

**UNIVERSIDAD NACIONAL  
“SANTIAGO ANTÚNEZ DE MAYOLO”  
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA CIVIL**



**TESIS:**

**“IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD  
HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LLANGANUCO,  
CORDILLERA BLANCA-PERÚ, AÑOS 2020-2100”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL  
DE INGENIERA CIVIL**

**PRESENTADO POR LA BACHILLER:  
ESPINOZA SEGURA FLOR DE MARÍA ELVIRA**

**ASESOR:  
Ing. MONTORO VERGARA DANILO ENRIQUE**

**HUARAZ – ANCASH – PERÚ**

**2023**





**UNIVERSIDAD NACIONAL  
"SANTIAGO ANTUNEZ DE MAYOLO"  
FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL**



REGISTRO	
LIBRO	FOLIO
01	299

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS N° 295**

En la ciudad de Huaraz, al (a los) 11 día (s) del mes de

MAYO del DOS MIL VEINTITRES, siendo las 11:00 horas, se reunieron el

Jurado Evaluador integrado por:

- PRESIDENTE : Mag. MARCO ANTONIO LOLI SILVA  
 PRIMER MIEMBRO : Ing. JULIO CESAR CORAL JAMANCA  
 SEGUNDO MIEMBRO : Mag. RICHARD ALBERTO DEPAZ BLACIDO

Para proceder al Acto de Sustentación para optar el Título Profesional de INGENIERO(A) CIVIL, bajo la modalidad de:

Tesis  Trabajo de suficiencia profesional, del (de la) Bachiller

ESPINOZA SEGURA FLOR DE MARÍA ELVIRA

(de la Tesis) - (del Trabajo de suficiencia profesional) titulada:

**"IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA DE LA SUBCUENCA DEL RÍO LLANGANUCO, CORDILLERA BLANCA-PERÚ, AÑOS 2020-2100".**

desarrollada bajo el asesoramiento de:

- ASESOR : Ing. DANILO ENRIQUE MONTORO VERGARA  
 CO - ASESOR : -----

En cumplimiento del Reglamento de Grados y Títulos de la Facultad de Ingeniería Civil; se procedió a recepcionar la exposición del aspirante; luego de las interrogantes, objeciones y aclaraciones y su absolución, el Jurado Evaluador determinó la calificación de:

APROBADO

Siendo las 11:30 horas del mismo día, se dio por concluido el Acto de Sustentación, firmando la presente por triplicado, en señal de conformidad.

PRESIDENTE  
 Mag. MARCO ANTONIO LOLI SILVA

PRIMER MIEMBRO  
 Ing. JULIO CESAR CORAL JAMANCA

SEGUNDO MIEMBRO  
 Mag. RICHARD ALBERTO DEPAZ BLACIDO

ASESOR  
 Ing. DANILO ENRIQUE MONTORO VERGARA

CO - ASESOR

SUSTENTANTE  
 ESPINOZA SEGURA FLOR DE MARÍA ELVIRA



NOMBRE DEL TRABAJO

**TESIS ESPINOZA SEGURA FLOR DE MAR  
ÍA ELVIRA.docx**

RECUENTO DE PALABRAS

**19226 Words**

RECUENTO DE PÁGINAS

**111 Pages**

FECHA DE ENTREGA

**May 12, 2023 11:03 PM GMT-5**

RECUENTO DE CARACTERES

**103430 Characters**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**14.8MB**

FECHA DEL INFORME

**May 12, 2023 11:06 PM GMT-5****● 20% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 19% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 10% Base de datos de trabajos entregados
- 8% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

## **Dedicatoria**

*A Dios, a la Santísima Virgen de la Asunción, al Señor de Exaltación por haberme dado salud, paciencia y perseverancia para poder cumplir mis objetivos.*

*A mis padres Luzmila Segura y Curín Espinoza, por mostrarme el camino hacia la superación y por ser siempre mi mayor motivación para seguir adelante.*

*A mis hermanas María del Carmen y María Teresa, a mi cuñado Carlos Tarazona por su constante apoyo y a José Rosales por su compañía y ayuda incondicional.*

*A mis queridos sobrinos Daniela, Álvaro y Mateo por ser mi motivación para seguir adelante.*

*En memoria de mi querido Papito Eleuterio Segura por ser ejemplo en vida de honradez, humildad, sapiencia y amor.*

## Agradecimiento

En primer lugar, a Dios por darme las armas necesarias para lograr lo que me propongo, por iluminarme y estar siempre a mi lado dándome fuerza y salud. Agradecer a mis padres por su apoyo incondicional para poder cumplir mis metas.

A mis hermanas, mi cuñado y José por impulsar en mí el deseo de superación en la vida, siempre recibiendo de ustedes una palabra de aliento.

A la Facultad de Ingeniería Civil, personal administrativo y docentes; por impartirme conocimiento de gran calidad y formar parte del proceso integral de mi formación. A mi asesor, al Ing. Danilo Enrique Montoro Vergara por motivarme y guiarme en el desarrollo de esta tesis, a los miembros del jurado por su continuo apoyo y colaboración que hicieron posible que se realice esta tesis.

## ÍNDICE

ÍNDICE .....	iv
LISTA DE FIGURAS .....	vii
LISTA DE TABLAS.....	xi
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	xv
CAPÍTULO I.....	1
PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN .....	1
1.1. Situación Problemática .....	1
1.2. Formulación Del Problema.....	2
1.2.1. <i>Problema General</i> .....	2
1.2.2. <i>Problemas Específicos</i> .....	2
1.3. Justificación .....	3
1.4. Hipótesis y Variables.....	4
1.4.1. <i>Hipótesis</i> .....	4
1.4.2. <i>Variables</i> .....	4
1.5. Definición de Términos .....	4
1.6. Objetivos de la Investigación.....	5
1.6.1. <i>General</i>	5
1.6.2. <i>Específicos</i> .....	5
CAPITULO II .....	6
MARCO TEÓRICO.....	6
2.1. Antecedentes de Investigación .....	6



2.2. Bases Teóricas .....	8
2.2.1. <i>Ciclo Hidrológico y su Concepción como Sistema</i> .....	8
2.2.2. <i>Modelos Hidrológicos</i> .....	10
2.2.3. <i>Modelamiento Hidrológico en RS Minerve</i> .....	12
2.2.4. <i>Régimen glaciar anual</i> .....	23
2.2.5. <i>Pruebas Estadísticas</i> .....	24
2.2.6. <i>Cambio Climático</i> .....	26
2.2.7. <i>Modelos de Circulación General (Mcg)</i> .....	34
2.2.8. <i>Métodos de Downscaling (Reducción De Escala)</i> .....	37
2.2.9. <i>Proyección de Precipitación y Temperatura para el Perú</i> .....	39
2.2.10. <i>Incertidumbre en la Proyección del Clima Futuro</i> .....	40
CAPITULO III.....	42
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN .....	42
3.1. Tipo de Investigación .....	42
3.2. Diseño de la Investigación.....	42
3.3. Limitación de la Investigación.....	44
3.4. Contexto y Unidad de Análisis: Población y Muestra.....	44
3.4.1. <i>Población</i> .....	44
3.4.2. <i>Muestra</i> .....	44
3.5. Materiales y Metodología.....	45
3.5.1. <i>Descripción de la Zona de Estudio</i> .....	47
3.5.2. <i>Materiales</i> .....	49

3.5.3. Metodología .....	51
CAPITULO IV .....	69
RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	69
4.1. Información Meteorológica e Hidrométrica Histórico de Entrada para el Modelo Hidrológico.....	69
4.2. Información Meteorológica de Entrada de modelo de cambio climático para el Modelo Hidrológico. ....	71
4.3. El Modelo Hidrológico de Llanganuco .....	74
4.4. Calentamiento y Simulación.....	76
4.5. Calibración del Modelo Hidrológico .....	76
4.6. Validación del Modelo Hidrológico .....	77
4.7. Efecto del Cambio Climático en la Precipitación, Temperatura. ....	80
4.7.1. Precipitación Observada y Proyectada .....	80
4.7.2. Temperatura Observada y Proyectada .....	81
4.8. Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad Hídrica Futura .....	82
4.9. Contrastación de la hipótesis .....	85
4.10. Discusión .....	86
CONCLUSIONES .....	89
RECOMENDACIONES .....	90
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	91
ANEXOS.....	96



## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> Ciclo Hidrológico. ....	9
<b>Figura 2</b> Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global. ..	10
<b>Figura 3</b> Clasificación de los modelos hidrológicos según su representación espacial. .....	12
<b>Figura 4</b> Esquema del Modelo SOCONT. ....	13
<b>Figura 5</b> Esquema del Modelo HBV. ....	15
<b>Figura 6</b> Esquema del Modelo SACRAMENTO. ....	17
<b>Figura 7</b> Esquema del modelo GR4J. ....	19
<b>Figura 8</b> Esquema del modelo GSM. ....	20
<b>Figura 9</b> Régimen glaciar anual en la Cordillera Blanca. ....	23
<b>Figura 10</b> Láminas de escorrentía directa anual. ....	24
<b>Figura 11</b> Ramificaciones de escenarios EI-EE. ....	28
<b>Figura 12</b> <i>Cambios proyectados en el sistema climático entre 2006 y 2100.</i> ....	30
<b>Figura 13</b> Evolución de los modelos climáticos. ....	32
<b>Figura 14</b> Esquemización de un modelo climático global. ....	35
<b>Figura 15</b> Esquema ilustrativo de las técnicas de reducción de escala estadística y dinámica. ....	37
<b>Figura 16</b> Proyecciones climáticas en el Perú hacia el año 2050. ....	40
<b>Figura 17</b> Diseño de Investigación. ....	43
<b>Figura 18</b> Subcuencas definidas de la cuenca Santa .....	46
<b>Figura 19</b> Hidrografía del Río Llanganuco, en la cuenca del Río Santa. ....	47
<b>Figura 20</b> Ubicación Geográfica de la cuenca en estudio. ....	48
<b>Figura 21</b> Ubicación de las Estaciones en la cuenca de estudio. ....	50
<b>Figura 22</b> Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio. ....	52

<b>Figura 23</b> DEM Revisado .....	53
<b>Figura 24</b> Representación del Flow direction. ....	53
<b>Figura 25</b> Representación del stream definition y segmentation. ....	54
<b>Figura 26</b> Delimitación de subcuencas .....	54
<b>Figura 27</b> Vectorización del sistema hidrológico. ....	55
<b>Figura 28</b> <i>Delimitación de subcuencas del área de influencia.</i> ....	56
<b>Figura 29</b> Subcuencas sin glaciar y glaciares alrededor de la cuenca en estudio. ....	57
<b>Figura 30</b> Registro Histórico de la Temperatura y Línea de la estación Huandoy. ...	59
<b>Figura 31</b> Registros Históricos de la Precipitación, Temperatura y línea de tendencia de la Estación Portachuelos.....	59
<b>Figura 32</b> Registros Históricos de Precipitación, Temperatura, Caudal y Línea de tendencia de la estación Llanganuco.....	60
<b>Figura 33</b> División en zonas.....	62
<b>Figura 34</b> Componentes del modelo hidrológico.....	63
<b>Figura 35</b> Agrupación de los objetos hidrológicos en nueve submodelos.....	64
<b>Figura 36</b> Entradas de datos meteorológicos e hidrológicos.....	65
<b>Figura 37</b> Método del cálculo de evotranspiración.....	66
<b>Figura 38</b> Mensaje de validación del modelo. ....	66
<b>Figura 39</b> Simulación de modelo a nivel diario. ....	67
<b>Figura 40</b> Evolución de la función objetivo.....	67
<b>Figura 41</b> Histogramas de precipitación diaria 2004 – 2019. ....	70
<b>Figura 42</b> Análisis de la serie de Temperatura a nivel diario de la estación Portachuelo, Huandoy y Llanganuco del 2004-2019.....	70
<b>Figura 43</b> Análisis de la demanda hídrica de la estación Llanganuco. ....	71

<b>Figura 44</b> Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2020 – 2050) de la estación Portachuelos. ....	72
<b>Figura 45</b> Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2051 – 2100) de la estación Portachuelos. ....	72
<b>Figura 46</b> Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2020 – 2050) de la estación Huandoy. ....	73
<b>Figura 47</b> Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2051 – 2100) de la estación Huandoy. ....	74
<b>Figura 48</b> Modelo Hidrológico en RS Minerve. ....	75
<b>Figura 49</b> Simulación del calentamiento en un intervalo de tiempo del 2004 al 2005. ....	76
<b>Figura 50</b> Simulación de la calibración en un intervalo de tiempo de 2004 - 2010. ....	77
<b>Figura 51</b> Simulación de la validación en un intervalo de tiempo de 2011 – 2019. ....	77
<b>Figura 52</b> Simulación de caudal de todo el periodo 2004 – 2019. ....	78
<b>Figura 53</b> Variación mensual y estacional de la precipitación en un futuro cercano (2020-2050). ....	80
<b>Figura 54</b> Variación mensual y estacional de la precipitación en un futuro lejano (2051-2100). ....	81
<b>Figura 55</b> Variación mensual y estacional de la temperatura en un futuro cercano (2020-2050). ....	81
<b>Figura 56</b> Variación mensual y estacional de la temperatura en un futuro cercano (2051-2100). ....	82
<b>Figura 57</b> Caudal diarios del 2004 – 2100 en las RCP4.5 y RCP8.5. ....	82
<b>Figura 58</b> Caudal anual del 2004 – 2100 en las RCP4.5 y RCP8.5. ....	83

<b>Figura 59</b> Caudales mensuales en el Sistema Hidrológico Llanganuco del 2004-2100.....	84
<b>Figura 60</b> Variación mensual de la demanda hídrica en un futuro lejano y cercano.	84
<b>Figura 61</b> Gráfico de caudales anuales en los años claves, observados y proyectados .....	87
<b>Figura 62</b> Caudales anuales en los años claves, observados y proyectados .....	88



## LISTA DE TABLAS

<b>Tabla 1</b>	Parámetros SOCONT.....	14
<b>Tabla 2</b>	Parámetros HBV. ....	16
<b>Tabla 3</b>	Parámetros del Modelo SACRAMENTO.....	18
<b>Tabla 4</b>	Parámetros del Modelo GR4J. ....	19
<b>Tabla 5</b>	Parámetros del Modelo GSM.....	21
<b>Tabla 6</b>	Resumen de las características de las RCP proyectadas hasta el año 2100.	29
<b>Tabla 7</b>	Modelos Climáticos Globales preparados para el CMIP5 .....	36
<b>Tabla 8</b>	Ubicación Geográfica de la zona de estudio. ....	47
<b>Tabla 9</b>	Coordenadas UTM de la Estación Llanganuco.....	48
<b>Tabla 10</b>	Información geográfica que se aplicara en el modelo.....	49
<b>Tabla 11</b>	Información de las estaciones empleadas en el estudio .....	50
<b>Tabla 12</b>	Coordenadas UTM de las estaciones empleadas en el estudio. ....	50
<b>Tabla 13</b>	Modelo de circulación regional utilizado en la investigación.....	51
<b>Tabla 14</b>	Datos de la subcuenca sin glaciar.....	57
<b>Tabla 15</b>	Datos de las zonas con glaciar. ....	58
<b>Tabla 16</b>	Información ingresada al modelo de Llanganuco. ....	75
<b>Tabla 17</b>	Indicadores de bondad de ajuste del sistema hidrológico .....	78
<b>Tabla 18</b>	Parámetros calibrados del modelo GSM para Llanganuco.....	79
<b>Tabla 19</b>	Parámetros calibrados del modelo GR4J para Llanganuco.....	79
<b>Tabla 20</b>	Promedio anual de las estaciones en el sistema hidrológico Llanganuco(mm).....	84
<b>Tabla 21</b>	Variación porcentual respecto al promedio histórico.....	85
<b>Tabla 22</b>	Caudales anuales (m <sup>3</sup> /s) en los años claves, observados y proyectados...	87

**Tabla 23** Caudales anuales observados y proyectados en los meses de estiaje y  
avenidas..... 87



## RESUMEN

Hoy en día es muy importante estar al tanto de los efectos del cambio climático que posiblemente podrían afectar la demanda hídrica en nuestra zona, actualmente se va percibiendo cambios por el incremento de la temperatura global en uno de los recursos más importantes que tenemos en nuestra región y país: el agua.

El espacio de estudio de esta investigación es la subcuenca glaciada de Llanganuco-Yungay, ubicada en el departamento de Ancash. Para la simulación de los caudales se utilizaron los modelos hidrológicos GR4J y GSM de la plataforma RS Minerve, modelos debidamente calibrados y validados en un periodo de 2004 al 2019, obteniendo los indicadores de bondad de ajuste del sistema hidrológico, por lo que se entiende que el modelo tiene un buen rendimiento a una escala diaria.

Se utilizó al modelo regional RCA4 del modelo de circulación global MPI-ESM-LR y dos rutas representativas de concentración RCP4.5 y RCP8.5 del proyecto CMIP5, para poder determinar los posibles efectos en la demanda hídrica de la subcuenca Llanganuco que puede ocasionar el cambio climático.

Para definir el efecto del cambio climático se realizó el estudio en dos periodos, el periodo histórico que está comprendido desde enero del 2004 hasta diciembre del 2019, el periodo futuro cercano que comprende desde enero del 2020 hasta diciembre del 2050 y el periodo futuro lejano desde enero del 2051 hasta diciembre del 2100 para el futuro lejano. Los resultados muestran que habrá cambios significativos en la temperatura, precipitación y la disponibilidad hídrica de la subcuenca; alcanzando un incremento moderado en el escenario RCP4.5 en un futuro cercano, y mayor incremento en un escenario RCP 8.5 en un futuro lejano.

**Palabras Claves:** Modelos climáticos, disponibilidad hídrica, Cambio climático.



## ABSTRACT

Today it is very important to be aware of the effects of climate change that could possibly affect the water demand in our area, changes are currently being perceived due to the increase in global temperature in one of the most important resources that we have in our region. and country: water.

The study space of this research is the Llanganuco-Yungay glaciated sub-basin, located in the department of Ancash. For the simulation of the flows, the GR4J and GSM hydrological models of the RS Minerve platform were used, models duly calibrated and validated in a period from 2004 to 2019, obtaining the goodness-of-fit indicators of the hydrological system, for which it is understood that the model performs well on a daily scale.

The regional model RCA4 of the global circulation model MPI-ESM-LR and two representative routes of concentration RCP4.5 and RCP8.5 of the CMIP5 project were used, in order to determine the possible effects on the water demand of the Llanganuco sub-basin that can cause climate change.

To define the effect of climate change, the study was carried out in two periods, the historical period that is from January 2004 to December 2019, the near future period that is from January 2020 to December 2050 and the distant future period from January 2051 to December 2100 for the far future. The results show that there will be significant changes in the temperature, precipitation and water availability of the sub-basin; reaching a moderate increase in the RPC4.5 scenario in the near future, and a greater increase in an RCP 8.5 scenario in the distant future.

Keywords: Climate models, water availability, climate change.

## INTRODUCCIÓN

Para poder realizar estudios sobre los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica necesitamos apoyarnos de los avances tecnológicos, hoy en día los modelos hidrológicos son herramientas muy beneficiosas. Además, con las mejoras de los sistemas de información geográfica (SIG) y técnicas de adquisición de datos de la superficie terrestre, gracias a los modelos hidrológicos se logra simular cómo se comporta una cuenca hidrológicamente con relación al clima, topografía, uso del suelo, etc.

Por tanto, en la presente investigación se evaluará el cambio futuro de la disponibilidad hídrica de la subcuenca del río Llanganuco, en futuros cercano y lejano, aplicando los modelos hidrológicos GSM para zonas glaciadas y GR4J para zonas no glaciadas de la plataforma RS MINERVE, en base a los modelos de circulación general (MCG) del proyecto CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project 5) en las rutas de concentración representativas RCP4.5 y RCP8.5 (Representative Concentration Pathways).

Es trascendental realizar estudios sobre los cambios que pueden afectar al ciclo hidrológico teniendo en cuenta escenarios del cambio climático empleando modelos hidrológicos adecuados. Los resultados que se obtengan en esta investigación serán de mucha ayuda para tomar decisiones apropiadas para poder afrontar las diferentes situaciones que se puedan presentar en la gestión de los recursos hídricos en una cuenca bajo el contexto del cambio climático, garantizando la sostenibilidad del agua en la cuenca. De esta forma ir preparando a las zonas afectadas por los cambios que se puedan producir.

## CAPÍTULO I

### PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.1. Situación Problemática

El cambio climático en el Perú y el mundo está originando variaciones climáticas que afectan las condiciones hidrológicas, ocasionando diferentes impactos en el recurso hídrico. Estos cambios pueden estar vinculados a procesos hidrológicos, como la evapotranspiración, el volumen del flujo de agua en ríos, la humedad del suelo, entre otros. Entonces, evaluar estos cambios, fundamentalmente en las regiones donde el agua es un recurso escaso y sensibles al clima es primordial.

La cuenca del río Santa se encuentra ubicada en la Cordillera Blanca con sus glaciares tropicales y una de las subcuencas que lo conforman es el río Llanganuco, al estar expuesta a diferentes eventos como efectos del calentamiento global, se vuelve

vulnerable ante los efectos del cambio climático. La cuenca es muy importante para el desarrollo agroexportador en la sierra y costa de la Región Ancash, así como economía nacional y local.

De continuar las tendencias actuales, el futuro del sistema hidrológico Llanganuco (para evitar confusiones con otras definiciones, la denominación “subcuenca del río Llanganuco” se cambiará por el término “sistema hidrológico Llanganuco”) es muy sombrío. El escenario que nos espera, y en el cual se desenvolverán las nuevas generaciones, podría ser la alteración drástica en el ciclo hidrológico de los ríos y quebradas.

El estudio de los pronósticos climáticos hidrológicos, permite definir la tendencia de los recursos hidrológicos. En este sentido se comprende que las estimaciones de las tendencias de la temperatura y precipitación para el próximo siglo son inciertos, el nivel de representatividad de los datos hidrológicos medidos y la compleja singularidad de las cuencas generan todavía dudas importantes referente a los efectos hidrológicos más específicos, más allá de la relación inmediata que a menudo se establece entre clima e hidrología (Mas-Pla & Bach Plaza, 2008)

## **1.2. Formulación Del Problema**

### **1.2.1. Problema General**

¿Cuáles serían los efectos del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la subcuenca del río Llanganuco de la cordillera blanca, en el futuro?

### **1.2.2. Problemas Específicos**

¿Qué cambios en el futuro podrían originarse en las variables de Precipitación y Temperatura, como variables principales del cambio climático?

¿Cuál sería el impacto sobre la Disponibilidad Hídrica en un futuro cercano y lejano?

### 1.3. Justificación

La presente investigación permitirá formular un modelo hidrológico para evaluar los efectos del cambio climático en el recurso hídrico. Al ampliar los conocimientos de los factores implicados en el comportamiento de la dinámica hidrológica, así como los datos hidroclimáticos históricos, estarán en relación con la respuesta del modelo. Se planteará en el análisis del modelo matemático la representación de los procesos que involucran la simulación del sistema hidrológico Llanganuco manejando datos diarios de la temperatura, precipitación y caudal.

Un mejor conocimiento del comportamiento hidrológico estudiado, requerirá una amplia búsqueda de diferentes conceptualizaciones de modelos que se han desarrollado con diferentes fines y permitirá evaluar y cuantificar el proceso de la dinámica del agua.

El agua del sistema hidrológico Llanganuco, donde se desarrolla la Ciudad de Yungay y otros, es un recurso importante utilizado para las demandas agrícolas de los valles de Yungay y toma para riego complementario, uno de los sistemas de agua potable de la ciudad de Yungay capta el agua del río Llanganuco; además mantiene la corriente de los ríos y provee de alimentación a animales silvestres y domésticos, así como la agricultura sostenible (ANA, 2015).

Un continuo crecimiento de las demandas de agua por crecimiento poblacional y la necesidad de garantizar la seguridad alimentaria, nos alertan para realizar estudios sobre posibles cambios en la disponibilidad de agua como un efecto negativo del cambio climático.

Un análisis de la influencia del cambio climático sobre la hidrología y las actividades económicas de la subcuenca, permitirá establecer políticas de aprovechamiento y

gestión del recurso hídrico, así como estrategias de mejoramiento de las capacidades de las poblaciones a fin de plantear alternativas de desarrollo sostenible.

## **1.4. Hipótesis y Variables**

### **1.4.1. Hipótesis**

La disponibilidad hídrica futura en el sistema hidrológico Llanganuco disminuye, debido a los efectos del cambio climático en las variables de Precipitación y Temperatura, proyectados para un futuro cercano y lejano.

### **1.4.2. Variables**

Variable independiente: variables meteorológicas del cambio climático (Precipitación, Temperatura)

Variable dependiente: Disponibilidad Hídrica (caudales Futuros, cercano 2050 y lejano 2100).

## **1.5. Definición de Términos**

**Sistema climático.** – Está conformado por 5 componentes principales: atmósfera, hidrosfera, criósfera, litosfera y biosfera. Y la interacción entre dichos componentes lo convierte en un sistema complejo. El sistema climático va evolucionando en el tiempo por su propia dinámica y a causa de forzamientos externos (IPCC, 2013).

**Antropógeno.** – Es la resultante de la actividad de los seres humanos o producto de esta (IPCC, 2019).

**Paleoclima.** – Es el estudio de los climas ocurridos hace muchos años (IPCC, 2007). Expertos en el paleoclima, para hacer sus estudios usan registros ambientales naturales como: núcleo de hielo, anillos de los troncos de los árboles, los corales, entre otros.

**Forzante Radiativo.** – Es la variación del flujo radiativo neto en la parte superior de la atmosfera, resultado de una variación del causante externo del cambio climático. De forma más sencilla es la diferencia entre la luz solar absorbida por la Tierra y la energía irradiada de vuelta al espacio (IPCC, 2019)

**Aerosoles.** – Son partículas sólidas o líquidas, lo suficientemente pequeñas para quedar suspendidas en la atmosfera. Se tiene como fuentes naturales de aerosol a las partículas de sal proveniente del mar y partículas de arcilla de la erosión de rocas. Y también existen aerosoles originados por la actividad humana, es cuando es considerado contaminante (PROCLIM, 2005).

**Gas de efecto invernadero (GEI).** – Es un gas atmosférico que absorbe la radiación infrarroja, emitida por la superficie terrestre. Los principales GEI son el vapor de agua (H<sub>2</sub>O), el dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), el metano (CH<sub>4</sub>) y el ozono (O<sub>3</sub>) (PROCLIM, 2005).

## **1.6. Objetivos de la Investigación**

### **1.6.1. General**

Evaluar el efecto del cambio climático en la disponibilidad hídrica de la subcuenca del río Llanganuco.

### **1.6.2. Específicos**

- Preparar los datos de entrada presente y futuro que necesita el modelo hidrológico.
- Calibrar y validar el modelo hidrológico GSM y GR4J de la plataforma RS MINERVE en el sistema hidrológico Llanganuco.
- Proyectar la disponibilidad hídrica futura en el sistema hidrológico Llanganuco, desde el año 2020 hasta un futuro cercano año 2050 y futuro lejano año 2100.



## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### 2.1. Antecedentes de Investigación

Existen tesis nacionales e internacionales que han investigado la disponibilidad hídrica de una cuenca bajo escenarios de cambio climático. Estas investigaciones fueron utilizadas como apoyo para el desarrollo de esta tesis.

(Stehr Gesche, 2008). En este trabajo el objetivo fue generar una herramienta capaz de analizar el comportamiento de las cuencas en estudio bajo escenarios de cambio climático tanto a macro como a meso-escala (subcuencas), incorporando el impacto del aporte nival en la zona cordillerana y la disponibilidad del recurso agua durante diferentes períodos del año. Con la disponibilidad de datos y otros factores optó por el modelo Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para su modelación, el cual

considera la cobertura de nieve dentro del modelo. Como resultado obtuvo la reducción de caudales medios mensuales verano y aumento en las épocas de invierno. (León Ochoa, 2017). El objetivo principal fue evaluar el cambio de la oferta hídrica en el futuro en la cuenca media y alta del río Piura bajo escenarios de cambio climático. El método de investigación que utilizó para que evalué los riesgos de los recursos hídricos fue combinar el modelamiento hidrológico con escenarios de misiones de gases de efecto invernadero para simular el comportamiento hídrico en cuencas. El modelo hidrológico que utilizó fue Soil and Water Assessment Tool (SWAT) para investigar el comportamiento hidrológico futuro en la cuenca y las principales variables climáticas se proyectaron con dos escenarios de forzamiento radiactivo RCP4.5 y RCP8.5 de dos modelos climáticos globales (MCG) HADGEM2-ES y CSIRO-Mk3-6-0, del (CMIP5), usando el generador de clima MarkSim. Obteniendo un aumento promedio de temperatura y precipitación + 2,9°C y 39,3% respectivamente en los escenarios del cambio climático, sobre la escorrentía mensual al 2050, en los cuatro escenarios se muestra un aumento entre octubre a abril de +71.8% y una disminución entre mayo a setiembre de -66.1%.

(SENAMHI, 2009). En su trabajo implementaron dos técnicas: el downscaling dinámico lo realizaron mediante el modelo regional RAMS, iniciado con el modelo global NCAR-PCM T42 (SENAMHI, 2005), y el downscaling estadístico relacionando variables de gran escala con variables locales, utilizando la temperatura de agua de mar como forzante para las precipitaciones en la cuenca. Indica que las lluvias se estarían incrementando en la cuenca alta hasta en un 15% en otoño y respecto a la temperatura se observa una mayor variación durante el otoño en el sector más alto de la cuenca del orden de 0,6 – 1,0 °C,

(Pouyaud et al, 2005). En su investigación sobre el futuro de los recursos hídricos sobre el deshielo de los glaciares en la cordillera blanca, calibra su modelo del 1950 al

2000, obteniendo una mejor simulación. Concluye que habrá un incremento del recurso hídrico por lo menos hasta el año 2050 en algunas subcuencas de la cordillera blanca que están conformadas por glaciares como Llanganuco y Parón.

## **2.2. Bases Teóricas**

### **2.2.1. Ciclo Hidrológico y su Concepción como Sistema**

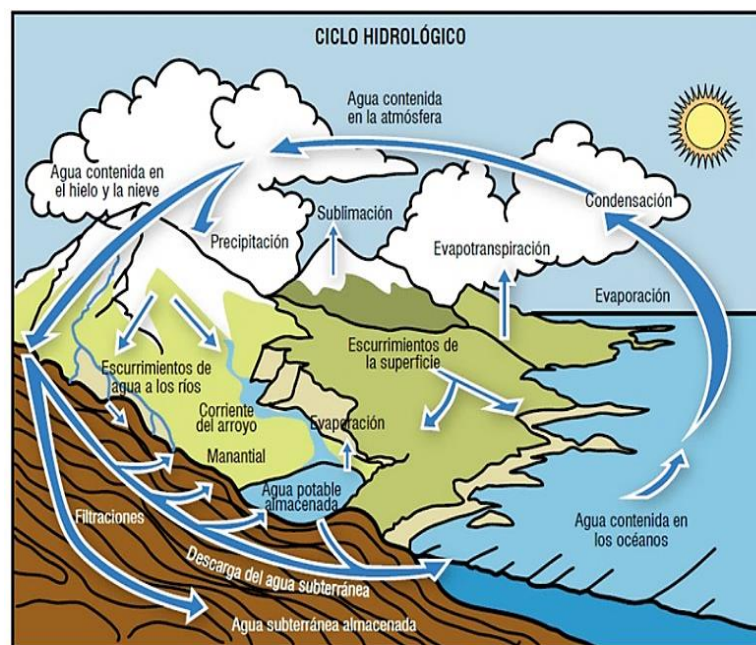
En la tierra, el agua se encuentra en la hidrosfera, se limita entre unos quince kilómetros arriba de la atmosfera y a un kilómetro por debajo de la litosfera (Chow et al, 1994). A la circulación constante del agua en la hidrosfera se le denomina ciclo hidrológico. Desde que inicia hasta que acaba el ciclo, el agua puede pasar por sus tres estados: líquido, sólido y gas.

Realmente no se sabe dónde comienza el ciclo hidrológico, pero se considera que inicia en los mares y océanos por ocupar el mayor porcentaje en la superficie del planeta, ya que la evaporación originado por ellos es mucho más elevada que las originadas por la tierra y de algunas partes de la atmósfera (Mejía, 2012).

El vapor de agua resultado de la evaporación, se transporta y se condensa en la atmósfera creando nubes, luego se precipita sobre la superficie terrestre u océanos. Una porción del agua precipitada puede ser interceptada por las plantas, escurrirse sobre la superficie de los suelos o infiltrarse al subsuelo; la mayor parte del agua interceptada, la transpirada por la vegetación y de la que escurre superficialmente, regresa a la atmósfera mediante la evaporación. El agua infiltrada puede percolar a sectores profundos, depositándolos en acuíferos subterráneos, las cuales puede emerger como manantiales, uniéndose a las corrientes superficiales y llegar a los mares y océanos para ser evaporada culminando así el ciclo hidrológico. En la *Figura 1* se puede observar el ciclo Hidrológico (Mejía, 2012).

Por la complejidad de los fenómenos hidrológicos, probablemente no se llegue a comprender completamente. Sin embargo, pueden ser representados de forma sintética mediante el concepto de **sistema**. El sistema es un conjunto de partes vinculadas entre sí, que constituyen un todo. Componentes del ciclo hidrológico como la precipitación, evaporación, escorrentía y otros elementos del ciclo pueden llegar a considerar al ciclo hidrológico como un sistema. Los componentes del ciclo hidrológico pueden agruparse en subsistemas y para analizar el sistema, los subsistemas pueden analizarse por separado y luego los resultados se combinan de acuerdo a las interacciones entre ellos y así poder analizar el sistema total (Mejía, 2012).

**Figura 1**  
*Ciclo Hidrológico.*



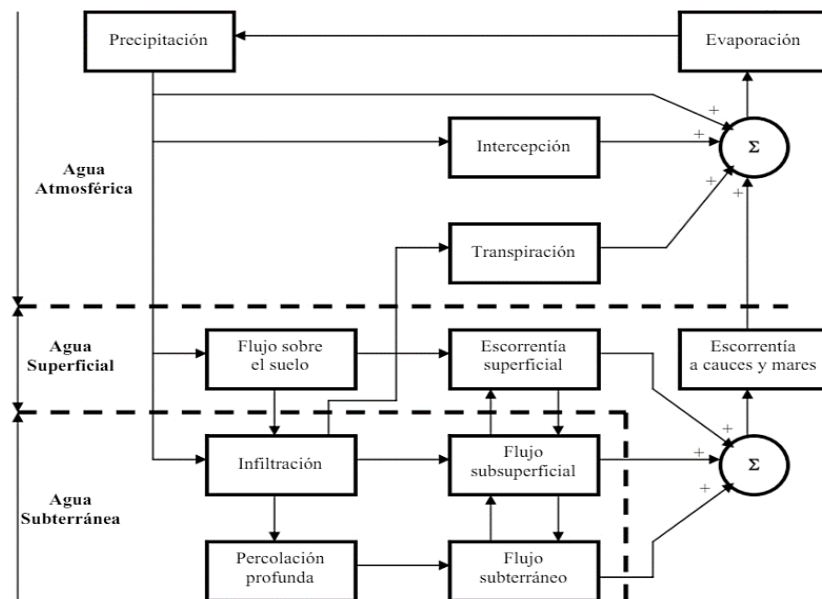
*Nota.* Tomado de (Portillo, 2012).

En la **Figura 2**, se describe al ciclo hidrológico como un sistema. Las líneas punteadas descomponen al sistema total en 3 subsistemas: el **sistema de agua atmosférica**, que comprende los procesos de precipitación, evaporación, intercepción y transpiración; el **sistema de agua superficial** que comprende los procesos de escorrentía superficial, flujo sobre el suelo, flujo superficial y flujo subterránea (hacia cauces y océanos); y el

**sistema de agua subsuperficial** que comprende los procesos de infiltración, percolación profunda, flujo subsuperficial y flujo subterráneo. El flujo subsuperficial ocurre en la capa de suelo cercana a la superficie y el flujo subterráneo ocurre en estratos profundos de suelo o roca (Mejía, 2012).

**Figura 2**

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



*Nota.* Tomado de J. Mejía (2012, p. 9)

### 2.2.2. Modelos Hidrológicos

Un modelo hidrológico es una herramienta que ha desarrollado la ciencia para comprender y representar el comportamiento de los fenómenos físicos que ocurren en el espacio de una cuenca y estimar las variables hidrológicas en períodos actuales, pasados y futuros. La diversidad de modelos hidrológicos desarrollados tiene objetivos específicos cada uno, pero estructuralmente son parecidos por las suposiciones en las que esta basados (Tellez, 2016).

Entonces, para comprender mejor los impactos del cambio climático en la hidrología de una cuenca necesitamos modelos hidrológicos. En la actualidad existe una diversidad de modelos hidrológicos, que para su elección se tendrá en cuenta algunos

factores como: el objetivo de modelado, magnitud de la cuenca, elementos hidrológicos de la cuenca, características de la cuenca y la disponibilidad de los datos.

**2.2.2.1. Clasificación de los Modelos Hidrológicos.** Existe una amplia clasificación de los modelos hidrológicos, pero nos enfocaremos en tres características importantes que nos ayudaran a elegir el modelo adecuando modelar hidrológicamente una cuenca.

**2.2.2.1.1. De acuerdo a la conceptualización de los procesos básicos.** Pueden ser empíricos, conceptuales o basados en procesos. Los modelos empíricos o llamados también de caja negra funcionan como una relación calibrada entre entradas y salidas, estos modelos solo se enfocan en la relación entrada-salida y no en procesos internos del sistema. Los modelos de base física o llamados también de caja blanca trabaja de forma opuesta a los modelos empíricos ya que se enfocan a los procesos internos del sistema ayudándose de ecuaciones físicas. Los modelos conceptuales o llamados también de caja gris, estos modelos generalmente consideran leyes físicas simplificadas, se podría entender que estos modelos comparten características de los modelos empíricos y los de base física (Cabrera, s.f, P.4)

**2.2.2.1.2. De acuerdo a la naturaleza de los algoritmos básicos.** Se clasifican en estocásticos y determinísticos. Los modelos estocásticos poseen datos de entrada y/o parámetros formulado por distribuciones estadísticas y probabilísticas, estos modelos tratan de modelar procesos aleatorios en función del tiempo. Mientras en los modelos determinísticos no existen aleatoriedad, la relación causa-efecto se conoce (Tellez, 2016).

**2.2.2.1.3. De acuerdo a su representación espacial.** Pueden ser Agregados, semi distribuido y distribuido. Se denominan modelos agregados o agrupados cuando dan a entender que una cuenca es homogénea, y esto se da siempre en cuando se afirme

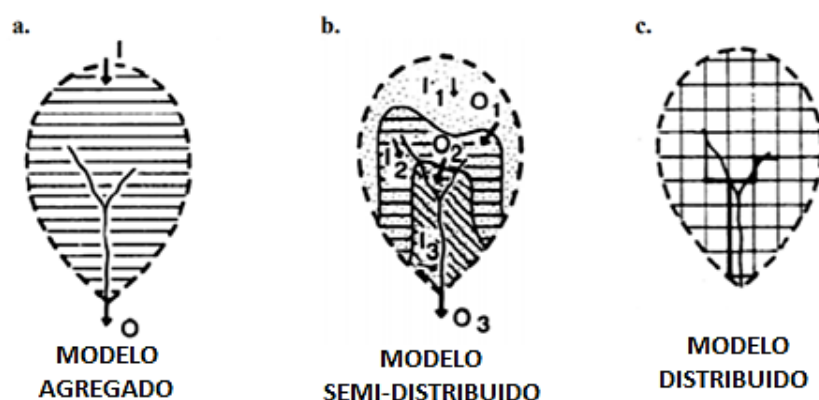


que la cuenca es muy pequeña. Existen limitaciones por falta de conocimiento de las propiedades del suelo y de los procesos involucrados en los flujos sub superficial y subterráneo, pero estas se ven superadas al asumir que la cuenca es homogénea. Los modelos semi distribuidos trabajan de forma independiente cada zona para analizar y luego combinar y/o superpones sus efectos, estos modelos se utilizan ya cuando el tamaño de cuenca es más grande y ya haya variación en tipo de suelo, largo y ancho de la cuenca. Con los modelos distribuidos la intención es representar mejor a una cuenca, esto se logra dividiéndolo en elementos más pequeños, usualmente con una geometría uniforme (grillas) (Cabrera, s.f, P.4).

En la **Figura 3** se observa la clasificación de los modelos hidrológicos según su representación espacial.

**Figura 3**

*Clasificación de los modelos hidrológicos según su representación espacial.*



*Nota.* Tomado de J. Cabrera (s.f, P.7)

### 2.2.3. Modelamiento Hidrológico en RS Minerve

El programa hidrológico e hidráulico RS MINERVE (Routing System Minerve) fue desarrollada por el “Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin” (CREALP) con la colaboración de la Oficina de Ingeniería HydroCosmos S.A. y mejorada con el apoyo de la École Polytechnique Fédérale de Lausanne, la Universidad Politécnica de Valencia y la asociación Hydro10 (García et al., 2020).



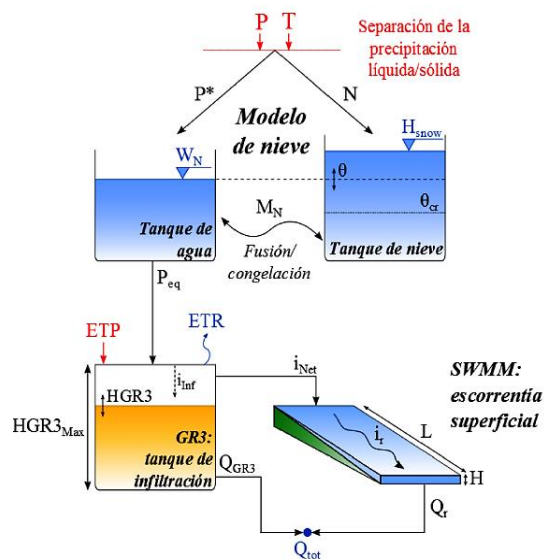
El RS MINERVE tiene la capacidad de simular la formación y propagación del flujo de escorrentía superficial y subterránea. Puede modelar sistemas hidrológicos e hidráulicos complejos en función de un esquema conceptual semi-distribuido, así también procesos hidrológicos particulares, como el deshielo de los glaciares, el flujo superficial y subterráneo, también se incluyen elementos de control hidráulico (por ejemplo, compuertas, vertederos, turbinas y bombas). Gracias a estas funcionalidades y su interfaz de sencilla comprensión, el RS MINERVE es capaz de controlar y mejorar esquemas hidrológicos e hidráulicos de distintos grados de complejidad (García et al, 2020).

El sistema informático RS MINERVE comprende diferentes modelos hidrológicos de lluvia-escorrentía, como GSM, SOCONT, HBV, SAC – SMA y GR4J. Dependiendo de los datos de entrada que se tenga y del comportamiento geomorfológico que posea la cuenca se puede elegir el modelo hidrológico a utilizar.

**2.2.3.1. Modelo Hidrológico SOCONT.** Este modelo fue desarrollado por Consuegra & Vez (1996).

**Figura 4**

*Esquema del Modelo SOCONT.*



*Nota.* Tomado de M. ASTORAYME et al. (2015, P.112)

En el modelo SOCONT, el modelo Snow-GSM simula la evolución transitoria de la capa de nieve (derretimiento y acumulación) en función de la temperatura (T) y la precipitación (P), proporcionando así una precipitación equivalente (P<sub>eq</sub>) que se utiliza como entrada por el modelo GR3. El modelo GR3 también tiene en cuenta la evapotranspiración potencial (ETP) y proporciona la intensidad neta al modelo SWMM (García et al, 2020).

En la **Tabla 1** se pueden observar la lista de parámetros que necesita el modelo SOCONT para su calibración.

**Tabla 1**

*Parámetros SOCONT.*

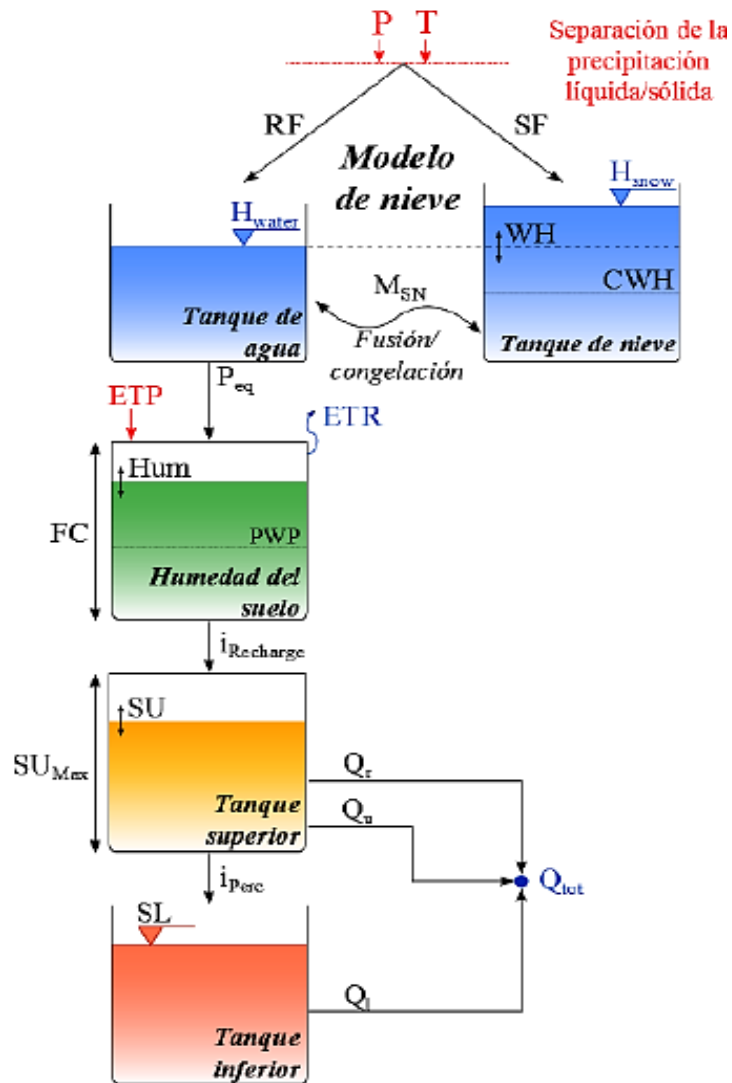
Nombre	Unidades	Descripción	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0
S	mm/°C/d	Coefficiente de deshielo grados-días	0.5 a 20
Slnt	mm/°C/d	Grado-intervalo de deshielo de día	0 a 4
SMin	mm/°C/d	Coefficiente mínimo de fusión de nieve por grados día	≥0
SPh	D	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal	1 a 365
ThetaCri	-	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.1
bp	d/mm	Coefficiente de derretimiento debido a la precipitación líquida	0.0125
Tcp1	°C	Temperatura mínima crítica para la precipitación líquida	0
Tcp2	°C	Temperatura máxima crítica para la precipitación sólida	4
Tcf	°C	Temperatura crítica de deshielo	0
HGR3Max	m	Altura máxima del reservorio de infiltración	0 a 2
KGR3	1/s	Coefficiente de liberación del reservorio de infiltración	0.00025 a 0.1
L	m	Longitud del plano	>0
J0	-	Pendiente del plano	>0
Kr	m <sup>3</sup> /s	Coefficiente de Strickler	0.1 a 90

*Nota.* Adaptado de García et al. (2020, p.23)

**2.2.3.2. Modelo Hidrológico HBV.** El modelo integrado de lluvia-escorrentía HBV (Bergström, 1976, 1992) es un modelo determinístico conceptual. Se compone de una función de nieve, un depósito de humedad de suelo, un depósito de almacenamiento superior y un depósito de almacenamiento inferior (García et al, 2020). La estructura del modelo se puede observar en la **Figura 5**.

**Figura 5**

*Esquema del Modelo HBV.*



*Nota.* Tomado de M. ASTORAYME et al. (2015, P.112)

En la **Tabla 2** se pueden observar la lista de parámetros que necesita el modelo HBV para su calibración.

**Tabla 2***Parámetros HBV.*

Nombre	Unidades	Descripción	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0
CFMax	mm/°C/day	Coeficiente de deshielo	0.5 a 20
CFR	-	Factor de congelación	0.05
CWH	-	Contenido crítico de agua en la nieve acumulada	0.1
TT	°C	Temperatura umbral de lluvia/mezcla de nieve	0 a 3
TTInt	°C	Intervalo de temperatura para lluvia nieve	0 a 3
TTSM	°C	Temperatura umbral para el derretimiento de nieve	0
Beta	-	Coeficiente forma	1 a 5
FC	m	Máxima capacidad de almacenamiento del suelo	0.050 a 0.65
PWP	-	Punto de marchitez permanente del suelo	0.030 a 1
SUMAX	m	Nivel umbral de agua del Reservorio superior	0 a 0.10
Kr	1/d	Coeficiente de liberación del flujo superficial	0.05 a 0.5
Ku	1/d	Coeficiente de liberación del interflujo	0.01 a 0.4
Kl	1/d	Coeficiente de liberación del flujo base	0 a 0.15
Kperc	1/d	Coeficiente de liberación de percolación	0 a 0.8

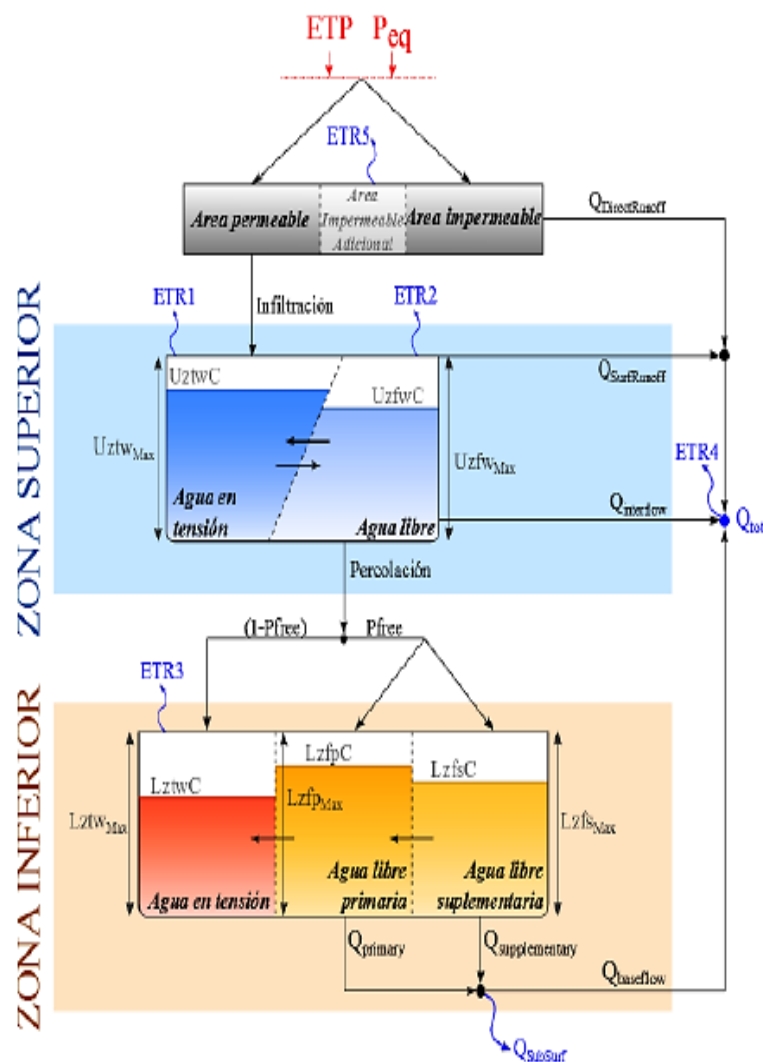
*Nota.* Adaptado de García et al. (2020, P.27)

**2.2.3.3. Modelo Hidrológico SACRAMENTO.** El modelo hidrológico SACRAMENTO o SAC-SMA (Sacramento Soil Moisture Accounting) es un modelo determinístico conceptual, fue propuesto por Burnash et al. y desarrollado en los años 70 por el Cuerpo de Ingeniero del Ejército de los Estados Unidos División Norte junto con el personal del Centro de Predicción Fluvial del Servicio de Meteorológico Nacional de Estados Unidos y el Departamento de Recursos Hídricos, en Sacramento, California (Astorayme et al, 2015).

El modelo SAC-SMA fue diseñado para optimizar las características de humedad en el suelo, distribuida en diferentes niveles, con características de percolación racional, para una eficiente simulación de vertidos. Este modelo calcula la descarga total de la precipitación ( $P$ ) y la evapotranspiración potencial (ETP) dependiendo de los parámetros y condiciones iniciales (García et al, 2020). La estructura del modelo se puede observar en la **Figura 6**.

**Figura 6**

*Esquema del Modelo SACRAMENTO.*



*Nota.* Tomado de M. ASTORAYME et al. (2015, P.112)

En la **Tabla 3** se pueden observar la lista de parámetros que necesita el modelo SACRAMENTO para su calibración.

**Tabla 3***Parámetros del Modelo SACRAMENTO.*

Nombre	Unidades	Descripción	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0
Adimp	-	Fracción máxima de un impermeable adicional	0 a 0.2
Pctim	-	Fracción permanente de área impermeable	0 a 0.05
Riva	-	Fracción de cobertura vegetal	0 a 0.2
UztwMax	m	Capacidad de la tensión de agua en la capa superior	0.01 a 0.15
UzfwMax	m	Capacidad del agua libre en la capa superior	0.005 a 0.10
Uzk	1/d	Tasa de retiro de la capa superior	0.10 a 0.75
Zperc	-	Coefficiente de la relación de percolación	10 a 350
Rexp	-	Exponente de la relación de percolación	1 a 4
Pfree	-	Fracción de la percolación que va a LZFW	0 a 0.60
LztwMax	m	Capacidad de la tensión de agua en la capa inferior	0.05 a 0.40
LzfpMax	m	Capacidad del agua libre primario en la capa inferior	0.03 a 0.80
LzfsMax	m	Capacidad del agua libre suplementario en la capa inferior	0.01 a 0.40
Rserv	-	Fracción del agua almacenada en la zona más baja no transferible	0 a 1
Lzpk	1/d	Tasa de retiro diario de LZFP	0.001 a 0.03
Lzsk	1/d	Tasa de retiro diario de LZFS	0.2 a 0.3
Side	-	Fracción del flujo base para la recarga profunda	0 a 0.5

*Nota.* Adaptado de García et al. (2020, pp.35)

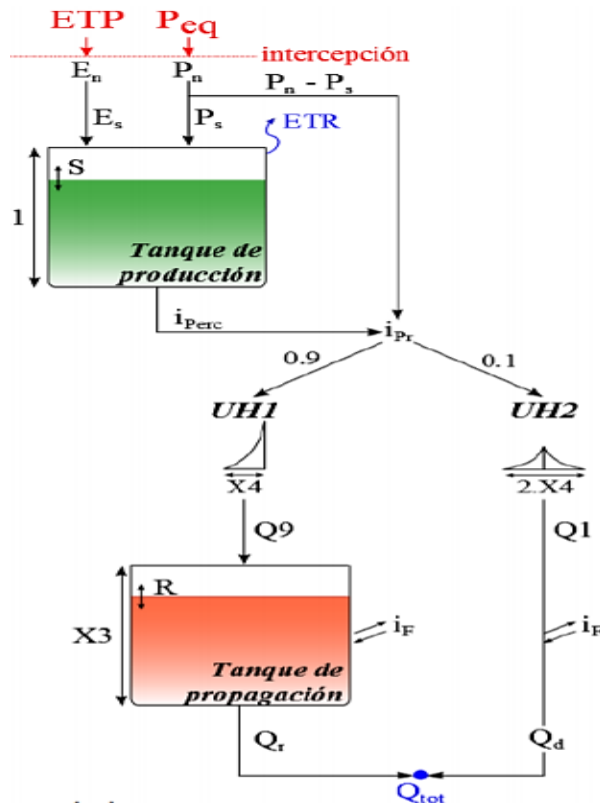
**2.2.3.4. Modelo Hidrológico GR4J.** El modelo GR4J es un modelo hidrológico global impulsado con cuatro parámetros desarrollado por (Perrin et al., 2003). Es un modelo empírico, pero su estructura es parecida a los modelos conceptuales. Tiene en cuenta la humedad y contiene dos depósitos (producción y enrutamiento). También se asocian hidrogramas unitarios para el comportamiento

hidrológico de la cuenca (García et al, 2020).

En la **Figura 7** se muestra la estructura del modelo GR4J.

**Figura 7**

Esquema del modelo GR4J



Nota. Tomado de M. ASTORAYME et al. (2015, P.112)

En la **Tabla 4** se pueden observar los cuatro parámetros que necesita el modelo GR4J para su calibración.

**Tabla 4**

Parámetros del Modelo GR4J.

Nombre	Unidades	Descripción	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	Superficie de la cuenca	>0
X1	m	Capacidad del depósito de producción	0.01 a 1.2
X2	m	Coefficiente de intercambio de agua	-5.78x10 <sup>-8</sup> a 3.47x10 <sup>-8</sup>
X3	m	Capacidad del depósito de enrutamiento	0.01 a 0.5
X4	d	Base de tiempo UH	-0.05 a 1

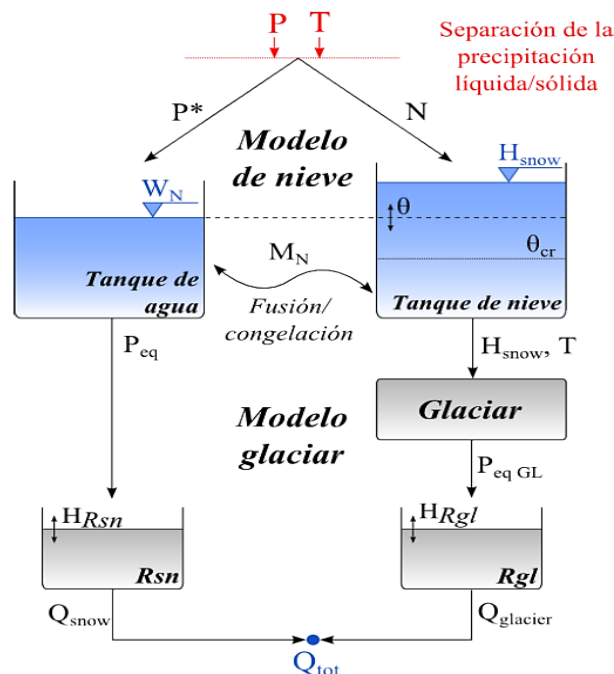
Nota. Adaptado de García et al. (2020, pp.31)



**2.2.3.5. Modelo Hidrológico GSM.** El modelo GSM está conformado por cinco submodelos, dos pertenecen al modelo Snow-GSM y los otros tres pertenecientes al modelo glaciar. A partir de las entradas de precipitación (P) y temperatura (T), el modelo de nieve crea una precipitación equivalente ( $P_{eq}$ ) que se transfiere al modelo de glaciar. Lo mismo explica la altura de la nieve ( $H_{snow}$ ) y la temperatura (T). En el modelo glaciar, la precipitación equivalente se transfiere al depósito de nieve lineal (Rsn) y finalmente a la salida de la subcuenca ( $Q_{snow}$ ). Además, el submodelo del derretimiento del glaciar crea un flujo cuando la altura de la nieve es cero ( $H_{snow}=0$ ). Este flujo glaciar ( $P_{eqGL}$ ) se transfiere al reservorio glaciar lineal (Rgl) y el flujo resultante ( $Q_{glaciar}$ ) a la salida de la subcuenca. El flujo final ( $Q_{tot}$ ) producido por la subcuenca es la suma de los dos flujos ( $Q_{glaciar}$  y  $Q_{snow}$ ) (García et al, 2020). La estructura se observa en la **Figura 8**.

**Figura 8**

Esquema del modelo GSM.



Nota. Tomado de M. ASTORAYME et al. (2015, P.112)

En la **Tabla 5** se pueden observar la lista de parámetros que necesita el modelo GSM para su calibración.

**Tabla 5**

*Parámetros del Modelo GSM.*

Nombre	Unidades	Descripción	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	Superficie de infiltración	>0
S	mm/°C/d	Coefficiente de fusión de nieve día-grado de referencia	0.5 a 20
SInt	mm/°C/d	Intervalo grado-día de fusión de nieve	0 a 4
SMin	mm/°C/d	Coefficiente mínimo de deshielo grado-día	≥0
Sph	d	Desplazamiento de fase de la función sinusoidal	1 a 365
ThetaCri	-	Contenido de agua relativo crítico del paquete de nieve	0.1
bp	d/mm	Coefficiente de fusión debido a la precipitación líquida	0.125
Tcp1	°C	Temperatura crítica mínima para precipitación líquida	0
Tcp2	°C	Temperatura crítica máxima para precipitación sólida	4
Tcf	°C	Temperatura crítica de deshielo	0
G	mm/°C/d	Coefficiente de derretimiento del glaciar grado-día de referencia	0.5 a 20
GInt	mm/°C/d	Intervalo de derretimiento de glaciares grados-día	0 a 4
GMin	mm/°C/d	Coefficiente mínimo de derretimiento del glaciar grado-día	≥0
Tcg	°C	Temperatura crítica de deshielo del glaciar	0
Kgl	1/d	Coefficiente de liberación del depósito de deshielo de los glaciares	0.1 a 5
Ksn	1/d	Coefficiente de liberación del depósito de deshielo	0.1 a 5
CFR	-	Coefficiente de recongelación	0 a 1

*Nota.* Adaptado de García et al. (2020, pp.19)

### **2.2.3.6. Calibración y Validación de Modelos**

**2.2.3.6.1. Calibración Del Modelo.** La calibración de modelos apunta a un criterio de exactitud, y se respalda en la cuantificación de la bondad de ajuste del modelo. Los parámetros son las constantes que deben de ser estimadas de tal forma que el modelo pueda asemejarse lo mejor posible a la realidad (Aliaga , 2017).

La etapa de calibración se puede ejecutar de manera manual o automática. La calibración manual se tiene que escoger los parámetros que mejor se adecuen a las características de la cuenca y ubicarlos en el modelo. Con los parámetros ubicados en la cuenca, se obtiene un hidrograma de flujo de la cuenca y tiene que ser comparado con otro que se haya conseguido en campo en la misma ubicación e intervalo de tiempo. En caso no sean similares los hidrogramas, se procederá a variar los parámetros del modelo de forma manual hasta producir un hidrograma parecido al obtenido en campo. El procedimiento de la calibración automática es parecido al de la calibración manual, pero con la diferencia que la variación de parámetros lo ejecuta el modelo que está usando. Esta forma de calibrar agiliza el proceso, además se obtienen medidas más objetivas y de confianza (Iparraguirre & Arias, 2018).

El sistema informativo RS MINERVE cuenta con tres algoritmos de calibración: SCE-UA, UAMC y CLHR.

**2.2.3.6.2. Validación del Modelo.** Al finalizar la calibración del modelo, se procede a validarlo cotejando los valores conseguidos con los reales, esta diferencia se obtiene con herramientas estadísticas. Al tener el modelo ya validado podemos obtener resultados más cercanos a la realidad. La validación se puede realizar utilizando indicadores estadísticos como el coeficiente de Nash, el coeficiente de Nash-Ln, Pearson Correlation Coeff, RRMSE, entre otros. Por ejemplo, los dos primeros indicadores obtienen valores que varían de  $-\infty$  a 1, donde 1 representa el mejor

rendimiento del modelo (García et al, 2020).

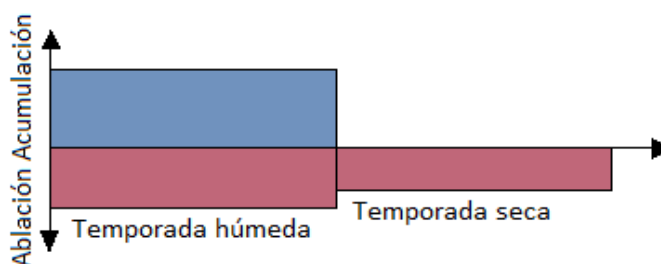
#### 2.2.4. Régimen glaciar anual

El régimen de un glaciar se refiere a los procesos físicos de acumulación y ablación que ocurren anualmente en la masa y frente glaciar. Así, en los glaciares tropicales, la acumulación ocurre solamente en temporada de lluvias, de setiembre a abril más o menos, y en cambio la ablación ocurre todo el año. La ablación puede ocurrir de dos formas: fusión de hielo en agua, o sublimación de hielo directamente en vapor. La sublimación es un proceso que consume ocho veces más energía que la fusión para transformar la misma cantidad de hielo. Se entiende que en la temporada seca cuando la sublimación esta favorecida por una humedad relativa más baja, mucha de la energía que llega al glaciar se desgasta en sublimación y la ablación neta es menor que en temporada húmeda, donde se estima una sublimación débil (Vignon, 2022).

La **Figura 9** muestra el régimen glaciar anual de la Cordillera Blanca, donde se observa que en la temporada húmeda ocurre casi 100% de la acumulación. En la temporada húmeda se observa más ablación, ya que la fusión esta privilegiada con respecto a la sublimación por la elevada humedad relativa. En la temporada seca no hay acumulación, y hay menos ablación porque hay más sublimación (humedad relativa baja), que consume más energía para transformar la misma cantidad de hielo (Vignon, 2022).

**Figura 9**

*Régimen glaciar anual en la Cordillera Blanca.*



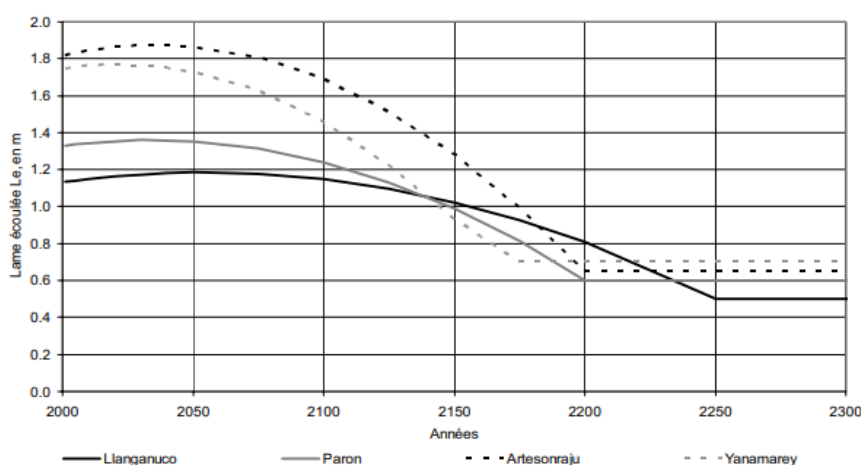
*Nota.* Tomado de (Vignon, 2022)

En la Cordillera Blanca en el régimen estacional diciembre – febrero, es caracterizada por la presencia de precipitación. Así como la temperatura, la precipitación también es muy importante para el comportamiento de los glaciares. Si la aumenta temperatura, el estado de la precipitación cambia y desciende en forma nieve en lugar que lluvia. Una falta de nieve implica efectos para un glaciar primero, al disminuir la nieve existirá menos material para acumular el volumen del glaciar. Segundo, el cambio de nieve a lluvia también provoca una reducción en el albedo que a la vez acelera aún más el retroceso del glaciar (Proyecto Glaciares, s.f.)

Según (Pouyaud et al, 2005), para las cuencas hidrográficas de la cordillera blanca, se espera un ligero aumento en el recurso de agua glacial durante otros 25 a 50 años (**Figura 10**), dependiendo de su congelación actual. El proceso continuará si el cambio climático continúa, o incluso se acelera, con un empobrecimiento dramático de este recurso, volviéndose progresivamente más nivo-pluvial el régimen hidrológico de cada una de las cuencas, a medida que desaparecen sus glaciares reguladores, comenzando por el más pequeño de ellos y los nacidos en altitudes más bajas.

**Figura 10**

*Láminas de escorrentía directa anual*



*Nota.* Tomado de (Pouyaud et al, 2005)

### 2.2.5. Pruebas Estadísticas

Para validar los resultados de los modelos de circulación global comparados con los modelos observados, usaremos pruebas estadísticas para lograrlo. Para los análisis ejecutados se utilizaron los siguientes parámetros estadísticos: media, desviación estándar y covarianza.

**2.2.5.1. El coeficiente de correlación de Pearson.** El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ) representa el grado de colinealidad entre los datos simulados y observados. Los valores oscilan desde el -1 a 1, es un índice del grado de relación lineal entre el observado y simulado. Si  $r = 0$ , no existe una relación lineal. Si  $r = 1$  o -1, existe una relación lineal perfecta positiva o negativa. Aunque  $r$  ha sido ampliamente utilizado para la evaluación del modelo, esta estadística es más sensible a los valores extremos altos e insensible a adiciones y diferencias proporcionales entre el modelo de predicciones y los datos medidos (Chou , 1979).

**2.2.5.2. Eficiencia Nash-Sutcliffe.** Es una estadística normalizada que determina la magnitud relativa de la varianza residual ("ruido") en comparación con la variación de los datos de medición. Siendo 1 el valor óptimo. Los valores entre 0.0 y 1.0 normalmente se entienden como niveles aceptables de rendimiento, mientras que los valores  $< 0.0$  indica que el valor medio observado es un mejor predictor que el valor simulado, por lo que se alude un rendimiento inaceptable (Chou , 1979).

**2.2.5.3. Porcentaje de sesgo.** Mide la tendencia media de los datos simulados para ser más grandes o más pequeños que sus contrapartes observadas. El valor óptimo es de 0.0. Una magnitud baja de valores indica modelos de simulación precisa. Los valores negativos indican sesgo de sobreestimación en modelo y los valores positivos indican sesgo de subestimación en el modelo. Este coeficiente tiene la capacidad de indicar el rendimiento pobre del modelo (Chou , 1979).

**2.2.5.4. Relación de desviación estándar RMSE.** Mide la cantidad de error

que hay entre dos conjuntos de datos. Es decir, compara un valor proyectado y un valor observado o conocido. El rango de valores esta entre el 0 y el infinito(positivo), donde 0 significa un ajuste perfecto mientras que los valores sean mayor a 0 indican un menor ajuste (Chou , 1979).

### **2.2.6. Cambio Climático**

Se entiende por cambio climático a la variación del estado del clima que podría ser identificado mediante cambios en la media o en la variabilidad de sus propiedades, que persiste por periodos largos (décadas o más). El cambio climático es el producto de procesos internos naturales o de forzamientos externos como erupciones volcánicas, uso del suelo o cambios antropógenos constantes en la composición de la atmosfera. En su artículo 1, la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC), define el cambio climático como “cambio de clima atribuido directa o indirectamente a la actividad humana que altera la composición de la atmósfera global y que se suma a la variabilidad natural del clima observada durante períodos de tiempo comparables”. La CMNUCC indica que el cambio climático atribuible a las actividades humanas que alteran la composición atmosférica y la variabilidad del clima atribuible a causas naturales (IPCC, 2014).

Diferentes gases componen la atmósfera, y al estar en una proporción correcta no existiría alteraciones en dicha capa. Pero con el transcurrir del tiempo, las actividades del ser humano han llegado a provocar que la atmósfera retenga más calor, lo cual se obtiene debido a que aumentaron la emisión de gases de efecto invernadero (GEI). Entonces, se produjo lo que hoy en día es muy escuchado como el calentamiento global.

En un reciente informe especial del IPCC indica que el uso humano afecta directamente a más del 70% de la superficie terrestre global sin hielo, ya que la tierra



proporciona la base principal para el sustento humano y bienestar. Con el crecimiento de la población mundial y los cambios en el consumo per cápita de alimentos, pastos, fibra, madera y energía han ocasionado el incremento del uso de la tierra. La tierra es una fuente como también un sumidero de GEI y cumple un papel importante en el intercambio de agua, energía y aerosoles entre la superficie terrestre y la atmosfera. Por el uso desmedido de la tierra a gran escala han contribuido al incremento de las emisiones de los GEI (IPCC, 2019).

El aumento global de la temperatura en estos últimos años es más frecuente, intenso y duradero, este calentamiento trae grandes consecuencias que peligran la flora y la fauna de la Tierra, incluso el ser humano. Algunos efectos del cambio climático se pueden observar en cambios en la temperatura, precipitación y derretimiento de la masa de hielo en los polos y los continentes (aumento del nivel del mar), entre otros aspectos. Estas variaciones se expresan con apariciones de fenómenos Meteorológicos más violentos como sequias, incendios, cambios de calidad de fuentes de agua, desbordamientos de ríos y lagos, entre otros.

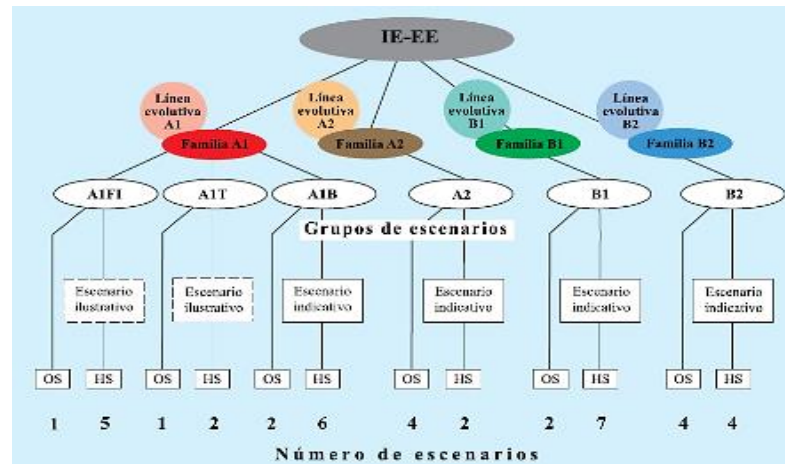
**2.2.6.1. Escenarios de Emisiones para el Cambio Climático.** Un escenario de emisiones son representaciones del posible desarrollo futuro, y componen un instrumento adecuado para conjeturar el cambio climático futuro. El IPCC precisa que los escenarios son proyecciones del futuro de la sociedad y del medio ambiente, impulsado por el crecimiento poblacional, desarrollo socioeconómico, avance tecnológico, incremento de gases de efecto invernadero y aerosoles (IPCC, 2001).

El IPCC en su informe especial sobre los escenarios de emisiones (IE-EE) en el año 2000, publicó un conjunto de escenarios de emisiones para su empleo en estudios sobre cambio climático. Los escenarios IE-EE fueron elaborados para explorar el desarrollo del futuro a nivel mundial en especial en temas relacionados al aumento de gases de

efecto invernadero y emisiones de aerosoles.

**Figura 11**

*Ramificaciones de escenarios EI-EE.*



*Nota.* Tomado de IPCC (2001, P. 04)

Los escenarios IE-EE están clasificados en cuatro familias (A1, A2, B1 y B2), quienes exploran vías de desarrollo alternativas incluyendo toda una serie de fuerzas que impulsan las emisiones de GEI y aerosoles como el crecimiento demográfico, económico y tecnológico. La familia A1 describe un mundo futuro con un acelerado crecimiento económico, una población mundial que alcanza el máximo a mediados de siglo y una rápida introducción a nuevas tecnologías más eficientes. Se clasifica en tres grupos, que expresan tres direcciones alternativas de cambio tecnológico: A1FI (intensiva en combustibles fósiles), A1T (energías de origen no fósil) y A1B (equilibrio entre las distintas fuentes). La familia A2 describe un mundo muy heterogéneo con un fuerte crecimiento poblacional y con desarrollo económico y tecnológico lento. La familia B1 describe un mundo convergente, con la población mundial que A1, pero con cambios rápidos de las estructuras económicas dirigidas a una economía de servicios e información. La familia B2 describe a un mundo cuya población crece gradualmente a un ritmo menor que en A2 y un desarrollo económico intermedio, más orientada a las soluciones locales para la sostenibilidad económica,

social y medioambiental (IPCC, 2007). En la Figura 11 se puede observar las ramificaciones de escenarios IE-EE.

El Futuro del clima está sujeto al calentamiento originado por emisiones antropógenas en el pasado, también dependerá de emisiones antropógenas futuras y variabilidad del clima natural. El marco de la quinta fase del Proyecto de comparación de modelos acoplados (CMIP5) del Programa Mundial de Investigaciones Climáticas ha utilizado un nuevo conjunto de escenarios: las rutas representativas de concentración (RCP, de sus siglas en inglés) para realizar nuevas simulaciones de modelos climáticos. Estos nuevos escenarios son nombrados de acuerdo al forzamiento Radiativo (FR), que producen al año 2100: RCP 2.6 W/m<sup>2</sup>, RCP 4.5 W/m<sup>2</sup>, RCP 6.0 W/m<sup>2</sup> y RCP 8.5 W/m<sup>2</sup>. Los escenarios RCP, comprenden un escenario en el que los esfuerzos en mitigación conducen a un nivel de forzamiento muy bajo (RCP2.6), 2 escenarios de estabilización (RCP4.5 y RCP6.0) y un escenario con un nivel muy alto de emisiones (RCP8.5) (IPCC, 2013). La FR total para el año 2100 varía desde 2,6 a 8,5 W/m<sup>2</sup>, tal como se aprecia en la **Tabla 6**.

**Tabla 6**

*Resumen de las características de las RCP proyectadas hasta el año 2100.*

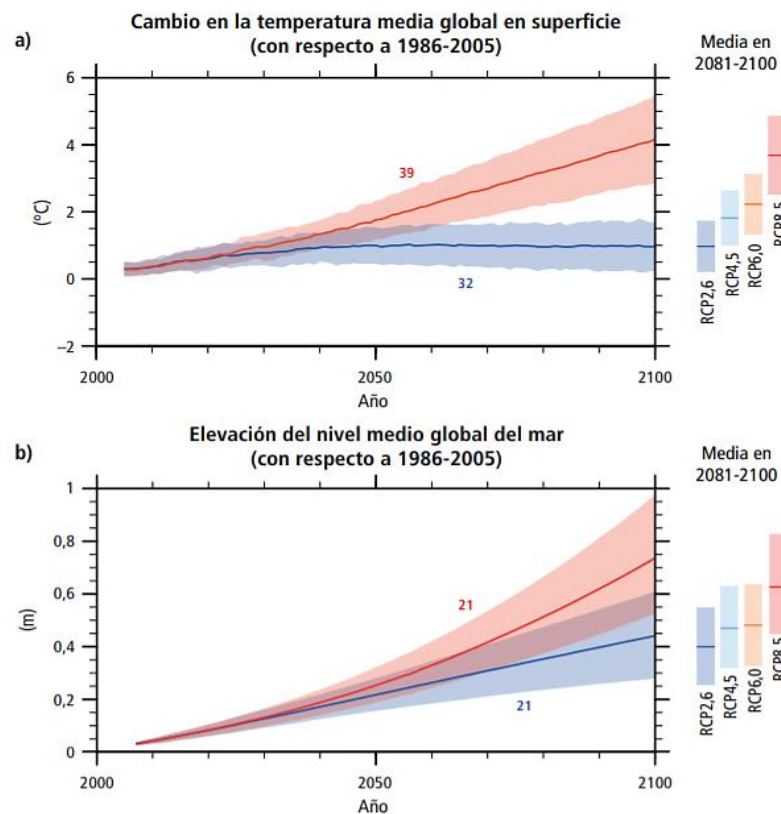
Nombre	Forzante radiativo (W/m <sup>2</sup> )	Concentración (ppm)	Trayectoria
RCP 8.5	> 8.5 en 2100	> 1,370 CO <sub>2</sub> -equiv. en 2100	En aumento
RCP 6.0	~6 post estabilización en 2100	~850 CO <sub>2</sub> -equiv. (estabilización post 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 4.5	~4.5 post estabilización en 2100	~650 CO <sub>2</sub> -equiv. (estabilización post 2100)	Estabilización sin aumentos radicales
RCP 2.6	Peak en ~3 antes de 2100 luego declina	Peak en ~490 CO <sub>2</sub> -equiv. Antes de 2100 luego declina	Peak y declina

*Nota.* Tomado de (Serrano , 2014)

Las proyecciones de los escenarios RCP señalan que existen y existirán cambios en el sistema climático a lo largo del siglo XXI. Estos cambios seguirán aumentando especialmente debido a que las emisiones antropógenas van incrementando y se verá reflejado principalmente en el cambio de temperatura media global del aire y del océano, elevación del nivel del mar y derretimiento de la nieve glaciar y hielo en los polos.

**Figura 12**

*Cambios proyectados en el sistema climático entre 2006 y 2100.*



*Nota.* Tomado de IPCC (2014, P. 11)

El IPCC en el 2014 en su informe de síntesis nos dan a conocer las variaciones proyectadas en el sistema climático, las proyecciones señalan que la temperatura de la superficie seguirá aumentando al igual que la elevación del nivel mar. Es casi seguro que el incremento de la temperatura media global en superficie al final del siglo XXI (2081-2100) respecto de 1986-2005 sea de 0,3 °C a 1,7 °C bajo el escenario RCP2,6;

de 1,1 °C a 2,6 °C bajo RCP4,5; de 1,4 °C a 3,1 °C bajo RCP6,0; y de 2,6 °C a 4,8 °C bajo RCP8,5 tal como señala la **Figura 12a**. Así mismo, para la elevación del nivel medio global del mar en el periodo 2081-2100 respecto a 1986-2005 variarían en un rango de 0,26 a 0,55 m para RCP2,6, y de 0,45 a 0,82 m para RCP8,5 como muestra la **Figura 12b** (IPCC, 2014).

**2.2.6.2. Modelos Climáticos.** Son programas que nos brindan información muy detallada sobre el sistema climático y simulan las interacciones complejas entre la atmósfera, el océano, la superficie terrestre, la nieve y el hielo, el ecosistema global y una variedad de procesos químicos y biológicos. En la CMIP5 se ha utilizado desde modelos climáticos sencillos y modelos de complejidad media, hasta modelos climáticos completos y modelos del sistema tierra cuyos resultados componen el elemento fundamental de las proyecciones del sistema climático (*IPCC, 2013*).

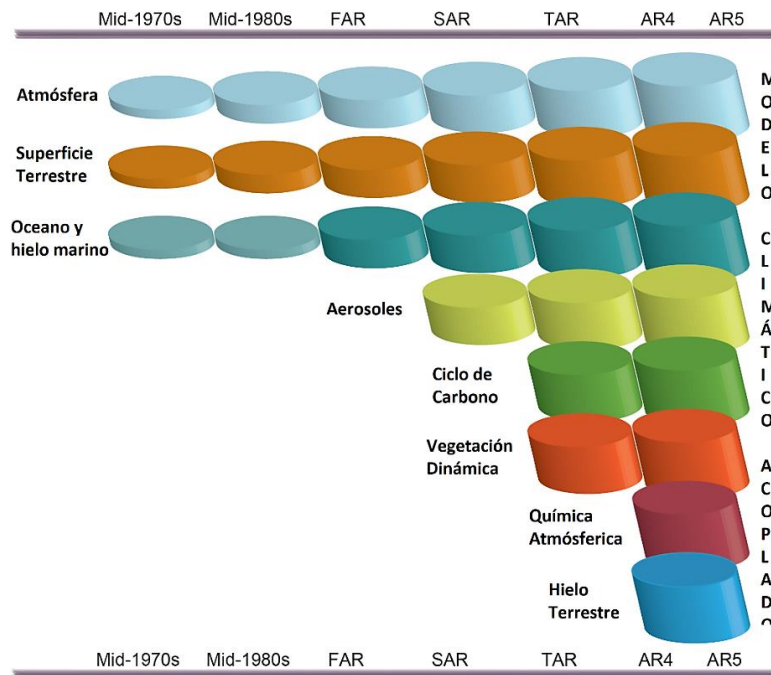
Los modelos climáticos con el transcurso del tiempo han ido mejorando, pero junto con la evolución de los modelos crece la complejidad de los modelos climáticos. Hoy en día existen computadoras más sofisticadas que logran que los modelos actuales puedan tener mejor precisión en los detalles espaciales. Los modelos climáticos se emplean como una técnica de investigación para analizar y simular el clima. Los “Modelos de Circulación General” (MCG) son de los más complejos de los modelos.

El desarrollo de los modelos climáticos en las últimas décadas muestra como los diferentes componentes se integraron en modelos climáticos integrales en el transcurrir de los años. En la **Figura 13**, el Grupo de Trabajo I del IPCC indica que la complejidad y la gama de procesos en cada aspecto (procesos atmosféricos, procesos de la superficie terrestre, entre otros) se han incrementado con el tiempo (ilustrado por cilindros en crecimiento). Así también, al mismo tiempo la resolución horizontal y vertical ha aumentado considerablemente (Cubash et al, 2013).



**Figura 13**

*Evolución de los modelos climáticos.*



*Nota.* Adaptado de U. Cubasch (2013, P. 144)

### 2.2.6.3. CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project Phase 5).

El Grupo de trabajo sobre modelado acoplado (WGCM, de sus siglas en inglés) del Programa Mundial de Investigación del Clima, creó el Proyecto de Intercomparación de Modelos Acoplados (CMIP) como un protocolo experimental estándar para estudiar la elaboración de modelos de circulación general atmósfera-oceano acoplados (AOGCM) (CMIP, 2002).

El objetivo del CMIP es evaluar a los modelos, de tal forma que podamos comparar las proyecciones del cambio climático futuro con los modelos que simulen el clima pasado, presente y futuro y el desempeño de los modelos sean óptimos.

El CMIP permite que diversos científicos del mundo analicen el modelo climático global (GCM) de manera sistemática, un procedimiento que interviene en la mejora del modelo. En el 2008 acordaron promover un nuevo conjunto de experimentos

coordinados de modelos climáticos. Estos experimentos comprenden la quinta fase del Proyecto de Intercomparación de modelos acoplados (CMIP5) (CMIP, 2002).

El CMIP5 proporcionará notablemente un contexto multimodelo para 1) evaluar los mecanismos responsables de las diferencias de modelo en retroalimentaciones mal entendidas asociadas con el ciclo del carbono y con las nubes, 2) examinar la "previsibilidad" del clima y explorar la capacidad de los modelos para predecir el clima en la década escalas de tiempo y, más generalmente, 3) precisar por qué de manera similar los modelos forzados generan un rango de respuestas. El diseño del experimento CMIP5 culminó con los siguientes conjuntos de experimentos: Simulaciones de predicciones y predicciones de décadas, Simulaciones "a largo plazo" y Simulaciones de "solo atmósfera" (SST prescrita) para modelos especialmente exigentes computacionalmente. Los objetivos del CMIP5 son: evaluar cuán realistas son los modelos al simular el pasado reciente, Proporcionar proyecciones del cambio climático futuro en dos escalas de tiempo, a corto plazo (aproximadamente mediados del siglo XXI) y a largo plazo (hasta el final del siglo XXI) y comprender algunos de los factores responsables de las diferencias en las proyecciones del modelo, incluida la cuantificación de algunas ciertas retroalimentaciones clave, como las relacionadas con las nubes y el ciclo del carbono (CMIP, 2002).

Las simulaciones paleoclimáticas fueron incluidas en el CMIP5 que ha admitido relacionar de forma más estrecha la información paleoclimática con las proyecciones del futuro. Las restauraciones elaboradas a partir de archivos paleoclimáticos permiten profundizar los cambios actuales en la composición de la atmósfera, el nivel del mar y el clima (incluidos fenómenos extremos como sequías e inundaciones), así también como las proyecciones futuras, con una perspectiva más amplia de la variabilidad del clima en el pasado. Tener informaciones del clima en el pasado también admite



documentar el comportamiento de los componentes lentos del sistema climático, incluido el ciclo del carbono, los mantos de hielo y el océano profundo (Cubash et al, 2013).

### **2.2.7. Modelos de Circulación General (MCG)**

Los Modelos de Circulación General o modelos climáticos globales (MCG) son consideradas como las herramientas más avanzadas que producen procesos del sistema climático.

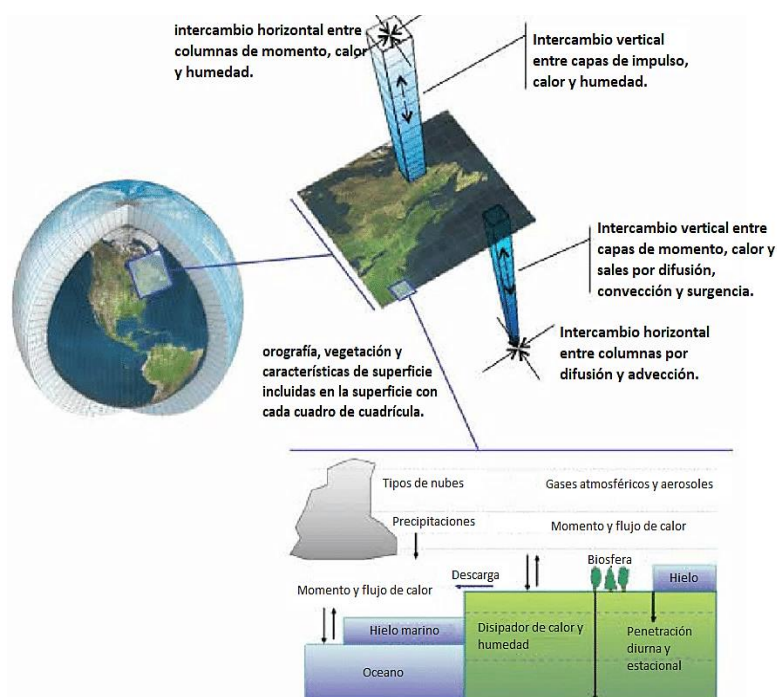
Esos modelos son simuladores y desarrollan ecuaciones fundamentales de las leyes y principios de la física que rigen cada componente del sistema climático global, como los intercambios de energía y de masa, mediante métodos números (Avalos et al., 2013).

Para la proyección del clima del futuro, los MCG necesitan información de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y aerosoles futuros, información que es generada por modelos socio-económicos para indagar la posible evolución de las emisiones de GEI y aerosoles en el mundo (Avalos et al., 2013).

Los MCGs representan el clima, empleando una cuadrícula tridimensionalmente sobre el globo (ver la **Figura 14**) y luego trabajan con cada pequeño cubo o celda. En cada rejilla volumétrica se le asigna un valor promedio para propiedades como velocidad, temperatura, humedad (de la atmósfera) y salinidad (de los océanos). Habitualmente los MCGs tienen una resolución horizontal entre 250 y 600 km, de 10 a 20 capas verticales en la atmósfera y algunas veces 30 capas en el océano. su resolución es entonces no es tan buena a escala de exposición en la mayoría de las evaluaciones de impacto de gas de efecto invernadero (CDD-IPCC, 2013).

**Figura 14**

*Esquematización de un modelo climático global.*



*Nota.* Adaptado de (*Lachance et al., 2015*)

Pese que los MCGs son las herramientas más avanzadas del clima futuro, al tener una escala espacial muy gruesa se conseguiría resultados incorrectos sobre el impacto del cambio climático, es por ello que no se podría utilizar a escala local.

Debido a ellos se han realizado distintos proyectos de Modelos Climáticos Regionales (MCR) para diferentes partes del mundo. Estos modelos son el resultado de procesos de downscaling dinámico o estadístico. Para Sudamérica, en los últimos años han desarrollado algunos MCR para escenarios de emisión y cambio climático (Marengo et al., 2012).

Existen algunos modelos regionales de libre acceso para la aplicación en todo Sudamérica, el RCA4 es uno de ellos. Dicho modelo trabaja en datos para el periodo histórico y futuro en los forzamientos radiativos RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 hasta finales del siglo 21 con una resolución de 0.44°.

**Tabla 7***Modelos Climáticos Globales preparados para el CMIP5*

<b>Modelo</b>	<b>Resolución</b>	<b>Institución</b>
<b>ACCESS1-0</b>	1.875 x1.25	CSIRO - BOM
<b>ACCESS1-3</b>	1.875 x 1.25	
<b>bcc-csm1-1</b>	2.8 x 1.4	BCC
<b>bcc-csm1-1-m</b>	1.25 x 1.12	
<b>CCSM4</b>	1.25 x 0.94	NCAR
<b>CESM1-BGC</b>	1.25 x 0.94	CESMC
<b>CESM1-CAM5</b>	1.25 x 0.94	
<b>CMCC-CM</b>	0.75 x 0.75	CMCC
<b>CMCC-CMS</b>	1.875 x 1.85	
<b>CNRM-CM5</b>	1.25 x 0.94	CNRM-CERFACS
<b>CSIRO-Mk3-6-0</b>	1.875 x 1.87	CSIRO-QCCCE
<b>GFDL-CM2p1</b>	2.5 x 2.02	NOAA-GFDL
<b>GFDL-CM3</b>	2.5 x 2	
<b>GFDL-ESM2G</b>	2.5 x 2.02	
<b>HadCM3</b>	3.75 x 2.5	MOHC
<b>HadGEM2-AO</b>	1.875 x 1.25	
<b>HadGEM2-ES</b>	1.875 x 1.25	
<b>inmcm4</b>	2 x 1.5	INM
<b>IPSL-CM5A-LR</b>	3.75 x 2	IPSL
<b>IPSL-CM5A-MR</b>	2.5 x 1.27	
<b>IPSL-CM5B-LR</b>	3.75 x 1.9	
<b>MIROC4h</b>	0.5625x0.56	MIROC
<b>MIROC5</b>	1.4 x 1.4	
<b>MPI-ESM-LR</b>	1.875 x 1.87	MPI-M
<b>MPI-ESM-MR</b>	1.875 x 1.87	
<b>MRI-CGCM3</b>	1.125 x1.121	MRI
<b>CanCM4</b>	2,8125x 2.79	CCCMA
<b>CanESM2</b>	2,8125 x 2.79	
<b>FGOALS-g2</b>	2.8125 x 3.172	LASG-CESS
<b>GISS-E2-H</b>	2.5 x 2	NASA-GISS
<b>GISS-E2-H-CC</b>	2.5 x 2	
<b>GISS-E2-R</b>	2.5 x 2	
<b>GISS-E2-R-CC</b>	2.5 x 2	
<b>MIROC-ESM</b>	2.8125 x 2.787	MIROC
<b>MIROC-ESM-CH</b>	2.8125 x 2.787	
<b>NorESM1-ME</b>	2.5 x 1.9	NCC
<b>NorESM1-M</b>	2.5 x 1.9	

*Nota.* Earth System Grid Federation (<http://www-pcmdi.llnl.gov/>).

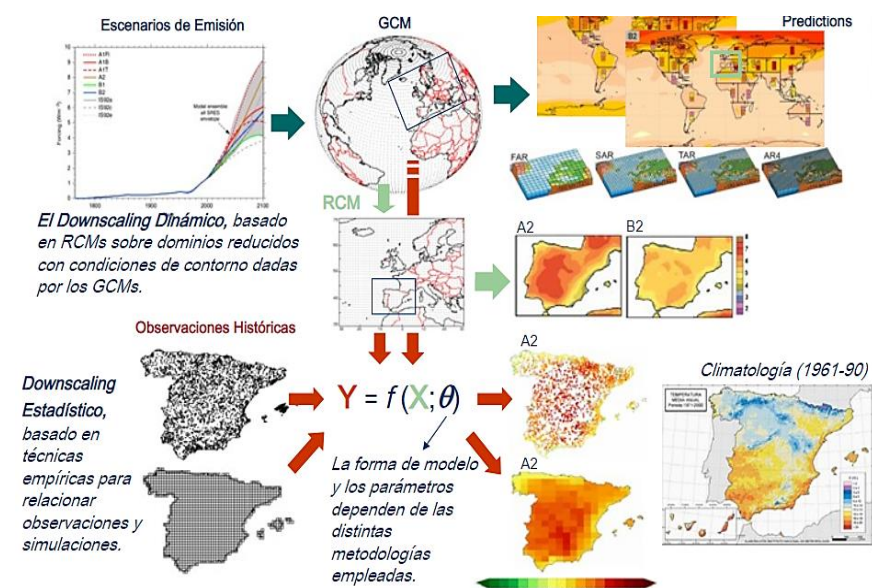
Los datos RCA4 son de acceso libre a través del programa CORDEX, una iniciativa de World Climate Research Programme (WCRP) que junta diferentes MCR a nivel mundial. En la **Tabla 7** se muestra algunos de los modelos climáticos globales existentes adaptados para el CMIP5.

### 2.2.8. Métodos de Downscaling (Reducción De Escala)

Los Modelos Climáticos Globales es un instrumento primordial para predecir el clima futuro. Estos modelos son confiables a escala global, es decir, sus resoluciones espaciales son muy bajas. Cuando se consideran a escalas regionales (10-100 km) las distribuciones de temperatura y, especialmente de precipitación muestran discordancias con los datos observados. Para que se pueda simular el clima futuro convenientemente se debe efectuar una reducción de escala, a estas estrategias se les denomina técnicas de regionalización (downscaling). Esta técnica se clasifica en dos tipos (**Figura 15**): la reducción de escala estadística (statistical downscaling) y la reducción de escala dinámica (dynamic downscaling) (Gaertner et al., 2012).

**Figura 15**

*Esquema ilustrativo de las técnicas de reducción de escala estadística y dinámica.*



*Nota.* Tomado de E. Francés (2017, p. 3)

**2.2.8.1. Reducción de Escala Dinámica (Dynamic Downscaling).** La regionalización Dinámica radica en emplear modelos regionales de clima para ejecutar proyecciones realistas de cambio climático a escala regional (10-100 km) de forma físicamente consistente. Los modelos climáticos regionales son esencialmente parecidos al modelo climático global, pero se utilizan en un área limitada (zona de interés) con mejor resolución. Los valores iniciales de las variables simuladas y su evolución temporal de los modelos climáticos regionales se derivan de resultados obtenido por un modelo climático global. (*Gaertner et al., 2012*).

Esta técnica genera respuestas basadas en procesos físicamente consistentes, también produce información de resolución más fina a partir de salidas a escala MCG que alcanza a resolver procesos atmosféricos a menor escala. La reducción a escala dinámica posee desventajas como el alto costo y tiempo computacional, es fuertemente dependiente del límite de MCG y presenta un número limitado de conjuntos de escenarios (Fowler et al., 2007).

**2.2.8.2. Reducción de Escala Estadística (Statistical Downscaling).** En la reducción de escala estadística, se basa en modelos estadísticos que vinculan de manera empírica las variables de circulación atmosféricas a gran escala con las variables locales/regionales observadas en la superficie, relacionadas normalmente con la temperatura y precipitación. Estos modelos se calibran/ajustan empleando datos de reanálisis y registros históricos observados para un periodo común, luego los modelos conseguidos son utilizados para proyectar localmente los escenarios globales futuros facilitados por los MCG (Gaertner et al., 2012).

Algunas de las ventajas de esta técnica son que a comparación de la reducción de escala dinámica es computacionalmente barata y eficiente, tienen una rápida aplicación a muchos escenarios y diferentes modelos globales, proporcionar información con una



elevada resolución espacial en localidades puntuales. Esta técnica presenta ciertos inconvenientes como facilitar resultados solo para las variables para las que se tiene observaciones, necesita observaciones diarias confiables para un representativo periodo climático y supone que las relaciones deducidas en clima actual también son válidas en clima futuro (Gaertner et al., 2012).

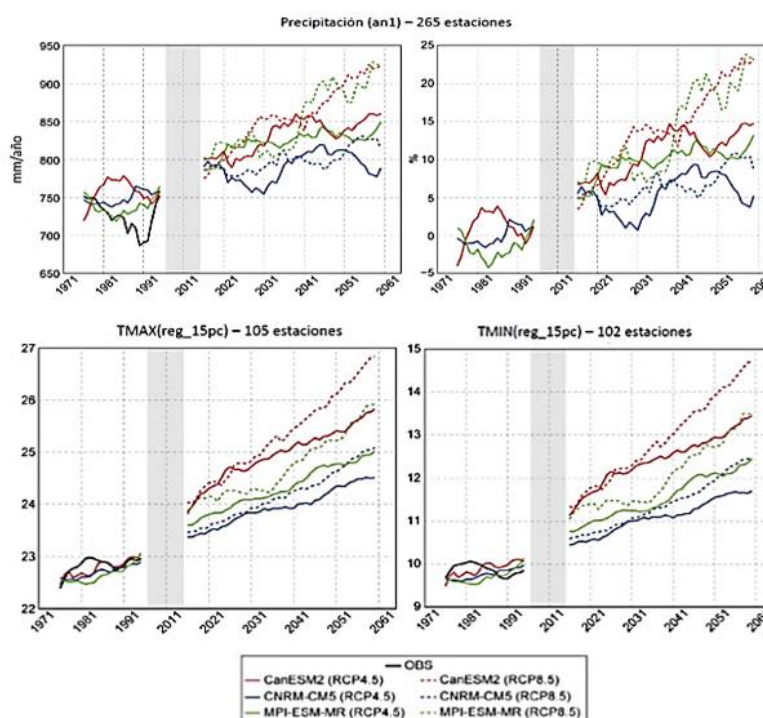
### **2.2.9. Proyección de Precipitación y Temperatura para el Perú**

En el Perú, el SENAMHI con la cooperación del Grupo de Meteorología de la Universidad de Cantabria, realizó la regionalización estadística de escenarios climáticos con la finalidad de obtener las proyecciones climáticas locales a nivel nacional de las variables precipitación, temperaturas máximas y temperaturas mínimas hacia el periodo 2050. En dicho proyecto el SENAMHI realizó la regionalización estadística (downscaling) de seis escenarios climáticos que forman parte del CMIP5 con 265 estaciones de precipitación, 102 estaciones de temperatura mínima y 105 estaciones de temperatura máxima distribuidas a nivel nacional. Los resultados muestran que para el periodo 2036-2065 habrá un incremento medio (con respecto a 1971-2000) de 2°C a 3°C para la temperatura máxima y de 4°C a 6°C para la temperatura mínima. Para la precipitación, pese a su variabilidad espacial, su incremento promedio será entre el 10% al 20% (SENAMHI, 2014).

En la **Figura 16** se distinguir los modelos MCG utilizados (CanESM2, CNRM-CM5 y MPI-ESM-MR), en línea discontinua representa al escenario RCP8.5 y en la línea continua representa al escenario RCP4.5. El sombreado gris, indica el periodo entre el fin de la simulación histórica y el inicio de las proyecciones (SENAMHI, 2014).

**Figura 16**

*Proyecciones climáticas en el Perú hacia el año 2050.*



*Nota.* Tomado de SENAMHI (2014, p. 20)

### **2.2.10. Incertidumbre en la Proyección del Clima Futuro**

La incertidumbre es algo de lo cual no estamos seguros o se tenga dudas. Se dan por dos razones las incertidumbres al predecir el clima futuro. La primera tiene que ver con el desconocimiento de las emisiones futuras de los gases de efecto invernadero, ya que en los últimos 50 años se han ido incrementando y favoreciendo al calentamiento global. El segundo lugar no se sabe exactamente cómo van a ser los efectos de las emisiones sobre el sistema climático. Existen otras incertidumbres como las que se presentan por la regionalización y la variabilidad natural que se tendrán que tener presente para analizar las salidas de los modelos (PROCLIM, 2005).

Las incertidumbres por regionalización cada vez son menores, en los últimos años, investigadores especializados en la simulación del clima futuro han logrado simular dichos climas a escala local. Las fuentes de estas incertidumbres provienen de



muchas fuentes como: la evolución de la sociedad, población, y las emisiones de GEI en el futuro, técnicas de regionalización, etc. Sin embargo, estas técnicas de regionalización son lo bastante robustas como para ser empleadas suficientemente en planificación y definición de políticas relativas a la actividad humana que se proyecte al futuro más de una década (planificación hidrológica, urbanística, agrícola, etc.) (SENAMHI, 2014).

## CAPITULO III

### METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

#### 3.1. Tipo de Investigación

Según su enfoque, el tipo de investigación es CUANTITATIVO, porque cinco de las características epistemológicas corresponden a una naturaleza Cuantitativa: Percepción de la realidad, Razonamiento, Finalidad, Orientación y Causalidad.

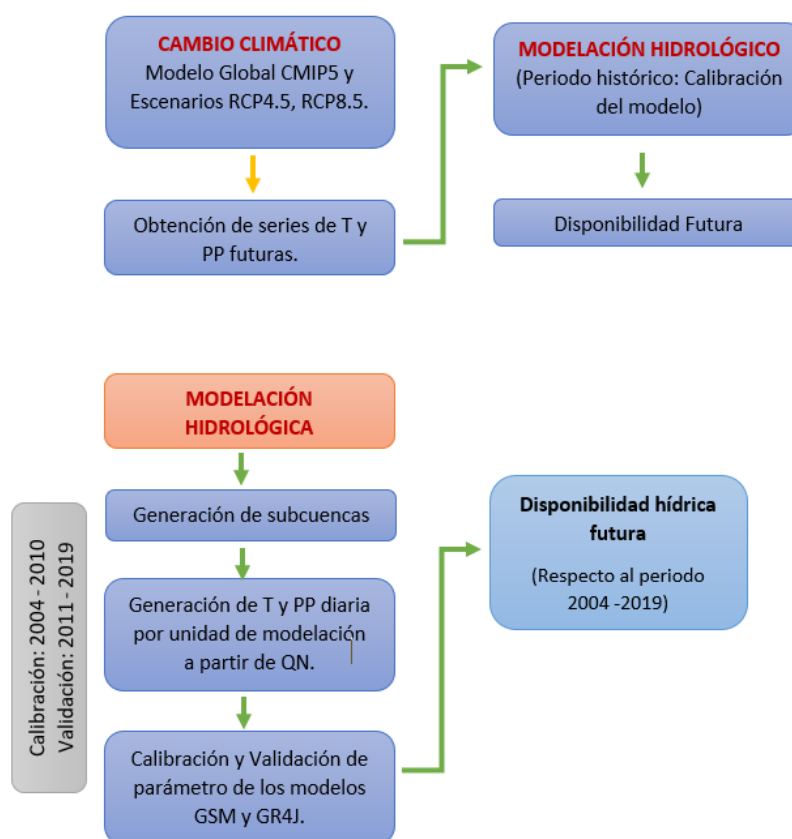
Según su Alcance, el tipo de investigación es de naturaleza CORRELACIONAL, porque centra en explicar por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta, explica la relación entre variables, cuantifica relaciones entre variables y ofrece predicciones usando modelos matemáticos.

#### 3.2. Diseño de la Investigación

El diseño de la presente investigación es NO EXPERIMENTAL, porque no

habrá manipulación de la variable independiente y sus resultados se analizan describiendo o midiendo la relación entre las variables. Para conseguir los objetivos de la investigación y llegar a demostrar o rechazar la hipótesis se realizó el siguiente plan que se describe a continuación en la **Figura 17**:

**Figura 17**  
*Diseño de Investigación*



Donde:

**PP:** Precipitación.

**T:** Temperatura.

**QN:** Estación Base.

**Disponibilidad hídrica:** Caudales.

**Modelo hidrológico:** GSM Y GR4J.

**Modelación hidrológica:** Plataforma del Software RS Minerve.

**Disponibilidad hídrica futura:** Caudales en futuro cercano y futuro lejano.

### **3.3. Limitación de la Investigación**

En el sistema hidrológico Llanganuco existen muy pocas estaciones, además existieron algunos vacíos en su base de datos, que posteriormente fueron trabajados y completados. Al existir varias estaciones en una cuenca, se obtendrán resultados más precisos.

### **3.4. Contexto y Unidad de Análisis: Población y Muestra**

#### **3.4.1. Población**

La presente investigación se realizará en el sistema hidrológico Llanganuco de la Cordillera Blanca, que tiene como aportantes a los nevados Huandoy, Pisco, Chacararaju, Yanapacha, Chopicalqui y Huascarán.

#### **3.4.2. Muestra**

- Información meteorológica: Temperatura y Precipitación a nivel diario en los sectores de Huandoy, Portachuelos y Llanganuco existentes en la zona, registrada en las estaciones automáticas con sensores instaladas, para periodos que varían desde el año 2004 al 2019.
- Información hidrométrica: Caudales a nivel diario registrada en la estación Llanganuco, ubicado a la salida de la laguna.
- Datos de los modelos de cambio climático CMIP5, descargados del portal del programa Coordinated Regional Downscaling Experiment (CORDEX) en extensión netCDF. Los datos fueron extraídos del modelo climático Regional RCA4 del modelo climático global MPI-ESM-LR en los escenarios RCP4.5 Y RCP8.5, dichos modelos pertenecen a Sudamérica.
- Extractor de datos de extensión netCDF. Se utilizó el software “CORDEX Data Extractor” para extraer datos de archivos NetCDF como de temperatura y precipitación.

### 3.5. Materiales y Metodología

(ANA, 2015) realiza una descripción general de la cuenca del río Santa:

La cuenca del río Santa se localiza en la región Norte - Centro del Perú, abarcando casi totalmente a las provincias de Bolognesi, Recuay, Huaraz, Carhuaz, Yungay, Huaylas, Corongo, Pallasca y Santa del departamento de Ancash y de las provincias de Santiago de Chuco y Virú del departamento de La Libertad. La cuenca tiene una longitud promedio de 316 km hasta su desembocadura en el Océano Pacífico, con un ancho promedio de 38 km. Comprende altitudes desde el nivel del mar hasta los 6 768 msnm (nevado Huascarán) (p. 85-89).

Considerando cuencas colectoras de los ríos tributarios más importantes de la cuenca del río Santa ha sido dividida en 29 subcuencas. Existen pequeñas subcuencas que también están incluidas por presentar nevados, al poseer cobertura glaciaria generan escorrentía e intervienen en el comportamiento hídrico de cada cuenca (ANA, 2015). La subcuenca que se empleara para el presente estudio es la subcuenca Llanganuco, el cual se puede observar en la **Figura 18**.

(INDECI et al, 2005) indica lo siguiente:

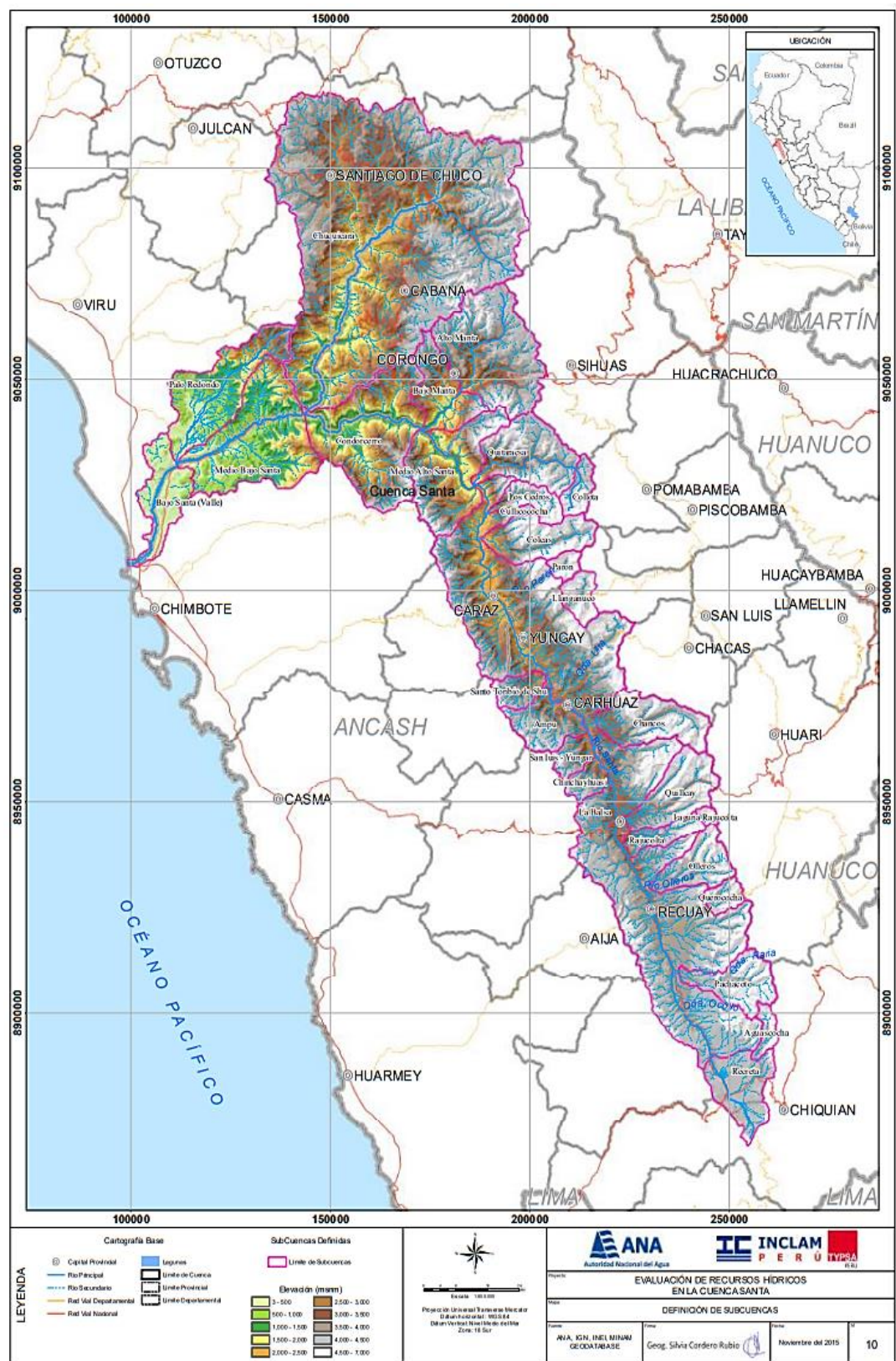
El río Llanganuco tiene su origen en las lagunas del mismo nombre ubicadas en la parte alta y el aporte de la desglaciación de nevados como el Huascarán. Recorre el tramo entre las lagunas y el río Santa en donde desemboca, de este a oeste, cambiando su nombre a río Ranrahirca al llegar a la parte baja del valle, antes de pasar al lado sur de la ciudad de Yungay y norte de Ranrahirca (p.88).

En la **Figura 19** se observa el recorrido del aporte del río Llanganuco hasta el río Santa.



**Figura 18**

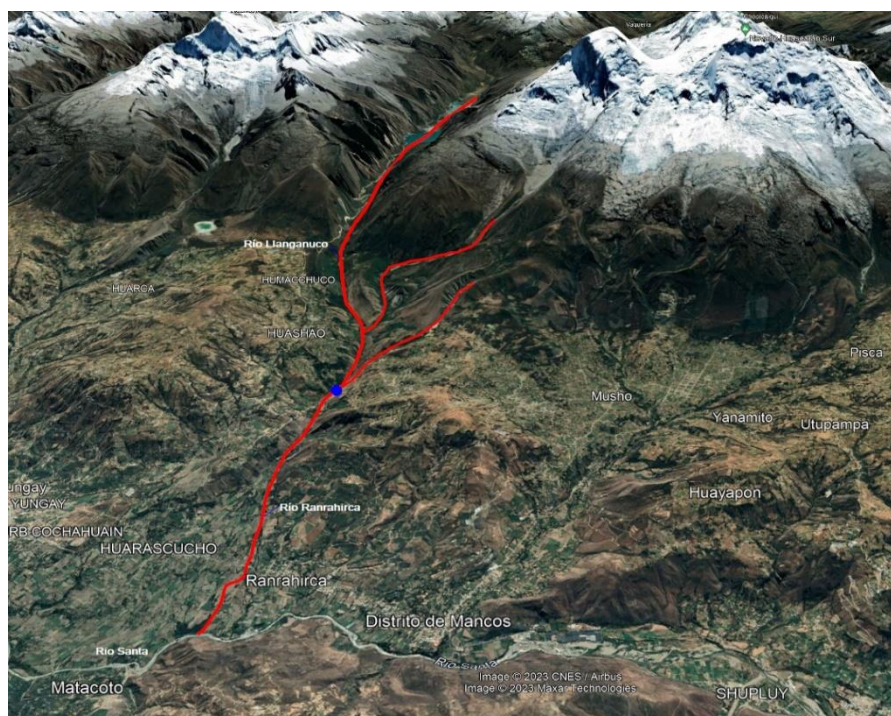
*Subcuencas definidas de la cuenca Santa*



Nota. Tomado de anexos (ANA, 2015)

**Figura 19**

*Hidrografía del Río Llanganuco, en la cuenca del Río Santa*



Nota. Adaptado de Google Earth

A continuación, se describe la zona de estudio de forma específica y los datos empleados para realizar el trabajo de investigación, para constatar la existencia de la estación de aforo Llanganuco se visitó la zona de estudio, se visualizar en el Anexo 2.

### **3.5.1. Descripción de la Zona de Estudio**

**3.5.1.1. Ubicación Geográfica.** La zona de estudio está comprendida geográficamente como se muestra en la **Tabla 8**.

**Tabla 8**

*Ubicación Geográfica de la zona de estudio.*

<b>Coordenadas y altitudes</b>	
<b>Este</b>	: 206887.00 m - 217231.00 m
<b>Norte</b>	: 8991113.00 m - 9003573.00 m
<b>Altitud</b>	: Entre los 3,850 - 6,620 m.s.n.m.

El sistema hidrológico ha sido delimitado partiendo de la estación de aforo Llanganuco, está ubicada en el departamento de Ancash, provincia de Yungay (sierra



oriental de Ancash y de la vertiente del pacífico), subcuenca Llanganuco. Como se muestra en la **Figura 20**.

Las coordenadas UTM se muestran en la **Tabla 9**.

**Tabla 9**

*Coordenadas UTM de la Estación Llanganuco.*

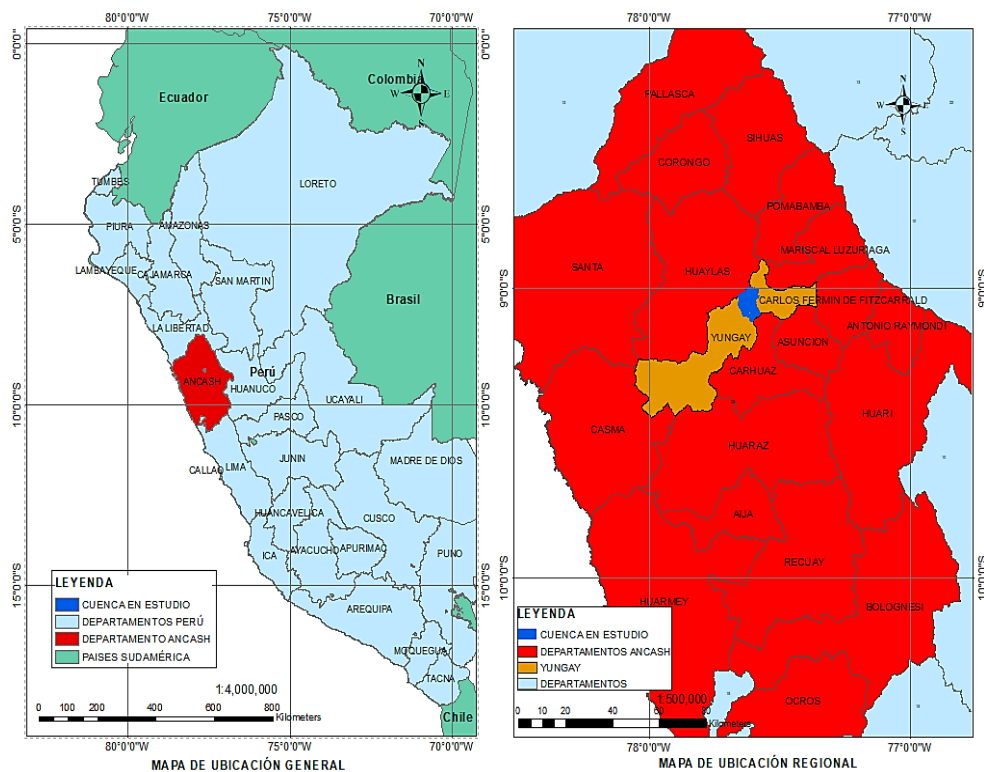
COORDENADAS UTM (WGS 84)	ESTACIÓN LLANGANUCO		
	NORTE	ESTE	COTA (msnm)
	8995485.6677	208574.1007	3850

El río Llanganuco tiene afluentes como los nevados Huandoy, Pisco, Chacaraju, Yanapacha, Chopicalqui y Huascarán. Finalmente contribuyendo al río Santa.

El río Llanganuco, desde la estación hidrométrica de registro de caudales, hasta su desembocadura al río Santa, tiene una longitud total de 20 Kms recorre los pueblos de Huamachuco, Huashao, Encayoc y Ranrahirca antiguo.

**Figura 20**

*Ubicación Geográfica de la cuenca en estudio.*



### 3.5.1.2. Ubicación Política

Departamento	:	Ancash
Provincia	:	Yungay
Distrito	:	Yungay
Cordillera	:	Blanca

### 3.5.2. Materiales

**3.5.2.1. Información Geográfica.** La información fue analizada para su buen uso en el modelo. La cual se encuentra descrita en la **Tabla 10**.

**Tabla 10**

*Información geográfica que se aplicara en el modelo.*

Información	Fuente	Descripción	Formato
<b>Topografía (DEM)</b>	ALOS PALSAR / NASA	Modelo Digital de elevación (DEM) con resolución 12.5 m x 12.5 m.	Raster
<b>Cartas Nacionales</b>	MINAM	Mapas de lagos, ríos, nevados de Ancash	Polygon Shapefile

**3.5.2.2. Información Climática Observada.** La información utilizada en la investigación corresponde a registros históricos de precipitaciones y temperaturas diarias. Así mismo se contó con registros de caudales para la realización de la calibración y validación del modelo. Las estaciones que están comprendidas en esta investigación son la estación Llanganuco, Huandoy y Portachuelos, conseguidas de las instituciones públicas como el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos UGRH – ANA y la Empresa generadora de energía eléctrica Orazul de Cañón del Pato-Huallanca.

En la **Tabla 11** se observan las informaciones de las estaciones y en la **Tabla 12** se muestran las coordenadas UTM de las estaciones.

**Tabla 11**

*Información de las estaciones empleadas en el estudio*

Nombre	Dpto.	Provincia	Distrito	Información Climática	Periodo
Llanganuco	Ancash	Yungay	Yungay	T°, PP y Q	2004-2019
Huandoy	Ancash	Yungay	Yungay	T°	2004-2019
Portachuelos	Ancash	Yungay	Yungay	T° y PP	2004-2019

**Tabla 12**

*Coordenadas UTM de las estaciones empleadas en el estudio.*

Nombre	E(m)	N(m)	Altitud (msnm)
Llanganuco	208574.11	8995485.67	3850
Huandoy	208748.52	8998080.63	4750
Portachuelos	215420.51	8998811.13	4750

En la **Figura 21** se muestra la ubicación de las estaciones meteorológicas y la estación Hidrometeorológica.

**Figura 21**

*Ubicación de las Estaciones en la cuenca de estudio.*



**3.5.2.3. Información Climática Proyectada.** Se trabajó con el modelo climático regional RCA4 del modelo de circulación general MPI-ESM-LR y dos trayectorias de concentración representativa (RCP 4.5 y RCP 8.5), con una resolución de 0.44°. En la **Tabla 13**, se presentan los escenarios climáticos que se utilizaron en la investigación.

**Tabla 13**

*Modelo de circulación regional utilizado en la investigación.*

Modelo Global	Modelo Regional	Resolución	Escenarios
MPI-ESM-LR	RCA4	0.44°	RCP 4.5 RCP 8.5

**3.5.2.4. Programas y equipo de cómputo. Para la ejecución.** Los datos y los cálculos se ejecutaron usando los siguientes softwares y equipos:

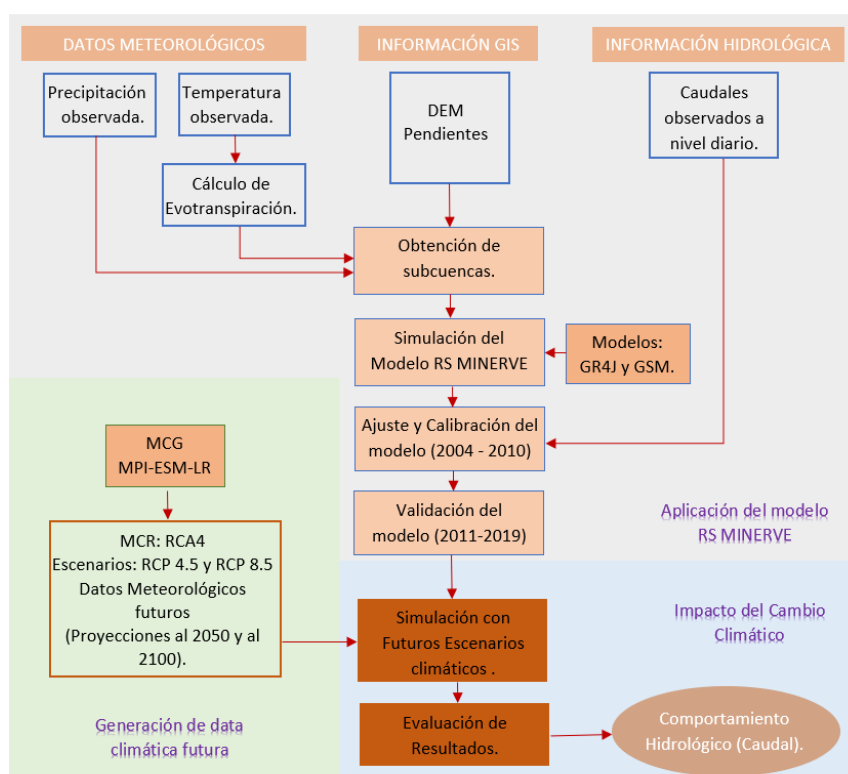
- ArcGIS Desktop 10.8
- RS Minerve versión 2.9.1.0
- CORDEX Data Extractor
- Microsoft Office 2016
- Google Earth Pro

### **3.5.3. Metodología**

Para el presente trabajo de investigación se siguió la siguiente metodología: (1) La aplicación de los modelos hidrológicos GSM (Zonas glaciares) y GR4J (zonas no glaciares) disponibles en la Plataforma del RS MINERVE en la cuenca de estudio, (2) Extracción de datos climáticos proyectados con el escenario seleccionado; y (3) Evaluación del impacto del Cambio climático, los cuales se pueden realizar del resultado del diagrama de flujo que se muestra en la **Figura 22**.

**Figura 22**

*Diagrama de flujo de la metodología empleada en el estudio.*



### 3.5.3.1. Sistematización de la Información Requerida

**3.5.3.1.1. Modelo de Elevación Digital (DEM).** Este modelo digital se emplea para delimitar subcuencas y distribuir la red hídrica del área estudiado en Arcgis. Accediendo al Portal Vertex de la NASA, donde podemos obtener imágenes DEM. Las imágenes que nos brindan están a una resolución espacial de 12.5 metros. El sistema de coordenadas para la elaboración DEM es el: “Projected Coordinate Systems UTM WGS 1984 UTM Zona 18S”.

### 3.5.3.1.2. Procesamiento del área de estudio

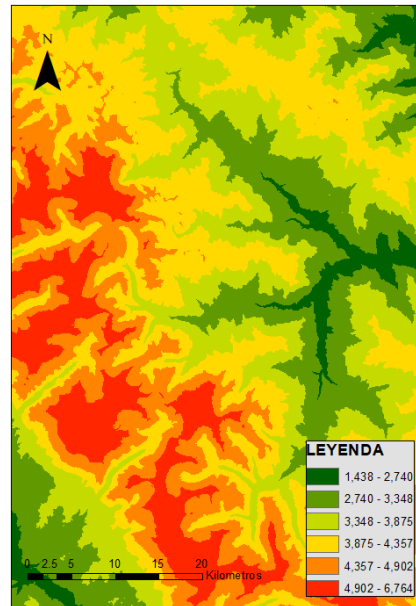
Para realizar la delimitación de la cuenca se tomó como ejemplo los pasos realizados por (Aliaga , 2017)

- a. En ArcGIS se llenan los vacíos del DEM, y así se obtiene un DEM revisado, el cual se observa en la **Figura 23**.



**Figura 23**

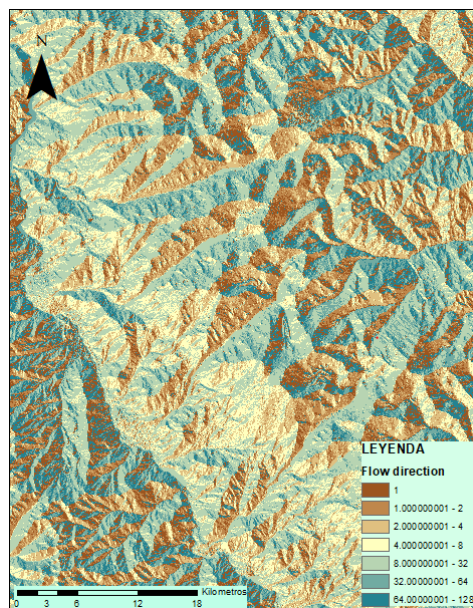
*DEM Revisado*



- b. Teniendo el DEM revisado, usamos la herramienta hidrológica Fill Sinks para rellenar imperfecciones existentes en la superficie del modelo digital de elevaciones.
- c. Definimos en este paso la dirección del flujo de forma descendente con la herramienta Flow direction como se muestra en la **Figura 24**.

**Figura 24**

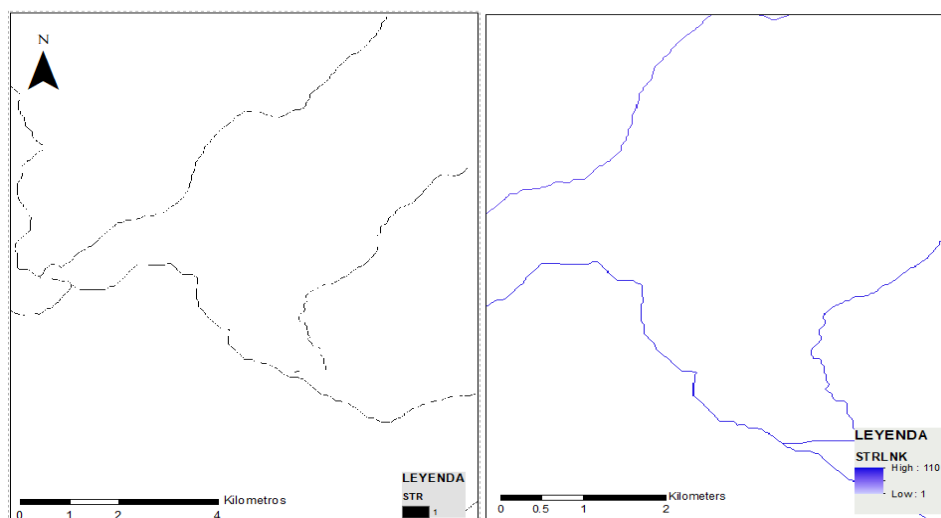
*Representación del Flow direction.*



- d. Utilizando el Flow accumulation se crea el ráster de acumulación de flujo en cada celda.
- e. Luego creamos un mapa ráster donde se ubican celdas en la red de flujo con la herramienta Stream definition y Aplicando el Stream segmentation dividimos el cauce en segmentos sin interrupción como se observa en la **Figura 25**.

**Figura 25**

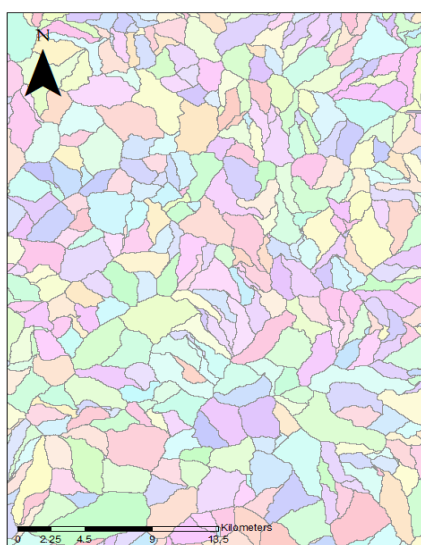
*Representación del stream definition y segmentation.*



- f. Se crea un ráster donde se delinea las subcuencas por cada segmento de cause definido como se observa en la **Figura 26**.

**Figura 26**

*Delimitación de subcuencas*

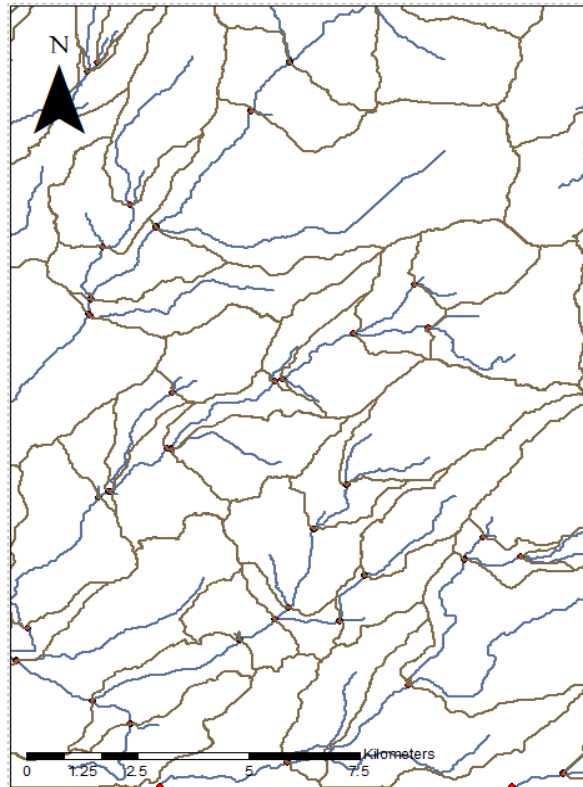




- g. Vectorización del sistema hidrológico: convertimos las subcuencas en formato shapefile (.shp). también, se crean las líneas de drenaje y los puntos de confluencia. Se puede observar en la **Figura 27**.

**Figura 27**

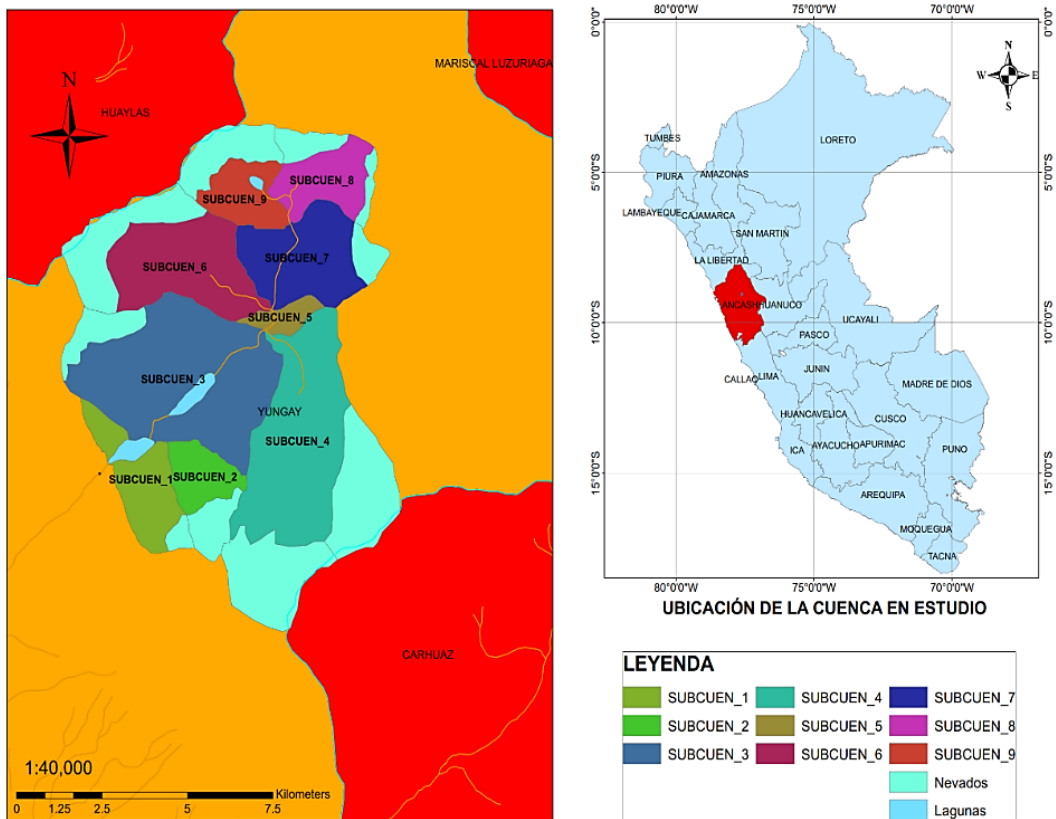
*Vectorización del sistema hidrológico.*



- h. Se determina el área de influencia: con el punto de control (estación de aforo Llanganuco logramos establecer el área de influencia. Obtuvimos una cuenca de 89.96 km<sup>2</sup> de área y nueve subcuencas delimitadas como se muestra en la **Figura 28**.
- i. Para conseguir información del nombre de los ríos, quebrada, lagunas, distritos, provincias, etc., se descargaron cartas nacionales zona 18 - código 19 h, mapas como de Sudamérica, departamentos del Perú, distritales, provinciales y mapas hidrográficos todos en formato vectorial (shapefile) pertenecientes a la zona de estudio.

**Figura 28**

*Delimitación de subcuencas del área de influencia.*



**3.5.3.1.3. Parámetros Geomorfológicos del Área de Estudio.** La

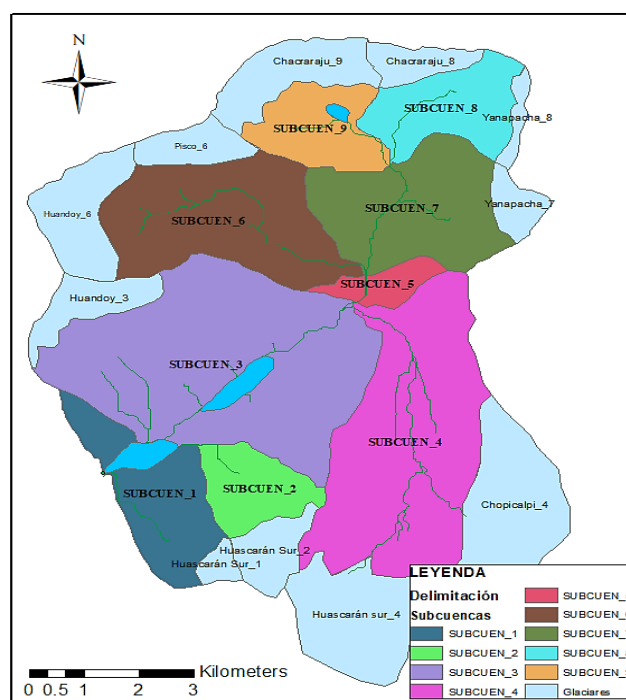
determinación de parámetros serán los necesarios para modelar en la plataforma RS-MINERVE.

a. La plataforma RS-MINERVE para generar la modelación requiere de una ubicación y distribución espacial de las variables meteorológicas, esto se consigue con los siguientes parámetros: área, perímetro y ubicación del centroide de las subcuencas. Estos parámetros son obtenidos del programa Arcgis. Como se observa el sistema hidrológico Llanganuco Este compuesto por zonas con glaciar y no glaciar, es por ello, que cada subcuenca fue dividida por zona glaciar y no glaciar.

En la **Figura 29** se puede observar las subcuencas sin glaciar y con glaciares que se encuentran dentro del sistema hidrológico en estudio.

**Figura 29**

*Subcuencas sin glaciar y glaciares alrededor de la cuenca en estudio.*



En la **Tabla 14** y **15** se presentan las coordenadas, área y perímetro de las nueve subcuencas sin glaciar y con glaciares que se encuentran alrededor de las subcuencas. Con ayuda del Google Earth y el archivo -shp de glaciares del repositorio del ANA se obtuvo datos aproximados del área de la zona con glaciar.

**Tabla 14**

*Datos de la subcuenca sin glaciar.*

ID	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	X (m)	Y (m)	Z (m)
SUBCUEN_1	5.23	11.95	209467.2	8995067.2	4422.0
SUBCUEN_2	2.88	7.36	211281.1	8995186.5	4746.0
SUBCUEN_3	17.89	18.76	210744.9	8997763.8	4237.0
SUBCUEN_4	13.92	19.32	214077.4	8996137.6	4468.0
SUBCUEN_5	1.28	5.92	213676.6	8999450.4	4100.0
SUBCUEN_6	8.91	13.84	210746.5	9000763.2	4678.0
SUBCUEN_7	7.33	11.88	214173.8	9001033.8	4174.0
SUBCUEN_8	4.10	10.03	214818.6	9003120.4	4582.0
SUBCUEN_9	3.48	8.64	212505.2	9002712.4	4766.0

**Tabla 15***Datos de las zonas con glaciar.*

ID	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)	X (m)	Y (m)	Z (m)
HUASCARÁN_1	0.50	2.99	210670.7	8993569.9	5394.0
HUASCARÁN_2	1.66	5.90	211635.5	8993855.9	5418.0
HUASCARÁN_4	5.29	10.85	213317.3	8992505.6	5797.0
CHOPICALQUI_4	5.31	10.17	215941.8	8994808.6	5192.0
YANAPACHA_7	1.01	4.42	216045.1	9001098.2	5048.0
YANAPACHA_8	0.51	4.96	216065.2	9002913.8	5094.0
CHACRARAJU_8	1.24	5.65	214243.0	9004090.0	5130.0
CHACRARAJU_9	2.97	9.09	211976.3	9003810.3	5135.0
PISCO_6	1.50	5.53	210205.2	9002332.4	5211.0
HUANDOY_6	3.07	8.26	208197.5	9000910.6	5468.0
HUANDOY_3	1.86	7.84	208320.5	8999007.7	5254.0

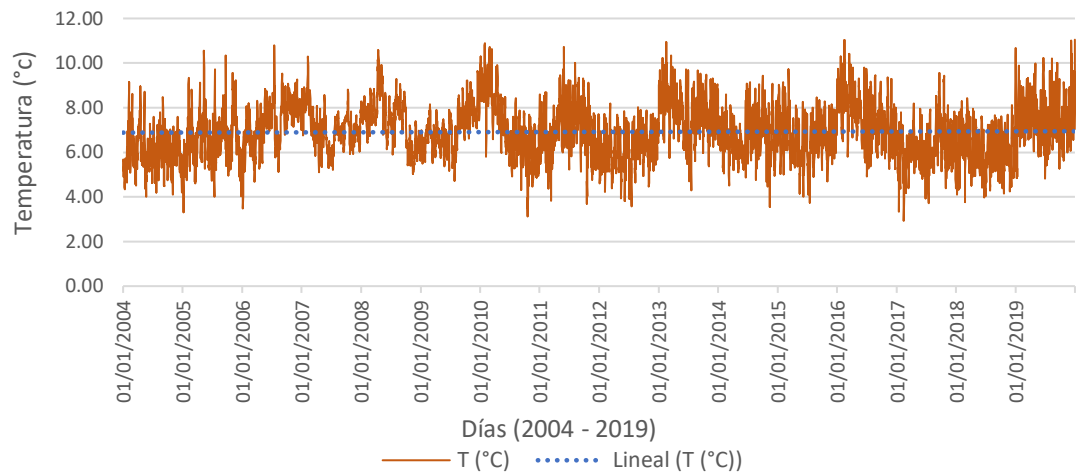
- b. Las cotas de la cuenca se consiguen del DEM (modelo digital de elevación).
- c. Del interfaz ArcGis se obtienen los parámetros: longitud del cauce principal y sus afluentes. Dentro de la plataforma existe el tránsito de agua en ríos, es por ello, que se necesitan estos datos.
- d. Pendiente de los ríos: Estos parámetros fueron obtenidos del programa ArcGis.

**3.5.3.1.4. Información Hidrometeorológica y Meteorológica.** La información que se requiere para desarrollar el estudio fueron la precipitación, temperatura y caudal diario de las estaciones Llanganuco, Huandoy y Portachuelos. Se tomó un periodo común de las estaciones desde el 2004 hasta el 2019 de la información recopilada. Los datos diarios de Caudales de la estación Llanganuco se muestra en el Anexo 1.

En la **Figura 30, 31 y 32** se pueden observar en las gráficas los datos recopilados a nivel diario de temperatura, precipitación y caudal, según la información recopilada para cada estación como indicó la **Tabla 11** páginas atrás. Antes de ser utilizados los datos fueron completados para el periodo de análisis, para su uso óptimo en la modelación.

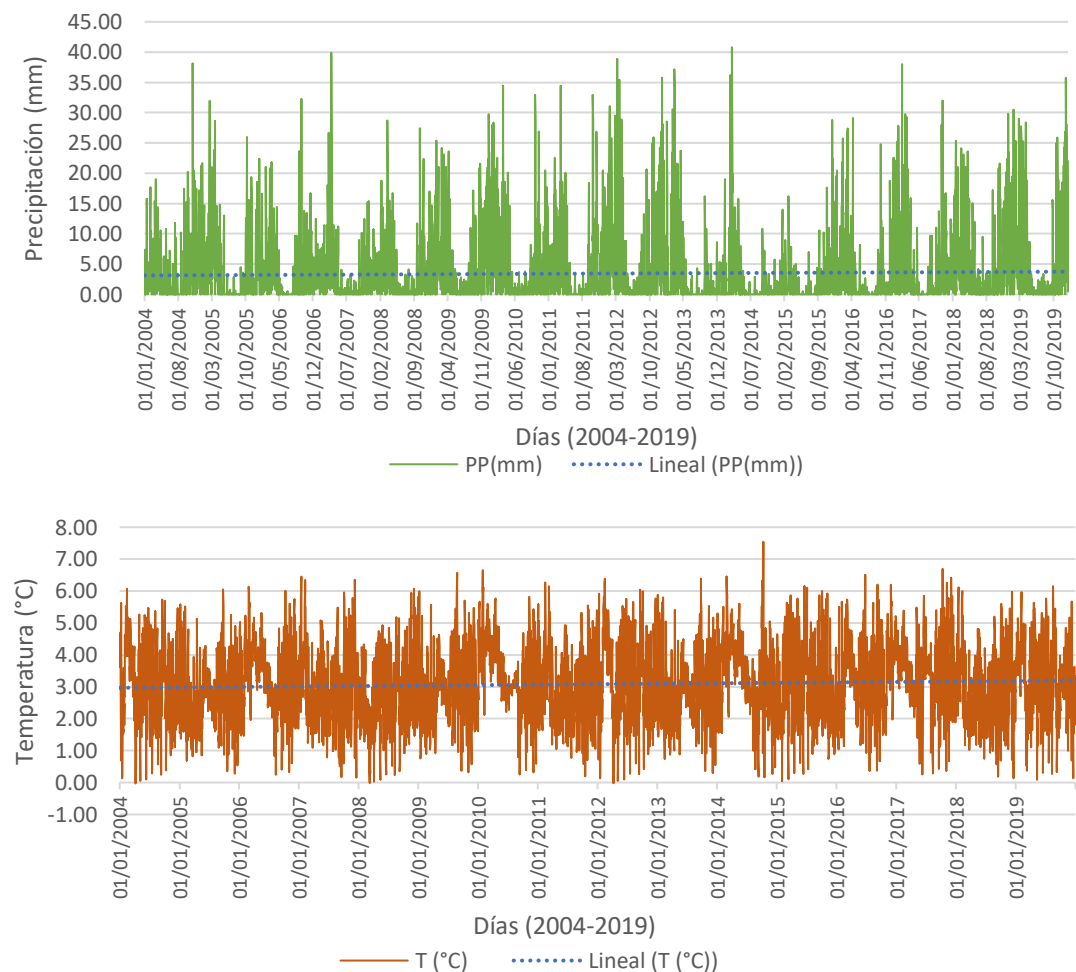
**Figura 30**

*Registro Histórico de la Temperatura y Línea de la estación Huandoy.*



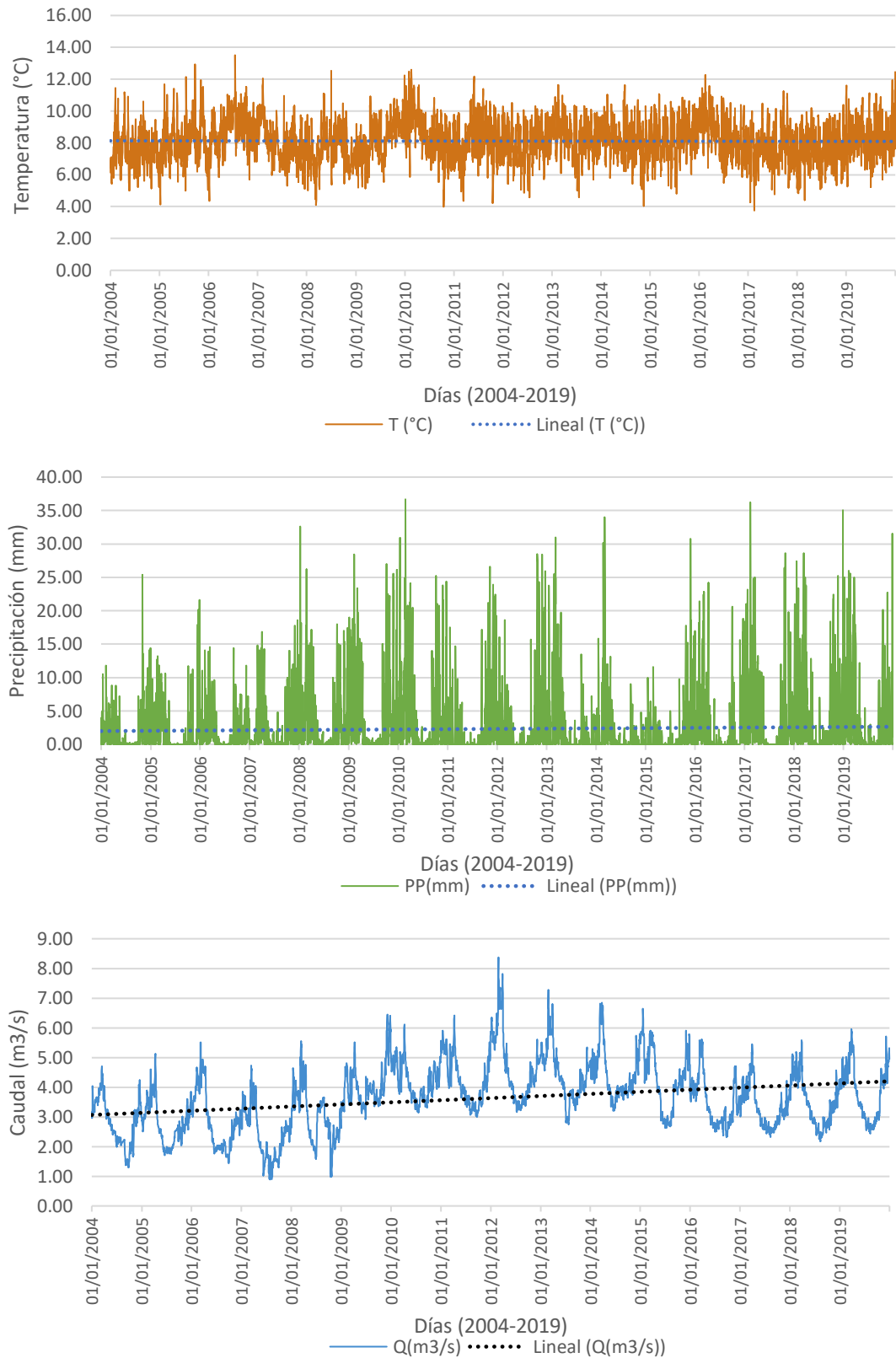
**Figura 31**

*Registros Históricos de la Precipitación, Temperatura y línea de tendencia de la Estación Portachuelos.*



**Figura 32**

*Registros Históricos de Precipitación, Temperatura, Caudal y Línea de tendencia de la estación Llanganuco.*





**3.5.3.1.5. Modelamiento Hidrológico Rs-Minerve.** Las subcuencas se clasificaron en dos tipos: simples y mixtos. Cuando una subcuenca está representada bien por un modelo glaciar o no glaciar se le conoce como subcuenca simple, en cambio, al estar compuesta por dos modelos a la vez se le conoce como subcuenca mixta. Como ya se mencionó en el apartado 1.1 para desarrollar este estudio recurrimos a dos modelos hidrológicos: el modelo hidrológico GSM y el Modelo GR4J. Se utilizará el modelo GSM debido que nuestro sistema hidrológico posee superficies con glaciares y para las superficies no glaciares se utilizó el modelo GR4J, ya que solo requiere de información de precipitación, temperatura y evotranspiración como se indicó anteriormente.

Según investigaciones realizadas en nuestro país, como el trabajo en la cuenca del Rímac y en el de Rio Chillón (Astorayme et al, 2015; Astorayme et al, 2016) utilizaron el modelo GR4J y se obtuvo resultados satisfactorios en comparación a otros que aparecen en el programa. Como solo se utiliza cuatro indicadores de calibración, el trabajo de iteración se hace más liviano, pero se obtienen resultados aceptables (Astorayme et al, 2015).

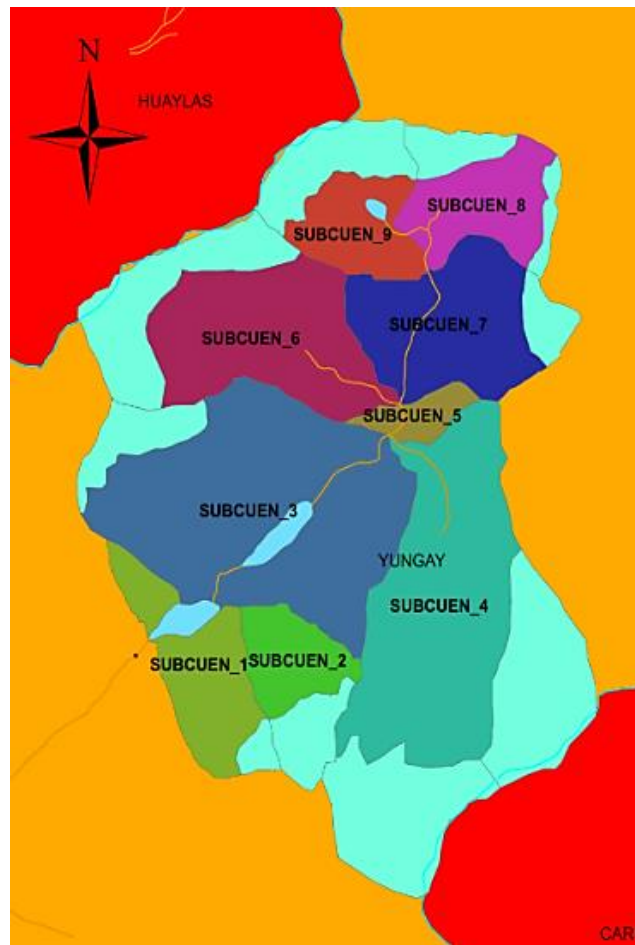
El sistema hidrológico Llanganuco cuenta con almacenamiento de recurso hídrico, las cuales tienen un caudal de salida casi constante y no necesitan estructuras para regularlos. Es por ello, que para la modelación las lagunas no se tomarán en cuenta ya que se considerara como un almacenamiento de paso.

Teniendo la subdivisión en subcuencas con zonas sin glaciar y con glaciar como se muestra la **Figura 33**, se empieza a realizar el modelo hidrológico de la siguiente forma:



**Figura 33**

*División en zonas*

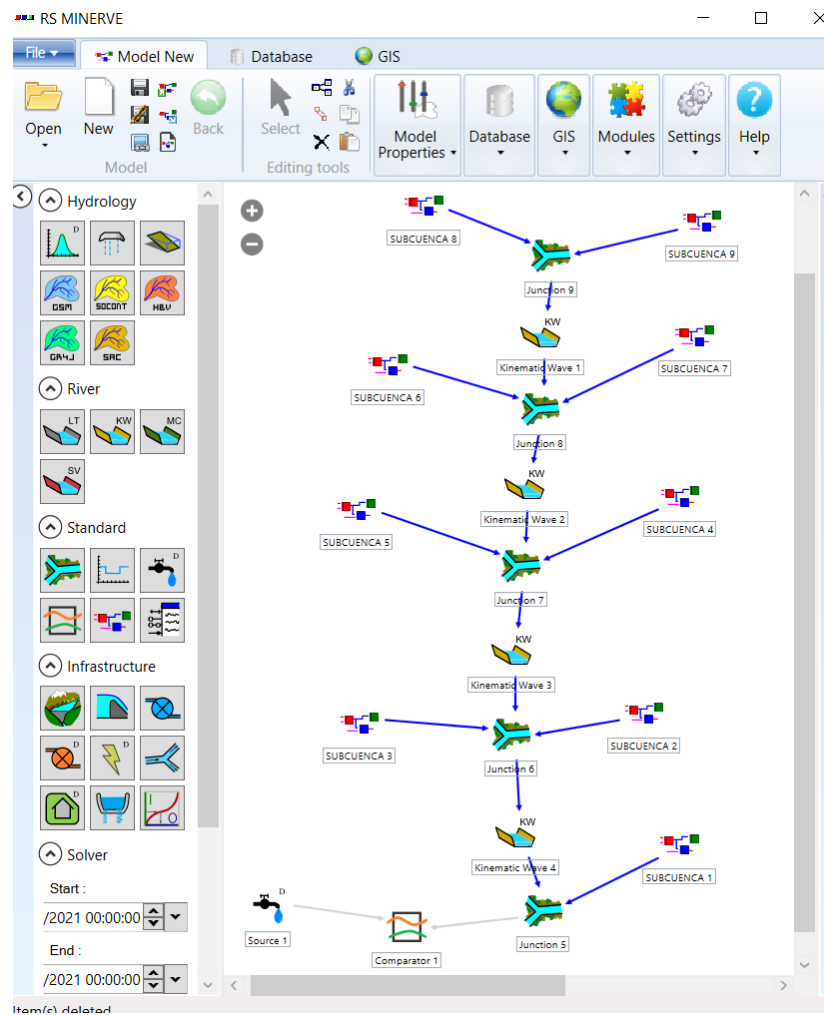


a. Se crean los componentes del modelo, en el presente trabajo se realizó la creación de componentes de forma manual, ya que en cada cuenca posee zonas con glaciares y no glaciares. Cada subcuenca estará asignada por el modelo hidrológico GR4J (para la zona no glaciar) y el modelo GSM (para la zona glaciar) y su respectiva estación virtual que estará ubicado en el centroide. Se creará un tránsito de flujo con la metodología de onda cinemática para cada río y en cada confluencia se colocará un punto de unión entre dos ríos. También, se colocó un comparador, el cual tiene como objetivo comparar resultados de una simulación con datos de referencia provenientes de otro objeto. En la **Figura 34** se observa los componentes del modelo hidrológico (Aliaga , 2017).



**Figura 35**

*Agrupación de los objetos hidrológicos en nueve submodelos.*

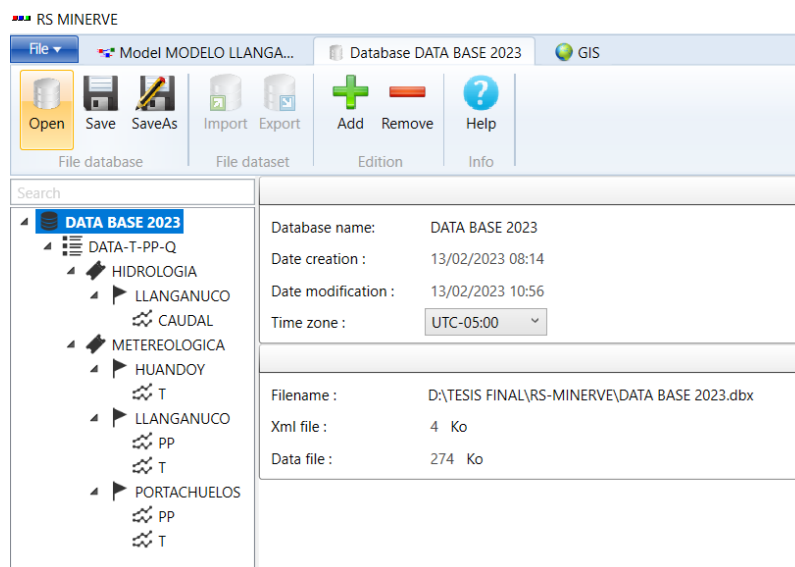


b. Ingreso de los datos meteorológicos que comprenden datos diarios desde el año 2004 al 2019 de las precipitaciones y temperaturas, se tomó un intervalo de tiempo común entre las estaciones con los datos más completos. Se preparó una base de datos de aforos diarios de la estación Llanganuco y también de las estaciones meteorológicas Huandoy y Portachuelos. En cambio, no se consiguió datos de evapotranspiración; no obstante, con otras metodologías que posee sistema informático RS-MINERVE se obtuvo esos datos. Se creará una base de datos de cada estación con datos de temperatura,

precipitación y para la estación de aforo el caudal se obtendrá una estructura jerárquica al lado izquierdo como se muestra en **Figura 36**.

**Figura 36**

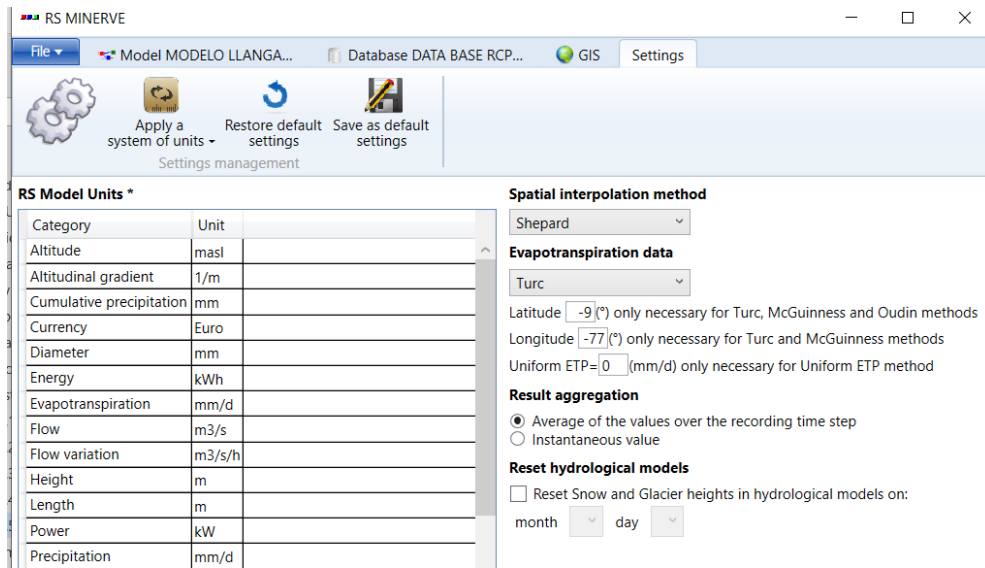
*Entradas de datos meteorológicos e hidrológicos.*



c. Para empezar con las iteraciones se debe de tener datos como la precipitación diaria, el caudal diario de la estación de aforo Llanganuco y por último la evotranspiración. Como no tenemos datos de evapotranspiración disponibles, recurrimos al sistema informático RS Minerve, quien nos brinda distintos métodos para obtener dichos datos. En la **Figura 37** se muestra el método seleccionado y sus respectivas unidades de las variables.

**Figura 37**

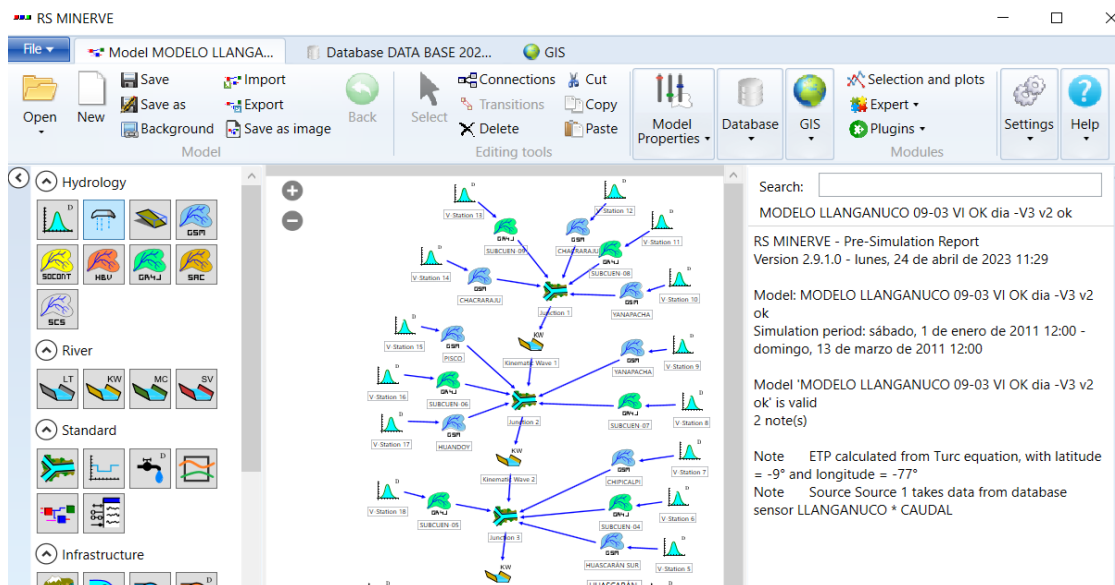
*Método del cálculo de evotranspiración.*



d. Antes de realizar una simulación debemos verificar que el modelo hidrológico y sus componentes estén bien representados en la plataforma, esto se verifica pulsando la opción “validar” y al lado derecho de la pantalla se podrá leer un mensaje que dice el Modelo es válido. El la **Figura 38** se puede observar lo descrito.

**Figura 38**

*Mensaje de validación del modelo.*

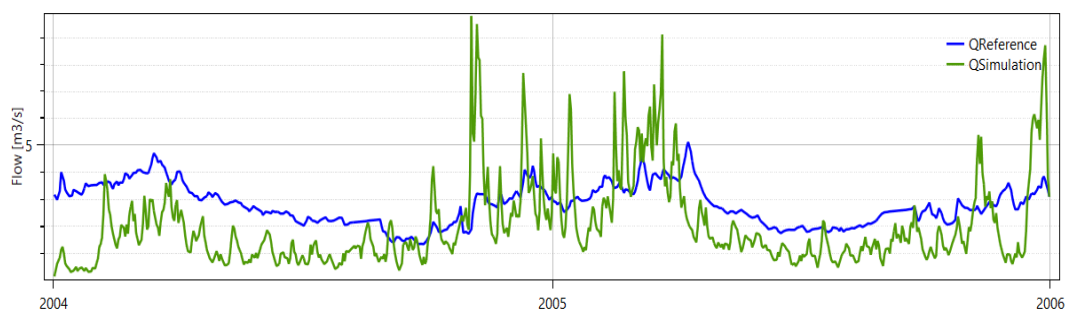


e. Se realizó una simulación con los datos aforados a nivel diario de la estación

Llanganuco en el periodo de enero de 2004 a diciembre de 2005 sin realizar ajustes en los parámetros y con una frecuencia de impresión de salida diaria. Esta simulación puede representar como un calentamiento del modelo.

**Figura 39**

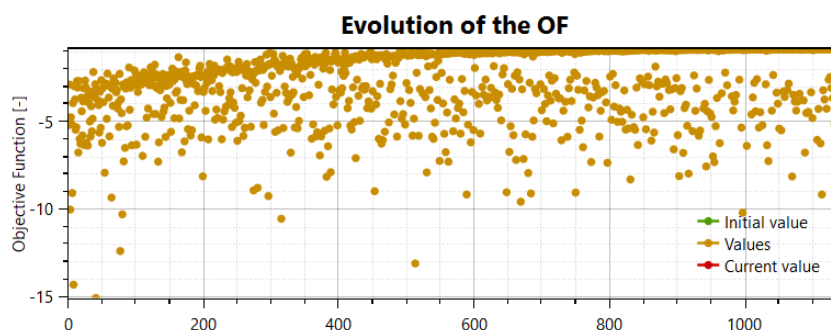
*Simulación de modelo a nivel diario.*



f. Como se puede observar en la **Figura 39**, no hay similitud entre los caudales simulados con los caudales observados, es por ellos que se realiza el siguiente paso que es la calibración. En el proceso de calibración de los datos diarios observados en la estación Llanganuco (datos de entrada) deben de tener relación con los datos simulados. La calibración se realiza de enero del año 2004 hasta el diciembre del año 2010. Mientras la iteración se acerque más al valor de la función objetivo, los caudales observados y simulados serán más parecidos. En la **Figura 40** se muestra la evolución de la función objetivo y eso se observa en la figura al ver que las iteraciones ya no son tan dispersas.

**Figura 40**

*Evolución de la función objetivo*





g. Una vez la etapa de calibración se haya realizado se procederá con la validación, donde se compara los datos simulados con los datos observados en la estación de aforo Llanganuco en un periodo de enero 2011 a diciembre del 2019.

### **3.5.3.2. Simulación de Escenarios Futuros y Efectos del Cambio Climático.**

Luego de la calibración y validación del modelo, se realizó la simulación para obtener los caudales futuros con dos escenarios futuros RCP 4.5 (optimista) y RCP 8.5 (pesimista), donde el escenario RCP4.5 representa la estabilización del forzamiento radiactivo total antes del 2100 y el escenario RCP 8.5 representa el aumento sin control de gases de efecto invernadero a través del tiempo (*SENAMHI, 2014*).

El modelo climático global utilizado pertenece al proyecto CMIP5, que considera la nueva generación de proyección climáticas. Estos añaden componentes adicionales como los aerosoles, la vegetación, interacción de la atmósfera con el suelo. Se extrajeron los datos que modelo regional RCA4 del modelo climático global MPI-ESM-LR, este modelo fue estudiado y puesto en evaluación el SENAMHI en el Perú.

Para obtener el análisis de los efectos del cambio climático en la oferta hídrica en el sistema hidrológico Llanganuco. Se analizaron en dos escenarios proyectados, en un futuro cercano (enero del 2020 hasta diciembre del 2050) y en un futuro lejano (enero del 2051 hasta diciembre del 2100).

Para simular los caudales futuros, se realizó en el modelo semi distribuido RS Minerve ya con los parámetros calibrados.

## CAPITULO IV

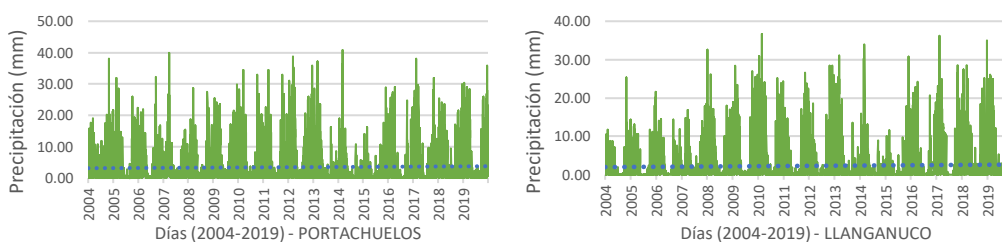
### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

#### 4.1. Información Meteorológica e Hidrométrica Histórico de Entrada para el Modelo Hidrológico.

- a. Se realizó el análisis de histogramas para poder observar alguna inconsistencia en la información pluviométrica o detectar la existencia de datos incompletos. Solo se tiene datos diarios de precipitación de la estación Portachuelos y Llanganuco de las tres estaciones utilizadas en la investigación, en el histograma se visualiza que las series de precipitación son cíclicas, no se observan saltos y la tendencia es natural, por tal motivo no se considera que algún periodo de la información pluviométrica sea dudoso. El la **Figura 41** se muestran los histogramas desde el año 2004-2019.

**Figura 41**

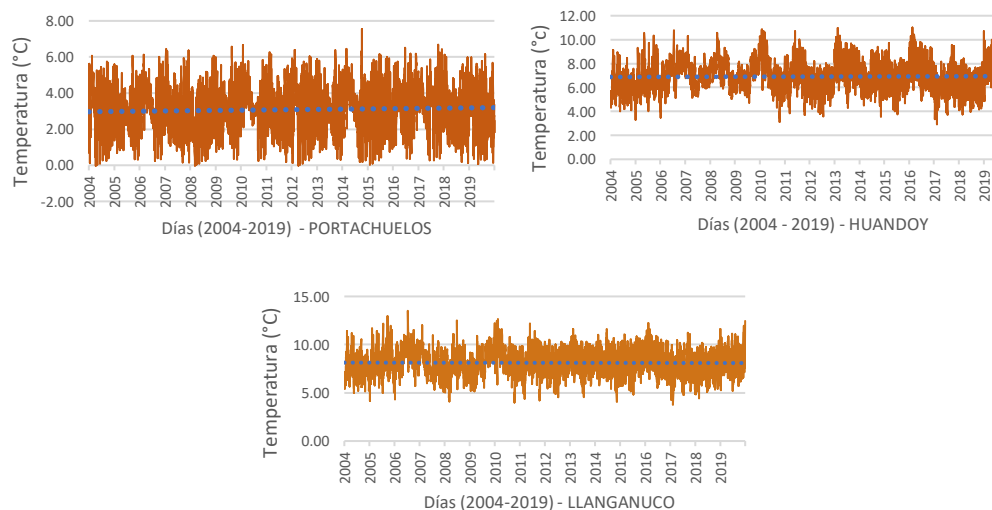
*Histogramas de precipitación diaria 2004 – 2019.*



b. Se analizaron los histogramas de los datos de temperatura media diaria de las tres estaciones y no se observaron saltos ni tendencias dudosas. La tendencia natural del comportamiento de las variables de precipitación y temperatura, no se corrigen. Algunos datos faltantes se completaron con el método de regionalización con datos de estaciones cercanas. En la **Figura 42** se observa la serie de datos de temperatura de las tres estaciones.

**Figura 42**

*Análisis de la serie de Temperatura a nivel diario de la estación Portachuelo, Huandoy y Llanganuco del 2004-2019.*

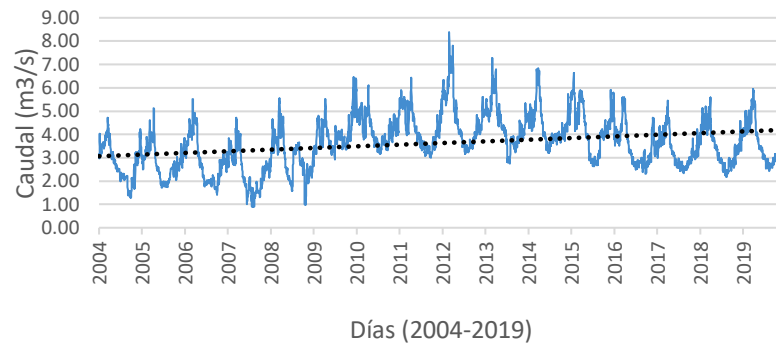


c. En la **Figura 43** se presenta el caudal observado del año 2004 al 2019 en la estación Llanganuco, en el cual podemos observar que no hay saltos y presenta una tendencia natural de incremento de la demanda hidrica, pues dicho glaciar

se encuentra en la etapa de fusión y con incrementos hasta alcanzar el pico máximo hacia el año 2060 (Pouyaud et al, 2005).

### Figura 43

*Análisis de la demanda hídrica de la estación Llanganuco.*



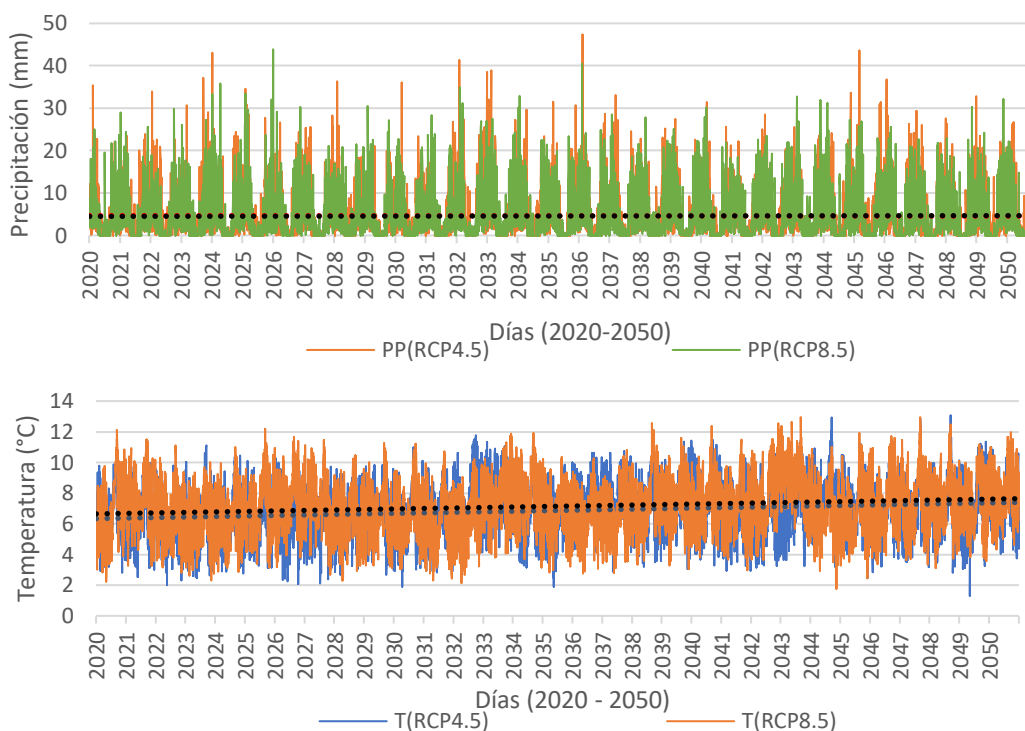
#### 4.2. Información Meteorológica de Entrada de modelo de cambio climático para el Modelo Hidrológico.

La información futura se extrajo del proyecto CMIP5, se encuentra en el portal de la NASA, produce una generación mejorada de proyecciones regionales de cambio climático en todo el mundo. CORDEX produce un conjunto de múltiples modelos de reducción de escala dinámicos y estadísticos considerando múltiples modelos de GCM de forzamiento del proyecto CMIP5.

En la **Figura 44** se muestran los registros del futuro cercano (2020 – 2050) de la precipitación y temperatura de la estación Portachuelos en escenarios RPC 4.5 y RPC 8.5. Así mismo, en la **Figura 45** se observa los registros del futuro lejano (2051 – 2100) de la precipitación y temperatura de la estación Portachuelos en escenarios RPC 4.5 y RPC 8.5.

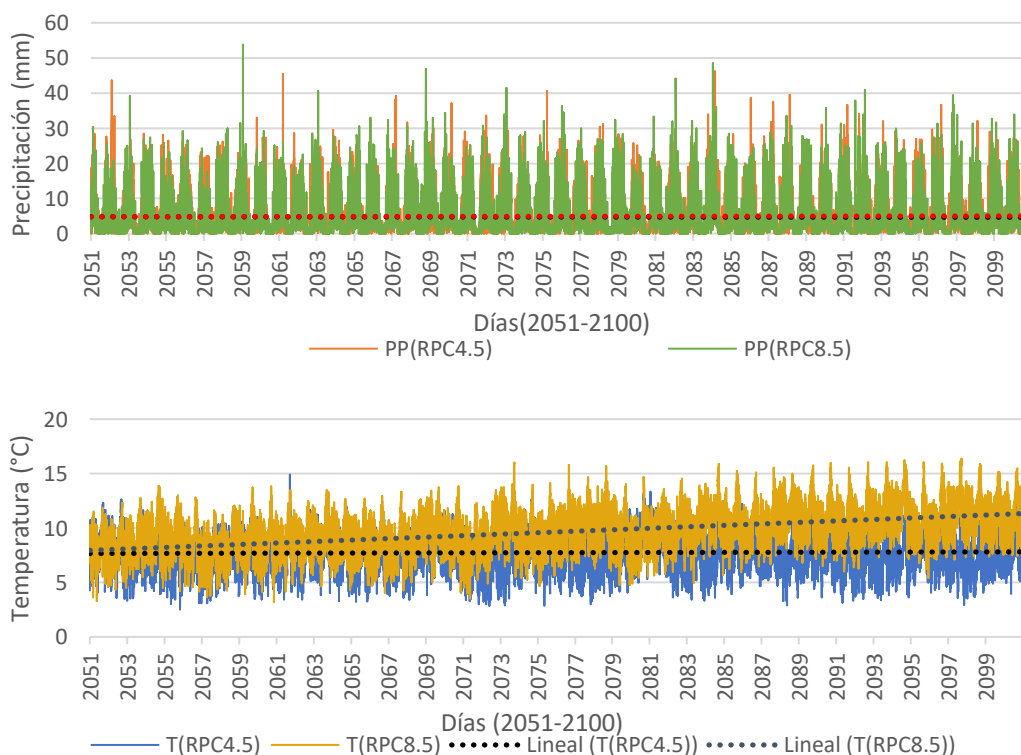
**Figura 44**

*Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2020 – 2050) de la estación Portachuelos.*



**Figura 45**

*Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2051 – 2100) de la estación Portachuelos.*

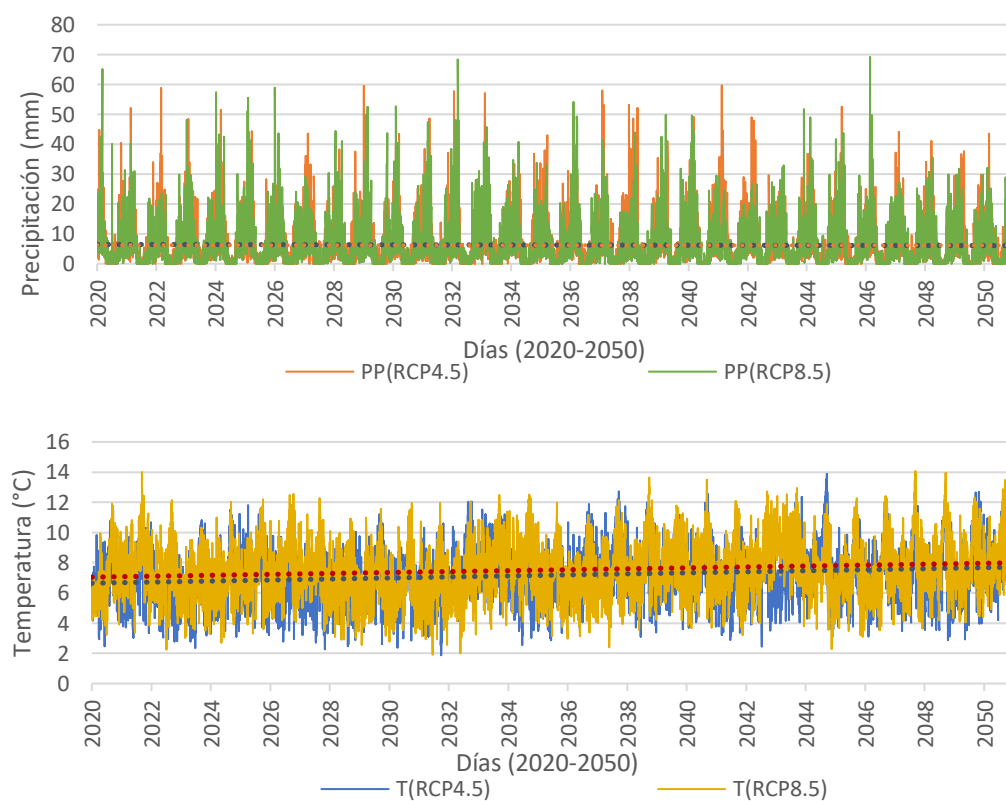


En la **Figura 46** se muestran los registros del futuro cercano (2020 – 2050) de la precipitación y temperatura de la estación Huandoy en escenarios RPC 4.5 y RPC 8.5. Así mismo, en la **Figura 47** se observa los registros del futuro lejano (2051 – 2100) de la precipitación y temperatura de la estación Huandoy en escenarios RPC 4.5 y RPC 8.5.

Para ambos intervalos de tiempo se puede observar que, por efectos del cambio climático la temperatura y la precipitación tendrán un incremento, en el caso de la temperatura en un escenario más crítico que es el RCP8.5 se observa que la temperatura tiene un incremento más marcado en un futuro lejano. Y esta tendencia de incremento se observa en todas las estaciones.

#### **Figura 46**

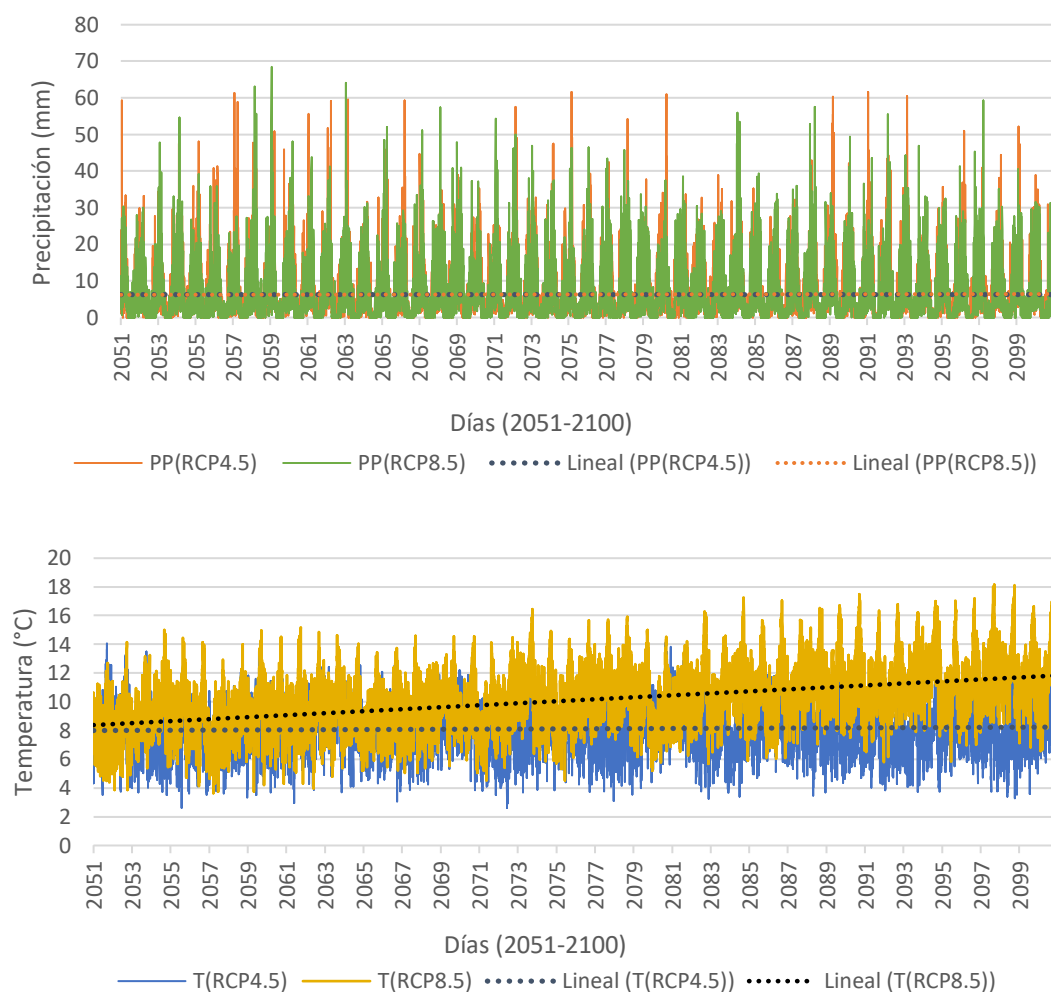
*Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2020 – 2050) de la estación Huandoy.*





**Figura 47**

*Proyección de precipitaciones y temperatura del futuro cercano (2051 – 2100) de la estación Huandoy.*

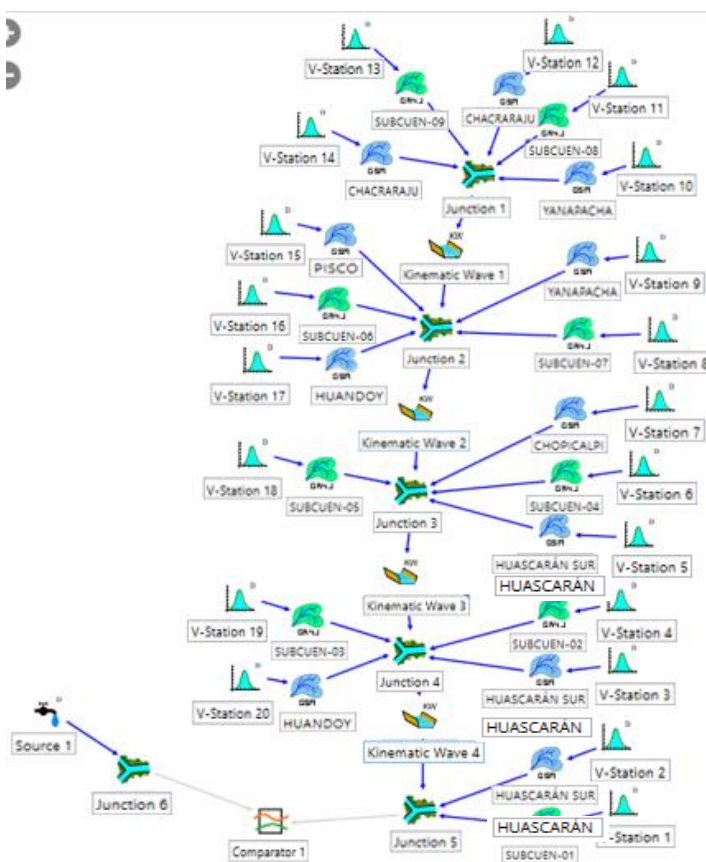


### 4.3. El Modelo Hidrológico de Llanganuco

En la plataforma RS Minerve se modela las subcuencas mixtas y simples con los modelos GSM y GR4J. Tanto la zona con glaciar y sin glaciar cuentan con sus respectivas estaciones meteorológicas virtuales, que, en el proceso de la calibración, trabaja interpolando datos de las estaciones de entrada del modelo. En la **Figura 48** se muestra dicho esquema.

**Figura 48**

*Modelo Hidrológico en RS Minerve.*



Teniendo definida la estructura del sistema hidrológico Llanganuco, se empezó a introducir la información hidrometeorológica y otros en cada subcuenca, ya que cada una necesita sus propios datos, en **Tabla 16** se muestra la información necesaria para la simulación.

**Tabla 16**

*Información ingresada al modelo de Llanganuco.*

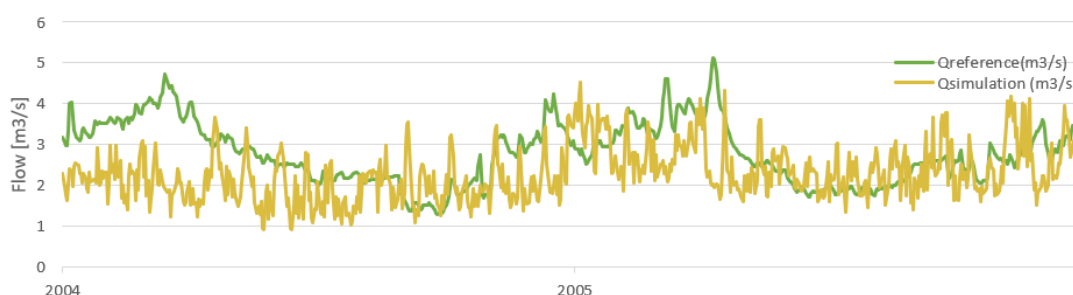
Tipo	Información
Hidrometeorológica	2 estaciones pluviométricas
	3 estaciones de temperatura
	1 estación hidrométrica
Glaciología	Área de las zonas de glaciar
Uso de suelo	Zona Glaciar y no Glaciar
	Área, Pendiente, etc

#### 4.4. Calentamiento y Simulación

En esta etapa se desarrolla la simulación en un intervalo de tiempo pequeño antes de la calibración, con el objetivo de buscar una inicialización del modelo y reducir la influencia que pueda ocasionar al tener condiciones iniciales desconocidas, de esa forma después del calentamiento se obtenga valores que servirán como condiciones iniciales para la calibración. Se realizó la simulación del calentamiento de enero de 2004 a diciembre de 2005 como se observa en la **Figura 49**.

**Figura 49**

*Simulación del calentamiento en un intervalo de tiempo del 2004 al 2005.*



#### 4.5. Calibración del Modelo Hidrológico

En este proceso se busca ajustar los factores en base a la optimización de los índices de eficiencia de la Función Objeto que están disponibles en la Plataforma del RS Minerve utilizando la calibración automática.

El modelo fue calibrado con la información hidrométrica registrada en la estación Llanganuco, ya que es la única estación hidrométrica en la cuenca.

Con los datos de los caudales históricos recopilados (enero 2004 a diciembre 2010) se realizó la calibración del modelo, en el cual se obtuvo una similitud de los picos y tendencia de los caudales simulados con los observado. Posteriormente al proceso de calibración, se empezó a ajustar los índices de eficiencia realizando simulaciones sucesivas, se puede mostrar en la **Figura 50** la simulación des el año 2004 al año 2010 después de haber calibrado el modelo.

**Figura 50**

*Simulación de la calibración en un intervalo de tiempo de 2004 - 2010.*

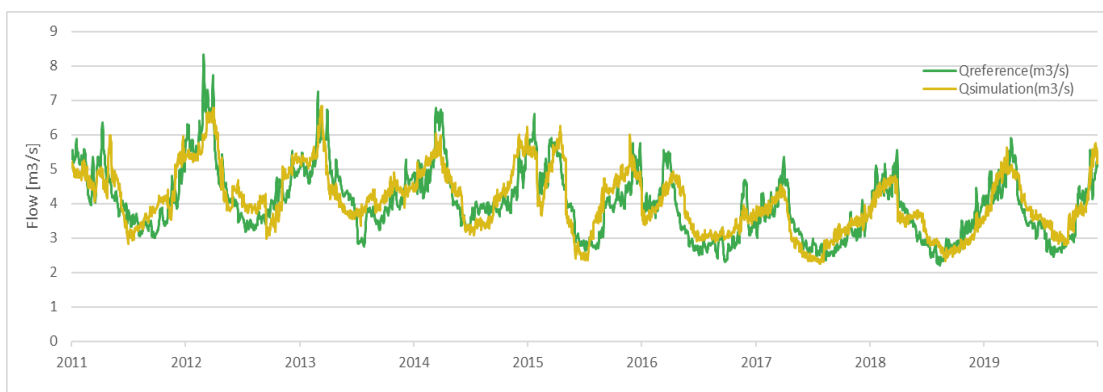


#### 4.6. Validación del Modelo Hidrológico

Para verificar la precisión de la simulación después de la calibración, se realiza el proceso de validación y de tal forma deducir que el modelo puede realizar predicciones en distintos periodos. La validación se realizó en años distintos a la calibración, se simulo entre los años 2011 al 2019, usando los factores obtenidos después de la calibración. En la **Figura 51** se observa el resultado de la simulación de la validación.

**Figura 51**

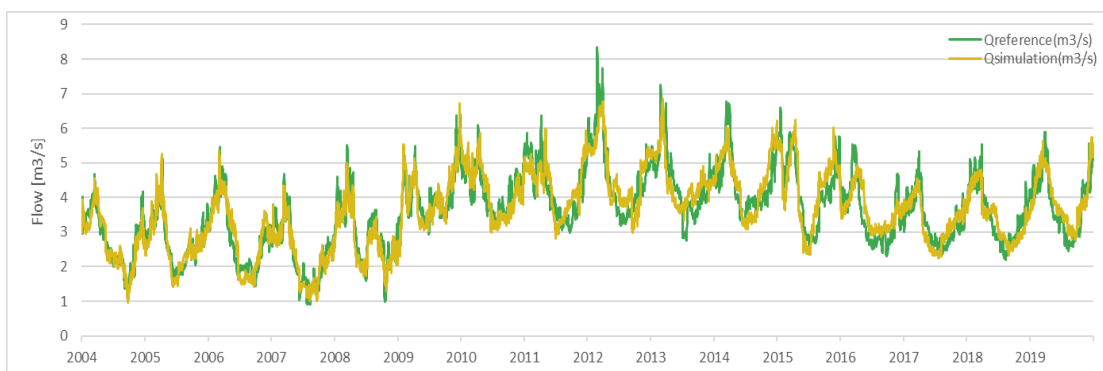
*Simulación de la validación en un intervalo de tiempo de 2011 – 2019.*



En la simulación del modelo desde el 2004 hasta el 2019, se observa que coinciden en varios de los periodos los caudales simulados con los caudales observados. Y en los picos donde existen diferencia puede resultar por el uso de subcuencas mixtas. En la **Figura 52** se muestra la simulación de caudal en todo el periodo.

**Figura 52**

*Simulación de caudal de todo el periodo 2004 – 2019.*



En la **Tabla 17** se observa los indicadores de bondad de ajuste finales después de la calibración y validación del modelo GSM+GR4J a nivel global, cuyos indicadores de eficiencia resultan aceptables en los periodos considerados.

**Tabla 17**

*Indicadores de bondad de ajuste del sistema hidrológico*

	Indicador	Periodo Completo
		GR4J + GSM
<b>CALIBRACIÓN</b>	Nash	0.602
	Pearson Correlation Coeff	0.684
	Kling-Gupta Efficiency	0.702
	Bias Score	0.756
	Relative Volume Bias	0.095
<b>VALIDACIÓN</b>	Nash	0.612
	Pearson Correlation Coeff	0.675
	Kling-Gupta Efficiency	0.721
	Bias Score	0.748
	Relative Volume Bias	0.094

En la **Tabla 18** se muestra los parámetros calibrados del modelo GSM para Llanganuco.

**Tabla 18***Parámetros calibrados del modelo GSM para Llanganuco.*

Nombre	Unidades	Valor	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	–	>0
S	mm/°C/d	10.9026	0.5 a 20
SInt	mm/°C/d	2.9675	0 a 4
SMin	mm/°C/d	0	≥0
Sph	d	328.7209	1 a 365
ThetaCri	-	0.1	0.1
bp	d/mm	0.125	0.125
Tcp1	°C	0	0
Tcp2	°C	4	4
Tcf	°C	0	0
G	mm/°C/d	11.0128	0.5 a 20
GInt	mm/°C/d	3.9738	0 a 4
GMin	mm/°C/d	0	≥0
Tcg	°C	0	0
Kgl	1/d	0.1005	0.1 a 5
Ksn	1/d	0.1953	0.1 a 5
CFR	-	1	0 a 1

Se muestran los parámetros finales del modelo GR4J en la **Tabla 19**, como se mencionó uno de sus parámetros más sensibles es el parámetro X1, por tal motivo se calibró manualmente cada subcuenca no glaciada hasta lograr la respuesta deseada.

**Tabla 19***Parámetros calibrados del modelo GR4J para Llanganuco.*

Nombre	Unidades	Valores	Rango Regular
A	m <sup>2</sup>	-	>0
X1	m	1.1689971	0.01 a 1.2
X2	m	0	-5.78x10 <sup>-8</sup> a 3.47x10 <sup>-8</sup>
X3	m	0.4333384	0.01 a 0.5
X4	d	1.7425	1.1 a 2.9



Por los datos obtenidos de la calibración y validación, podemos afirmar que el modelo de Llanganuco es aceptable, y con los parámetros calibrados se podrá simular la demanda hídrica para el futuro cercano y lejano.

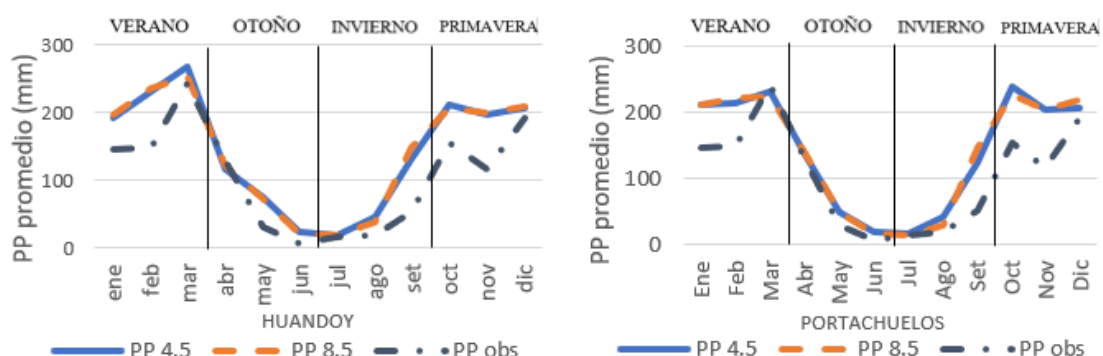
#### 4.7. Efecto del Cambio Climático en la Precipitación, Temperatura.

##### 4.7.1. Precipitación Observada y Proyectada

Después de calibrar y validar el modelo, se hizo un análisis en las estaciones trabajadas para este estudio entre los datos de precipitación observada (2004-2019) y proyectados por los escenarios del cambio climático para un futuro lejano y cercano (2020-2100). En la **Figura 53 y 54** se muestra el promedio de la variación mensual de la precipitación en las estaciones del año, de estos resultados se puede observar en el grafico que las precipitaciones futuras se incrementan con respecto a la histórica en un futuro cercano y lejano y en ambos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5). Cabe señalar que las estaciones astronómicas serán las mismas para la costa, sierra y selva peruana, sin embargo, cada región presentará características climáticas propias. La cordillera blanca donde se ubican la subcuenca de Llanganuco, los meses con mayor precipitación son de diciembre a marzo (MINAM, 2023).

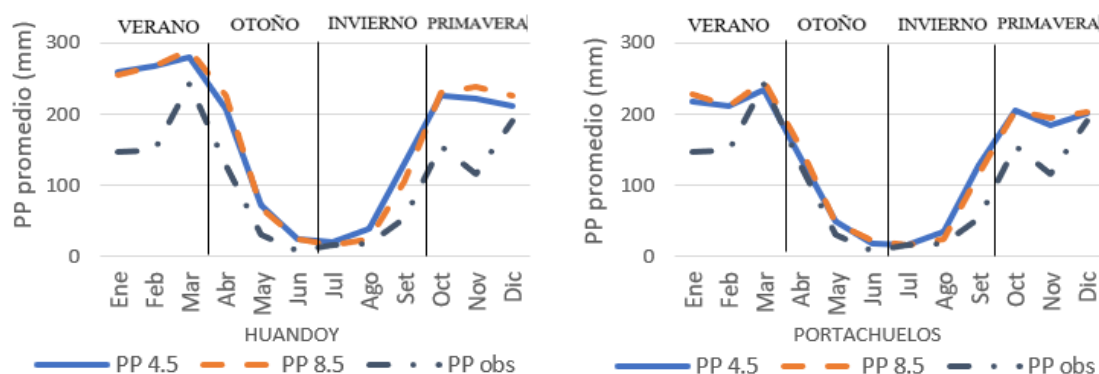
**Figura 53**

*Variación mensual y estacional de la precipitación en un futuro cercano (2020-2050).*



**Figura 54**

*Variación mensual y estacional de la precipitación en un futuro lejano (2051-2100).*



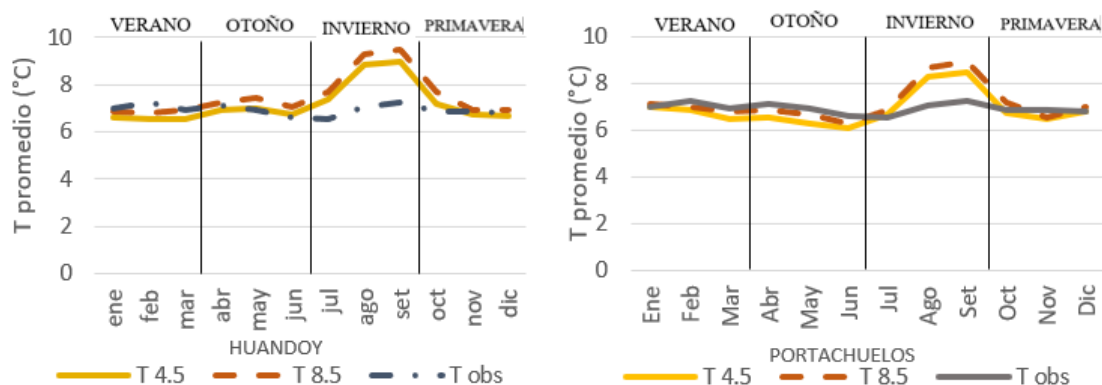
Considerando la precipitación proyectada, se estiman variaciones de -4.6% a 76.2% para un futuro cercano y para un futuro lejano variaciones de -5.6% a 96.4% para el escenario RCP4.5. También se estiman variaciones de -7.7% a 105.4% para un futuro cercano y para un futuro lejano variaciones de 1.9% a 117.2% para el escenario RCP8.5.

#### **4.7.2. Temperatura Observada y Proyectada**

Existe un incremento de la temperatura en las estaciones, para el futuro cercano y lejano donde en la ruta RCP8.5 se encuentra los mayores incrementos en la temperatura, en comparación con la ruta RCP4.5. En la **Figura 55 y 56** se muestra la variación mensual de la temperatura y por estaciones del año, estos resultados nos muestran que las temperaturas futuras se incrementan con respecto a la histórica en un futuro cercano y lejano y en ambos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5).

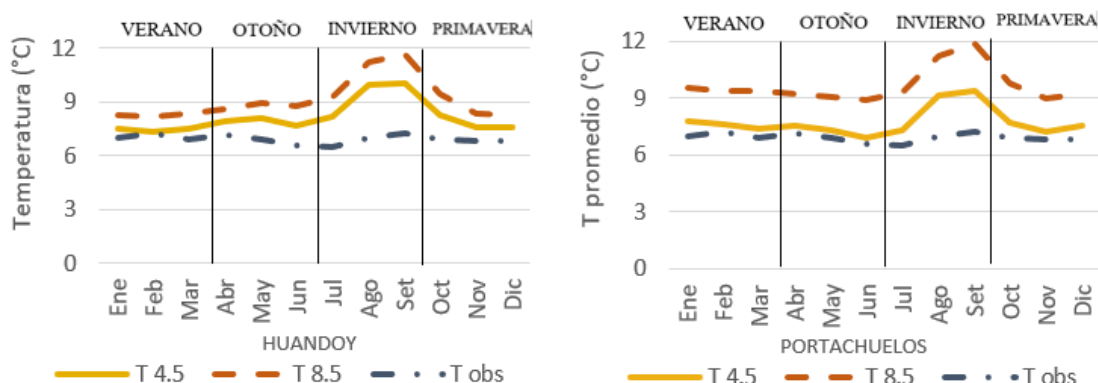
**Figura 55**

*Variación mensual y estacional de la temperatura en un futuro cercano (2020-2050).*



**Figura 56**

*Variación mensual y estacional de la temperatura en un futuro cercano (2051-2100).*



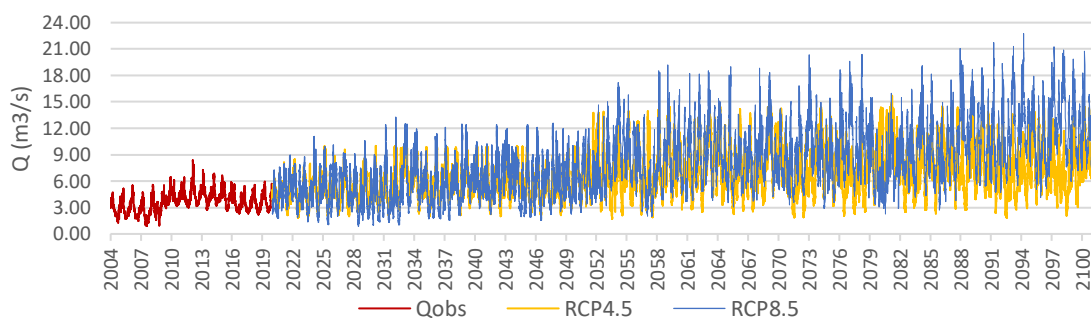
Considerando la temperatura proyectada, para el escenario RCP4.5 se estiman variaciones de -4.4% a 17.6% para un futuro cercano y para un futuro lejano variaciones de 4.7% a 29.9%<sup>5</sup>. Para el escenario RCP8.5 se estiman variaciones de -4.7% a 23.7% para un futuro cercano y para un futuro lejano variaciones de 20.7% a 45.7%.

#### 4.8. Efectos del Cambio Climático en la Disponibilidad Hídrica Futura

Después de haber comprobado que los índices de eficiencia del modelo ejecutado en la plataforma RS Minerve son adecuados y habiendo analizado la serie de datos de la precipitación observada y proyectada, se llevó a cabo la predicción de caudales hacia un futuro cercano (2020 – 2050) y un futuro lejano (2051- 2100) en la estación Llanganuco en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5. En la **Figura 57** se observan los caudales diarios del 2004 al 2100 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

**Figura 57**

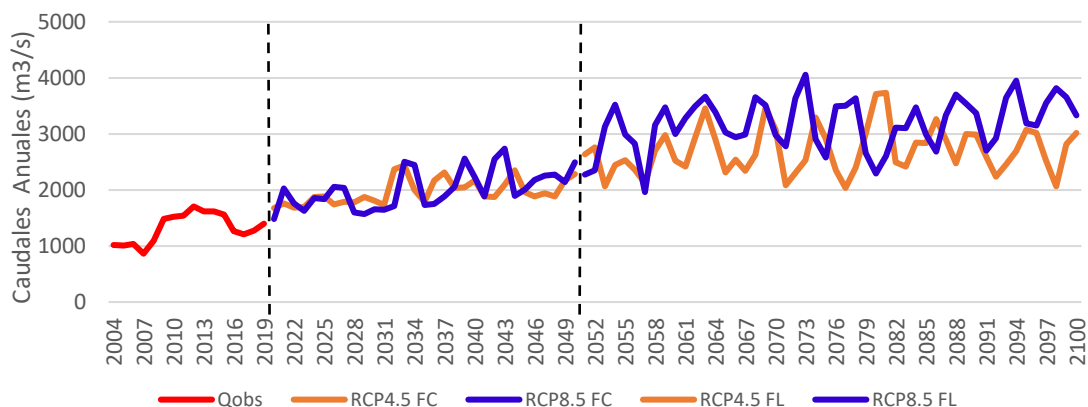
*Caudal diarios del 2004 – 2100 en las RCP4.5 y RCP8.5.*



En la **Figura 58** se observan los caudales anuales del año 2004 al 2100 en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5.

**Figura 58**

*Caudal anual del 2004 – 2100 en las RCP4.5 y RCP8.5.*



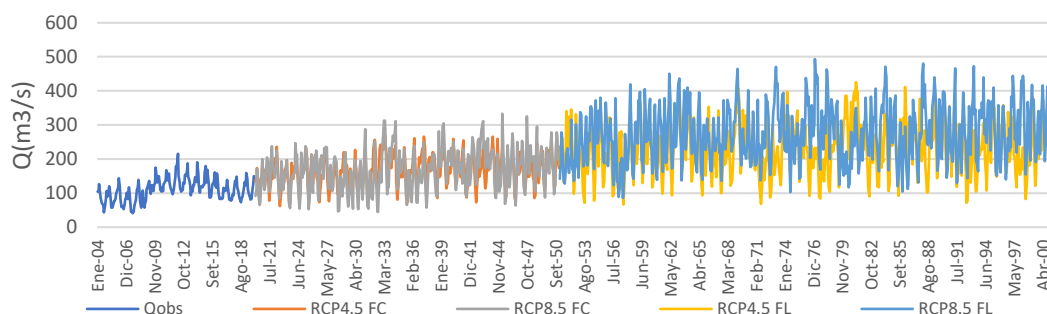
En la **Figura 58** se aprecia que los caudales en un futuro cercano hacia el año 2050 tienen una tendencia a un mayor incremento que en un futuro lejano 2100, cuyos resultados coinciden con la investigación realizada por (Pouyaud et al, 2005), comentada en la sección 2.2.4.

Habiendo realizado la simulación de los escenarios futuros RCP 4.5 y RCP8.5 después de haber calibrado y validado el modelo hidrológico, se puede evaluar los posibles efectos del cambio climático en la demanda hídrica de la subcuenca Llanganuco, evaluando la disponibilidad hídrica histórica y futura de forma estacional, mensual y anual. Los modelos globales del cambio climático tienen en cuenta la ocurrencia de eventos extremos en forma global.

En la **Figura 59** se muestran los resultados obtenidos en el sistema hidrológico Llanganuco en un futuro cercano (2020-2050) y futuro lejano (2051-2100) en los escenarios RCP4.5 y RCP 8.5.

**Figura 59**

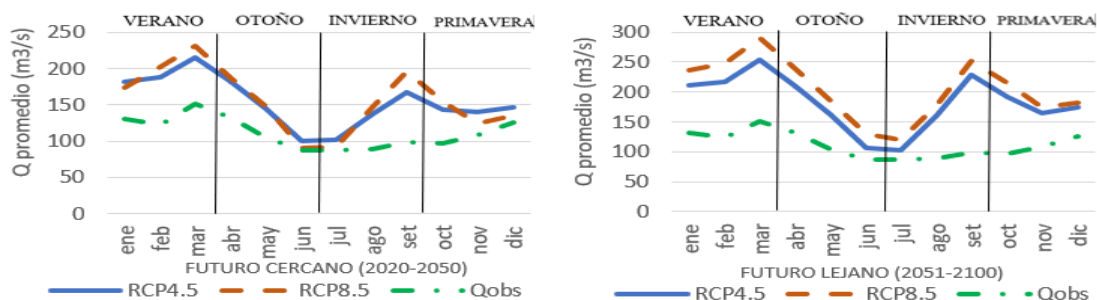
*Caudales mensuales en el Sistema Hidrológico Llanganuco del 2004-2100.*



En la **Figura 60** se muestra la variación mensual de la disponibilidad hídrica observada (2004-2019) y proyectada para un futuro cercano y lejano (2020-2100), los resultados obtenidos para el futuro indican el mayor incremento de la disponibilidad hídrica en las épocas húmedas en ambos escenarios (RCP4.5 y RCP8.5).

**Figura 60**

*Variación mensual de la demanda hídrica en un futuro lejano y cercano.*



Al comparar los promedios proyectados en ambos escenarios con el promedio histórico se puede observar en la **Tabla 20** que hay incrementos significativos en todas las estaciones en especial en la temporada húmeda.

**Tabla 20**

*Promedio anual de las estaciones en el sistema hidrológico Llanganuco(mm).*

ESTACIÓN	FUTURO CERCANO		FUTURO LEJANO		Promedio Histórico
	RCP 4.5	RCP8.5	RCP 4.5	RCP8.5	
Verano	194.88	202.61	227.13	250.77	135.25
Otoño	136.71	141.73	159.42	163.39	108.15
Invierno	135.22	137.44	164.27	173.63	91.80
Primavera	143.35	138.38	176.73	179.71	110.62

**Tabla 21***Variación porcentual respecto al promedio histórico.*

ESTACIÓN	FUTURO CERCANO		FUTURO LEJANO	
	RCP 4.5	RCP8.5	RCP 4.5	RCP8.5
Verano	44.08	49.79	67.93	85.41
Otoño	26.41	31.04	47.40	51.08
Invierno	47.29	49.72	78.94	89.14
Primavera	29.59	25.09	59.76	62.46

Las proyecciones obtenidas en este trabajo de investigación por los efectos del cambio climático nos dan una idea de que podría suceder en una cuenca y tomar decisiones frente al cambio climático; sin embargo, es importante indicar que estos resultados no son determinantes porque presentan cierta incertidumbre en el intervalo de tiempo trabajado (2020-2100).

#### 4.9. Contratación de la hipótesis

En la hipótesis planteada la disponibilidad hídrica futura en el sistema hidrológico Llanganuco disminuye, debido a los efectos del cambio climático en las variables de Precipitación y Temperatura, proyectados para un futuro cercano y lejano.

De acuerdo a los resultados encontrados, tanto de los modelos globales de cambio climático proyectados en los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 para la Precipitación y la Temperatura, y los caudales predichos como resultado de esta investigación en la cuenca del Llanganuco, la disponibilidad hídrica aumenta significativamente en el futuro cercano y lejano en Verano, y hacia el invierno es casi similar, tal como se muestran en la **Figura 60**. De acuerdo a ello se rechaza la hipótesis nula (la disponibilidad hídrica no cambia) y se acepta la hipótesis alterna (incremento de la disponibilidad hídrica).

En la **Tabla 21** se puede observar la mayor variación porcentual para futuro cercano en el escenario RCP4.5 en un 47.27% y en el escenario RCP8.5 en un 49.27%.



Para futuro lejano en el escenario RCP4.5 en un 78.94% y en el escenario RCP8.5 en un 89.14%.

#### 4.10. Discusión

Por los resultados obtenidos, se puede afirmar que la disponibilidad hídrica en el sistema hidrológico del río Llanganuco (Ítem 4.8) tienen una tendencia a incrementarse en un futuro cercano 2050 y en un futuro lejano 2100. La radiación solar y las temperaturas a la altitud de la cuenca de Llanganuco y del mar resultan ser más altas generando mayores evaporaciones, precipitaciones y escurrimiento superficiales incluyendo los eventos extremos, añadido a ello los aportes por fusión glaciaria que esta cuenca tiene con grandes masas glaciares del Huascarán. Así, en los resultados al comparar los promedios proyectados en ambos escenarios con el promedio histórico se puede observar en la **Tabla 21** que hay incrementos significativos en especial en la temporada húmeda y de la tabla 22 se tiene una variación porcentual promedio en el escenario RCP4.5 en un 56.0% y en el escenario RCP8.5 en un 67.6% hasta el 2100. Se debe tener en cuenta que, los resultados de los modelos globales y regionales del CMIP5 sobre la temperatura, precipitación y caudal tendrán mejor exactitud siempre que representen mejor los fenómenos naturales que ocurren en el sistema tierra-mar-atmósfera-universo.

Sin embargo, en el futuro cercano y lejano estos incrementos de precipitaciones y caudales también se traducirán en la ocurrencia de eventos extremos que afectarán las infraestructuras existentes, para lo cual el gobierno central deberá resolver esta problemática futura proyectando obras de defensa para mitigar los efectos de los desastres naturales en la infraestructura física de las ciudades y obras hidroenergéticas.

En la **Tabla 22** y **Figura 61**, se indica los valores de caudales anuales puntuales observados en los años 2004 y 2019, y los proyectados años 2050 y 2100, observándose que los valores globales se incrementan según las emisiones RPC.

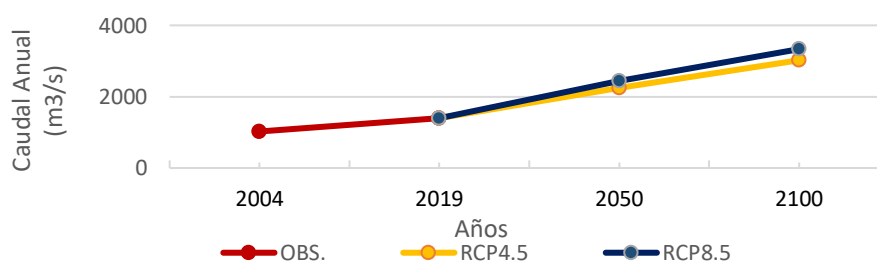
**Tabla 22**

*Caudales anuales (m<sup>3</sup>/s) en los años claves, observados y proyectados.*

CAUDAL ANUAL (m <sup>3</sup> /seg)			
AÑOS	OBS.	RCP4.5	RCP8.5
2004	1024.35		
2019	1397.95		
2050		2245.64	2443.24
2100		3021.20	3332.44

**Figura 61**

*Gráfico de caudales anuales en los años claves, observados y proyectados*



En la **Tabla 23** y **Figura 62**, se han disgregado los valores de caudales globales anuales, en caudales de estiaje y avenidas, observándose que los caudales en estiaje representan solo el 35% del caudal anual y los caudales escurridos en época de avenidas son el 65% del caudal anual. Dichos porcentajes se mantienen en promedio en los caudales proyectados de los futuros cercano y lejano.

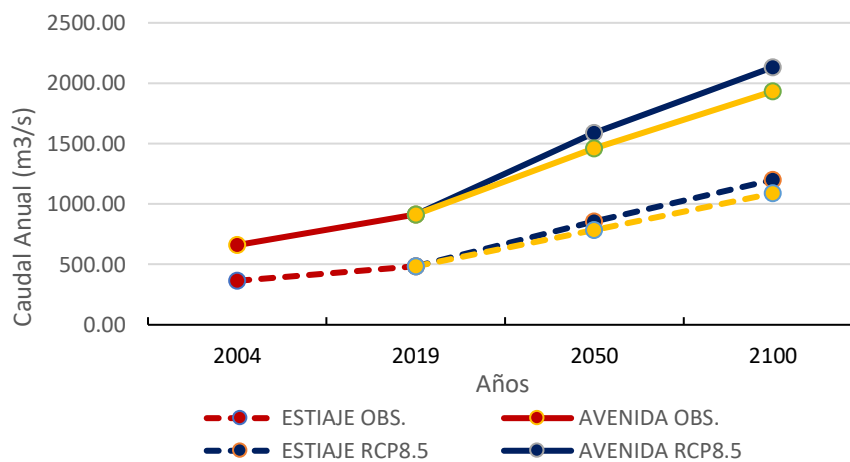
**Tabla 23**

*Caudales anuales observados y proyectados en los meses de estiaje y avenidas.*

AÑOS	CAUDAL ANUAL OBSERVADO (m <sup>3</sup> /seg)				CAUDAL ANUAL EN RCP4.5 (m <sup>3</sup> /seg)				CAUDAL ANUAL EN RCP8.5 (m <sup>3</sup> /seg)			
	ESTIAJE		AVENIDA		ESTIAJE		AVENIDA		ESTIAJE		AVENIDA	
	OBS.	%	OBS.	%	RCP4.5	%	RCP4.5	%	RCP8.5	%	RCP8.5	%
2004	364.22	35.6%	660.13	64.4%								
2019	484.53	34.7%	913.42	65.4%								
2050					785.97	35.2%	1459.66	64.9%	855.13	35.1%	1588.10	65.0%
2100					1087.63	36.2%	1933.57	63.8%	1199.68	36.0%	2132.76	64.0%

**Figura 62**

*Caudales anuales en los años claves, observados y proyectados*



Quiere decir que, estos incrementos de caudal en los futuros cercano y lejano serán mayormente en época de avenidas con las probables ocurrencias de eventos extremos, y que en época de estiaje la cuenca de Llanganuco dispondrá de un recurso hídrico muy similar a la disponibilidad actual.

## CONCLUSIONES

1. El cambio climático que principalmente se representa por un incremento de la Temperatura global del planeta, afectará positivamente la disponibilidad hídrica global anual del sistema hidrológico de Llanganuco, pues en esta investigación se ha encontrado que; en los modelos de cambio climático del CMIP5 para los escenarios más pesimista RCP8.5 y optimista RCP4.5, las Temperaturas y Precipitaciones en promedio siempre aumentan. Así mismo los caudales futuros predichos con la aplicación de los modelos hidrológicos GR4J y GSM también se incrementan. Sin embargo, cabe mencionar que la mayor parte de estos incrementos ocurrirán en época de avenidas y en época de estiaje el recurso hídrico en esta subcuenca se mantendrá.
2. De este modo, los resultados obtenidos para la proyección del caudal en los dos escenarios de emisión RCP 4.5 y RCP 8.5, para un futuro cercano (2020 – 2050) en el período húmedo (verano) se obtuvo la mayor variación porcentual en el escenario RCP4.5 en un 47.27% y en el escenario RCP8.5 en un 49.27%. Para un futuro lejano (2051 – 2100), para el periodo húmedo (verano) en el escenario RCP4.5 en un 78.94% y en el escenario RCP8.5 en un 89.14%.
3. La hipótesis nula fue rechazada, en razón a que, con los incrementos de la temperatura, precipitaciones en el sistema hidrológico del río Llanganuco van a aumentar y por lo tanto las disponibilidades del recurso hídrico, por ello, se acepta la hipótesis alterna.

## RECOMENDACIONES

1. Se recomienda desarrollar planes para la gestión del recurso hídrico en el sistema hidrológico glaciario del río Llanganuco, para uso hidro energético y obras de mitigación para enfrentar los eventos extremos, por parte de las autoridades que administran el agua.
2. Es de importancia realizar este tipo de investigaciones en todas las subcuencas del Río Santa de la Cordillera Blanca, a fin de contar con resultados sobre la disponibilidad hídrica futura y gestionar el recurso hídrico futuro a nivel de toda la cuenca del Santa.
3. En las próximas investigaciones se recomienda usar los modelos acoplados de circulación general MCG para escenarios de cambio climático, del proyecto más reciente CMIP6, a fin de tener una menor incertidumbre de las proyecciones de disponibilidad hídrica futura en las cuencas de la cordillera blanca.
4. Debido a la limitada disponibilidad de datos registrados de precipitación y temperatura en las sub cuencas del río santa y en general en las cuencas de nuestro país, se recomienda promover el uso de datos satelitales de precipitación, temperatura y otras variables que se requieren, su tratamiento y su uso para el estudio de recursos hídricos en las cuencas de nuestra región y el Perú.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

- Aliaga , I. (2017). *Modelación Hidrológica de la Cuenca del Rio Huallaga, Aguas Arriba del Punto de Control Santa Lorenza*. [Tesis para Título Profesional, Universidad Nacional Agraria la Molina].
- ANA, (2015). *Evaluación de Recursos Hídricos en la cuenca Santa*. Resumen Ejecutivo
- Astorayme, M.A., García, E., Suarez, W., Felipe, O., Hunggel, C., y Molina, W. (2015). *Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú*. Servicio Nacional de Metereología e Hidrología del Perú. 109-124.
- Avalos G., Oria C., Jácome G., Acuña D., Llacza A., y Cubas F. (2013). *Cambio climático en la cuenca del Río Mantaro, Junín*. SENAMHI.
- Cabrera, J. (s.f). *Modelos Hidrológicos*. Universidad nacional de Ingenieria.
- CDD-IPCC.(2013). *What is a GCM*. Obtenido de [http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm\\_guide.html](http://www.ipcc-data.org/guidelines/pages/gcm_guide.html)
- Chou , Y. (1979). *Análisis Estadístico*. Buenos Aires: Interamericana.
- Chow , V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W.(1994). *Hidrología Aplicada*. McGraw-Hill.
- CMIP. (2002). *Coupled Model Intercomparison Project, WCRP: World Climate Research Programme*. Obtenido de <https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/>
- Cubash, U., D. Wuebbles, D. Chen, M.C. Facchini, D. Frame, N. Mahowald, and J.-G. Winther, (2013). *Introduction. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K.



- Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.]). Cambridge University Press.
- Fowler, H.J., Blenkinsop S., y Tebaldi, C.(2007). *Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling*. International Journal of Climatology.
- Francés, E. (2017). *Cambio climático en Cantabria*. Universidad de Cantabria.
- Gaertner, M. A., Gutierrez, J. M., y Castro, M.(2012). *Escenarios regionales de cambio climático*. Real Sociedad Española de Física. Vol. 26-2.
- García, J., Paredes, J., Foehn, A., y Roquier, B.(2020). *RS MINERVE – Technical manual v2.10*. RS MINERVE Group.
- INDECI (2005). *Mapa de Peligros, Programa de Prevención y Medidas de Mitigación ante Desastres Ciudades de Yungay y Ranrahirca*.
- Iparraquirre, D., & Arias, L. (2018). *Generación de Hidrogramas de la Subcuenca Chosica Empleando la Plataforma de Modelamiento Rs Minerve*. [Tesis para Título Profesional, Pontificia Universidad Católica del Perú].
- IPCC. (2001). *Resumen para responsables de políticas. En: Informe de especial. Escenarios de Emisiones*. Contribución del Grupo de trabajo III del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático.
- IPCC. (2007). *Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. IPCC.
- IPCC. (2013). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio Climático 2013: Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J.

- Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América.
- IPCC. (2014). *Cambio climático 2014: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático*. [Equipo principal de redacción, R.K. Pachauri y L.A. Meyer (eds.)].
- IPCC. (2019). *Resumen para responsables de políticas. En: Cambio climático y tierra: un informe especial del IPCC sobre cambio climático, desertificación, degradación de la tierra, gestión sostenible de la tierra, seguridad alimentaria y flujos de gases de efecto inver*. [PR Shukla, J. Skea, E. Calvo Buendia, V. Masson -Delmotte, H.- O. Pörtner, DC Roberts, P. Zhai, R. Slade, S. Connors, R. van Diemen, M. Ferrat, E. Haughey, S. Luz, S. Neogi, M. Pathak, J. Petzold, J. Portugal Pereira, P. Vyas, E. Huntley, K. Kissick, M. Belkacemi, J. Malley, (eds.)].IPCC.
- Lachance, S., Richard, S., Turcotte, R., y Braun, M.(2015). *Hydroclimatic Atlas of Southern Québec, The Impact of Climate Change on High, Low and Mean Flow Regimes for the 2050 horizon.CEHQ*
- León Ochoa, R. (2017). *Modelación de la Disponibilidad Hídrica del Río Piura, Considerando la Incidencia del Cambio Climático*. [Tesis para Título Profesional,Universidad Nacional Agraria la Molina].
- Marengo et al. (2012). *Extreme climatic events in the Amazon basin*.
- Mas-Pla, J., & Bach Plaza, J. (2008). *Los Recursos Hídricos en el Sistema Cuenca: Disponibilidad y Calidad*. España: Andrés P. y Rodríguez R. (Eds).

- Mejía, J. A. (2012). *Hidrología Aplicada*. Lima: Universidad Nacional Agraria la Molina.
- MINAM (SENAMHI, 2023). *Plataforma digital única del Estado Peruano*. Obtenido de <https://www.gob.pe/11000>
- Portillo, G. (2012). *Ciclo Hidrológico*. Obtenido de <https://www.meteorologiaenred.com/ciclo-hidrologico.html>
- Pouyaud et al. (2005). Avenir des ressources en eau glaciaire de la Cordillère Blanche. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques*. Copyright @ 2005 IAHS Press.
- PROCLIM. (2005). *Escenarios del cambio climático en el Perú al 2050: Cuenca del río Piura*. 2 ed. SENAMHI.
- PROCLIM. (2005). *Escenarios del Cambio Climático. Cuenca del Río Piura*. 2 ed. SENAMHI.
- Proyecto Glaciares. (s.f.). *Línea de Base Climática-Parte II: Escenarios Climáticos Cordillera Blanca y Santa Teresa*.
- SENAMHI. (2014). *Regionalización estadística de escenarios climáticos en el Perú*. P. 3-24.
- Serrano, R. (2014). *Proyecciones de disponibilidad del recurso hídrico en la cuenca alta del Maipo, bajo escenarios recientes de cambio climático*. Universidad de Chile.
- Stehr Gesche, A. (2008). *Análisis del Comportamiento Hidrológico y Disponibilidad de Agua, Bajo Escenarios de Cambio Climático, para dos Sub-Cuencas del Río Biobío Incorporando el Impacto del Aporte Nival en la Zona Cordillerana*. [Tesis de Doctorado, Universidad de Concepción].

- Tellez, A. F. (2016). *Modelación Hidrológica del Sistema de Explotación Gállego-Cinca de la Confederación Hidrográfica del Ebro Mediante el Modelo de Precipitación-Escorrentía HBV*. [Tesis de Maestría, Universidad Politecnica de Valencia].
- Vignon, F. (2022). *Glaciares y Recursos Hídricos en el valle alto del Río Santa*. [Tesis de Doctorado, Universidad de París VII].

## ANEXOS

ANEXO 1: Datos diarios de Caudal de la Estación Llanganuco

ANEXO 2: Visita Zona de Estudio

## ANEXO 1





Fecha	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
01/01 12:00:00	4.253	3.158	2.922	3.250	2.951	2.630	3.511	5.016	5.536	5.852	5.089	4.890	5.713	3.796	3.423	4.067	3.936
02/01 12:00:00	4.208	3.071	2.876	3.350	2.849	2.752	3.421	4.887	5.538	5.865	5.100	4.898	5.579	4.015	3.189	3.789	3.967
03/01 12:00:00	4.179	2.970	2.881	3.457	2.746	2.882	3.341	4.773	5.564	5.817	5.058	4.882	5.485	4.002	3.013	3.579	3.965
04/01 12:00:00	4.179	2.972	2.796	3.355	2.649	3.208	3.234	4.620	5.380	5.857	5.093	4.725	5.554	3.873	3.006	3.571	3.957
05/01 12:00:00	4.358	3.297	2.749	3.299	2.582	3.281	3.172	4.531	5.260	6.184	5.377	4.469	5.729	3.663	3.086	3.666	3.949
06/01 12:00:00	4.354	4.004	2.867	3.440	2.607	3.196	3.202	4.575	5.208	6.323	5.498	4.287	5.856	3.514	3.302	3.923	4.010
07/01 12:00:00	4.272	4.036	2.783	3.340	2.788	3.225	3.266	4.666	5.156	6.274	5.456	4.638	5.868	3.802	3.608	4.286	4.149
08/01 12:00:00	4.174	3.677	2.630	3.156	3.143	3.249	3.342	4.774	5.287	6.227	5.415	4.975	5.820	4.078	3.727	4.428	4.286
09/01 12:00:00	4.037	3.351	2.505	3.006	3.559	3.477	3.450	4.928	5.260	6.339	5.512	4.817	5.870	3.948	3.643	4.328	4.189
10/01 12:00:00	3.86	3.252	2.529	3.035	3.840	3.541	3.459	4.942	5.266	6.221	5.410	4.548	5.847	3.928	3.549	4.216	4.081
11/01 12:00:00	3.753	3.183	2.587	3.104	3.731	3.599	3.339	4.770	5.281	5.910	5.139	4.296	5.846	3.721	3.527	4.190	4.056
12/01 12:00:00	3.752	3.096	2.650	3.180	3.397	3.712	3.241	4.630	5.331	5.834	5.073	4.272	5.840	3.802	3.484	4.139	4.007
13/01 12:00:00	3.915	3.083	2.730	3.276	3.224	4.012	3.219	4.598	5.437	5.848	5.085	4.708	5.803	3.859	3.433	4.078	3.948
14/01 12:00:00	4.038	3.127	2.925	3.510	3.224	4.504	3.224	4.606	5.543	5.694	4.951	5.064	5.791	4.151	3.450	4.099	3.968
15/01 12:00:00	4.103	3.336	2.976	3.571	3.367	4.640	3.268	4.669	5.903	5.572	4.845	5.196	5.836	4.259	3.506	4.165	4.032
16/01 12:00:00	4.017	3.394	2.945	3.534	3.677	4.478	3.415	4.788	5.841	5.512	4.793	5.285	5.909	4.332	3.684	4.377	4.237
17/01 12:00:00	3.909	3.292	3.017	3.620	3.736	4.248	3.541	5.058	5.526	5.718	4.972	5.081	5.967	4.165	3.969	4.715	4.564
18/01 12:00:00	3.832	3.253	3.089	3.707	3.596	4.285	3.551	5.073	5.291	5.789	5.034	4.788	6.091	3.925	4.247	5.045	4.884
19/01 12:00:00	3.747	3.219	3.079	3.695	3.374	4.344	3.456	4.937	5.474	5.735	4.987	4.638	6.207	3.802	4.309	5.119	4.955
20/01 12:00:00	3.742	3.178	2.997	3.596	3.271	4.161	3.383	4.833	5.200	5.802	5.045	4.537	6.561	3.819	4.273	5.076	4.914
21/01 12:00:00	3.833	3.157	2.938	3.526	3.173	3.876	3.287	4.695	5.436	5.827	5.067	4.392	6.642	3.900	4.158	4.940	4.782
22/01 12:00:00	3.909	3.250	2.935	3.522	3.160	3.637	3.170	4.529	5.423	5.874	5.108	4.269	6.285	3.799	4.197	4.986	4.827
23/01 12:00:00	3.958	3.404	2.943	3.532	3.235	3.468	3.700	4.441	5.321	5.781	5.027	4.425	5.854	3.827	4.357	5.050	5.011
24/01 12:00:00	3.956	3.581	2.938	3.526	3.341	3.305	3.981	4.423	5.211	5.584	4.856	4.788	5.734	3.925	4.228	4.800	4.862
25/01 12:00:00	3.916	3.527	2.941	3.529	3.501	3.215	3.976	4.418	5.153	5.476	4.762	5.147	5.739	4.219	3.993	4.744	4.592
26/01 12:00:00	3.915	3.477	2.957	3.548	3.706	3.240	3.992	4.436	5.108	5.472	4.758	5.142	5.800	4.215	3.759	4.466	4.323
27/01 12:00:00	4.063	3.551	3.021	3.625	3.693	3.240	4.032	4.480	5.243	5.415	4.709	4.804	5.770	3.938	3.624	4.305	4.168
28/01 12:00:00	4.003	3.507	3.019	3.623	3.616	3.256	4.135	4.594	5.260	5.319	4.625	4.435	5.680	3.635	3.547	4.214	4.079
29/01 12:00:00	3.846	3.521	3.121	3.745	3.513	3.378	4.262	4.736	5.257	5.259	4.573	4.242	5.540	3.825	3.481	4.500	4.003
30/01 12:00:00	3.671	3.520	3.329	3.995	3.434	3.439	4.487	4.986	5.254	5.273	4.585	4.133	5.000	3.727	3.483	4.450	4.005
31/01 12:00:00	3.528	3.512	3.250	4.020	3.244	3.575	4.684	5.205	5.380	5.246	4.562	4.159	4.830	3.750	3.222	4.700	4.050
01/02 12:00:00	3.536	3.520	3.250	3.900	3.110	3.878	4.665	5.183	5.442	5.379	4.677	4.209	4.140	3.795	3.617	4.500	4.160
02/02 12:00:00	3.634	3.530	3.234	3.881	3.079	4.163	4.567	5.075	5.329	5.615	4.883	4.225	4.156	3.809	3.719	4.418	4.277
03/02 12:00:00	4.029	3.599	3.334	4.001	3.080	4.214	4.559	5.065	5.318	5.726	4.979	4.280	4.210	3.859	3.711	4.409	4.268
04/02 12:00:00	4.318	3.666	3.449	4.139	3.079	4.122	4.636	5.151	5.409	5.922	4.863	4.435	4.362	3.998	3.608	4.500	4.149
05/02 12:00:00	4.294	3.617	3.442	4.130	3.031	3.900	4.550	5.056	5.309	5.507	4.789	4.520	4.446	4.075	3.588	4.380	4.126
06/02 12:00:00	4.411	3.527	3.456	4.147	2.943	3.751	4.424	4.916	5.162	5.496	4.779	4.458	4.385	4.019	3.680	4.372	4.232
07/02 12:00:00	4.381	3.520	3.790	4.548	2.871	3.775	4.371	4.857	5.100	5.531	4.810	4.547	4.472	4.100	3.854	4.579	4.432
08/02 12:00:00	4.203	3.549	3.886	4.663	2.955	3.826	4.505	5.005	5.255	5.602	4.871	4.809	4.730	3.942	3.973	4.720	4.569
09/02 12:00:00	4.16	3.665	3.777	4.532	3.067	3.741	4.767	5.297	5.562	5.636	4.901	4.946	4.865	4.054	4.078	4.845	4.690
10/02 12:00:00	4.15	3.619	3.773	4.528	2.935	3.737	4.812	5.347	5.614	5.775	5.022	5.033	4.950	4.125	4.099	4.870	4.714
11/02 12:00:00	4.369	3.613	3.809	4.571	2.803	3.836	4.722	5.247	5.509	5.889	5.121	4.836	4.757	3.964	3.971	4.718	4.567
12/02 12:00:00	4.425	3.474	3.739	4.487	2.770	3.722	4.672	5.191	5.451	5.931	5.157	4.466	4.393	3.661	3.759	4.466	4.323
13/02 12:00:00	4.318	3.382	3.656	4.387	2.771	3.780	4.686	5.207	5.467	6.334	5.508	4.307	4.236	3.530	3.554	4.222	4.087
14/02 12:00:00	4.147	3.550	3.488	4.186	2.751	3.801	4.583	5.092	5.347	6.479	5.634	4.409	4.337	3.614	3.590	4.265	4.128
15/02 12:00:00	4.014	3.591	3.408	4.090	2.742	3.745	4.414	4.904	5.149	6.249	5.434	4.839	4.759	3.966	3.812	4.529	4.384
16/02 12:00:00	3.95	3.664	3.391	4.069	2.733	3.836	4.264	4.738	4.975	6.001	5.218	5.006	4.924	4.103	4.154	4.935	4.777
17/02 12:00:00	3.966	3.512	3.447	4.136	2.724	3.786	4.192	4.658	4.891	5.773	5.020	4.929	4.848	4.040	3.668	5.189	5.023
18/02 12:00:00	3.948	3.607	3.472	4.166	2.715	3.629	4.092	4.547	4.774	5.917	5.145	4.745	4.667	3.889	4.289	5.095	4.932
19/02 12:00:00	3.907	3.662	3.640	4.368	2.706	3.615	3.942	4.380	4.599	6.157	5.354	4.553	4.478	3.732	4.213	5.005	4.845
20/02 12:00:00	3.887	3.608	3.604	4.325	3.029	3.563	3.842	4.269	4.482	6.128	5.329	4.649	4.573	3.811	4.006	4.759	4.607
21/02 12:00:00	3.961	3.742	3.342	4.010	3.029	3.564	3.754	4.171	4.380	6.071	5.279	4.675	4.598	3.832	3.876	4.605	4.457
22/02 12:00:00	3.883	3.957	3.233	3.880	3.125	3.676	3.659	4.065	4.268	6.117	5.319	4.649	4.573	3.811	3.783	4.494	4.350
23/02 12:00:00	3.715	3.952	3.359	4.031	3.241	3.813	3.635	4.039	4.241	6.476	5.631	4.934	4.853	4.044	3.723	4.423	4.281
24/02 12:00:00	3.659	3.891	3.364	4.037	3.303	3.886	3.595	3.995	4.195	6.772	5.889	5.209	5.124	4.270	3.626	4.320	4.181
25/02 12:00:00	3.668	3.762	3.331	3.997	3.231	3.801	3.541	3.934	4.131	7.449	6.477	5.194	5.108	4.257	3.605	4.283	4.146
26/02 12:00:00	3.66	3.742	3.314	3.977	3.107	3.655	3.499	3.888	4.082	8.373	7.281	5.297	5.210	4.342	3.668	4.358	4.218
27/02 12:00:00	3.606	3.893	3.211	3.853	2.947	3.467	3.487	3.874	4.068	8.289	7.208	5.324	5.237	4.364	3.691	4.385	4.245
28/02 12:00:00	3.515	3.974	3.147	3.776	2.744	3.228	3.483	3.870	4.063	7.698	6.694	5.445	5.356	4.463	3.593	4.268	4.132
29/02 12:00:00	3.468	3.982	-	-	-	3.188	-	-	-	7.577	-	-	-	4.429	-	-	-
01/03 12:00:00	3.394	3.990	3.266	3.822	2.675	3.147	3.444	3.776	3.965	7.463	6.490	5.404	4.748	4.396	3.964	3.971	4.229
02/03 12:00:00	3.304	4.069	3.447	3.919	2.757	3.244	3.398	3.771	3.960	7.074	6.151	5.363	4.540	4.204	4.078	4.281	4.559
03/03 12:00:00	3.236	4.131	3.667	4.136	2.921	3.437	3.394	3.876	4.070	6.769	5.886	5.129	4.439	4.110	4.191	4.044	4.690

Fecha	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
17/04 12:00:00	3.746	2.938	3.677	3.688	3.745	4.406	4.440	4.831	5.073	4.538	4.406	5.114	4.859	4.049	3.768	3.897	4.522
18/04 12:00:00	3.736	2.947	3.534	3.500	3.454	4.063	4.348	4.800	5.040	4.582	4.449	4.940	4.711	3.926	3.644	4.069	4.333
19/04 12:00:00	3.765	2.974	3.389	3.333	3.235	3.806	4.320	4.749	4.986	4.581	4.448	4.790	4.760	3.967	3.577	3.936	4.191
20/04 12:00:00	3.83	3.048	3.249	3.223	3.112	3.661	4.274	4.616	4.847	4.503	4.372	4.840	4.825	4.021	3.554	3.863	4.114
21/04 12:00:00	3.862	3.102	3.149	3.139	3.037	3.573	4.154	4.505	4.730	4.476	4.346	4.906	4.811	4.009	3.543	3.838	4.087
22/04 12:00:00	3.857	3.112	3.046	3.065	2.961	3.483	4.055	4.416	4.637	4.601	4.467	4.891	4.559	3.799	3.478	3.826	4.074
23/04 12:00:00	3.813	3.250	2.987	3.096	2.876	3.383	3.974	4.349	4.566	4.913	4.770	4.635	4.540	3.783	3.442	3.756	4.000
24/04 12:00:00	3.682	3.222	2.932	3.091	2.787	3.279	3.914	4.426	4.647	5.090	4.942	4.615	4.554	3.795	3.491	3.717	3.958
25/04 12:00:00	3.567	3.160	2.869	3.187	2.707	3.185	3.983	4.586	4.815	5.395	5.238	4.630	4.499	3.749	3.562	3.770	4.015
26/04 12:00:00	3.395	3.070	2.819	3.232	2.731	3.213	4.127	4.671	4.905	5.468	5.309	4.574	4.398	3.665	3.564	3.847	4.096
27/04 12:00:00	3.34	3.138	2.790	3.226	2.735	3.218	4.204	4.617	4.848	5.287	5.133	4.471	4.403	3.669	3.550	3.849	4.099
28/04 12:00:00	3.302	3.225	2.734	3.223	2.706	3.183	4.155	4.507	4.732	5.108	4.959	4.476	4.417	3.681	3.536	3.834	4.082
29/04 12:00:00	3.268	3.167	2.728	3.217	2.632	3.097	4.056	4.416	4.637	5.130	4.981	4.491	4.457	3.714	3.522	3.819	4.066
30/04 12:00:00	3.315	3.154	2.725	3.145	2.546	2.995	3.974	4.379	4.598	5.075	4.927	4.531	4.478	3.732	3.508	3.804	4.050
01/05 12:00:00	3.376	3.096	2.677	3.003	2.489	2.928	3.941	4.451	4.674	4.601	4.793	4.553	4.369	3.641	3.443	3.789	3.942
02/05 12:00:00	3.475	2.972	2.658	2.855	2.504	2.946	4.006	4.503	4.728	4.572	4.763	4.442	4.216	3.513	3.341	3.718	3.834
03/05 12:00:00	3.622	2.895	2.656	2.747	2.407	2.832	4.053	4.478	4.702	4.556	4.746	4.286	4.091	3.409	3.254	3.608	3.810
04/05 12:00:00	3.662	2.830	2.651	2.725	2.282	2.685	4.030	4.399	4.619	4.559	4.749	4.159	3.984	3.320	3.198	3.514	3.797
05/05 12:00:00	3.543	2.788	2.586	2.689	2.203	2.592	3.959	4.333	4.550	4.503	4.691	4.050	3.916	3.263	3.151	3.454	3.799
06/05 12:00:00	3.515	2.755	2.531	2.642	2.179	2.563	3.900	4.241	4.453	4.445	4.630	3.981	3.858	3.215	3.238	3.403	3.753
07/05 12:00:00	3.484	2.807	2.505	2.590	2.192	2.579	3.817	4.140	4.347	4.517	4.705	3.922	3.965	3.304	3.230	3.497	3.704
08/05 12:00:00	3.445	2.845	2.450	2.612	2.185	2.571	3.726	4.075	4.279	4.650	4.844	4.031	3.955	3.296	3.274	3.488	3.764
09/05 12:00:00	3.402	2.871	2.461	2.803	2.157	2.538	3.667	3.997	4.197	4.555	4.745	4.021	4.009	3.341	3.222	3.536	3.875
10/05 12:00:00	3.419	2.885	2.531	3.015	2.133	2.509	3.597	3.973	4.172	4.402	4.585	4.076	3.946	3.288	3.205	3.480	3.796
11/05 12:00:00	3.471	2.893	2.545	2.957	2.105	2.477	3.576	4.030	4.232	4.335	4.516	4.011	3.924	3.270	3.185	3.461	3.668
12/05 12:00:00	3.551	2.941	2.533	2.872	2.088	2.456	3.627	4.022	4.223	4.309	4.489	3.989	3.900	3.250	3.225	3.440	3.613
13/05 12:00:00	3.613	2.940	2.471	2.798	2.071	2.437	3.620	4.025	4.226	4.262	4.440	3.965	3.949	3.291	3.236	3.483	3.591
14/05 12:00:00	3.622	2.929	2.463	2.725	2.016	2.372	3.623	4.000	4.200	4.228	4.404	4.015	3.962	3.302	3.198	3.495	3.552
15/05 12:00:00	3.626	2.871	2.529	2.728	1.973	2.321	3.600	3.916	4.112	4.125	4.305	4.028	3.916	3.263	3.282	3.545	3.523
16/05 12:00:00	3.615	2.874	2.532	2.725	1.958	2.304	3.524	3.888	4.082	4.114	4.285	3.981	4.019	3.349	3.275	3.545	3.496
17/05 12:00:00	3.601	2.836	2.595	2.676	1.977	2.326	3.499	3.894	4.089	4.077	4.247	4.086	4.010	3.342	3.192	3.537	3.428
18/05 12:00:00	3.581	2.743	2.591	2.648	2.037	2.397	3.505	3.942	4.139	4.060	4.229	4.077	3.908	3.257	3.112	3.447	3.398
19/05 12:00:00	3.462	2.678	2.551	2.653	2.127	2.502	3.548	3.985	4.184	4.040	4.208	3.974	3.811	3.176	3.077	3.361	3.383
20/05 12:00:00	3.348	2.679	2.510	2.657	2.167	2.550	3.586	4.081	4.285	4.048	4.217	3.875	3.768	3.140	3.133	3.323	3.366
21/05 12:00:00	3.13	2.725	2.471	2.669	2.084	2.452	3.673	4.149	4.356	4.031	4.199	3.831	3.836	3.197	3.198	3.384	3.374
22/05 12:00:00	3.033	2.618	2.440	2.742	1.950	2.294	3.734	4.144	4.351	4.039	4.207	3.900	3.916	3.263	3.158	3.454	3.359
23/05 12:00:00	3.011	2.537	2.381	2.725	1.865	2.194	3.730	3.998	4.198	4.080	4.250	3.981	3.866	3.222	3.116	3.410	3.366
24/05 12:00:00	3.012	2.532	2.350	2.668	1.856	2.184	3.598	3.904	4.099	4.102	4.273	3.931	3.816	3.180	3.102	3.366	3.360
25/05 12:00:00	2.983	2.651	2.339	2.535	1.842	2.167	3.514	3.872	4.066	4.163	4.336	3.880	3.798	3.165	3.115	3.350	3.418
26/05 12:00:00	2.895	2.733	2.302	2.518	1.830	2.153	3.485	3.825	4.016	4.148	4.321	3.861	3.815	3.179	3.099	3.365	3.469
27/05 12:00:00	2.802	2.680	2.286	2.532	1.816	2.137	3.443	3.758	3.946	4.135	4.307	3.878	3.794	3.162	3.018	3.347	3.457
28/05 12:00:00	2.726	2.653	2.319	2.595	1.788	2.103	3.382	3.654	3.837	4.126	4.298	3.858	3.696	3.080	2.890	3.260	3.446
29/05 12:00:00	2.76	2.598	2.360	2.612	1.764	2.075	3.289	3.550	3.727	4.149	4.322	3.758	3.539	2.949	2.769	3.121	3.438
30/05 12:00:00	3.64035	2.586	2.376	2.519	1.768	2.080	3.195	3.467	3.640	4.190	4.365	3.598	3.390	2.825	2.686	2.990	3.458
31/05 12:00:00	3.6435	2.587	2.287	2.266	1.760	2.071	3.120	3.470	3.644	4.209	4.384	3.447	2.878	2.741	2.694	2.901	3.492
01/06 12:00:00	3.6792	2.522	2.182	2.190	1.771	2.083	3.123	3.504	3.679	4.160	4.333	3.344	2.886	2.749	2.752	2.910	3.507
02/06 12:00:00	3.77475	2.402	2.127	2.153	1.804	2.122	3.154	3.595	3.775	4.125	4.297	3.354	2.948	2.808	2.787	2.972	3.466
03/06 12:00:00	3.81045	2.475	2.089	2.173	1.886	2.219	3.236	3.629	3.810	4.094	4.265	3.426	2.986	2.844	2.850	3.010	3.438
04/06 12:00:00	3.8283	2.523	2.059	2.177	1.887	2.220	3.266	3.646	3.828	4.037	4.205	3.470	3.053	2.908	2.848	3.078	3.412
05/06 12:00:00	3.82935	2.518	1.992	2.202	1.834	2.158	3.281	3.647	3.829	3.961	4.126	3.548	3.051	2.906	2.815	3.076	3.361
06/06 12:00:00	3.86925	2.504	1.917	2.261	1.811	2.130	3.282	3.685	3.869	3.922	4.085	3.545	3.016	2.872	2.786	3.040	3.304
07/06 12:00:00	3.95115	2.450	1.871	2.254	1.802	2.120	3.316	3.763	3.951	4.017	4.184	3.504	2.985	2.843	2.859	3.009	3.268
08/06 12:00:00	3.46846	2.459	1.833	2.199	1.782	2.096	3.387	3.810	4.000	4.114	4.285	3.468	3.063	2.917	2.963	3.087	3.347
09/06 12:00:00	3.55874	2.546	1.889	2.130	1.020	2.054	3.429	3.845	4.037	4.122	4.294	3.559	3.174	3.023	2.905	3.200	3.428
10/06 12:00:00	3.68806	2.516	1.918	2.100	1.054	2.004	3.461	3.871	4.065	4.038	4.206	3.688	3.112	2.964	2.804	3.137	3.435
11/06 12:00:00	3.61608	2.514	1.937	2.113	1.088	1.999	3.484	3.885	4.079	4.015	4.182	3.616	3.004	2.861	2.725	3.028	3.365
12/06 12:00:00	3.49042	2.520	1.969	2.102	1.122	2.013	3.496	3.841	4.033	4.020	4.188	3.490	2.920	2.781	2.690	2.943	3.346
13/06 12:00:00	3.39282	2.524	1.904	2.045	1.156	1.994	3.457	3.802	3.992	4.005	4.172	3.393	2.882	2.745	2.683	2.905	3.350
14/06 12:00:00	1.867	2.512	1.977	1.904	1.190	1.929	3.422	3.768	3.956	3.978	4.144	3.349	2.875	2.738	2.630	2.898	3.388
15/06 12:00:00	1.882	2.453	1.758	1.793	1.224	1.879	3.391	3.720	3.906	3.850	3.947	3.340	2.818	2.684	2.578	2.841	3.315
16/06 12:00:00	1.927	2.449	1.721	1.765	1.258	1.867	3.348	3.713	3.899	3.734	3.980	3.274	2.763	2.631	2.600	2.785	2.965
17/06 12:00:00	1.978	2.448	1.713	1.778	1.292	1.882	3.342	3.642	3.824	3.451	4.044	3.210	2.786	2.653	2.642	2.808	2.990
18/06 12:00:00	1.99	2.464	1.794	1.843	1.327	1.927	3.278	3.605	3								

Fecha	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
01/08 12:00:00	2.042	2.032	1.780	2.042	1.495	3.356	4.144	3.687	3.240	3.396	3.804	2.759	2.822	2.509	2.377	2.654	
02/08 12:00:00	2.036	2.044	1.750	2.036	1.325	3.449	4.101	3.765	3.166	3.410	3.816	3.922	2.743	2.855	2.428	2.349	2.623
03/08 12:00:00	2.388	2.039	1.860	2.036	1.328	3.546	4.039	3.862	3.106	3.333	3.858	3.934	2.728	2.859	2.403	2.273	2.538
04/08 12:00:00	2.124	2.057	1.900	2.037	1.348	3.533	3.926	3.863	3.072	3.270	3.847	3.977	2.713	2.801	2.471	2.251	2.513
05/08 12:00:00	1.914	2.112	1.870	2.036	1.397	3.400	3.809	3.851	3.067	3.234	3.791	3.966	2.698	2.840	2.521	2.313	2.583
06/08 12:00:00	1.836	2.118	1.900	2.031	0.927	3.340	3.813	3.868	3.065	3.228	3.750	3.908	2.683	2.795	2.595	2.361	2.636
07/08 12:00:00	1.712	2.123	1.913	2.042	0.964	3.348	3.831	3.903	3.084	3.226	3.742	3.866	2.689	2.783	2.641	2.430	2.713
08/08 12:00:00	1.544	2.128	1.930	2.065	0.964	3.314	3.854	3.947	3.148	3.246	3.787	3.858	2.754	2.805	2.505	2.473	2.761
09/08 12:00:00	1.439	2.133	1.900	2.107	0.906	3.312	3.869	3.878	3.226	3.314	3.832	3.904	2.836	2.842	2.421	2.345	2.619
10/08 12:00:00	1.395	2.138	1.910	2.096	0.900	3.336	3.872	3.775	3.179	3.396	3.885	3.951	2.874	2.863	2.361	2.267	2.531
11/08 12:00:00	1.466	2.144	1.960	1.987	0.916	3.381	3.837	3.751	3.120	3.346	3.866	4.005	2.815	2.850	2.327	2.210	2.468
12/08 12:00:00	1.537	2.148	1.980	1.869	0.997	3.409	3.762	3.757	3.132	3.284	3.825	3.986	2.724	2.829	2.397	2.178	2.432
13/08 12:00:00	1.569	2.154	2.010	1.780	0.987	3.432	3.760	3.747	3.186	3.297	3.750	3.943	2.704	2.808	2.511	2.244	2.506
14/08 12:00:00	1.57	2.159	1.970	1.763	1.040	3.413	3.769	3.725	3.260	3.354	3.740	3.866	2.761	2.847	2.627	2.351	2.625
15/08 12:00:00	1.597	2.164	1.950	1.773	1.445	3.380	3.780	3.722	3.212	3.432	3.749	3.856	3.027	2.889	2.641	2.460	2.746
16/08 12:00:00	1.679	2.169	1.990	1.806	1.488	3.430	3.783	3.713	3.208	3.381	3.661	3.865	3.188	2.907	2.504	2.473	2.761
17/08 12:00:00	1.784	2.174	2.010	1.860	1.467	3.498	3.875	3.629	3.298	3.377	3.609	3.774	3.177	2.914	2.461	2.344	2.617
18/08 12:00:00	1.786	2.180	2.050	1.834	1.280	3.560	4.024	3.570	3.435	3.472	3.630	3.721	3.102	2.968	2.511	2.300	2.573
19/08 12:00:00	1.766	2.185	2.080	1.829	1.298	3.584	4.076	3.579	3.554	3.616	3.701	3.742	3.018	2.930	2.581	2.351	2.625
20/08 12:00:00	1.723	2.190	2.050	1.854	1.357	3.619	4.033	3.564	3.595	3.741	3.786	3.815	2.984	2.984	2.537	2.416	2.698
21/08 12:00:00	1.729	2.195	2.070	1.939	1.434	3.642	4.007	3.553	3.550	3.784	3.854	3.903	3.034	2.989	2.525	2.375	2.652
22/08 12:00:00	1.793	2.200	2.090	2.049	1.477	3.618	4.045	3.605	3.499	3.737	3.918	3.973	2.979	2.845	2.477	2.364	2.639
23/08 12:00:00	1.857	2.206	2.120	2.110	1.488	3.612	4.113	3.750	3.411	3.683	3.914	4.039	3.060	2.651	2.486	2.320	2.590
24/08 12:00:00	1.903	2.210	2.150	2.125	1.541	3.606	4.173	3.870	3.365	3.591	3.885	4.035	3.222	2.613	2.519	2.328	2.599
25/08 12:00:00	1.834	2.216	2.180	2.201	1.567	3.537	4.206	3.959	3.466	3.542	3.911	4.005	3.234	2.631	2.548	2.328	2.633
26/08 12:00:00	1.808	2.221	2.210	2.238	1.548	3.588	4.188	4.006	3.448	3.648	3.910	4.032	3.270	2.612	2.609	2.385	2.663
27/08 12:00:00	1.768	2.227	2.220	2.212	1.516	3.660	4.191	4.031	3.394	3.629	3.707	4.031	3.327	2.571	2.581	2.443	2.728
28/08 12:00:00	1.767	2.231	2.300	2.166	1.522	3.587	4.152	3.975	3.368	3.573	3.502	3.822	3.191	2.576	2.564	2.416	2.698
29/08 12:00:00	1.796	1.800	2.440	2.175	1.488	3.481	3.965	3.773	3.299	3.545	3.468	3.610	3.057	2.497	2.570	2.401	2.681
30/08 12:00:00	1.833	1.800	2.480	2.125	1.850	3.437	3.805	3.569	3.241	3.473	3.630	3.575	2.993	2.412	2.609	2.406	2.686
31/08 12:00:00	1.731	1.750	2.502	2.035	1.964	3.368	3.788	3.748	3.310	3.412	3.381	3.742	3.944	3.377	2.606	2.443	2.728
01/09 12:00:00	2.784	1.622	2.508	2.160	1.905	2.998	3.363	3.704	3.238	3.550	3.416	3.826	4.080	2.908	2.622	2.938	2.724
02/09 12:00:00	2.817	1.566	2.514	2.095	1.917	2.963	3.435	3.658	3.193	3.587	3.474	3.958	4.030	2.868	2.563	3.001	2.742
03/09 12:00:00	2.815	1.502	2.519	2.109	1.923	2.926	3.457	3.563	3.295	3.648	3.472	3.909	3.971	2.918	2.501	2.846	2.679
04/09 12:00:00	2.766	1.407	2.525	2.115	1.886	2.850	3.465	3.491	3.374	3.646	3.469	3.852	3.889	2.949	2.464	2.696	2.615
05/09 12:00:00	2.727	1.372	2.531	2.075	1.808	2.793	3.452	3.516	3.383	3.642	3.477	3.772	3.863	2.999	2.476	2.629	2.676
06/09 12:00:00	2.687	1.381	2.537	1.989	1.693	2.813	3.429	3.476	3.365	3.651	3.513	3.747	3.926	2.959	2.500	2.664	2.589
07/09 12:00:00	2.631	1.475	2.542	1.862	1.594	2.781	3.423	3.360	3.346	3.689	3.482	3.808	3.917	2.963	2.595	2.718	2.614
08/09 12:00:00	2.615	1.574	2.548	1.753	1.561	2.688	3.462	3.339	3.358	3.656	3.389	3.799	4.039	3.127	2.674	2.777	2.713
09/09 12:00:00	2.683	1.575	2.554	1.717	1.508	2.671	3.536	3.339	3.482	3.558	3.355	3.918	4.077	3.233	2.705	2.870	2.796
10/09 12:00:00	2.729	1.562	2.560	1.659	1.503	2.671	3.634	3.431	3.511	3.523	3.255	3.955	4.089	3.195	2.741	2.984	2.828
11/09 12:00:00	2.782	1.510	2.565	1.653	1.505	2.745	3.682	3.528	3.387	3.418	3.217	3.966	4.136	3.166	2.704	2.908	2.866
12/09 12:00:00	2.896	1.452	2.571	1.655	1.505	2.822	3.569	3.567	3.219	3.378	3.244	4.012	4.189	3.188	2.600	2.768	2.827
13/09 12:00:00	2.861	1.390	2.577	1.655	1.529	2.854	3.507	3.562	3.096	3.406	3.257	4.063	4.154	3.228	2.565	2.756	2.719
14/09 12:00:00	2.77	1.406	2.583	1.682	1.570	2.850	3.562	3.497	3.034	3.420	3.392	4.029	4.059	3.273	2.687	2.766	2.682
15/09 12:00:00	2.676	1.509	2.588	1.727	1.542	2.798	3.677	3.447	3.034	3.562	3.576	3.937	4.042	3.341	2.864	2.738	2.809
16/09 12:00:00	2.607	1.510	2.594	1.696	1.514	2.758	3.811	3.392	3.115	3.755	3.602	3.921	4.138	3.108	2.818	2.682	2.995
17/09 12:00:00	2.533	1.506	2.600	1.665	1.561	2.714	3.925	3.383	3.217	3.782	3.504	4.014	4.244	2.769	2.715	2.704	2.946
18/09 12:00:00	2.453	1.515	2.606	1.717	1.514	2.706	3.821	3.411	3.155	3.679	3.617	4.117	4.153	2.568	2.660	2.794	2.838
19/09 12:00:00	2.478	1.575	2.611	1.665	1.577	2.729	3.732	3.321	3.073	3.798	3.683	4.028	4.017	2.505	2.634	2.796	2.781
20/09 12:00:00	2.549	1.525	2.617	1.735	1.564	2.657	3.696	3.317	3.030	3.867	3.597	3.896	3.915	2.453	2.658	2.712	2.754
21/09 12:00:00	2.621	1.468	2.674	1.720	1.528	2.654	3.623	3.502	2.997	3.777	3.516	3.798	3.890	2.394	2.687	2.639	2.778
22/09 12:00:00	2.653	1.431	2.725	1.681	1.507	2.802	3.561	3.682	2.993	3.692	3.480	3.773	3.874	2.334	2.742	2.518	2.809
23/09 12:00:00	2.589	1.386	2.543	1.658	1.486	2.946	3.518	3.715	3.044	3.654	3.458	3.758	3.923	2.306	2.747	2.460	2.867
24/09 12:00:00	2.584	1.313	2.294	1.635	1.460	2.972	3.572	3.696	3.087	3.631	3.423	3.805	3.933	2.316	2.728	2.605	2.872
25/09 12:00:00	2.541	1.294	2.173	1.606	1.426	2.957	3.583	3.669	3.123	3.594	3.464	3.815	3.943	2.336	2.736	2.759	2.852
26/09 12:00:00	2.516	1.322	2.271	1.569	1.377	2.935	3.491	3.523	3.136	3.637	3.563	3.825	3.935	2.349	2.724	2.850	2.860
27/09 12:00:00	2.518	1.307	2.442	1.515	1.330	2.818	3.440	3.483	3.131	3.741	3.696	3.817	3.937	2.370	2.733	2.860	2.847
28/09 12:00:00	2.518	1.308	2.533	1.463	1.307	2.786	3.438	3.635	3.142	3.881	3.805	3.819	3.935	2.369	2.848	2.752	2.858
29/09 12:00:00	2.518	1.344	2.596	1.438	1.298	2.908	3.419	3.780	3.166	3.995	3.892	3.817	3.868	2.357	3.018	2.644	2.777
30/09 12:00:00	2.47	1.429	2.583	1.428	1.322	2.268	3.369	4.062	3.175	4.087	3.910	3.752	3.754	2.349	2.892	2.651	3.126
01/10 12:00:00	2.498	1.524	2.589	1.454	1.339	2.437	3.353	4.395	3.220	4.106	3.829	3.641	3.755	2.396	2.800	2.746	3.053
02/10 12:00:00	2.609	1.601	2.759	1.473	1.454	2.637	3.425	4.292	3.237	4.020	3.796	3.642</					

Fecha	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
15/11 12:00:00	3.339	2.817	2.800	2.720	2.483	1.933	4.186	4.662	4.399	4.057	3.823	4.183	4.385	4.046	3.083	3.437	4.296
16/11 12:00:00	3.523	2.799	2.883	2.731	2.600	1.909	4.222	4.798	4.788	4.014	3.902	4.253	4.450	4.217	3.013	3.330	4.162
17/11 12:00:00	3.614	2.800	2.946	2.860	2.552	1.963	4.444	4.837	4.819	4.097	4.057	4.316	4.558	4.266	2.960	3.254	4.068
18/11 12:00:00	3.7	2.801	2.873	2.807	2.469	2.044	4.827	4.796	4.677	4.260	4.095	4.421	4.576	4.278	2.923	3.197	3.996
19/11 12:00:00	3.83	2.749	2.759	2.716	2.447	2.103	4.969	4.698	4.454	4.300	4.105	4.439	4.578	4.171	2.955	3.157	3.946
20/11 12:00:00	3.887	2.686	2.725	2.692	2.568	2.116	4.764	4.599	4.257	4.310	4.157	4.441	4.603	4.152	3.051	3.191	3.989
21/11 12:00:00	3.883	2.678	2.730	2.825	2.809	2.134	4.531	4.528	4.143	4.365	4.210	4.465	4.642	4.304	3.233	3.295	4.119
22/11 12:00:00	3.756	2.949	2.834	3.090	2.870	2.216	4.420	4.409	4.037	4.421	4.141	4.503	4.555	4.528	3.263	3.492	4.365
23/11 12:00:00	3.664	3.226	3.020	3.157	2.759	2.273	4.454	4.277	4.008	4.348	4.043	4.418	4.354	4.681	3.298	3.524	4.405
24/11 12:00:00	3.739	3.136	3.164	3.035	2.614	2.281	4.721	4.182	4.062	4.245	3.993	4.223	4.249	4.684	3.254	3.562	4.452
25/11 12:00:00	3.76	2.937	3.233	2.875	2.538	2.254	5.100	4.172	4.116	4.193	3.990	4.112	4.242	4.705	3.225	3.514	4.393
26/11 12:00:00	3.846	2.813	3.298	2.792	2.601	2.300	5.190	4.230	4.295	4.190	4.043	4.115	4.254	4.666	3.161	3.483	4.354
27/11 12:00:00	4.068	2.799	3.305	2.861	2.651	2.403	5.120	4.222	4.394	4.245	4.180	4.126	4.411	4.570	3.091	3.414	4.267
28/11 12:00:00	3.981	2.887	3.383	2.916	2.704	2.406	5.300	4.150	4.355	4.389	4.278	4.279	4.581	4.524	3.042	3.338	4.173
29/11 12:00:00	3.772	2.958	3.477	2.974	2.725	2.422	5.612	4.053	4.143	4.492	4.282	4.444	4.672	4.522	3.029	3.285	4.107
30/11 12:00:00	3.591	3.018	3.598	2.997	2.661	2.572	5.894	4.014	4.022	4.496	4.351	4.532	5.338	4.474	3.085	3.271	4.089
01/12 12:00:00	3.477	3.012	3.539	2.927	2.546	2.639	5.977	3.935	3.950	4.569	4.399	5.178	5.907	4.698	3.419	3.332	4.165
02/12 12:00:00	3.806	3.013	3.327	2.801	2.504	2.571	5.907	3.984	3.872	4.619	4.441	5.730	5.602	4.394	3.537	3.693	4.616
03/12 12:00:00	4.124	3.115	3.013	2.754	2.531	2.448	6.001	4.158	3.848	4.663	4.805	5.434	5.241	3.936	3.466	3.820	4.775
04/12 12:00:00	4.327	3.182	2.777	2.784	2.596	2.344	6.445	4.448	3.974	5.045	5.202	5.084	5.294	3.668	3.461	3.743	4.679
05/12 12:00:00	4.269	3.296	2.614	2.856	2.681	2.313	6.336	4.693	4.078	5.462	5.338	5.135	5.479	3.532	3.931	3.738	4.672
06/12 12:00:00	4.012	3.267	2.569	2.949	2.677	2.331	5.983	4.690	4.090	5.605	5.138	5.315	5.389	3.475	4.228	4.245	5.307
07/12 12:00:00	3.668	3.135	2.605	2.945	2.618	2.433	5.728	4.568	4.150	5.395	4.880	5.227	5.136	3.402	4.004	4.566	5.708
08/12 12:00:00	3.376	3.046	2.735	2.880	2.577	2.524	5.435	4.489	4.208	5.124	4.766	4.982	4.959	3.256	3.764	4.324	5.405
09/12 12:00:00	3.391	3.124	2.867	2.835	2.610	2.573	5.166	4.496	4.477	5.004	4.803	4.810	5.219	3.159	3.737	4.065	5.081
10/12 12:00:00	3.551	3.641	2.825	2.871	2.688	2.572	5.042	4.623	4.884	5.043	4.812	5.062	5.460	3.075	3.686	4.036	5.045
11/12 12:00:00	3.722	4.091	2.814	2.957	2.693	2.435	4.971	4.606	5.019	5.053	4.733	5.296	5.322	3.091	3.454	3.981	4.976
12/12 12:00:00	3.906	4.004	2.951	2.962	2.607	2.285	4.843	4.478	4.961	4.970	4.681	5.162	5.175	3.074	3.216	3.730	4.663
13/12 12:00:00	4.16	3.883	3.089	2.868	2.552	2.215	4.754	4.358	4.983	4.915	4.625	5.020	5.040	3.067	3.064	3.473	4.342
14/12 12:00:00	4.353	3.808	3.074	2.807	2.496	2.186	4.741	4.182	5.032	4.856	4.534	4.889	4.770	3.098	3.062	3.309	4.136
15/12 12:00:00	4.406	3.804	2.982	2.746	2.420	2.152	4.821	4.041	4.913	4.761	4.546	4.627	4.610	3.280	3.245	3.307	4.134
16/12 12:00:00	4.362	3.942	3.099	2.662	2.337	2.170	5.128	3.988	4.778	4.773	4.649	4.472	4.552	3.338	3.405	3.505	4.381
17/12 12:00:00	4.275	4.242	3.208	2.571	2.217	2.262	5.496	4.057	4.647	4.881	4.700	4.415	4.758	3.222	3.463	3.677	4.597
18/12 12:00:00	4.251	4.042	3.189	2.439	2.161	2.334	5.604	4.145	4.503	4.935	4.718	4.615	5.142	3.148	3.496	3.740	4.675
19/12 12:00:00	4.143	3.676	3.181	2.377	2.481	2.402	5.757	4.076	4.764	4.954	4.676	4.988	5.283	3.287	3.472	3.776	4.720
20/12 12:00:00	3.993	3.455	3.119	2.729	2.769	2.565	5.816	4.203	5.094	4.910	4.667	5.125	5.275	3.417	3.497	3.750	4.687
21/12 12:00:00	3.845	3.449	3.340	3.046	2.942	2.668	6.140	4.398	5.392	4.807	4.670	5.117	5.163	3.417	3.599	3.777	4.721
22/12 12:00:00	3.805	3.489	3.475	3.236	2.829	2.789	6.107	4.640	5.504	4.810	4.689	5.008	5.037	3.489	3.630	3.887	4.859
23/12 12:00:00	3.809	3.461	3.407	3.112	2.686	3.018	6.205	4.812	5.229	4.830	4.742	4.886	5.339	3.709	3.632	3.920	4.901
24/12 12:00:00	3.819	3.394	3.423	2.955	2.533	3.284	6.340	4.902	5.087	4.884	4.733	5.179	5.779	3.503	3.593	3.923	4.903
25/12 12:00:00	3.823	3.369	3.756	2.786	2.396	3.202	6.399	5.018	5.032	4.875	4.737	5.606	5.753	3.265	3.685	3.880	4.851
26/12 12:00:00	3.901	3.317	3.841	2.636	2.447	3.017	6.342	4.880	4.975	4.879	4.825	5.580	5.733	3.359	3.793	3.980	4.975
27/12 12:00:00	4.227	3.188	3.698	2.692	2.505	2.897	5.976	4.828	4.882	4.970	4.856	5.561	5.298	3.474	3.886	4.096	5.121
28/12 12:00:00	4.349	3.102	3.512	2.756	2.632	2.809	5.865	4.871	5.190	5.002	4.866	5.624	4.782	3.548	3.934	4.197	5.246
29/12 12:00:00	4.188	2.972	3.332	2.895	2.878	2.727	5.950	4.952	5.685	5.012	4.832	5.803	4.755	3.492	3.855	4.249	5.311
30/12 12:00:00	4.049	3.015	3.086	3.166	2.934	2.669	5.200	5.059	5.726	4.977	4.874	5.679	4.682	3.450	3.667	4.163	5.204
31/12 12:00:00	4.066	3.082	3.086	3.227	2.934	2.630	5.100	5.059	5.726	5.020	4.874	5.700	5.682	3.549	3.667	3.960	4.950

Los datos recopilados de la estación Llangauro a nivel diario fueron obtenidos del Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua, mediante la CARTA N.º 016-2020-ANA-DCERH-AEGL.

## ANEXO 2





