanish.pdf>
- Valladares, E. (2017). Respuesta hidrológica de la cuenca del río santa en condiciones de cambio climático. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Agraria la Molina, Perú.
- Valverde, E. (2018). Modelación hidrológica para cuantificar la producción de agua y sedimento actual y futuro a partir de cambios de cobertura forestal, sector Prusia, Parque Nacional Volcán Irazú. Instituto Tecnológico de Costa Rica. Cartago, Costa Rica. 65 p.
- Van Liew., Arnold, G. y Garbrecht, D. (2003) Hydrologic simulation on agricultural watersheds: Choosing between two models. *Transactions of the ASAE*, 46 (6), 1539-1551.
- Vargas, C. (2010). Modelo teórico determinístico para análisis estacional del agua en cuencas hidrográficas con datos discretos de caudales. Universidad Nacional, Costa Rica. 136 p. <https://repositoriotec.tec.ac.cr/bitstream/handle/2238/5856/Modelo%20te%C3%B3rico%20determin%C3%ADstico%20para%20an%C3%A1lisis%20de%20la%20disponibilidad%20estacional%20del%20agua%20en%20cuencas%20hidrogr%C3%A1ficas%20con%20datos%20discretos%20de%20caudales.pdf?sequence=1&isAllowed=y>.
- Vásquez, A. (1997). Manejo de Cuencas Alto andinas. Escuela superior de Administración de Aguas, *Charles Sutton*, 293p.

- Vera, L. (2002). *Análisis de aforo de la Estación Hidrométrica Obrajillo – Periodo 2001-2002*. (Tesis pregrado). Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Lima. [http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/Vera\\_H\\_L/T\\_Completo.pdf](http://sisbib.unmsm.edu.pe/bibvirtualdata/Tesis/Ingenie/Vera_H_L/T_Completo.pdf)
- Vélez, J. (2008). Modelación en hidrología. Conference: III Simposio Nacional. Actualidad y tendencias de la Ingeniería Civil en Colombia. Manizales, Colombia. 64 p. [https://www.researchgate.net/publication/271194652-\\_Modelacion\\_en\\_hidrologia](https://www.researchgate.net/publication/271194652-_Modelacion_en_hidrologia)
- Villegas, I., Méndez, J., Reyes, D., Barrios, B., y Torres, D. (2014). *Variación de la precipitación y temperatura en el municipio de Teziutlán, Puebla*. *Biológico Agropecuario*, 588–598.
- Williams, J. (1969). Flood Routing with Variable Travel Time or Variable Storage Coefficients. *Trans ASAE*, 12,100–103.
- Williams, J., y Hann, R. (1972). HYMO, a problem-oriented computer language for building hydrologic models, *Water Resour Res*, 8:79–85.
- Zuleta, C. (2013). Análisis del comportamiento del recurso hídrico ante cambios en el uso del suelo y el cambio climático en la cuenca del río Pejivalle. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. 79 p. [orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf](http://orton.catie.ac.cr/repdoc/A11471e/A11471e.pdf).

## TERMINOLOGÍA

- **Agua Superficial.** Son aguas que circulan de forma continua o discontinua, que se encuentra en lagos, embalses o cualquier otra fuente de agua en la superficie (Plan Integral de Recursos de Agua, 2008).
- **Análisis multitemporal.** Es un análisis espacial realizado comparando mantas interpretadas en dos imágenes de satélite o mapas en el mismo lugar en fechas diferentes y que permite evaluar los cambios en la situación de los fusibles que según ellos se clasificaron (Chuvieco, 2002).
- **Avenida.** Generalmente es un aumento más rápido del nivel de agua en curso, a un máximo desde el cual el nivel baja a una velocidad más baja (Vera, 2002).
- **Biodiversidad.** Refleja la cantidad de los diversos organismos vivos incluye la diversidad dentro de una especie (GreenFacts, 2009).
- **Cambio climático.** Cambios en el estado del clima se identifican en variaciones de la media y/o cambios en sus características, que persisten durante periodos largos de tiempo, a menudo décadas o tiempo más largos (IGP, 2015).
- **Desembalse.** Operación para liberar el agua contenida en un reservorio, dentro de un régimen de operación adecuado a la atención de los derechos de concesión (Losada, 2018).
- **Embalse.** Depósito grande que se forma artificialmente al cerrar la boca de un valle y donde se almacena el agua para usarla en el riego, creando una elevación para la energía hidroeléctrica u otros usos (Losada, 2018).
- **Estiaje.** Nivel más bajo que tienen los ríos (Vera, 2002).

- **Evaporación.** Es el fenómeno físico donde el agua pasa de líquido a vapor; ello se llega a producir a partir de la superficie de la tierra y la vegetación seguidamente después de las lluvias, incluso de las extensiones de agua (ríos, lagos y embalses) y del suelo, el agua impregnada que se evapora (Sánchez, 2017).
- **Humedad.** Es la proporción de vapor de agua en el aire. Se utilizan varios parámetros para formular cuantitativamente el contenido de humedad que se localiza en la atmósfera. Asimismo, antes de plantear algún método, se considera a la saturación. Definiéndose como el aire que tiene una cierta cantidad de vapor de agua a una cierta temperatura (Inzunza, s.f.).
- **Imagen multiespectral.** Estas son las imágenes que son satélites a través de una serie de sensores fotoeléctricos que convierten los niveles de radiancia, desde la extensión de la Tierra, en valores numéricos llamados niveles numéricos. El valor numérico correspondiente a un nivel de píxel es proporcional a la magnitud de radiación del campo (Pérez, 2006).
- **Lago.** Acumulación permanente de agua, generalmente dulce, menor tamaño que el mar (Losada, 2018).
- **Landsat.** Es una serie de satélites que han sido construidos y puestos en circulación por EE. UU. Para la observación de alta resolución de la superficie de la tierra (Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico [INGEMMET], s.f.).
- **Precipitación.** Son las partículas líquidas que se encuentran en la atmósfera y caen sobre la extensión de la tierra. La cantidad, generalmente expresada en milímetros o centímetros de agua líquida, de la sustancia del agua que ha caído en un momento dado en un lapso determinado (American Meteorological Society, 2000).
- **Predicción hidrológica.** Vocablo que puede ocurrir de un componente del régimen hídrico en un tiempo futuro a partir de la fecha de liberación (Cohen, s.f.).

- **Radiación.** Es el traspaso de energía por las ondas electromagnéticas, ello se ocasiona directamente desde una fuente hacia el exterior en todas las direcciones. La radiación es una sucesión de transferencia de ondas a través del espacio o por cualquier medio (Inzunza, s.f.).
- **Sistema de Información Geográfica.** Es una herramienta que proporciona el trabajo de uso y gestión de la investigación geográfica con todo el poder de un ordenador (Olaya, 2014).
- **Temperatura:** Variable meteorológica en la cual se manifiesta el calor generado por la radiación solar del suelo, el agua y el aire (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI], 2013).
- **Temperaturas Máximas y Mínimas.** Es la temperatura máxima (mínima) como la temperatura del aire más alta (más baja) registrada en una ubicación exacta en una época determinada (American Meteorological Society, 2000).
- **Transpiración.** Es un fenómeno biológico donde las plantas liberan agua al ambiente. Ellos consumen el agua de suelo través de sus raíces, donde cogen una pequeña porción para su desarrollo y el resto la traspira (Sánchez, 2017).
- **Velocidad del viento.** Es la velocidad en la que se mueve el aire de la atmósfera sobre la superficie de la tierra. La velocidad y vector es decir la dirección en la que se mueve el viento, tiene una gran influencia dentro del clima de la tierra y la civilización. Se forma a causa de las diferentes situaciones del clima (Hamel, 2018).
- **Variabilidad climática.** Se refiere al cambio promedio de estado y otras peculiaridades estadísticas del clima en todas las escalas espaciotemporales mayores que los fenómenos meteorológicos (IGP, 2015).



Apéndice 2. Ubicación Administrativa de la Cuenca del lago Chinchaycocha

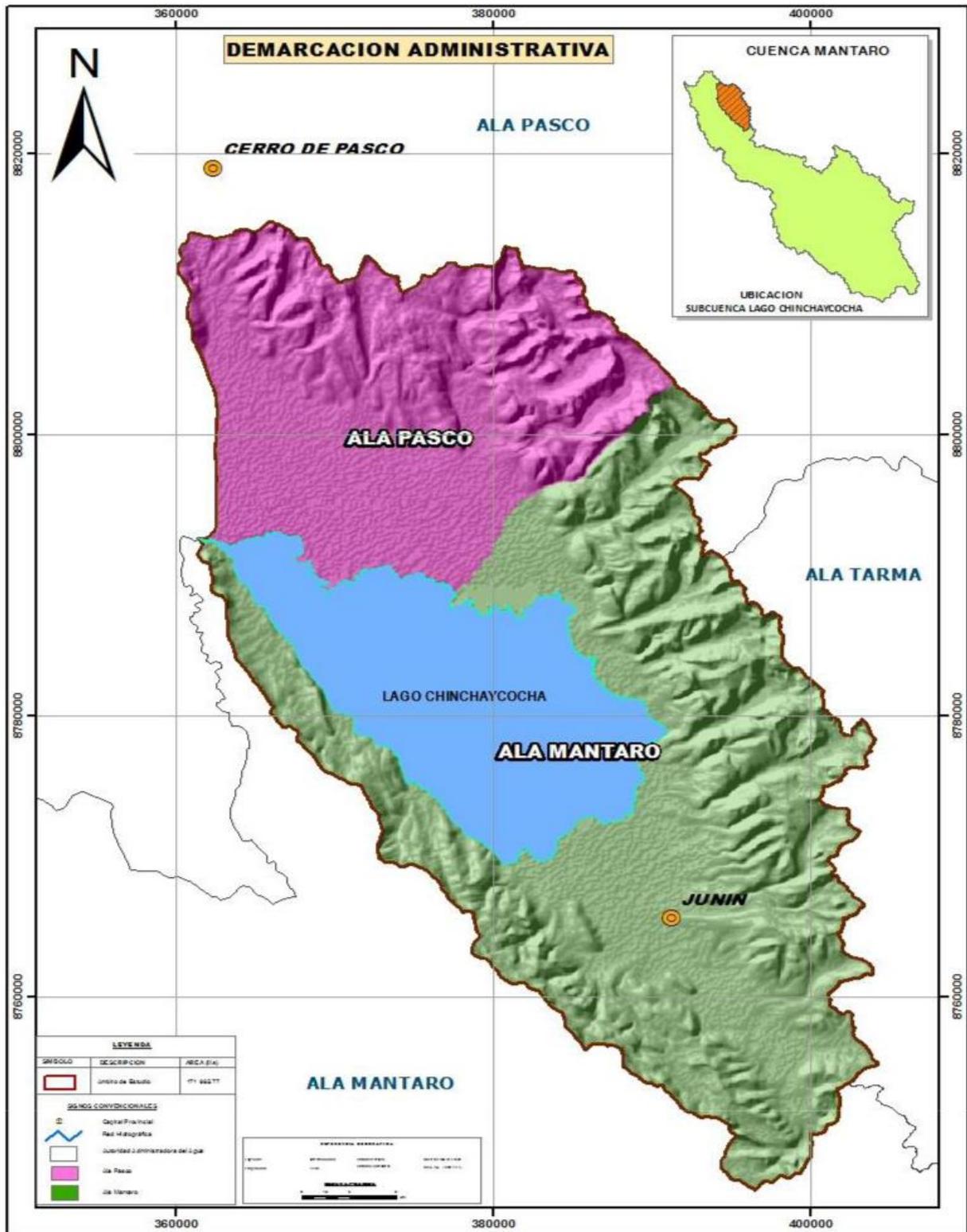


Figura 53. Ubicación Administrativa de la Cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: ANA (2018).

Apéndice 3. Red vial de la Cuenca del lago Chinchaycocha e Intercuencas

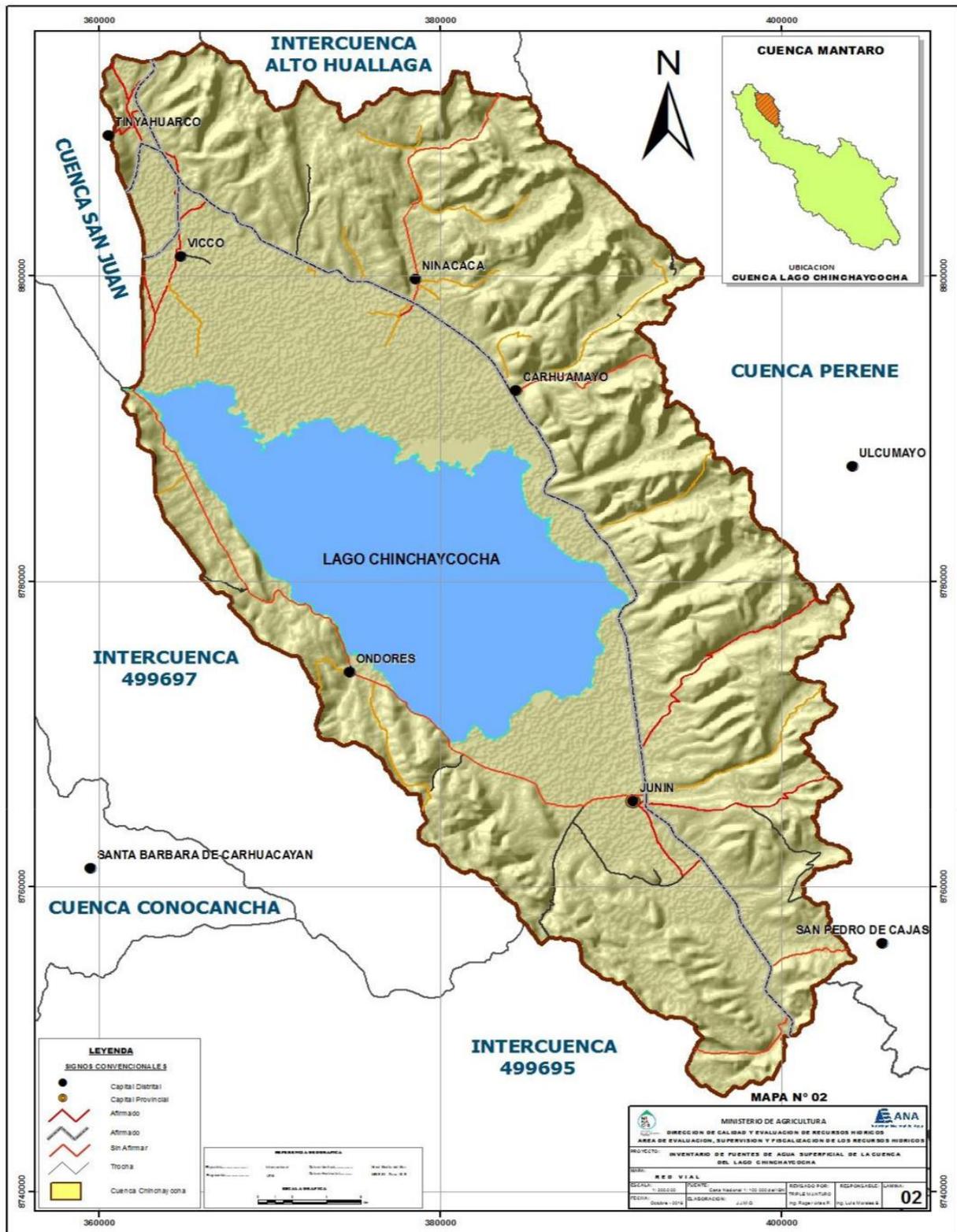


Figura 54. Red vial de la Cuenca del lago Chinchaycocha e Intercuencas. Fuente: ANA (2018).

## Apéndice 4. Mapa Vial de La Cuenca del lago Chinchaycocha

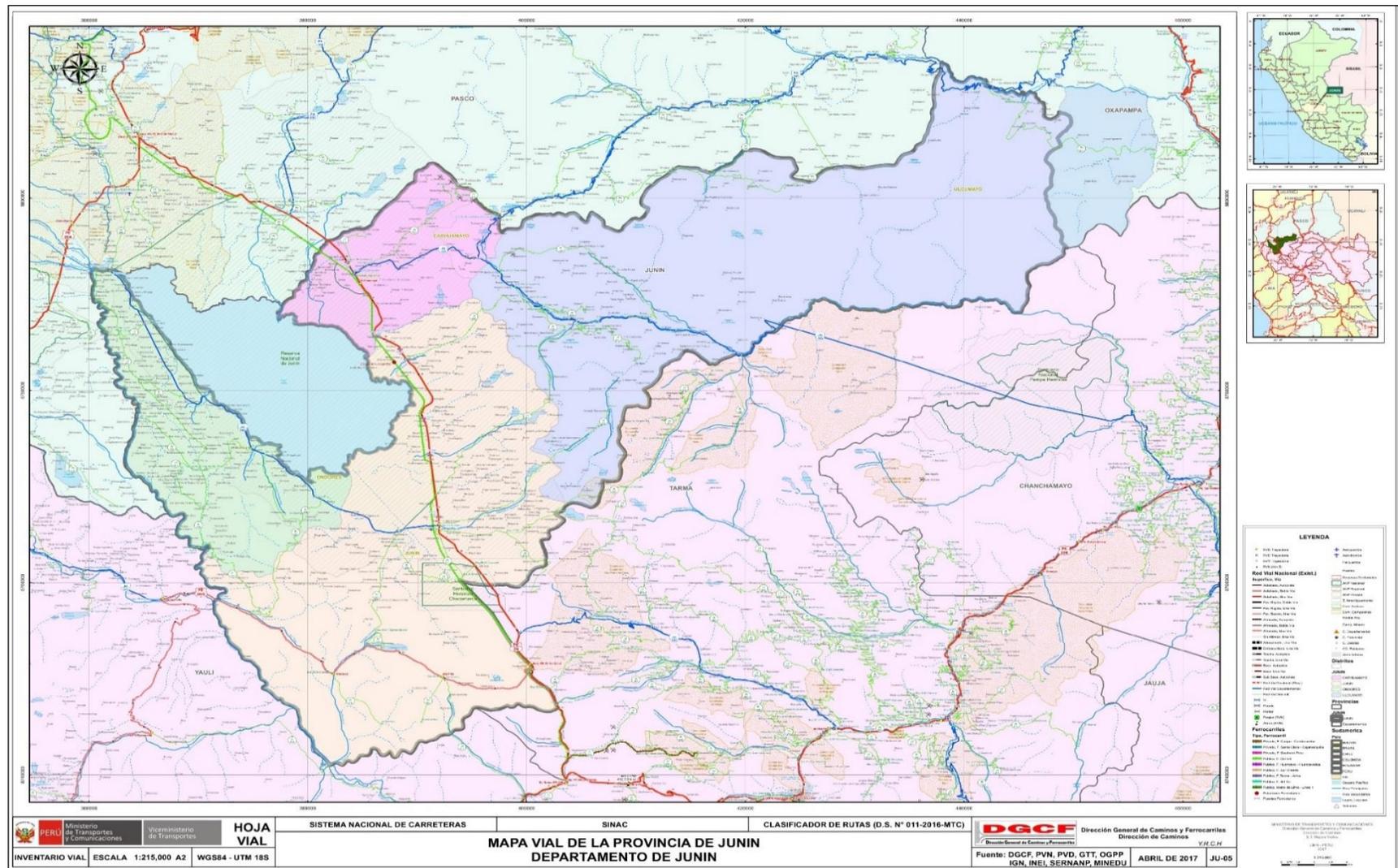


Figura 55. Mapa Vial de La Cuenca del lago Chinchaycocha. Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones [MTC] (2017).

## Apéndice 5. Registros de datos Meteorológicas

Tabla 18

*Registro de datos meteorológicas de la estación de Cerro de Pasco - 2017*

<b>Meses</b>	<b>Precipitación Total Mensual (mm/mes)</b>	<b>Temperatura Mínima Promedio Mensual (°C)</b>	<b>Temperatura Máxima Promedio Mensual (°C)</b>
Ene	160,3	1,8	10,0
Feb	180,2	1,8	9,8
Mar	134,2	2,1	9,8
Abr	88,8	1,9	10,7
May	66,9	1,4	10,7
Jun	0,5	-0,5	11,4
Jul	7,7	-2,1	11,6
Ago	8,3	-1,1	12,2
Sep	57,1	0,5	11,3
Oct	58,3	0,7	12,1
Nov	122,0	1,4	11,3
Dic	115,9	1,3	10,9

*Fuente:* SENAMHI (2020).

Tabla 19

*Registro de datos meteorológicas de la estación de Cerro de Pasco - 2018*

<b>Meses</b>	<b>Precipitación Total Mensual (mm/mes)</b>	<b>Temperatura Mínima Promedio Mensual (°C)</b>	<b>Temperatura Máxima Promedio Mensual (°C)</b>
Ene	139,3	0,8	10,5
Feb	100,6	2,0	11,5
Mar	118,3	2,0	10,8
Abr	80,8	0,8	10,4
May	36,2	-0,1	11,5
Jun	17,7	-0,8	9,7
Jul	16,2	-2,1	10,7
Ago	26,0	-1,3	11,0
Sep	86,0	-0,6	11,7
Oct	206,1	1,7	10,8
Nov	112,2	1,9	12,5
Dic	227,1	0,9	11,3

*Fuente:* SENAMHI (2020).

Tabla 20

*Registro de datos meteorológicas de la estación de Junín - 2017*

<b>Meses</b>	<b>Precipitación Total Mensual (mm/mes)</b>	<b>Temperatura Mínima Promedio Mensual (°C)</b>	<b>Temperatura Máxima Promedio Mensual (°C)</b>
Ene	134,6	2,8	12,0
Feb	127,6	2,0	12,0
Mar	149,2	3,0	12,0
Abr	87,4	2,0	12,6
May	46,8	1,2	12,7
Jun	8,6	-1,2	13,2
Jul	0,0	-4,1	13,1
Ago	4,4	-2,5	14,3
Sep	36,8	-0,2	13,2
Oct	46,4	-0,4	13,7
Nov	64,6	0,7	13,8
Dic	118,2	1,4	13,2

*Fuente:* SENAMHI (2020).

Tabla 21

*Registro de datos meteorológicas de la estación de Junín - 2018*

<b>Meses</b>	<b>Precipitación Total Mensual (mm/mes)</b>	<b>Temperatura Mínima Promedio Mensual (°C)</b>	<b>Temperatura Máxima Promedio Mensual (°C)</b>
Ene	116,8	2,1	12,7
Feb	84,0	2,0	12,7
Mar	140,2	3,4	12,7
Abr	55,4	0,8	12,1
May	18,2	-0,1	13,1
Jun	11,8	-2,4	12,4
Jul	21,4	-3,8	12,3
Ago	22,8	-2,2	12,4
Sep	57,2	-2,4	13,3
Oct	91,6	1,6	12,5
Nov	62,6	1,2	13,5
Dic	52,4	0,3	13,3

*Fuente:* SENAMHI (2020).

## Apéndice 6. Datos de caudales observados y estimados (m<sup>3</sup>/mes)

Tabla 22

*Datos de Caudal observado (m<sup>3</sup>/mes) en la salida de la presa para la etapa de enero de 2014 a diciembre de 2018*

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
2014	1390	1744	2250	2190	1490	457	982	914	690	839	879	733
2015	691	623	931	1473	871	892	978	670	848	498	648	916
2016	663	356	517	615	570	788	592	754	625	801	644	407
2017	424	363	1998	1682	1156	1535	780	569	752	1077	679	397
2018	409	450	306	1650	266	482	852	2128	1595	1229	929	244

*Fuente:* ELECTROPERU y COES-SINAC (2019).

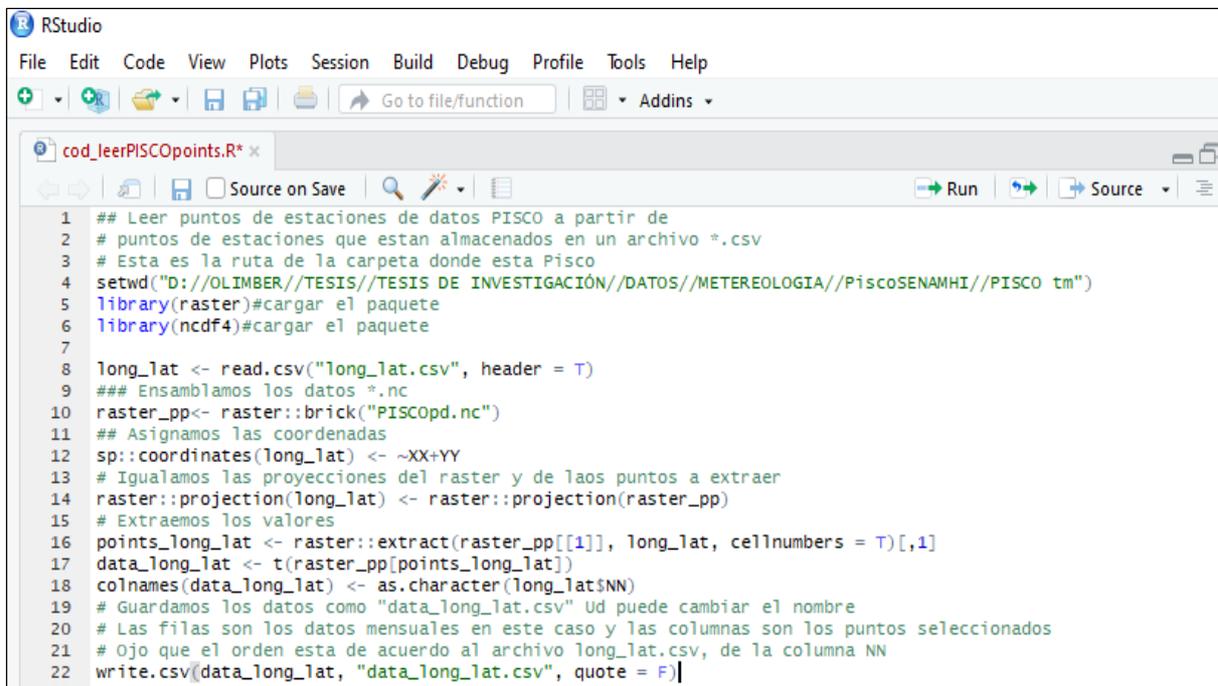
Tabla 23

*Datos de caudales simulados (m<sup>3</sup>/mes) para el periodo de enero de 1981 a diciembre del 2018*

<b>Año</b>	<b>Ene</b>	<b>Feb</b>	<b>Mar</b>	<b>Abr</b>	<b>May</b>	<b>Jun</b>	<b>Jul</b>	<b>Ago</b>	<b>Sep</b>	<b>Oct</b>	<b>Nov</b>	<b>Dic</b>
<b>1981</b>	048	022	114	025	006	003	002	012	001	084	564	731
<b>1982</b>	951	2310	2260	1160	549	274	250	202	129	214	643	626
<b>1983</b>	692	669	1090	744	343	260	196	127	92	164	279	524
<b>1984</b>	906	1270	1640	972	617	301	256	203	141	210	589	869
<b>1985</b>	1190	1440	1630	1060	540	298	251	190	143	135	276	379
<b>1986</b>	773	1230	2360	1120	507	282	246	195	123	118	102	215
<b>1987</b>	622	905	1430	722	556	258	210	162	122	165	371	590
<b>1988</b>	769	1360	1260	731	379	250	211	143	113	173	273	768
<b>1989</b>	1070	1300	2000	1040	633	300	276	224	171	228	515	516
<b>1990</b>	1120	1130	1280	789	358	249	208	146	80	197	219	263
<b>1991</b>	617	1160	2060	883	535	252	225	178	133	167	386	410
<b>1992</b>	441	912	1190	702	472	273	210	160	111	135	155	189
<b>1993</b>	224	555	985	619	377	184	170	128	105	201	742	1050
<b>1994</b>	1130	1400	1160	893	395	286	232	167	103	163	296	572
<b>1995</b>	838	1490	1930	1070	648	328	282	203	252	414	494	627
<b>1996</b>	769	1210	1520	1210	547	309	261	191	209	159	316	404
<b>1997</b>	572	748	588	408	251	175	124	90	73	166	448	687
<b>1998</b>	720	1480	1300	860	409	265	223	160	93	239	563	599
<b>1999</b>	829	1290	1470	944	522	307	254	187	208	279	542	848
<b>2000</b>	1230	1310	1590	872	443	315	255	185	109	140	275	675
<b>2001</b>	1070	1270	1480	916	477	292	249	182	111	187	409	770
<b>2002</b>	514	987	1280	915	541	283	255	176	116	352	642	883
<b>2003</b>	819	990	1580	988	488	300	256	202	139	118	256	650
<b>2004</b>	707	1120	804	601	335	237	201	147	204	387	794	1020
<b>2005</b>	899	1170	1680	699	342	264	213	140	107	187	401	446
<b>2006</b>	603	838	1110	1040	439	313	236	175	136	369	858	1050
<b>2007</b>	929	803	1530	997	709	343	290	204	142	238	475	704
<b>2008</b>	959	918	785	549	343	234	182	119	102	253	483	713
<b>2009</b>	917	923	1730	964	513	312	258	192	111	191	848	1560
<b>2010</b>	1390	1330	1450	820	479	299	237	161	105	229	257	676
<b>2011</b>	916	1560	1560	1100	513	279	249	191	146	270	373	940
<b>2012</b>	942	1490	1160	939	529	327	253	185	153	333	844	1430
<b>2013</b>	1330	1380	1910	1020	631	371	296	249	218	574	755	971
<b>2014</b>	1140	1590	1900	1020	633	389	303	216	211	193	386	599
<b>2015</b>	811	733	1040	810	530	282	232	185	111	116	329	608
<b>2016</b>	555	1130	1240	760	437	255	218	169	165	335	234	501
<b>2017</b>	1950	2810	3490	2080	1380	687	533	404	465	480	777	1160
<b>2018</b>	2090	1880	2720	1880	944	667	572	460	583	1170	1410	1610

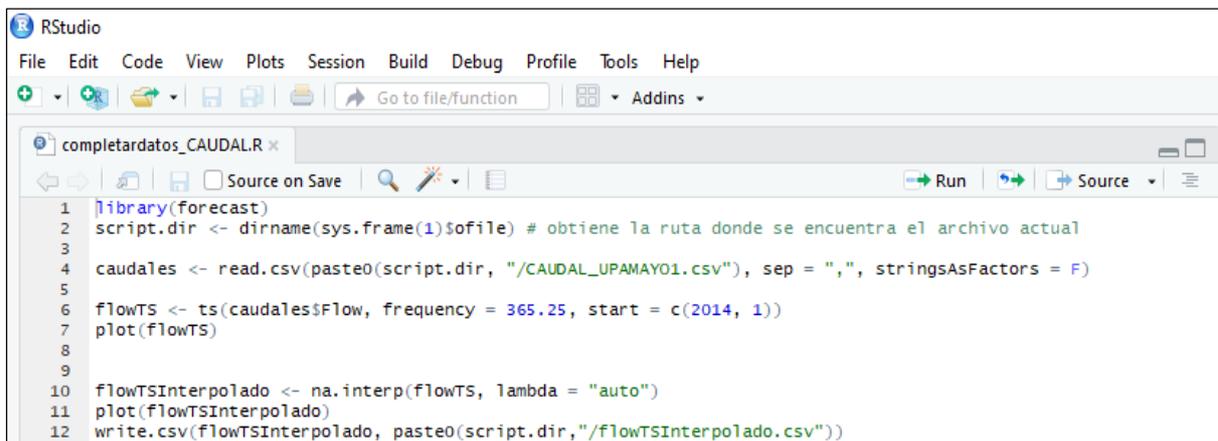
*Fuente:* Elaboración propia.

## Apéndice 7. Scripts en la aplicación del modelo hidrológico y en la aplicación de la teledetección



```
1 ## Leer puntos de estaciones de datos PISCO a partir de
2 # puntos de estaciones que estan almacenados en un archivo *.csv
3 # Esta es la ruta de la carpeta donde esta Pisco
4 setwd("D:/OLIMBER//TESIS//TESIS DE INVESTIGACIÓN//DATOS//METERELOGIA//PiscoSENAMHI//PISCO tm")
5 library(raster)#cargar el paquete
6 library(ncdf4)#cargar el paquete
7
8 long_lat <- read.csv("long_lat.csv", header = T)
9 ### Ensamblamos los datos *.nc
10 raster_pp<- raster::brick("PISCOpd.nc")
11 # Asignamos las coordenadas
12 sp::coordinates(long_lat) <- ~XX+YY
13 # Igualamos las proyecciones del raster y de laos puntos a extraer
14 raster::projection(long_lat) <- raster::projection(raster_pp)
15 # Extraemos los valores
16 points_long_lat <- raster::extract(raster_pp[[1]], long_lat, cellnumbers = T)[,1]
17 data_long_lat <- t(raster_pp[points_long_lat])
18 colnames(data_long_lat) <- as.character(long_lat$NN)
19 # Guardamos los datos como "data_long_lat.csv" Ud puede cambiar el nombre
20 # Las filas son los datos mensuales en este caso y las columnas son los puntos seleccionados
21 # Ojo que el orden esta de acuerdo al archivo long_lat.csv, de la columna NN
22 write.csv(data_long_lat, "data_long_lat.csv", quote = F)
```

Figura 56. Script para extraer datos PISCO. Fuente: Elaboración propia.



```
1 library(forecast)
2 script.dir <- dirname(sys.frame(1)$ofile) # obtiene la ruta donde se encuentra el archivo actual
3
4 caudales <- read.csv(paste0(script.dir, "/CAUDAL_UPAMAYO1.csv"), sep = ",", stringsAsFactors = F)
5
6 flowTS <- ts(caudales$Flow, frequency = 365.25, start = c(2014, 1))
7 plot(flowTS)
8
9
10 flowTSInterpolado <- na.interp(flowTS, lambda = "auto")
11 plot(flowTSInterpolado)
12 write.csv(flowTSInterpolado, paste0(script.dir, "/flowTSInterpolado.csv"))
```

Figura 57. Script para interpolación de caudal observado, utilizando la herramienta interpolación lineal. Fuente: Elaboración propia.

```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
SCRIPT_MENSUAL.R x Caudales.R x
Run Source
1 library(readxl)
2 library(lubridate) # manipulacion de fechas
3 library(forecast) # analisis de series de tiempo, modelamiento
4 library(dplyr) ## manipular tabla
5 library(ggplot2)
6 library(hydroGOF)
7
8 caudales <- read_excel("D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx",
9 sheet = "Caudales", range = "A1:D457")
10 caudales$date <- ymd(paste(caudales$Año, caudales$Mes, 1, sep="-"))
11
12
13 ## prueba de bondad de ajuste
14
15 caudales2014_2016 <- subset(caudales, date >= ymd("2014-01-01") )
16
17 cor.test(caudales2014_2016$Q_Simulado, caudales2014_2016$Q_Real)
18 Simulado <- caudales2014_2016$Q_Simulado
19 Observado <- caudales2014_2016$Q_Real
20
21 # grafico de caudal y observado e indicadores del modelo
22 Simulado <- zoo(Simulado, caudales2014_2016$date)
23 Observado <- zoo(Observado, caudales2014_2016$date)
24 ggof(Simulado, Observado,
25 xlab = "Tiempo[mes]", ylab="Caudal[m3/mes]")
26

```

Figura 58. Script para la prueba de bondad de ajuste en la Calibración y Validación del modelo SWAT +. Fuente: Elaboración propia.

```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
SCRIPT_MENSUAL.R x
Run Source
1 library(hydroGOF)
2 library(hydroTSM)
3 library(lubridate)
4 library(sqldf)
5 library(ggplot2)
6 library(gdata)
7 #ruta donde se encuentra el archivo')
8 pathTxtInOut <- "C:/Users/Coms-Labs/Documents/cuenca/QSWAT+PISCO/Scenarios/Default/TxtInOut"
9 setwd(pathTxtInOut)
10 #observData <- choose.files(filters = Filters[c("txt", "All"), ])
11 observData <- "CAUDAL MENSUAL.txt"
12 anioinicial <- read.table(observData, nrows=1)
13 qobservado <- read.table(observData, skip = 1, header = F)
14 fechaInicial <- ymd(paste(substr(anioinicial[1,], 1, 4), substr(anioinicial[1,], 5, 6), substr(anioinicial[1,], 7, 8), sep = "-"))
15 qobservado$date <- seq(fechaInicial, length.out = dim(qobservado)[1], by="month")
16 colnames(qobservado)[1] <- "obs"
17 # colocar el numero de corriente
18 flowChanel <- read.csv.sql(paste0(pathTxtInOut, "/channel_mon_sd.csv"),
19 sql = "select * from file where VS = '1' ", skip = 3, header=F)
20 flowChanel$date <- ymd(paste(flowChanel$V4, flowChanel$V2, flowChanel$V3, sep = "-"))
21 sim <- flowChanel[, c("date", "v30")]
22 ##### visualized obs and simulated
23 seriefechasObsSim <- seq(ymd("2014-01-01"), ymd("2015-12-31"), by = "month")
24 qobservadoSub <- qobservado[match(seriefechasObsSim, qobservado$date), ]
25 simSub <- sim[match(seriefechasObsSim, floor_date(sim$date, unit = "m")), ]
26 observadoVssimulado <- data.frame(obs = qobservadoSub$obs, sim = simSub$v30, date = seriefechasObsSim)
27 #suficiencianash <- NSE(sim = observadoVssimulado$sim, obs = observadoVssimulado$obs)
28 suficiencianash <- cor(observadoVssimulado$sim, observadoVssimulado$obs)^2
29 #colores <- c("Obs"="red", "Sim"="blue", "SimAdd"="green")
30 colores <- c("Obs"="red", "Sim"="blue")
31 ggplot(observadoVssimulado) +
32 geom_line(aes(x = date, y = obs, color="Obs")) +
33 geom_line(aes(x = date, y = sim, color="Sim")) +
34 # geom_line(aes(x = date, y = simAdd, color="SimAdd")) +
35
36 labs(title="Observed Flow and simulated", subtitle =paste0("Coeficiente de Pearson : ", round(suficiencianash,3)),
37 x = "Year",
38 y = "obs [m3/mes]",
39 color = "obs") +
40 scale_color_manual(values = colores)
41 system("rev59.3_64rel.exe")

```

Figura 59. Script para la Calibración y Validación del modelo SWAT +. Fuente: Elaboración propia.

```

RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
procesamiento.R*
Source on Save Run Source
1 library(RStoolbox)
2 library(rasterVis)
3 library(rgdal)
4 library(raster)
5 library(grid)
6 library(ggplot2)
7
8 areaestudio <- readOGR("C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/procesamiento/shapes/LimitesRNJ.shp")
9 entrenamiento <- readOGR("C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/procesamiento/shapes/entrenamiento.shp")
10 #CORRECCION DE NUBES
11 #imagen sin nubes
12 metafilesinnube <- "C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/2018/JUNIO/LE07_L1TP_007068_20180622_20180718_01_T1_MTL.txt"
13 metafilereadsinnube <- readMeta(metafilesinnube)
14 rasterstacksinnube <- stackMeta(metafilereadsinnube)
15 # recorte por la extension de una capa
16 rasterstackcropsinnube <- crop(rasterstacksinnube, areaestudio)
17 # recorte por el perimetro del area de influencia
18 rasterstacklipsinnube <- mask(rasterstackcropsinnube, areaestudio)
19 ### correccion radiometrica(ND a radiansa)
20 rasterstacklipsinnubeCor <- radCor(rasterstacklipsinnube, metafilereadsinnube)
21 ggRGB(rasterstacklipsinnubeCor,4,3,2, stretch = "lin")
22 #imagen con nube
23 metafileconnube <- "C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/2018/OCTUBRE/LE07_L1TP_007068_20181028_20181124_01_T1_MTL.txt"
24 metafilereadconnube <- readMeta(metafileconnube)
25 rasterstackconnube <- stackMeta(metafilereadconnube)
26 # recorte por la extension de una capa
27 rasterstackcroconnube <- crop(rasterstackconnube, areaestudio)
28 # recorte por el perimetro del area de influencia
29 rasterstacklipconnube <- mask(rasterstackcroconnube , areaestudio)
30 ### correccion radiometrica(ND a radiansa)
31 rasterstacklipconnubeCor <- radCor(rasterstacklipconnube, metafilereadconnube)
32 ggRGB(rasterstacklipconnubeCor,4,3,2, stretch = "lin")
33 ##### eliminacion de nubes
34 rasterstack_srefSinNubes <- mosaic(rasterstacklipsinnubeCor, rasterstacklipconnubeCor, fun=min)
35 ggRGB(rasterstack_srefSinNubes,4,3,2, stretch = "lin")

```

Figura 60. Script para eliminar las nubes mediante la aplicación de la herramienta RasterStack. Fuente: Elaboración propia.

id	clase	Comentario
1	NULL	1 Cuerpos de Agua
2	NULL	1 Cuerpos de Agua
3	NULL	1 Cuerpos de Agua
4	NULL	1 Cuerpos de Agua
5	NULL	1 Cuerpos de Agua
6	NULL	1 Cuerpos de Agua
7	NULL	1 Cuerpos de Agua
8	NULL	1 Cuerpos de Agua
9	NULL	1 Cuerpos de Agua
10	NULL	2 Bofedales
11	NULL	2 Bofedales
12	NULL	2 Bofedales
13	NULL	2 Bofedales
14	NULL	2 Bofedales
15	NULL	2 Bofedales
16	NULL	2 Bofedales

Figura 61. Generación del área de entrenamiento en el Software QGIS – Tabla de Atributos. Fuente: Elaboración propia.

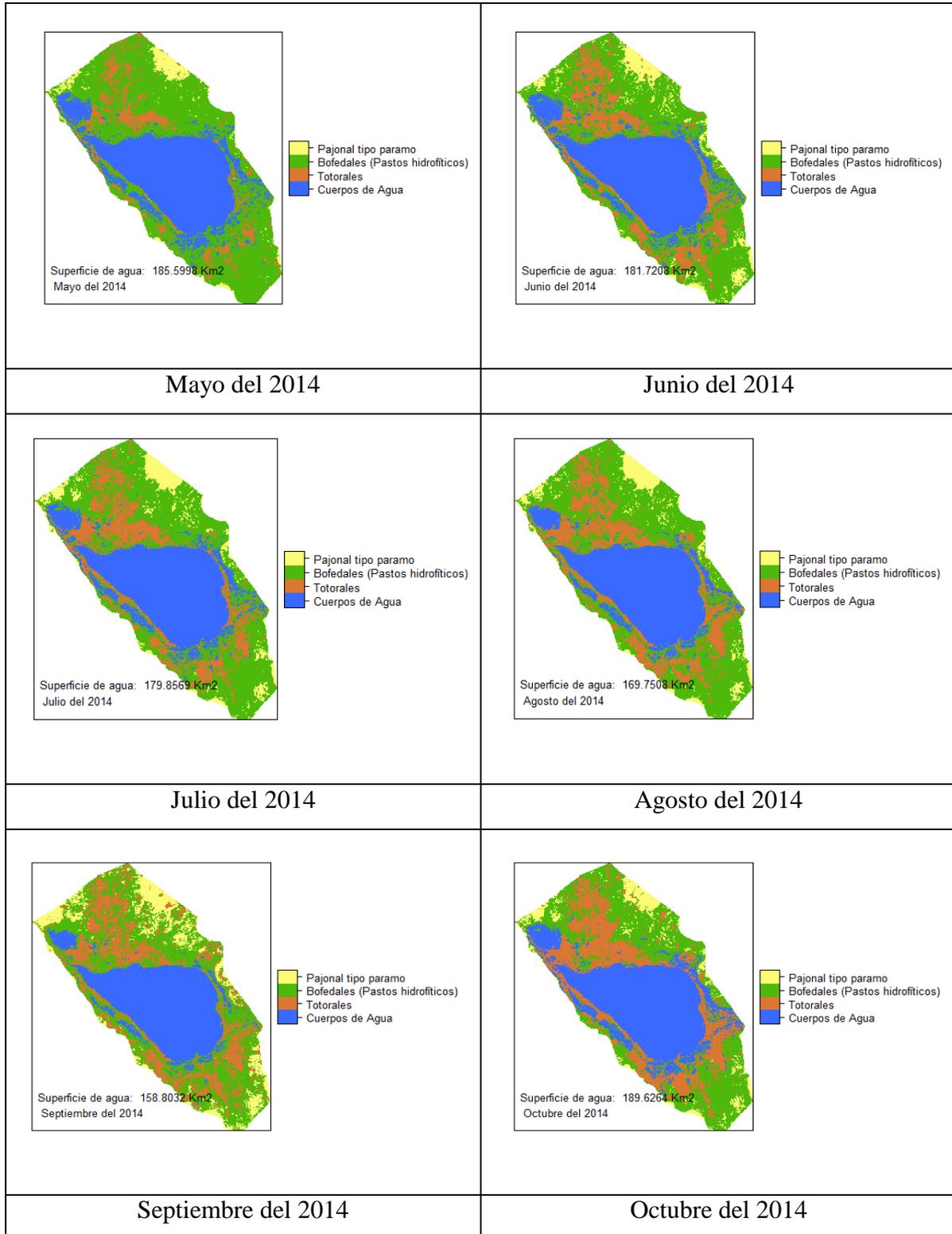
```

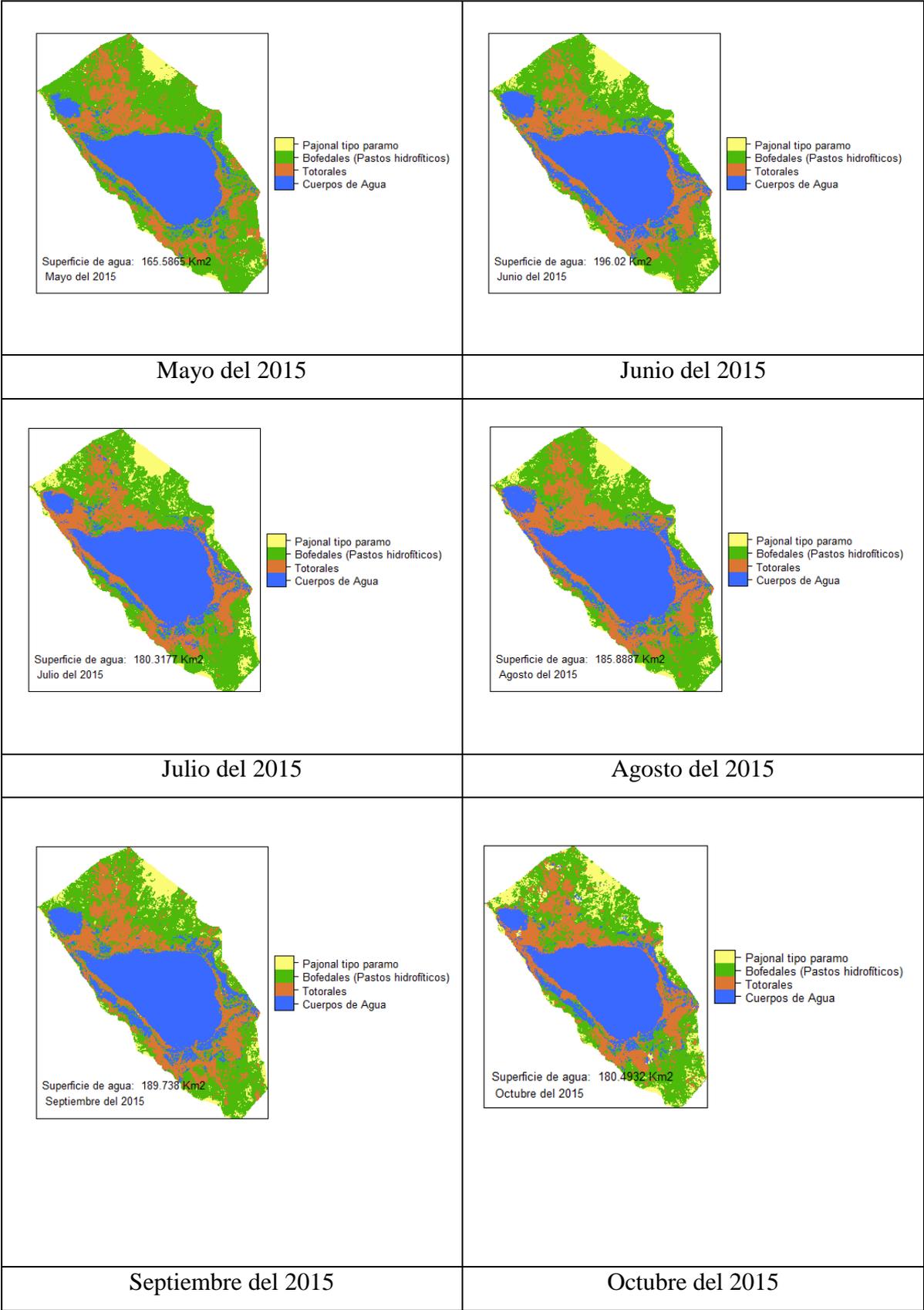
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Go to file/function Addins
procesamiento.R x
Source on Save Run Source
1 ##### procesamiento de imagenes landsat - lago chinchaycocha
2 library(RStoolbox)
3 library(rasterVis)
4 library(rgdal)
5 library(raster)
6 library(grid)
7 library(ggplot2)
8
9 areaestudio <- readOGR("C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/procesamiento/shapes/LimitesRNJ.shp")
10 pentrenamiento <- readOGR("C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/procesamiento/shapes/entrenamiento.shp")
11 metafile <- "C:/Users/Coms-Labs/Documents/IMAGENES SAT/2018/JULIO/LE07_L1TP_007068_20180708_20180803_01_T1_MTL.txt"
12 metafilerread <- readMeta(metafile)
13 rasterstack <- stackMeta(metafilerread)
14 # recorte por la extension de una capa
15 rasterstackcrop <- crop(rasterstack, areaestudio)
16 # recorte por el perimetro del area de influencia
17 rasterstacklip <- mask(rasterstackcrop, areaestudio)
18 plotRGB(rasterstacklip, 5,4,3, stretch = "lin")
19 ### correccion radiometrica(ND a radiansa)
20 rasterstackclipCor <- radCor(rasterstacklip, metafilerread)
21 ##### clasificacion Supervisada
22 clasessuperficie <- superClass(rasterstack_srefSinNubes, trainData = pentrenamiento, responseCol = "clase",
23                               model = "rf", tuneLength = 1, trainPartition = 0.7)
24 #levelplot(clasessuperficie$map)
25 ## obtencion de areas
26 areasclass <- table(getValues(clasessuperficie$map))*30*30/1000000 # km2
27 ## mapa de areas
28 rat <- levels(clasessuperficie$map)[[1]]
29 rat[["value"]] <- c("Cuerpos de Agua","Totoraes", "Bofedales (Pastos hidrofíticos)","Pajonal tipo paramo")
30 levels(clasessuperficie$map) <- rat
31 levelplot(clasessuperficie$map, col.regions=c("#3969FF", "#DC7633", "#4D8908", "#FBFB76"), scales=list(draw=FALSE),
32           xlab="", ylab="", main = "" )
33 grid.text(paste("Superficie de agua: ", areasclass[1], "Km2 \n Octubre del 2018"),
34           x = 0.05, y = 0.18, gp = gpar(fontsize=10, col="black", fill="black" ), just = "left")
35 levels(clasessuperficie$map) <- rat
36 levelplot(clasessuperficie$map, col.regions=c("#3969FF", "#DC7633", "#4D8908", "#FBFB76"), scales=list(draw=FALSE),
37           xlab="", ylab="", main = "" )
38 grid.text(paste("Superficie de agua: ", areasclass[1], "Km2 \n Julio del 2018"),
39           x = 0.05, y = 0.18, gp = gpar(fontsize=10, col="black", fill="black" ), just = "left")

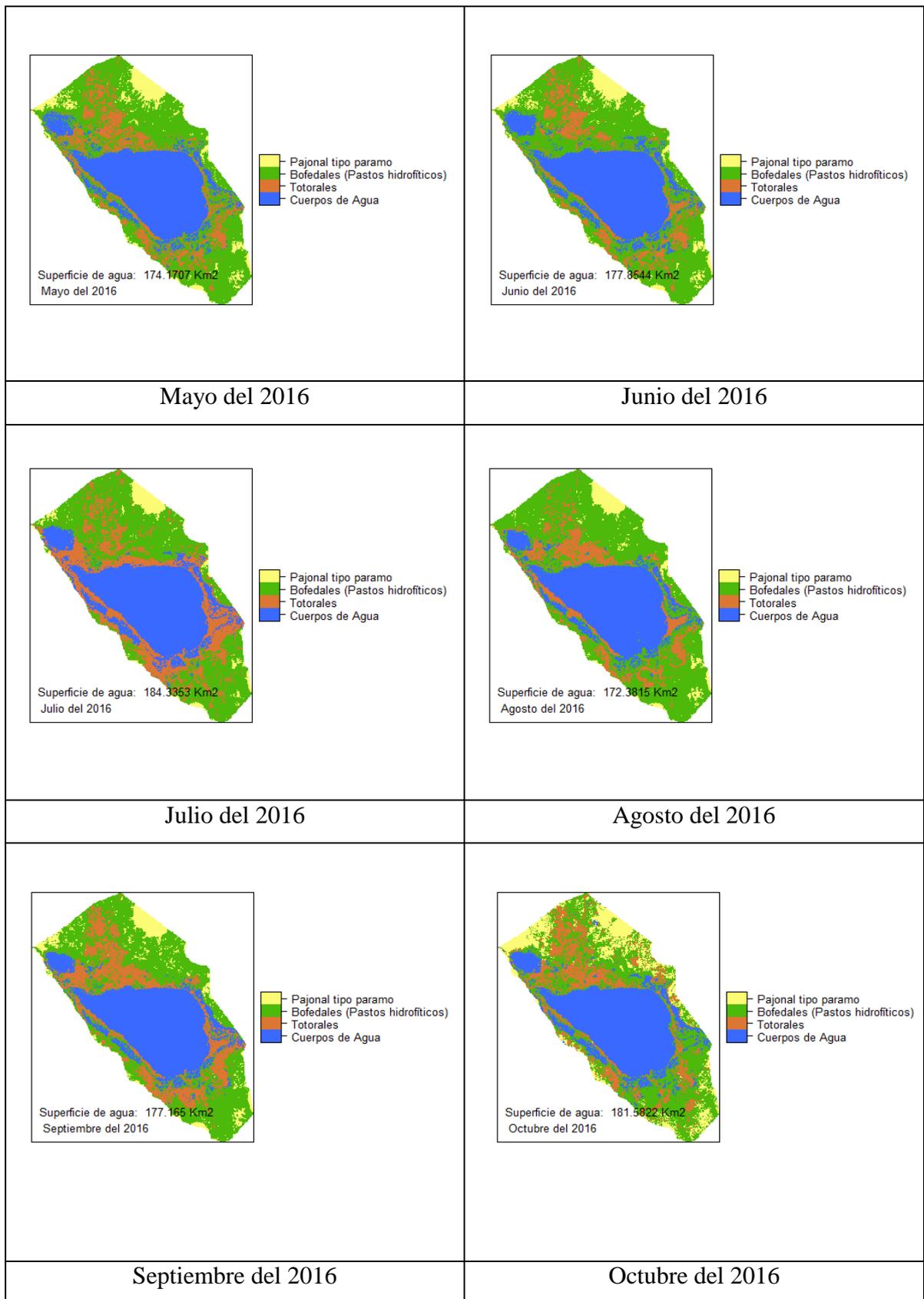
```

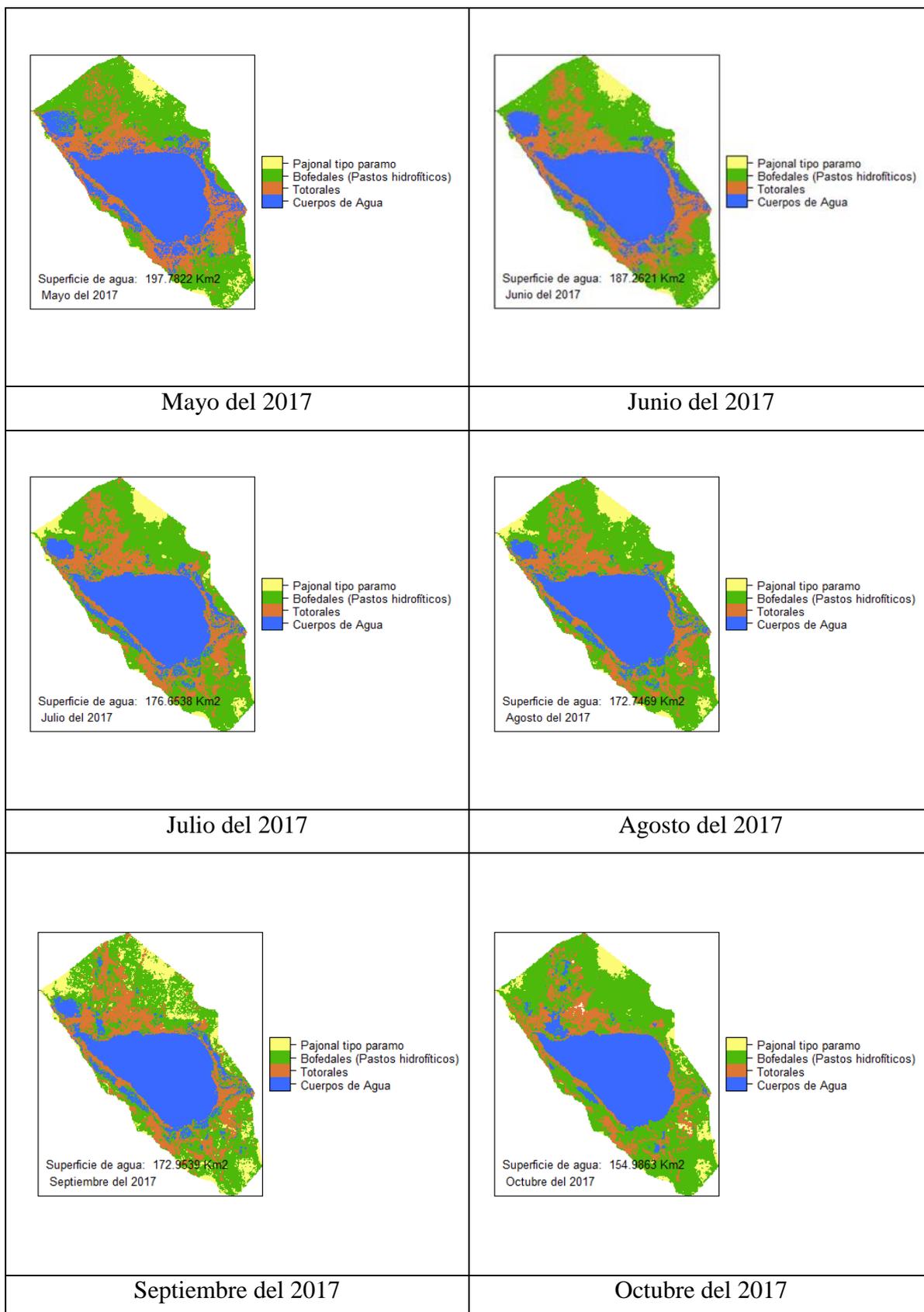
Figura 62. Script para Clasificación no Supervisada. Fuente: Elaboración propia.

**Apéndice 8. Mapas de la Clasificación no Supervisada del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018 en la época de estiaje**









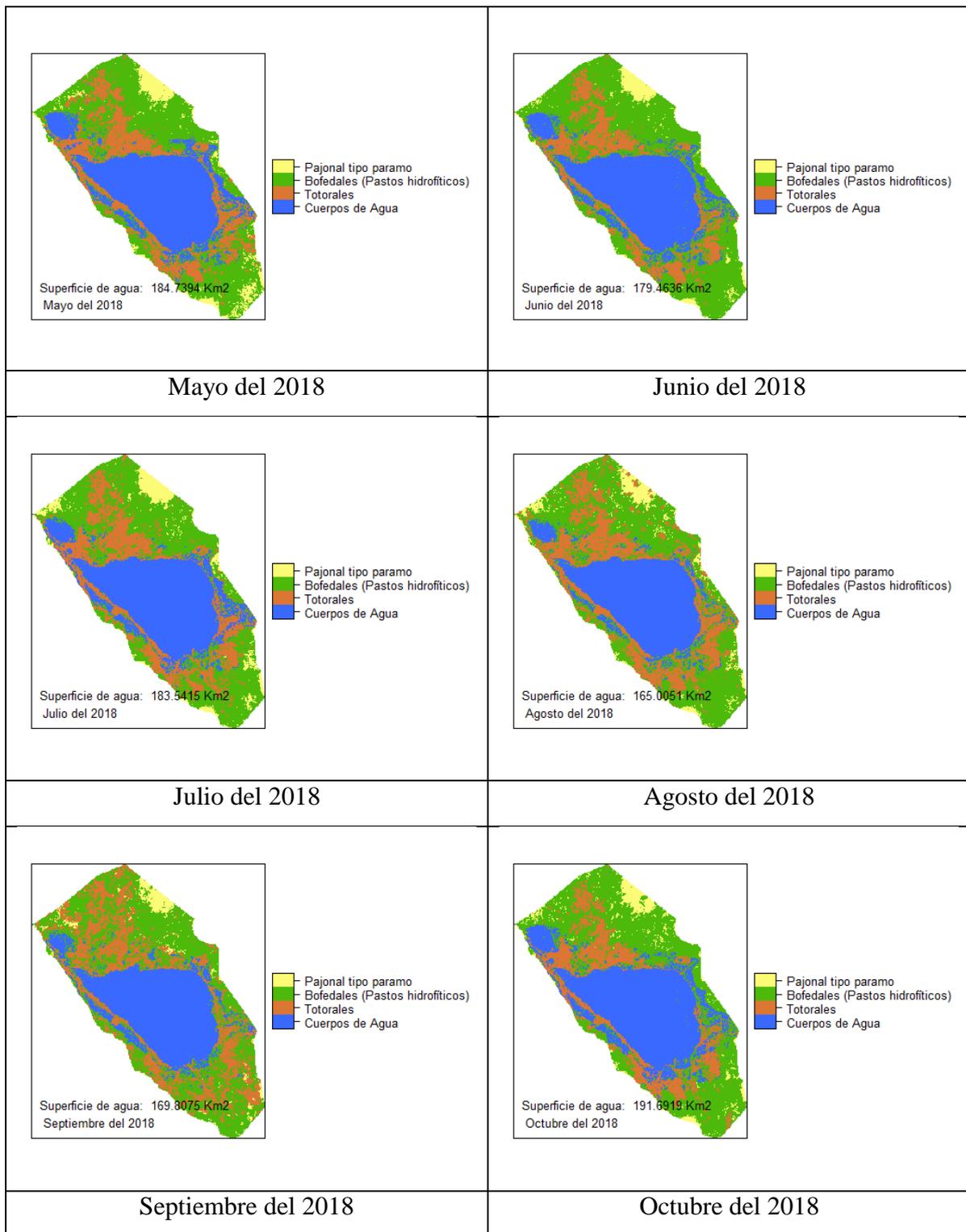


Figura 63. Mapas de la clasificación Supervisada del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018 en la época de estiaje. Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 9. Script para estimar el comportamiento hídrico con redes neuronales

```
RStudio
File Edit Code View Plots Session Build Debug Profile Tools Help
Caudales.R* x
Source on Save Run Source
1 library(readxl)
2 library(lubridate) # manipulacion de fechas
3 library(forecast) # analisis de series de tiempo, modelamiento
4 library(dplyr) ## manipular tabla
5 library(ggplot2)
6 library(hydroGOF)
7
8 caudales <- read_excel("D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx",
9 sheet = "Caudales", range = "A1:D457")
10 caudales$date <- ymd(paste(caudales$Año, caudales$Mes, 1, sep="-"))
11
12 ##ostico de caudales
13 #Descomposición estacional (Q en serie de tiempo), con la función ts
14 caudalesTS <- ts(caudales$Q_Simulado, start = c(1981, 1), frequency=12)
15 plot(stl(caudalesTS, s.window = "per"))
16
17 #pronóstico con modelo Arima
18 CaudalesfitArima <- auto.arima(caudalesTS)
19 residualArima <- resid(CaudalesfitArima)
20 plot(residualArima, xlab="Tiempo[mensual]", ylab="Residual[m3/mes]")
21 pronosticoCaudal <- forecast(CaudalesfitArima, h=48)
22 autoplot(pronosticoCaudal) +
23   xlab("Tiempo[Años]") +
24   ylab("Caudales[m3/mes]") +
25   ggtitle(label="Predicciones por modelo ARIMA", subtitle = "ARIMA(4,0,1) (2,1,1)[12]")
26
27 #pronóstico con red neuronal
28 Caudalemodeloneuronal <- nnetar(caudalesTS)
29 residualRedNeuronal <- resid(Caudalemodeloneuronal)
30 plot(residualRedNeuronal, xlab="Tiempo[mensual]", ylab="Residual[m3/mes]")
31 length(residualArima)
32 residualesDF <- data.frame(RNNETAR=residualRedNeuronal, RARIMA=residualArima)
33 write.csv(residualesDF, "residuales.csv")
34 pronosticoCaudalnnnet <- forecast(Caudalemodeloneuronal, PI = TRUE, h=48)
35 autoplot(pronosticoCaudalnnnet) +
36   xlab("Tiempo[Años]") +
37   ylab("Caudales[m3/mes]") +
38   ggtitle(label="Predicciones por red neuronal", subtitle = "NNAR(15,1,8)[12]")
```

Figura 64. Script para estimación de Caudales. Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 10. Script para determinar la variabilidad climática y la influencia sobre el recurso hídrico en el periodo 1981-2018

```

library(readxl)
library(lubridate) # manipulacion de fechas
library(forecast) # analisis de series de tiempo, modelamiento
library(dplyr) ## manipular tabla
library(ggplot2)
caudales <- read_excel("D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx" ,
  sheet = "Caudales", range = "A1:D445")
caudales$date <- ymd(paste(caudales$Año, caudales$Mes, 1, sep="-"))
### datos meteorologicos
dmeteo <- read_excel("D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/CAMBIO CLIMÁTICO/VARIABLES.xlsx",
  sheet = "datos_meteorologicos", range = "A1:H27759")
str(dmeteo)
##### analisis de tendencias
dmeteo$fecha <- ymd(paste(dmeteo$Año, dmeteo$Mes, dmeteo$Dia, sep="-"))
##### subset por fecha
dmeteo01 <- subset(dmeteo, fecha <= ymd("2018-12-31") )
## promediar de manera mensual
dmeteo01Mensual <- dmeteo01 %>%
  group_by(fecha = floor_date(fecha, "year"), estacion = estacion) %>%
  summarize(tmax = mean(tmax), tmin = mean(tmin), pp = sum(pp))
##### para cambio climático
## segmentar cada 10 años
dmeteo01Segmentado <- dmeteo01 %>%
  group_by(fecha = floor_date(fecha, "10 year"), estacion = estacion)
dmeteo01Segmentado$yearsegment <- as.factor(year(dmeteo01Segmentado$fecha))
ggplot(dmeteo01Segmentado, aes(x=yearsegment, y=pp)) +
  geom_boxplot()

```

Figura 65. Script para Análisis de Tendencias. Fuente: Elaboración propia.

```

#Correlación de Pearson de las variable hidrometeorológicas
library(ggplot2)
library(corrplot)
library(PerformanceAnalytics)

mtcars <- read.csv("D:/OLIMBER/TESIS_CATOLICA/REVISION JURADOS/DOCUMENTOS EMPLEADOS/VARIABILIDAD CLIMATICA/VARIABILIDAD CLIMÁTICA2.csv")
head(mtcars)
mtcars$Meses = NULL
mtcars$AÑO = NULL
mtcars$Mes = NULL
mtcars$Qobservado = NULL

mtcars.cor <- cor(mtcars, method = "pearson")
found(mtcars.cor, digits = 2)

corrplot(mtcars.cor)

corrplot(mtcars.cor, method = "shade",
  shade.col = NA, tl.col = "black",
  tl.srt = 45)

col <- colorRampPalette(c("#BB4444", "#EE9988", "#FFFFFF",
  "#77AADD", "#4477AA"))
corrplot(mtcars.cor, method = "pie",
  tl.col = "black",
  tl.srt = 45, col = col(200),
  addcoef.col = "black",
  addcolorlabel = "no",
  order = "AOE",
  type = "lower",
  addshade = "all")

```

Figura 66. Script para Coeficiente de Correlación. Fuente: Elaboración propia.

## Apéndice 11. Scripts para determinar la variación de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha en el periodo 2014-2018, en la época de estiaje

```
library(readxl)
library(lubridate) # manipulacion de fechas
library(forecast) # analisis de series de tiempo, modelamiento
library(dplyr) ## manipular tabla
library(ggplot2)
library(GGally)
library(Hmisc)
library(corrplot)
library(PerformanceAnalytics)

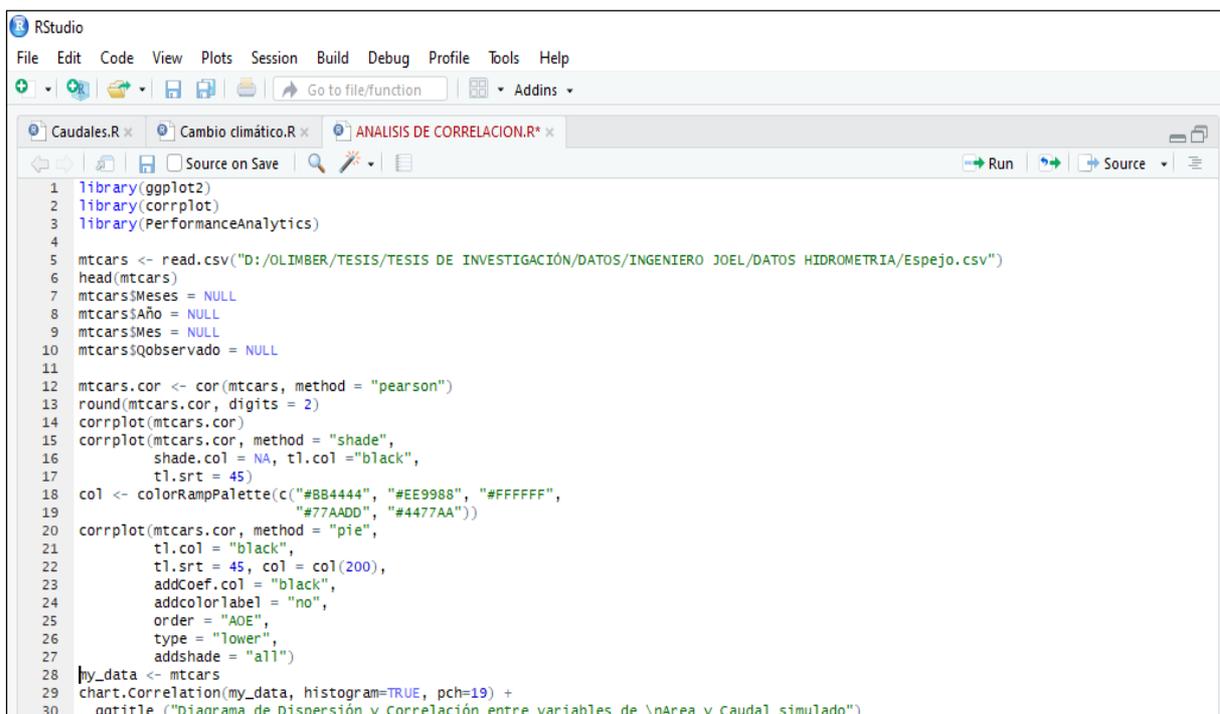
Hidrometrica<- read_excel( "D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx" ,
  sheet = "Hidrometrica", range = "A1:E1827")

caudales <- read_excel( "D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx" ,
  sheet = "Caudales", range = "A1:D457")
caudales$date <- ymd(paste(caudales$Año, caudales$Mes, 1, sep="-"))

Lago <- read_excel( "D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/DATOS_HIDROMÉTRICAS.xlsx" ,
  sheet = "Lago", range = "A1:H31")

### analisis de varianza ANOVA
Lago$Año <- as.factor(Lago$Año)
res.aov <- aov(Area ~ Año, data = Lago)
summary(res.aov)
```

Figura 67. Script para Análisis de Varianza de la superficie del espejo del lago Chinchaycocha. Fuente: Elaboración propia.

The image shows a screenshot of the RStudio interface. The top menu bar includes File, Edit, Code, View, Plots, Session, Build, Debug, Profile, Tools, and Help. Below the menu bar is a toolbar with icons for file operations and a search bar. The main window displays a script titled 'ANALISIS DE CORRELACION.R'. The script includes the following code:

```
1 library(ggplot2)
2 library(corrplot)
3 library(PerformanceAnalytics)
4
5 mtcars <- read.csv("D:/OLIMBER/TESIS/TESIS DE INVESTIGACIÓN/DATOS/INGENIERO JOEL/DATOS HIDROMETRIA/Espejo.csv")
6 head(mtcars)
7 mtcars$Meses = NULL
8 mtcars$Año = NULL
9 mtcars$Mes = NULL
10 mtcars$Qobservado = NULL
11
12 mtcars.cor <- cor(mtcars, method = "pearson")
13 round(mtcars.cor, digits = 2)
14 corrplot(mtcars.cor)
15 corrplot(mtcars.cor, method = "shade",
16          shade.col = NA, tl.col = "black",
17          tl.srt = 45)
18 col <- colorRampPalette(c("#8B4444", "#EE9988", "#FFFFFF",
19                          "#77AADD", "#4477AA"))
20 corrplot(mtcars.cor, method = "pie",
21          tl.col = "black",
22          tl.srt = 45, col = col(200),
23          addCoef.col = "black",
24          addColorLabel = "no",
25          order = "AOE",
26          type = "lower",
27          addshade = "all")
28 my_data <- mtcars
29 chart.Correlation(my_data, histogram=TRUE, pch=19) +
30 ggtitle("Diagrama de Dispersión y Correlación entre variables de \nArea y Caudal simulado")
```

Figura 68. Script de Correlación de Variables. Fuente: Elaboración propia.

**Apéndice 12. Solicitud de datos hidrológicos (1988-2018) del lago Chinchaycocha a la  
Administración Local de Agua Pasco**

**SOLICITO: Datos hidrológicos: Volumen del lago Junín, Caudal de la Represa Upamayo y Niveles del lago Chinchaycocha.**

**Ing. MITCHAELE EUSEBIO CASAS CARDENAS  
ADMINISTRADOR LOCAL DE AGUA PASCO**

Yo, Bach. HURTADO CARLOS OLIMBER FAGUSTINO, en la carrera profesional de Ciencias Ambientales, de la Universidad Católica Sedes Sapientiae de la sede de Tarma, identificado con Documento Nacional de Identidad N.º 75048331, con domicilio en el Jr. Milagro sur S/N, de la ciudad de Tarma, ante Usted expongo:

Que, habiendo obtenido la aprobación del proyecto de tesis titulado “**Diseño de un modelo dinámico para estimar la variabilidad climática sobre el comportamiento hidrológico del lago Chinchaycocha durante el periodo (1988-2018) – Junín**”, solicito datos hidrológicos: Volumen del lago Junín, Caudal de la Represa Upamayo y Niveles del lago Chinchaycocha en los últimos 10 años, con fines de ejecutar satisfactoriamente dicho proyecto.

Por lo expuesto:  
Solicito acceder a mi petición.

Cerro de Pasco, 20 de septiembre del 2019



  
Hurtado Carlos Olimber Fagustino  
DNI: 75048331  
Cell: 929547240  
Gmail: olimberhurtado@gmail.com

*Figura 69. Solicitud de datos hidrológicos del lago Chinchaycocha a la Administración Local de Agua Pasco. Fuente: Elaboración propia.*