



Universidad Nacional Mayor de San Marcos
Universidad del Perú. Decana de América
Facultad de Ciencias Físicas
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos

**Efecto del cambio climático en la oferta de agua en la
unidad hidrográfica Yanayacu para la gestión del
recurso hídrico, Áncash, Perú**

TESIS

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos

AUTOR

Reynner Raymundo FLORES ESTRADA

ASESORES

Douglas Donal SARANGO JULCA

Gladis Teodora CELMI HENOSTROZA (Coasesora)

Lima, Perú

2023



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Flores, R. (2023). *Efecto del cambio climático en la oferta de agua en la unidad hidrográfica Yanayacu para la gestión del recurso hídrico, Áncash, Perú*. [Tesis de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ciencias Físicas, Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor	
Nombres y apellidos	Reynner Raymundo Flores Estrada
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	45237933
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7820-4183
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	07136313
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0001-7963-1507
Datos de coasesor	
Nombres y apellidos	Gladis Teodora Celmi Henostroza
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	44734005
URL de ORCID	https://orcid.org/0000-0002-4384-070X
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Aristides Ramón Serruto Colque
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	01284486
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Jorge Luis Gastelo Villanueva

Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08434899
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Douglas Donal Sarango Julca
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	07136313
Datos de investigación	
Línea de investigación	A.2.5.2. Recursos Hídricos
Grupo de investigación	No Aplica
Agencia de financiamiento	Perú. Concytec/ProCiencia. Proyecto "Peruvian Glacier Retreat and its Impact". N°08-2019-FONDECYT
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Ancash Provincia: Huaraz Distrito: Independencia Latitud: - 9.528920 Longitud: - 77.526690
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2020 - 2022
URL de disciplinas OCDE	Oceanografía, Hidrología, Recursos hídricos https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.11



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PRESENCIAL PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECANICO DE FLUIDOS

Siendo las 15:00 horas del sábado 11 de marzo de 2023, en el Auditorio de la Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos, bajo la presidencia del Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE y con la asistencia del asesor Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA, y miembro Dr. Ing. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA se dio inicio a la sesión pública de sustentación de tesis para la obtención del Título Profesional de Ingeniero Mecánico de Fluidos, mediante la sustentación y aprobación de una tesis del Bachiller:

REYNNER RAYMUNDO FLORES ESTRADA

El Presidente del Jurado en primer lugar dio lectura al documento formal que designa al Jurado y aprueba el acto de sustentación de la tesis, así como del resumen del expediente e invitó al citado Bachiller a realizar la presentación y exposición de su tesis titulada: "EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA YANAYACU PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, ANCASH, PERÚ".

Concluida la exposición del candidato y luego de las preguntas de rigor por parte del Jurado, el Presidente del mismo, invitó al Bachiller a abandonar momentáneamente la Sala de Sesión para dar paso a la deliberación y calificación por parte del Jurado.

Al término de la deliberación del Jurado, se invitó al candidato a regresar a la Sala de Sesión, para dar lectura a la calificación obtenida por el Bachiller, la misma que es:


DIECISIETE 17

El Presidente del Jurado Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE, a nombre de la Nación y de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, declaró al Bachiller REYNNER RAYMUNDO FLORES ESTRADA, Ingeniero Mecánico de Fluidos.

Siendo las 16:20 horas del mismo día, se levanta la sesión.


Dr. Ing. ARÍSTIDES RAMÓN SERRUTO COLQUE
PRESIDENTE


Dr. Ing. DOUGLAS DONAL SARANGO JULCA
ASESOR


Dr. Ing. JORGE LUIS GASTELO VILLANUEVA
MIEMBRO

Anexo 1

Informe de evaluación de Originalidad

1. Facultad de Ciencias Físicas
2. Escuela/Unidad de Posgrado
Escuela Profesional de Ingeniería Mecánica de Fluidos
3. Autoridad Académica que emite el informe de originalidad
El Director de la EPIMF
4. Apellidos y nombres de la autoridad académica
Sarango Julca Douglas Donal
5. Operador del programa Informático de similitudes
Dr. Ing. Douglas Sarango Julca
6. Documento evaluado (1)
"EFECTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA OFERTA DE AGUA EN LA UNIDAD HIDROGRÁFICA YANAYACU PARA LA GESTIÓN DEL RECURSO HÍDRICO, ANCASH, PERÚ"
7. Autor del documento (2)
REYNNER RAYMUNDO FLORES ESTRADA
8. Fecha de recepción del documento 14/03/23
9. Fecha de aplicación del programa informático de similitudes 15/03/23
10. Software utilizado
 - Turnitin (X)
 - Ithenticate
 - Otro (especificar)
11. Configuración del programa detector de similitudes
 - Excluye textos entrecomillados
 - Incluye Bibliografía
 - Excluye cadenas menores a 40 palabras
12. Porcentaje de similitudes según programa detector de similitudes³
10%
13. Fuentes originales de las similitudes encontradas⁴
14. Observaciones
Ninguna
15. Calificación de originalidad
 - Documento cumple criterios de originalidad, sin observaciones (X)
 - Documento cumple criterios de originalidad, con observaciones
 - Documento no cumple criterios de originalidad
16. Fecha del Informe 16/03/23



Firmado digitalmente por SARANGO
JULCA Douglas Donal FAU
20148092282 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 17.03.2023 08:42:54 -05:00

DR. ING. Douglas Sarango Julca
DIRECTOR (e) DE LA EPIMF

1 Tesis para grado o título de pregrado, Tesis para posgrado. Otro (especificar)

2 Apellidos y Nombres completos

3 En letras y números

4 Indicarlas en orden decreciente y su respectivo porcentaje

DEDICATORIA

A mis queridos padres Afrodocio Flores y Norma Estrada, y a mi querido hermano Franco Flores. Por su sacrificio, amor, paciencia, confianza y apoyo incondicional a lo largo de toda mi vida. No hay ni habrá discurso suficiente para expresarles mi amor y agradecimiento a ustedes. Espero que la vida nos regale más tiempo para poder disfrutar de su compañía y de tenerlos siempre a mi lado.

A pesar de los vaivenes de la vida todo es posible si uno conserva en su alma sus sueños y enfrenta sus miedos.

AGRADECIMIENTO

A mi familia por siempre apoyarme en todo momento y confiar en mí en los muchos retos en los que me he embarcado, a mi asesor Dr. Ing. Douglas Sarango por su apoyo y guía a lo largo de la tesis, en mi vida universitaria y sobretodo en la etapa como presidente del GIHREHMA en donde pudimos generar confianza y compartir ideas.

Al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por promover y fomentar la investigación en el país, dando soporte científico, logístico y humano, a los nuevos y futuros científicos del país.

A mi co-asesora Gladis Celmi del INAIGEM, por su disposición para absolver mis dudas, darme buenos consejos, apoyo constante en el día a día de la institución y además, por permitirme conocer y trabajar con investigadores nacionales e internacionales.

A la Ph.D. Emily Potter, que me proporcionó la información meteorológica que fue usada como base de datos para la tesis y por responder a todas mis preguntas y correos. A los especialistas de la SDIG de INAIGEM y a mis amigos tesistas por su amistad a lo largo de la tesis. Asimismo, al Lic. Florentino Bellido que con su apoyo y consejos puede concluir esta etapa.

Esta investigación ha sido financiada por el Concytec/ProCiencia, la Embajada Británica, el NERC y el Fondo Newton-Paulet en el marco de la convocatoria E031-2018-01-NERC “Círculos de Investigación en Glaciares”. [Contrato N°08-2019-FONDECYT], proyecto “Peruvian Glacier Retreat and its Impact on Water Security - Peru GROWS”.

INDICE

1	INTRODUCCIÓN.....	10
1.1	Problemática	11
1.2	Justificación	12
1.3	Hipótesis	12
1.3.1	Variables independientes	13
1.3.2	Variables dependientes	13
1.4	Objetivos.....	13
1.4.1	Objetivo General.....	13
1.4.2	Objetivos específicos	14
2	REVISIÓN DE LA LITERATURA.....	15
2.1	Antecedentes	15
2.2	Ciclo hidrológico	16
2.3	Unidad hidrográfica	17
2.4	Aplicación de Herramientas de información geográfica (geoespaciales).....	17
2.5	Modelamiento hidrológico.....	18
2.6	WEAP	19
2.6.1	Descripción del modelo	19
2.6.2	Modelamiento hidrológico con WEAP	21
2.6.3	Método Humedad de Suelo	22
2.7	Escenarios climáticos.....	26
3	METODOLOGÍA.....	28
3.1	Ubicación y características del área de investigación.....	28
3.1.1	Ubicación de la zona de estudio	28
3.1.2	Población	28

3.1.3	Clima	28
3.1.4	Hidrografía.....	29
3.1.5	Cobertura de suelo	29
3.2	Materiales.....	33
3.2.1	Información hidrometeorológica	33
3.2.2	Información geoespacial.....	36
3.2.3	Demandas de agua	37
3.2.4	Equipos y software	39
3.3	Metodología de la investigación	39
3.3.1	Generación de información de insumo para el modelo hidrológico WEAP .	41
3.3.2	Construcción del modelo hidrológico WEAP	44
3.3.3	Calibración y validación del modelo WEAP.....	50
3.3.4	Simulación de los efectos del Cambio Climático en la oferta de agua.....	56
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
4.1	Generación de información de insumo para el modelo hidrológico WEAP.....	58
4.1.1	Creación de las unidades hidrológicas.....	58
4.1.2	Cobertura de suelo	64
4.1.3	Información meteorológica.....	68
4.2	Construcción del modelo hidrológico WEAP.....	68
4.2.1	Esquema del modelo.....	68
4.2.2	Ingreso de datos al modelo	71
4.3	Calibración y validación del modelo WEAP	76
4.4	Simulación de los efectos del Cambio Climático en la oferta de agua futura	94
4.4.1	Escenario de Referencia:	94
4.4.2	Escenario de RCP 4.5:	101
4.4.3	Escenario RCP 8.5:.....	108
5	CONCLUSIONES.....	116

6	RECOMENDACIONES	119
7	BIBLIOGRAFÍA	120
8	ANEXOS	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Variables Dependientes e Independientes	13
Tabla 2 Aspectos Principales de WEAP.....	20
Tabla 3 Bloques de Riego en la Zona de Estudio.....	38
Tabla 4 Unidad Hidrográfica Yanayacu Nivel 6	41
Tabla 5 Rango de Valores de los Parámetros de Suelo en Distintas Investigaciones	47
Tabla 6 Sitios de Demanda en la Zona de Estudio	48
Tabla 7 Lagunas Importantes en las Zonas de Estudio.....	49
Tabla 8 Rangos de Valores del Coeficiente de Nash-Sutcliffe.....	53
Tabla 9 Rangos de Valores del Coeficiente de PBIAS.....	53
Tabla 10 Valores Referenciales del Criterio de Schultz.....	54
Tabla 11 Bandas Altitudinales en la UH Yanayacu	58
Tabla 12 Unidades Hidrológicas en la Unidad Hidrográfica Yanayacu.....	59
Tabla 13 Nuevas Unidades Hidrológicas Debido a la Laguna Querococha.....	61
Tabla 14 Nuevas Unidades Hidrológicas Debido a la Laguna Verdecocha.....	63
Tabla 15 Nuevas Unidades Hidrológicas por las lagunas Pamparaju, Jarpacocha y Gheshguecocha.....	63
Tabla 16 Cobertura en la UH Yanayacu.....	67
Tabla 17 Valores de k_c en función al tipo de cobertura	71
Tabla 18 Valores de S_w en función al tipo de cobertura.....	72
Tabla 19. Valores de D_w en función al tipo de cobertura.	72
Tabla 20 Valores de RRF en función al tipo de cobertura y la pendiente promedio.....	73
Tabla 21 Valores de k_s en función al tipo de cobertura	73
Tabla 22 Valores de k_d en función al tipo de cobertura y unidad hidrográfica.....	74
Tabla 23 Valores de f en función al tipo de cobertura y unidad hidrográfica	74
Tabla 24 Valores de z_1	74
Tabla 25 Valores de z_2	75
Tabla 26 Caudales históricos de la Estación Querococha en el periodo 1980-1996.....	77
Tabla 27 Valores de los parámetros de suelo en el proceso de calibración de Querococha.	78
Tabla 28 Caudales simulados por el modelo WEAP en Querococha en el periodo 1980-1996	78

Tabla 29 Caudales Medios Mensuales en la Calibración en Querococha (m ³ /s).....	80
Tabla 30 Valores de las medidas de ajuste de la Calibración en Querococha.....	81
Tabla 31 Caudales Medios Mensuales en la Validación (m ³ /s).....	83
Tabla 32 Valores de las medidas de ajuste de la Validación en Querococha.....	83
Tabla 33 Caudales históricos de la Estación Olleros en el periodo 1980-1996.....	84
Tabla 34 Comparación de valores de Similitud entre las cuencas de los ríos Yanayacu y Negro	85
Tabla 35 Caudales históricos de la Estación ficticia Yanayacu (por trasposición de caudales)	86
Tabla 36 Valores de los parámetros de suelo en el proceso de calibración de Yanayacu..	87
Tabla 37 Caudales simulados por el modelo WEAP para la estación ficticia Yanayacu..	88
Tabla 38 Caudales Medios Mensuales en la Calibración en Yanayacu (m ³ /s).....	90
Tabla 39 Valores de las medidas de ajuste de la Calibración en Yanayacu	91
Tabla 40 Caudales Medios Mensuales en la Validación en Yanayacu (m ³ /s).....	93
Tabla 41 Valores de las medidas de ajuste de la Validación en Yanayacu	93
Tabla 42 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y Referencia.....	95
Tabla 43 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y Referencia	96
Tabla 44 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y Referencia.....	97
Tabla 45 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y Referencia.....	98
Tabla 46 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y Referencia	99
Tabla 47 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y Referencia.....	100
Tabla 48 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y RCP 4.5.....	102
Tabla 49 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 4.5.....	103
Tabla 50 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 4.5	104
Tabla 51 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y RCP 4.5.....	105
Tabla 52 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 4.5.....	106
Tabla 53 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 4.5	107
Tabla 54 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y RCP 8.5.....	109
Tabla 55 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 8.5.....	110
Tabla 56 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 8.5	111
Tabla 57 Caudales medios (m ³ /s) entre los escenarios Base y RCP 8.5.....	112
Tabla 58 Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 8.5.....	113
Tabla 59 Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 8.5	114
Tabla 60. Áreas por tipo de cobertura en cada unidad hidrológica en la UH Yanayacu..	173

Tabla 61. Porcentaje por tipo de cobertura en cada unidad hidrológica en la UH Yanayacu	176
--	-----

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global.....	16
Figura 2. La cuenca como un sistema hidrológico	19
Figura 3. Esquema del método de Humedad de Suelo	23
Figura 4. Curvas de nivel cada 100 m	36
Figura 5. Inventario de lagunas (en azul) y glaciares (en amarillo).	37
Figura 6. Metodología de la elaboración de la tesis	40
Figura 7. Información de ingreso de uso de suelo que requiere cada unidad hidrológica.	47
Figura 8. Área de escorrentía sobre la laguna Querococha (en rojo).	62
Figura 9. Áreas de escorrentía sobre las lagunas (en rojo).	62
Figura 10. Cuenta creada y verificada para trabajar sobre la plataforma GEE	65
Figura 11. Elaboración de scripts en la plataforma de GEE.....	66
Figura 12. Tipos de cobertura en la zona de estudio	67
Figura 13. Componentes creados en el interfaz de WEAP.	68
Figura 14. Esquema de algunos componentes a la altura de la Laguna Querococha.	70
Figura 15. Esquema de los componentes creados para Yanayacu	70
Figura 16. Precipitación calculada para cada unidad hidrológica	75
Figura 17. Calibración de caudales observados y simulados en Querococha	79
Figura 18. Diagrama de dispersión de calibración Querococha.....	79
Figura 19. Caudales medios mensuales de calibración en Querococha	80
Figura 20. Validación de caudales observados y simulados en Querococha	81
Figura 21. Diagrama de dispersión de validación en Querococha.	82
Figura 22. Caudales medios mensuales de validación en Querococha.	82
Figura 23. Calibración de caudales ficticios y simulados en Yanayacu.....	89
Figura 24. Diagrama de dispersión de calibración en Yanayacu	89
Figura 25. Caudales medios mensuales de calibración en Yanayacu	90
Figura 26. Validación de caudales ficticios y simulados en Yanayacu.....	91
Figura 27. Diagrama de dispersión de validación en Yanayacu	92
Figura 28. Caudales medios mensuales de validación en Yanayacu.....	92

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 1. Mapa de ubicación política de la UH Yanayacu	30
Mapa 2. Mapa de ubicación hidrográfica de la UH Yanayacu.....	31
Mapa 3. Mapa de ubicación administrativa de la UH Yanayacu	32
Mapa 4. Mapa de estaciones climáticas e hidrométricas cercanas a la UH Yanayacu.....	35
Mapa 5. Mapa de ubicación de similitud de cuencas	52

1 INTRODUCCIÓN

La presente tesis se realizó bajo el marco del proyecto PERU GROWS (Retrosceso Glaciar y su impacto en la seguridad hídrica en el Perú). GROWS estuvo liderado por INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) con el propósito de mejorar la resiliencia de las comunidades y ecosistemas andinos en el Perú por la inseguridad hídrica generada por cambios climáticos y el clima, en cooperación con instituciones como SENAMHI y PUCP (parte peruana) e internacionales como la Universidad de Cranfield, Universidad de Northumbria, entre otros (parte británica). El proyecto de investigación se centró en la cuenca del río Santa, partiendo de las unidades hidrográficas (UHs) de Parón, Quillcay y Yanayacu, como unidades pilotos, donde se buscó cubrir las principales brechas de información que existen para una eficiente gestión del recurso hídrico, así como un estudio sobre los posibles impactos que podría generarse con la pérdida del glaciar y el cambio en el clima, todo ello enfocado desde un punto de vista de “sistema”, que incluye la parte social, ecológica y de gobernanza. Debido a estas brechas de información que existe, se tiene que generar una estrategia que pueda ser el primer paso para mejorar la eficiencia en la gestión del recurso hídrico en una de las cuencas más importantes del país (cuenca del río Santa) y de la cual dependen muchas comunidades rurales, urbanas y actividades importantes. Para suplir esta necesidad se hará uso del modelamiento hidrológico cuya finalidad es representar la unidad hidrográfica y simular sus diferentes componentes.

En la presente tesis nos enfocaremos en el modelamiento hidrológico de la UH Yanayacu, ubicada en la Cordillera Blanca, en los distritos de Ticapamapa y Cátac, provincia de Recuay. De esta manera se elaborará un modelamiento donde podremos analizar su comportamiento hidrológico con el modelo WEAP. Además, es preciso remarcar que la UH fue delimitada por la metodología Pfsfstetter por la Autoridad Nacional del Agua (ANA), cuyo código es 137698 (nivel 6).

Debido a que el recurso hídrico cada vez es más requerido para poder satisfacer todas las demandas, es necesario generar alternativas para que su uso sea entregado de manera eficiente a todos sus distintos usuarios y con sus respectivas demandas. Por ello en el proyecto PERU GROWS y en la presente tesis se usará el software WEAP (“Water

Evaluation And Planing” system), siendo esta una herramienta computacional que provee un enfoque integral para la planificación de los recursos hídricos, desarrollado por el Stockholm Environment Institute.

Entonces el objetivo de la tesis será simular los efectos del cambio climático de la oferta de agua de la UH 137698 (Yanayacu) mediante la utilización del software WEAP con fines de gestión de recurso hídrico con un periodo de datos desde 1980 al 2018.

La metodología empezó por la delimitación de la UH a modelar; luego se definieron las variables hidrometeorológica, el análisis, el tratamiento y la generación de data; seguidamente se construyó el esquema que consiste en adecuar al modelo WEAP con las características propias de la UH de estudio como son la cobertura vegetal, las demandas y usos de agua, las estructuras hidráulicas, etc.; más tarde, se calibró y validó el modelo hidrológico para evaluarlo con algún indicador estadístico de eficiencia (coeficiente de Nash, coeficiente de correlación de Pearson, etc); y finalmente se analizó los efectos del cambio climático en la UH sobre la oferta de agua en el periodo del 2019 al 2050.

1.1 Problemática

La problemática es la disminución en la oferta de agua en la UH de Yanayacu por el efecto del cambio climático y la limitada disponibilidad de dicha información.

En la UH de Yanayacu se tiene limitada información, se conoce que su superficie glaciar es de 6.07 km² y es menor respecto a las demás cuencas piloto (Llullán con 23.10 km² y Quillcay con 30.04 km²), por lo tanto, la población se siente vulnerable respecto a la disminución de la oferta de agua. Actualmente sus principales actividades de demanda de agua son la piscícola, minera, agrícola y poblacional, que no están regidas bajo una gestión integral del recurso hídrico y resulta preocupante las repercusiones que podría tener esta en los próximos años.

1.2 Justificación

La UH Yanayacu se encuentra ubicada al sur de la cuenca del río Santa, donde las tasas de retroceso glaciario son mayores a comparación de los glaciares ubicados al norte, como se evidencia en el glaciar Pastoruri (aledaña a los glaciares de la Unidad Hidrográfica Yanayacu), que ha perdido el 60% de su glaciar en 21 años (1995 – 2016) (ANA, 2018). Dichas pérdidas repercuten directamente en el almacenamiento de agua en las lagunas y esta a su vez en la disponibilidad hídrica de las diferentes demandas de agua.

De acuerdo a la población asentada en la UH, la cantidad de agua ha ido disminuyendo en los últimos años, sin embargo, se tiene limitados registros de flujo de agua que corroboren dicha información y el limitado acceso a herramientas que ayuden a mejorar la distribución y gestión del agua. Dichas limitaciones están generando problemas (posibles conflictos) entre los diferentes usuarios, especialmente en los usuarios de pastos (comunidad campesina) y los usuarios piscícolas por el uso del agua. Radicando en ello la principal necesidad de generar una herramienta que ayude a comprender los procesos que vienen sucediendo en la UH de manera integrada. El modelo WEAP es una herramienta que ayuda en la planificación del recurso hídrico a diversas escalas e integra los diversos componentes de una cuenca, hace balances hídricos (oferta y demanda) y tiene el potencial de simular escenarios. El modelo WEAP podrá ayudar en la planificación de los recursos que se pueden encontrar en la UH y como gestionarlos de manera más eficiente en el futuro.

1.3 Hipótesis

La simulación hidrológica permitirá determinar si la oferta de agua en la UH Yanayacu es afectada por el efecto del cambio climático.

En la Tabla 1 se muestra las diferentes variables que se usaron en la elaboración de la presente tesis.

Tabla 1*Variables Dependientes e Independientes*

Variables	Dimensión	Indicadores	Unidad	
Independientes	Física	Cobertura de suelo	%	
		Pendiente terreno	%	
		Área glaciár	km ²	
		Precipitación	mm	
		Temperatura	°C	
	Climática	Humedad relativa	%	
		Velocidad del viento	m/s	
		Fracción de nubosidad	%	
		Social	Población	unidad
			Área agrícola	has
N° industrias	unidad			
Dependientes	Oferta de agua	Caudal	m ³ /s	

Fuente: Elaboración propia

1.3.1 Variables independientes

Variables climáticas (de todas las variables se tomarán en cuenta como las principales y más susceptibles a la precipitación y temperatura).

1.3.2 Variables dependientes

Oferta de agua.

1.4 Objetivos

1.4.1 Objetivo General

Simulación del efecto del cambio climático de las ofertas de agua en la unidad hidrográfica Yanayacu con fines de gestión del recurso hídrico.

1.4.2 Objetivos específicos

- Generar información de insumo para el modelo WEAP en la UH Yanayacu.
- Construir el modelo hidrológico para la UH Yanayacu en el modelo WEAP.
- Calibrar y validar los flujos generados por el modelo hidrológico WEAP en la UH Yanayacu.
- Simular el efecto del cambio climático en la oferta hídrica de la UH Yanayacu con proyección en el periodo del 2019 al 2050.

2 REVISIÓN DE LA LITERATURA

2.1 Antecedentes

Para poder construir de manera adecuada la simulación hidrológica de la UH Yanayacu es necesario revisar las aplicaciones del software WEAP, proyectos de ingeniería, investigaciones o trabajos realizados en las cuencas de estudio. Si bien se sabe que son zonas con poca información los antecedentes presentados fueron útiles para el desarrollo del trabajo. Entre los siguientes trabajos se tienen:

“Construcción del Modelo WEAP del Río Santa” (Escobar et al., 2008) como parte del proyecto Evaluación de Impactos de Cambio Climático en Hidrología de Montaña: Desarrollo de una Metodología a través de un Estudio de Caso en Perú, bajo las organizaciones IRD, SEI-US y el Banco Mundial, es un informe de la situación de la cuenca del río Santa y que servirá de guía para la modelación de la presente tesis.

“Escenarios Climáticos en la Cuenca del Río Santa para el año 2030” (SENAMHI, 2009), es un estudio realizado por Senahmi cuyos objetivos son determinar las tendencias climáticas en la cuenca del río Santa, estimar las proyecciones climáticas nacionales al año 2030 en base a escenarios climáticos globales, y determinar indicadores extremos de lluvia y temperatura, observados y simulados al año 2030.

“Modelación Hidrológica y Escenarios de Cambio Climático en Cuencas de Suministro de Agua de las ciudades La Paz y El Alto, Bolivia” (Escobar, Lima, Purkey, & Yates, 2014), es un artículo donde se presenta un enfoque útil para la modelación hidrológica de UHs y suministro de agua potable en el cual se incluye la incertidumbre y el cambio climático.

“Generación de escenarios de disponibilidad del Recurso Hídrico aplicando el modelo WEAP, sub cuenca Parón – Lullán, Provincia de Huaylas, Ancash – Perú – 1978-1998” (Celmi, 2014) es una tesis de pregrado donde se evaluó la disponibilidad del recurso hídrico para diferentes escenarios. Estos escenarios fueron el incremento de la poblacional, incremento de área agrícola y revestimiento del canal Toma I Huandoy, para el balance hídrico se consideraron la demanda poblacional, agrícola, piscícola y energética; y en la

oferta la precipitación, el aporte glaciario, canales de riego y el manejo que hay de la laguna Parón.

“Evaluación de los recursos hídricos en la Cuenca Santa” (ANA, 2015) es una investigación realizada por la ANA e INCLAM PERÚ cuyo objetivo es determinar la disponibilidad hídrica de las cuencas hidrográficas con un modelo de soporte para la toma de decisiones, además la implementación de un modelo de gestión que permita realizar el planeamiento de los recursos hídricos de cada cuenca hidrográfica para su mejor aprovechamiento.

2.2 Ciclo hidrológico

“El ciclo hidrológico es el foco central de la hidrología. El ciclo no tiene principio ni fin y sus diversos procesos ocurren en forma continua” (Chow, Maidment, & Mays, 1994, p. 2). Ver la Figura 1.

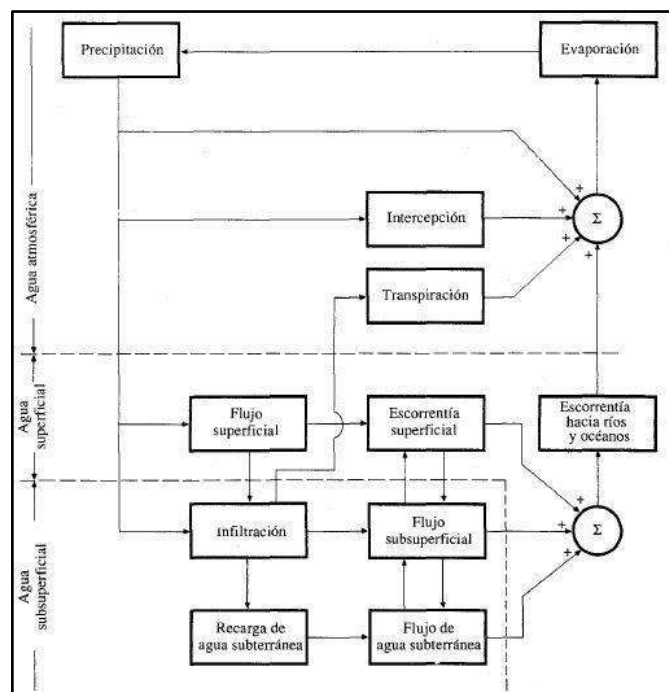


Figura 1. Representación en diagrama de bloques del sistema hidrológico global

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

El ciclo hidrológico es el ciclo virtuoso del agua que se da de manera constante, natural e indefinida, en el que el agua experimenta cambios en su estado físico que son impulsados por el Sol y la gravedad.

Este proceso podría considerarse como un sistema en donde sus componentes principales son: precipitación, evaporación, condensación, transpiración, interceptación, escorrentía superficial y subsuperficial, etc.

2.3 Unidad hidrográfica

El término unidad hidrográfica se toma a partir de la codificación Pfafstetter, que es un sistema de delimitación de carácter analítico, organizado y de aplicación global. Se basa principalmente en asignarle una codificación jerarquizada de dígitos que depende de la superficie de las unidades de drenaje, su ubicación respecto a las unidades vecinas y a su topología.

2.4 Aplicación de Herramientas de información geográfica (geoespaciales)

Google Earth Engine:

“Google Earth Engine combina un catálogo de varios petabytes de imágenes satelitales y conjuntos de datos geoespaciales con capacidades de análisis a escala planetaria y lo pone a disposición de científicos, investigadores y desarrolladores para detectar cambios, mapear tendencias y cuantificar diferencias en la superficie de la Tierra” (Google, 2020).

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma que permite visualizar imágenes satelitales de todo el mundo de manera libre, sin embargo, no se limita a la visualización, sino que además el usuario puede analizar la información mediante el uso de programación e implementación de líneas de códigos o scripts en el interfaz según sea la necesidad o tema de interés del usuario.

Las aplicaciones en GEE son muy diversas ya que permite al usuario realizar análisis en función a sus intereses, los cuales pueden ser: gestión de desastres, gestión del recurso hídrico, monitoreo del clima, algebra de imágenes satelitales, etc.

La aplicación que se llevó a cabo en la presente tesis fue usar la plataforma para analizar un conjunto de imágenes satelitales Sentinel 2 nivel 2A corregidas atmosféricamente a nivel del suelo, para definir los diferentes tipos de cobertura que están presentes en las zonas de trabajo a través de una supervisión clasificada sobre la UH Yanayacu.

ArcMap:

“ArcMap es la aplicación principal de ArcGIS. Se utiliza para realizar muchas de las tareas habituales de SIG, así como tareas especializadas, específicas del usuario, tales como: trabajar con mapas, imprimir mapas, compilar y editar datasets SIG, utilizar geoprocésamiento para automatizar el trabajo y realizar análisis, organizar y administrar geodatabases y documentos de ArcGis, documentar información geográfica, etc” (ESRI, 2016).

La aplicación del software en la tesis fue la corrección de errores y el procesamiento de la clasificación supervisada: unir datasets, editar las áreas de trabajo, corroborar y eliminar vacíos, correcciones de la clasificación, etc. El resultado fue la clasificación de los distintos tipos de suelo que hay presentes en la UH Yanayacu.

2.5 Modelamiento hidrológico

Un modelo es la representación matemática simplificada de un sistema o fenómeno complejo que se da en la naturaleza donde se trata de expresar a través de fórmulas o expresiones matemáticas las relaciones que existen y vinculan las diferentes variables o parámetros que se registran en dicho fenómeno. “En general puede decirse que es cualquier representación simplificada de la realidad. Desde un punto de vista físico, podríamos definirlo como la representación matemática de un fenómeno físico, y por tanto cuantificable” (Cruces & Martinez, 2007, p. 3).

La modelación hidrológica viene a ser la representación simplificada de lo que sucede en el sistema “cuenca hidrológica” y su relación como parte del ciclo hidrológico. Ver la Figura 2. “Un sistema hidrológico se define como una estructura o volumen en el espacio, rodeada por una frontera, que acepta agua y otras entradas, opera en ellas internamente y las produce como salidas” (Chow et al., 1994).

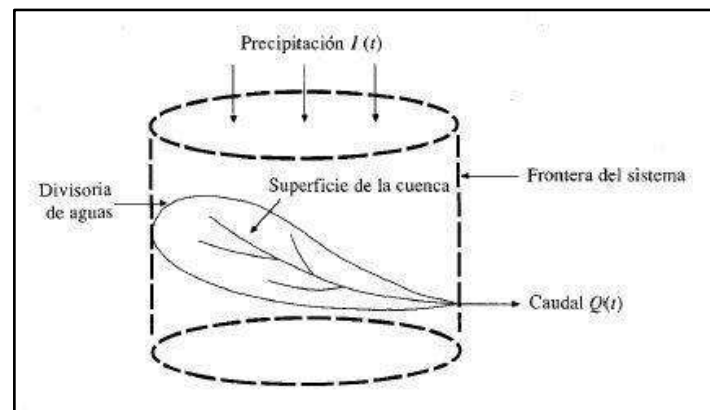


Figura 2. La cuenca como un sistema hidrológico

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

Resulta imposible representar exactamente la realidad del fenómeno, por ello se trata de dar algunas restricciones o limitaciones para acercarse lo más posible al sistema de estudio, de esa manera se pueden obviar o ajustar algunas variables que resulten innecesarias o aporten muy poco al resultado del modelo final, así como también dar énfasis a otras variables cuya significancia sí sea relevante.

2.6 WEAP

2.6.1 Descripción del modelo

Es una herramienta computacional que proporciona un enfoque completo e integral en la planificación de los recursos hídricos. Según el Stockholm Environment Institute (SEI) (2019), WEAP funciona usando el principio básico del balance hídrico, pudiendo ser aplicado en diferentes tipos de sistemas municipales y agrícolas, y a diferentes escalas desde una cuenca pequeña a cuencas transfronterizas. Ver Tabla 2.

Las capacidades que ofrece WEAP es que proporciona una base de datos de balance hídrico para mantener información de oferta y demanda de agua; además, tiene una herramienta de generación de escenarios, donde simula las demandas, caudales, escorrentía, etc. y también una herramienta de análisis de políticas donde se puede evaluar múltiples alternativas para la gestión de los recursos hídricos.

Tabla 2

Aspectos Principales de WEAP

Aspectos principales de WEAP	
Enfoque integrado	Enfoque único para realizar evaluaciones de planificación integrada de recursos hídricos.
Proceso de participación	Una estructura que facilita la participación de los actores involucrados en un proceso abierto.
Balance de agua	Una base de datos que mantiene la información de demanda y suministro para manejar el modelo de balance de masa en una arquitectura de nodo-enlace.
Basado en simulación	Cálculo la demanda, oferta, escorrentía, infiltración, requisitos para las cosechas, flujos y almacenamiento del agua, y generación, tratamiento, descarga de contaminantes y de calidad de agua en ríos para variados escenarios hidrológicos y de políticas.
Escenarios de políticas de uso de agua	Evalúa una amplia gama de opciones de desarrollo y manejo del agua y toma en cuenta los múltiples y opuestos usos de los recursos hídricos.
Interfaz amigable	Interfaz gráfica basada en mapas SIG con conceptos de "arrastrar y soltar" ("drag-and-drop") con resultados flexibles como mapas, gráficos y tablas.
Integración de modelos	Enlaces dinámicos a otros modelos y programas como QUAL2K, MODFLOW, MODPATH, PEST, Excel y GAMS.

Fuente: <https://www.weap21.org/index.asp?action=200>

Las aplicaciones de WEAP incluyen:

Definición del Estudio: Se establece el periodo de tiempo, los límites espaciales, los componentes de todo el sistema y la relación entre ellos.

Cuentas Corrientes: Se definen las diferentes demandas de aguas, los recursos y suministros.

Escenarios: Permite simular una gama de alternativas en base a suposiciones acerca de los efectos futuros de políticas, costos y del clima.

Evaluación: En función a los diferentes escenarios se evalúan los recursos que dispone el sistema.

2.6.2 Modelamiento hidrológico con WEAP

Existen 5 metodologías para simular las interacciones de evapotranspiración, escorrentía, infiltración y demandas de irrigación que ocurren dentro del área a estudiar. Estos métodos son los siguientes:

Método de solo demanda de irrigación: utiliza los coeficientes de cultivo para calcular la evapotranspiración potencial en la cuenca, luego determina cualquier demanda de riego que se requiera para cumplir con la parte del requisito de evapotranspiración que la lluvia no puede satisfacer.

Método de lluvia escorrentía (método del coeficiente simplificado): determina la evapotranspiración para cultivos utilizando coeficientes de cultivo. El resto de la lluvia no consumida por la evapotranspiración es simulado como escorrentía a un río, o se puede distribuir entre la escorrentía a un río y el flujo al agua subterránea a través de enlaces de escorrentía / infiltración.

Método de lluvia escorrentía (método de humedad de suelo): el método de humedad del suelo es más complejo, representa la cuenca con dos capas de suelo. En la capa superior del suelo se simula la evapotranspiración considerando la lluvia y el riego en tierras agrícolas y no agrícolas, escorrentías e inter-flujos poco profundos y cambios en la humedad del suelo. Esta metodología permite la caracterización del uso de la tierra o los impactos del tipo de suelo en estos procesos. El enrutamiento del flujo base al río y los cambios de humedad del suelo se simulan en la capa inferior del suelo. En consecuencia, el método de humedad del suelo requiere una parametrización más extensa del suelo y el clima para simular estos procesos. Se debe tener en cuenta que la percolación más profunda dentro de la cuenca

también se puede transmitir directamente a un nodo de agua subterránea mediante la creación de un enlace de escorrentía / infiltración desde la cuenca al nodo de agua subterránea. El método se convierte esencialmente en un esquema de humedad del suelo de una capa si se establece este vínculo.

El método MABIA (FAO 56, Dual Kc, Diario): es una simulación diaria de transpiración, evaporación, requisitos y programación de riego, crecimiento y rendimiento de cultivos, e incluye módulos para estimar la evapotranspiración de referencia y la capacidad de agua del suelo.

El método de crecimiento vegetal (PGM): El modelo de crecimiento de las plantas simula el crecimiento de las plantas, el uso del agua y el rendimiento mediante un paso de tiempo diario. Fue desarrollado para proporcionar un método para estudiar los impactos de la concentración alterada de CO₂ atmosférico, el estrés por temperatura, la variabilidad de la duración de la estación y el estrés hídrico en el uso de agua de las plantas y el rendimiento de los cultivos.

La tesis se desarrolló con el método de lluvia escorrentía (método de humedad de suelo) o como también es conocido el método de los dos baldes. Esto, debido a la variabilidad de los ecosistemas en las zonas de estudio, ya que están presentes áreas agrícolas, pastos naturales, afloramientos rocosos, cobertura glaciaria, etc. Este método procuró interpretar de manera más cercana la realidad hidrológica en la UH Yanayacu.

2.6.3 Método Humedad de Suelo

El modelo de balance de humedad del suelo considera el movimiento del agua a través de las dos capas del suelo. En la primera capa se representa el agua retenida cerca de la superficie, que está disponible para las raíces de las plantas; la segunda capa es más profunda y el agua de esta capa puede ser transmitida como flujo base o la recarga de acuíferos. Ver la Figura 3.

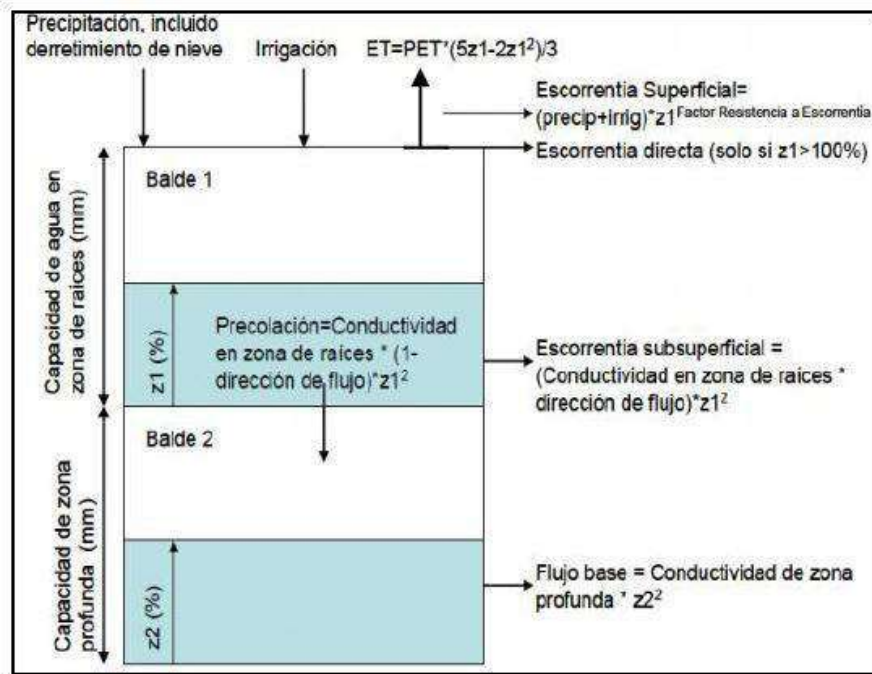


Figura 3. Esquema del método de Humedad de Suelo

Fuente: (Sieber & Purkey, 2015, p. 57)

Este esquema unidimensional de contabilidad de humedad del suelo de 2 compartimentos (o "cubetas") se basa en funciones empíricas que describen evapotranspiración, escorrentía superficial, escorrentía subterránea (es decir, interflujo) y percolación profunda para una unidad de cuenca. Este método permite la caracterización del uso del suelo y/o los impactos del tipo de suelo en estos procesos. (Sieber & Purkey, 2015, p. 198)

El modelo trabaja a partir un elemento mínimo llamado unidad hidrológica (catchment) que se considera como la mínima entidad dentro de toda la subdivisión de la cuenca o área de estudio. Se considera que dentro de este catchment todos los parámetros hidrológicos (temperatura, precipitación, humedad relativa, fracción de nubosidad, etc) que intervienen en el cálculo son constantes (uniformes) a lo largo de su dominio. El modelo realiza un cálculo de balance de agua dentro de cada unidad hidrológica y en cada "balde" a través de la relación de las siguientes ecuaciones:

Balde 1 (Balde superior)

$$Sw_j \frac{dz_{1,j}}{dt} = P_e(t) - PET(t)k_{c,j}(t) \left(\frac{5z_{1,j} - 2(z_{1,j})^2}{3} \right) - P_e(t)(z_{1,j})^{\frac{RRF_j}{2}} - f_j k_s z_{1,j}^2 - (1 - f_j) k_{s,j} z_{1,j}^2$$

Donde:

1° término: Cambio de la humedad de suelo.

2° término: Precipitación efectiva (incluye riego y derretimiento de nieves).

3° término: Evapotranspiración.

4° término: Escorrentía superficial.

5° término: Flujo intermedio.

6° término: Percolación.

Balde 2 (Balde inferior)

$$Dw_j \frac{dz_{2,j}}{dt} = -k_d z_{1,j}^2 + (1 - f_j) k_s z_{2,j}^2$$

Donde:

1° término: Flujo base.

2° término: Percolación.

De las ecuaciones se puede observar que tanto en el balde superior como inferior los términos corresponden a los elementos del balance hidrológico.

“El método de lluvia escurrimiento (método de la humedad del suelo) ha sido desarrollado para proporcionar una manera simple pero realista para modelar los procesos hidrológicos con una representación semi-física” (Stockholm Environment Institute (SEI), 2017, p. 127).

Según Sieber & Purkey (2015, p. 55) para el modelado en el método de humedad de suelo es necesario los siguientes parámetros:

Uso del Suelo: Los parámetros de uso de suelo a considerar en el modelo WEAP son los siguientes:

Área: Área de cada clase de cobertura de suelo dentro de la unidad hidrológica.

Kc: El coeficiente de cultivo, relativo al cultivo de referencia, para un tipo de clase de cobertura en la unidad hidrológica.

Capacidad de agua de la zona raíz (Sw): Es la capacidad efectiva de retención de agua de la capa superior del suelo (balde superior). La unidad está en milímetros (mm).

Capacidad de aguas profundas (Dw): Es la capacidad efectiva de retención de agua de la capa inferior y profunda del suelo (balde inferior). La unidad está en milímetros (mm). Esto se da como un valor único y constante para la cuenca de estudio sin importar los distintos tipos de cobertura. Esto se ignora si el sitio de demanda tiene un enlace de flujo de retorno a un nodo de agua subterránea.

Conductividad profunda (kd): Es la tasa de conductividad de la capa profunda (balde inferior) cuando se encuentra completamente saturado (es decir: $z_2=100\%=1$) que controla la transmisión del flujo base. La unidad está en milímetros por mes (mm/mes). Esto se da como un valor único para la cuenca sin importar los distintos tipos de cobertura. El flujo base aumentará a medida que aumente este parámetro. Esto se ignora si el sitio de demanda tiene un enlace de flujo de retorno a un nodo de agua subterránea.

Factor de resistencia de escorrentía (RRF): Se utiliza para controlar la respuesta de escorrentía superficial relacionando factores como el índice de área foliar y la pendiente del terreno. La escorrentía tiende a disminuir con valores más altos, el rango de valores está entre 0.1 y 10. Este parámetro puede variar entre los tipos de clase de tierra.

Conductividad de la zona raíz (ks): Es la tasa de conductividad de la zona raíz (balde superior) cuando está completamente saturado (es decir: $z_1=100\%=1$), y que se dividirá de acuerdo con la dirección de flujo preferencial, el flujo interno y el flujo hacia la capa inferior del suelo (balde inferior). Este parámetro puede variar entre los tipos de clase de tierra. La unidad está en milímetros por mes (mm/mes).

Dirección preferencial de flujo (f): Varía de acuerdo con su porcentaje donde: 1.0 = 100% flujo horizontal y 0 = 100% flujo vertical. Se utiliza para dividir el flujo de la capa de la zona de la raíz (balde superior) entre el flujo interno y el flujo hacia la capa inferior del suelo (balde inferior) o el agua subterránea. Este valor puede variar entre los tipos de clase de tierra.

z1 inicial: Es el valor inicial de z_1 al comienzo de la simulación. z_1 es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la capacidad de agua de la zona radicular (balde superior). La unidad está en porcentaje (%).

z2 inicial: Es el valor inicial de z_2 al comienzo de una simulación. z_2 es el almacenamiento relativo dado como un porcentaje del almacenamiento efectivo total de la capacidad de aguas profundas (balde inferior). Este parámetro se ignora si el sitio de demanda tiene un enlace de escorrentía/infiltración a un nodo de agua subterránea. Este valor se mantiene constante

para la cuenca de estudio sin importar los distintos tipos de cobertura. La unidad está en porcentaje (%).

Clima: Los parámetros de clima a considerar son los siguientes:

Precipitación: Series de precipitación mensual.

Temperatura: Temperatura media mensual.

Humedad: Humedad relativa media mensual.

Viento: Velocidad media mensual del viento

Fracción de nubosidad: Fracción de horas diurnas sin nubes

Latitud: Latitud en grados

Nieve inicial: Valor inicial para la acumulación de nieve al comienzo del primer mes de simulación.

Punto de fusión: Límite de agua líquida para el derretimiento de nieve

Punto de congelamiento: Límite de agua sólida para la acumulación de nieve.

Indicador de acumulación de nieve: Datos históricos de acumulación de nieve para la calibración.

2.7 Escenarios climáticos

A lo largo de los últimos años diversas investigaciones coinciden en que el planeta está sufriendo grandes cambios cuya responsabilidad directa es la intervención antrópica a través del excesivo uso de los GEI (Gases de Efecto Invernadero) y otros contaminantes. Abordar este tema trae consigo una incertidumbre sobre cuánto será el incremento de temperatura en los próximos años y cómo cambiarán las otras variables meteorológicas, especialmente la precipitación.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC, Intergovernmental Panel on Climate Change) para el Proyecto de Inter-comparación de Modelos de Clima Acoplados (CMIP, Coupled Model Intercomparison Project) versión 5 definió cuatro sendas representativas de concentración (RCP, Representative Concentration Pathway). Estos RCPs son identificados por el forzamiento radiativo, medida de la influencia

en el balance energético de la Tierra debido al factor natural y humano sobre el sistema climático, que ejercen al 2100 que varía desde 2.6 a 8.5 W/m² (Llacza, 2020, p. 17).

En la presente tesis se evaluará en función a 3 escenarios: Referencia, el RCP 4.5 y RCP 8.5. El primer escenario, Referencia, es donde se replica la información climática del periodo 1980-2018 sobre el periodo 2019-2050 a fin de dar a comprender que no hay variación importante en el clima futuro ya que se considera que las variables climáticas pasan por un periodo cíclico. El segundo escenario, RCP 4.5, es donde se considera ya el efecto del cambio climático con un forzamiento radiativo al 2100 de 4.5W/m²; este escenario tiene características de mitigación con desarrollo de tecnologías limpias y con una disminución en la generación de emisiones de efecto invernadero. El tercer escenario, RCP 8.5, es donde se considera ya el efecto del cambio climático con un forzamiento radiativo al 2100 de 8.5W/m²; este escenario tiene características de escasos avances de aplicación de tecnologías y ausencia de políticas de mitigación y adaptación al cambio climático.

3 METODOLOGÍA

3.1 Ubicación y características del área de investigación

El trabajo de investigación se desarrolló en la zona sur y margen derecha de la cuenca del río Santa.

3.1.1 Ubicación de la zona de estudio

Políticamente está ubicada en los distritos de Ticapampa y Cátac, provincia de Recuay, departamento de Ancash (ver Mapa 1). La zona está limitada por el norte con la cuenca del río Negro; por el oeste, con la quebrada Aloc Huacanca y el río Santa; por el sur está el río Pachacoto; y por el este, limitado por los glaciares que Yanamarey y Gueshgue. Se ubica entre los $9^{\circ}51'08''$ a $9^{\circ}38'54''$ S y $77^{\circ}13'43''$ a $77^{\circ}26'22''$ O.

El área total es de 273.06 km^2 , un perímetro de 80.35 km , su altura mínima es de 3550 msnm , una altura máxima de 5600 msnm y una altitud media de 4409 msnm .

3.1.2 Población

Entre los centros poblados más importantes ubicados cerca de las zonas de estudio se encuentran Ticapampa y Cátac. La población del CP Ticapamapa es de 1674 habitantes y del CP Cátac es de 2776 habitantes según el Directorio Nacional de Centros Poblados elaborado el 2017 por INEI (INEI, 2017, p. 183).

3.1.3 Clima

Entre las estaciones meteorológicas más cercanas a la zona de estudio tenemos a Recuay (3394 msnm), Milpo (4400 msnm) y Pachacoto (3750 msnm), todas administradas por SENMAHI y todas se encuentran fuera de la delimitación de la zona de estudio. Entre las variables que se registran en estas estaciones son la precipitación y la temperatura mínima y máxima.

De manera general, la estación seca está empieza en el mes de junio y se extiende hasta agosto o setiembre, las menores precipitaciones se registran entre julio y agosto, la estación húmeda varía de setiembre a abril, donde las mayores precipitaciones se dan en febrero y marzo. Respecto a la temperatura los meses más cálidos se extienden en general desde setiembre a abril y las menores temperaturas desde mayo a agosto.

3.1.4 Hidrografía

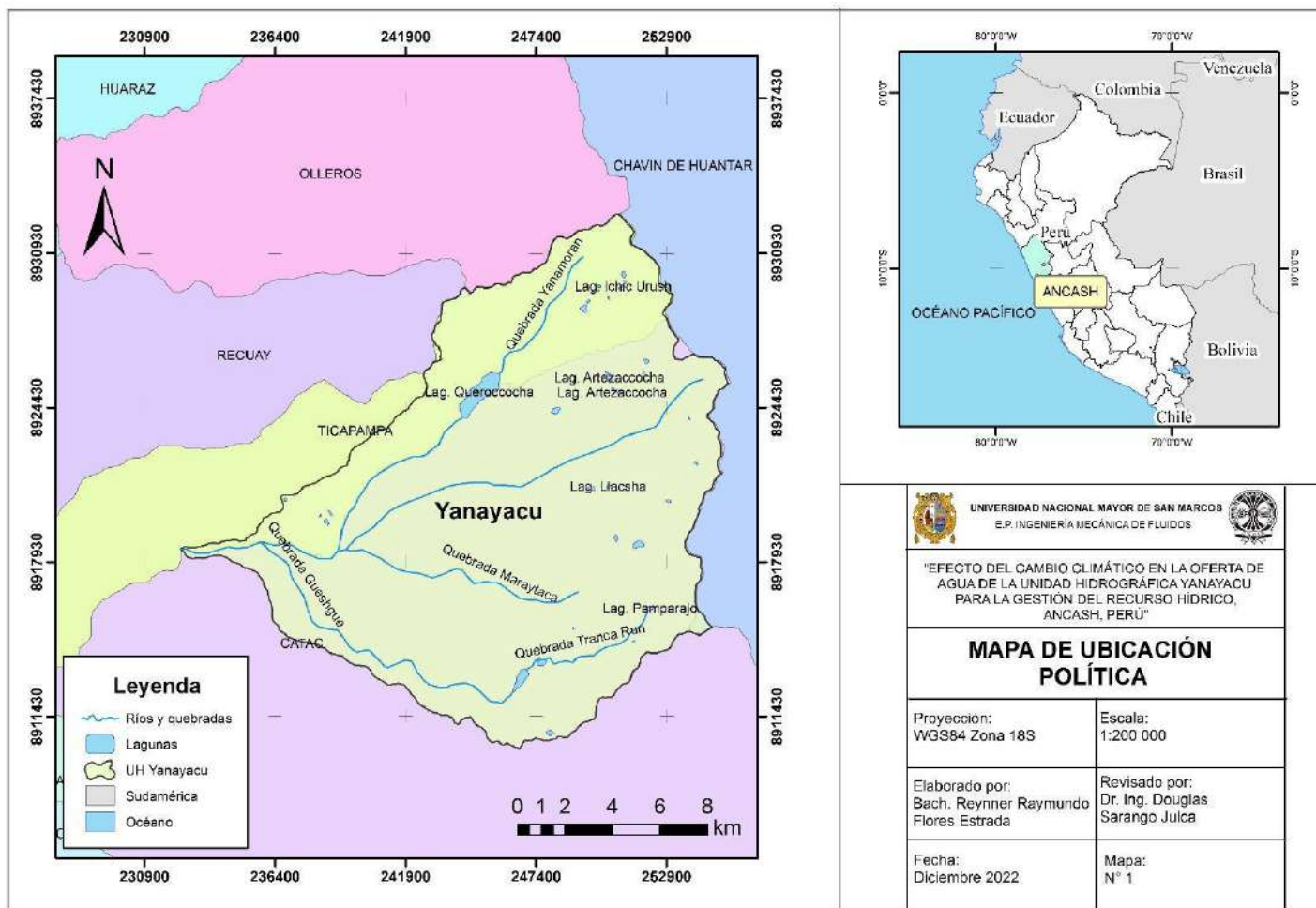
En la UH Yanayacu se tienen quebradas importantes tales como: Yanamarey, Querococha, Cotush, Maraytaca y Gueshgue; y el río más importante es el Yanayacu, que nace en la confluencia de las quebradas de Querococha, Maraytaca y Cotush. Finalmente, el río Yanayacu desemboca al río Santa. Posee además lagunas importantes por su tamaño y por su origen glaciar, las cuales son Querococha, Gheshguecocha, Jarpacocha, Pamparaju, Verdecocha entre otras (ver Mapa 2).

Esta cuenca es de origen glaciar, entre los cuerpos de hielo más importantes están el Yanamarey y Gheshgue (ambos se encuentran en proceso de extinción) (ANA, 2019, p. 17).

La zona de estudio pertenece a la ALA (Autoridad Local del Agua) de Huaraz y a la AAA (Autoridad Administrativa del Agua) de Huarmey-Chicama (ver Mapa 3).

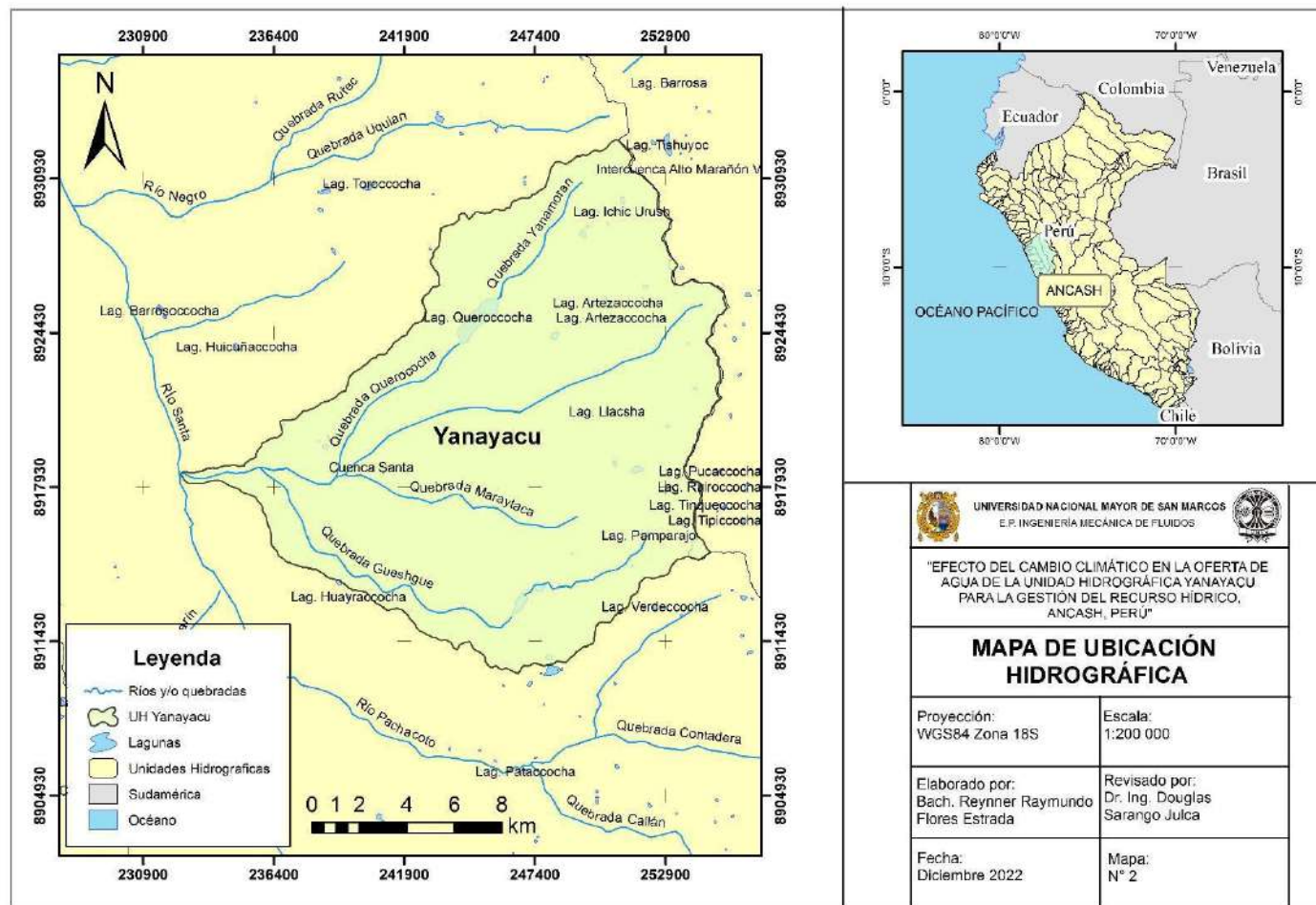
3.1.5 Cobertura de suelo

En la zona de estudio existe sobretodo grandes áreas de pajonal andino, áreas de cultivo ubicadas en la parte baja de sus cuencas que son alimentadas por canales y filtraciones, zonas boscosas de polylepis y eucalipto y humedales, se encuentran zonas de escasa vegetación, así como glaciares en las zonas más altas.



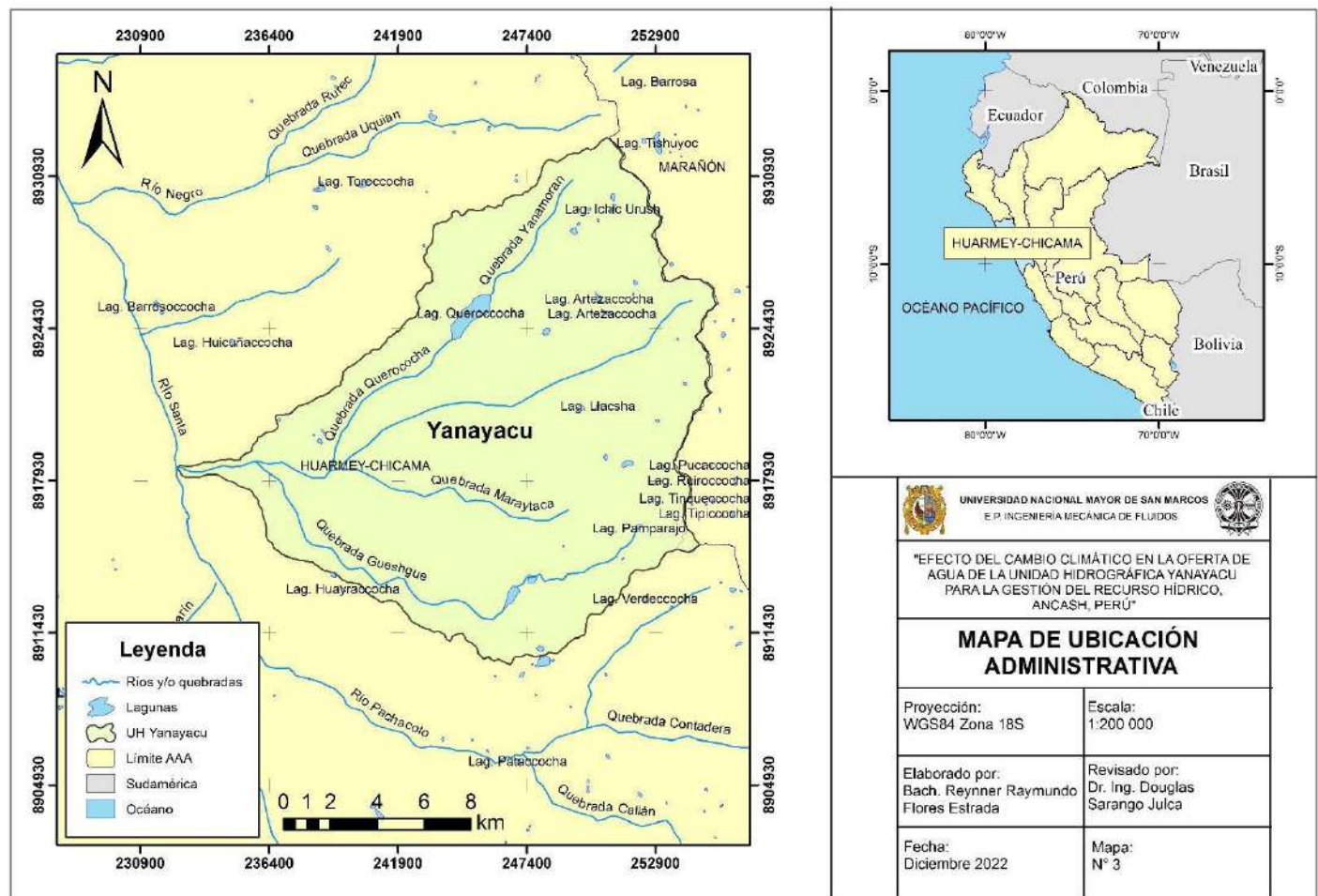
Mapa 1. Mapa de ubicación política de la UH Yanayacu

Fuente: Elaboración propia



Mapa 2. Mapa de ubicación hidrográfica de la UH Yanayacu

Fuente: Elaboración propia



Mapa 3. Mapa de ubicación administrativa de la UH Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

La clasificación de los tipos de cobertura se tomó como referencia la clasificación Corine Land Cover. Se trabajó con un nivel 3 de clasificación, donde se encontraron las de pajonal andino, matorral arbustivo, humedales, bosques, cultivos, suelo desnudo o escasa vegetación, cuerpos de agua, glaciares y otros (se consideró entre otros a formaciones rocosas, infraestructura de concreto, etc). En el Anexo 1 se puede ver la clasificación Corine Land Cover.

3.2 Materiales

La presente tesis se ha desarrollado dentro del marco del proyecto PERU GROWS, por tanto, algunos de los resultados que se tomaron como punto de partida en esta tesis fueron realizados por los especialistas de INAIGEM (Institución Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña), y de socios estratégicos (SENAMHI, Cranfield University y Leeds University) que han apoyado al proyecto a lo largo de su periodo para que este pueda cumplir los objetivos trazados.

3.2.1 Información hidrometeorológica

Para poder aplicar el modelamiento hidrológico usando el software WEAP es necesario tener información a nivel diario o mensual de principalmente 5 variables: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad. Por lo tanto, es necesario contar con data de estaciones meteorológicas que contengan las variables mencionadas.

Entre las estaciones meteorológicas cercanas tenemos:

- Recuay: estación meteorológica administrada por SENAMHI que se encuentra a una altitud de 3431 msnm, cuya información registrada es la precipitación y temperaturas máximas y mínimas a nivel diario. Posee un registro que abarca desde el año 1964 hasta 2018, pero con un periodo de no registro de datos desde el 1974 al 1978.
- Milpo: estación meteorológica administrada por SENAMHI que se encuentra a una altitud de 4400 msnm, cuya información registrada es la precipitación a nivel diario. Posee un registro que abarca desde el año 1980 hasta 2014.

- Pachacoto: estación meteorológica administrada por SENAMHI que se encuentra a una altitud de 3733 msnm, cuya información registrada es la precipitación. Posee un registro que abarca desde el año 2015 hasta 2018.

De estas tres estaciones se considera a la estación Milpo como la más representativa del área de estudio debido a que su altitud es relativamente similar a la altitud media de la UH Yanayacu (4409 msnm).

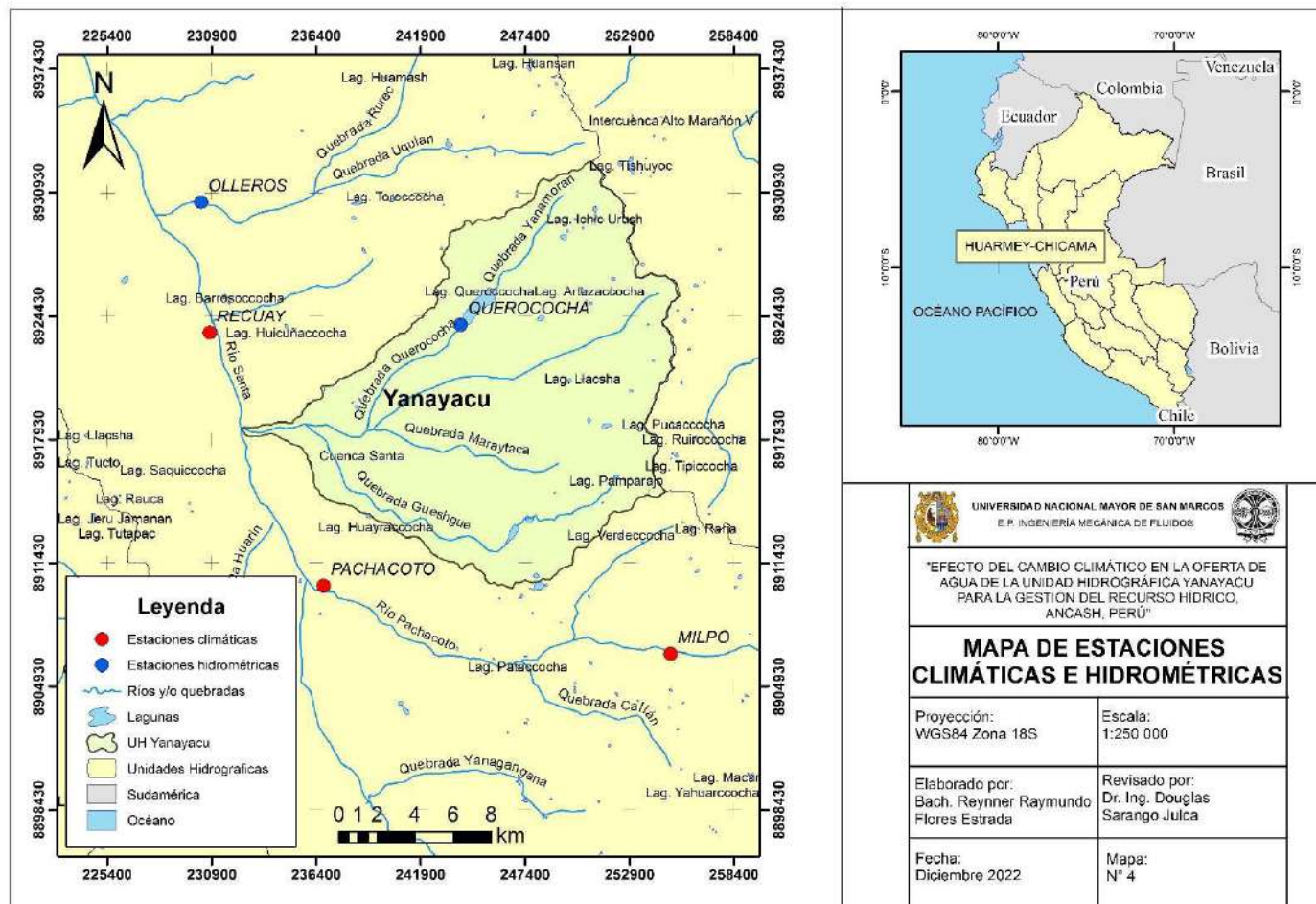
Entre las estaciones hidrométricas tenemos:

- Querococha: estación hidrométrica que fue administrada por ELECTROPERÚ y luego por SENAMHI, se encontraba a una altitud de 3980 msnm y que actualmente no está operativa. Posee un registro histórico de caudales medios a nivel mensual que abarca desde 1953 a 1996.
- Olleros: estación hidrométrica que fue administrada por SENAMHI, se encontraba a una altitud de 3550 msnm y que actualmente no se encuentra operativa. Posee un registro histórico de caudales medios a nivel mensual que abarca desde 1970 a 1998.

La ubicación de las estaciones climáticas e hidrométricas se puede ver en el Mapa 4.

En el Anexo 2 se puede ver la información de las estaciones climáticas e hidrométricas.

La estación Querococha se encontraba en la salida de la laguna Querococha y por consiguiente dentro de la UH Yanayacu; mientras que la estación Olleros se encuentra en una cuenca vecina. A partir de los caudales simulados de la cuenca de Yanayacu y los caudales de la estación Olleros se realiza una comparación de estos al aplicar la metodología de similitud de cuencas.



Mapa 4. Mapa de estaciones climáticas e hidrométricas cercanas a la UH Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Información geoespacial

Se usó siguiente información:

- Curvas de nivel cada 100 m, que sirvieron de base para el desarrollo de un DEM (Modelo Digital de Elevación) de la zona de estudio. Ver Figura 4.

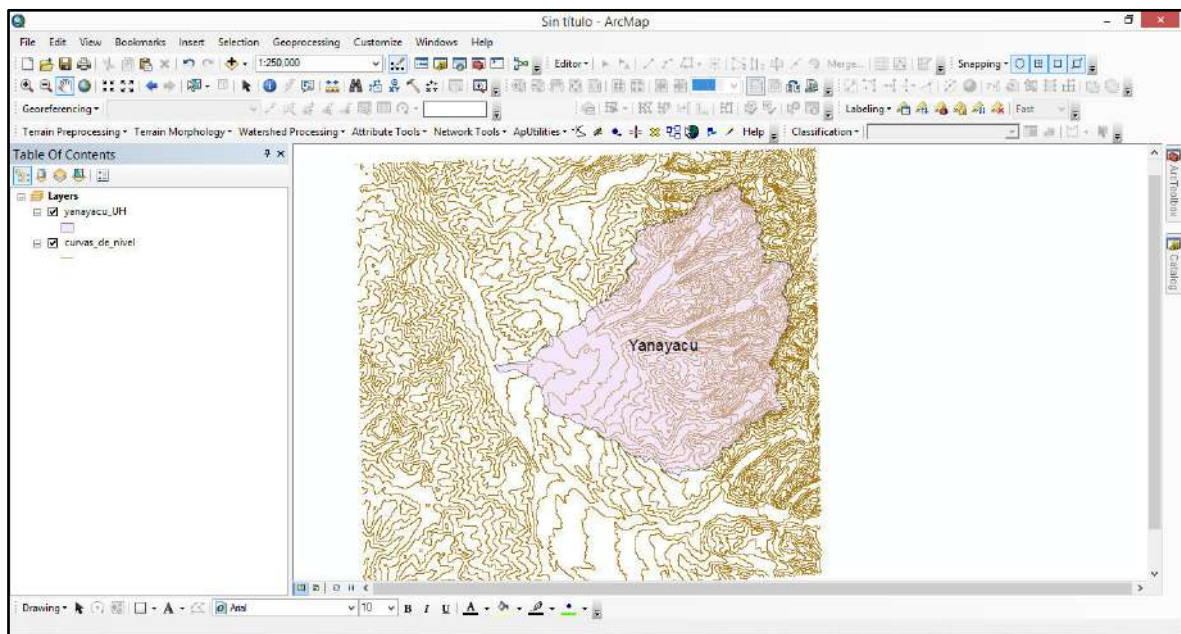


Figura 4. Curvas de nivel cada 100 m

Fuente: Elaboración propia

- Inventario de Glaciares del 2016 desarrollado por INAIGEM. Ver Figura 5.
- Inventario de Lagos y lagunas del 2016 desarrollado por INAIGEM. Ver Figura 5.

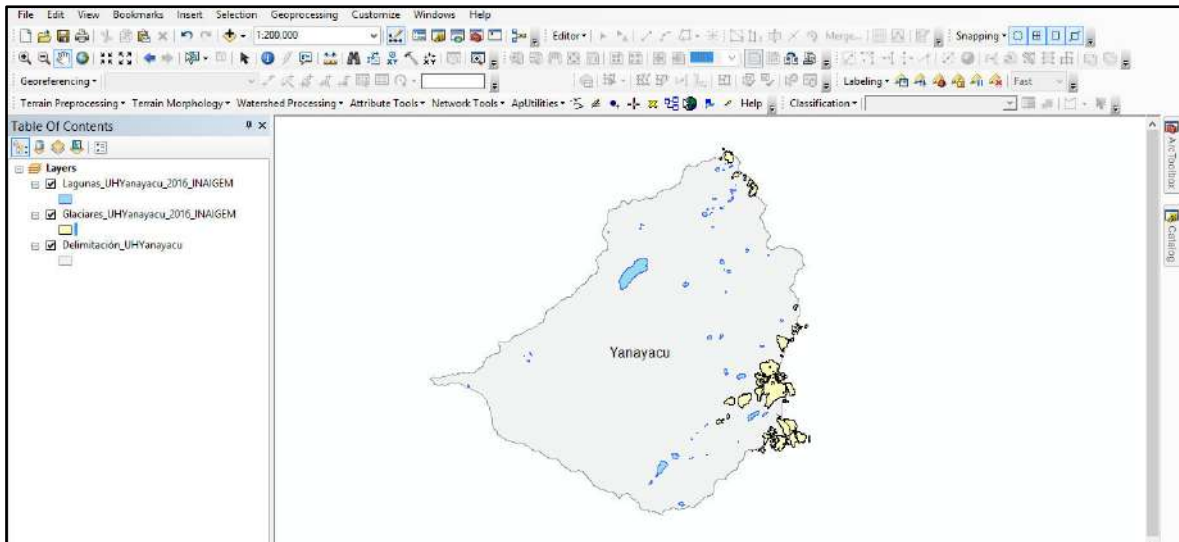


Figura 5. Inventario de lagunas (en azul) y glaciares (en amarillo).

Fuente: Elaboración propia

- Bloques de Riego, desarrollado por PROFODUA.
- Distribución de la unidad hidrográfica de Yanayacu (UH 137698) a través de la metodología Pfafstetter, desarrollada por la ANA.

3.2.3 Demandas de agua

Todas las demandas de agua que se usaron en la investigación tienen como fuente oficial el portal de la ANA sobre derechos de uso del agua (<http://snirh.ana.gob.pe/snirh//ConsultarRegistros.aspx>).

3.2.3.1 Demanda poblacional

Las demandas de agua para uso poblacional están en función a los distritos cercanos a la zona de estudio, siendo estos Ticapampa y Cátac los más importantes, el primero se encuentra frente al oeste y cruzando el río Santa; el segundo se encuentra aledaña a la cuenca. Se consideraron 3 demandas de tipo poblacional: Ticapampa, Cátac y Compina cuyas demandas son: 22444.48 m³, 45096.48 m³ y 2207.52 m³ anuales respectivamente.

3.2.3.2 Demandas agrícolas

Las demandas agrícolas están supeditadas a través de los bloques de riego presentes en la zona de estudio. Se pudieron encontrar un total de 13 bloques de riego (BR) donde se cultivan principalmente papa, haba, trigo, pastos (trébol y otros), etc. Sin embargo, solo se tomaron en cuenta un total de 5 bloques de riego, ya que estos toman de manera directa el agua de los cursos de agua principales que pertenecen a la UH Yanayacu. Estos BR son los siguientes: Qeshqui-Rosa, Ayala – Castillo, Compinacucho, Shapaca Pocrac y Buenos Aires – Yacucancho – Compina – Chaupis cuyas demandas anuales en MMC son: 2.8055, 0.1107, 0.1525, 3.7648 y 0.8307 respectivamente. En la Tabla 3 se puede ver el detalle de los bloques de riego.

Tabla 3
Bloques de Riego en la Zona de Estudio

Junta de Usuarios	Comisión de Regantes	Comité de Regantes	Bloque de Riego	Unidad Hidrográfica	Fuente
Callejón de Huaylas	San Idelfonso	Cátac	Ayala – Castillo	Yanayacu	Río Yanayacu
			Qeshqui – Rosa	Yanayacu	Quebrada Gueshgue
		Querococha – Tres Bases	Shapaca Pocrac	Yanayacu	Laguna Querococha
			Buenos Aires – Yacucancho – Compina – Chaupis	Yanayacu	Laguna Querococha
		Yacucancho	Compinacucho	Yanayacu	Río Yanayacu

Fuente: ANA.

3.2.3.3 Demandas mineras

Las demandas mineras están dadas por las empresas que tienen sus operaciones dentro de la UH Yanayacu o usan el agua través de canales. Se consideraron a 5: Minera Santa Renné, Concentradora Mesapata, Minera Huinac, Minera Toma la Mano y Minera Greenex, estas se abastecen principalmente de los ríos Geshgue y Yanayacu. Sus demandas anuales son: 0.06, 0.32, 0.19, 0.79 y 0.18 en MMC respectivamente.

3.2.3.4 Demandas piscícolas

Las piscigranjas se localizan principalmente en las cercanías del río Yanayacu, de donde toman su caudal. Se consideraron un total de 6 piscícolas cuyas demandas anuales en MMC son: 3.72, 1.42, 2.05, 2.21, 11.04 y 0.19.

3.2.4 Equipos y software

Equipos de Gabinete:

- Una laptop personal LENOVO Z10 Intel Core i5.
- Disco duro de 1TB
- Impresora EPSON L396

Equipos de Campo:

- GPS navegador Garmin Montana 680
- Medidor de flujo OTT MF PRO
- Wincha

Softwares:

- Microsoft Office
- Mendeley
- ArcGis 10.5
- Google Earth Engine
- WEAP

3.3 Metodología de la investigación

La presente tesis se desarrolló a través de la siguiente estructura, ver Figura 6.

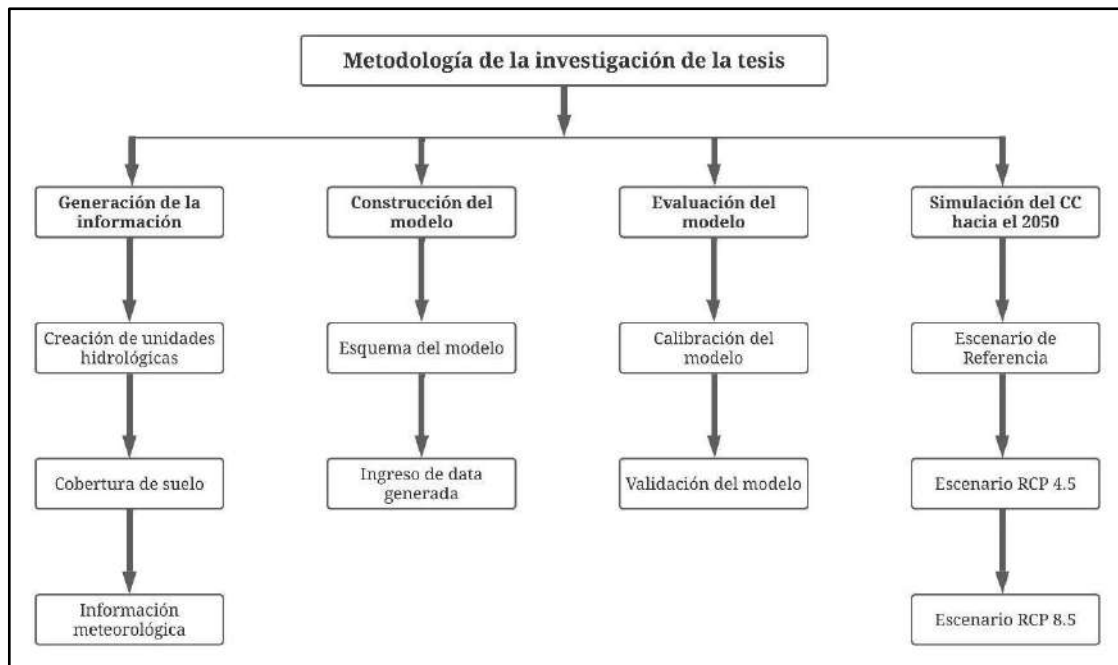


Figura 6. Metodología de la elaboración de la tesis

Fuente: Elaboración propia

Está compuesta por 4 etapas bien definidas: la primera etapa es la de generar información necesaria de ingreso al modelo hidrológico WEAP, en esta se determina cómo se crea las unidades hidrológicas, cómo es la cobertura de suelo en toda la zona de estudio y cómo se distribuye en cada unidad hidrológica, así como la información hidrometeorológica; la segunda etapa es la de construir el modelo, es decir, definir de manera concreta todos los elementos que serán parte del modelamiento y cuáles son los tipos de información que requiere cada elemento, la tercera etapa es el proceso de evaluación del modelo a través de la calibración y validación, donde se comparan a través de indicadores de bondad de ajuste los caudales generados por el modelo y los caudales históricos registrados en las zonas de estudio; finalmente la cuarta etapa es la de simular los escenarios futuros en el periodo 2019 a 2050 según los 3 escenarios: el Reference, RCP 4.5 y de RCP 8.5, y cómo se ven afectadas las ofertas de agua bajo estos escenarios con respecto a la variación de la precipitación y temperatura.

3.3.1 Generación de información de insumo para el modelo hidrológico WEAP

3.3.1.1 Unidades hidrológicas

Las unidades hidrológicas o conocidas también como “catchments” en el interfaz WEAP son las unidades mínimas de trabajo en el modelamiento hidrológico. El conjunto de todas las unidades hidrológicas representa a la totalidad de la zona de estudio. Sobre estos elementos se relacionan las ecuaciones de balance de masa que realiza el modelo. Para el cálculo del modelamiento se requiere que se ingrese a cada unidad hidrológica los parámetros de suelo y climáticos.

En esta tesis a las unidades hidrológicas (que se ubicaban dentro del área de las cuencas) se definieron a través de la intersección de las bandas altitudinales (área entre dos cotas definidas por el modelador) y de la delimitación de las unidades hidrográficas según el método Pfafstetter. La unidad hidrográfica de la zona de trabajo, según la metodología Pfafstetter, se detalla en la Tabla 4.

Tabla 4

Unidad Hidrográfica Yanayacu Nivel 6

ID de la UH (Nivel 6)	ID de la UH (Nivel 7)	Nombre según Pfafstetter nivel 7
137698	1376981	Unidad Hidrográfica 1376981
137698	1376982	Unidad Hidrográfica 1376982
137698	1376983	Unidad Hidrográfica 1376983
137698	1376984	Unidad Hidrográfica 1376984
137698	1376985	Unidad Hidrográfica 1376985
137698	1376986	Unidad Hidrográfica 1376986
137698	1376987	Unidad Hidrográfica 1376987

Fuente: Elaborado por la ANA

Es importante comentar que debido a que la Unidad Hidrográfica 1376985 es poco significativa en cuestión de tamaño, esta será incluida en la Unidad Hidrográfica 1376984. Por lo tanto, la UH 1376985 a partir de ahora no será tomada en cuenta de manera individual.

El proceso de representar a la cuenca en unidades hidrológicas fue el siguiente:

1. Se obtuvo el archivo de las curvas de nivel de la zona de trabajo, es decir, un archivo de curvas de nivel de Yanayacu.
2. Se obtuvo el archivo de la delimitación de la UH Yanayacu.
3. Se definieron los intervalos de las bandas altitudinales (100, 200 o 300 metros según sea el caso) de Yanayacu.
4. Sobre el archivo de curvas de nivel se ingresó los intervalos de las bandas de manera que se visualice la división correspondiente.
5. Luego, se cortó el archivo de unidad hidrográfica en función a las bandas altitudinales. Esto generó que se tenga la UH dividida en bandas altitudinales.
6. Seguidamente, se revisó si se habían generado errores, y se corrigieron uniendo las áreas que estén separadas de su banda correspondiente. Esta medida depende del criterio del modelador.
7. Después, se identificó todas las unidades hidrográficas hasta el nivel 7.
8. Se usó como base el archivo de bandas altitudinales y se cortó en función a cada una de las unidades hidrográficas de nivel 7 según corresponda, es decir, se cortó las bandas altitudinales de Yanayacu con las unidades hidrográficas de Yanayacu.
9. Se repitió el proceso a cada una de las unidades hidrográficas de nivel 7.
10. Finalmente se obtuvo en la unidad hidrográfica de nivel 7 las divisiones según las bandas altitudinales.
11. De esta manera cada división es considerada una unidad hidrológica.

3.3.1.2 Cobertura de suelo

Para realizar el proceso de modelado se debe conocer qué tipo de cobertura tiene cada unidad hidrológica, por tanto, fue necesario clasificarla mediante tipos de capas o coberturas de suelo presentes en las cuencas de estudio. En esta tesis se usó como información base la aplicación del NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) mediante el uso de la plataforma de Google Earth Engine, zonas de bloques de riego, inventario de glaciares de INAIGEM y el inventario de lagos y lagunas de INAIGEM sobre las unidades hidrográficas para luego hacer el trabajo de edición en el software ArcMap.

El proceso de clasificación supervisada a través del uso de la plataforma de Google Earth Engine fue el siguiente:

1. Se creó una cuenta en la plataforma de GEE.
2. Se navegó por la plataforma en busca de colecciones de imágenes de las zonas de estudio.
3. Se desarrolló un script donde se llamó a la colección de imágenes Sentinel.
4. Se filtró entre todas las imágenes Sentinel las que sean más recientes (año 2019), las que se ubiquen en la zona de la tesis (distritos de Recuay y Ticapampa) y que tenga un porcentaje de nubosidad pequeño (menos de 30%) de manera que permita una buena visualización del terreno natural.
5. Se trabajó en un script a partir de la imagen Sentinel seleccionada calculado el NDVI de toda la zona de trabajo.
6. A partir de este NDVI se clasificó a través de sus valores los posibles y diferentes tipos de uso de suelo o cobertura presente en la zona de trabajo, esta etapa se apoyó en las visitas hechas a campo.
7. Luego, se trabajó en un nuevo script donde permita realizar una clasificación supervisada en función al NDVI y a los puntos recorridos en las visitas de campo.
8. Seguidamente se descargó la información y se llevó al proceso de edición en el software ArcGis.
9. En el proceso de edición se agregó a la clasificación las coberturas que ya se tenían definidas de manera preliminar (es decir, las coberturas de glaciares, los cuerpos de aguas y bloques de riego).
10. Finalmente, con esta clasificación se tiene definida los distintos tipos de cobertura que hay sobre la zona de estudio.

3.3.1.3 Información hidrometeorológica

Debido a que el modelo hidrológico WEAP relaciona las variables meteorológicas con un caudal de salida simulado, fue necesario encontrar un periodo de tiempo en el que todos los parámetros a considerar hayan sido registrados. Debido a ello se consideró el periodo de calibración y validación del modelo sea desde el año 1980 hasta el año 1996, ya que la estación hidrométrica Querococha cuenta con información histórica registrada de caudales medios mensuales para este periodo.

Luego de definir el periodo de calibración y validación se analizó las variables a utilizar en el modelo: precipitación media (estación Recuay, Milpo y Pachacoto), temperatura media (estación Recuay), sin embargo, como ya se mencionó las estaciones meteorológicas mencionadas se encuentran fuera de la UH Yanayacu.

Por lo tanto, debido a que no se tiene registro de datos meteorológicos suficientes sobre la misma zona de estudio se aplicó el modelo WRF con la finalidad de obtener la información a nivel mensual de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad para el periodo de calibración y validación de 1980 a 1996. Además, el modelo WRF está siendo utilizado en proyectos de investigación nacionales e internacionales en cambio climático.

Las variables climáticas que se usaron en el modelo WEAP como es información nivel mensual de precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad para el periodo de calibración y validación del 1980 a 1996, forma parte de la información trabajada para el proyecto PERU GROWS (www.gob.pe/institucion/inaigem/informes-publicaciones/832114-peru-grows), en la que se recolectó datos de distintas estaciones que se ubican dentro de la zona de influencia del proyecto (cuenca de la parte alta del río Santa). La información obtenida a través del modelo WRF fue tratada y corregida con dichas estaciones locales para reflejar de mejor manera los valores para la cuenca de estudio.

El periodo de evaluación del modelo se tomó en cuenta desde 1980 a 1996, es debido a que la variable de salida: caudal, está definida por la estación hidrométrica Querococha, cuyo periodo máximo de registro llega al año 1996.

3.3.2 Construcción del modelo hidrológico WEAP

La etapa de la construcción del modelo se divide principalmente en dos etapas: primero, definir los elementos del esquema del modelo hidrológico, y segundo ingresar la información a cada uno de estos elementos según sus requerimientos. Sin embargo, de manera preliminar se debe solicitar una licencia de uso y definir el paso e intervalo de tiempo.

Para poder usar el software WEAP se debe solicitar la licencia de uso a través de su página web y dependerá de la condición del solicitante el costo que corresponda pagar por su uso. La presente tesis es parte del proyecto PERU GROWS del INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) y es por ello no ha generado gasto alguno en adquirir la licencia.

La tesis se desarrolló a paso mensual y en el periodo de tiempo de 1980 a 2050. Todos los cálculos realizados abarcan este periodo. A partir de estos datos el modelo automáticamente tomó el año de 1980 como *Cuentas Corrientes* y el periodo de 1981-2050 como *Reference*.

3.3.2.1 Esquema del modelo

Río: Este componente representa los cursos de agua que el modelador considere incluir de acuerdo con la hidrografía de las zonas de estudio.

Derivación: Este componente representa a los canales de distribución de agua para satisfacer a las demandas agrícolas de los bloques de riego.

Embalse: Ese componente representa los grandes almacenes de agua que pueden ser naturales como lagos y lagunas o artificiales como las represas.

Otras fuentes: Este componente representa toda fuente de origen diferente a la escorrentía natural de los cauces de ríos, pudiendo ser manantiales o trasvases de otras cuencas.

Sitios de demanda: Este componente representa a todos los tipos de demanda de agua que existen en la zona de estudio, estos pueden ser demandas de consumo poblacional, demandas mineras, etc. Estas demandas corresponden a las diferentes actividades que dependen del recurso hídrico, éstas pueden ubicarse dentro o fuera de la cuenca.

Unidad hidrológica: El conjunto de todas representan a toda el área de la cuenca, estas están divididas en subcuencas o porciones de la cuenca y se dividen a través de las bandas de elevación. Vienen a ser la unidad mínima de representación del área de trabajo.

Escorrentía / Infiltración: Representan el enlace o vínculo que hay entre la unidad hidrológica, o también llamado *catchment*, y la fuente de agua hacia donde escurren normalmente sus aguas.

Conducción: Representa el vínculo directo de la fuente de suministro (que puede ser también una derivación) hacia la demanda respectiva.

Flujo de Retorno: Definido como parte del caudal que regresa a la fuente.

Requerimiento de Caudal: Representa el caudal que requiere cierta demanda y que obliga al modelo a que circule a través de él.

Medidor de Caudal: Este elemento ayuda a evaluar el desempeño del modelo, ya que compara los caudales simulados y observados. Estos caudales observados son los registros de caudales históricos que hay sobre un curso de agua.

3.3.2.2 Ingreso de Datos

El ingreso de datos está en función al tipo de componente a modelar, en la siguiente sección se resumirá los datos de ingreso a cada uno de estos elementos.

Los distintos tipos de datos que se ingresan a un modelo hidrológico en WEAP se detallan en el Anexo 3.

3.3.2.2.1 Unidades hidrológicas:

Una vez creadas las unidades hidrológicas se completó la información de ingreso, en la presente tesis solo se trabajó con 3 de estos campos, los cuales son: Uso de suelo, Clima y Avanzado.

La pestaña “Uso de suelo”, ver Figura 7, hace referencia a las características del suelo, es decir, el área total (así como de cada tipo de cobertura que existe en dicha unidad hidrológica), el coeficiente de cultivo, capacidad de agua del suelo, capacidad de agua

profunda, factor de resistencia a la escorrentía, conductividad de la zona radicular, conductividad profunda, dirección preferencial de flujo, z1 y z2 inicial.

En la sección de área se incluyeron los tipos de cobertura que existen en cada unidad hidrológica de manera manual, luego se ingresaron sus valores y unidades respectivas.

En la sección de coeficiente de cultivo y demás parámetros se trabajó bajo la referencia de valores establecidos por el SEI y en base a investigaciones similares. Ver Tabla 5. Esta gama de valores varía de acuerdo con el tipo de cobertura que hay en cada cuenca o zona de estudio.

Tabla 5

Rango de Valores de los Parámetros de Suelo en Distintas Investigaciones

Parámetro	(Condom et al., 2011)	(Escobar et al., 2014)	(Celmi, 2014)	(Figuroa & Escobar, 2015)	(León, 2018)
kc	1.1	[0.9 - 0.95]	[0.1 - 1.1]	[0.71 - 1.1]	[0.1 - 0.9]
Sw	80	[500 - 1000]	[20 - 95]	[300 - 800]	[100 - 500]
Dw	500	500	3000	800	1000
RRF	[0.8 - 4]	[1 - 5]	[3 - 9]	[3 - 6]	[0.1 - 1.8]
ks	500	[50 - 400]	500	[75 - 190]	[750 - 10000]
kd	50	50	50	80	20
f	0.68	[0.3 - 0.7]	[0.1 - 0.9]	[0.3 - 0.8]	[0.4 - 0.85]
Z1	35	10	35	30	35
Z2	35	30	35	30	20



Figura 7. Información de ingreso de uso de suelo que requiere cada unidad hidrológica.

Fuente: Elaboración propia

La pestaña “Clima”, ver figura 8, hace referencia a las características climáticas que hay en cada unidad hidrológica, estas variables son la precipitación, temperatura, humedad, viento, fracción de nubosidad y latitud (en la presente tesis solo fueron usadas estas variables). Para poder ingresar las variables de clima generalmente se importan archivos .csv que previamente se trabajó bajo un formato para que su lectura sea compatible.

La pestaña “Avanzado”, ver figura 8, hace referencia a dos características, la primera es la metodología del modelamiento; ¿y la segunda es modelar glaciares? En el caso de la metodología del modelamiento se escogió el Método de Humedad de Suelo, y en el caso de modelar glaciares no se tomó en cuenta debido a que en la tesis no se consideró modelar glaciares, esto principalmente a que no existen datos suficientes para calibrar los valores, pero la cobertura glaciar sí fue incluida en el modelo.

3.3.2.2.2 Sitio de demanda:

En los sitios de demanda se ingresa a la pestaña “Uso del agua” donde se completará la información sobre el nivel de actividad y su tasa anuales de consumo. Toda la información de ingreso está en la Tabla 6.

Tabla 6

Sitios de Demanda en la Zona de Estudio

Nombre WEAP	Nombre Demanda	Fuente	Volumen anual (m3)
Poblacional_1	Cátac	L. Gueshguecocha	45096.48
Poblacional_2	Ticapampa	L. Gueshguecocha	21444.48
Poblacional_3	Compina	L. Gueshguecocha	2207.52
Agrícola_1	Ayala – Castillo	R. Yanayacu	110700
Agrícola_2	Queshqui – Rosa	Q. Gueshgue	2805500
Agrícola_3	Shapaca Pocrac	L. Querococha	830700
Agrícola_4	Buenos Aires –YacucanCHA – Compina – Chaupis	L. Querococha	3764800
Agrícola_5	CompinaCucho	R. Yanayacu	152800
Minera_1	Santa Renee	Q. Gueshgue	60000
Minera_2	Concentradora Mesapata	Q. Gueshgue	315360

Nombre WEAP	Nombre Demanda	Fuente	Volumen anual (m3)
Minera_3	Huinac	R. Yanayacu	189216
Minera_4	Toma la Mano	R. Yanayacu	788400
Minera_5	Greenex	R. Yanayacu	180000
Piscícola_1	Roger Emerson PalaciosPoma	R. Yanayacu	3780000
Piscícola_2	Rudencio Albino Mejía Tarazona	Q. Gueshgue	1419000
Piscícola_3	Eusebio Nemecio Romero Rondan	L. Querococha	2049000
Piscícola_4	Emilai Cervantes Tarazona de Rasker	L. Querococha	2207000
Piscícola_5	Víctor Manuel Ames Espinoza	R. Yanayacu	11037000
Piscícola_6	Alejandro Tarazona Ortiz	R. Yanayacu	189000

Nota. Las demandas piscícolas toman el caudal que se señala, pero solo se considera como consumo al 20% del valor, el 80% regresa a la fuente aguas abajo de su captación.

3.3.2.2.3 Otros:

Entre los otros elementos o información de ingreso al modelo están los embalses y medidor de caudal.

En los embalses solo se ingresaron el valor de capacidad de almacenamiento y almacenamiento inicial, considerando a estos iguales. Esta información se ingresó de acuerdo con la Tabla 7, cuya información fue obtenida del inventario de Lagunas de INAIGEM.

Tabla 7

Lagunas Importantes en las Zonas de Estudio

Nombre	Cuenca	Área (km ²)	Altitud (msnm)	Vol. estimado (MMC)
Querococha	Querococha	1.435	4022.57	38.682522
Gueshguecocha	Gheshgue	0.293	4272.13	7.496429
Pamparaju	Gheshgue	0.180	4701.72	4.419966
Jarpacocha	Gheshgue	0.112	4288.03	2.559930
Verdecocha	Cotush	0.108	4713.67	2.466676

Nota. MMC = millones de metros cúbicos. Fuente: INAIGEM 2016.

En el proceso para identificar las áreas de escorrentía que influyen sobre las lagunas se procedió a crear más unidades hidrológicas en función a las ya creadas. Se dividieron las unidades en las que incluyan áreas que no escurran a lagunas y áreas en las que sí escurren, de esta manera se pudo representar de mejor manera la influencia sobre las 5 lagunas o embalses considerados en el modelo.

Para el medidor de caudal fue necesario ingresar un registro de caudales históricos. Se puede realizar a través de la importación de un archivo .csv con el formato adecuado. Se obtuvo información de los registros históricos de la estación Querococha.

3.3.3 Calibración y validación del modelo WEAP

El proceso de calibración y validación es la etapa en la que se pone a prueba la representatividad del modelo hidrológico respecto a los valores reales registrados en campo. En nuestro caso se realizará una comparación de los caudales históricos registrados con los caudales simulados por el modelo WEAP. Para evaluar el desempeño del modelo se recurrirá a evaluar los caudales a través de medidas de bondad de ajuste, en función a los resultados se podrá juzgar el comportamiento de las series calculadas. Se consideró en esta tesis al coeficiente de Nash-Sutcliffe, P-BIAS, RMSE, el criterio de Schultz y el R^2 .

El proceso de calibración y validación se realizaron sobre 2 zonas: a la salida de la Laguna Querococha y a la salida de la UH Yanayacu. Se debe tener en cuenta que la subcuenca

Respecto a la primera zona, Querococha, se tiene un registro de caudales observados desde el año 1953 al 1996, en la tesis se evaluó en el periodo 1980-1996; estos valores fueron comparados con los caudales simulados por el modelo hidrológico WEAP para luego ser evaluados por los métodos de bondad de ajuste.

Respecto a la segunda zona, Yanayacu, no tiene un registro de caudales en el punto de evaluación, por tanto, se recurrió a un artificio que consiste en generar una estación ficticia que fue completada a través de una cuenca similar en donde sí existe un registro histórico.

Por ello se recurrió a la estación Olleros, cuenca del río Negro (se puede ver la ubicación de las cuencas Olleros y Yanayacu en el Mapa 5), que cuenta con un periodo histórico de 1971-

1998, pero para efectos de la comparación se trabajó en el periodo 1980-1996. Para calcular los caudales en la estación ficticia se recurrió a la siguiente fórmula:

$$Q_{Yanayacu} = Q_{Olleros} \cdot \frac{A_{Yanayacu}}{A_{Olleros}}$$

Donde:

$Q_{Yanayacu}$: es el caudal medio mensual de la estación ficticia.

$Q_{Olleros}$: es el caudal histórico medio mensual de la estación Olleros.

$A_{Yanayacu}$: área de la cuenca de Yanayacu.

$A_{Olleros}$: área de la cuenca de río Negro.

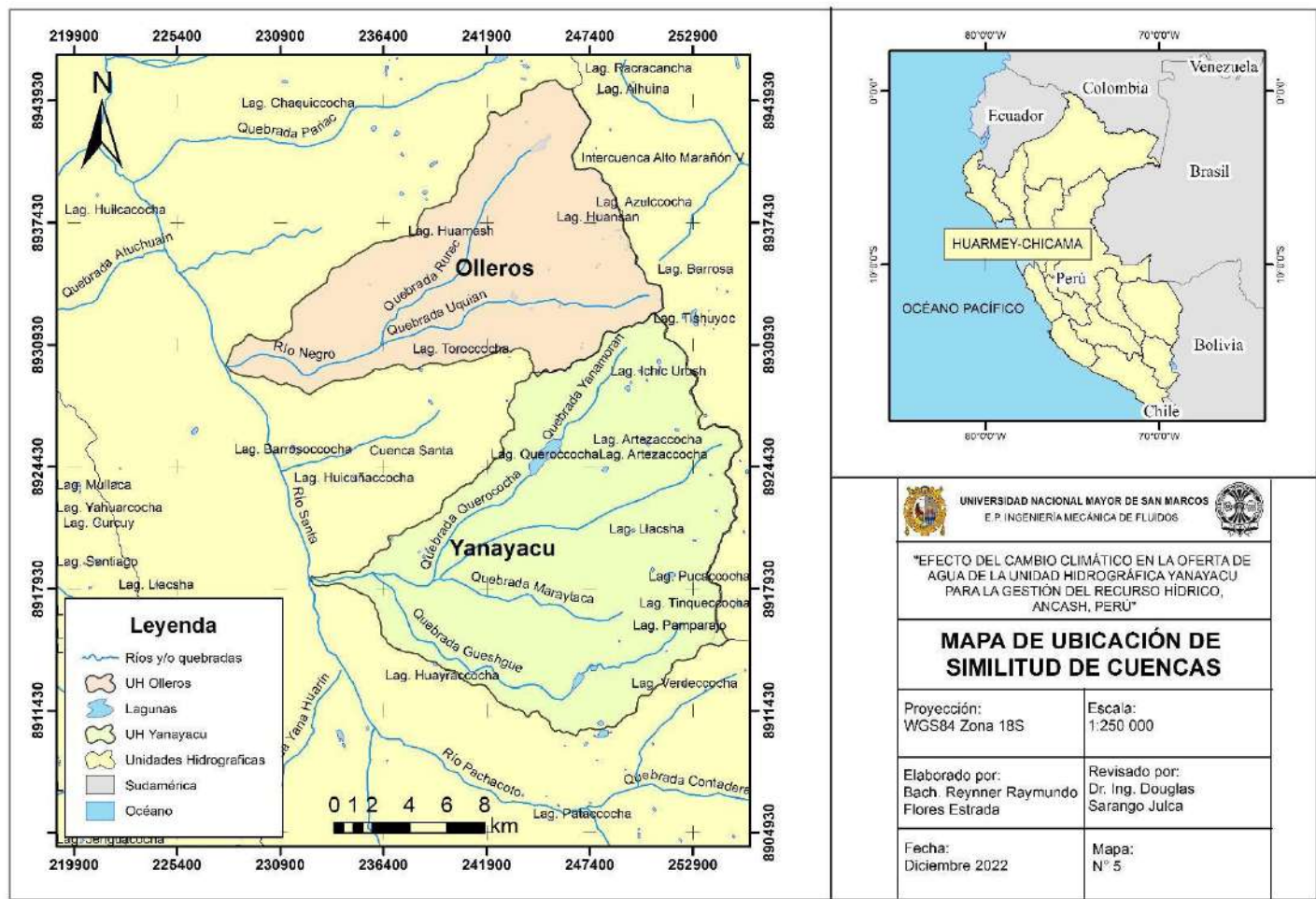
Para poder utilizar esta fórmula primero se debe corroborar que ambas cuencas sean similares, esto se comprueba a través de 3 factores: similitud geométrica (coeficiente de compacidad), similitud dinámica (coeficiente orográfico) y similitud cinemática (correlación de confluencia). Mientras los valores de estos factores sean similares o iguales, se podrá decir que las cuencas son similares.

Entonces a partir de esta fórmula se pudo obtener una relación de caudales ficticios con los que se pueda comparar los caudales simulados por el modelo WEAP. Esta comparación nos ayudará a evaluar los caudales simulados por el modelo, sin embargo, al usar valores ficticios o de artificio no se espera que exista un gran ajuste cuantitativo, pero sí lo cualitativo, es decir las variaciones en épocas de avenida y de estiaje sean correspondientes a lo esperado.

Coefficiente de Nash-Sutcliffe (NS):

Usado en diferentes tesis: Celmi (2014), Astorayme (2017), Pilares (2018), etc, y artículos: Sarango et al. (2016), Escobar et al. (2014), etc. que han sido usados de base bibliográfica para el desarrollo de la tesis. El coeficiente se calcula a través de una fórmula y dependiendo de su resultado (ver Tabla 8) el modelo puede ser calificado.

$$NS = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Q_{sim,i} - Q_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Q_i - \bar{Q})^2}$$



Mapa 5. Mapa de ubicación de similitud de cuencas

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8*Rangos de Valores del Coeficiente de Nash-Sutcliffe*

Valor	Ajuste del modelo
NS < 0.2	Insuficiente
0.2 – 0.4	Satisfactorio
0.4 – 0.6	Bueno
0.6 – 0.8	Muy bueno
NS > 0.8	Excelente

Fuente: Molnar 2011

Coeficiente P-BIAS:

El valor del coeficiente determinará su eficiencia, ver Tabla 9:

$$PBIAS = 100 \frac{\sum_{i=1}^n (Q_i - Q_{sim})}{\sum_{i=1}^n Q_i}$$

Tabla 9*Rangos de Valores del Coeficiente de PBIAS*

Valor	Ajuste del modelo
PBIAS > 25	Insatisfactorio
15 – 25	Satisfactorio
10 – 15	Bueno
PBIAS < 10	Muy bueno

Raíz del error cuadrático medio (RMSE):

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

Criterio de Schultz (D):

$$D = 200 \frac{\sum_{i=1}^n |Q_{sim,i} - Q_i| Q_i}{n(Q_{max})^2}$$

Dónde: Q_{max} es el máximo valor observado

El uso de este criterio es recomendado para análisis de eventos de alta resolución temporal. Ver Tabla 10.

Tabla 10

Valores Referenciales del Criterio de Schultz

D	Ajuste
0 – 3	Muy bueno
3 – 10	Bueno
10 – 18	Suficiente
> 18	Insuficiente

Se tuvo en cuenta para el análisis del periodo de evaluación que el primer año se asumió como un año de calentamiento (warm up year), por tanto, este primer año (1980) no se tomará en cuenta dentro del periodo de calibración en sí.

Además, se definió en todos los análisis que el periodo de calibración fue las 2/3 partes del periodo de evaluación, mientras que el periodo de validación fue la 1/3 parte del periodo de evaluación.

3.3.3.1 Calibración del modelo

La calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros del modelo para los cuales la serie de datos simulado se ajusta de manera óptima a la serie de datos observados (Cabrera 2009).

Procedimiento:

1. Se tomó como referencia a los valores de parámetros de suelo de otras tesis y publicaciones y se adecuaron valores que sean correspondientes a los de la zona de estudio. Ver Tabla 6.
2. Se ingresaron los valores de parámetros de suelo en función a las características hidrológicas de la cuenca y se corrió el modelo de manera que se pudieran ver resultados previos.
3. En función a estas primeras corridas se analizó que los caudales picos y caudales bases simulados sean correspondientes a los observados, es decir, que mantengan una relación semejante tanto en valor y en su comportamiento estacional.
4. Se identificó que los parámetros de suelo que son más susceptibles a cambio.
5. Se editaron estas variables para mejorar los resultados de las medidas de bondad de ajuste.

Para poder ajustar los valores de los parámetros de suelo se debe tener en cuenta lo siguiente:

“Los principales parámetros que permiten el aumento de la respuesta de caudales pico son el factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y la conductividad hidráulica en la zona de raíces (k_s). Por otro lado, si se quiere afectar los caudales base se deben ajustar la dirección de flujo (f) y la conductividad hidráulica en la zona profunda (k_d); al aumentar este factor aumenta la conductividad en la zona profunda y, por tanto, la descarga de perfiles profundos, y como consecuencia aumentan los caudales base. De igual manera, si se aumenta la capacidad hidráulica de perfil superior (S_w), se logra un mayor flujo subsuperficial, y por lo tanto, un aumento de caudales máximos. Igualmente, si se regula la transmisión de flujos de caudal base se podrá ajustar la capacidad de retención de humedad en el perfil profundo (D_w)” (Figueroa & Escobar, 2015).

3.3.3.2 Validación del modelo

“Refsgaard y Knudsen (1996) definen la validación de un modelo como el proceso de demostración que el modelo es capaz de hacer predicciones en un lugar específico determinado para períodos fuera del período de calibración. De esta manera, se dice

que un modelo ha sido validado si su precisión y capacidad predictiva en el periodo de validación muestran errores o límites aceptables” (Cabrera, 2012).

3.3.4 Simulación de los efectos del Cambio Climático en la oferta de agua.

La simulación de los efectos del cambio climático en la oferta de agua en la UH Yanayacu se evaluaron en 2 zonas de trabajo: salida de la Laguna Querococha y salida de Yanayacu. Además, para conocer la oferta futura que puede aportar la cuenca se consideró conveniente no incluir demandas para poder obtener un régimen o caudal natural.

Se sabe que el SENAMHI a lo largo de los años ha venido trabajando en Escenarios Climáticos Futuros, por ejemplo, el año 2009 se publicó “Escenarios Climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030”, y en 2021 se terminará el estudio de “Escenarios climáticos para el año 2050 a nivel nacional: Aplicaciones en salud, agua y biomas”; por lo tanto, y para seguir esta misma pauta se consideró para esta tesis los escenarios futuros del 2019 al 2050.

Los datos futuros se redujeron estadísticamente. Se usaron 31 modelos CMIP5 (proyecciones futuras globales) y se redujo la escala utilizando los datos de WRF como observaciones. La reducción siguió el método de Cannon et al 2015. Además, se utilizó el método de “Quantile Delta Mapping”. Esto logró coincidir la distribución de probabilidad de los datos pasados con la distribución de probabilidad de los datos futuros teniendo en cuenta las tendencias. La idea es que no solo se corrijan los datos de la mediana, sino también que los extremos coincidan con la tendencia de los extremos observados en los datos CMIP5 a gran escala. Estos datos climáticos son los que corresponden a los RCP 4.5 y RCP 8.5 y se trabajaron para las variables de temperatura y precipitación considerándolas más importantes por el deshielo de los glaciares y los recursos hídricos. Es importante mencionar que el planteamiento y obtención de las variables climáticas que se usaron en la tesis fueron proporcionados por la especialista Ph.D. Emilly Potter, a quien agradezco el apoyo.

Se analizaron los datos de la oferta de agua futura, precipitación y temperatura futuras con el fin de buscar una relación entre estas, y se compararon cada uno de los tres escenarios *Referencia*, *RCP 4.5* y *RCP 8.5* con respecto al escenario Base. Se hicieron 3 escenarios de

comparación sobre 2 zonas, la primera considerada a la salida de la laguna Querococha y la segunda fue considerada a la salida de la UH Yanayacu.

3.3.4.1 Escenario de Referencia:

Se definió este primer escenario comparando los resultados del escenario de Referencia con el escenario Base, siendo el escenario Base los valores obtenidos en el periodo 1981-1996. En el escenario de Referencia se consideró replicar las variables meteorológicas ingresadas en el periodo 1981-2012, lo que implicaría un periodo cíclico. Se comparó el caudal medio anual (m^3/s), el caudal medio mensual (m^3/s) precipitación total anual (mm), precipitación total mensual (mm), la temperatura media anual ($^{\circ}C$) y la temperatura media mensual ($^{\circ}C$) entre ambos periodos.

3.3.4.2 Escenario RCP 4.5

Se definió este segundo escenario comparando los resultados del escenario del RCP 4.5 con el escenario Base, siendo el escenario Base los valores obtenidos en el periodo 1981-1996. En este escenario se consideró las variables meteorológicas del RCP 4.5 en el periodo 2019-2050. Se comparó el caudal medio anual (m^3/s), el caudal medio mensual (m^3/s) precipitación total anual (mm), precipitación total mensual (mm), la temperatura media anual ($^{\circ}C$) y la temperatura media mensual ($^{\circ}C$) entre ambos periodos.

3.3.4.3 Escenario RCP 8.5

Se definió este tercer escenario comparando los resultados del escenario del RCP 8.5 con el escenario Base, siendo el escenario Base los valores obtenidos en el periodo 1981-1996. En este escenario se consideró las variables meteorológicas del RCP 8.5 en el periodo 2019-2050. Se comparó el caudal medio anual (m^3/s), el caudal medio mensual (m^3/s) precipitación total anual (mm), precipitación total mensual (mm), la temperatura media anual ($^{\circ}C$) y la temperatura media mensual ($^{\circ}C$) entre ambos periodos.

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Generación de información de insumo para el modelo hidrológico WEAP

4.1.1 Creación de las unidades hidrológicas

Para el modelado en la UH Yanayacu se definió las siguientes bandas altitudinales. Ver Tabla 11.

Tabla 11

Bandas Altitudinales en la UH Yanayacu

Bandas	Cota inferior (msnm)	Cota superior (msnm)	Rango (m)
Banda 1	3550	3700	150
Banda 2	3700	4000	300
Banda 3	4000	4300	300
Banda 4	4300	4600	300
Banda 5	4600	4800	200
Banda 6	4800	4900	100
Banda 7	4900	5000	100
Banda 8	5000	5100	100
Banda 9	5100	5200	100
Banda 10	5200	5300	100
Banda 11	5300	5400	100
Banda 12	5400	5600	200

Nota: Elaboración propia.

Luego del procedimiento de creación de las unidades hidrológicas se obtuvo un total de 46 unidades hidrológicas. Se puede ver el detalle en la Tabla 12.

Tabla 12*Unidades Hidrológicas en la Unidad Hidrográfica Yanayacu*

ID_UH	Unidad Hidrográfica	ID_WEAP
1376981	Unidad Hidrográfica 1376981	Y1376981A
1376981	Unidad Hidrográfica 1376981	Y1376981B
1376981	Unidad Hidrográfica 1376981	Y1376981C
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982A
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982B
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982C
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982D
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982E
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982F
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982G
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982H
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982I
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982J
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982K
1376982	Unidad Hidrográfica 1376982	Y1376982L
1376983	Unidad Hidrográfica 1376983	Y1376983A
1376983	Unidad Hidrográfica 1376983	Y1376983B
1376983	Unidad Hidrográfica 1376983	Y1376983C
1376983	Unidad Hidrográfica 1376983	Y1376983D
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984A
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984B
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984C
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984D
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984E
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984F
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984G
1376984	Unidad Hidrográfica 1376984	Y1376984H
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986A
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986B
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986C
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986D

ID_UH	Unidad Hidrográfica	ID_WEAP
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986E
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986F
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986G
1376986	Unidad Hidrográfica 1376986	Y1376986H
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987A
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987B
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987C
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987D
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987E
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987F
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987G
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987H
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987I
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987J
1376987	Unidad Hidrográfica 1376987	Y1376987K

Nota: Elaboración propia.

Donde:

- ID_UH: hace referencia a la codificación según la metodología Pfafstetter.
- Unidad Hidrográfica: hace referencia al nombre de la unidad hidrográfica de acuerdo a la metodología Pfafstetter.
- ID_WEAP: hace referencia al código interno, del modelador, que se le asignó a cada una de las unidades hidrológicas en el proceso de la tesis.

El código de ID_WEAP se compone de la siguiente manera:

1. La 1° letra hace referencia a la UH a la que pertenece. (Y= Yanayacu)
2. Continúa con el código de la UH según la metodología Pfafstetter.
3. Se asigna una letra del abecedario (A, B C, D, etc.) en función al orden de su recorrido desde aguas abajo hacia aguas arriba dentro de la UH a la que pertenece.

Ejemplo:

Y1376981A

Y: Unidad hidrológica en la UH Yanayacu.

1376981: Código de la unidad hidrológica según metodología Pfafstetter.

A: Orden de ubicación de la unidad en el sentido hacia aguas arriba dentro de la UH.

En el Anexo 4 se puede ver el procedimiento detallado de la creación de unidades hidrológicas según la metodología empleada en la tesis.

Sobre las unidades hidrológicas creadas se editaron aquellas que tengan cuerpos de agua (lagunas) con la finalidad de que se puedan separar entre unidades hidrológicas más pequeñas donde se pueda identificar la influencia del área de escorrentía sobre dicho cuerpo de agua. En ese sentido, se consideró en el modelo tener la referencia de 5 lagunas: Querococha, Gheshguecocha, Pamparaju, Jarpacocha y Verdecocha, se identificó a las unidades hidrológicas a las que pertenecen y se las subdividió de manera que se tenga las zonas de real influencia sobre dichas lagunas.

Tomando como ejemplo a la laguna Querococha, tenemos que las unidades hidrológicas que influyen en la escorrentía hacia esta empiezan en Y1376984B y termina en el Y1376984H (según la metodología seguida en la tesis), ver Figura 8. Puede notarse que solo dos unidades hidrológicas no están completamente dentro de esta área de influencia (Y1376984B y Y1376984C), por tanto, se dividió ambas unidades de manera que se tenga una zona que influya sobre la laguna y otra que no influya. Este proceso es importante debido a que estas subdivisiones ayudarán a mejorar el resultado del caudal simulado en la salida de la laguna y su evaluación con parámetros de ajuste con los caudales observados.

Por lo tanto, se dividió la Y1376984B en Y1376984B1 y Y1376984B2, y Y1376984C en Y1376984C1 y Y1376984C2. Ver la Tabla 13.

Tabla 13

Nuevas Unidades Hidrológicas Debido a la Laguna Querococha

Unidad antigua	Unidad hidrológica nueva	Escurrimiento
Y1376984B	Y1376984B1	L. Querococha
	Y1376984B2	Q. Querococha
Y1376984C	Y1376984C1	L. Querococha
	Y1376984C2	Q. Querococha

Nota: Elaboración propia

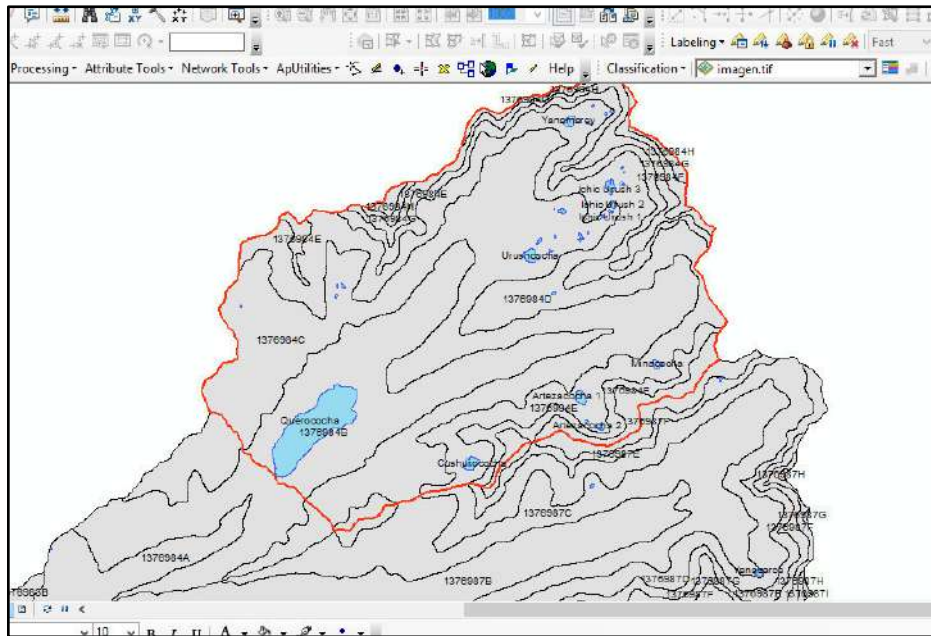


Figura 8. Área de escorrentía sobre la laguna Querochocha (en rojo).

Fuente: Elaboración propia

De manera similar se trabajó con las otras 4 lagunas más (ver Figura 9), lo que llevó a que se subdivida en más unidades hidrológicas y por tanto la creación de más unidades hidrológicas. Ver Tabla 14 y Tabla 15. En el Anexo 5 se puede ver el proceso de delimitación de las zonas de influencia de las lagunas.

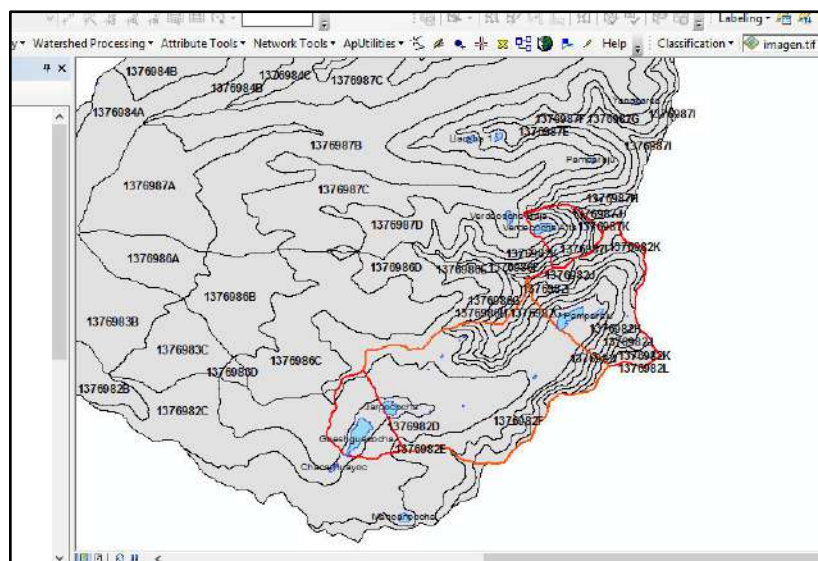


Figura 9. Áreas de escorrentía sobre las lagunas (en rojo).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 14*Nuevas Unidades Hidrológicas Debido a la Laguna Verdecocha*

Unidad antigua	Unidad hidrológica nueva	Escurrimiento
	Y1376987D1	Q. Cotush
Y1376987D	Y1376987D2	L. Verdecocha
	Y1376987E1	Q. Cotush
Y1376987E	Y1376987E2	L. Verdecocha
	Y1376987F1	Q. Cotush
Y1376987F	Y1376987F2	L. Verdecocha
	Y1376987G1	Q. Cotush
Y1376987G	Y1376987G2	L. Verdecocha
	Y1376987H1	Q. PampaRajo
Y1376987H	Y1376987H2	L. Verdecocha
	Y1376987I1	Q. PampaRajo
Y1376987I	Y1376987I2	L. Verdecocha
	Y1376987J1	Q. PampaRajo
Y1376987J	Y1376987J2	L. Verdecocha
	Y1376987K1	Q. PampaRajo
Y1376987K	Y1376987K2	L. Verdecocha

Nota: Elaboración propia. Se colocó la numeración de 1 o 2 en función a su orden respecto a la unidad antigua, donde 1 es el área que se encuentra aguas arriba de esa división respecto a las demás nuevas unidades

Finalmente, el conjunto total de unidades hidrológicas creadas en el modelo hace un total de 71 unidades creadas.

Tabla 15*Nuevas Unidades Hidrológicas por las lagunas Pamparaju, Jarpacocha y Gheshguecocha*

Unidad antigua	Unidad hidrológica nueva	Escurrimiento
	Y1376982C1	L. Jarpacocha
Y1376982C	Y1376982C2	L. Gheshguecocha
	Y1376982C3	Q. Gheshgue

Unidad antigua	Unidad hidrológica nueva	Escurrimiento
	Y1376982D1	L. Jarpacocha
Y1376982D	Y1376982D2	L. Gheshguecocha
	Y1376982D3	Q. Gheshgue
	Y1376982E1	L. Pamparaju
Y1376982E	Y1376982E2	L. Jarpacocha
	Y1376982E3	L. Gheshguecocha
	Y1376982E4	Q. Gheshgue
	Y1376982F1	L. Pamparaju
Y1376982F	Y1376982F2	L. Jarpacocha
	Y1376982F3	Q. Gheshgue
	Y1376982G1	L. Pamparaju
Y1376982G	Y1376982G2	L. Jarpacocha
	Y1376982G3	Q. Gheshgue
Y1376982H	Y1376982H1	L. Pamparaju
	Y1376982H2	L. Jarpacocha
Y1376982I	Y1376982I1	L. Pamparaju
	Y1376982I2	L. Jarpacocha
Y1376982J	Y1376982J1	L. Pamparaju
	Y1376982J2	L. Jarpacocha
Y1376982K	Y1376982K1	L. Pamparaju
	Y1376982K2	L. Jarpacocha

Nota: Elaboración propia. Se colocó la numeración de 1, 2 o 3 en función a su orden respecto a la unidad antigua, donde 1 es el área que se encuentra aguas arriba de esa división respecto a las demás nuevas unidades.

4.1.2 Cobertura de suelo

El proceso de calcular el tipo de cobertura de suelo a partir del uso de la plataforma GEE sobre la zona de estudio y su posterior edición final en ArcGis se desarrolló a través de 4 pasos previos.

El primer paso fue la creación de una cuenta en la plataforma de Google Earth Engine. A través del interfaz podremos obtener las imágenes satelitales necesarias para la clasificación. Ver Figura 10.

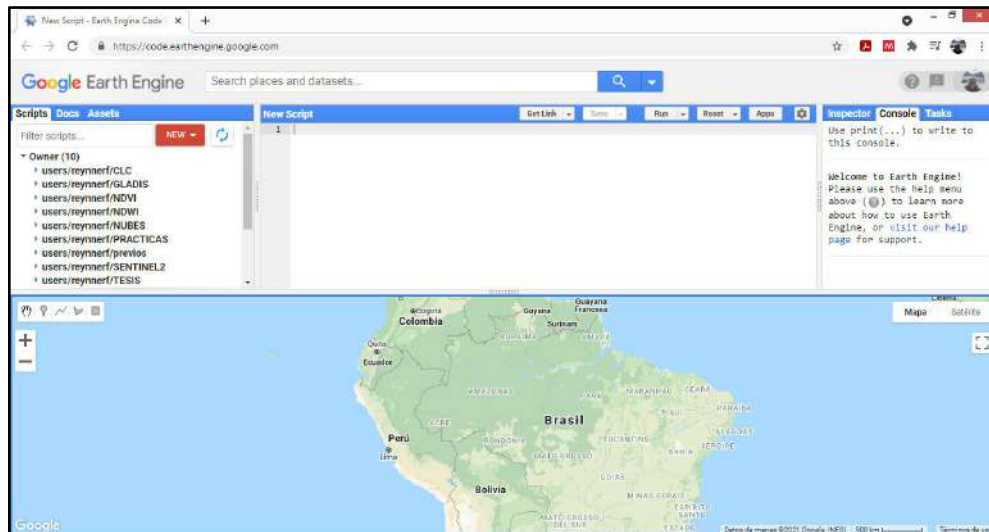


Figura 10. Cuenta creada y verificada para trabajar sobre la plataforma GEE

Fuente: Elaboración propia

El segundo paso fue el desarrollo de un script donde se puedan visualizar imágenes satelitales sobre la zona de trabajo, y a través de esta colección escoger la más adecuada para el proceso de clasificación supervisada (ver Figura 11). Dentro de este script se definieron las condiciones de área, tiempo y nubosidad de la imagen satelital. El detalle del Script de la colección de imágenes satelitales está en el Anexo 6.

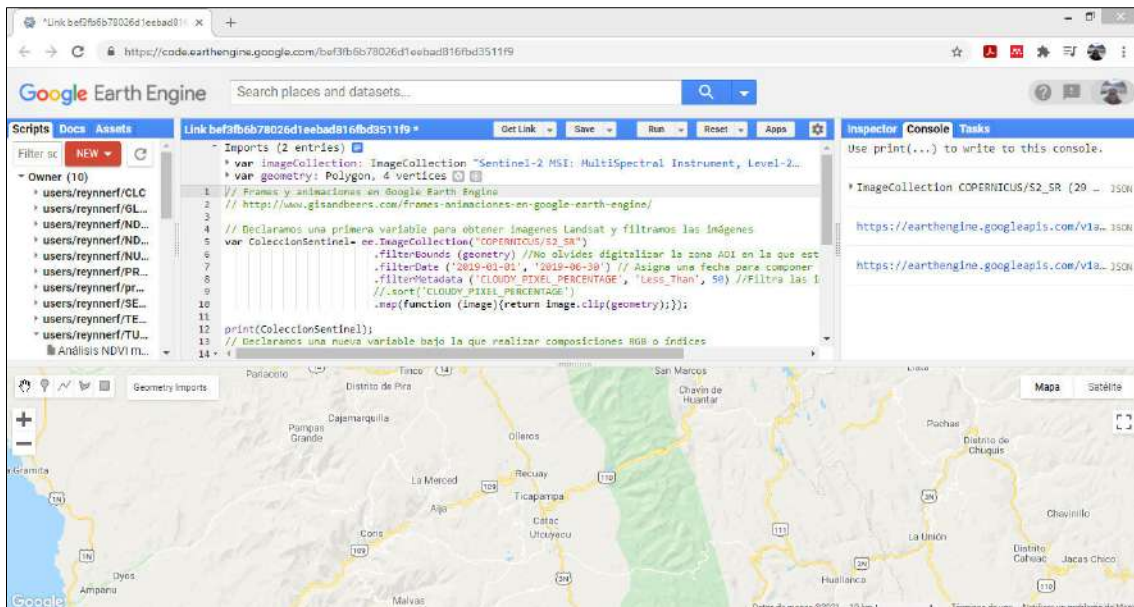


Figura 11. Elaboración de scripts en la plataforma de GEE

Fuente: Elaboración propia

El tercer paso fue la clasificación supervisada a partir de una imagen satelital que permita clasificar los diferentes tipos de cobertura presentes en la zona. Este paso se realizó también a través de la plataforma GEE desarrollado a través de un script. El detalle del script de clasificación supervisada está en el Anexo 7. El proceso parte de escoger la imagen satelital y crear puntos de tipos de cobertura en función a los valores del NDVI previamente calculados y que se apoyan en las salidas de campo.

El cuarto paso fue la edición en el software ArcGis. La plataforma GEE permite descargar el resultado de la clasificación en formato .tif, luego esta se lleva al ArcMap y se inicia el proceso de edición, donde junto a shapes de tipos de cobertura ya definidos (bloques de riego, lagos y lagunas, y glaciares) se delimita de mejor manera las distintas coberturas presentes en las zonas de interés. Esto lleva como resultado final la clasificación de la UH Yanayacu según la Figura 12.

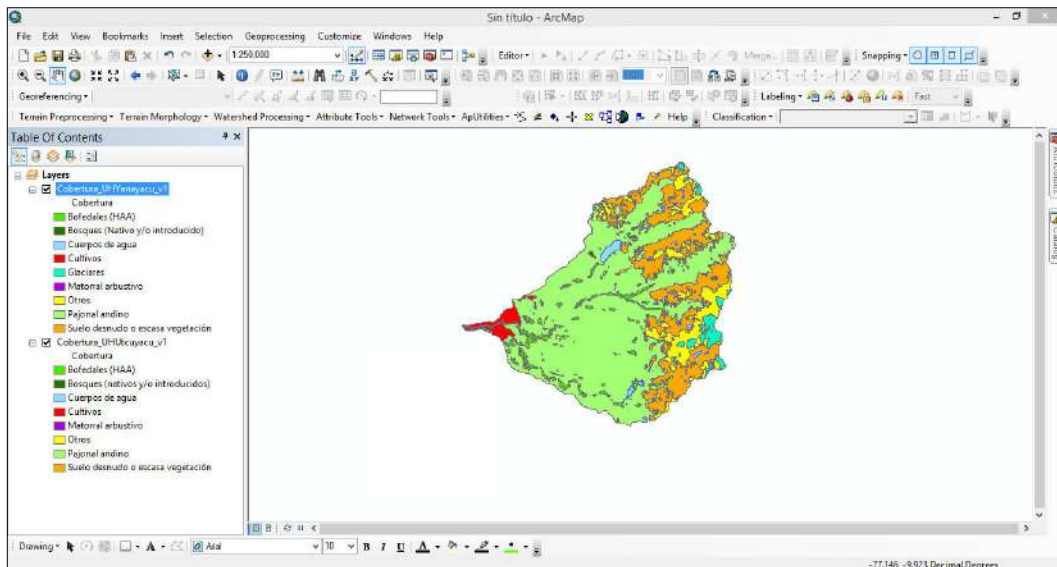


Figura 12. Tipos de cobertura en la zona de estudio

Fuente: Elaboración propia

Luego del análisis se obtuvo los tipos de cobertura y sus porcentajes de Yanayacu en la Tabla 16. El procedimiento de cálculo de la cobertura de suelo se detalla en el Anexo 8.

Tabla 16
Cobertura en la UH Yanayacu

Nº	Tipo de Cobertura	Área (km ²)	Porcentaje (%)
1	Pajonal andino	166.5	60.98
2	Matorral arbustivo	0.51	0.19
3	Humedal	8.33	3.05
4	Bosques	1.82	0.67
5	Cultivos	5.03	1.84
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	56.68	20.76
7	Cuerpos de agua	2.82	1.03
8	Glaciares	6.07	2.22
9	Otros	25.3	9.26
	Total	273.06	100

Nota. Fuente: Elaboración propia.

Para el ingreso de esta información al modelo se tuvo que dividir esta clasificación entre cada una de las unidades hidrológicas (excepto a las que se refieran a bloques de riego), así pues, en cada unidad hidrológica está presente la cobertura de suelo que le corresponda.

En el Anexo 9 se detalla el área y los porcentajes de cobertura por cada unidad hidrológica (catchment) de Yanayacu.

4.1.3 Información meteorológica

Toda la información meteorológica usada en la tesis fue elaborada y compartida por la especialista PhD. Emily Potter, usando el modelo WRF. En el Anexo 10 se explica el procedimiento y corrección de los datos de salida del modelo WRF. Los resultados de la información meteorológica fueron espacializados a cada unidad hidrológica de manera que puedan ser ingresados al modelo a través de archivos csv. La totalidad de archivos que se ingresaron en las unidades hidrológicas están descritos en el Anexo 11.

4.2 Construcción del modelo hidrológico WEAP

Esta construcción se realizó dibujando cada uno de los elementos tratando de representar de mejor manera la situación real que sucede en las zonas.

4.2.1 Esquema del modelo

Luego de ingresar de toda la información se obtuvo los siguientes resultados. Ver Figura 13.



Figura 13. Componentes creados en el interfaz de WEAP.

Fuente: Elaboración propia

Río: Un total de 9 cursos de agua. Se tomaron en cuenta las quebradas Querococha, Cotush, Pamparaju, VerdeCocha, Maraytaca y Gheshgue y el río Yanayacu.

Derivación: Un total de 3 derivaciones, las cuales fueron en Yanayacu: Querococha, Buenos Aires – Yacucancha – Compina - Chaupis y Qeshqui. Al igual que los ríos, esta información se ingresa dibujando su recorrido o dirección, pero de manera simplificada para no saturar el esquema.

Embalse: Un total de 5 embalses. Todos estos ubicados en la UH Yanayacu. Estos son: Querococha, Gheshguecocha, Pamparaju, Jarpacocha y Verdecocha.

Sitios de demanda: Un total de 19: 3 de ellas de consumo humano, 5 de demanda minero, 6 de piscícolas y 5 bloques de riego.

Unidades hidrológicas: Un total de 71.

Escorrentía / Infiltración: Un total de 71. Desde la unidad hidrológica hacia donde escurre normalmente.

Conducción: Un total de 19.

Flujo de retorno: Un total de 6. Son demandas que regresan al curso del río. Todas están relacionadas con las 8 demandas de piscícolas. Se consideró que el flujo de retorno equivale al 80% de la demanda requerida, por tanto, el consumo real será del 20%.

Medidor de Caudal: Un total de 1. Un registro en Querococha.

En la Figura 14, se puede apreciar algunos componentes del esquema: la laguna Querococha representada por un embalse (▲), el medidor de caudal (●) localizado a la salida de la laguna, las distintas quebradas (→), las conducciones (→) y las unidades hidrológicas (●) (Stockholm Environment Institute (SEI), 2020).

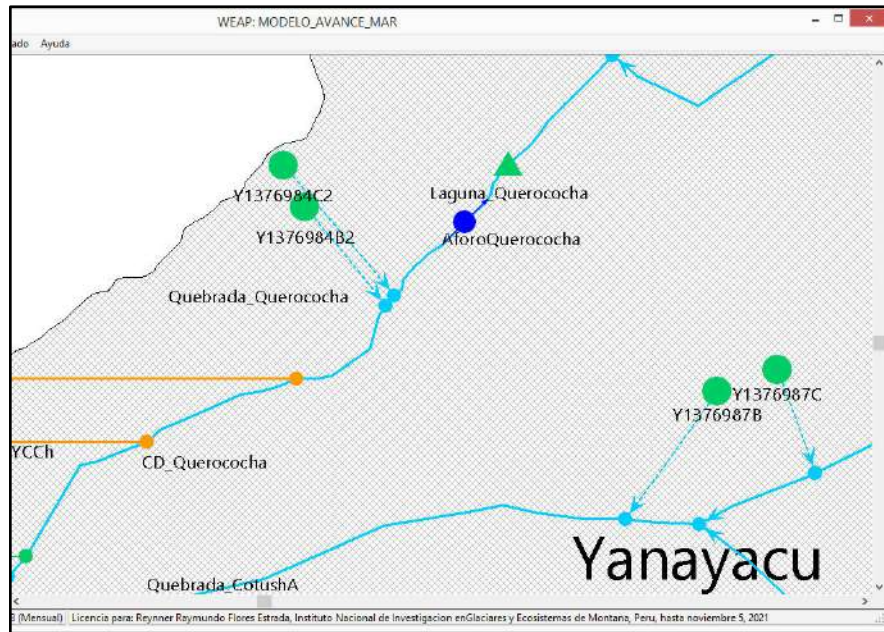


Figura 14. Esquema de algunos componentes a la altura de la Laguna Querococha.

Fuente: Elaboración propia

En la Figura 15, se puede apreciar todos los componentes del esquema de la UH Yanayacu.

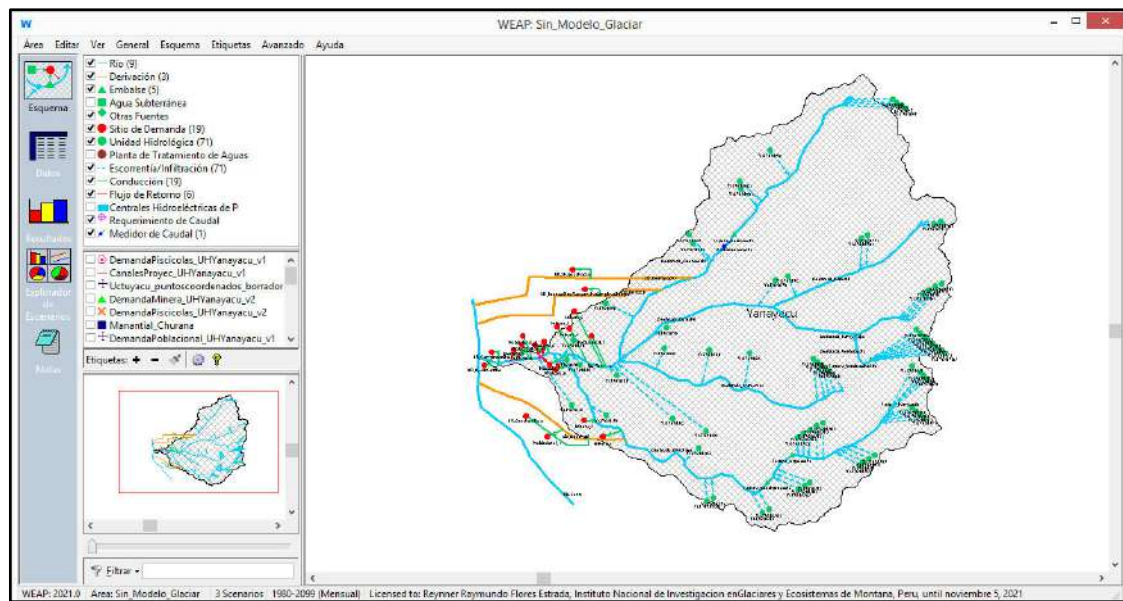


Figura 15. Esquema de los componentes creados para Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

4.2.2 Ingreso de datos al modelo

4.2.2.1 Unidades hidrológicas

Se obtuvo un total de 71 unidades hidrológicas, por tanto, para obtener los resultados finales del modelo fue necesario llevar a cabo resultados previos en el ingreso de información sobre estas unidades. Así como se describió en la metodología, el ingreso de información de las unidades hidrológicas se divide en 3 campos: Uso de suelo, Clima y Avanzado.

- Uso de suelo: se definieron en función al tipo de cobertura presente. Los resultados fueron los siguientes:

Área: Está en función al tamaño de la unidad hidrológica creada.

Coefficiente de Cultivo: Los valores de coeficiente de cultivo están definidos por el tipo de cobertura. Ver Tabla 17.

Tabla 17

Valores de k_c en función al tipo de cobertura

N°	Tipo de cobertura	Valor
1	Pajonal andino	1
2	Matorral arbustivo	1
3	Humedal	0.9
4	Bosques	1.1
5	Cultivos	1
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	0.75
7	Cuerpos de agua	1
8	Glaciares	1
9	Otros	0.9

Nota: Elaboración propia

Capacidad de Agua del Suelo: Los valores de la capacidad de agua de suelo varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Ver Tabla 18.

Tabla 18*Valores de Sw en función al tipo de cobertura*

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Pajonal andino	500
2	Matorral arbustivo	650
3	Humedal	1000
4	Bosques	800
5	Cultivos	600
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	300
7	Cuerpos de agua	700
8	Glaciares	400
9	Otros	400

Nota: Elaboración propia.

Capacidad Agua Profunda: Los valores de la capacidad de agua profunda no varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Se considera de manera uniforme un solo valor. Ver **Tabla 19**.

Tabla 19. *Valores de Dw en función al tipo de cobertura.*

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Todo cobertura	3000

Nota: Elaboración propia

Factor de Resistencia a la Escorrentía: Los valores del factor de resistencia a la escorrentía varía de acuerdo con el tipo de cobertura, pendiente del terreno y área foliar. Por ello, se trabajó en función a la pendiente promedio de las unidades hidrológicas (definiendo valores para unidades mayores y menores al 30% de pendiente) y al tipo de cobertura. En Yanayacu existen ambas características. Ver Tabla 20.

Tabla 20*Valores de RRF en función al tipo de cobertura y la pendiente promedio*

N°	Tipo de cobertura	Pendiente alta	Pendiente baja
1	Pajonal andino	2.5	5
2	Matorral arbustivo	3	6.5
3	Humedal	2.8	4
4	Bosques	3	7
5	Cultivos	2.5	6
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	2.2	4
7	Cuerpos de agua	3	5
8	Glaciares	3.5	5
9	Otros	3.5	7

Nota: Elaboración propia. Pendiente alta = mayor a 30%; Pendiente baja = menor a 30%.

Conductividad de la Zona Radicular: Los valores de la conductividad de la zona de raíz varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Ver Tabla 21.

Tabla 21*Valores de ks en función al tipo de cobertura*

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Pajonal andino	100
2	Matorral arbustivo	120
3	Humedal	350
4	Bosques	150
5	Cultivos	80
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	50
7	Cuerpos de agua	300
8	Glaciares	100
9	Otros	100

Nota: Elaboración propia.

Conductividad Profunda: Los valores de la conductividad profunda no varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Se considera de manera uniforme un solo valor por unidad hidrográfica. Ver Tabla 22.

Tabla 22

Valores de kd en función al tipo de cobertura y unidad hidrográfica

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Todo cobertura	100

Nota: Elaboración propia

Dirección Preferencial del Flujo: Los valores de la dirección preferencial de flujo varían de acuerdo al tipo de cobertura. Ver Tabla 23.

Tabla 23

Valores de f en función al tipo de cobertura y unidad hidrográfica

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Pajonal andino	0.3
2	Matorral arbustivo	0.5
3	Humedal	0.4
4	Bosques	0.5
5	Cultivos	0.6
6	Suelo desnudo o escasa vegetación	0.2
7	Cuerpos de agua	0.5
8	Glaciares	0.8
9	Otros	0.9

Nota: Elaboración propia.

Z1 Inicial: Los valores de Z1 por lo general no varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Se considera de manera uniforme un solo valor por unidad hidrográfica. Ver Tabla 24.

Tabla 24

Valores de $z1$

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Todo cobertura	30%

Nota: Elaboración propia

Z2 Inicial: Los valores de Z2 por lo general no varían de acuerdo con el tipo de cobertura. Se considera de manera uniforme un solo valor por unidad hidrográfica. Ver Tabla 25.

Tabla 25

Valores de z2

N°	Tipo de cobertura	UH Yanayacu
1	Todo cobertura	30%

Nota: Elaboración propia

- Clima: los resultados previos de esta sección se desarrollaron a partir de la información de ingreso de data en cada una de las unidades hidrológicas y se obtuvo las gráficas de su comportamiento. Como se mencionó en la metodología se trabajó con las variables de precipitación, temperatura, humedad, viento, fracción de nubosidad y latitud. Los resultados previos fueron los siguientes:

Precipitación: Se trabajó a partir de la data calculada por el modelo WRF. Ver Figura 16.

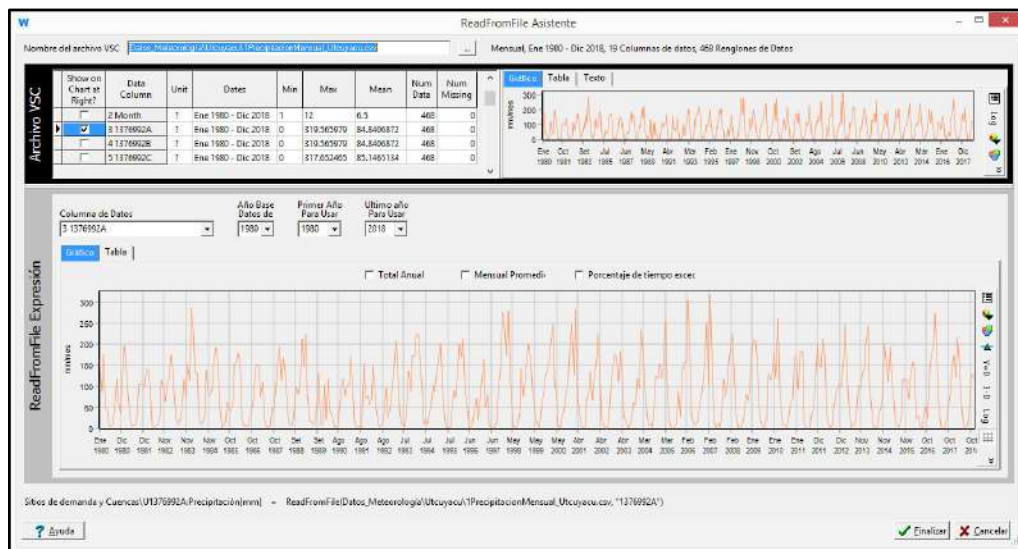


Figura 16. Precipitación calculada para cada unidad hidrológica

Fuente: Elaboración propia

Temperatura: Se trabajó a partir de la data calculada por el modelo WRF.

Humedad: Se trabajó a partir de la data calculada por el modelo WRF.

Velocidad del viento: Se trabajó a partir de la data calculada por el modelo WRF.

Fracción de Nubosidad: Se trabajó a partir de la data histórica calculada por el modelo WRF.

Latitud: Se trabajó a partir de la ubicación del centroide de cada unidad hidrológica.

- Avanzado: en esta etapa se trabaja con la sección del método de modelamiento mencionado ya anteriormente: Método de Humedad de Suelo.

4.2.2.2 Sitios de demanda

Según la Tabla 6, se registraron en las zonas de estudio un total de 19 demandas.

4.3 Calibración y validación del modelo WEAP

El periodo de análisis de calibración y validación se realizó en 2 lugares diferentes: salida de la Laguna Querococha y salida de la UH Yanayacu.

- El primer análisis fue en la salida de la Laguna Querococha. El periodo total de análisis fue de 1981-1996 (192 meses), donde la calibración fue de enero 1981 – agosto 1991 (128 meses) y validación de setiembre 1991 – diciembre 1996 (64 meses). En la Tabla 26 se muestra los valores de la estación Querococha.

Tabla 26*Caudales históricos de la Estación Querococha en el periodo 1980-1996*

		Variable: Caudal (m ³ /s)				Latitud: 9°43'35"				Longitud: 77°20'00"			
		Propietario: Senamhi				Altitud: 3980 msnm							
AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	
1980	1.93	2.24	1.94	1.83	1.01	0.66	0.4	0.58	0.79	1.39	1.94	2.78	
1981	2.5	5.65	4.14	2.32	1.13	0.63	0.52	0.49	0.51	1.41	3.52	3.65	
1982	3.51	5.14	3.26	2.59	1.23	0.72	0.44	0.39	0.61	1.85	3.08	4.11	
1983	4.14	2.54	3.96	3.52	2.11	1.17	0.79	0.74	0.94	1.34	1.7	3.35	
1984	2.36	5.11	5.65	3.27	1.96	1.06	0.78	0.53	0.51	1.59	1.36	2.39	
1985	2.36	2.71	3.49	2.92	1.43	0.66	0.37	0.37	0.98	0.94	1.21	2.25	
1986	2.38	2.57	3.32	2.58	1.42	0.56	0.4	0.37	0.58	0.76	1.18	2.42	
1987	3.3	3.09	2.89	1.52	1.06	0.46	0.39	0.36	0.52	1.08	1.25	2.6	
1988	3.9	3.71	2.33	2.21	1.2	0.6	0.39	0.39	0.57	0.83	0.95	1.42	
1989	2.37	3.8	3.95	3.07	1	0.5	0.32	0.36	0.4	0.86	1.54	0.77	
1990	1.82	1.41	1.48	1.1	0.66	0.68	0.42	0.32	0.42	1.41	1.83	1.49	
1991	1.81	2.04	3.02	1.84	1.13	0.56	0.38	0.37	0.39	1.16	1.18	1.19	
1992	1.67	1.32	1.34	1.44	1.04	0.7	0.4	0.46	0.43	0.76	0.85	1.52	
1993	2.01	3.92	4.42	3.28	1.44	0.69	0.45	0.4	0.98	1.09	3.14	4.51	
1994	4.93	7.26	4.91	3.9	0.85	0.45	0.25	0.25	0.3	0.68	1.11	1.42	
1995	2.37	1.82	5.12	2.55	0.97	0.43	0.3	0.28	0.65	0.81	1.55	1.54	
1996	3.31	4.74	4.63	3.54	1.54	0.63	0.43	0.38	0.61	1.11	0.86	1.19	

Nota. Fuente: (Alata, 2019)

Los parámetros de suelo usados, tanto en la calibración y validación, respecto al tipo de cobertura fueron los siguientes (Tabla 27):

Tabla 27*Valores de los parámetros de suelo en el proceso de calibración de Querococha.*

N°	Parámetro	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros (rocas, etc)
1	Sw (mm)	500	650	1000	800	600	300	700	400	400
2	Ks (mm/mes)	100	120	350	150	80	50	300	100	100
3	RRF	2.5	3.0	2.8	3.0	2.5	2.2	3.0	3.5	3.5
4	f	0.3	0.5	0.4	0.5	0.6	0.2	0.5	0.8	0.9
5	z1 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
6	Dw (mm)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
7	Kd (mm/mes)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
8	Z2 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
9	Kc	1	1	0.9	1.1	1	0.75	1	1	0.9

Nota: Elaboración propia. Los valores de RRF fueron considerados para terrenos con pendiente mayores a 30% en promedio.

Estos parámetros dieron como resultado la siguiente serie de caudales simulados por el modelo (Tabla 28):

Tabla 28*Caudales simulados por el modelo WEAP en Querococha en el periodo 1980-1996*Variable: Caudal (m³/s)

N°	AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1	1980	1.13	2.64	3.03	2.06	1.26	0.68	0.47	0.41	0.49	0.99	1.66	1.49
2	1981	2.17	3.27	4.22	2.8	1.66	0.85	0.58	0.49	0.55	1.39	2.05	2.72
3	1982	2.93	4.35	2.78	2.08	1.15	0.62	0.47	0.47	0.63	1.22	2.17	2.73
4	1983	3.65	2.09	3.65	3.58	1.95	1.1	0.74	0.66	0.82	1.25	1.52	2.14
5	1984	2.93	4.66	5.39	3.97	2.52	1.45	0.94	0.79	0.83	1.27	1.52	2.02
6	1985	2.92	2.87	3.67	3.07	2.05	1.06	0.77	0.71	0.87	1.04	1.23	1.69
7	1986	2.61	3.66	3.75	4.06	1.77	0.94	0.63	0.63	0.66	0.93	1.22	1.91
8	1987	3.04	3.64	2.85	2.18	1.08	0.76	0.6	0.56	2.23	1.1	1.9	2.97
9	1988	4.28	4.44	3.31	3.7	2.04	0.98	0.65	0.54	0.86	1.28	1.83	2.75
10	1989	3.49	3.43	4.96	3.65	1.66	1.03	0.68	0.68	0.85	1.64	1.42	0.94
11	1990	2.06	1.91	1.35	1.44	0.97	0.93	0.69	0.52	0.72	1.28	2.07	2.75
12	1991	2.84	2.62	3.81	2.18	1.47	0.74	0.52	0.45	0.5	0.83	1.19	1.83
13	1992	1.59	1.87	2.09	2.34	1.14	0.67	0.51	0.5	0.67	1.02	1.25	1.07
14	1993	2.26	3.47	3.67	4.5	2.27	0.99	0.73	0.57	0.76	1.45	2.11	4.76
15	1994	5.46	4.93	4.28	3.3	2.2	1.06	0.81	0.64	0.68	1.07	1.64	2.08
16	1995	2.68	3.8	5.1	3.65	1.66	1	0.73	0.6	0.73	0.96	1.21	2.23
17	1996	2.89	2.9	3.58	2.86	1.75	1	0.67	0.61	0.7	1.26	1.34	1.73

Nota: Elaboración propia

Calibración:

Se comparó los caudales simulados por el modelo en la etapa de calibración enero 81 – agosto 91. Ver **Figura 17**.

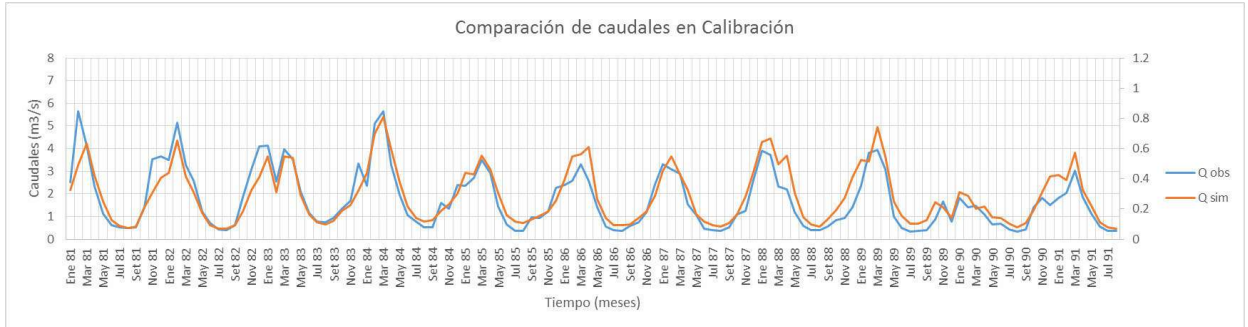


Figura 17. Calibración de caudales observados y simulados en Querococha

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo además el diagrama de dispersión en la Figura 18, donde se muestra una buena relación de $R^2=0.79$.

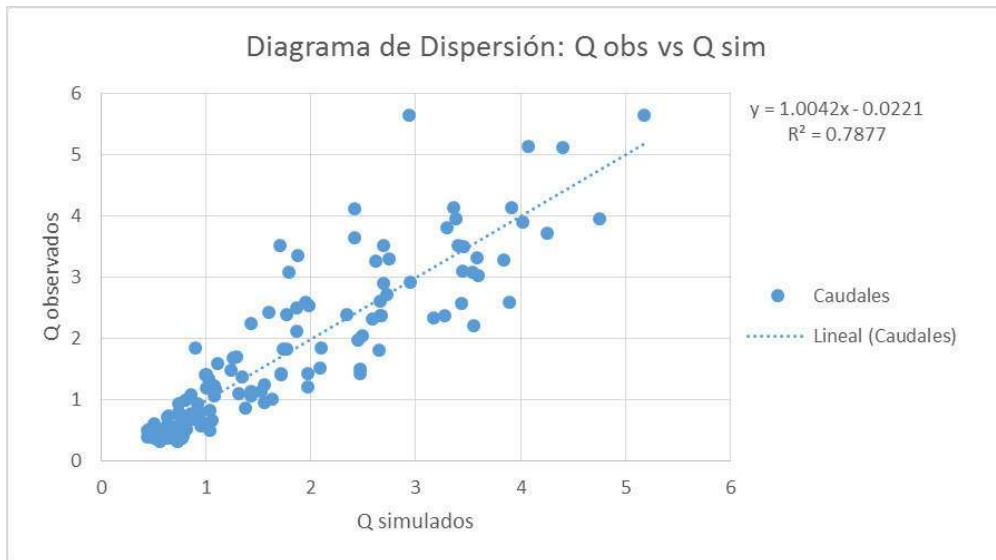


Figura 18. Diagrama de dispersión de calibración Querococha

Fuente: Elaboración propia

Los caudales medios mensuales a través del periodo de calibración fueron los siguientes (ver Figura 19 y Tabla 29):

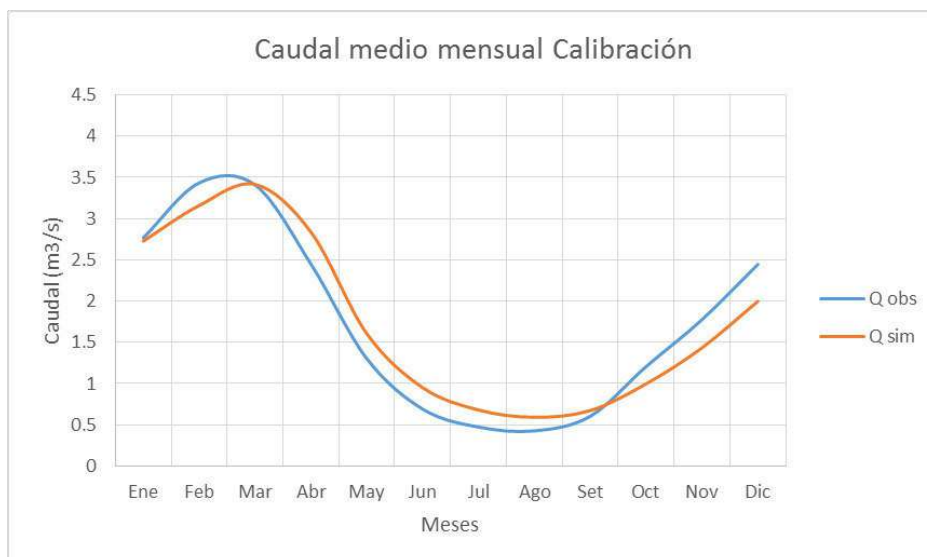


Figura 19. Caudales medios mensuales de calibración en Querococha

Fuente: Elaboración propia

Tabla 29

Caudales Medios Mensuales en la Calibración en Querococha (m³/s)

N°	Mes	Observado	Simulado
1	Ene	2.77	2.73
2	Feb	3.43	3.16
3	Mar	3.41	3.42
4	Abr	2.45	2.84
5	May	1.30	1.61
6	Jun	0.69	0.95
7	Jul	0.47	0.68
8	Ago	0.43	0.59
9	Set	0.60	0.67
10	Oct	1.21	1.00
11	Nov	1.78	1.43
12	Dic	2.45	2.00

Nota: Elaboración propia

Se evaluaron estos resultados con las medidas de bondad de ajuste y se obtuvo los siguientes resultados (Tabla 30):

Tabla 30

Valores de las medidas de ajuste de la Calibración en Querococha

Nº	Prueba	Valor
1	Nash-Sutchcliffe	0.79
2	P-BIAS	-0.84
3	RMSE	0.60
4	D	6.57
5	R ²	0.79

Nota: Elaboración propia.

Validación:

Se comparó los caudales simulados por el modelo en la etapa de validación setiembre 91 – diciembre 96. Ver Figura 20.

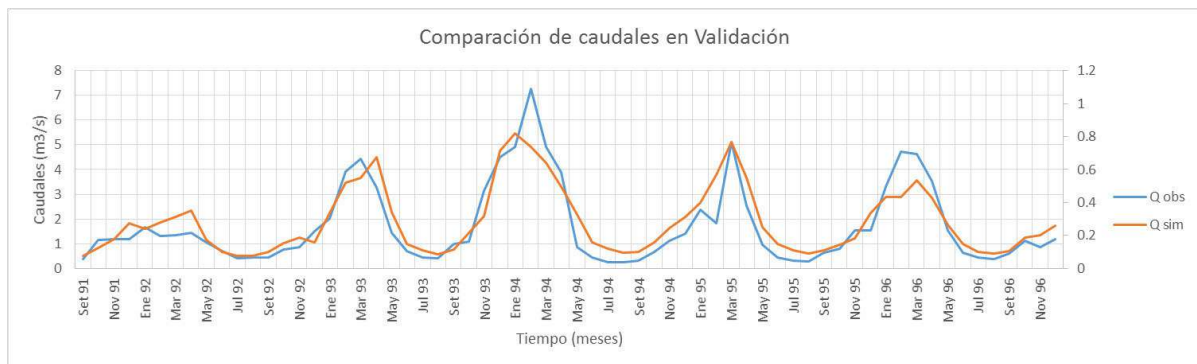


Figura 20. Validación de caudales observados y simulados en Querococha

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo además el diagrama de dispersión en la Figura 21, donde se muestra una buena relación de $R^2=0.82$.

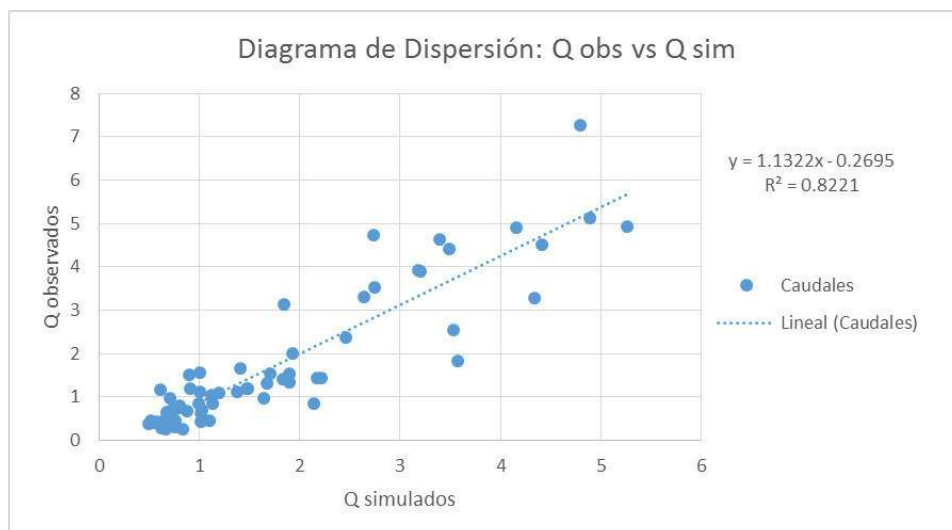


Figura 21. Diagrama de dispersión de validación en Querococha.

Fuente: Elaboración propia

Los caudales medios mensuales a través del periodo de validación fueron los siguientes (ver Figura 22 y **Tabla 31**):

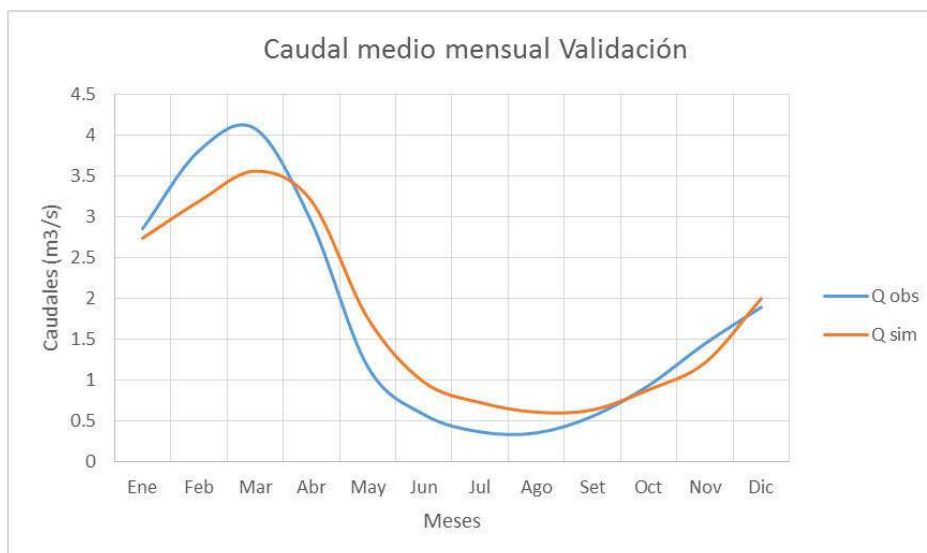


Figura 22. Caudales medios mensuales de validación en Querococha.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 31*Caudales Medios Mensuales en la Validación (m3/s)*

N°	Mes	Observado	Simulado
1	Ene	2.89	2.74
2	Feb	3.81	3.19
3	Mar	4.08	3.56
4	Abr	2.94	3.20
5	May	1.17	1.76
6	Jun	0.58	0.98
7	Jul	0.37	0.73
8	Ago	0.35	0.61
9	Set	0.56	0.64
10	Oct	0.94	0.88
11	Nov	1.45	1.21
12	Dic	1.90	2.00

Nota: Elaboración propia

Se evaluaron estos resultados con las medidas de bondad de ajuste y se obtuvo los siguientes resultados (Tabla 32):

Tabla 32*Valores de las medidas de ajuste de la Validación en Querococha*

N°	Prueba	Valor
1	Nash-Sutchcliffe	0.81
2	P-BIAS	-2.19
3	RMSE	0.69
4	D	4.90
5	R ²	0.82

Nota: Elaboración propia.

Finalmente, de acuerdo con los resultados de las Tabla 30 y Tabla 32, los datos observados y simulados en Querococha muestran una buena correlación entre ambas series.

- El segundo análisis fue en la salida de la UH Yanayacu. El periodo total de análisis fue de 1981-1996 (192 meses), donde la calibración fue de enero 1981 – agosto 1991

(128 meses) y validación de setiembre 1991 – diciembre 2018 (64 meses). Se escogió el mismo periodo de trabajo que en el análisis 1 para poder comparar estos resultados de manera más correcta, además, para este análisis se omitieron todas las demandas que hay en la cuenca con la intención de buscar el caudal natural de salida de Yanayacu.

En la Tabla 33 se presenta los valores de la estación Olleros que se usaron para hallar los valores de salida de Yanayacu a través de la metodología de trasposición de caudales de una cuenca similar, estos valores se compararán con los valores que simuló el modelo a la salida de la UH Yanayacu.

Tabla 33

Caudales históricos de la Estación Olleros en el periodo 1980-1996

Variable: Caudal (m³/s)

Propietario: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1980	3.99	8.21	10.74	7.01	4.46	2.7	1.94	1.72	1.94	3.4	5.46	4.84
1981	7.7	12.39	15.98	10.48	6.45	3.53	2.58	2.13	2.23	4.53	6.99	9.22
1982	10.7	16.06	10.84	8.51	4.7	3.01	2.22	2.12	2.5	4.09	7.4	9.12
1983	12.06	8.38	12.85	13.19	8.17	4.74	3.35	2.91	3.28	4.58	5.97	8.17
1984	10.48	18.58	22.23	14.98	10.03	5.93	3.91	3.41	3.55	4.7	5.76	6.92
1985	10.12	11.53	14.45	12.52	7.98	4.32	3.34	3.16	3.71	3.91	4.28	5.65
1986	8.96	13.49	14.33	14.97	6.61	4.03	2.9	2.82	2.87	3.52	4.47	6.84
1987	10.48	13.22	11.38	9.25	4.94	3.52	2.9	2.6	7.9	3.89	6.38	10.4
1988	15.53	15.65	13.09	14.83	7.98	4.34	3.12	2.73	3.46	4.74	6.61	10.19
1989	14.21	13.73	19.06	14.06	6.11	4.42	3.13	3.03	3.43	5.88	5.1	3.87
1990	6.87	7.09	5.51	5.59	4.18	3.67	2.86	2.42	2.88	4.49	7.2	8.85
1991	9.98	9.28	14.05	8.91	5.71	3.44	2.56	2.25	2.23	3.27	4.47	6.31
1992	6.03	6.8	8.45	9.58	4.93	3.15	2.41	2.31	2.85	3.94	4.75	4.53
1993	7.6	12.2	13.61	17.37	8.68	4.24	3.29	2.69	3.14	5.23	7.86	16.34
1994	19.87	18.94	17.55	13.95	9.33	4.67	3.6	3.03	3.09	4.09	5.91	7.44
1995	9.99	15.24	19.87	14.25	6.63	4.28	3.34	2.83	3.12	3.9	4.7	7.9
1996	11.17	10.65	13.54	10.88	7.2	4.47	3.17	2.92	3.21	4.42	4.75	5.87

Nota. Fuente: (Alata, 2019)

“Dos sistemas hidrológicos son similares si cumplen las condiciones de similitud geométrica, cinemática y dinámica” (Alata, 2019).

Similitud Geométrica: Considera al coeficiente de Gravelius, mientras el valor de este parámetro sea similar en ambas cuencas se podrá considerar que ambas guardan similitud geométrica.

Similitud Cinemática: Considera al coeficiente de confluencia (R_c), mientras el valor de este parámetro sea similar en ambas cuencas se podrá considerar que ambas guardan similitud cinemática.

Similitud Dinámica: Considera al coeficiente de orográfico, mientras el valor de este parámetro sea similar en ambas cuencas se podrá considerar que ambas guardan similitud dinámica.

Tabla 34

Comparación de valores de Similitud entre las cuencas de los ríos Yanayacu y Negro

N°	Cuenca	S. Geométrica	S. Cinemática	S. Dinámica
		Coef. Gravelius (k_c)	Coef. Confluencia (R_c)	Coef. Orográfico (Co)
1	Yanayacu	1.36	2.55	7.12
2	Negro	1.46	1.69	10.69

Nota.

En función a los resultados de la Tabla 34 se consideró que la cuenca de Yanayacu es similar a la cuenca del río Negro.

Una vez definida a las cuencas similares entonces se calculó los caudales “históricos” de la estación ficticia que se ubicaría en Yanayacu. En la Tabla 35 se muestra los resultados luego del cálculo.

Tabla 35*Caudales históricos de la Estación ficticia Yanayacu (por trasposición de caudales)*Variable: Caudal (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1980	11.31	11.07	11.04	5.36	3.00	2.45	2.13	3.29	5.76	7.91	10.41	12.23
1981	11.91	7.21	9.31	5.19	2.13	2.88	2.66	2.60	4.49	6.03	11.68	9.23
1982	10.62	16.26	5.53	4.88	2.69	2.74	3.05	3.43	5.04	11.71	16.63	17.01
1983	20.56	14.27	18.34	12.77	5.36	3.67	2.71	2.91	4.03	5.65	7.49	10.27
1984	7.84	21.83	24.16	12.35	6.14	3.58	2.83	2.45	2.85	8.01	5.88	11.22
1985	7.39	7.64	11.45	11.16	5.76	3.02	2.13	2.28	5.69	5.82	7.20	13.81
1986	16.36	15.45	9.14	7.65	3.84	1.36	0.92	2.65	7.53	11.48	13.62	10.09
1987	13.66	11.34	12.37	7.39	3.54	1.55	1.29	1.32	5.60	9.87	15.98	11.40
1988	13.69	12.16	8.42	9.26	5.04	2.92	2.60	2.89	4.06	6.28	6.22	6.92
1989	9.92	17.12	15.54	14.56	7.06	5.16	4.26	4.59	2.82	5.53	6.00	8.02
1990	8.27	7.29	7.23	5.16	3.15	2.71	1.45	1.61	1.64	5.02	7.39	8.08
1991	6.89	6.11	13.06	6.11	5.16	2.80	2.46	3.23	4.26	5.43	5.50	8.48
1992	8.70	8.36	10.44	9.22	6.87	4.35	2.97	3.70	5.37	6.78	6.54	7.55
1993	14.73	15.61	15.32	12.98	9.54	6.00	5.16	5.43	4.41	6.49	10.47	10.09
1994	16.00	16.40	11.70	9.75	5.05	3.49	2.72	2.77	3.15	4.45	6.74	8.21
1995	9.26	9.94	13.93	15.66	5.37	4.42	3.57	4.26	4.50	5.05	8.40	9.69
1996	11.83	11.93	16.59	10.81	4.81	3.66	3.05	2.85	4.96	6.74	8.76	9.19

Nota. Elaboración propia.

Los parámetros de suelo usados, tanto en la calibración y validación, respecto al tipo de cobertura se muestran en la Tabla 36:

Tabla 36*Valores de los parámetros de suelo en el proceso de calibración de Yanayacu*

N°	Parámetro	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros (rocas, etc)
1	Sw (mm)	500	650	1000	800	600	300	700	400	400
2	Ks (mm/mes)	100	120	350	150	80	50	300	100	100
3	RRF ^(a)	2.5	3.0	2.8	3.0	2.5	2.2	3.0	3.5	3.5
4	RRF ^(b)	5.0	6.5	4.0	7.0	6.0	4.0	5.0	5.0	7.0
5	f	0.3	0.5	0.4	0.5	0.6	0.2	0.5	0.8	0.9
6	z1 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
7	Dw (mm)	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000	3000
8	Kd (mm/mes)	100	100	100	100	100	100	100	100	100
9	Z2 (%)	30	30	30	30	30	30	30	30	30
10	Kc	1	1	0.9	1.1	1	0.75	1	1	0.9

Nota: Elaboración propia. Los valores de RRF^(a) fueron considerados para terrenos con pendiente mayores a 30% en promedio.

Los valores de RRF^(b) fueron considerados para terrenos con pendiente mayores a 30% en promedio

A partir de los parámetros de la Tabla 36 dieron como resultado la siguiente serie de caudales simulados por el modelo WEAP (ver Tabla 37):

Tabla 37

Caudales simulados por el modelo WEAP para la estación ficticia Yanayacu

Variable: Caudal (m³/s)

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC
1980	3.99	8.21	10.74	7.01	4.46	2.7	1.94	1.72	1.94	3.4	5.46	4.84
1981	7.7	12.39	15.98	10.48	6.45	3.53	2.58	2.13	2.23	4.53	6.99	9.22
1982	10.7	16.06	10.84	8.51	4.7	3.01	2.22	2.12	2.5	4.09	7.4	9.12
1983	12.06	8.38	12.85	13.19	8.17	4.74	3.35	2.91	3.28	4.58	5.97	8.17
1984	10.48	18.58	22.23	14.98	10.03	5.93	3.91	3.41	3.55	4.7	5.76	6.92
1985	10.12	11.53	14.45	12.52	7.98	4.32	3.34	3.16	3.71	3.91	4.28	5.65
1986	8.96	13.49	14.33	14.97	6.61	4.03	2.9	2.82	2.87	3.52	4.47	6.84
1987	10.48	13.22	11.38	9.25	4.94	3.52	2.9	2.6	7.9	3.89	6.38	10.4
1988	15.53	15.65	13.09	14.83	7.98	4.34	3.12	2.73	3.46	4.74	6.61	10.19
1989	14.21	13.73	19.06	14.06	6.11	4.42	3.13	3.03	3.43	5.88	5.1	3.87
1990	6.87	7.09	5.51	5.59	4.18	3.67	2.86	2.42	2.88	4.49	7.2	8.85
1991	9.98	9.28	14.05	8.91	5.71	3.44	2.56	2.25	2.23	3.27	4.47	6.31
1992	6.03	6.8	8.45	9.58	4.93	3.15	2.41	2.31	2.85	3.94	4.75	4.53
1993	7.6	12.2	13.61	17.37	8.68	4.24	3.29	2.69	3.14	5.23	7.86	16.34
1994	19.87	18.94	17.55	13.95	9.33	4.67	3.6	3.03	3.09	4.09	5.91	7.44
1995	9.99	15.24	19.87	14.25	6.63	4.28	3.34	2.83	3.12	3.9	4.7	7.9
1996	11.17	10.65	13.54	10.88	7.2	4.47	3.17	2.92	3.21	4.42	4.75	5.87

Nota. Elaboración propia.

Calibración:

Se comparó los caudales simulados por el modelo en la etapa de calibración enero 81 – agosto 91. Se llamó Q_{obs} al caudal que fue transportado de la cuenca vecina. Ver Figura 23.



Figura 23. Calibración de caudales ficticios y simulados en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo además el diagrama de dispersión en la Figura 24, donde se muestra una relación de $R^2=0.54$.

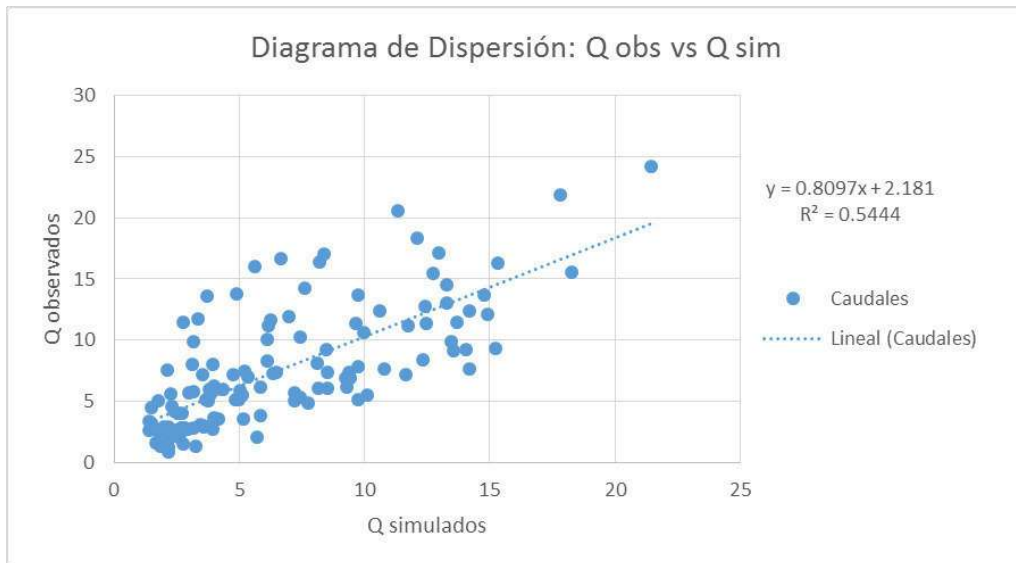


Figura 24. Diagrama de dispersión de calibración en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Los caudales medios mensuales a través del periodo de calibración fueron los siguientes (ver Figura 25 y Tabla 38):

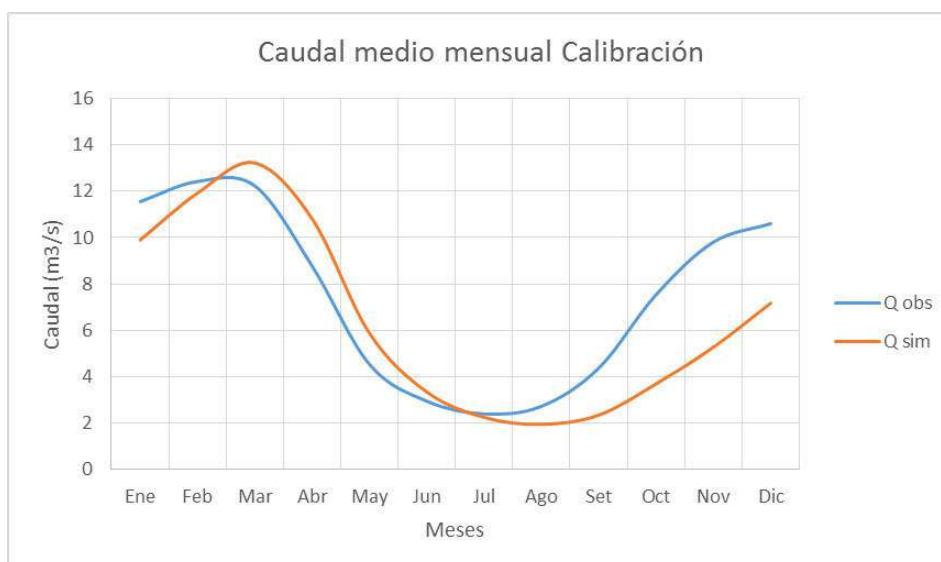


Figura 25. Caudales medios mensuales de calibración en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Tabla 38

Caudales Medios Mensuales en la Calibración en Yanayacu (m3/s)

N°	Mes	Observado	Simulado
1	Ene	11.56	9.90
2	Feb	12.42	11.92
3	Mar	12.23	13.22
4	Abr	8.77	10.81
5	May	4.53	5.87
6	Jun	2.94	3.34
7	Jul	2.40	2.25
8	Ago	2.72	1.95
9	Set	4.37	2.34
10	Oct	7.54	3.69
11	Nov	9.81	5.27
12	Dic	10.61	7.18

Nota: Elaboración propia

Se evaluaron estos resultados con las medidas de bondad de ajuste y se obtuvo los siguientes resultados (ver Tabla 39):

Tabla 39

Valores de las medidas de ajuste de la Calibración en Yanayacu

N°	Prueba	Valor
1	Nash-Sutchcliffe	0.48
2	P-BIAS	-12.54
3	RMSE	3.53
4	D	9.00
5	R ²	0.54

Nota: Elaboración propia.

Validación:

Se comparó los caudales simulados por el modelo en la etapa de validación setiembre 91 – diciembre 96. Se llamó Q_{obs} al caudal que fue transportado de una cuenca vecina. Ver Figura 26.

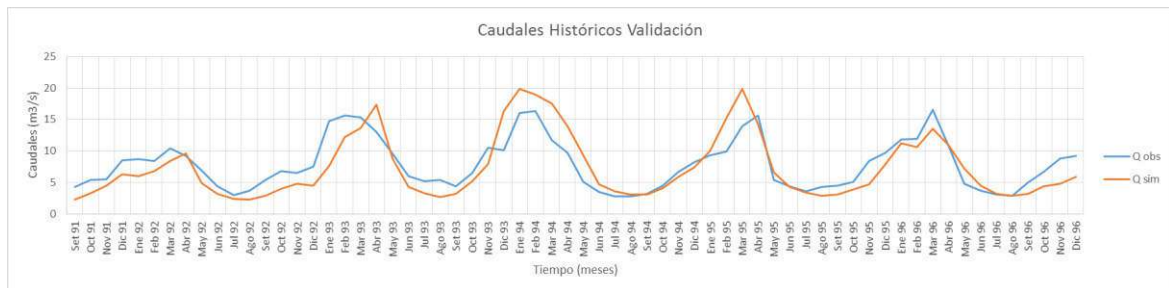


Figura 26. Validación de caudales ficticios y simulados en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Se obtuvo además el diagrama de dispersión en la Figura 27, donde se muestra una buena relación de R²=0.72.

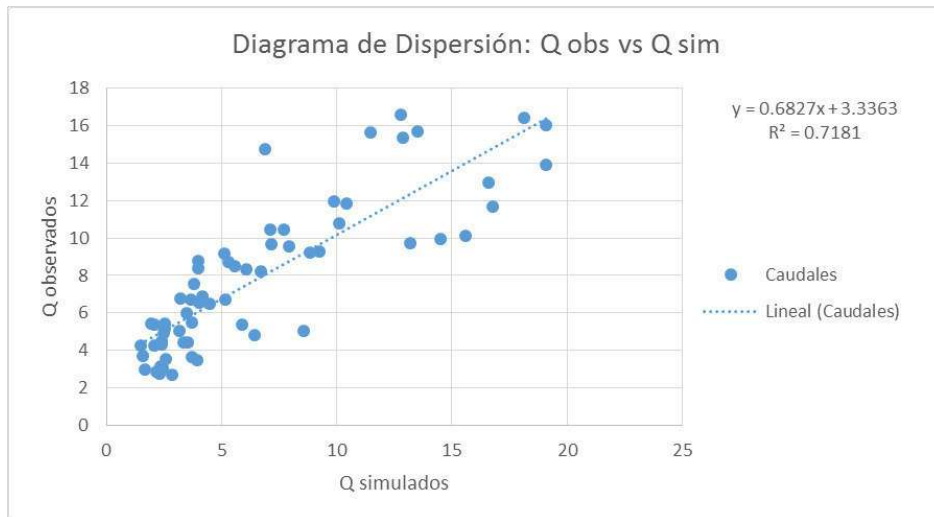


Figura 27. Diagrama de dispersión de validación en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Los caudales medios mensuales a través del periodo de validación fueron los siguientes (ver Figura 28 y Tabla 40):

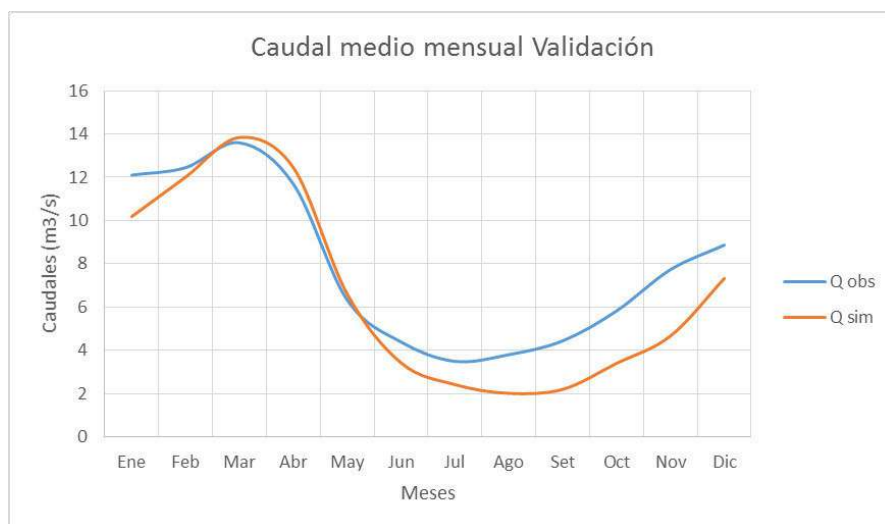


Figura 28. Caudales medios mensuales de validación en Yanayacu

Fuente: Elaboración propia

Tabla 40*Caudales Medios Mensuales en la Validación en Yanayacu (m³/s)*

N°	Mes	Observado	Simulado
1	Ene	12.10	10.18
2	Feb	12.45	12.01
3	Mar	13.60	13.84
4	Abr	11.68	12.44
5	May	6.33	6.60
6	Jun	4.38	3.42
7	Jul	3.49	2.42
8	Ago	3.80	2.02
9	Set	4.44	2.20
10	Oct	5.82	3.40
11	Nov	7.73	4.67
12	Dic	8.87	7.32

Nota: Elaboración propia

Se evaluaron estos resultados con las medidas de bondad de ajuste y se obtuvo los siguientes resultados (Tabla 41):

Tabla 41*Valores de las medidas de ajuste de la Validación en Yanayacu*

N°	Prueba	Valor
1	Nash-Sutchcliffe	0.51
2	P-BIAS	-16.02
3	RMSE	2.88
4	D	16.10
5	R ²	0.72

Nota: Elaboración propia.

Finalmente, de acuerdo con los resultados de las Tabla 41 y Tabla 42, los datos ficticios y simulados en la estación ficticia ubicada en la salida de Yanayacu muestran una aceptable correlación entre ambas series. Los resultados de RMSE y D son poco alentadores. Sin embargo, el general todos estos valores se tomaron solo como referencia, ya que no existe

una estación real en la salida de la UH Yanayacu, a pesar de ello los valores de R^2 , PBIAS y NS confirman que llevan relación.

4.4 Simulación de los efectos del Cambio Climático en la oferta de agua futura

La simulación de la oferta de agua se realizó a través de tres escenarios: Referencia, RCP 4.5 y RCP 8.5 cuyos intervalos son 2019-2050. En este periodo de análisis se consideró como más importantes las variables de temperatura y precipitación. Como se comentó la generación de los valores de las variables fue realizado por la especialista Ph.D Emily Potter. En el Anexo 12 se puede ver los datos brindados.

Las comparaciones y los valores del caudal futuro serán analizados en 2 zonas distintas, las mismas que fueron analizadas previamente en la etapa de calibración y validación, es decir, a la salida de la Laguna Querococha (este punto de evaluación es importante debido a que a la altura de este punto aún no hay ninguna intervención de demandas externas, el caudal que sale de la laguna es de un proceso natural.) y Yanayacu (hace referencia al punto de cierre de la UH y nos permitirá conocer el caudal de salida de la cuenca). En el Anexo 13 se mostrará el resultado de los caudales, precipitación y temperatura futura media de ambas zonas de estudio.

4.4.1 Escenario de Referencia:

En este escenario se presentan los posibles valores de la oferta de agua bajo la premisa que las variables de meteorológicas sobre el periodo 2019-2050 sean cíclicas con respecto al periodo 1981-2011.

Considerando la salida de la Laguna Querococha: Se tiene en la Tabla 42 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 43 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 44 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 42*Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y Referencia*

N°	Promedio	Escenario Base (m ³ /s) (1981-1996)	Escenario de Referencia (m ³ /s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	2.74	2.79	1.93	Aumenta
2	Feb	3.17	3.19	0.45	Aumenta
3	Mar	3.47	3.49	0.59	Aumenta
4	Abr	2.95	2.76	-6.71	Disminuye
5	May	1.66	1.55	-6.83	Disminuye
6	Jun	0.96	0.94	-2.06	Disminuye
7	Jul	0.70	0.70	0.10	Aumenta
8	Ago	0.60	0.60	0.61	Aumenta
9	Set	0.66	0.66	-1.13	Disminuye
10	Oct	0.96	0.96	-0.05	Disminuye
11	Nov	1.35	1.39	2.90	Aumenta
12	Dic	2.00	2.13	6.30	Aumenta
13	Multianual	1.77	1.76	-0.39	Disminuye

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 42 se puede apreciar que hay una disminución del caudal promedio del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 0.39 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de enero (1.93%), febrero (0.45%), marzo (0.59%), julio (0.1%), agosto (0.61%), noviembre (2.9%) y diciembre (6.3%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de abril (6.71%), mayo (6.83%), junio (2.06%), setiembre (1.13%) y octubre (0.05%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 43*Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y Referencia*

Nº	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario de Referencia (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	198.20	192.37	-2.94	Disminuye
2	Feb	182.66	179.36	-1.80	Disminuye
3	Mar	210.66	212.20	0.73	Aumenta
4	Abr	151.11	135.13	-10.58	Disminuye
5	May	67.36	60.87	-9.64	Disminuye
6	Jun	21.04	19.33	-8.11	Disminuye
7	Jul	12.75	11.66	-8.61	Disminuye
8	Ago	15.33	12.63	-17.60	Disminuye
9	Set	58.93	54.58	-7.38	Disminuye
10	Oct	124.30	128.29	3.21	Aumenta
11	Nov	119.34	124.29	4.14	Aumenta
12	Dic	153.09	166.55	8.79	Aumenta
13	Multianual	1314.79	1297.26	-1.33	Disminuye

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 43 se puede apreciar que hay una disminución de la precipitación mensual del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 1.33 %. También se puede apreciar que en promedio hay un aumento de precipitación en los meses de marzo (0.73%), octubre (3.21%), noviembre (4.14%) y diciembre (8.79%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (2.94%), febrero (1.80%), abril (10.58%), setiembre (1.13%) y octubre (0.05%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 44*Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y Referencia*

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario de Referencia (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	3.96	4.06	2.60	Aumenta
2	Feb	3.82	3.98	4.11	Aumenta
3	Mar	4.01	4.07	1.51	Aumenta
4	Abr	3.96	4.10	3.49	Aumenta
5	May	3.83	3.91	1.95	Aumenta
6	Jun	3.12	3.17	1.53	Aumenta
7	Jul	2.47	2.58	4.26	Aumenta
8	Ago	2.86	3.02	5.49	Aumenta
9	Set	2.91	3.08	6.02	Aumenta
10	Oct	3.13	3.25	3.93	Aumenta
11	Nov	3.26	3.36	3.01	Aumenta
12	Dic	3.99	3.90	-2.26	Disminuye
13	Multianual	3.44	3.54	2.78	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 44 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 2.78 %. También se puede apreciar que en promedio hay un aumento de temperatura casi todos los meses, enero (2.6%), febrero (4.11%), marzo (1.51%), abril (3.49%), mayo (1.95%), junio (1.53%), julio (4.26%), agosto (5.49%), setiembre (6.02%), octubre (3.93%) y noviembre (3.01%); mientras que hay una disminución promedio en el mes de diciembre (2.26%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario de Referencia respecto del escenario Base es en Querococha, el caudal medio disminuye en 0.4% (de 1.77 a 1.76 m³/s), a razón que disminuye la precipitación media en 1.3% (de 1315 a 1297 mm) y la temperatura media aumenta en 2.8% (de 3.4 a 3.5 °C). No se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

Salida de la UH Yanayacu: Se tiene en la Tabla 45 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 46 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 47 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 45

Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y Referencia

Nº	Promedio	Escenario Base (m3/s) (1981-1996)	Escenario de Referencia (m3/s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	10.16	10.59	4.23	Aumenta
2	Feb	12.26	12.63	3.01	Aumenta
3	Mar	13.69	14.29	4.35	Aumenta
4	Abr	11.78	11.24	-4.57	Disminuye
5	May	6.79	6.47	-4.76	Disminuye
6	Jun	4.21	4.22	0.22	Aumenta
7	Jul	3.17	3.25	2.29	Aumenta
8	Ago	2.75	2.84	3.06	Aumenta
9	Set	2.90	2.95	1.72	Aumenta
10	Oct	3.74	3.79	1.27	Aumenta
11	Nov	5.14	5.29	2.98	Aumenta
12	Dic	7.33	7.88	7.54	Aumenta
13	Multianual	7.00	7.12	1.79	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 45 se puede apreciar que hay un aumento del caudal promedio del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 1.79 %. También se puede apreciar que en promedio hay un aumento de caudal en los meses de enero (4.23%), febrero (3.01%), marzo (4.35%), junio, (0.22%), julio (2.29%), agosto (3.06%), setiembre (1.72%) octubre (1.27%), noviembre (2.98%) y diciembre (7.54%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de abril (4.57%) y mayo (4.76%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa también un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento.

Tabla 46

Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y Referencia

Nº	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario de Referencia (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	192.56	189.87	-1.40	Disminuye
2	Feb	180.83	181.89	0.58	Aumenta
3	Mar	211.22	218.01	3.21	Aumenta
4	Abr	150.49	135.90	-9.69	Disminuye
5	May	67.46	60.27	-10.65	Disminuye
6	Jun	19.12	17.61	-7.92	Disminuye
7	Jul	13.72	11.64	-15.19	Disminuye
8	Ago	14.65	12.50	-14.69	Disminuye
9	Set	56.66	52.90	-6.62	Disminuye
10	Oct	120.47	123.56	2.56	Aumenta
11	Nov	116.80	121.86	4.33	Aumenta
12	Dic	145.51	162.79	11.88	Aumenta
13	Multianual	1289.50	1288.80	-0.05	Disminuye

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 46 se puede apreciar que hay una disminución de la precipitación promedio del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 0.05 %. También se puede apreciar que en promedio hay un aumento de precipitación en los meses de febrero (0.58%), marzo (3.21%), octubre (2.56%), noviembre (4.33%) y diciembre (11.88%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (1.40%), abril (9.69%), mayo (10.65%), junio (7.92%), julio (15.19%), agosto (14.69%) y setiembre (6.62%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 47

Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y Referencia

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario de Referencia (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	4.83	4.93	2.09	Aumenta
2	Feb	4.72	4.84	2.57	Aumenta
3	Mar	4.90	4.96	1.27	Aumenta
4	Abr	4.87	4.99	2.35	Aumenta
5	May	4.67	4.76	1.86	Aumenta
6	Jun	3.99	4.05	1.52	Aumenta
7	Jul	3.36	3.51	4.58	Aumenta
8	Ago	3.78	3.96	4.80	Aumenta
9	Set	3.85	4.02	4.30	Aumenta
10	Oct	4.10	4.23	3.01	Aumenta
11	Nov	4.16	4.27	2.60	Aumenta
12	Dic	4.87	4.79	-1.69	Disminuye
13	Multianual	4.34	4.44	2.30	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de Referencia respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 47 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario de Referencia con respecto al escenario Base de un 2.30 %. También se puede apreciar que en promedio hay un aumento de la temperatura en los meses de enero (2.09%), febrero (2.57%), marzo (1.27%), abril (2.35%), mayo (1.86%), junio (1.52%), julio (4.58%), agosto (4.8%), setiembre (4.3%), octubre (3.01%) y noviembre (2.6%); mientras que hay una disminución promedio en el mes de diciembre (1.69%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario de Referencia respecto del escenario Base es en Yanayacu el caudal medio aumenta en 1.8% (de 7 a 7.1 m³/s) a razón que disminuye la precipitación media en 0.05% (de 1290 a 1289 mm) y la temperatura media aumenta en 2.3% (de 4.3 a 4.4 °C). No se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

4.4.2 Escenario de RCP 4.5:

En este escenario se presentan los posibles valores de la oferta de agua bajo la premisa que las variables de meteorológicas sobre el periodo 2019-2050 han sido generadas para un escenario bajo los efectos del RCP 4.5.

Considerando la salida de la Laguna Querococha: Se tiene en la Tabla 48 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 49 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 50 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 48*Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y RCP 4.5*

Nº	Promedio	Escenario Base (m ³ /s) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (m ³ /s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	2.74	2.81	2.75	Aumenta
2	Feb	3.17	3.43	8.14	Aumenta
3	Mar	3.47	3.62	4.57	Aumenta
4	Abr	2.95	2.74	-7.08	Disminuye
5	May	1.66	1.75	5.67	Aumenta
6	Jun	0.96	0.93	-3.28	Disminuye
7	Jul	0.70	0.68	-2.86	Disminuye
8	Ago	0.60	0.60	-0.49	Disminuye
9	Set	0.66	0.64	-2.99	Disminuye
10	Oct	0.96	1.03	7.93	Aumenta
11	Nov	1.35	1.63	20.12	Aumenta
12	Dic	2.00	2.39	19.17	Aumenta
13	Multianual	1.77	1.86	4.88	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario de RCP 4.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 48 se puede apreciar que hay un aumento del caudal promedio del escenario de RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 4.88 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de enero (2.75%), febrero (8.14%), marzo (4.57%), mayo (5.67%), octubre (7.93%), noviembre (20.12%) y diciembre (19.17%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de abril (7.08%), junio (3.28%), julio (2.86%), agosto (0.49%) y setiembre (2.99%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento y disminución de los promedios dependiendo del mes; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 49*Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 4.5*

Nº	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	198.20	183.95	-7.19	Disminuye
2	Feb	182.66	193.17	5.76	Aumenta
3	Mar	210.66	219.93	4.40	Aumenta
4	Abr	151.11	139.25	-7.85	Disminuye
5	May	67.36	86.26	28.06	Aumenta
6	Jun	21.04	14.45	-31.32	Disminuye
7	Jul	12.75	7.65	-40.02	Disminuye
8	Ago	15.33	14.75	-3.76	Disminuye
9	Set	58.93	47.67	-19.10	Disminuye
10	Oct	124.30	137.86	10.90	Aumenta
11	Nov	119.34	144.03	20.69	Aumenta
12	Dic	153.09	181.27	18.41	Aumenta
13	Multianual	1314.79	1370.26	4.22	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario del RCP 4.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 49 se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio del escenario RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 4.22%. También se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio en los meses de febrero (5.76%), marzo (4.40%), mayo (28.06%), octubre (10.90%), noviembre (20.69%) y diciembre (18.41%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (7.19%), abril (7.85%), junio (31.32%), julio (40.02%), agosto (3.76%) y setiembre (19.10%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 50*Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 4.5*

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	3.96	4.99	26.12	Aumenta
2	Feb	3.82	5.08	33.05	Aumenta
3	Mar	4.01	5.02	25.25	Aumenta
4	Abr	3.96	5.14	29.75	Aumenta
5	May	3.83	4.76	24.26	Aumenta
6	Jun	3.12	4.25	36.02	Aumenta
7	Jul	2.47	3.76	52.08	Aumenta
8	Ago	2.86	4.10	43.60	Aumenta
9	Set	2.91	4.42	52.06	Aumenta
10	Oct	3.13	4.54	45.06	Aumenta
11	Nov	3.26	4.43	35.84	Aumenta
12	Dic	3.99	4.83	21.12	Aumenta
13	Multianual	3.44	4.61	33.91	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 4.5 con respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 50 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 33.91%. También se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio en todos los meses, en enero (26.12%), febrero (33.05%), marzo (25.25%), abril (29.75%), mayo (24.26%), junio (36.02%), julio (52.08%), agosto (43.60%), setiembre (52.06%), octubre (45.06%), noviembre (35.84%) y diciembre (21.12%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa también un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento de los promedios; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa también un aumento.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario RCP 4.5 respecto del escenario Base es en Querococha, el caudal medio aumenta en 4.9% (de 1.8 a 1.9 m³/s), a razón que aumenta la precipitación media en un 4.2% (de 1315 a 1370 mm) y la temperatura media aumenta en 33.9% (de 3.4 a 4.6 °C). Se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

Salida de la UH Yanayacu: Se tiene en la Tabla 51 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 52 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 53 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 51

Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y RCP 4.5

Nº	Promedio	Escenario Base (m ³ /s) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (m ³ /s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	10.16	10.64	4.70	Aumenta
2	Feb	12.26	13.60	10.89	Aumenta
3	Mar	13.69	14.82	8.24	Aumenta
4	Abr	11.78	11.38	-3.45	Disminuye
5	May	6.79	7.38	8.64	Aumenta
6	Jun	4.21	4.29	1.88	Aumenta
7	Jul	3.17	3.25	2.29	Aumenta
8	Ago	2.75	2.86	3.82	Aumenta
9	Set	2.90	2.95	1.53	Aumenta
10	Oct	3.74	4.02	7.49	Aumenta
11	Nov	5.14	6.07	18.04	Aumenta
12	Dic	7.33	8.78	19.81	Aumenta
13	Multianual	7.00	7.50	7.24	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 4.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 51 se puede apreciar que hay un aumento del caudal promedio del escenario RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 7.24 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de enero (4.70%), febrero (10.89%), marzo (8.24%), mayo (8.64%), junio (1.88%), julio (2.29%), agosto (3.82%), setiembre (1.53%), octubre (7.49%), noviembre (18.04%) y diciembre (19.813%); mientras que hay una disminución promedio en el mes de abril (3.45%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento.

Tabla 52

Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 4.5

N°	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	192.56	179.91	-6.57	Disminuye
2	Feb	180.83	196.56	8.69	Aumenta
3	Mar	211.22	226.00	7.00	Aumenta
4	Abr	150.49	140.95	-6.34	Disminuye
5	May	67.46	86.78	28.63	Aumenta
6	Jun	19.12	13.37	-30.06	Disminuye
7	Jul	13.72	7.44	-45.82	Disminuye
8	Ago	14.65	14.55	-0.71	Disminuye
9	Set	56.66	46.22	-18.42	Disminuye
10	Oct	120.47	132.34	9.85	Aumenta
11	Nov	116.80	140.76	20.51	Aumenta
12	Dic	145.51	176.51	21.30	Aumenta
13	Multianual	1289.50	1361.38	5.57	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 4.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 52 se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio del escenario RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 5.57 %. También se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio en los meses de febrero (8.69%), marzo (7.0%), mayo (28.63%), octubre (9.85%), noviembre (20.51%) y diciembre (21.30%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (6.57%), abril (6.34%), junio (30.06%), julio (45.82%), agosto (0.71%) y setiembre (18.42%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 53

Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 4.5

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario RCP 4.5 (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	4.83	5.87	21.44	Aumenta
2	Feb	4.72	5.91	25.25	Aumenta
3	Mar	4.90	5.88	20.20	Aumenta
4	Abr	4.87	6.01	23.39	Aumenta
5	May	4.67	5.59	19.69	Aumenta
6	Jun	3.99	5.05	26.54	Aumenta
7	Jul	3.36	4.58	36.43	Aumenta
8	Ago	3.78	4.95	30.91	Aumenta
9	Set	3.85	5.29	37.36	Aumenta
10	Oct	4.10	5.48	33.68	Aumenta
11	Nov	4.16	5.32	27.90	Aumenta
12	Dic	4.87	5.70	17.12	Aumenta
13	Multianual	4.34	5.47	25.99	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 4.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 53 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario RCP 4.5 con respecto al escenario Base de un 25.99 %. También se puede apreciar que hay un aumento promedio de la temperatura en los meses de enero (21.44%), febrero (25.25%), marzo (20.20%), abril (23.39%), mayo (19.69%), junio (26.54%), julio (36.43%), agosto (30.91%), setiembre (37.36%), octubre (33.68%), noviembre (27.90%) y diciembre (17.12%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario RCP 4.5 respecto del escenario Base es en Yanayacu el caudal medio aumenta en 7.2% (de 7 a 7.5 m³/s) a razón que aumenta la precipitación media en 5.6% (de 1290 a 1361 mm) y la temperatura media aumenta en 26% (de 4.3 a 5.5 °C). Se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

4.4.3 Escenario RCP 8.5:

En este escenario se presentan los posibles valores de la oferta de agua bajo la premisa que las variables de meteorológicas sobre el periodo 2019-2050 han sido generadas para un escenario bajo los efectos del RCP 8.5

Considerando la salida de la Laguna Querococha: Se tiene en la Tabla 54 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 55 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 56 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 54*Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y RCP 8.5*

Nº	Promedio	Escenario Base (m3/s) (1981-1996)	Escenario RCP 8.5 (m3/s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	2.74	2.73	-0.25	Disminuye
2	Feb	3.17	3.46	8.92	Aumenta
3	Mar	3.47	3.38	-2.41	Disminuye
4	Abr	2.95	2.59	-12.25	Disminuye
5	May	1.66	1.57	-5.07	Disminuye
6	Jun	0.96	0.91	-5.55	Disminuye
7	Jul	0.70	0.65	-6.55	Disminuye
8	Ago	0.60	0.57	-5.16	Disminuye
9	Set	0.66	0.62	-6.12	Disminuye
10	Oct	0.96	1.01	5.61	Aumenta
11	Nov	1.35	1.51	11.74	Aumenta
12	Dic	2.00	2.12	6.15	Aumenta
13	Multianual	1.77	1.76	-0.41	Disminuye

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 54 se puede apreciar que hay una disminución del caudal promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 0.41 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de febrero (8.92%), octubre (5.61%), noviembre (11.74%) y diciembre (6.15%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (0.25%), marzo (2.41%), abril (12.25%), mayo (5.07%), junio (5.55%), julio (6.55%), agosto (5.16%) y setiembre (6.12%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución dependiendo del mes. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 55*Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 8.5*

Nº	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario RCP 8.5 (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	198.20	187.83	-5.23	Disminuye
2	Feb	182.66	200.40	9.71	Aumenta
3	Mar	210.66	198.68	-5.69	Disminuye
4	Abr	151.11	136.78	-9.48	Disminuye
5	May	67.36	74.74	10.95	Aumenta
6	Jun	21.04	21.82	3.73	Aumenta
7	Jul	12.75	7.34	-42.43	Disminuye
8	Ago	15.33	11.68	-23.78	Disminuye
9	Set	58.93	50.10	-14.98	Disminuye
10	Oct	124.30	136.19	9.56	Aumenta
11	Nov	119.34	134.80	12.95	Aumenta
12	Dic	153.09	163.16	6.58	Aumenta
13	Multianual	1314.79	1323.53	0.66	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 55 se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 0.66 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de febrero (9.71%), mayo (10.95%), junio (3.73%), octubre (9.56%), noviembre (12.95%) y diciembre (6.58%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (5.23%), marzo (5.69%), abril (9.48%), julio (42.43%), agosto (23.78%) y setiembre (14.98%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 56*Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 8.5*

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario de Referencia (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	3.96	5.30	33.72	Aumenta
2	Feb	3.82	5.29	38.51	Aumenta
3	Mar	4.01	5.39	34.38	Aumenta
4	Abr	3.96	5.61	41.46	Aumenta
5	May	3.83	5.38	40.34	Aumenta
6	Jun	3.12	4.57	46.41	Aumenta
7	Jul	2.47	4.09	65.74	Aumenta
8	Ago	2.86	4.64	62.24	Aumenta
9	Set	2.91	4.89	68.44	Aumenta
10	Oct	3.13	4.84	54.62	Aumenta
11	Nov	3.26	4.76	46.07	Aumenta
12	Dic	3.99	5.21	30.76	Aumenta
13	Multianual	3.44	5.00	45.14	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 56 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 45.14 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de enero (33.72%), febrero (38.51%), marzo (34.38%), abril (41.46%), mayo (40.34%), junio (46.41%), julio (65.74%), agosto (62.24%), setiembre (68.44%), octubre (54.62%), noviembre (46.07%) y diciembre (30.76%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario RCP 8.5 respecto del escenario Base es en Querococha, el caudal medio disminuye en 0.4% (de 1.77 a 1.76 m³/s), a razón que aumenta la precipitación media en un 0.7% (de 1315 a 1323 mm) y la temperatura media aumenta en 45.1% (de 3.4 a 5.0 °C). No se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

Salida de la UH Yanayacu: Se tiene en la Tabla 57 la comparación de los valores de los caudales medios anuales y caudales medio mensuales del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 58 se muestra la comparación de la precipitación total anuales y la precipitación mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base. En la Tabla 59 se muestra la comparación de la temperatura media anual y la temperatura media mensual del escenario de referencia con respecto al periodo Base.

Tabla 57

Caudales medios (m³/s) entre los escenarios Base y RCP 8.5

Nº	Promedio	Escenario Base (m ³ /s) (1981-1996)	Escenario RCP 8.5 (m ³ /s) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	10.16	10.21	0.46	Aumenta
2	Feb	12.26	13.69	11.62	Aumenta
3	Mar	13.69	13.85	1.16	Aumenta
4	Abr	11.78	10.70	-9.23	Disminuye
5	May	6.79	6.65	-2.13	Disminuye
6	Jun	4.21	4.15	-1.50	Disminuye
7	Jul	3.17	3.11	-2.02	Disminuye
8	Ago	2.75	2.72	-1.06	Disminuye
9	Set	2.90	2.83	-2.40	Disminuye
10	Oct	3.74	3.91	4.43	Aumenta
11	Nov	5.14	5.65	9.86	Aumenta
12	Dic	7.33	7.82	6.81	Aumenta
13	Multianual	7.00	7.11	1.60	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 57 se puede apreciar que hay un aumento del caudal promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 1.6 %. También se puede apreciar que hay un aumento de caudal promedio en los meses de enero (0.46%), febrero (11.62%), marzo (1.16%), octubre (4.43%), noviembre (9.86%) y diciembre (6.81%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de abril (9.23%), mayo (2.13%), junio (1.5%), julio (2.02%), agosto (1.06%) y setiembre (2.40%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa una disminución. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa una disminución de los promedios; mientras que para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 58

Precipitación media (mm) entre los escenarios Base y RCP 8.5

Nº	Promedio	Escenario Base (mm) (1981-1996)	Escenario RCP 8.5 (mm) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	192.56	183.67	-4.62	Disminuye
2	Feb	180.83	204.25	12.95	Aumenta
3	Mar	211.22	204.24	-3.30	Disminuye
4	Abr	150.49	138.30	-8.10	Disminuye
5	May	67.46	74.89	11.02	Aumenta
6	Jun	19.12	20.30	6.18	Aumenta
7	Jul	13.72	7.11	-48.18	Disminuye
8	Ago	14.65	11.45	-21.85	Disminuye
9	Set	56.66	48.67	-14.10	Disminuye
10	Oct	120.47	130.78	8.56	Aumenta
11	Nov	116.80	131.54	12.62	Aumenta
12	Dic	145.51	158.69	9.06	Aumenta
13	Multianual	1289.50	1313.91	1.89	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 58 se puede apreciar que hay un aumento de la precipitación promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 1.89 %. También se puede apreciar que hay un aumento de precipitación promedio en los meses de febrero (12.95%), mayo (11.02%), junio (6.18%), octubre (8.56%), noviembre (12.62%) y diciembre (9.06%); mientras que hay una disminución promedio en los meses de enero (4.62%), marzo (3.30%), abril (8.10%), julio (48.18%), agosto (21.85%) y setiembre (14.10%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un aumento y disminución dependiendo del mes, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento y disminución dependiendo del mes; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento y disminución dependiendo del mes.

Tabla 59

Temperatura media (°C) entre los escenarios Base y RCP 8.5

N°	Promedio	Escenario Base (°C) (1981-1996)	Escenario RCP 8.5 (°C) (2019-2050)	Variación porcentual (%)	Observación
1	Ene	4.83	6.16	27.61	Aumenta
2	Feb	4.72	6.12	29.69	Aumenta
3	Mar	4.90	6.25	27.65	Aumenta
4	Abr	4.87	6.47	32.82	Aumenta
5	May	4.67	6.19	32.55	Aumenta
6	Jun	3.99	5.37	34.46	Aumenta
7	Jul	3.36	4.91	46.25	Aumenta
8	Ago	3.78	5.48	44.79	Aumenta
9	Set	3.85	5.76	49.68	Aumenta
10	Oct	4.10	5.79	41.04	Aumenta
11	Nov	4.16	5.65	35.86	Aumenta
12	Dic	4.87	6.08	24.84	Aumenta
13	Multianual	4.34	5.85	34.79	Aumenta

Nota: Elaboración propia.

Los valores en la columna de Variación porcentual se obtienen al comparar los valores promedio del escenario RCP 8.5 respecto a los valores del escenario Base.

En la Tabla 59 se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio del escenario RCP 8.5 con respecto al escenario Base de un 34.79 %. También se puede apreciar que hay un aumento de la temperatura promedio en los meses de enero (27.61%), febrero (29.69%), marzo (27.65%), abril (32.82%), mayo (32.55%), junio (34.46%), julio (46.25%), agosto (44.79%), setiembre (49.68%), octubre (41.04%), noviembre (35.86%) y diciembre (24.84%).

En general, tomando en cuenta los meses de época húmeda (enero, febrero y marzo) se observa que hay un incremento porcentual, si tomamos en cuenta los meses de época seca (junio, julio y agosto) se observa un aumento. Para los meses de transición de época húmeda a seca (abril y mayo) se observa un aumento de los promedios; para los meses de transición de época seca a húmeda (setiembre, octubre, noviembre y diciembre), se observa un aumento.

En la simulación de la oferta de agua futura de todo el periodo 2019-2050 del escenario RCP 8.5 respecto del escenario Base es en Yanayacu el caudal medio aumenta en 1.6% (de 7 a 7.1 m³/s) a razón que aumenta la precipitación media en 1.9% (de 1290 a 1313 mm) y la temperatura media aumenta en 34.8% (de 4.3 a 5.9 °C). Se concluye la relación directa entre el caudal y la precipitación.

5 CONCLUSIONES

1. La generación de información consistió en recopilar, procesar y generar información base para el ingreso al modelo. Esta información se generó por intermedio de bandas altitudinales cada 100, 200 y 300 metros (según sea el caso) que junto a la delimitación de las cuencas conformaron 71 unidades hidrológicas, luego de trabajar con imágenes satelitales en Google Earth Engine y ArcGis se identificaron 9 tipos de cobertura; y se definieron 5 variables meteorológicas: precipitación, temperatura, humedad relativa, velocidad del viento y fracción de nubosidad.
2. En la construcción del modelo se incorporaron 9 cursos de agua, 3 derivaciones, 5 embalses (lagunas), 19 demandas de agua, 71 unidades hidrológicas, 71 enlaces de escorrentía/infiltración, 19 conducciones, 6 flujos de retorno y 1 medidor de caudal, se definió los parámetros de suelo del modelo para cada unidad hidrológica, además la metodología usada fue el Método de Humedad de Suelo y no se usó el modelo de glaciares, pero a cobertura glaciar sí fue incluida.
3. Los parámetros de bondad de ajuste, tanto en la calibración y validación, sobre la zona de Querococha y Yanayacu mostraron una buena relación entre los valores observados y simulados. Los valores de Nash de 0.79 y 0.48, y un R^2 de 0.79 y 0.54 en la calibración y con valores de Nash de 0.81 y 0.51, y un R^2 de 0.82 y 0.72 en la validación.
4. En la simulación del periodo 2019-2050 del escenario de Referencia respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 0.4% (de 1.77 a 1.76 m^3/s), a razón que disminuye la precipitación media en 1.3% (de 1315 a 1297 mm) y la temperatura media aumenta en 2.8% (de 3.4 a 3.5 °C); en Yanayacu el caudal medio aumenta en 1.8% (de 7 a 7.1 m^3/s) a razón que disminuye la precipitación media en 0.05% (de 1290 a 1289 mm) y la temperatura media aumenta en 2.3% (de 4.3 a 4.4 °C).
5. En la simulación del periodo 2019-2050 del escenario RCP 4.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio aumenta en 4.9% (de 1.8 a 1.9 m^3/s), a razón que aumenta la precipitación media en un 4.2% (de 1315 a 1370 mm) y la temperatura media aumenta en 33.9% (de 3.4 a 4.6 °C); en Yanayacu el caudal medio aumenta en 7.2% (de 7 a 7.5 m^3/s) a razón que aumenta la precipitación media en 5.6% (de 1290 a 1361 mm) y la temperatura media aumenta en 26% (de 4.3 a 5.5 °C).
6. En la simulación del periodo 2019-2050 del escenario RCP 8.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 0.4% (de 1.77 a 1.76 m^3/s), a razón que aumenta la precipitación media en un 0.7% (de 1315 a 1324 mm) y la temperatura media aumenta en 45.1% (de 3.4 a 5.0 °C); en Yanayacu el caudal medio aumenta en 1.6% (de 7 a 7.1 m^3/s) a razón que aumenta

la precipitación media en 1.9% (de 1290 a 1313 mm) y la temperatura media aumenta en 34.8% (de 4.3 a 5.9 °C).

7. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época húmeda (enero, febrero y marzo) del escenario de Referencia respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio aumenta en 1.93%, 0.45% y 0.59% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 2.94% y 1.8% y aumenta en 0.73% respectivamente, y la temperatura aumenta en 2.6%, 4.11% y 1.5% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio aumenta en 4.23%, 3.01% y 4.35% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 1.4%, y aumenta en 0.58% y 3.21% respectivamente, y la temperatura aumenta en 2.09%, 2.57% y 1.27% respectivamente.
8. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época húmeda (enero, febrero y marzo) del escenario RCP 4.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio aumenta en 2.75%, 8.14% y 4.57% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 7.19% y aumenta en 5.76% y 4.4% respectivamente, y la temperatura aumenta en 26.12%, 33.05% y 25.25% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio aumenta en 4.7%, 10.89% y 8.24% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 6.57%, y aumenta en 8.69% y 7% respectivamente, y la temperatura aumenta en 21.4%, 25.25% y 20.2% respectivamente.
9. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época húmeda (enero, febrero y marzo) del escenario RCP 8.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 0.25% aumenta en 8.92% y vuelve a disminuir en 2.41% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 5.23% aumenta en 9.71% y disminuye en 5.69% respectivamente, y la temperatura aumenta en 33.72%, 38.51% y 34.38% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio aumenta en 0.46%, 11.62% y 1.16% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 4.62%, aumenta en 12.95% y vuelve a disminuir en 3.3% respectivamente, y la temperatura aumenta en 27.61%, 29.69% y 27.65% respectivamente.
10. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época seca (junio, julio y agosto) del escenario de Referencia respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 2.06% y aumenta en 0.1% y 0.61% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 8.11%, 8.61% y 17.60% respectivamente, y la temperatura aumenta en 1.53%, 4.26% y 5.49% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio aumenta en 0.22%, 2.29% y 3.06% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 7.92%, 15.19% y 14.69% respectivamente, y la temperatura aumenta en 1.52%, 4.58% y 4.8% respectivamente.

11. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época seca (junio, julio y agosto) del escenario RCP 4.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 3.28%, 2.86% y 0.49% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 31.32%, 40.02% y 3.76% respectivamente, y la temperatura aumenta en 36.02%, 52.08% y 43.60% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio aumenta en 1.88%, 2.29% y 3.82% respectivamente, a medida que la precipitación disminuye en 30.06%, 45.82% y 0.71% respectivamente, y la temperatura aumenta en 26.54%, 36.43% y 30.91% respectivamente.
12. En la simulación del periodo 2019-2050 en la época seca (junio, julio y agosto) del escenario RCP 8.5 respecto del escenario Base se tiene que: en Querococha, el caudal medio disminuye en 5.55%, 6.55% y 5.16% respectivamente, a medida que la precipitación aumenta en 3.73% y disminuye en 42.43% y 23.78% respectivamente, y la temperatura aumenta en 46.41%, 65.74% y 62.24% respectivamente; en Yanayacu, el caudal medio disminuye en 1.5%, 2.02% y 1.06% respectivamente, a medida que la precipitación aumenta 6.18% y disminuye en 48.18% y 21.85% respectivamente, y la temperatura aumenta en 34.46%, 46.25% y 44.79% respectivamente.
13. En términos generales en los escenarios evaluados se conserva la relación directa entre la precipitación y el caudal: a más precipitación, más caudal.
14. Las precipitaciones simuladas en época seca (junio, julio y agosto) en todos los escenarios tienden a disminuir y por lo tanto también sus caudales. Esta tendencia implica tener especial cuidado en la gestión del agua en esta época del año.
15. Las precipitaciones simuladas en época húmeda (enero, febrero y marzo) en todos los escenarios tienden a variar, y por lo tanto no se concluye una tendencia clara en esta época del año.

6 RECOMENDACIONES

1. Realizar más visitas a campo para recolectar muestras de suelo para mejorar las variables del suelo en el modelo y para identificar más tipos de cobertura.
2. Además del NDVI se recomienda aplicar más índices en la clasificación de cobertura, por ejemplo, EVI y SAVI en la plataforma de GEE.
3. Realizar aforos en la UH Yanayacu para poder conocer más de cerca su variabilidad a lo largo del año hidrológico y comparar con los valores simulados.
4. Instalación de una estación hidrométrica a las salidas de la Laguna Querococha y de la UH Yanayacu para monitorear la variación de caudales a lo largo de los siguientes años.
5. Considerar a los parámetros del suelo: capacidad de zona raíz (S_w), factor de resistencia a la escorrentía (RRF) y conductividad de zona raíz (k_s) variables a lo largo del año, es decir, que sus valores cambien cuando es estación seca o estación húmeda.
6. Simular las ofertas de agua en el mismo periodo 2019-2050 pero con valores de RCP 2.6 y comparar los resultados.
7. Simular las ofertas de agua hacia periodos más extensos 2050-2090, pero configurando e identificando las zonas donde se perdería cobertura glaciaria.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Alata, C. (2019). *Evaluación del recurso hídrico superficial de la quebrada Pariac , cuenca del río Santa , para el proyecto de las centrales hidroeléctricas Pariac V y Pariac VI*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- ANA. (2012). *Delimitación y Codificación de Unidades Hidrográficas del Perú*. Lima-Peru.
- ANA. (2015). Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca Santa. In *Evaluación de recursos hídricos en las cuencas del Perú*.
- ANA. (2019). Retroceso Glaciar en la Cordillera Blanca 1948-2018. *Autoridad Nacional Del Agua*, p. 52. Retrieved from <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/3770>
- Astorayme, M. (2017). *Análisis y evaluación comparativa de modelos hidrológicos agrupados y semidistribuidos aplicados al pronóstico de caudales diarios del río Chillón*. Universidad Nacional Mayor de San Marcos.
- Autoridad Nacional del Agua. (2018). *Retroceso del glaciar Pastoruri* (p. 1). p. 1. Retrieved from <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2431>
- Cabrera, J. (2009). Calibración de Modelos Hidrológicos. *Imefen.Uni.Edu.Pe*, 1, 1–7. Retrieved from http://www.imefen.uni.edu.pe/Temas_interes/modhidro_2.pdf
- Cabrera, J. (2012). Validación de Modelos Hidrológicos. *Instituto Para La Mitigación de Los Efectos Del Fenómeno El Niño - Universidad Nacional de Ingeniería*, 4. Retrieved from <http://www.imefen.uni.edu.pe/modhidro.htm>
- Celmi, G. (2014). *Generación de Escenarios de disponibilidad del recurso hídrico aplicando el modelo WEAP, sub cuenca Parón - Lullán, Provincia de Huaylas, Ancash - Perú - 1978-1988*. UNASAM.
- Chow, V. Te, Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrologia Aplicada*.
- Condom, T., Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J. C., Suarez, W., Ramos, C., ... Vergara, W. (2011). Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru). *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 8(1), 869–916. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-869-2011>
- Cruces, J., & Martinez, L. (2007). *Modelos Matemáticos en Hidrogeología*.
- Escobar, M., Lima, N., Purkey, D., & Yates, D. (2014). Modelación Hidrológica Y Escenarios De Cambio Climático En Cuencas De Suministro De Agua De Las Ciudades La Paz Y El Alto , Bolivia Hydrologic Modeling and Scenarios of Climate Change on Water Supply Catchments of the Cities La Paz and El Alto , Bolivia R. *Aqua-LAC*, 5, 2–4.
- Escobar, M., Purkey, D., Pouget, J.-C., Suarez, W., Condom, T., & Ramos, C. (2008). *Construcción del Modelo WEAP del Río Santa*. 1–24.
- ESRI. (2016). Qué es ArcMap? Retrieved from <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/10.3/main/map/what-is-arcmap-.htm#:~:text=ArcMap es el lugar donde,crear y editar los dataset.>
- Figueroa, C., & Escobar, M. (2015). Modelación del recurso hídrico en la cuenca del río La Vieja en Colombia. *Sei*, (2013), 1–4.
- Google. (2020). Google Earth Engine. Retrieved from <https://earthengine.google.com/>
- INEI. (2017). *Directorio Nacional de Centros Poblados*.
- León, W. (2018). *Aplicación del modelo WEAP para determinar el balance hídrico superficial en la cuenca alta del río Pativilca, Aquia - Bolognesi - Ancash*. UNASAM.

- Llacza, A. (2020). *Aplicación de regionalización dinámica con el modelo atmosférico WRF en la generación de escenarios climáticos regionales*. Lima-Peru.
- Pilares, I. A. (2018). *Disponibilidades Hídricas Reguladas del Reservorio Lagunillas y Río Verde para usos múltiples en la cuenca del río Cabanillas* (UNALM). Retrieved from <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3675>
- Sarango, D., Lavado, W., & Velásquez, T. (2016). *Modelización Precipitación - Escorrentía en la cuenca del río Cañete*.
- SENAMHI. (2009). *Escenarios Climáticos en la Cuenca del Río Santa para el año 2030*. Lima.
- Sieber, J., & Purkey, D. (2015). *User Guide for WEAP 2015*. Somerville, MA.
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2017). *Water Evaluation And Planning System Tutorial Español*.
- Stockholm Environment Institute (SEI). (2019). WEAP: Water Evaluation And Planning System. Retrieved December 14, 2019, from <https://www.weap21.org/index.asp?action=201>

8 ANEXOS

ANEXO 1. Clasificación en función a la metodología Corine Land Cover

N°	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3		
1	Superficies artificiales	Zonas urbanas	Tejido urbano continuo Tejido urbano discontinuo Zonas industriales o comerciales		
		Zonas industriales, comerciales y de transporte	Redes viarias, ferroviarias y terrenos asociados Zonas portuarias Aeropuertos		
		Zonas de extracción minera, vertederos y de construcción	Zonas de extracción minera Escombreras y vertederos Zonas de construcción		
		Zonas verdes artificiales, no agrícolas	Zonas verdes urbanas Instalaciones deportivas y recreativas		
		2	Zonas agrícolas	Tierras de labor	Tierras de labor en secano Terrenos regados permanentemente Arrozales Viñedos
				Cultivos permanentes	Frutales Olivares
				Prados y praderas	Prados y praderas Cultivos anuales asociados con cultivos permanentes
				Zonas agrícolas heterogéneas	Mosaico de cultivos Terrenos principalmente agrícolas, pero con importantes espacios de vegetación natural y semi-natural Sistemas agroforestales

N°	NIVEL 1	NIVEL 2	NIVEL 3
3	Zonas forestales con vegetación natural y espacios abiertos	Bosques	Bosques de frondosas Bosques de coníferas Bosque mixto Pastizales naturales
		Espacios de vegetación arbustiva y/o herbácea	Landas y matorrales mesófilos Matorrales esclerófilos Matorral boscoso de transición Playas, dunas y arenales Roquedo
4	Zonas húmedas	Espacios abiertos con poca o sin vegetación	Espacios con vegetación escasa Zonas quemadas Glaciares y nieves permanentes
		Zonas húmedas continentales	Humedales y zonas pantanosas Turberas y prados turbosos Marismas
5	Superficies de agua	Zonas húmedas litorales	Salinas Zonas llanas intermareales
		Aguas continentales	Cursos de agua Láminas de agua Lagunas costeras
		Aguas marinas	Estuarios Mares y océanos

ANEXO 2. Información de las estaciones climáticas e hidrométricas.

Estación: Recuay.

Variable: Precipitación.

Fuente: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964		80.7	210.8	85.6	33.6			0	0	0	0	0	410.7
1965									22.6	87.2	40.7	122.8	273.3
1966	85.7	95.8	48.1	43	25.1	0.2	0	0.4	13.3	107.7	52.4	70.2	541.9
1967	119.8	195	143.6	58.4	24.5	5.4	16.1	11.5	35.8	136.5	35.6	59.4	841.6
1968	73.9	83.6	111.1	21.9	46.6	0	0	21.9	25.5	89.9	34	15.1	523.5
1969	43.6	93.7	92.6	64.8	12.7	1.1	0.1	11.3	10.1	62.6	89.7	128.4	610.7
1970	127.1	57.4	86.9	133.5	43	6	0	14.3	95	172.7	200.6	182.3	1118.8
1971	64.8	93.2	200.1	44.6	0	4	0	16	18.2	67.4	68.8	153.2	730.3
1972	105.1	111.9	233	88.2	22.8	0.1	0.1	9.2	0	7.9	31	74.5	683.8
1973	86	112.8	173.7	103.8	65.5	5.1	1.4	3	44.2	125.1	130.1	168.2	1018.9
1974	127.3	135.9	126.8	50.5	6.3								446.8
1975													
1976													
1977													
1978										35.2	63.6	103.5	202.3
1979	37	117.4	169.7	95.4	22	3	0	9.1	23.8	12.2	45.8	31	566.4
1980	85.4	60.8	92.3	47.5	9.9	3.4	0.2	8.9	10.6	157.4	124.7	147.8	748.9
1981	139.9	176	187.2	52	3.2	0	0	16.4	9.7	44.6	141.7	81.8	852.5
1982	158.4	163.3	94.6	43.2	4.4	0	9.2	15.5	14.9	163.1	128.9	108.5	904
1983	124.4	39.7	113.4	74.5	10.2	15.5	2.1	0.1	10.5	71.7	93.6	60.4	616.1
1984	99.1	229.4	228.2	90.2	63	21.5	14	0	45.3	154.8	88.9	83	1117.4
1985	40.5	115.4	111.6	128.5	47.8	2.1	13.6	0	73.4	45.7	44.2	109	731.8
1986	219.7	136.9	73.8		3.5	0	0.3	2.4	42	50.4	74.8	128.7	732.5
1987	175.4	125.4	76.7	75.3	7.4	0.2	0.2	6.9	58.5	57.1	112.6	183.9	879.6
1988	154.8	133.5	89.8	115.4	33.4	2.5	0	21.8	46.7	84.1	96.7	70.9	849.6
1989	177.7	140.6	137.5	82.6	33.3	7.4	0.2	23.7	38.5	137.9	40.7	9.4	829.5
1990	110.1	42.7	75.6	49.5	33	3.4	0	4.9	9.7	132.6	117.7	61.4	640.6
1991	57.6	72		99.6	42.4	0	4.8	0	0.2	61.7	76	32.9	447.2
1992	2.5	71.1	113	50	30.3	18.3	0	13.2	49.2	77.1	45.1	46.7	516.5
1993	150.9	132	247.1	156.3	29.3	0.1	5.6	0.3	47.6	152.1	128.3	181.8	1231.4
1994	135.5	144.7	253.9	113.1	40.2	4	0.7	5	37.1	52.5	56.6	82.7	926
1995	46.4	98.6	144.3	128.9	39	0.6	0	4.5	18.4	75.2	79.8	124.8	760.5
1996	135.2	161	208.8	62.1	28.2	0	0	6.8	17.8	92	43.2	76.9	832
1997	106.5	142.5	44.2	49.9	16.2	0	0	1.7	23.6	49.3	77.7	200.5	712.1

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1998	246.2	203.4	173.3	138.4	30.6	15.6	0	5.8	38.8	150.4	26.6	39.4	1068.5
1999	132.2	213.5	129.1	104.3	62.2	9.3	0	0.7	62.5	47.9	96.4	111.7	969.8
2000	59.5	189.5	124.5	90.6	48.8	0	0	29.2	31.7	42.5	39	164.8	820.1
2001	220.7	123.2	259.1	48.2	30.6	13.9	0	0.1	84.4	66.8	172.4	56	1075.4
2002	87.3	99.1	175.3	58.8	24.7	7.7	0	0	22		155.3	157	787.2
2003	116.2	109	163.5	66.2	27.1	8.9	6.4	0	2.9	57.4	39.8	92.9	690.3
2004	47	126.6	119.4	84.6	24.6	4.5	0.8	0	59.6	105.2	110.8	123.7	806.8
2005	95.7	73.7	200.8	69.9	25.6	0	0	9.5	18.1	45.7		115.7	654.7
2006	101	94.8	219.9	141.6	7.1	35.7	4.5	32.6	72.5	92.4	126	156.7	1084.8
2007	171.9	87.1	224.6	173.3	33	8.3	0	2.3	4	80.4	113.2	47.6	945.7
2008	107.9	116.6	124.3	72	7.9	5.6	13.6	11.4	16.2	144.2	34.8	51.1	705.6
2009	198.3	118.8	327.5	121.2	68.5	4	0	16.4	14.6	147.2	137.8	157.9	1312.2
2010	124.9	92.8	180.8	85.4	25.3	8.7	2	6.3	37.9	49.7	92	167.9	873.7
2011	118.4	98.8	155	125.4	16.3	1.2	16.6	4.9	11.6	17.3	95.2	162.1	822.8
2012	162.2	142.6	141.3	153.4	15.6	14.5	0	0	30.8	49.9		152.1	862.4
2013	69.1	131.1	222.6										422.8
PROM	114.7	119.6	155.2	87.0	27.8	5.8	2.7	8.1	30.7	83.2	83.8	103.5	68.5
D.V.	53.3	43.6	63.4	36.7	17.5	7.4	5.0	8.5	23.4	46.6	44.6	53.5	33.6
C.V.	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6	1.3	1.9	1.1	0.8	0.6	0.5	0.5	0.7
MÍN.	2.5	39.7	44.2	21.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	9.0
MÁX.	246.2	229.4	327.5	173.3	68.5	35.7	16.6	32.6	95.0	172.7	200.6	200.5	149.9

Estación: Recuay.

Variable: Temperatura máxima.

Fuente: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964		17.1	17.9	18.3	18.3		17.8	18.1	19.7	17.6	17.8	17.9	18.1
1965	18.2	18.8	18.7	18.7	19.4	19.8	18.8	19.4	19.1	19.2	19.0	18.6	19.0
1966	18.8	18.5	18.3	19.4	19.4	19.5	20.4	20.3	20.3	17.4	18.5	17.6	19.0
1967	17.3	16.1	16.2	17.6	18.8	18.9	18.3	19.2	19.1	17.9	18.6	18.7	18.1
1968	18.6	17.3	16.9	18.7	18.8	19.3	19.2	19.4	19.7	19.5	19.6	20.1	18.9
1969	19.9	18.7	18.5	18.8	20.2	19.8	19.8	19.9	20.9	20.4	19.2	18.2	19.5
1970	16.8	19.4	19.1	18.8	18.9	19.2	19.4	20.5	19.4	20.2	19.8	19.1	19.2
1971	18.1	16.7	16.5	17.9	19.4	19.5	20.6	20.3					18.6
1972												19.8	19.8
1973	19.5	18.4	18.8	18.8	18.9	19.2	19.4	19.9	20.0	19.0	20.6	18.2	19.2
1974	16.4	16.4		18.4	18.8								17.5
1975													
1976													
1977													
1978										21.8	20.8	21.2	21.3
1979	21.8	19.8	18.8	20.5	21.4	21.3	21.2	22.7	22.1	23.0	22.7	22.5	21.5
1980	20.6	21.0	20.7	21.1	22.1	22.3	21.6	22.2	22.9	20.3	20.1	20.1	21.2
1981	20.4	19.1	19.0	21.3	22.2	22.2	21.7	21.3	22.1	22.1	19.4	19.9	20.9
1982	20.1	19.9	21.0	21.2	22.8	22.5	22.1	22.7	22.7	21.4	21.2	21.0	21.6
1983	22.4	23.1	22.1	22.2	22.7	21.9	23.0	22.6	22.0	20.7	20.5	19.6	21.9
1984	19.4	17.9	19.1	19.2	20.0	20.2	20.7	22.1	21.7	20.5	20.4	20.7	20.2
1985	20.9	19.4	20.4	19.9	19.9	20.1	20.6	21.0	21.4	21.6	21.7	21.0	20.7
1986	19.4	18.8	18.7		20.9	21.8	21.3	21.9	22.6	22.6	22.3	21.4	21.0
1987	19.8	20.5	21.0	21.5	21.2	22.5	22.5	23.0	22.4	22.9	21.5	20.7	21.6
1988	20.1	20.6	20.1	19.4	20.7	21.9	22.3	22.7	22.3	21.6	20.9	19.9	21.1
1989	19.6	18.3	18.5	19.9	20.9	20.4	21.0	21.7	22.5	20.3	22.3	23.7	20.7
1990	21.4	22.4	22.0	21.9	22.0	21.8	22.5	22.8	22.9	21.5	20.7	21.4	21.9
1991	22.2	21.1		20.9	22.1	24.0	23.7	23.2	23.5	22.0	22.1	22.9	22.5
1992	22.2	23.0	22.6	22.2	22.8	21.8	23.0	22.6	22.9	21.6	22.3	23.7	22.6
1993	21.2	20.8	19.4	20.4	21.2	22.2	22.6	22.9	22.4	21.6	20.1	19.7	21.2
1994	19.3	19.6	20.2	20.5	21.2	21.2	22.0	23.0	23.0	22.7	21.1	21.9	21.3
1995	21.3	21.0	20.1	21.2	21.8	22.2	23.0	23.6	23.0	22.0	21.4	21.2	21.8
1996	19.2	19.1	19.4	20.4	21.0	21.6	22.1	22.3	23.0	21.5	20.9	20.7	20.9
1997	18.6	19.3	20.7	20.9	21.8	21.4	22.3	22.3	21.5	21.8	20.9	20.9	21.0
1998	20.3	20.2	20.3	21.1	22.6	21.2	22.1	21.7	22.3	20.4	20.6	20.6	21.1
1999	19.6	18.2	18.3	19.5	19.8	20.5	20.6	21.7	20.3	19.9	20.4	19.6	19.9
2000													
2001								21.8	20.6	20.3	19.0	20.4	20.4

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2002	20.4	19.0	19.2	19.1	21.0	20.6	21.2	22.2	22.5		19.7	19.8	20.4
2003	19.8	19.6	19.5	20.6	20.8	21.4	21.6	22.7	22.5	22.8	22.5	19.1	21.1
2004	21.4	19.3	20.4	20.3	21.5	20.7	20.9	21.5	20.9	20.2	19.9	19.9	20.6
2005	20.4	20.9	18.5	20.2	21.1	21.7	22.4	22.3	22.5				21.1
2006					23.5	22.1	22.7	22.1	22.4	21.7	21.0	19.9	21.9
2007	20.6	20.5	20.0	19.8	20.3	21.0	21.1	22.0	21.4	21.1	20.7	21.5	20.9
2008	19.5	20.6	18.5	19.7	20.8	21.4	21.3	22.0	22.0	20.2	20.4	19.9	20.5
2009	19.2	17.7	18.2	19.3	19.7	21.2	21.3	22.3	22.8	20.8	19.5	18.7	20.1
2010	20.1	20.5	20.2	22.1	22.1	22.7	22.5	22.7	22.1	21.7	21.0	18.8	21.4
2011	19.3	18.2	19.2	19.9	21.2	22.5	21.5	21.6	21.3	21.2	20.9	19.4	20.5
2012												19.5	19.5
2013	21.9	19.9	19.4	21.0	21.0	20.8	20.9	21.9	22.4	20.3			20.9
PROM	19.9	19.4	19.4	20.1	20.8	21.2	21.3	21.7	21.7	20.9	20.5	20.2	20.6
D.V.	1.4	1.6	1.4	1.2	1.3	1.2	1.4	1.2	1.2	1.4	1.2	1.4	1.3
C.V.	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1	0.1
MÍN.	16.4	16.1	16.2	17.6	18.3	18.9	17.8	18.1	19.1	17.4	17.8	17.6	17.6
MÁX.	22.4	23.1	22.6	22.2	23.5	24.0	23.7	23.6	23.5	23.0	22.7	23.7	23.2

Estación: Recuay.

Variable: Temperatura mínima.

Fuente: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1964		4.7	5.4	5.3	3.7		-3.3	2.6	3.6	4.1	4.3	3.4	3.4
1965	4.7	5.5		2.8	2.2	0.2	1.4	1.9	4.7	5.7	4.7	4.5	3.5
1966	6.6	6.3	5.6	5.0	3.9	-0.2	0.1	1.9	3.5	5.5	5.1	4.7	4.0
1967	6.2	6.1	5.5	5.7	4.1	0.3	0.9	2.5	3.3	5.5	3.4	4.6	4.0
1968	4.6	5.6	5.4	1.7	2.9	1.4	0.7	2.1	3.3	3.9	3.2	4.1	3.2
1969	5.3	6.3	6.8	6.3	4.0	2.2	2.1	1.8	3.1	4.2	5.9	5.9	4.5
1970	6.6	5.6	5.5	6.7			0.6	0.8	3.5	2.8	3.3	3.5	3.9
1971	4.7	4.4	5.1	4.0	1.8	1.0	0.0	-0.5					2.6
1972												5.6	5.6
1973	6.3	6.7	6.8	6.0	4.1	2.6	-1.0	1.0	3.2	4.3	5.1	5.1	4.2
1974	5.1	5.4	5.1	5.2	3.6								4.9
1975													
1976													
1977													
1978										3.7	4.5	4.6	4.3
1979	4.8	6.8	6.1	4.8	3.1	0.2	-0.6	1.3	2.9	3.1	4.1	4.2	3.4
1980	6.5	6.2	5.8	4.6	3.5	0.5	0.5	1.4	1.9	5.0		4.8	3.7
1981	6.0	6.3	5.7	6.4	3.0	0.4	-0.2	1.8	3.0	5.6	6.3	7.3	4.3
1982	5.1	6.1	6.8	5.7	3.0	2.1	0.6	1.5	3.5	5.8	6.8	7.1	4.5
1983	7.9	6.9	7.8	7.3	4.5	2.9	1.0	2.5	3.9	4.3	4.2	5.8	4.9
1984	4.5	6.4	6.6	5.7	5.0	4.1	1.1	1.3	2.5	5.3	3.1	5.0	4.2
1985	5.6	6.1	6.2	6.0	3.6	1.7	-0.2	1.1	4.5	3.5	3.4	5.7	3.9
1986	6.8	5.4	5.9		1.9	1.1	-0.5	2.8	3.7	3.2	4.9	5.7	3.7
1987	6.9	7.2	6.3	4.3	0.2	-1.9		0.6	4.5	5.0	6.2	6.7	4.2
1988	7.2	6.9	6.1	6.2	4.0	-0.4	-1.0	-0.2	4.2	5.3	5.3	5.3	4.1
1989	5.7	5.7	5.7	5.1	1.7	0.4	-1.4	1.1	2.2	4.3	1.2	2.1	2.8
1990	4.0	4.5	4.8	4.7	2.6	3.0	-0.1	0.6	2.2	4.5	6.7	5.1	3.5
1991	5.1	5.6		5.6	3.5	-0.6	-0.5	0.2	2.3	4.6	3.9	4.6	3.1
1992	4.9	4.8	6.4	5.7	4.5	2.5	-0.1	1.6	4.0	5.6	4.6	3.4	4.0
1993	5.4	5.5	6.0	6.1	4.5	1.0	0.6	-0.5	3.8	5.3	6.5	7.6	4.3
1994	7.5	7.6	6.9	6.3	4.0	1.4	0.6	1.6	4.1	4.3	5.5	6.9	4.7
1995	5.3	5.4	6.3	5.7	3.5	2.2	1.5	2.0	3.7	5.0	6.1	5.2	4.3
1996	5.3	6.9	7.1	6.2	4.8	1.6	0.7	1.6	3.4	5.1	3.5	5.6	4.3
1997	5.5	6.1	5.6	4.7	3.9	0.7	0.8	2.0	3.3	5.5	7.4	7.3	4.4
1998	8.2	8.2	8.5	8.2	3.9	2.5	0.7	1.6	2.7	5.0	4.3	5.5	4.9
1999	6.1	6.4	6.3	6.0	4.6	2.5	0.5	0.1	3.8	3.2	3.4	4.0	3.9
2000	5.2	5.9	6.0	5.7	4.4	3.1	0.0	1.6	2.5	2.9	2.1	4.1	3.6
2001	4.6	4.4	5.9	3.6	3.4	1.8	0.9	1.1	4.5	6.4	6.7	6.9	4.2

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2002	6.2	7.6	6.9	6.4	4.8	2.6	2.1	2.1	3.1		6.8	7.3	5.1
2003	7.2	5.7	5.2	7.2	5.4	2.2	1.3	2.4	2.4	4.8	4.4	7.0	4.6
2004	5.4	6.6	7.0	4.8	4.0	1.9	1.9	1.0	4.6	5.9	6.0	6.5	4.6
2005	5.5	7.5	7.5	6.5	2.7	1.0	-0.5	0.1	2.7				3.7
2006					1.1	2.2	0.9	2.1	2.7	4.0	6.0	7.0	3.3
2007	7.7	6.2	6.9	5.8	4.0	1.0	1.1	1.3	3.1	4.5	4.9	4.4	4.2
2008	5.3	5.6	5.0	5.6	3.3	2.1	0.4	2.3	3.0	5.7	6.9	5.8	4.2
2009	6.8	7.3	6.4	6.6	5.3	4.2	3.5	1.9	3.4	5.1	5.9	7.5	5.3
2010	7.0	7.6	7.1	6.9	4.4	1.4	1.1	0.7	2.8	2.7	2.9	4.4	4.1
2011	6.1	6.1	5.7	5.5	2.7	1.5	1.0	1.6	4.1	4.0	5.7	5.9	4.2
2012	7.0	6.1	6.5	6.0	3.8	0.9	0.5	1.0	3.9	5.5		6.3	4.3
2013	7.5	7.0	6.9	5.8	3.8	1.4	1.0	1.9	3.6	6.2			4.5
PROM	6.0	6.2	6.2	5.6	3.6	1.5	0.5	1.4	3.4	4.7	4.9	5.4	4.1
D.V.	1.1	0.9	0.8	1.2	1.1	1.2	1.1	0.8	0.7	1.0	1.5	1.3	1.1
C.V.	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.8	2.3	0.6	0.2	0.2	0.3	0.2	0.5
MÍN.	4.0	4.4	4.8	1.7	0.2	-1.9	-3.3	-0.5	1.9	2.7	1.2	2.1	1.4
MÁX.	8.2	8.2	8.5	8.2	5.4	4.2	3.5	2.8	4.7	6.4	7.4	7.6	6.3

Estación: Milpo

Variable: Precipitación.

Fuente: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
1980							0	7	0	0	14.7	85	106.7
1981	224.8	323.8	325.1	117.3	24.3	21.7	7.7	61.9	61.7	103.7	287.7	146.9	1706.6
1982	66.8				101.5	65.4	30.2	20	135.6	415.8	212.3	112	1159.6
1983	58.4	18	124.7	5.6	0	0	0	0.6	2.2	3	0.8	14.8	228.1
1984	77.3	27	71.2	63.3	0	0	0	0	13.4	34.4	81.4	60.5	428.5
1985	94	83.1	97.4	78.3	0	0	0	8.9	189.5	76.8	28.7	150.1	806.8
1986	45.5	64.5	100	128.6	70.6	1.1	0	12.3	75.1	35.7	57.5	177.3	768.2
1987	259.6	127.4	202	106.3	21.4	0	0	3	72.6	54.4	191.7	192.6	1231
1988	319.9	166.7	177.2	214.4	67.6	13.6	0	7.8	40.7	117.1	48.84	71.82	1245.66
1989					54.73	63.29	22.32	83	111.1	75.3	17.7	19.5	446.94
1990	33.2	91.5	80.2	21.4	5.59	4.69	0.45	9.53	5.63	46.61	72.43	23.72	394.95
1991			133.1	78.2	44.7	10	0	30.2	26.7	127.3	63.4	68.91	582.51
1992	49.23	52.76	95.4	54.05	12.66	0.01	12.7	8.42	4.42	120.6	47.3	35.81	493.36
1993	156.92	143.82	181.22	195	37.63	18.22	11.8	4.6	106.51	144.5	112.3	208.2	1320.72
1994	280.9	250.9	221.03	109.7	57.6	11.3	6.4	12.71	53.65	81.3	75.9	111	1272.39
1995	131.8	99	174.4	54.6	52.1	5.8	10	21.2	33.8	70.4	115.3	184.9	953.3
1996	142.3	140.2	154.9	119.2	47.6	7.7	0.9	9.9	40	78.5	71.8	85.7	898.7
1997	142.5	159	45.3	45.6	28.9	1.8	18.6	21	47.4	66.3	87.7	234.1	898.2
1998	256.2	200.5	190.5	129	23.6	22.1	0	9.9	17.8	127.4	40.9	79.9	1097.8
1999	198.8	286.2	196.7	82.2	29.2	29.9	11	7.8	92.9	46.3	85.4	105.9	1172.3
2000	135.3	188.9	211.5	43.7	98.4	6.5	6.9	18.7	60.2	67.7	34.7	172.6	1045.1
2001	234.9	158.4	214.1	28.1	42.4	7.5	18.7	0.5	72.1	110.7	160.2	107.5	1155.1
2002	89.8	220.4	284.8	87.9	28.3	10.5	6.2	4.1	39	221.5	135.5	131.8	1259.8
2003	143	137.5	169.3	160.3	43.3	13.9	19.5	14.2	28.5	73.7	56.2	157.8	1017.2
2004	85.3	358.2	82.8	114.1	57.5	16.8	45.1	5.2	26.9	131.7	169.7	136.9	1230.2
2005	148.5	119.4	270.7	96	69.9	6.9	14.5	20.7	21.7	98.6	82	207.7	1156.6
2006	95.1	155.6	329.6	320.1	42.2	36.6	6.1	7.6	39	63.1	192.8	240.3	1528.1
2007	491.2	39.6	468.6	291.9	58.5	19.9	19.9	20.8	6.6	135.2	225.9	173.1	1951.2
2008	347.2	244.7	459.3	99.3	10.9	45.5	48.6	109.7	82.4	248.8	55.6	180.7	1932.7
2009	305.1	216.5	162.3	233.4	10.7	12.8	9.7	10.2	8.3	160.9	122	182.6	1434.5
2010	68.4	45	159.8	19.2	22.8	8	1.3	2.8	33.2	69.4	225.3	300.9	956.1
2011	279.8	278.9	177.4	95.7	10.1	3.2	23	17.4	201.3	119.6	232.8	536.4	1975.6
2012	266.7	638.3	227	433.1	38.3	41	5.6	3.3	149.2	106.1	380.7		2289.3
2013	127.7	388.2	369.3	256.5	90	86.4	39.4	28.1	47.8	250.1	141.3	179.1	2003.9
2014	376.5	612.2	323.1										1311.8
PROM	179.1	194.7	202.5	125.2	39.5	17.9	11.7	17.7	57.3	108.3	115.5	147.8	101.4
D.V.	113.0	149.8	105.9	97.8	27.7	21.1	13.3	23.3	51.5	80.0	86.9	98.0	72.4
C.V.	0.6	0.8	0.5	0.8	0.7	1.2	1.1	1.3	0.9	0.7	0.8	0.7	0.8

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
MÍN.	33.2	18.0	45.3	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.8	14.8	9.8
MÁX.	491.2	638.3	468.6	433.1	101.5	86.4	48.6	109.7	201.3	415.8	380.7	536.4	326.0

Estación: Pachacoto.

Variable: Precipitación.

Fuente: Senamhi

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	ANUAL
2015										72.2	65.2	102.9	240.3
2016	77.7	199	162.3	75.4	10.3	9.8	24.4	16.1	31	37.3	11.8	113.8	768.9
2017	139.4	147.7	300.5	114.4	77.4	6.2	0.1	2.4	25.8	71.3	29.7	128.4	1043.3
2018	155.5	98	250.6	196.4	74.8	4.3	3.4	7.1	33.2	110.2	123.7	105.5	1162.7
PROM	124.2	148.2	237.8	128.7	54.2	6.8	9.3	8.5	30.0	72.8	57.6	112.7	82.6
D.V.	41.1	50.5	70.0	61.8	38.0	2.8	13.2	7.0	3.8	29.8	49.3	11.5	31.6
C.V.	0.3	0.3	0.3	0.5	0.7	0.4	1.4	0.8	0.1	0.4	0.9	0.1	0.5
MÍN.	77.7	98.0	162.3	75.4	10.3	4.3	0.1	2.4	25.8	37.3	11.8	102.9	50.7
MÁX.	155.5	199.0	300.5	196.4	77.4	9.8	24.4	16.1	33.2	110.2	123.7	128.4	114.6

ANEXO 3. Tipos de datos para alimentar el modelo.

Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración	Prioridad	Formato preferido	Notas	
Datos de entrada - demandas				
<i>Uso de suelo</i>				
DEM (Modelo de Elevación Digital)	1	GIS		
Cobertura de vegetación	1	GIS		
Tipo de suelo	2	GIS	Estos datos son necesarios para caracterizar la cuenca	
Geología	2	GIS		
Áreas de agricultura irrigada	1	GIS, Excel, texto o csv		
Tecnologías de irrigación	2	GIS, Excel, texto o csv		
<i>Clima</i>				
Precipitación (series de datos históricas, promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto o csv		Estos datos son necesarios para alimentar el modelo con condiciones climáticas. Precipitación y temperatura deben ser promedios de cada paso de tiempo dentro del periodo de modelación, mientras que humedad relativa y viento pueden ser un promedio aproximado.
Temperatura (series de datos históricas, promedio mensual en cada año del periodo de modelación)	1	Excel, texto o csv		
Humedad Relativa (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto o csv		
Velocidad del viento (promedio mensual del periodo de modelación)	1	Excel, texto o csv		
Cobertura de nubes	2	Excel, texto o csv		
Latitud	1	Excel, texto, csv o capas de GIS para extraer datos		
<i>Sitios de demanda (ciudades, industrias, zonas agrícolas)</i>				
Número de usuarios	1	No hay formato preferido	Aunque las demandas agrícolas se pueden estimar dentro del modelo hidrológico, también se pueden agrupar en un sitio de demanda.	
Consumo per capita	1	No hay formato preferido		
Variación mensual	1	No hay formato preferido		
Porcentaje de retorno	1	No hay formato preferido		

Datos requeridos para alimentar el modelo y durante el proceso de calibración	Prioridad	Formato preferido	Notas
Datos de entrada - suministro y recursos			
<i>Reservorios/represas</i>			
<u>Datos físicos:</u>			
Capacidad de almacenamiento			
Volumen inicial			
Curva de volumen/elevación			
Evaporación	1	No hay formato preferido. Los datos pueden venir de diversos formatos o hacer parte de un texto. La curva de volumen/elevación puede venir en Excel.	Si existen reservorios, es importante tener información sobre su localización y sus características físicas y de operación.
Pérdidas de agua subterránea			
<u>Datos de operación</u>			
Máximo nivel de conservación			
Máximo nivel de seguridad			
Máximo nivel inactivo			
<i>Capacidad hidroeléctrica</i>			
Mínimo caudal de turbina			
Máximo caudal de turbina	1	No hay formato preferido	El modelo requiere estos datos para poder calcular la producción hidroeléctrica
Cabeza hidráulica			
Factor de planta			
Eficiencia			
<i>Requerimientos de caudales mínimos</i>	2	No hay formato preferido	
<i>Canales para extracción de agua (canales de irrigación)</i>	1	No hay formato preferido	Es importante saber la localización de los canales y acuíferos
<i>Agua subterránea</i>	2	No hay formato preferido	
Datos para calibración del modelo			
<i>Ríos</i>			
Series de tiempo de caudales	1	Excel, texto o csv	
<i>Nieve</i>			
Series de tiempo de profundidad de nieve o de equivalencia de agua	2	Excel, texto o csv	Estos datos son importantes para chequear el comportamiento del modelo, y realizar la calibración.
Estimados de volumen de nieve	2	Excel, texto o csv	
<i>Glaciares</i>			
Área de cobertura de glaciares	2	GIS o Excel	
Escorrentía de agua desde glaciares	2	Excel, texto o csv	

ANEXO 4. Creación de unidades hidrológicas (catchments) en la unidad hidrográfica de Yanayacu

La creación de las unidades hidrológicas se realizó a través de la intersección de bandas altitudinales y la unidad hidrgráfica.

En primer lugar, se deben definir la creación de las bandas altitudinales en Yanayacu a través de los siguientes pasos:

1. Se consideró definir los intervalos de las bandas de manera variada en rangos de 100 a 300 m. En general, se consideró a 300 m en la parte baja y cada 100 m en la zona alta. La división de intervalos depende del criterio del modelador. Ver la tabla 1.
2. Se generó 13 intervalos.

Tabla 1

Bandas altitudinales en la UH Yanayacu

Bandas	Cota inferior (msnm)	Cota superior (msnm)	Rango (m)
Banda 1	3550	3700	150
Banda 2	3700	4000	300
Banda 3	4000	4300	300
Banda 4	4300	4600	300
Banda 5	4600	4800	200
Banda 6	4800	4900	100
Banda 7	4900	5000	100
Banda 8	5000	5100	100
Banda 9	5100	5200	100
Banda 10	5200	5300	100
Banda 11	5300	5400	100
Banda 12	5400	5600	200

Nota: Elaboración propia.

En segundo lugar, se deben crear las bandas altitudinales en un software de procesamiento de información geográfica (ArcGis).

1. Teniendo en cuenta los datos del cuadro se trabajó con dos archivos vectoriales: curvas de nivel cada 100 m (CurvasDeNivelOriginal_100m.shp) y la delimitación de la UH Yanayacu (Delimitación_UHYanayacu.shp). Ver figura 1.

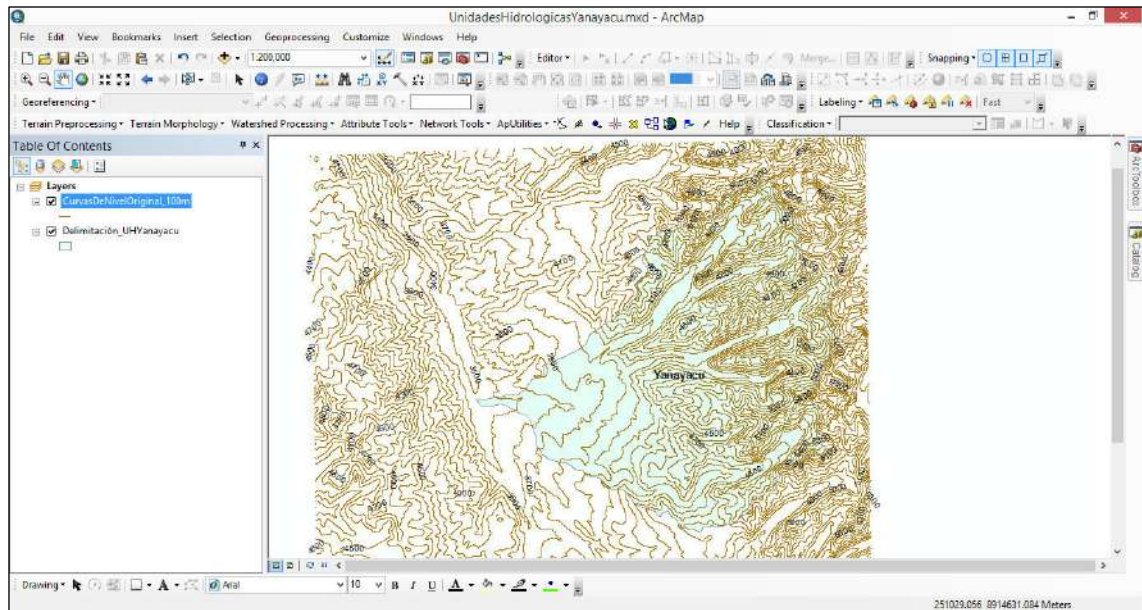


Figura 1. Archivos de curvas de nivel y delimitaciones de la UH.

2. Se realizó un clip al archivo: CurvasDeNivelOriginal_100m.shp en función a: Delimitación_UHYanayacu.shp, de manera que se obtuvo las curvas de nivel de la UH Yanayacu cada 100 m: CurvasDeNivel100m_UHYanayacu.shp (este archivo es de tipo Line). Ver figuras 2, 3 y 4.

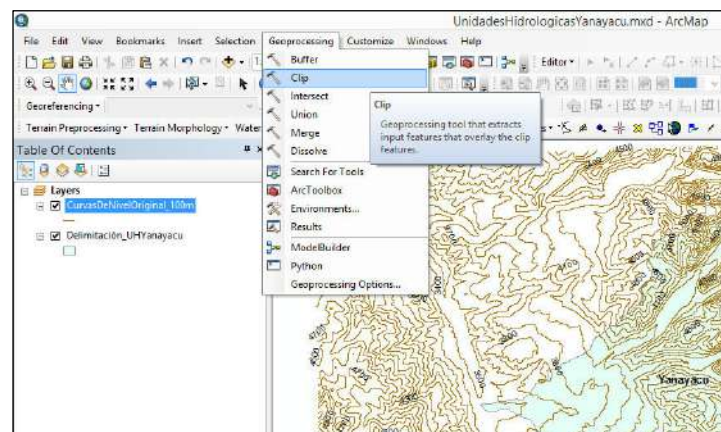


Figura 2. Ubicación de herramienta Clip.

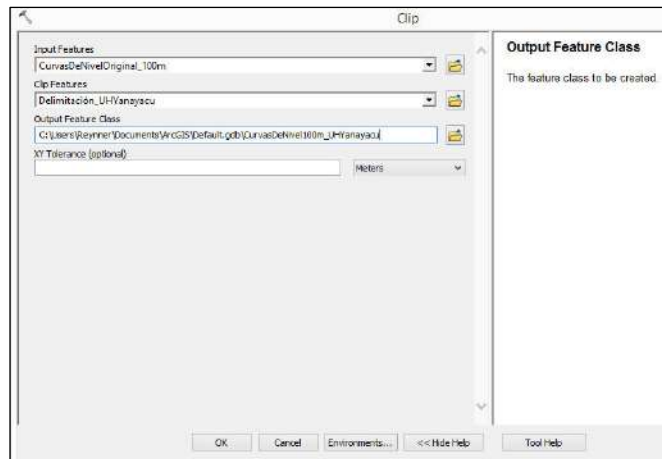


Figura 3. Uso de la herramienta Clip.

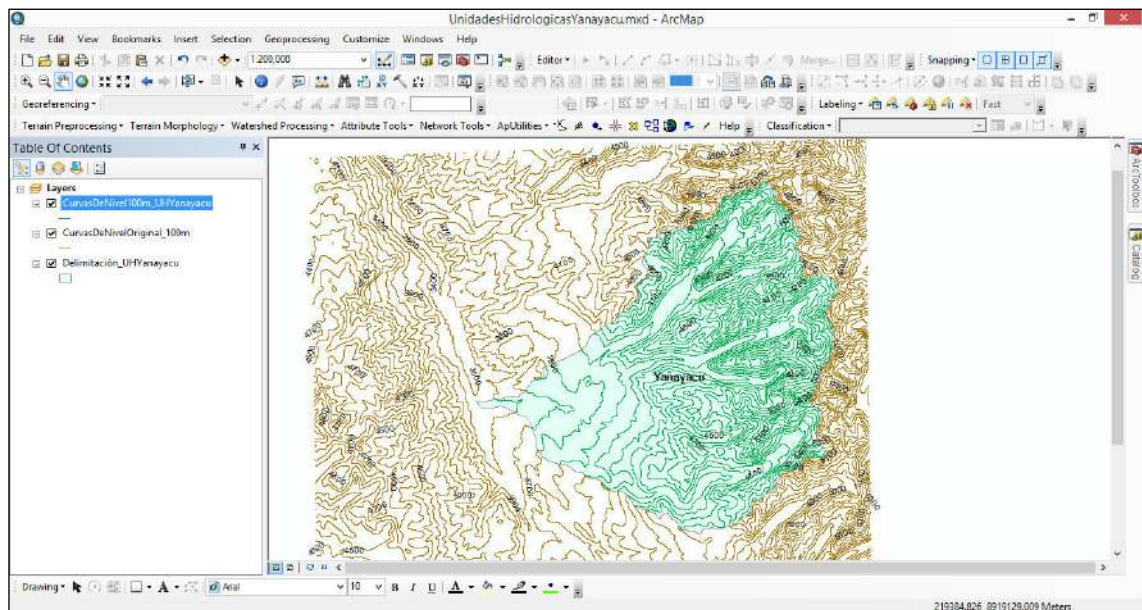


Figura 4. Resultado de la herramienta Clip.

3. Sobre este archivo creado CurvasDeNivel100m_UHYanayacu.shp se hizo lo siguiente: *Click derecho: Propiedades > Layer Properties > Labels* y se activó según la figura 5 siguiente.

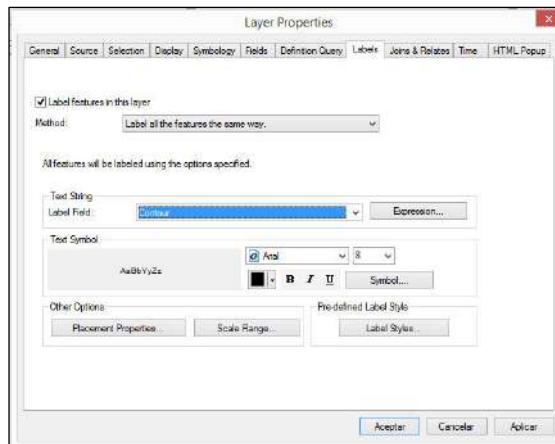


Figura 5. Ventana *Layer Properties* de *CurvasDeNivel100m_UHYanayacu.shp*

4. Luego, sobre esa misma ventana: *Definition Query* > *Query Builder*. Se definieron los intervalos mediante una fórmula tal y como aparece en la figura 6. Se verificó que la expresión con *Verify: The expression was successfully verified*. Luego *OK* y *Aceptar* para terminar. El resultado se ve en la figura 7.

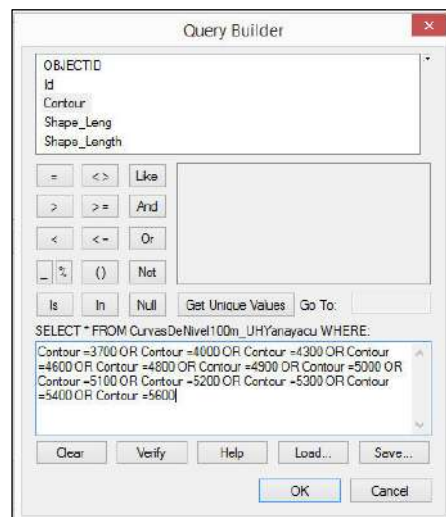


Figura 6. Ventana *Query Builder* de *CurvasDeNivel100m_UHYanayacu.shp*

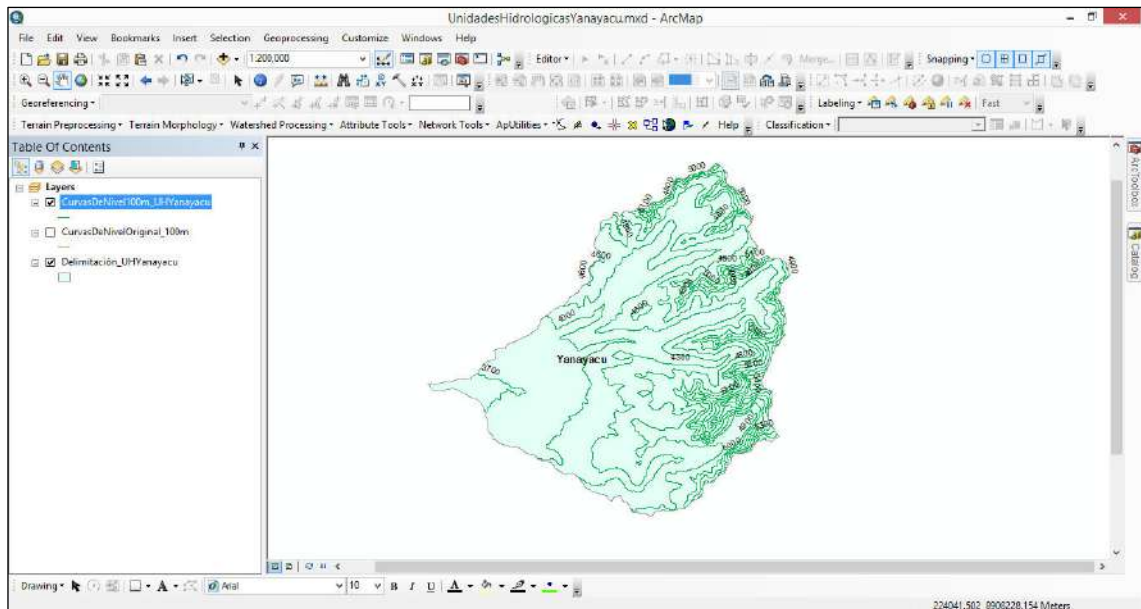


Figura 7. Resultado de seleccionar los intervalos de bandas sobre la UH.

5. Se convirtió el archivo Delimitación_UHYanayacu.shp (este archivo es de tipo *Polygon*) a tipo *Line*. Se procedió a través de: *ArcToolbox > Data Management Tools > Features > Polygon to Line (Features to Line)*. El resultado fue: Delimitación_UHYanayaculine.shp. Ver figuras 8, 9 y 10.

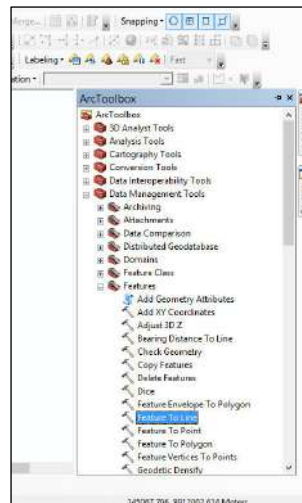


Figura 8. Ubicación de la herramienta *Features to Line*.

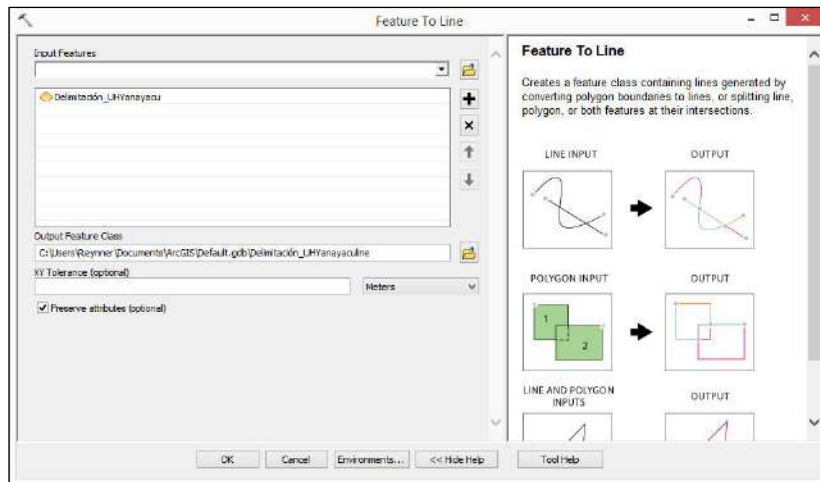


Figura 9. Uso de la herramienta Feature to Line

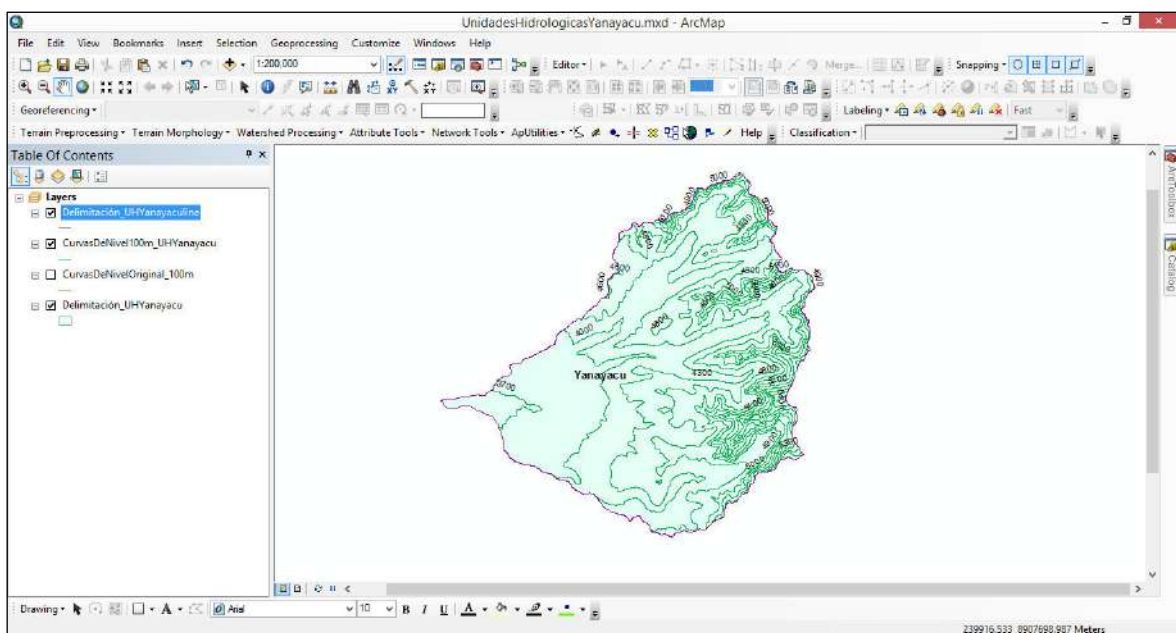


Figura 10. Resultado de usar la herramienta Features to Line

6. Luego se usó la herramienta *Merge* (a través de *Geoprocessing*) para juntar los archivos tipo *Line*: *Delimitación_UHYanayaculine.shp* y *CurvasDeNivel100m_UHYanayacu.shp* y el resultado fue: *BandasAltitudinales_UHYanayaculine.shp*. Ver figuras 11, 12 y 13.

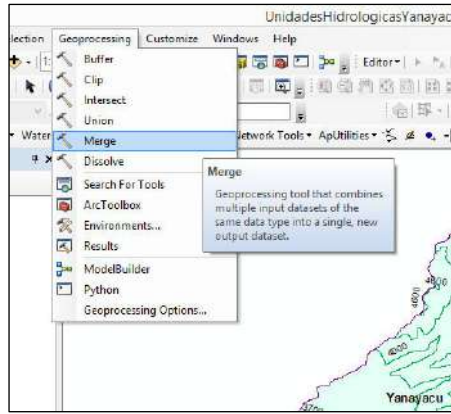


Figura 11. Ubicación de la herramienta Merge.

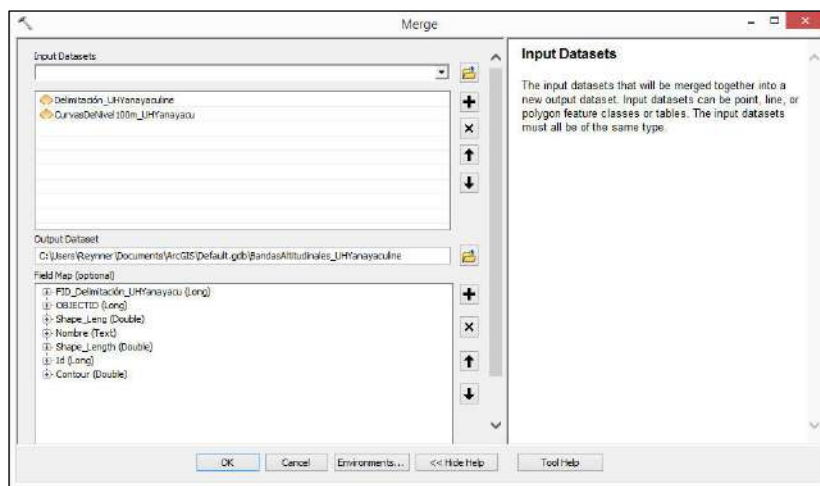


Figura 12. Uso de la herramienta Merge

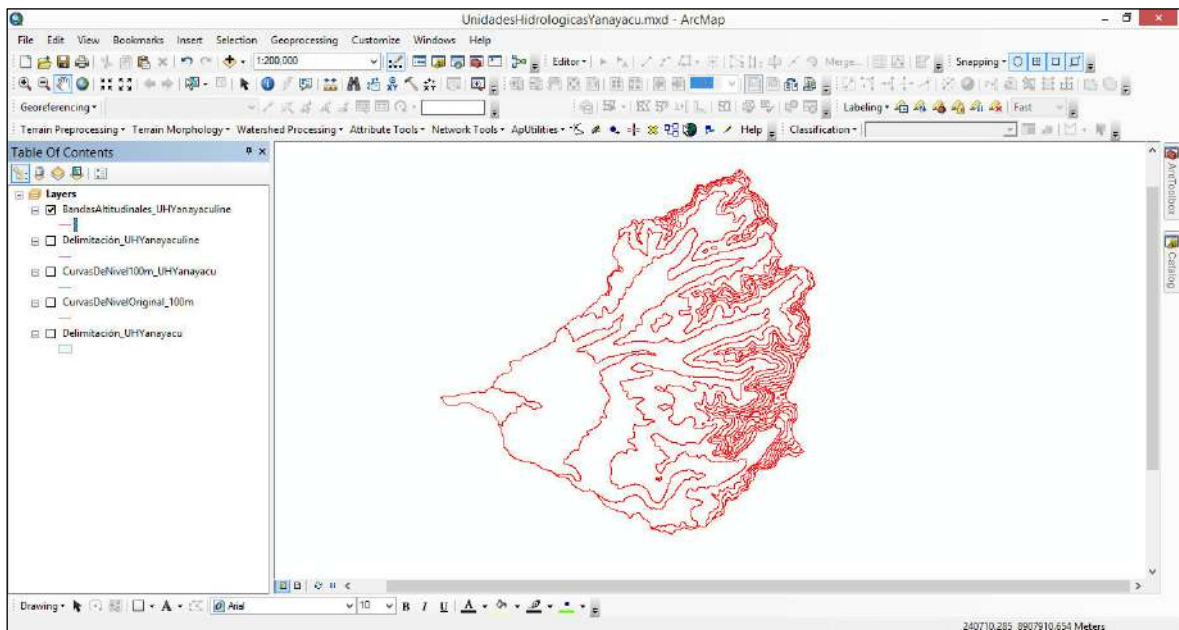


Figura 13. Resultado de la herramienta Merge.

7. Seguidamente se convirtió a tipo Polygon de la siguiente manera: *ArcToolbox* > *Data Management Tools* > *Features* > *Feature to Polygon*. El resultado fue: *BandasAltitudinales_UHYanayacu_v1.shp*. Ver figuras 14, 15 y 16.

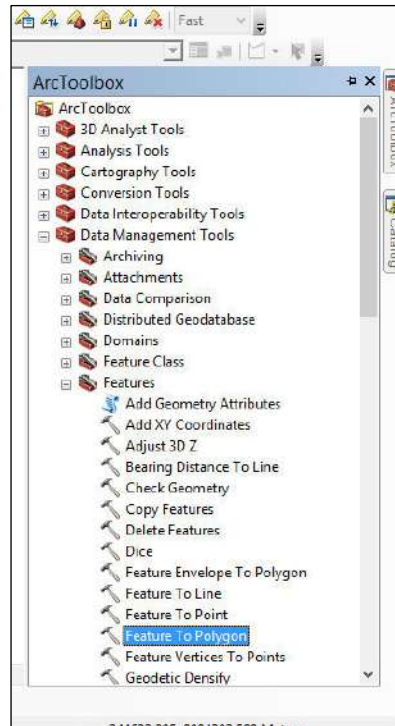


Figura 14. Ubicación de la herramienta *Features to Polygon*.

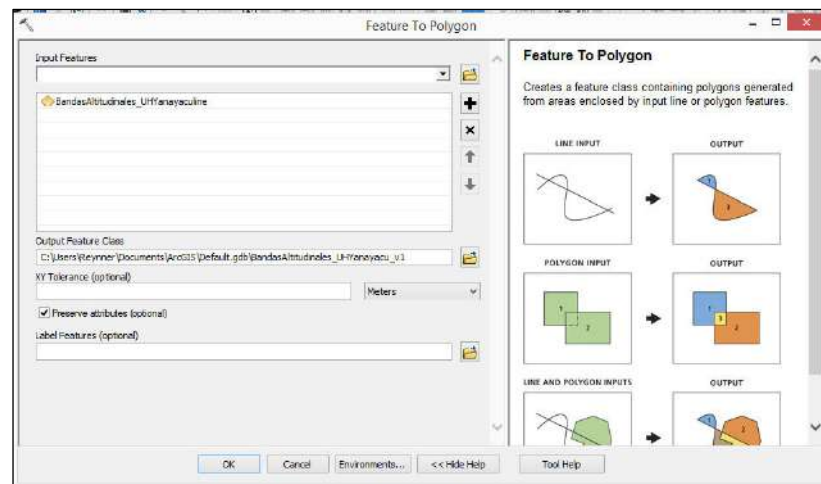


Figura 15. Uso de la herramienta *Feature to Polygon*

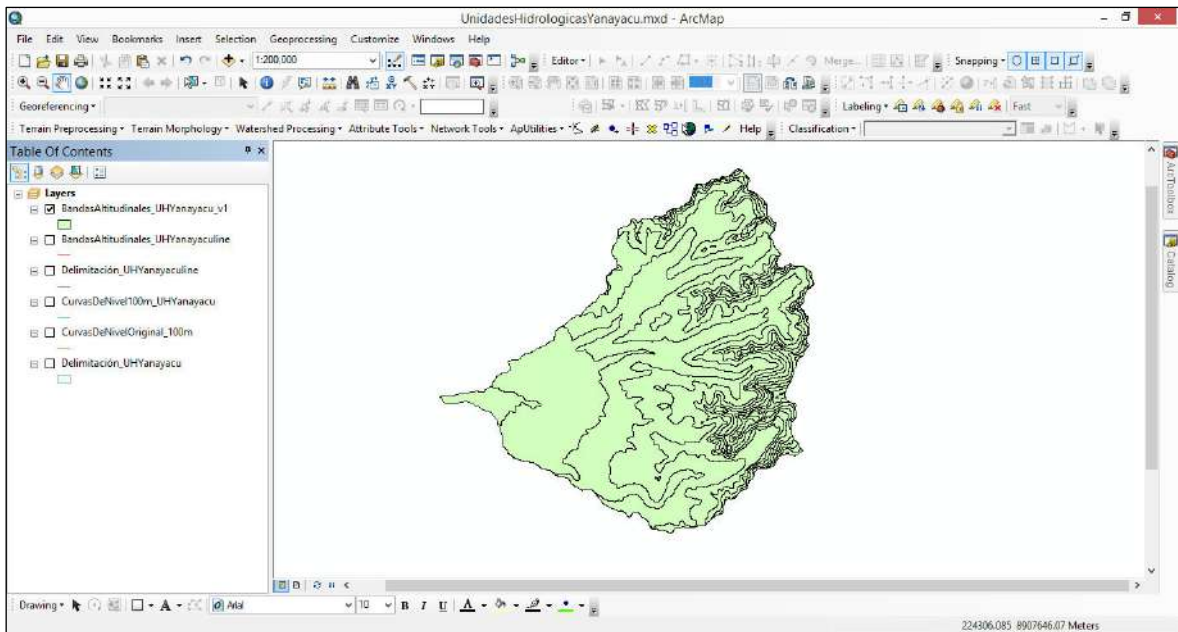


Figura 16. Resultado de la herramienta Feature to Polygon.

8. Se usó la herramienta *Merge* para incluir áreas que hayan sido dejadas fuera del rango de las bandas altitudinales a la que corresponden (se puede ver en la figura 17).

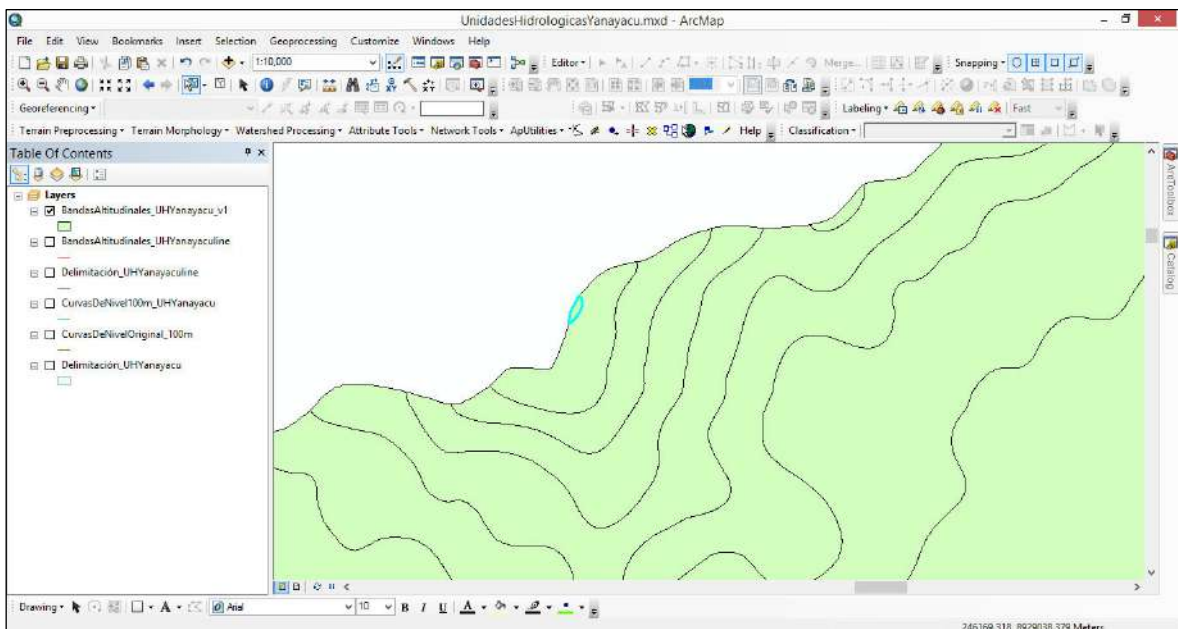


Figura 17. El área seleccionada no está dentro de la banda a la que corresponde.

9. Se seleccionó las áreas a unir. Usando la tecla *Shift* y dando *click* a ambas de manera que queden sombreadas ambas. Ver figura 18.

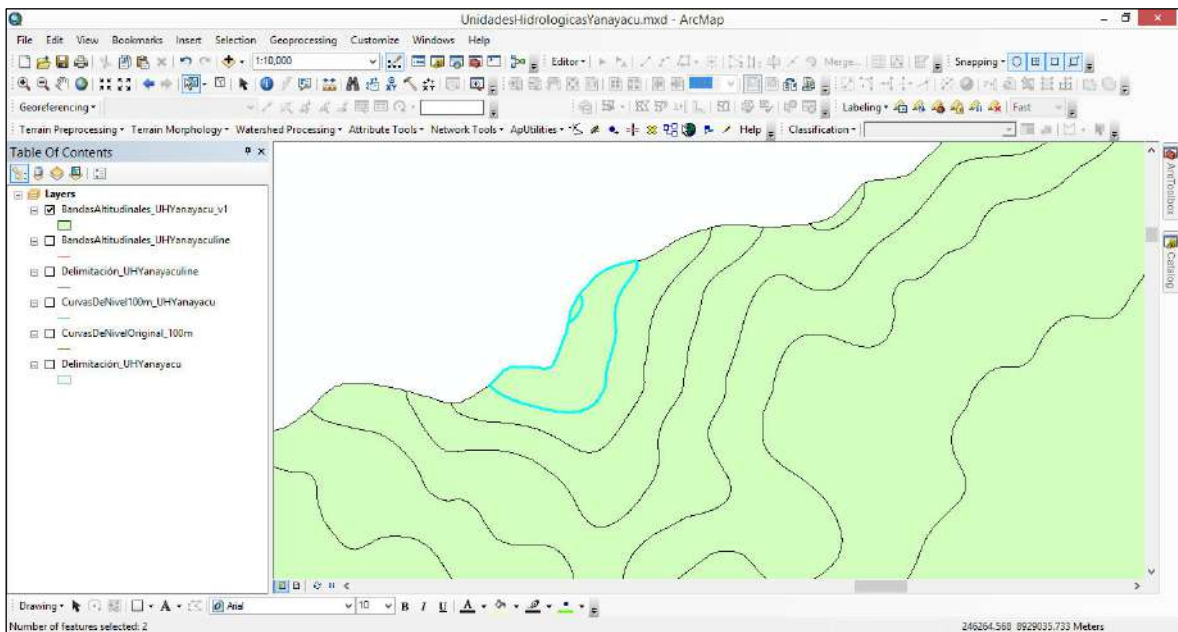


Figura 18. Se seleccionaron las áreas a unir.

10. Para editar el archivo *BandasAltitudinales_UHYanayacu_v1* se siguen los pasos de la figura 19: *Click derecho > Edit Features > Start Editing*.

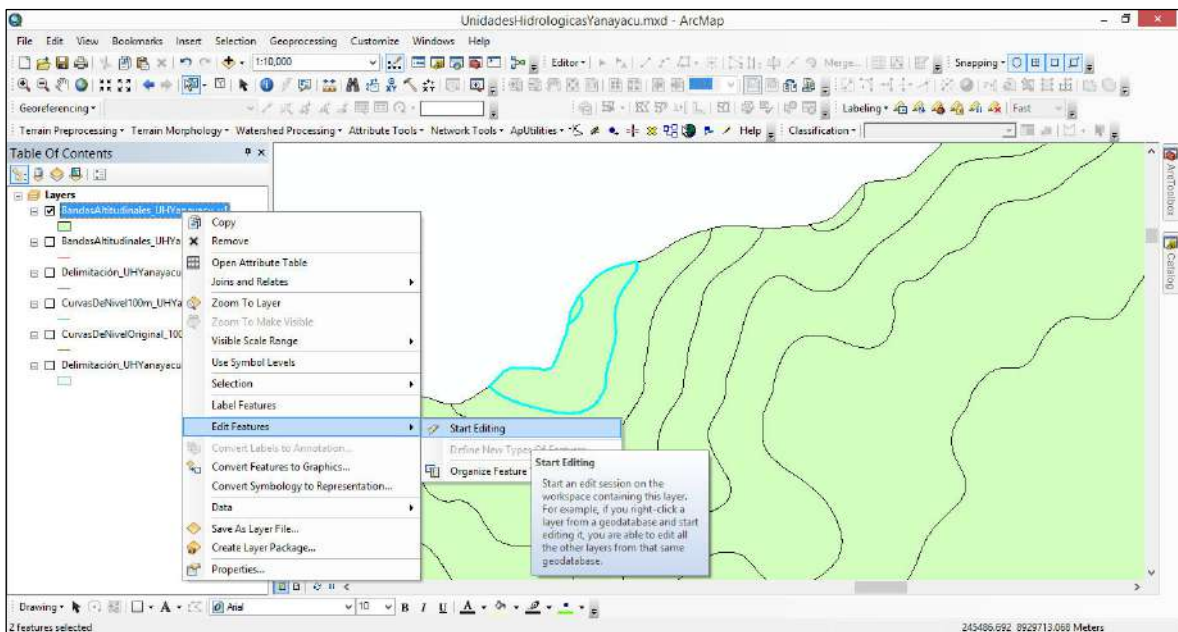


Figura 19. Se edita el archivo de bandas altitudinales.

11. Luego en la herramienta de Editor se usó *Merge*. Ver figura 20.

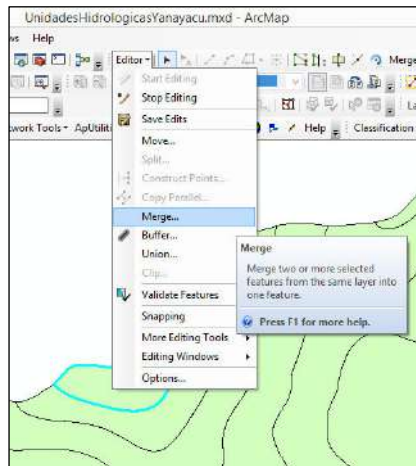


Figura 20. Uso de la herramienta Merge

12. Se escogió una de las áreas que a partir de ahora será considerada la que prevalece, las demás serán incluidas a esta. Luego dar OK. Ver figura 21.

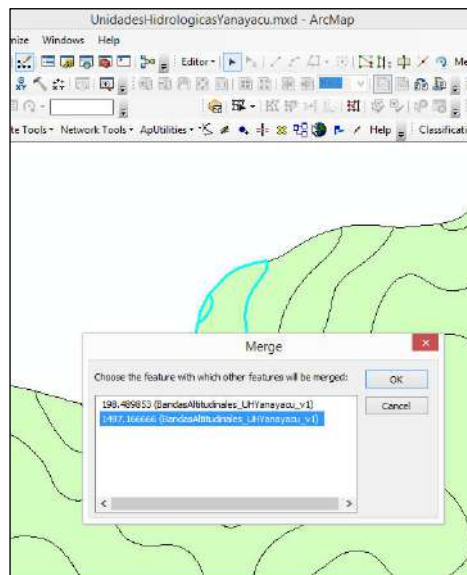


Figura 21. Se escogió el área que prevalece de todas las seleccionadas en la edición.

13. Finalmente, las áreas se unieron y forman parte de una misma banda altitudinal. Este proceso de unión de áreas dentro de una banda altitudinal se realizó a criterio del modelador. Ver figura 22.

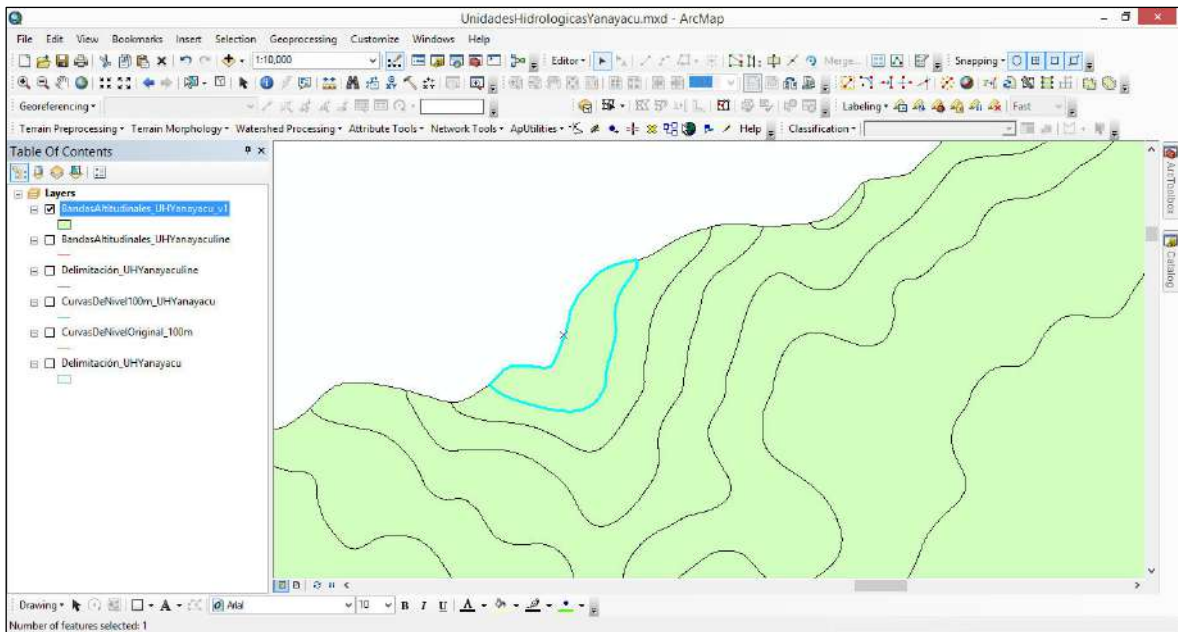


Figura 22. Se tiene una sola área que pertenece a una banda altitudinal.

Finalmente, en tercer lugar, se termina de crear en el mismo software la creación de las unidades hidrológicas.

Según la metodología Pfafstetter, Yanayacu es una unidad hidrográfica de nivel 6 (UH 137698), pero compuesta por 7 unidades hidrográficas nivel 7. Para el análisis y efectos de esta tesis se mantuvo esta distribución, sin embargo, solo se trabajó con 6 de estas unidades, esto debido a que una de las unidades es muy pequeña en comparación a las demás, por lo tanto fue incluido en una unidad vecina. Ver figura 23.

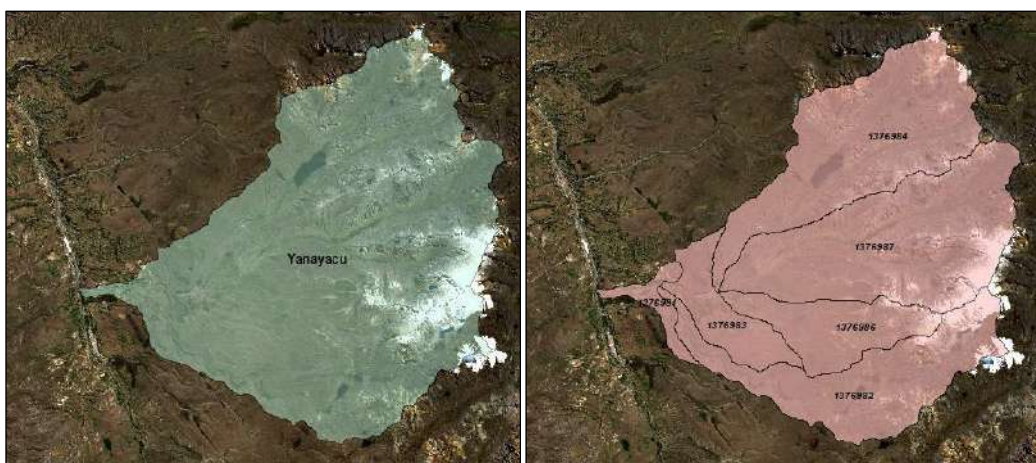


Figura 23. Izquierda: UH Yanayacu nivel 6. Derecha: Las 7 UHs nivel 7 de Yanayacu.

En función a los archivos trabajados: UnidadesHidrográficas_UHYanayacuNivel7.shp y BandasAltitudinales_UHYanayacu_v1.shp se procedió a trabajar con ellos con el fin de obtener las unidades hidrológicas.

1. Se tienen los dos archivos a trabajar, el de bandas altitudinales y el nivel 7 de Yanayacu. Ver figura 24.

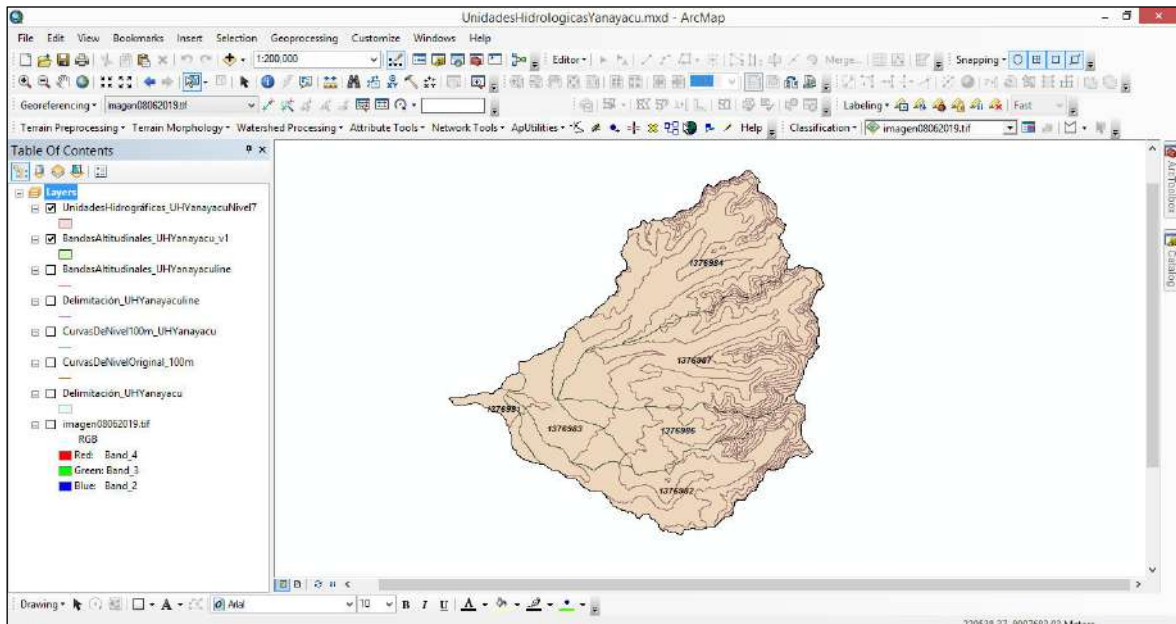


Figura 24. Los archivos de bandas altitudinales y codificación Pfafstetter.

2. El proceso empezó en definir el área de corte, ver figura 25, y que a partir de esta selección se usó la herramienta *Clip*.

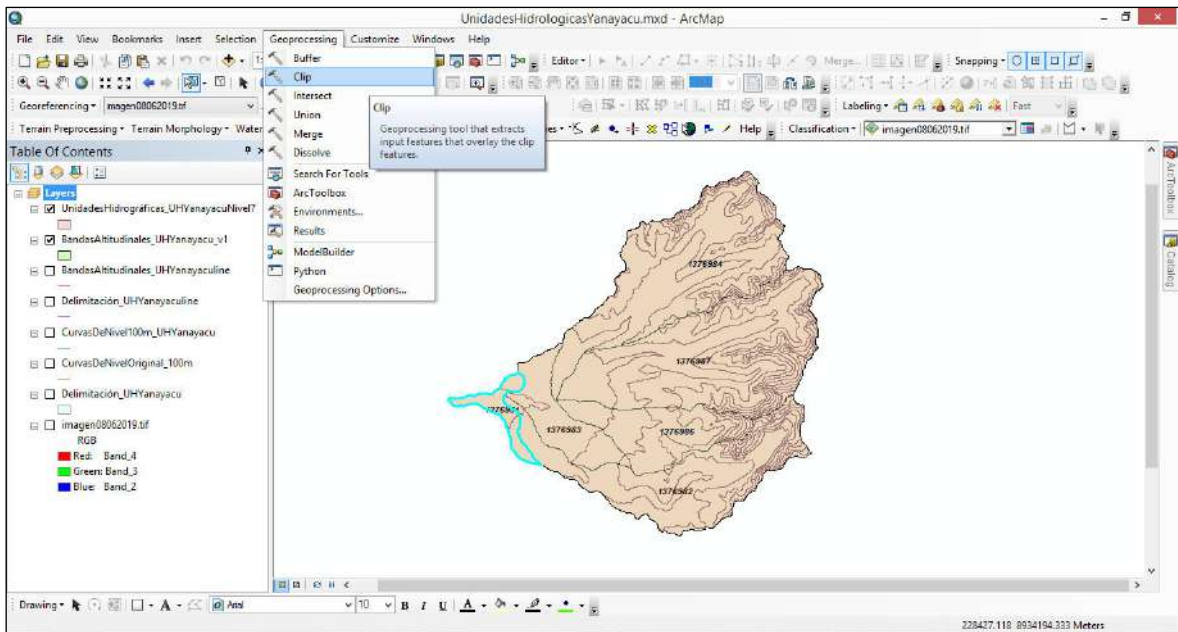


Figura 25. Selección de área y uso de herramienta Clip.

3. Luego, se seleccionó el orden del corte de manera que el archivo de bandas altitudinales sea cortado por el área seleccionada (conservar el orden es muy importante). Ver figura 26. El resultado de este corte se muestra en la figura 27.

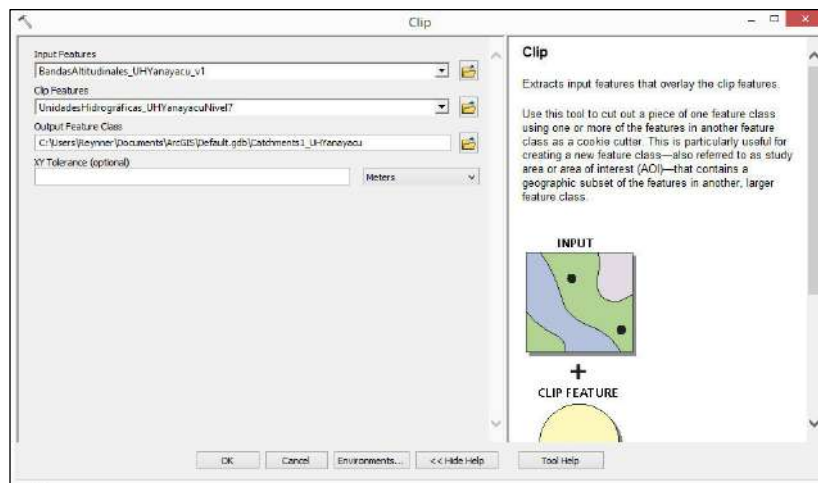


Figura 26. Uso de la herramienta Clip en el primer corte.

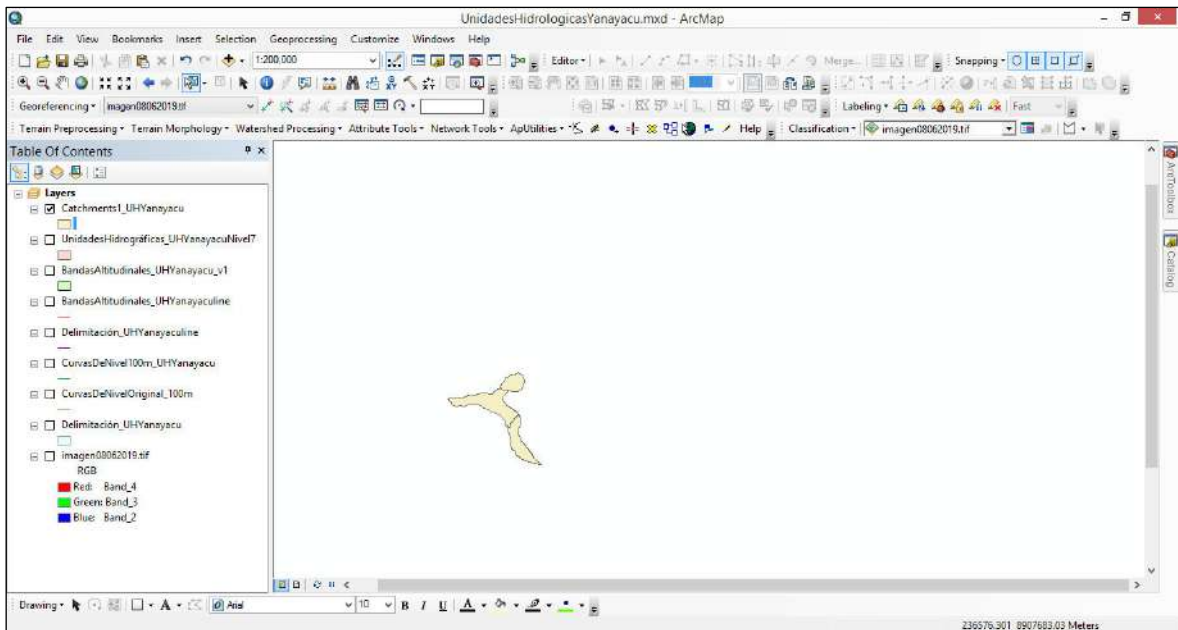


Figura 27. Resultado a partir de las bandas y las unidades hidrográficas nivel 7.

4. El proceso se repitió con las demás áreas que conforman la unidad hidrográfica Yanayacu. El resultado de los 6 cortes se presenta en la figura 28.

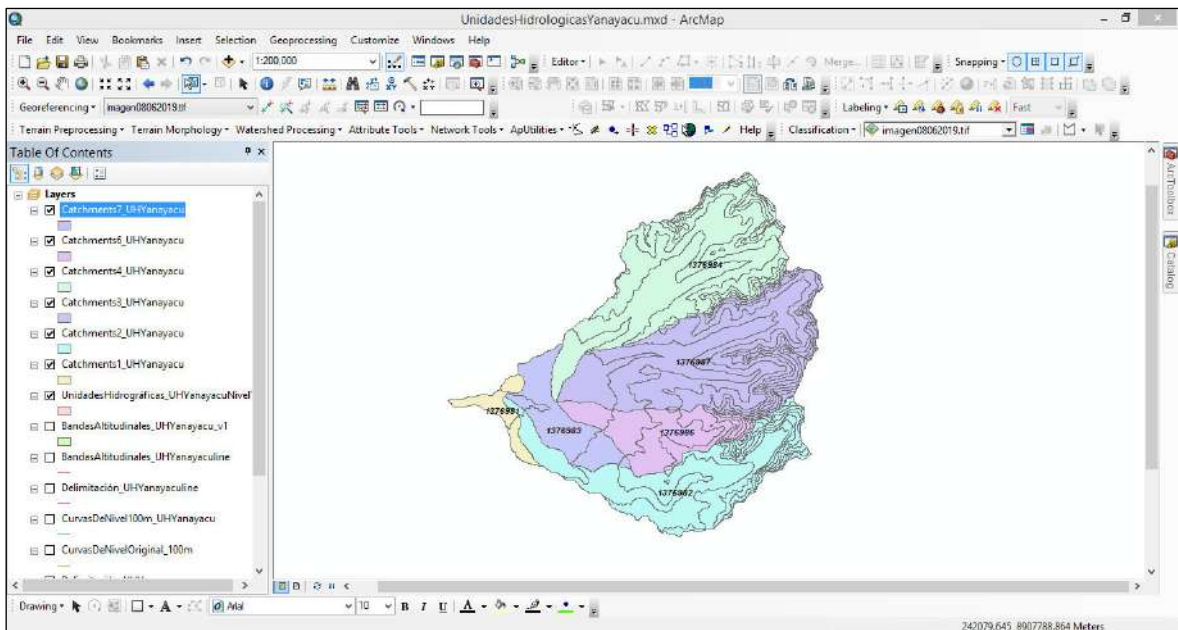


Figura 28. El resultado final de los seis cortes.

5. Luego, se procedió a unir todos los archivos cortados con la herramienta *Union*: *Geoprocessing > Union*. El proceso se muestra en las figuras 29 y 30.

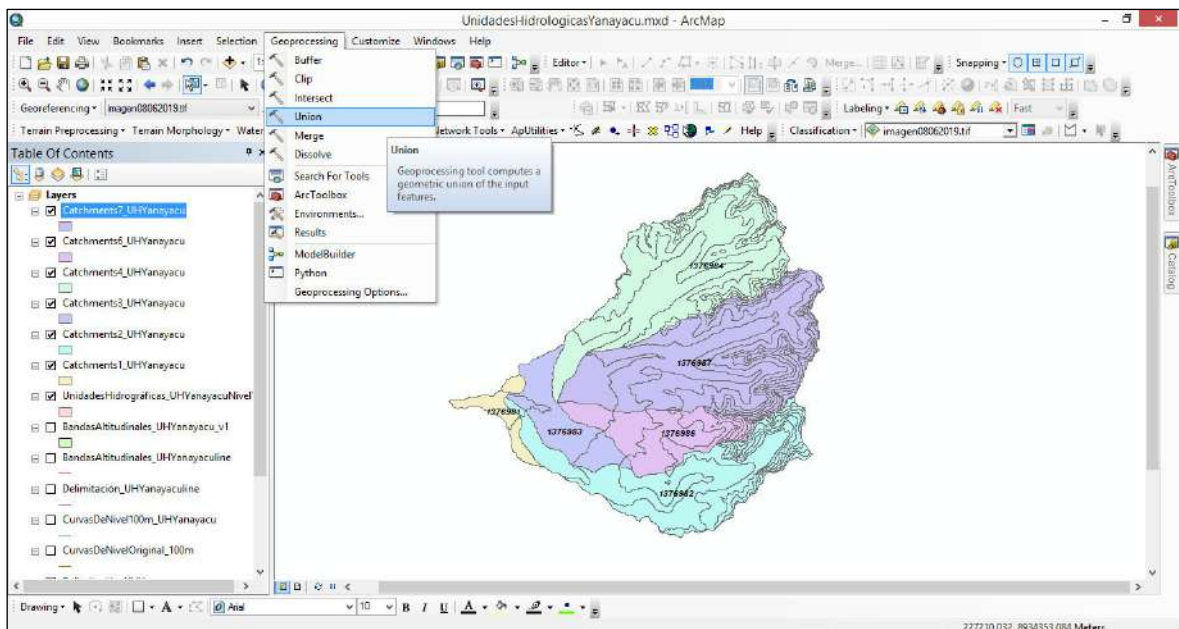


Figura 28. Ubicación de Herramienta Union.

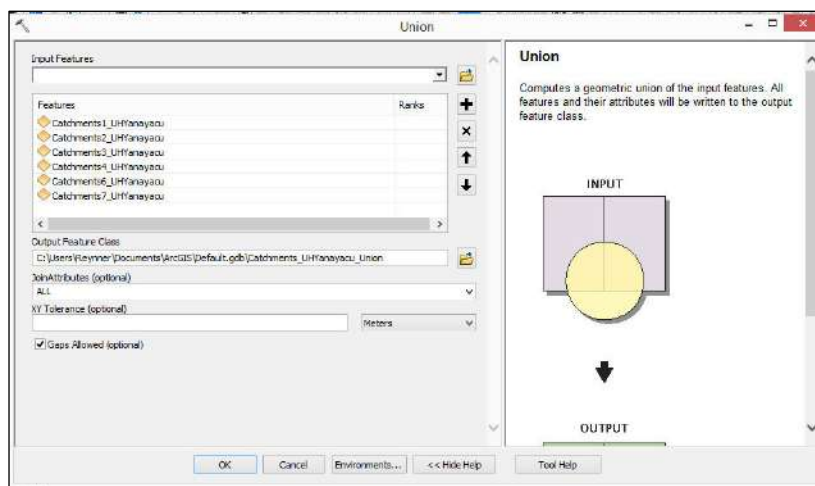


Figura 29. Uso y selección de los archivos a usar en la herramienta Union.

6. Seguidamente, se usó la herramienta *Multipart to Singlepart*: ArcToolbox > Data Management Tools > Features > Multipart to Singlepart. Ver figuras 30 y 31.

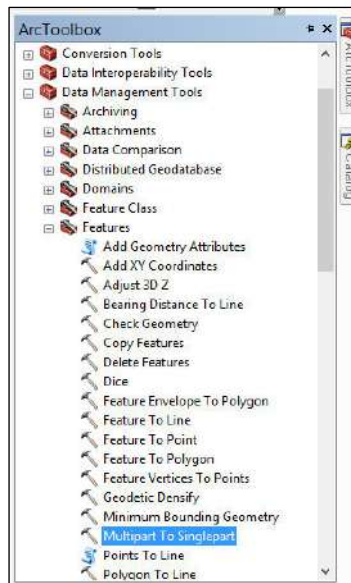


Figura 30. Ruta de la herramienta.

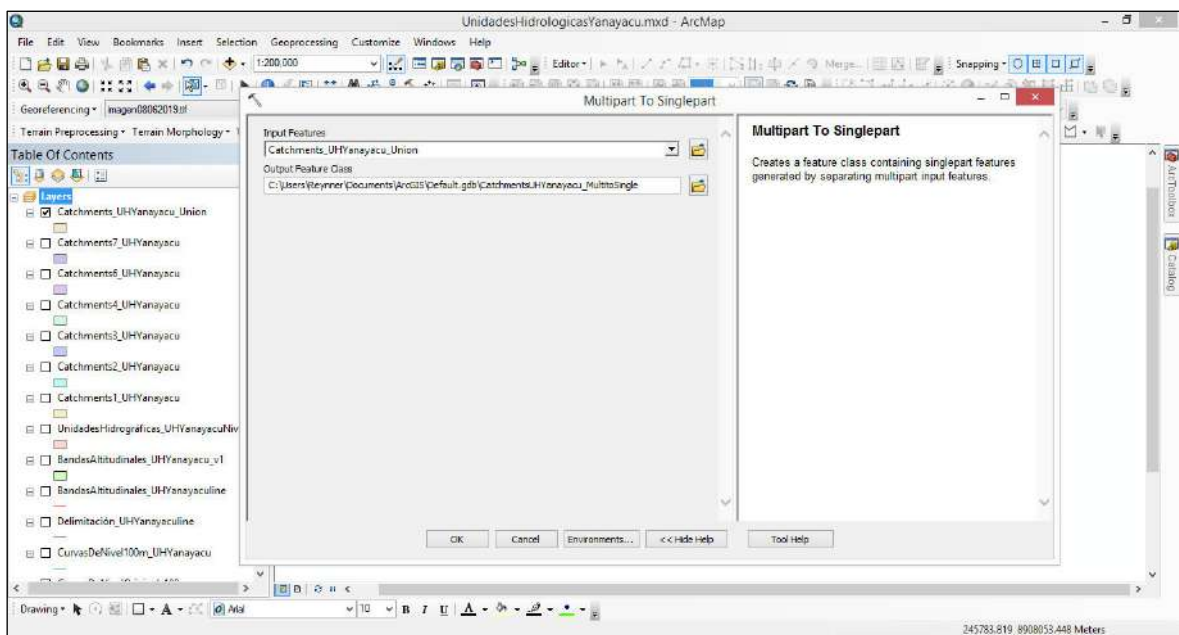


Figura 31. Uso de herramienta Multipart to Singlepart

7. Esta herramienta permitió separar todos los cortes en áreas individuales. Ver figura 32.

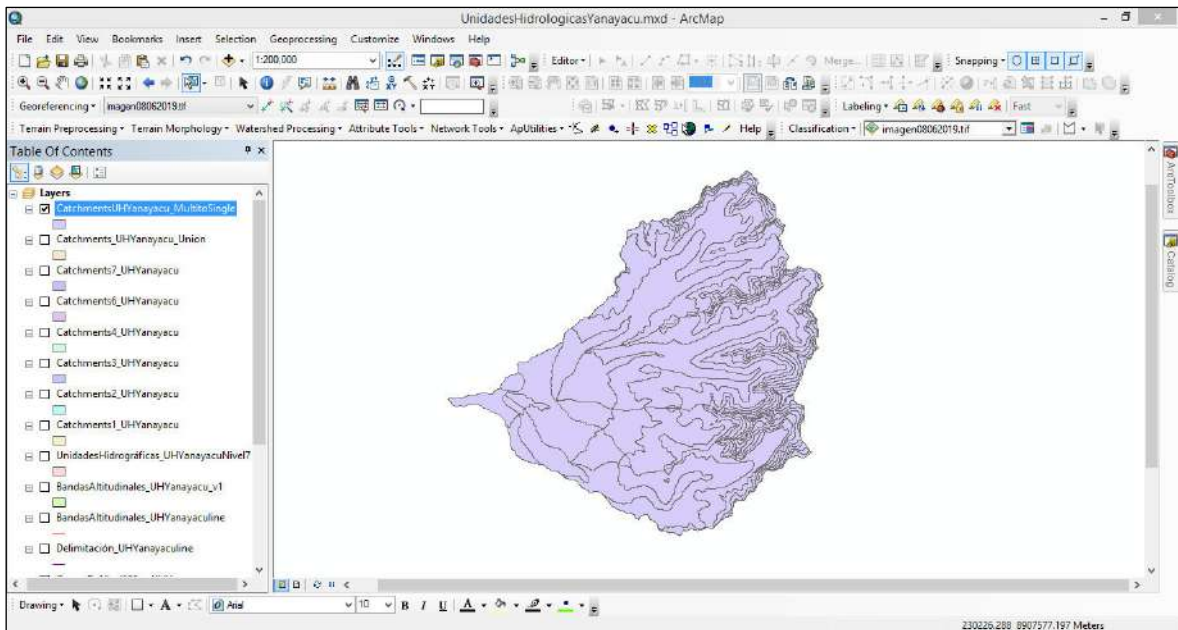


Figura 32. La herramienta permitió separar todas las áreas.

8. Se editó con la herramienta *Merge* de la barra *Editor* las áreas que no sean representativas, estas fueron agregadas a otras con mayor área.
9. El resultado final fueron las unidades hidrológicas o catchments que se usaron en el modelo hidrológico: *Catchments_UHYanayacu.shp*. Ver figura 33.

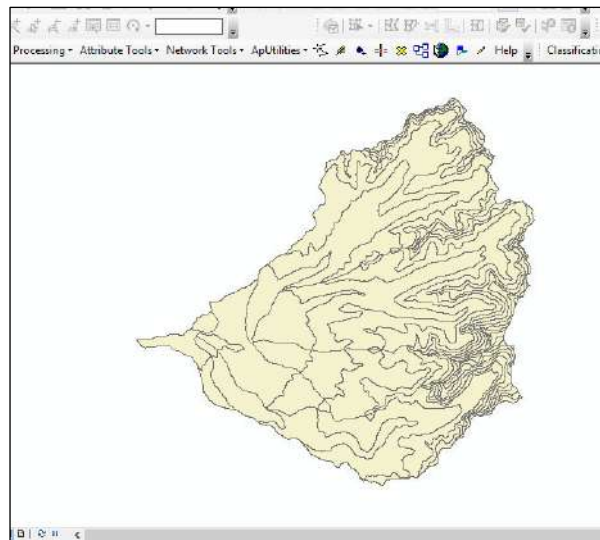


Figura 33. Resultado de la edición. *Catchments* de Yanayacu.

ANEXO 5. Procedimiento de la demarcación de la zona de influencia de lagunas sobre una unidad hidrológica.

El procedimiento se describe de la siguiente manera (se tomó como ejemplo la Laguna Jarpacocha):

1. Se usaron los shapfiles que delimitan a las lagunas. Es decir: archivo shapefile de la metodología Pfafstetter y las curvas de nivel de la cuenca.
2. Se procedió a crear un shapefile tipo *polyline* dentro del entorno de trabajo. Ver figuras 1 y 2.

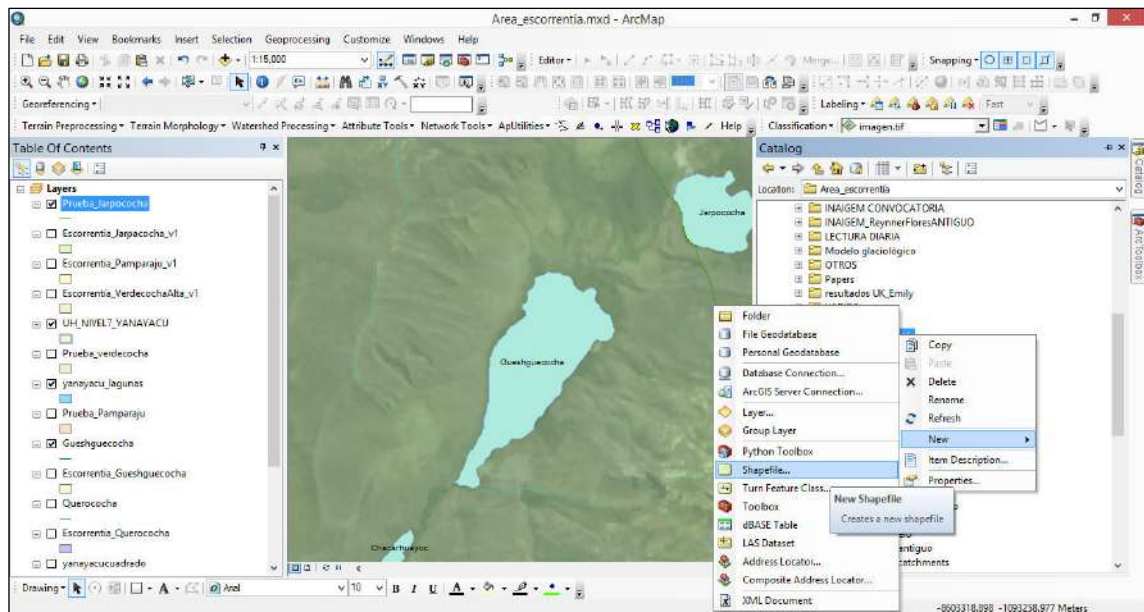


Figura 1. Creación de un shapefile

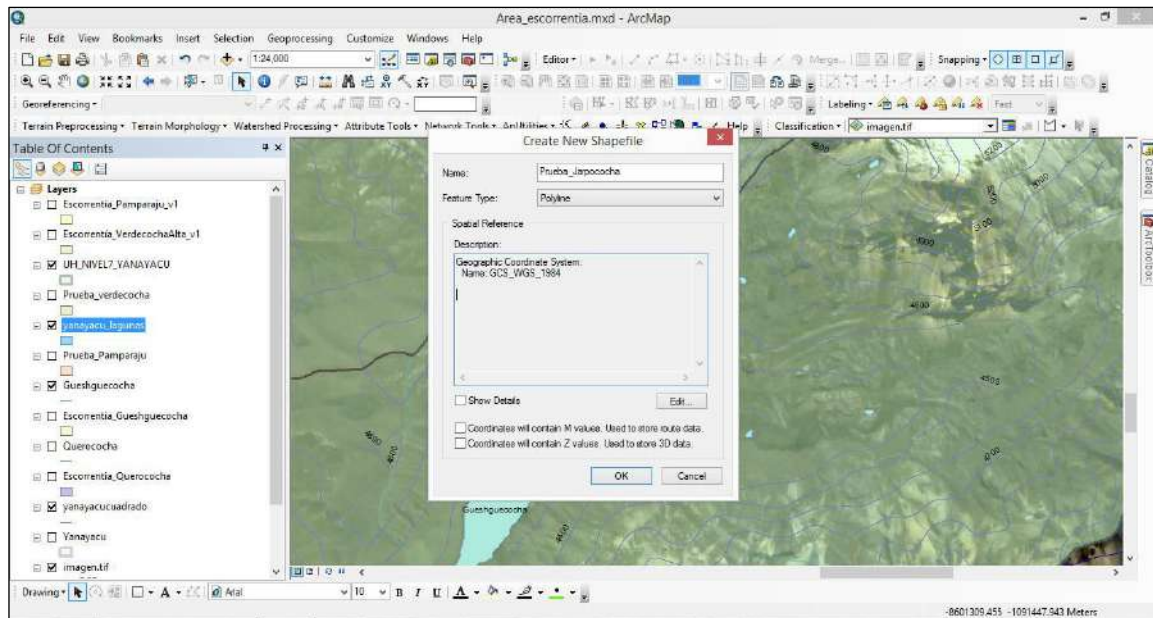


Figura 2. Creación de un shapefile de tipo polyline

- Una vez creado se edita el shape. Se procede a *Create Features*, tipo polígono, y luego editar vértices. Ver figuras 3 y 4.

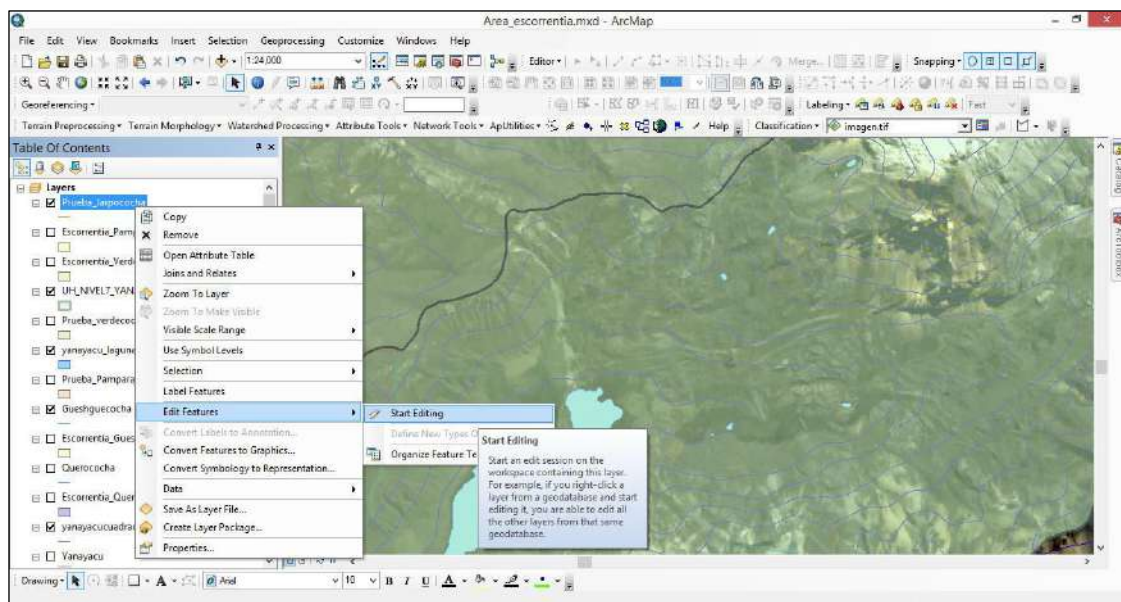


Figura 3. Edición del shape creado

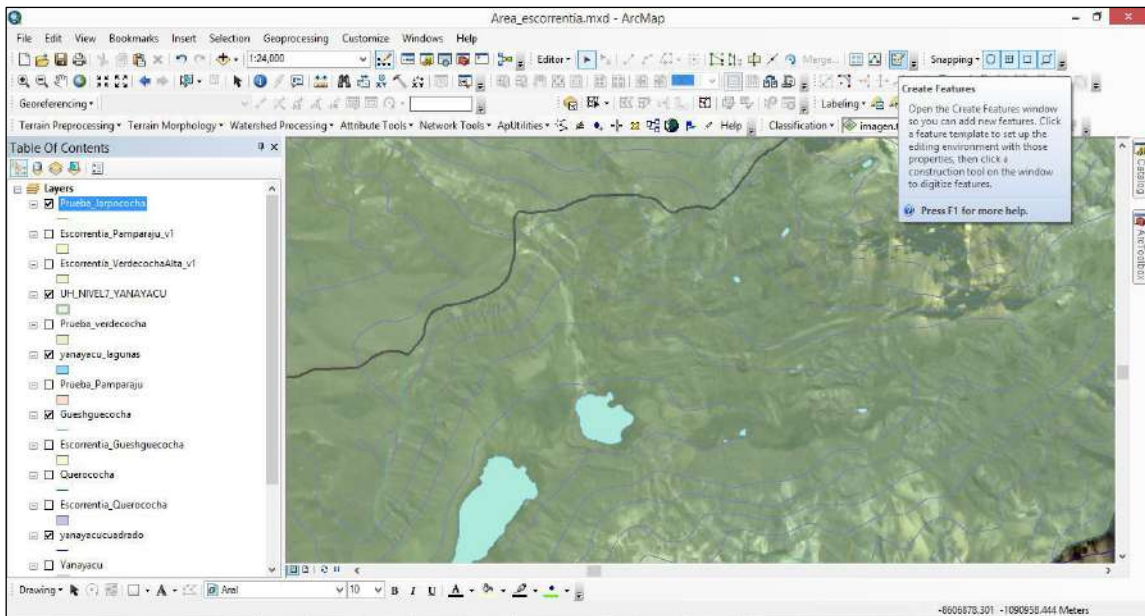


Figura 4. Creature fetures.

4. Se puede empezar con el vértice o punto de cierre de la laguna, luego a través de la ayuda de las curvas de nivel se delimitó, se puede complementar con la capa de nivel 7 de Pfafstetter como base con la herramienta *Reshape Feature Tool*, sombrear o recorrer por donde ya está definido los límites hasta donde sea necesario. Ver figuras del 5 al 9.

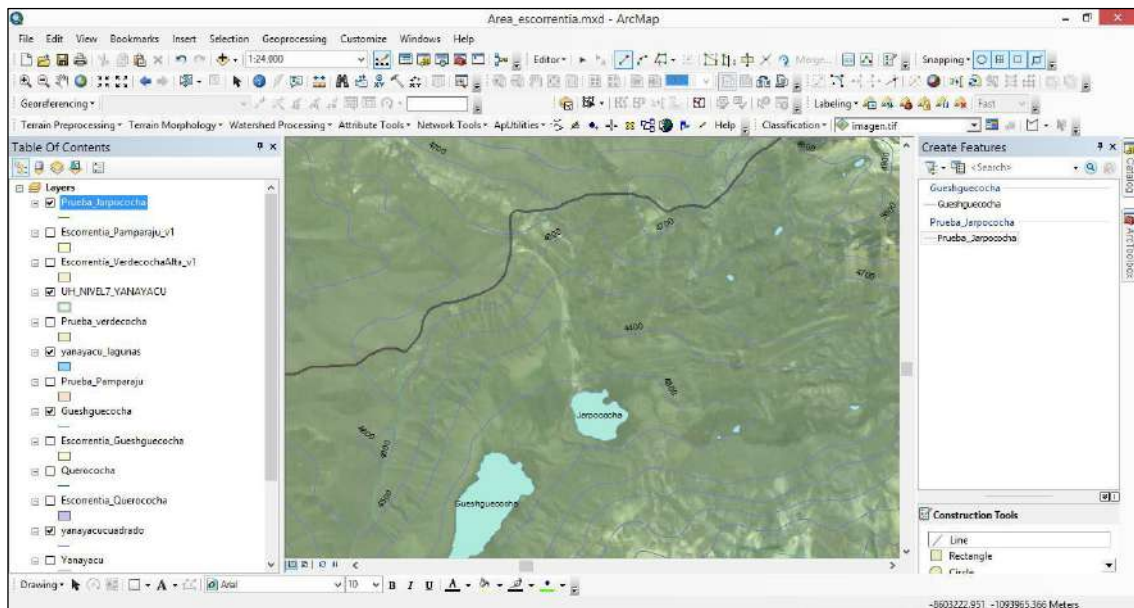


Figura 5. Seleccionar una línea que será la que definirá la delimitación.

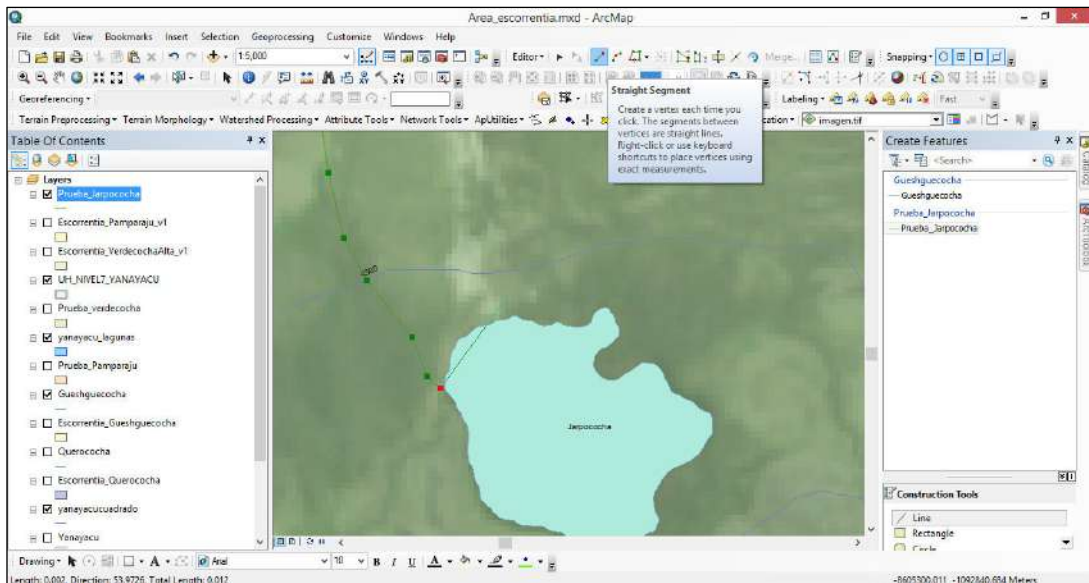


Figura 6. Se puede empezar a trazar los límites con la herramienta de segmento

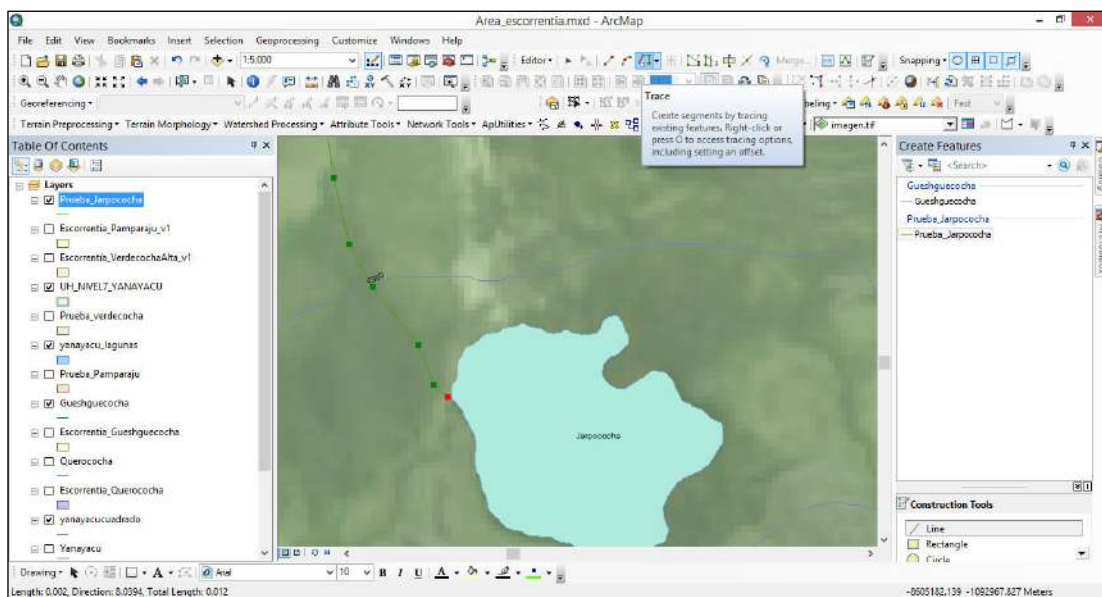


Figura 7. Cuando se desee seguir un límite ya definido se debe cambiar a otra herramienta (Trace)

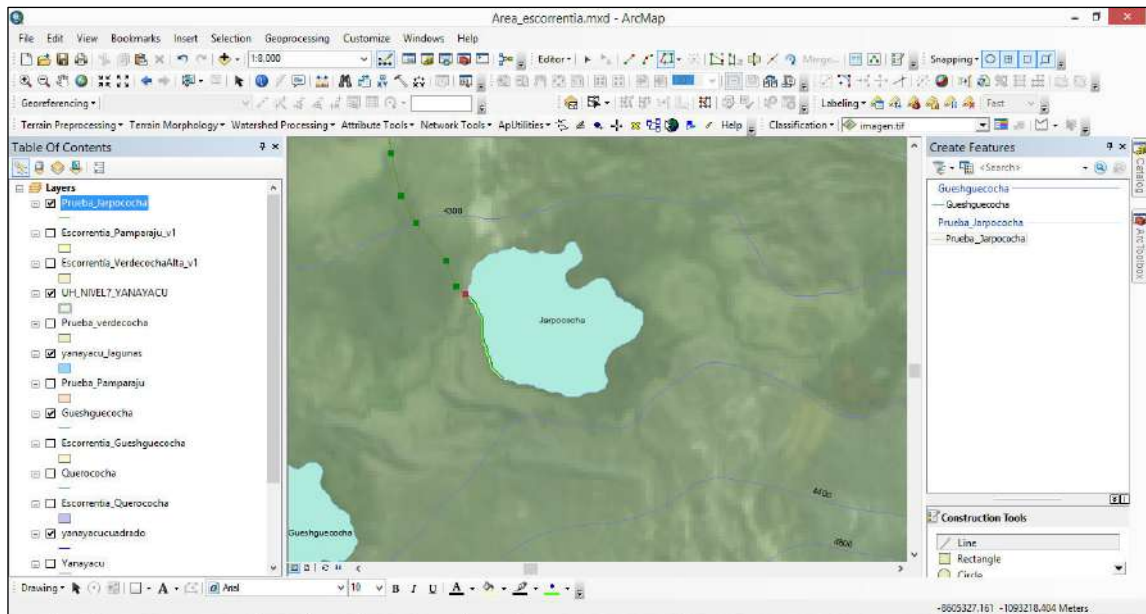


Figura 8. Delimitación con Trace.

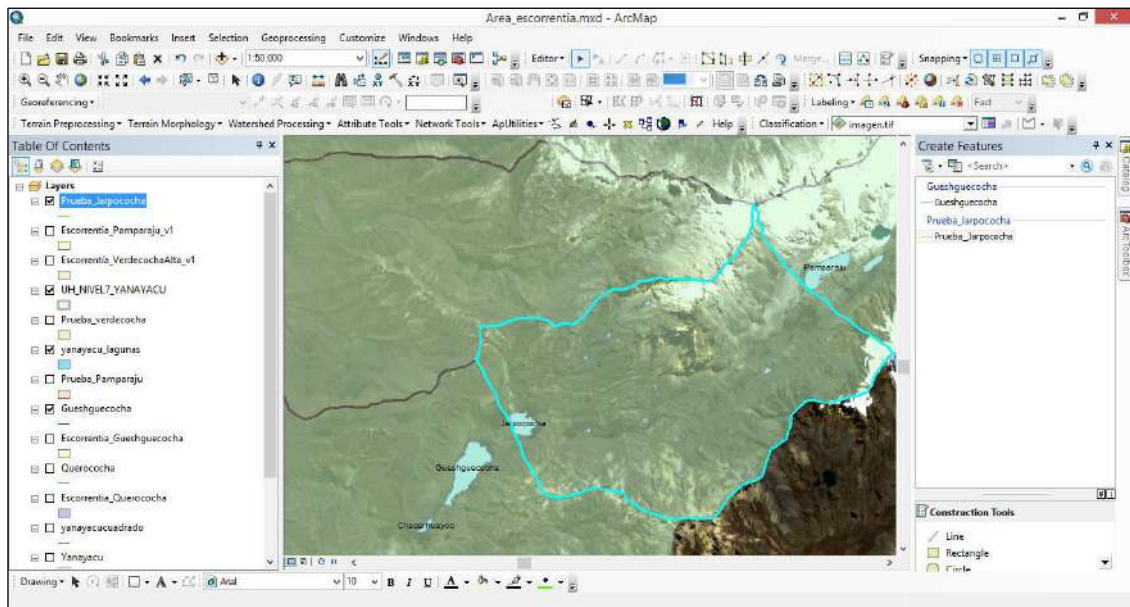


Figura 9. Y luego se complementa con la herramienta de segmento.

5. Luego cerrar el dibujo para crear el nuevo shape tipo *polygon*. Ver figura 10.

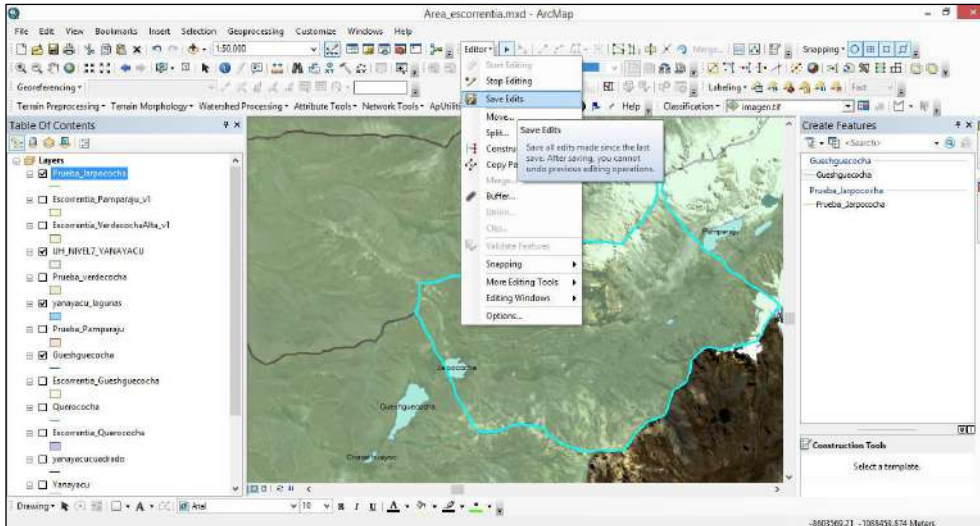


Figura 10. Para que salga bien el shape se debe crear como polyline y luego editar el área de trabajo para luego recién se convierte en polygon.

6. Seguidamente se convierte a tipo *polygon* para que calcule el área. Ver figuras 11 y 12.

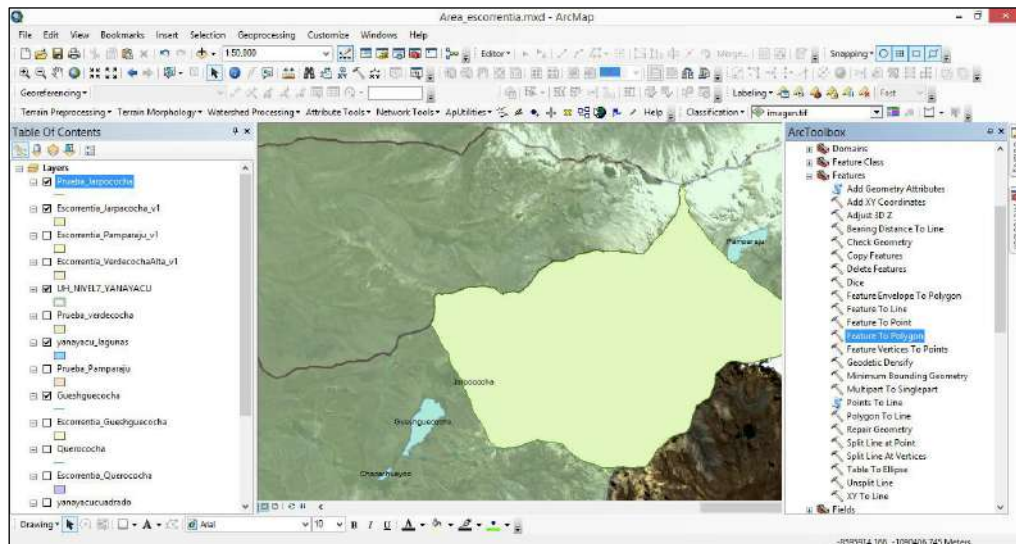


Figura 11. Finalmente convertir a *polygon*.

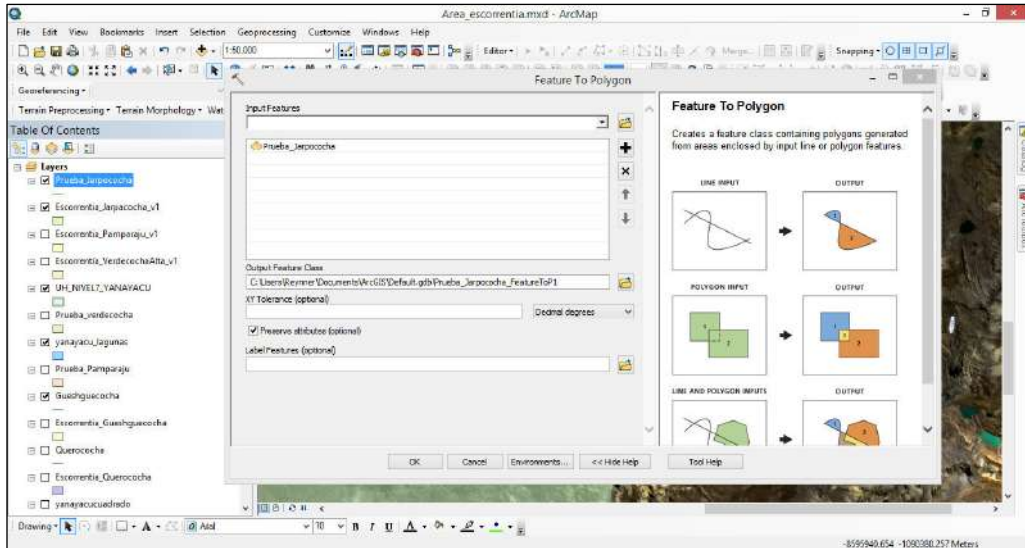


Figura 12. Dar OK y se tiene el área de influencia definida.

ANEXO 6. Script de la composición de imágenes Sentinel 2 que se desarrolló en la tesis.

<https://code.earthengine.google.com/bef3fb6b78026d1eebad816fbd3511f9>

```
// Frames y animaciones en Google Earth Engine
var ColeccionSentinel= ee.ImageCollection("COPERNICUS/S2_SR")
    .filterBounds (geometry)
    .filterDate ('2019-01-01', '2019-06-30')
    .filterMetadata ('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE', 'Less_Than', 50)
    .sort('CLOUDY_PIXEL_PERCENTAGE')
    .map(function (image){return image.clip(geometry)});

print(ColeccionSentinel);
// Declaramos una nueva variable bajo la que realizar composiciones RGB o índices
var ComposicionRGB = {
  bands: ['B11','B8','B4'],
  crs: 'EPSG:4326',
  min: 0.0,
  max: 5000.0,
  opacity:1,
  framesPerSecond: 2,
  dimensions: '1000',};

// Generamos el GIF animado del timelapse e imprimimos su URL para descarga
var AnimacionGIF = ColeccionSentinel.getVideoThumbURL (ComposicionRGB);
print (AnimacionGIF);

// Generamos la secuencia de frames que forman el timelapse e imprimimos su URL para
descarga
var FramesPelicula = ColeccionSentinel.getFilmstripThumbURL (ComposicionRGB);
print (FramesPelicula);
```

ANEXO 7. Script del cálculo del NDVI y la Clasificación Supervisada que se desarrolló en la tesis.

<https://code.earthengine.google.com/ae179c6e5d8366e42d6f67b32f94cfb>

```
var imagen7 =
ee.Image('COPERNICUS/S2_SR/20190608T152649_20190608T152646_T18LTQ');
print(imagen7);
Map.addLayer(imagen7,vis1,'Sentinel5');
Map.centerObject(table2,11);
//Cálculo del NDVI
var NDVI7 = imagen7.normalizedDifference(['B8','B4']);
//var ColeccionPaletas = require('users/gena/packages:palettes');
//var paleta = ColeccionPaletas.niccoli.cubicyf[7]; //reverse()
Map.addLayer(NDVI7, imageVisParam2,'NDVI5',1);
//Cálculo de la clasificacion supervisada
var muestra =
Vegetacion1.merge(Vegetacion2).merge(Vegetacion3).merge(Cultivos).merge(Suelo).merge(CuerposAgua).merge(Glaciario).merge(Otros);
Map.addLayer(muestra, {}, 'Puntos', 1);
var bandas = ['B4','B3','B2'];
var entrenamiento = imagen7.select(bandas).sampleRegions({
  collection:muestra,
  properties: ['Cobertura'],
  scale:10
});
var clasificacion = ee.Classifier.smileCart().train({
  features: entrenamiento,
  classProperty:'Cobertura',
  inputProperties:bandas
});

var clasi = imagen7.select(bandas).classify(clasificacion);
//var paleta1 = ColeccionPaletas.niccoli.cubicyf[7];
```

```
Map.addLayer(clasi,{ min:0,max:7,'palette':['98ff00','00d22d','dd00e0','d60000','d68000','00
66ff','29d6d6','fbff00'],opacity:1},'Clasificacion');
//Descarga de la clasificacion
Export.image.toDrive({
  image: clasi,
  description: 'ClasificacionSupervisada',
  scale: 10,
  region: geometry2});
//Descarga de la imagen satelital
Export.image.toDrive({
  image: imagen7.select('B1','B2','B3','B4','B5','B6','B7','B8'),
  description: 'ImagenSatelital',
  scale: 10,
  region: geometry2});
Map.addLayer(table, {}, 'Utcuyacu');
Map.addLayer(table2, {}, 'Yanayacu');
```

ANEXO 8. Determinación de la cobertura de suelo a través de la aplicación de la plataforma Google Earth Engine y ArcGis.

El procedimiento para calcular las coberturas de suelo se desarrolló a través de 4 etapas: la primera, se creó una cuenta (gratuita) en la plataforma de GEE; la segunda, fue implementar un script usando la plataforma de GEE para seleccionar una imagen satelital idónea para el desarrollo de la tesis; tercera, se realizó una clasificación supervisada de esa imagen, teniendo en cuenta el NDVI e información de visitas de campo; y cuarta, se editó el resultado en ArcGis y se unió esta clasificación con delimitaciones ya definidas anteriormente (bloques de riego, cuerpos de agua y glaciares).

Primero: Creación de una cuenta en GEE:

Previo a todo tipo de cálculo o análisis dentro de la plataforma fue necesario crearse una cuenta. Definiremos los pasos:

1. Se ingresó al siguiente enlace: <https://earthengine.google.com/> o a través de un buscador escribir: Google Earth Engine. La figura 1 muestra la pantalla de inicio de GEE.

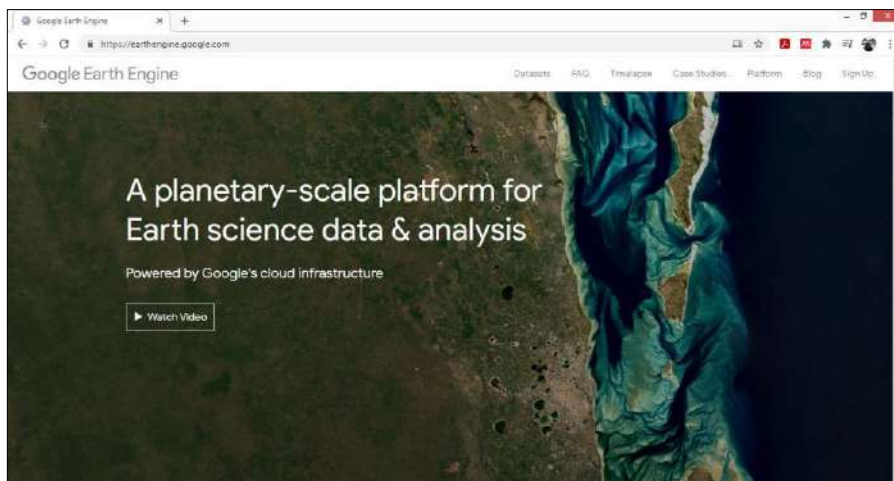


Figura 1. Página de inicio de GEE.

2. Luego en la parte superior derecha: *Sign Up*.
3. Se completa la información requerida donde corresponda (ver figura 2), aceptar los términos y condiciones. Luego *Submit*.

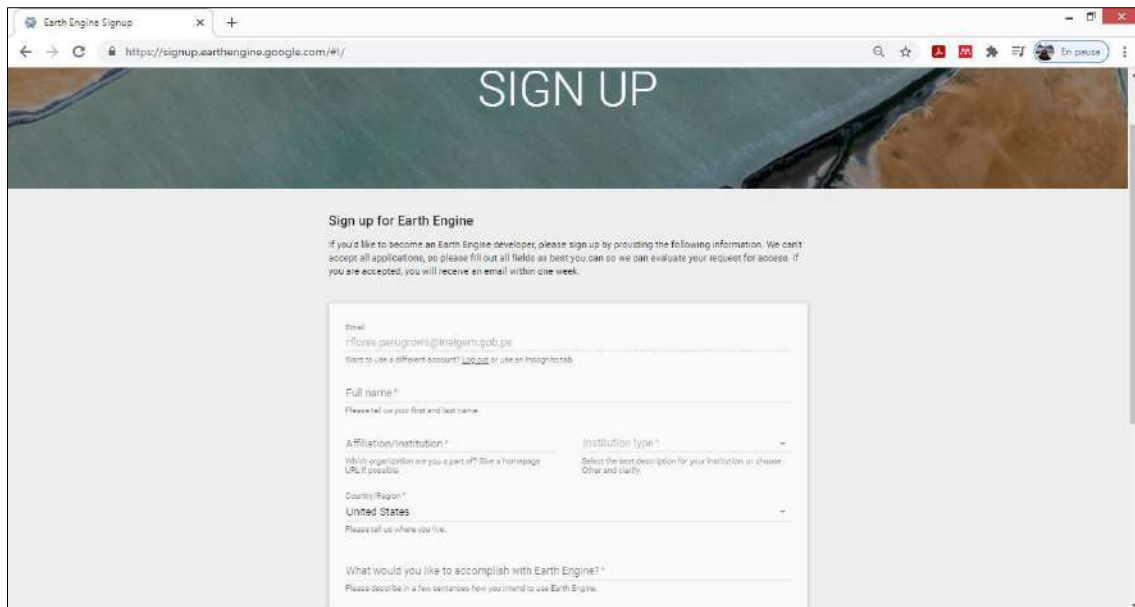


Figura 2. Completar la información solicitada.

4. Se debe esperar a que Google responda a la solicitud, revisar la bandeja de entrada del correo ingresado luego de unas horas.
5. Finalmente, llegó un correo de Google con la información complementaria para que se pueda empezar a trabajar en la plataforma.

Segundo: Script para la imagen satelital

Para poder trabajar en la identificación de los tipos de cobertura presentes en las zonas de trabajo fue necesario que la imagen sea de acceso libre, que tenga una buena resolución, poca presencia de nubes y que sea contemporánea (reciente); en función a estos requisitos se definió que la imagen sería usada a través de la plataforma Google Earth Engine, sea una imagen Sentinel 2 nivel 2A, entre los meses de Enero y Junio del año 2019 y que la presencia de nubes respecto a las zonas de estudio sean mínimas.

A través de la implementación de un script (ver figura 3) se elaboró una composición de imágenes que cumplan con los requisitos establecidos (ver figura 4).

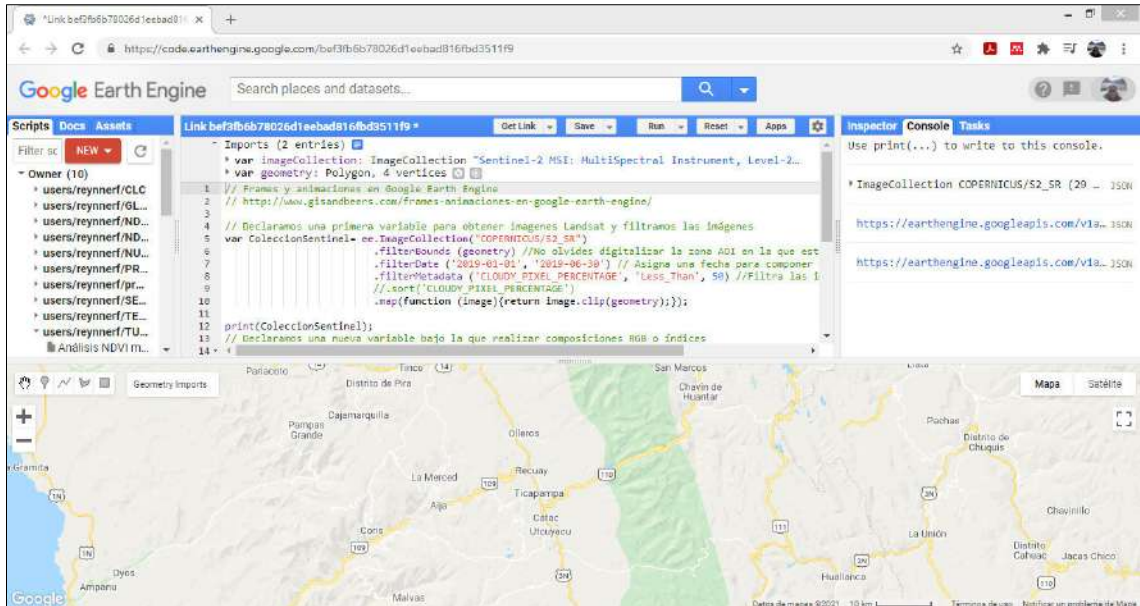


Figura 3. Desarrollo del script en la plataforma de GEE.

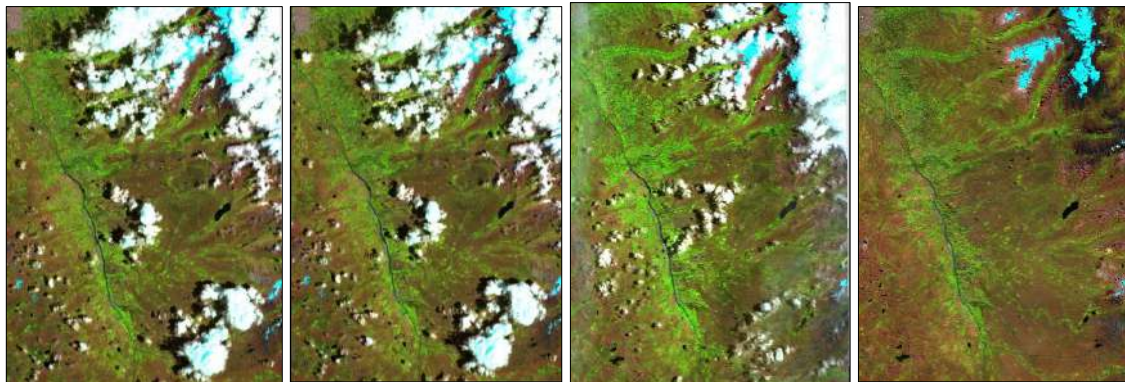


Figura 4. Composición de imágenes Sentinel 2 a partir del script.

Luego del análisis y comparación se determinó que la mejor imagen que cumple con los requisitos es: 'COPERNICUS/S2_SR/20190608T152649_20190608T152646_T18LTQ'. Dicha imagen tiene fecha de 08 de Junio de 2019. Por lo tanto, el trabajo de la tesis fue tomado a partir de esta imagen (ver Figura 5).

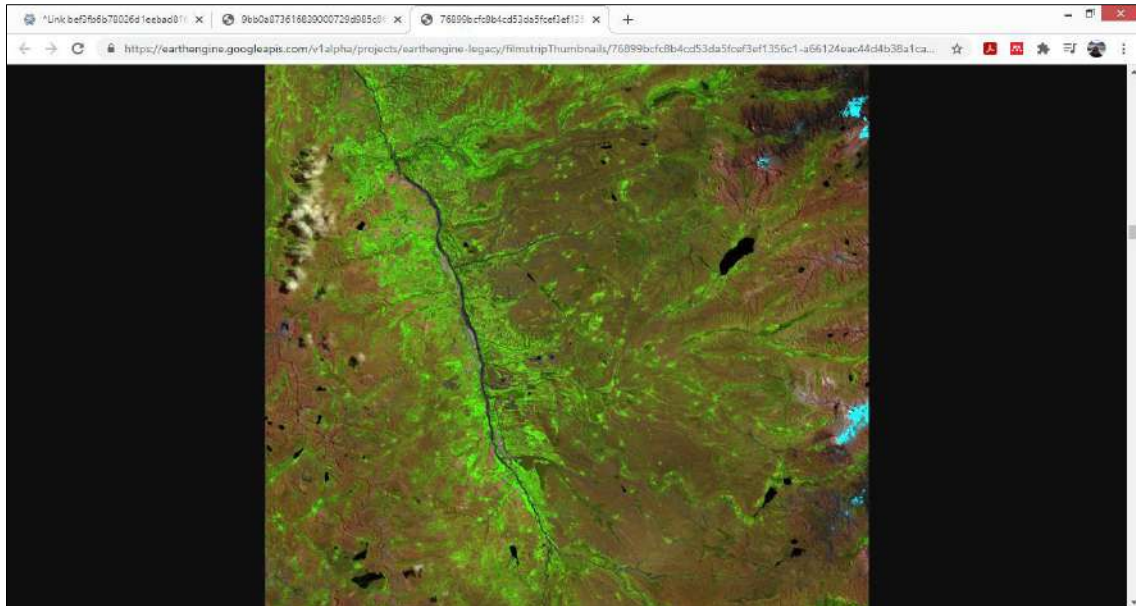










Figura 5. Imagen que cumple mejor con los requisitos.

Tercero: Clasificación supervisada:

Una vez definida la imagen se trabajó en los distintos tipos de cobertura presentes en la UH, entonces se tomó en cuenta para la supervisión clasificada 8 tipos de cobertura, las cuales estaban asociados a un tipo o tipos de suelo, un color y a un rango de valores de NDVI. Los tipos de cobertura en donde se tomó mayor interés fueron los relacionados a la vegetación, es decir: pajonal andino, matorrales, humedales y bosques principalmente; esto es, debido a que se tiene información previa de delimitación de tierras de cultivo, lagunas y glaciares en formato shape y que sirvieron también para mejorar más adelante la diferencia que hay entre los tipos de suelo.

Los tipos de cobertura se definieron a través de una clasificación supervisada que se pueden ver en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1

Identificación de la clasificación supervisada			
N°	Descripción	Color	Tipo de suelo
1	Vegetación baja		Pajonal andino
2	Vegetación media		Matorrales y humedales
3	Vegetación alta		Bosques
4	Cultivos		Cultivos
5	Suelo		Suelo desnudo o poca vegetación
6	Cuerpos de agua		Lagos, lagunas
7	Glaciar		Glaciares
8	Otros		Formaciones rocosas, infraestructura, etc

Nota. Elaboración propia

Esta clasificación se apoyó en rangos de valores de NDVI (Tabla 2), también se apoyó con imágenes de Google Earth Pro en distintas épocas del año y de dos visitas de campo a la UH Yanayacu para conocer mejor sus ecosistemas.

Tabla 2. Rango de valores de NDVI

N°	Descripción	Rango NDVI
1	Vegetación baja	0.2 – 0.5
2	Vegetación media	0.45 – 0.75
3	Vegetación alta	0.70 – 0.85
4	Cultivos	0.60 – 0.80
5	Suelo	0.15 – 0.25
6	Cuerpos de agua	no se definió
7	Glaciar	no se definió
8	Otros	no se definió

Nota. Elaboración propia

Los pasos para efectuar la clasificación fueron los siguientes:

1. Se definió la imagen a usar en la tesis.
2. Se procedió a realizar el cálculo del NDVI (índice de vegetación de diferencia normalizado) para que la clasificación supervisada sea en función a esta y a la imagen satelital correspondiente (se debe usar las bandas que sean convenientes

para una mejor visualización). Esto se realizó a través del álgebra de bandas satelitales. Dónde: $NDVI = (NIR-RED)/(NIR+RED)$.

3. Se le aplicó una gama de colores a la imagen satelital y al NDVI para una mejor identificación de las zonas a clasificar.
4. Se procedió con la clasificación supervisada definiendo las coberturas más comunes en las imágenes. Las cuales son: suelo desnudo, vegetación baja, vegetación alta, etc. Ver figura 6.

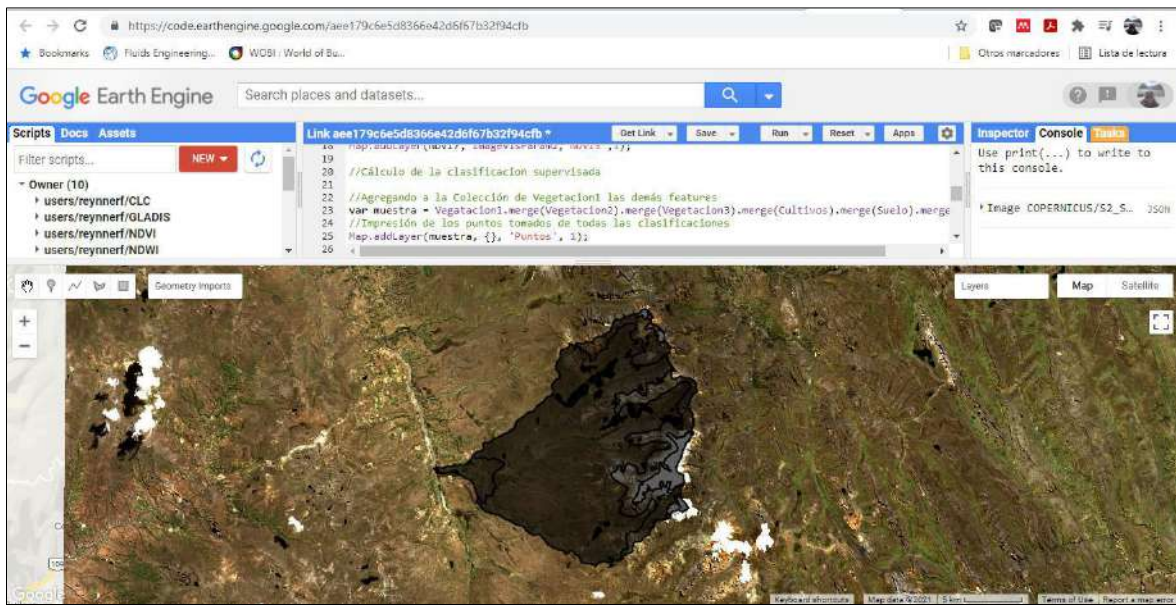


Figura 6. Imagen satelital, delimitación de trabajo y clasificación supervisada.

5. Se definieron al menos 50 puntos por cada una de las coberturas, esto es para que pueda generar una mejor clasificación.
6. Se descargó la imagen de la nube a nuestro Google Drive en formato .tif con una resolución de 10 m.

Finalmente, luego de la clasificación supervisada se corrió el código a través de un script que se elaboró de manera conjunta el cálculo del NDVI (ver figura 8) y la clasificación supervisada (ver figura 7) (Sadeck, 2017).

El resultado fue una clasificación supervisada con 8 tipos de cobertura.

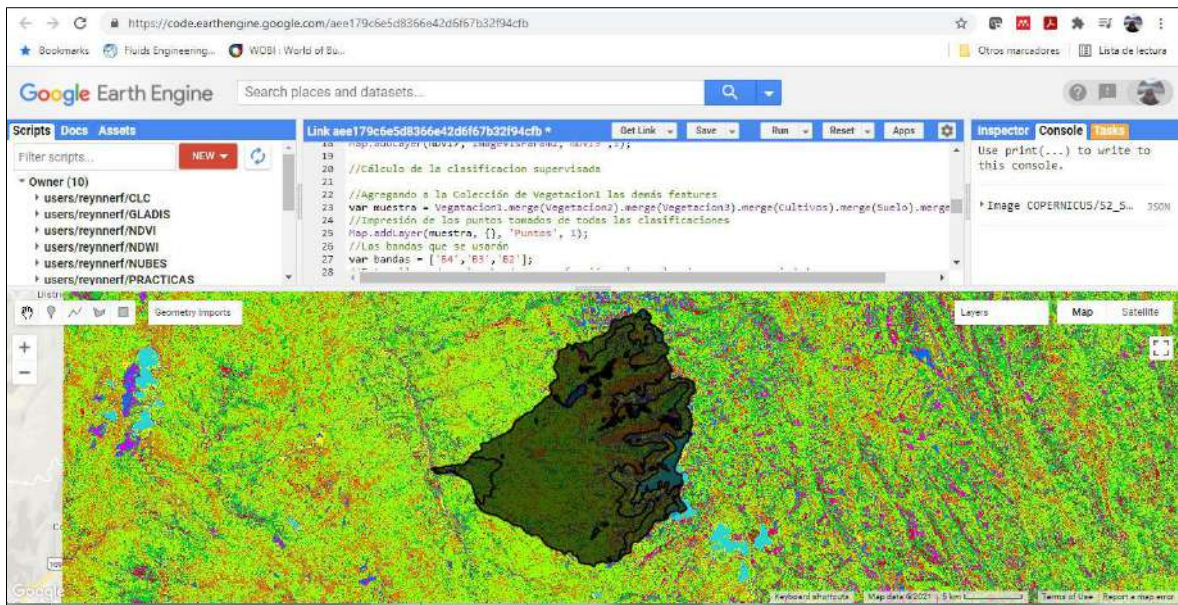


Figura 7. Resultado de la clasificación supervisada en GEE.

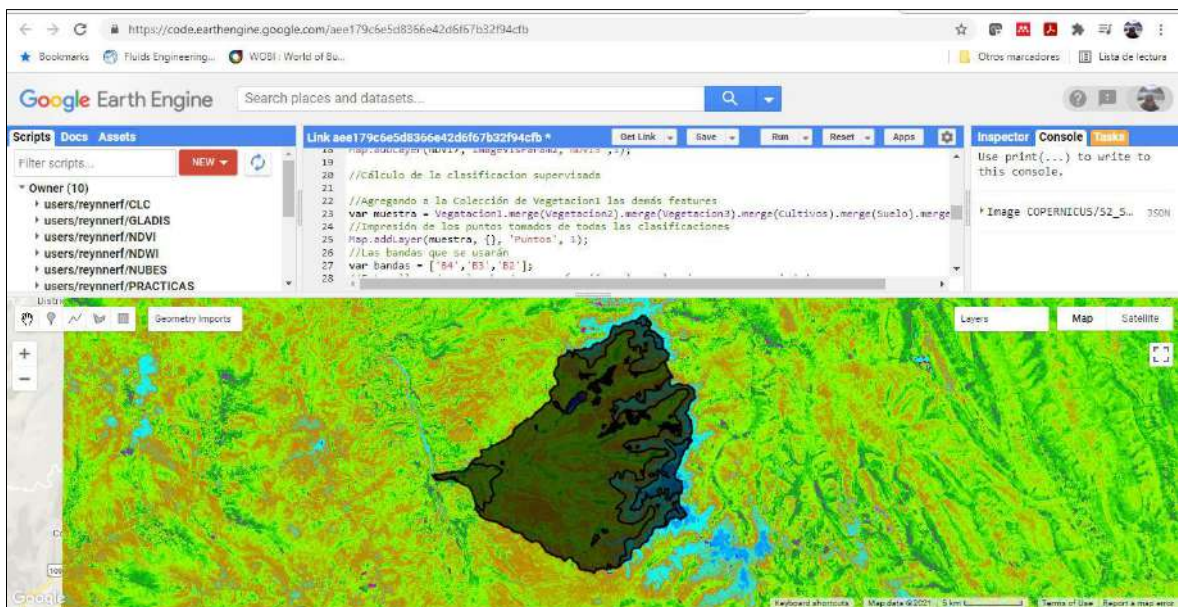


Figura 8. Resultado del NDVI en GEE

Como resultado del código se descargaron la imagen satelital y la clasificación supervisada en formato tif.

Cuarto: Clasificación supervisada

Una vez ya descargada la clasificación se continúa con los siguientes pasos para la edición en el software ArcGis:

1. Se abrió la imagen descargada en un proyecto nuevo en el software *ArcGis*.
2. *Click* derecho sobre la imagen: *Properties* > *Symbology* > *Unique Values* > *Add All Values* – (Se escogió los colores de acuerdo a la Tabla 1) > *Aceptar*. Ver figura 9.

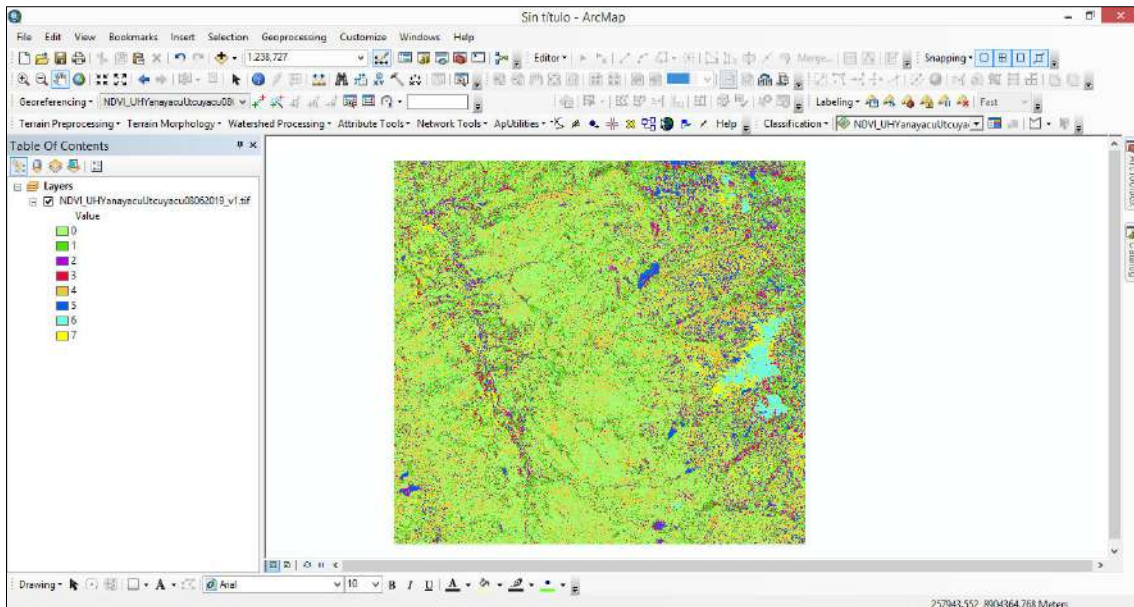


Figura 9. Identificando los tipos de cobertura según la clasificación de GEE.

3. Para corregir vacíos aplicamos la herramienta *Fill*: *ArcToolbox* > *Spatial Analyst Tools* > *Hydrology* > *Fill*. El resultado se puede ver en la figura 10.

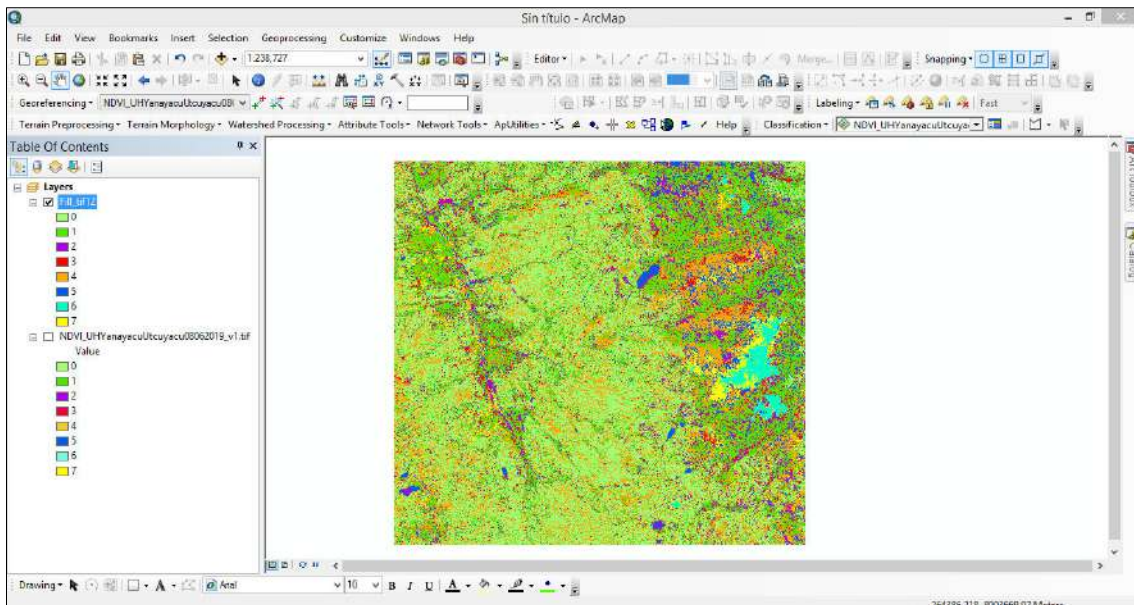


Figura 10. Clasificación supervisada luego de usar Fill

4. Se agregó los shapes de las coberturas ya desarrolladas (bloques de riego, lagunas y glaciares) al proyecto para identificar las zonas, hacer algunas comparaciones con la clasificación realizada.
5. Se convierte a polígono el archivo Fill: *ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon*. (luego de la conversión al ver su tabla de atributos ya aparecen todos los polígonos a detalle).
6. Se realizó cortes en función a las delimitaciones de la UH Yanayacu para solo trabajar en la zona de interés (herramienta *Clip: Geoprocessing*). Ver figura 11.

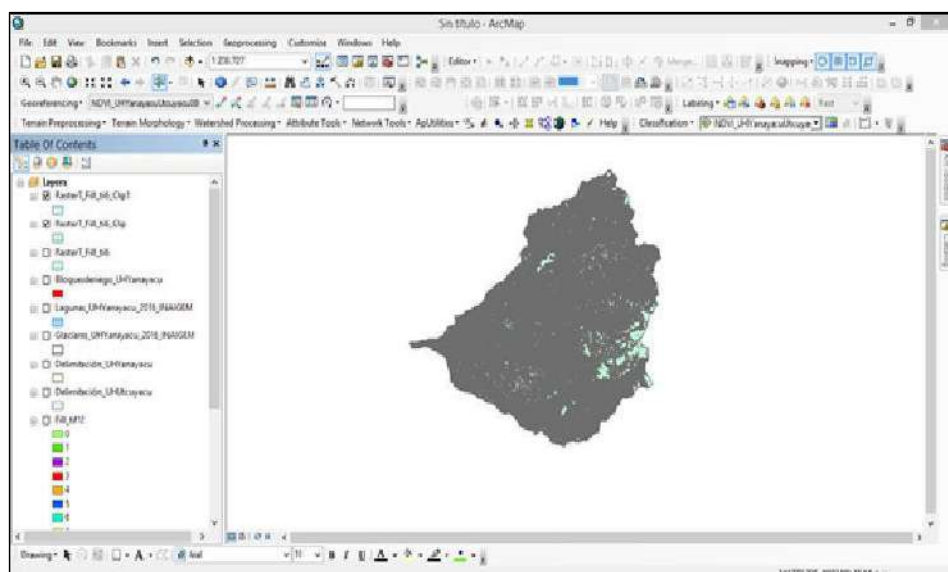


Figura 11. Corte de la clasificación según la UH.

7. Se eliminan las coberturas que ya se tienen definidas en otros shapes, es decir, se eliminan las coberturas de Cultivos (3), Cuerpos de agua (5) y Glaciar (6) usando la herramienta *Eliminate: Data Management Tools > Generalization > Eliminate*.
8. Luego se procede a eliminar las áreas pequeñas menores e iguales a 5000 m² usando la herramienta *Eliminate* nuevamente, primero se selecciona las áreas en la Tabla de atributos y luego se procede a usar la herramienta. Repetir el proceso las veces que sean necesarias para eliminar las áreas que generan “ruido” y de cada uno revisar los detalles y corregir algunas imperfecciones o áreas pendientes.
9. Se inserta las áreas que ya están definidas como son la de Bloques de riego (3), Cuerpos de agua (5) y Glaciares (6). Se copia del shape las áreas que se quieren pegar en formato *Edición*, luego se sale de la edición, se empieza la edición en el archivo donde se quiere pegar, se pega y luego se selecciona solo el área que se desea hacer clip (esto hará que la imagen duplicada no se pegue). Repetir el paso con las coberturas (3), (5) y (6).
10. Ahora sobre este archivo *Polygon* se cambia su simbología: *Symbology > Unique Values > Add All Values* (en función al gridcode, se debe escoger los colores más adecuados, de preferencia los mismos colores anteriores) – *Aceptar*.
11. Ahora se debe juntar las áreas pequeñas entre sí dependiendo su cobertura. Es decir, analizar todos los puntos y ver qué áreas realmente corresponde a su cobertura inicial o si hace falta cambiarla por otra cobertura. Se debe corroborar que el archivo debe ser *Polyline* (o polygon). (Esto se hace en cada paso anterior, es decir en cada *Eliminate*).
12. En este polígono hace falta separar las áreas de acuerdo a su tipo de cobertura: *Geoprocessing > Dissolve >* (se escoge el campo de *gridcode*). (Se usa la herramienta *Dissolve* para juntar todas las áreas y crearlas bajo un mismo *gridcode*. Se debe esperar a terminar de crear todas las áreas, ya que este proceso se hace al final.
13. Luego, se usa la herramienta *Smooth* para dar una definición de borde más natural a cada cobertura.
14. Finalmente, se usa la herramienta *Topology* donde se corregirán los últimos errores o vacíos generados en el proceso de edición.
15. El resultado final, la clasificación por tipos de cobertura, se pueden ver en la figura 12.

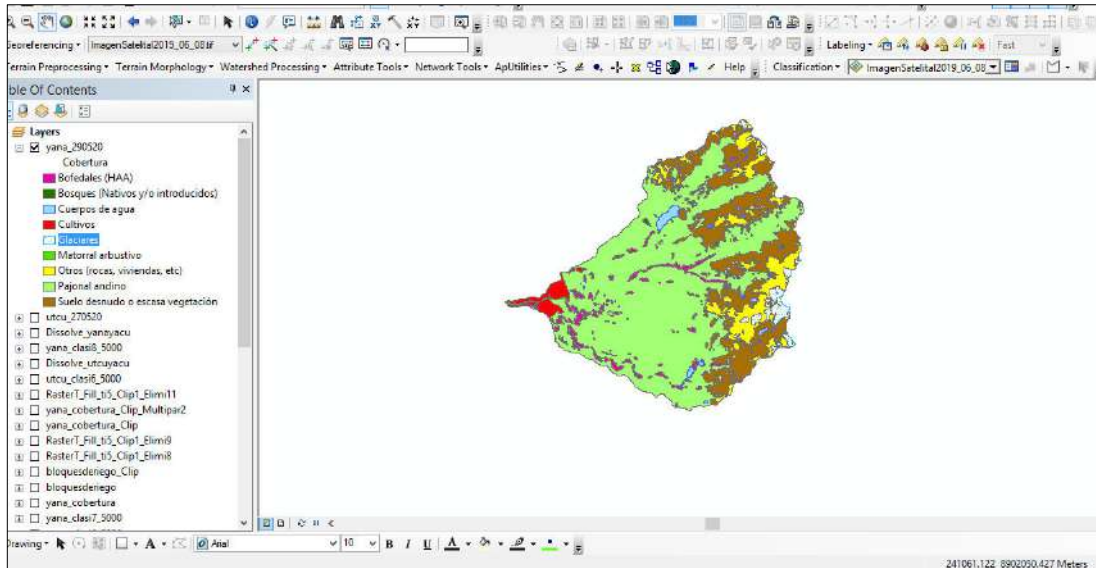


Figura 12. Resultados finales de los tipos de cobertura.

ANEXO 9. Áreas y Porcentajes de las unidades hidrológicas en la UH Yanayacu.

Tabla 60. Áreas por tipo de cobertura en cada unidad hidrológica en la UH Yanayacu.

N°	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (km ²)
1	Y1376981A	0.41	0.38	0.10	0.05	2.58	0.00	0.01	0.00	0.00	3.53
2	Y1376981B	0.00	0.00	0.00	0.00	1.23	0.00	0.00	0.00	0.00	1.23
3	Y1376981C	1.67	0.00	0.39	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.06
4	Y1376982A	0.26	0.01	0.00	0.00	0.37	0.00	0.00	0.00	0.00	0.64
5	Y1376982B	4.49	0.00	1.21	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	5.73
6	Y1376982C	6.45	0.00	1.33	0.00	0.00	0.04	0.42	0.00	0.00	8.24
7	Y1376982D	14.84	0.00	0.27	0.00	0.00	2.49	0.06	0.00	0.01	17.67
8	Y1376982E	2.97	0.00	0.12	0.00	0.00	6.04	0.23	0.00	0.46	9.82
9	Y1376982F	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	2.11	0.00	0.19	0.70	3.12
10	Y1376982G	0.04	0.00	0.00	0.00	0.00	1.49	0.00	0.25	1.04	2.82
11	Y1376982H	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	1.04	0.00	0.31	0.94	2.31
12	Y1376982I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.33	0.00	0.70	0.91	1.94
13	Y1376982J	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.89	0.57	1.52
14	Y1376982K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.66	0.23	0.90
15	Y1376982L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.31	0.21	0.52

N°	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (km ²)
16	Y1376983A	0.90	0.09	0.10	0.00	0.10	0.00	0.00	0.00	0.00	1.19
17	Y1376983B	11.94	0.03	1.32	0.00	0.75	0.00	0.01	0.00	0.00	14.05
18	Y1376983C	4.19	0.00	0.01	0.00	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	4.23
19	Y1376983D	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.35
20	Y1376984A	5.72	0.00	0.53	0.00	0.00	0.07	0.00	0.00	0.00	6.32
21	Y1376984B	15.34	0.00	0.11	0.24	0.00	0.62	1.44	0.00	0.00	17.75
22	Y1376984C	19.76	0.00	0.12	0.46	0.00	5.58	0.13	0.00	0.51	26.56
23	Y1376984D	1.75	0.00	0.00	0.00	0.00	11.92	0.25	0.00	2.20	16.12
24	Y1376984E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.40	0.00	0.07	2.09	5.56
25	Y1376984F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.32	0.00	0.26	2.49	4.07
26	Y1376984G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.27	0.64	1.10
27	Y1376984H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.00	0.17	0.20	0.49
28	Y1376986A	3.41	0.00	0.36	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.77
29	Y1376986B	5.66	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.66
30	Y1376986C	10.45	0.00	0.17	0.00	0.00	0.04	0.00	0.00	0.00	10.66
31	Y1376986D	4.12	0.00	0.00	0.00	0.00	0.77	0.00	0.00	0.29	5.18
32	Y1376986E	0.23	0.00	0.00	0.00	0.00	0.28	0.00	0.00	0.99	1.50
33	Y1376986F	0.02	0.00	0.00	0.00	0.00	0.06	0.00	0.03	0.45	0.56

N°	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (km ²)
34	Y1376986G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.22	0.30
35	Y1376986H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.17	0.25
36	Y1376987A	7.89	0.00	0.79	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	8.68
37	Y1376987B	17.59	0.00	1.39	0.03	0.00	0.06	0.00	0.00	0.00	19.07
38	Y1376987C	19.64	0.00	0.01	0.91	0.00	3.45	0.09	0.00	0.05	24.15
39	Y1376987D	5.55	0.00	0.00	0.13	0.00	9.22	0.15	0.00	1.16	16.21
40	Y1376987E	0.54	0.00	0.00	0.00	0.00	3.68	0.03	0.00	2.32	6.57
41	Y1376987F	0.12	0.00	0.00	0.00	0.00	1.94	0.00	0.05	3.23	5.34
42	Y1376987G	0.07	0.00	0.00	0.00	0.00	0.19	0.00	0.31	1.85	2.42
43	Y1376987H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.08	0.00	0.51	0.78	1.37
44	Y1376987I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.35	0.38	0.75
45	Y1376987J	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.27	0.19	0.46
46	Y1376987K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.29	0.03	0.32
Total (km ²)		166.51	0.51	8.33	1.82	5.03	56.68	2.82	6.05	25.31	273.06

Tabla 61. Porcentaje por tipo de cobertura en cada unidad hidrológica en la UH Yanayacu

N°	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (%)
1	Y1376981A	11.61	10.76	2.83	1.42	73.09	0.00	0.28	0.00	0.00	100.00
2	Y1376981B	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
3	Y1376981C	81.07	0.00	18.93	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
4	Y1376982A	40.63	1.56	0.00	0.00	57.81	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
5	Y1376982B	78.36	0.00	21.12	0.00	0.00	0.52	0.00	0.00	0.00	100.00
6	Y1376982C	78.28	0.00	16.14	0.00	0.00	0.49	5.10	0.00	0.00	100.00
7	Y1376982D	83.98	0.00	1.53	0.00	0.00	14.09	0.34	0.00	0.06	100.00
8	Y1376982E	30.24	0.00	1.22	0.00	0.00	61.51	2.34	0.00	4.68	100.00
9	Y1376982F	3.85	0.00	0.00	0.00	0.00	67.63	0.00	6.09	22.44	100.00
10	Y1376982G	1.42	0.00	0.00	0.00	0.00	52.84	0.00	8.87	36.88	100.00
11	Y1376982H	0.87	0.00	0.00	0.00	0.00	45.02	0.00	13.42	40.69	100.00
12	Y1376982I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.01	0.00	36.08	46.91	100.00
13	Y1376982J	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	3.95	0.00	58.55	37.50	100.00
14	Y1376982K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	1.11	0.00	73.33	25.56	100.00
15	Y1376982L	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	59.62	40.38	100.00
16	Y1376983A	75.63	7.56	8.40	0.00	8.40	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
17	Y1376983B	84.98	0.21	9.40	0.00	5.34	0.00	0.07	0.00	0.00	100.00

Nº	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (%)
18	Y1376983C	99.05	0.00	0.24	0.00	0.00	0.71	0.00	0.00	0.00	100.00
19	Y1376983D	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
20	Y1376984A	90.51	0.00	8.39	0.00	0.00	1.11	0.00	0.00	0.00	100.00
21	Y1376984B	86.42	0.00	0.62	1.35	0.00	3.49	8.11	0.00	0.00	100.00
22	Y1376984C	74.40	0.00	0.45	1.73	0.00	21.01	0.49	0.00	1.92	100.00
23	Y1376984D	10.86	0.00	0.00	0.00	0.00	73.95	1.55	0.00	13.65	100.00
24	Y1376984E	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	61.15	0.00	1.26	37.59	100.00
25	Y1376984F	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.43	0.00	6.39	61.18	100.00
26	Y1376984G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	17.27	0.00	24.55	58.18	100.00
27	Y1376984H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	24.49	0.00	34.69	40.82	100.00
28	Y1376986A	90.45	0.00	9.55	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
29	Y1376986B	100.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
30	Y1376986C	98.03	0.00	1.59	0.00	0.00	0.38	0.00	0.00	0.00	100.00
31	Y1376986D	79.54	0.00	0.00	0.00	0.00	14.86	0.00	0.00	5.60	100.00
32	Y1376986E	15.33	0.00	0.00	0.00	0.00	18.67	0.00	0.00	66.00	100.00
33	Y1376986F	3.57	0.00	0.00	0.00	0.00	10.71	0.00	5.36	80.36	100.00
34	Y1376986G	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	26.67	73.33	100.00

N°	Código WEAP	Pajonal andino	Matorral arbustivo	Humedal altoandino	Bosques	Cultivos	Suelo desnudo o escasa vegetación	Cuerpos de agua	Glaciares	Otros	Total (%)
35	Y1376986H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	32.00	68.00	100.00
36	Y1376987A	90.90	0.00	9.10	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	100.00
37	Y1376987B	92.24	0.00	7.29	0.16	0.00	0.31	0.00	0.00	0.00	100.00
38	Y1376987C	81.33	0.00	0.04	3.77	0.00	14.29	0.37	0.00	0.21	100.00
39	Y1376987D	34.24	0.00	0.00	0.80	0.00	56.88	0.93	0.00	7.16	100.00
40	Y1376987E	8.22	0.00	0.00	0.00	0.00	56.01	0.46	0.00	35.31	100.00
41	Y1376987F	2.25	0.00	0.00	0.00	0.00	36.33	0.00	0.94	60.49	100.00
42	Y1376987G	2.89	0.00	0.00	0.00	0.00	7.85	0.00	12.81	76.45	100.00
43	Y1376987H	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	5.84	0.00	37.23	56.93	100.00
44	Y1376987I	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	2.67	0.00	46.67	50.67	100.00
45	Y1376987J	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	58.70	41.30	100.00
46	Y1376987K	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	90.63	9.38	100.00

ANEXO 10. Descripción de las variables usadas en WEAP por el modelo WRF y la corrección de sesgo. Este anexo fue compartido y elaborado por la especialista Ph.D Emily Potter, el 13 de Agosto del 2021.

Entre los archivos finales creados para WEAP y que se usaron en la tesis fueron:

- Precipitación mensual por unidad hidrológica: Promedio (en el espacio) total de la precipitación mensual (con sesgo corregido y comprobado) (mm).
- Temperatura mensual por unidad hidrológica: Promedio (en tiempo y espacio) de la temperatura mensual del aire a 2 m (sesgo corregido y comprobado) (°C).
- Humedad Relativa mensual por unidad hidrológica: Humedad Relativa media (en el tiempo y espacio) mensual a 2 m (sin corrección de sesgo o comprobado) (%).
- Velocidad del Viento Diaria por unidad hidrológica: Velocidad media (en tiempo y espacio) diaria del viento a 2 m (ajustada a partir de 10 m de salida del modelo WRF, sin corrección de sesgo o comprobada) (m/s).
- Fracción de Nubosidad mensual por unidad hidrológica: Una aproximación para la fracción de horas diurnas con un “cielo despejado” promediada mensualmente.

Recuadrícula:

El método que he utilizado requiere una cuadrícula normal para rasterizar el shapefile. Las coordenadas de latitud/longitudes originales se interpolaron a una cuadrícula de mayor resolución (20 veces la resolución del original), que es regular en latitud y longitud (por lo que aproximadamente fue de 200 m por 200 m, pero no exactamente). No debería hacer demasiada diferencia, ya que el dominio es relativamente pequeño y cercano al ecuador (es decir, debería estar cerca de 200 m por cada nueva celda de cuadrícula de alta resolución). La interpolación se realiza a el punto más cercano (para la precipitación, el viento, las nubes, etc) o linealmente (temperatura, humedad relativa, etc).

Conversión de viento:

La longitud de rugosidad se define utilizando las categorías de uso del suelo del modelo WRF y las longitudes de rugosidad descritas en VEGPARAM.TBL, utilizando la media o los valores de verano e invierno. Estos pueden no coincidir exactamente con los utilizados por Noah-MP (en el modelo). La velocidad del viento se convierte de 10 a 2 m utilizando:

$origwind * (\ln(2/Z_0) / \ln(10/Z_0))$, donde $origwind$ es la velocidad del viento de salida WRF a 10 m, y Z_0 es la longitud de rugosidad. Esto hace una diferencia de (muy) aproximadamente 1,5-2 m/s. Se asume la estabilidad neutra.

Nubosidad:

La variable de nubosidad que se he mantenido de WRF es "fracción de nube máxima en la columna vertical". Si la nube máxima en la columna vertical es 1, sugiere que la celda de la cuadrícula está completamente cubierta de nube, a cierta altura. Si es 1/2, la mitad del cielo está cubierto de nubes a cierta altura.

En primer lugar, se filtra para las horas diurnas (radiación de onda corta entrante >0). A continuación, los valores inferiores al 50 % se cuentan para el mes y se dividen por el número de horas diurnas en el mes para crear una fracción de horas de 'cielo claro' en el mes (esto es lo mismo que promediar por día, luego mes).

Tenga en cuenta que en la práctica, WRF produce principalmente celdas de cuadrícula que no tienen nube, de cobertura de nubes al 100 % en algún nivel, por lo que elegir un nivel máximo de nube del 50 % (en lugar de 0) hace que solo una pequeña diferencia. Parece que WRF todavía está sobreestimando la nubosidad durante la estación seca.

Ajuste de temperatura:

Solo se ha ajustado la temperatura para la diferencia de altura entre el modelo y la elevación. Parece probable que sólo la temperatura y tal vez la humedad relativa están directamente correlacionadas con la elevación (con precipitación, nubes, etc. tal vez más basado en el lado de sotavento/barlovento de la montaña, proximidad a la costa (que creo que está en este caso relacionado con la elevación), etc). La HR no mostró consistentemente altos coeficientes de correlación, mientras que la temperatura no siempre es completamente lineal. Además, como la HR no se ha corregido el sesgo, puede haber problemas más grandes que esto.

Una vez que se ha encontrado la temperatura media dentro de una unidad hidrológica, la "brecha" entre la altura media del modelo en esa unidad hidrológica, y la altura real media de la unidad hidrológica se toma, y la temperatura media del modelo se ajusta para esa brecha, utilizando una tasa de lapso (para cada hora/temperatura máxima/temperatura mínima) tomado sobre la cuenca superior y 30 km alrededor de la cuenca superior (esta tasa de lapso se utiliza en todos los ajustes del modelo WRF).

En general, los datos de WRF están en una cuadrícula. El modelo WRF en sí mismo hace la reducción de escala. Utiliza una reducción de escala dinámica, lo que implicó que tiene ecuaciones (muy complejas) para tomar las variables climáticas a gran escala y determinar cuál será la pequeña escala. No es una reducción estadística, ya que resuelve numéricamente las ecuaciones que gobiernan el movimiento atmosférico (por ejemplo, las ecuaciones de Navier-Stokes). También utiliza algunas aproximaciones empíricas/estadísticas para los procesos que son muy pequeños para ser resueltos en la grilla (en este caso de 4 km) como la formación de nubes. Utiliza en los datos de entrada una reanálisis a gran escala, en este caso de ERA5.

La interpolación para las unidades hidrológicas o catchments es en su mayoría solo un promedio de los puntos de la cuadrícula dentro de esa cuenca. Sin embargo, como se menciona líneas arriba, hay una interpolación a una cuadrícula de mayor resolución, solo para asegurarse de que haya al menos un punto en cada unidad hidrológica.

Finalmente, se hizo la corrección de sesgo para la precipitación y la temperatura, porque esos eran los únicos datos de las estaciones disponibles. Dado que no estaba claro si las otras variables son 'correctas', los datos de WRF aquí realmente no podrían usarse como 'verdaderos', por lo que no parecía razonable usar otras variables para proyectar en el futuro de la misma manera (en referencia a proyectar las demás variables en los escenarios futuros)

Corrección del sesgo de salida del modelo WRF

1. Visión general

El modelo de Investigación y Pronóstico del Tiempo (Weather Research and Forecasting, WRF) se ejecutó durante 39 años, de 1980 a 2018. Hay cuatro dominios: Un dominio externo a 12km de resolución horizontal, que cubre todo el Perú con 3 horas de salida; dos dominios de resolución horizontal de 4 km (que cubren el Río Santa y las Cordilleras Urubamba, Vilcabamba y Vilcanota) con salida horaria; un dominio de resolución horizontal de 800 m, que cubre la sección superior del Río Santa, con salida horaria de 2009 a 2018 (Fig. 1). La precipitación y la temperatura de salida de los dos dominios de 4 km, y el dominio de 800 m, están corregidas por sesgo a las observaciones de las estaciones meteorológicas de la región (Fig. 1). A continuación, se detallan los modelos, observaciones y corrección de sesgos del WRF.

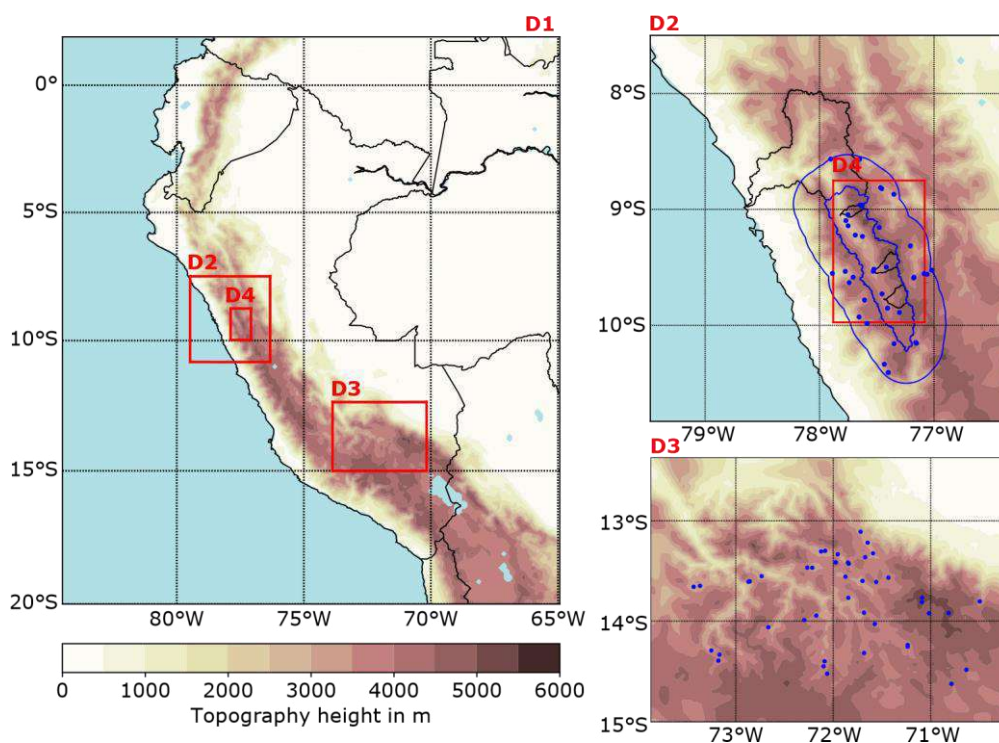


Figura 1: Los cuatro dominios del modelo WRF (D1-D4), con la elevación mostrada como contornos llenos, y el océano (y otros cuerpos de agua) mostrados en azul. La gráfica de la mano izquierda muestra los dominios externos (a una resolución horizontal de 12 km), y las gráficas de la derecha muestran los tres dominios internos. D2, con una resolución de 4 km, cubre la cuenca del río Santa delineada en negro (con contornos azules que muestran la 'parte superior del río Santa' que es donde se centra PeruGROWS, junto con el límite de 30 km dentro del cual se toman los datos de la estación), y D4, con una resolución de 800 m cubre las tres subcuencas del Río Santa para PeruGROWS (contornos negros). D3 muestra el dominio PEGASUS, que

incluye las Cordilleras Vilcanota, Urubamba y Vilcabamba. Las ubicaciones de todas las estaciones utilizadas en la corrección de sesgo se muestran como puntos azules.

2. Configuración del modelo WRF

El dominio externo utiliza la topografía WRF predeterminada del Servicio Geológico de los Estados Unidos (United States Geological Survey, USGS) de 30 segundos de los Datos Globales de Elevación del Terreno de Resolución Múltiple (Global Multi-resolution Terrain Elevation Data, GMTED2010). Los tres dominios internos utilizan los datos de la Misión Topográfica Radar Shuttle (Shuttle Radar Topography Mission, SRTM) (Jarvis u.a., 2008), a una resolución de 90 m. Los cuatro dominios utilizan los datos de la cobertura terrestre del USGS, pero en los tres dominios internos, el contorno del glaciar se actualiza utilizando el Inventario de Glaciares Randolph (Randolph Glacier Inventory, RGI) (RGI Consortium, 2015). Los datos meteorológicos para el límite lateral se toman del conjunto de datos de reanálisis ERA5, que se realiza cada 6 horas. El espectro también se utiliza por encima del nivel del modelo 15 (muy por encima de la capa límite atmosférica). Cada año del modelo se ejecuta por separado con un mes de giro, y el modelo utiliza el anidamiento unidireccional. Hay 35 niveles verticales en todos los dominios.

Las opciones de física para el modelo se eligieron predominantemente siguiendo la literatura previa para la región. Se realizaron algunas pruebas de sensibilidad cortas con los datos disponibles en el tiempo, y las siguientes opciones estaban todas en la configuración de mejor rendimiento, de las probadas. La opción de microfísica utiliza el esquema de doble momento de Morrison (Morrison u.a., 2009), según lo recomendado por Moya-Alvarez u.a. (2018). La física de la radiación es proporcionada por el esquema CAM (Collins u.a., 2004), la física de la superficie terrestre por el esquema Noah-MP (Niu u.a., 2011), y la física de las cumulus por el esquema Kain-Fritsch (solo en el dominio externo) (Ma und Tan, 2009), todas utilizadas en Posada-Marín u.a. (2019), con el esquema de superficie terrestre también utilizada por Mourre u.a. (2016). El esquema de la capa superficial es el esquema Revisado MM5 (Jiménez u.a., 2012), y el esquema de la capa límite planetaria es Mellor-Yamada Nakanishi y Niino Nivel 2.5 (Nakanishi und Niino, 2004). Se desactiva la convección superficial, se activan la radiación dependiente de la pendiente y el sombreado topográfico, y se actualiza la temperatura de la superficie del mar a lo largo de la corrida. Los términos de mezcla turbulenta se evalúan en el espacio físico, y el coeficiente de remolino se

determina utilizando horizontal cierre de primer orden de Smagorinsky. El tiempo descentrado para las ondas sonoras verticales se establece en 0,5, para la estabilidad.

3. Datos observacionales

Los datos de la estación observada se utilizaron para corregir el sesgo de la salida del modelo WRF. Todos los datos se limpiaron antes de su uso y se convirtieron en datos diarios cuando fue necesario. Los datos de las estaciones de observación utilizadas se muestran en la Figura 1. Nótese que no había una manera clara de probar sistemáticamente la captura insuficiente de las precipitaciones, o la sobreestimación de la temperatura máxima diaria, que a menudo se encuentran en las observaciones de todo el mundo. Es probable que tales sesgos sistemáticos también estén presentes en el conjunto de datos WRF corregido por sesgo.

4. Comparación de datos modelo y observacionales

Las salidas del modelo se interpolaron a las ubicaciones de la estación utilizando el punto de modelo más cercano a la ubicación de la estación. Antes de ser utilizados para la corrección de sesgos, los datos de temperatura del modelo se ajustaron a la altura de las observaciones, utilizando una tasa de lapso del modelo de 2 m tomada de la regresión lineal entre la elevación del modelo y la temperatura del aire de 2 m. Para el Río Santa (dominios 2 y 4), se calculó utilizando todos los puntos modelo dentro del límite de 30 km desde el que se tomaron las observaciones (en el dominio 4, excluyendo los puntos cercanos al límite). Para el dominio Pegasus (dominio 3), esto se tomó utilizando todo el dominio del modelo, excluyendo el límite.

5. Corrección de sesgos

En general, el modelo sobreestima la precipitación en comparación con las observaciones. Esto se debe tanto a una sobreestimación en el número de "días húmedos" (días con cualquier precipitación), como a una sobreestimación de la magnitud de la precipitación. En la región de Río Santa, y en el dominio PEGASUS en menor medida, en general el modelo de temperatura máxima diaria (T_{max}) es uniformemente demasiado frío, y la temperatura mínima diaria (T_{min}) es más o menos correcta en magnitud, pero no muestra el ciclo anual visto en las observaciones (en la mayoría de las estaciones, en las observaciones T_{min} es ligeramente más frío en la estación seca, alrededor de junio-

septiembre). Se utiliza un método lineal para corregir tanto la precipitación diaria total como la temperatura diaria máxima y mínima. La corrección del sesgo de precipitación mejora sustancialmente la representación del modelo de precipitación en todos los dominios, en comparación con la salida del modelo WRF sin procesar. La corrección de sesgo reduce tanto el número de días húmedos en el modelo como la magnitud de la precipitación. El sesgo de temperatura máxima diaria se reduce en todos los dominios (la salida del modelo WRF sin procesar es demasiado fría). El sesgo de temperatura mínima diaria también se reduce, principalmente al corregir el ciclo anual en la salida del modelo WRF sin procesar (la salida del modelo WRF sin procesar no pudo capturar las temperaturas nocturnas más frías en la estación seca).

Referencias

- [Collins u.a. 2004] Collins, William D.; Rasch, Philip J.; Boville, Byron A.; Hack, James J. ; McCaa, James R. ; Williamson, David L. ; Kiehl, Jeffrey T. ; Briegleb, Bruce ; Bitz, Cecilia ; Lin, SJ u.a.: Description of the NCAR community atmosphere model (CAM 3.0) / NCAR. 2004. – Forschungsbericht
- [Jarvis u.a. 2008] Jarvis, Andy ; Reuter, Hannes I. ; Nelson, Andrew ; Guevara, Edward u.a.: Hole-filled SRTM for the globe Version 4. In: available from the CGIAR-CSI SRTM 90m Database (<http://srtm.csi.cgiar.org>) 15 (2008)
- [Jiménez u.a. 2012] Jimenez´ , Pedro A. ; Dudhia, Jimmy ; Gonzalez-Rouco´ , J F. ; Navarro, Jorge ; Montavez´ , Juan P. ; Garc´ia-Bustamante, Elena: A revised scheme for the WRF surface layer formulation. In: Monthly Weather Review 140 (2012), Nr. 3, S. 898–918
- [Ma und Tan 2009] Ma, Lei-Ming ; Tan, Zhe-Min: Improving the behavior of the cumulus parameterization for tropical cyclone prediction: Convection trigger. In: Atmospheric Research 92 (2009), Nr. 2, S. 190–211
- [Morrison u.a. 2009] Morrison, Hugh ; Thompson, Gregory ; Tatarskii, V: Impact of cloud microphysics on the development of trailing stratiform precipitation in a simulated squall line: Comparison of one-and two-moment schemes. In: Monthly Weather Review 137 (2009), Nr. 3, S. 991–1007
- [Mourre u.a. 2016] Mourre, L ; Condom, Thomas ; Junquas, Cl´ementine ; Lebel, Thierry ; E Sicart, J ; Figueroa, R ; Cochachin, A: Spatio-temporal assessment of WRF, TRMM

and in situ precipitation data in a tropical mountain environment (Cordillera Blanca, Peru). In: *Hydrology and Earth System Sciences* 20 (2016), Nr. 1, S. 125–141

[Moya-Alvarez u.a. 2018] Moya-Alvarez, Aldo S. ; Martínez-Castro, Daniel ; Flores, José L ; Silva, Yamina: Sensitivity study on the influence of parameterization schemes in WRF ARW model on short-and medium-range precipitation forecasts in the Central Andes of Peru. In: *Advances in Meteorology* 2018 (2018)

[Nakanishi und Niino 2004] Nakanishi, Mikio ; Niino, Hiroshi: An improved Mellor–Yamada level-3 model with condensation physics: Its design and verification. In: *Boundary-Layer Meteorology* 112 (2004), Nr. 1, S. 1–31

[Niu u.a. 2011] Niu, Guo-Yue ; Yang, Zong-Liang ; Mitchell, Kenneth E. ; Chen, Fei ; Ek, Michael B. ; Barlage, Michael ; Kumar, Anil ; Manning, Kevin ; Niyogi, Dev ; Rosero, Enrique u.a.: The community Noah land surface model with multiparameterization options (Noah-MP): 1. Model description and evaluation with local scale measurements. In: *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* 116 (2011), Nr. D12

[Posada-Marín u.a. 2019] Posada-Marín, José A ; Rendon´, Angela M. ; Salazar, Juan F. ; Mejía, John F. ; Villegas, Juan C.: WRF downscaling improves ERA-Interim representation of precipitation around a tropical Andean valley during El Niño: implications for GCM-scale simulation of precipitation over complex terrain. In: *Climate Dynamics* 52 (2019), Nr. 5-6, S. 3609–3629

[RGI Consortium 2015] RGI Consortium: Randolph Glacier Inventory – A Dataset of Global Glacier Outlines: Version 5.0 / Global Land Ice Measurements from Space,

Colorado, USA. 2015. – Forschungsbericht

ANEXO 11. Información brindada por la especialista Ph.D Emity Potter de las variables climáticas divididas en unidades hidrológicas en el periodo 1980-2018.

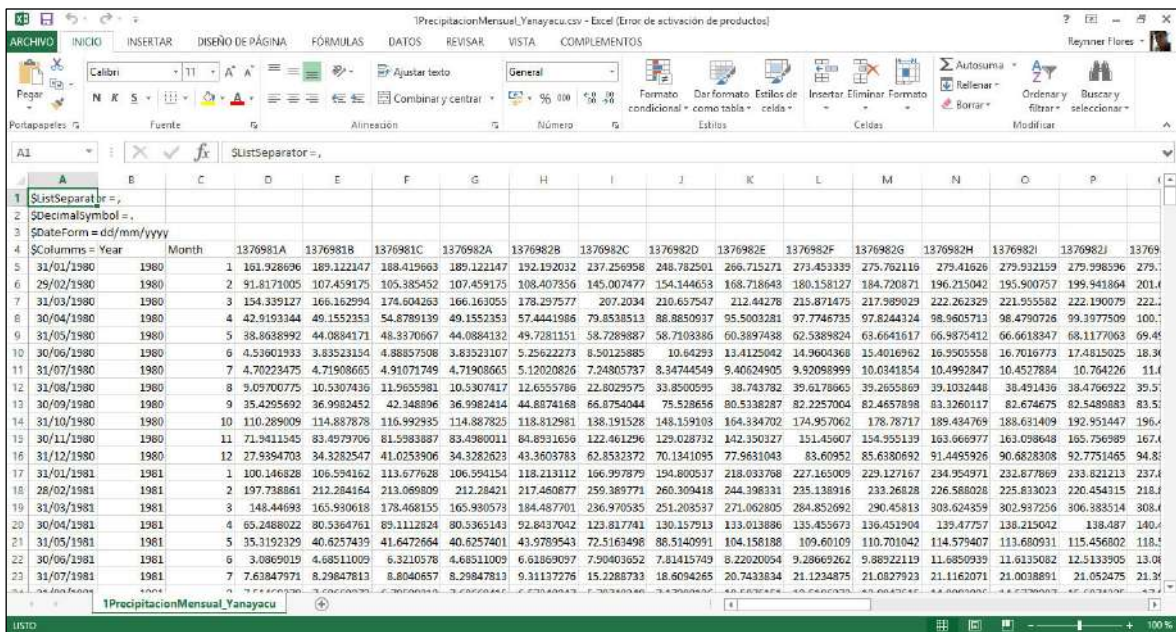


Figura 1. Precipitación mensual para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas.

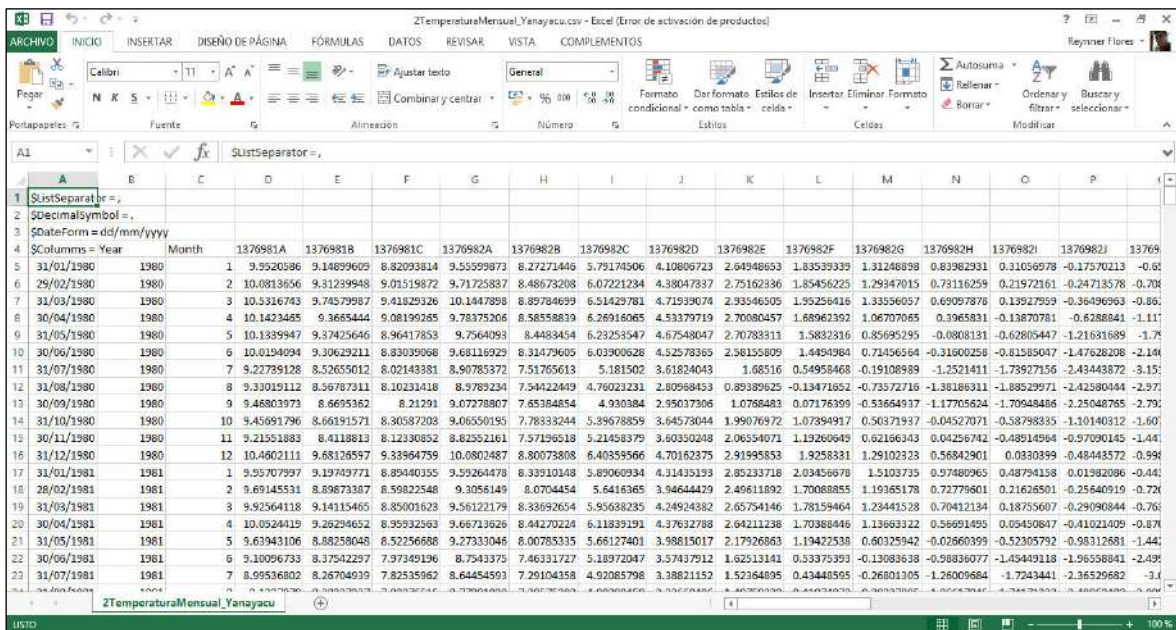


Figura 2. Temperatura mensual para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas.

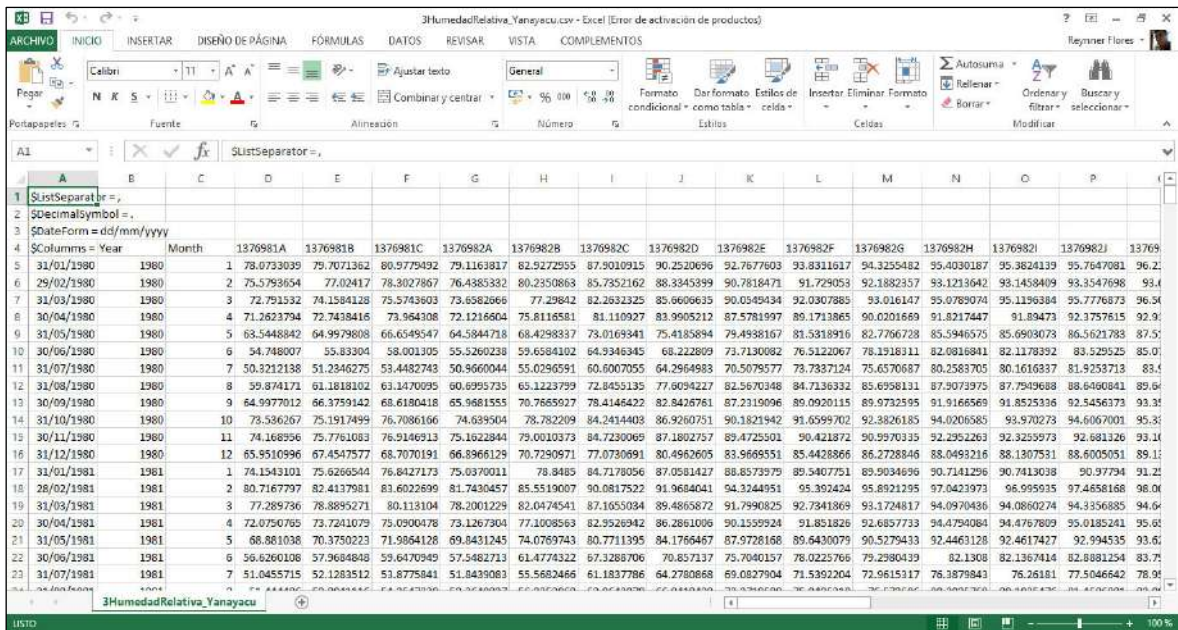


Figura 3. Humedad relativa mensual para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas

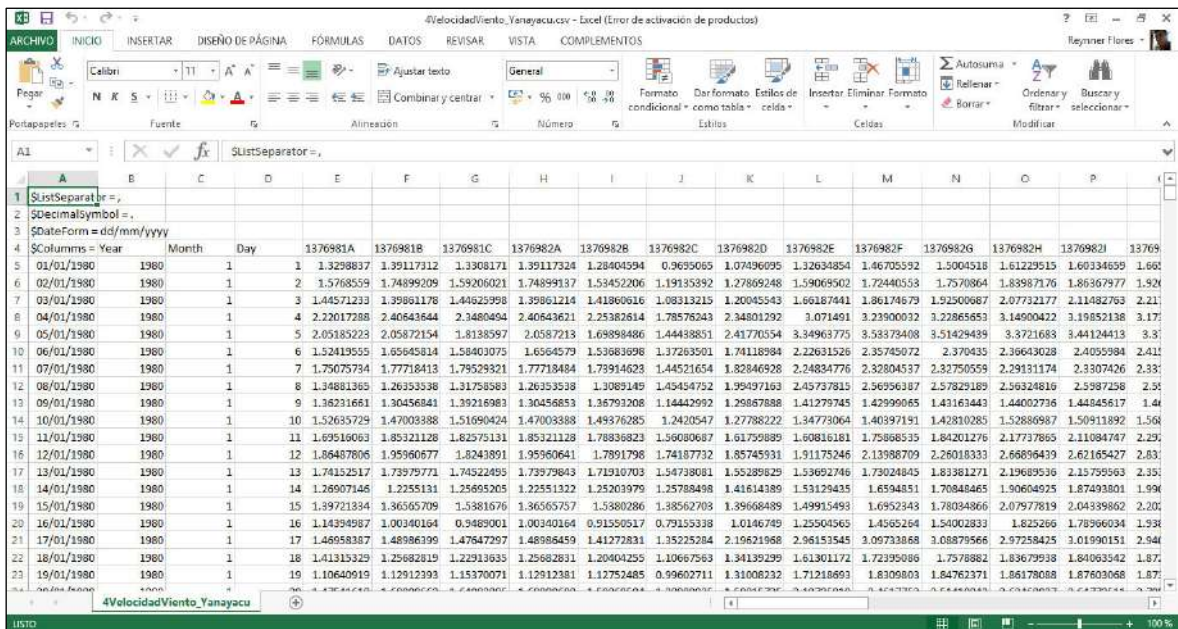


Figura 4. Velocidad del viento diaria para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas

The image shows an Excel spreadsheet titled "FracciónNubosidad_Yanayacu.csv - Excel (Error de activación de productos)". The spreadsheet contains data for monthly cloudiness fractions from 1980 to 1981, divided into 12 hydrological units. The columns are labeled as follows:

- Column 1: Year
- Column 2: Month
- Column 3: 1376981A
- Column 4: 1376981B
- Column 5: 1376981C
- Column 6: 1376982A
- Column 7: 1376982B
- Column 8: 1376982C
- Column 9: 1376982D
- Column 10: 1376982E
- Column 11: 1376982F
- Column 12: 1376982G
- Column 13: 1376982H
- Column 14: 1376982I
- Column 15: 1376982J

The data rows correspond to the following dates:

- 31/01/1980
- 29/02/1980
- 31/03/1980
- 30/04/1980
- 31/05/1980
- 30/06/1980
- 31/07/1980
- 31/08/1980
- 30/09/1980
- 31/10/1980
- 30/11/1980
- 31/12/1980
- 31/01/1981
- 28/02/1981
- 31/03/1981
- 30/04/1981
- 31/05/1981
- 30/06/1981
- 31/07/1981

Figura 5. Fracción de nubosidad mensual para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas

ANEXO 12. Información brindada por la especialista Ph.D Emity Potter de las variables climáticas divididas en unidades hidrológicas en el periodo 2019-2050.

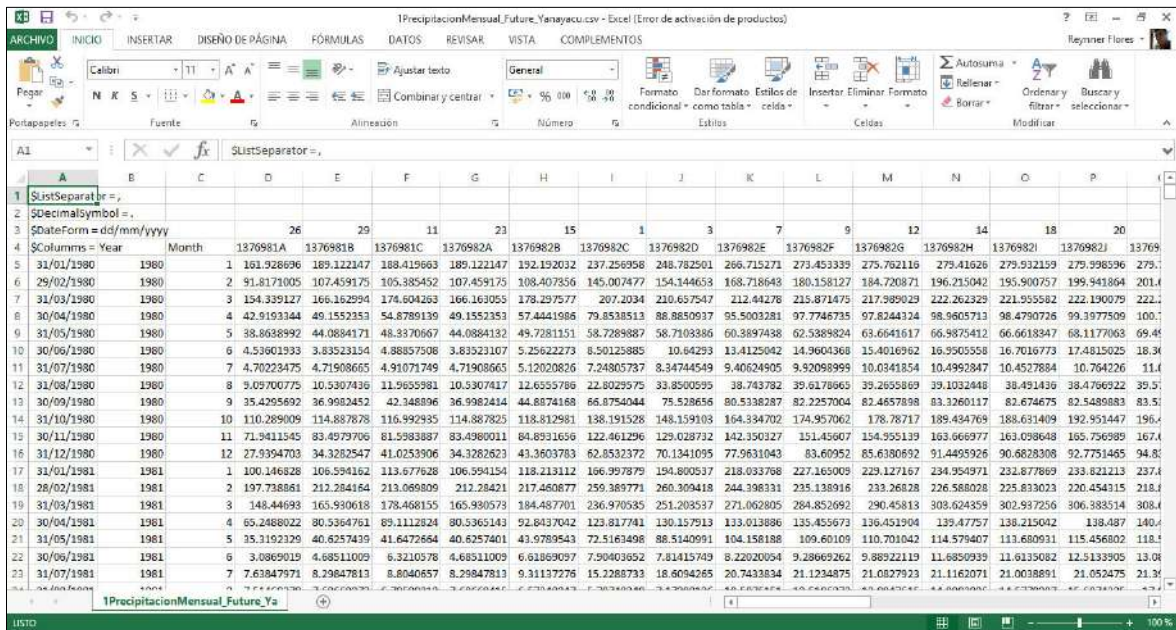


Figura 1. Precipitación mensual futura para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas.

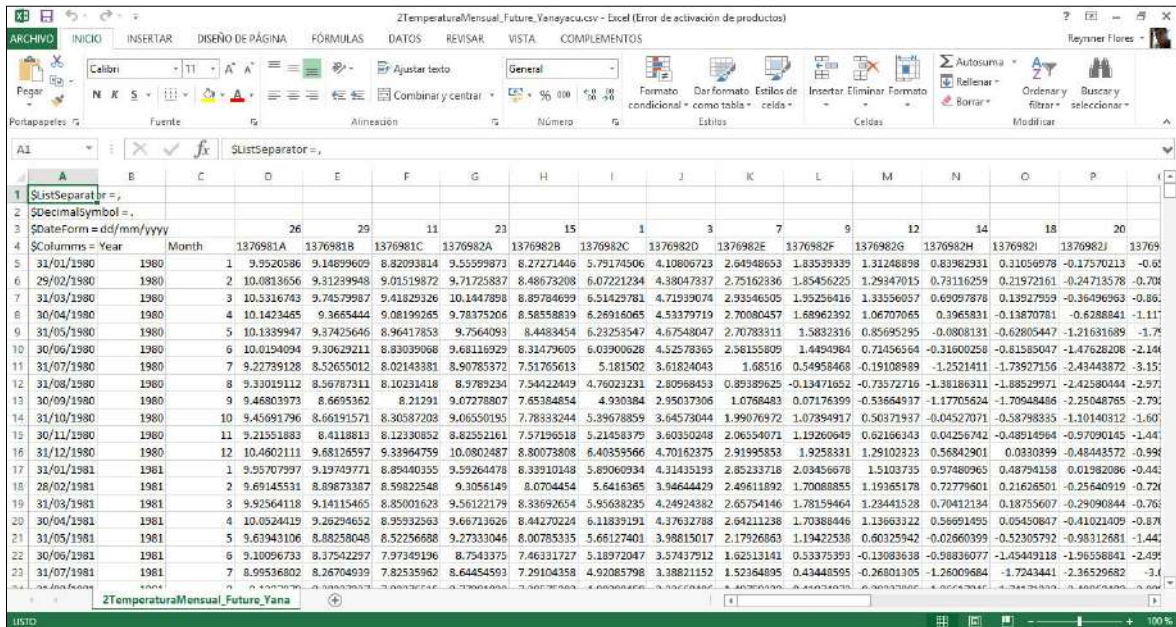


Figura 2. Temperatura mensual futura para Yanayacu dividido en unidades hidrológicas.

ANEXO 13. Resultado del cálculo de las variables de caudales, precipitación y temperatura futura media multianual en Querococha y Yanayacu.

Tabla 1. Caudales (m³/s) medios anuales futuros de los tres escenarios a la salida de Querococha

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	1.9254	2.03175	1.70825	2035	1.66599	1.67465	1.98932
2020	1.78162	1.94605	1.89228	2036	1.35403	1.77469	1.60038
2021	1.75639	2.12757	1.86757	2037	1.71348	1.53713	1.79856
2022	1.94408	1.68002	1.68895	2038	1.51045	2.39539	1.77928
2023	2.29281	1.52522	1.94427	2039	2.01143	1.91376	1.73426
2024	1.82405	1.74982	2.12222	2040	1.49417	2.00455	1.73826
2025	1.80902	1.64005	1.84594	2041	1.65188	1.71236	2.14618
2026	1.51394	1.66304	1.76489	2042	1.59846	1.99468	1.95135
2027	2.09487	2.29034	1.40813	2043	1.41753	2.00787	2.16776
2028	2.06574	1.77539	1.8336	2044	2.11111	1.87494	1.46018
2029	1.11406	1.6797	1.42805	2045	1.50163	2.08612	1.70972
2030	1.67083	1.65029	1.77818	2046	1.79316	1.64925	1.33977
2031	1.13781	1.97232	1.62143	2047	1.87259	2.06471	1.60652
2032	1.72619	2.31618	1.54745	2048	1.93337	1.57213	1.87727
2033	2.51672	1.49619	1.37043	2049	1.86049	1.71013	1.93023
2034	1.92882	1.81325	1.70292	2050	1.6515	1.93204	1.96181

Tabla 2. Precipitación (mm) media anual de los tres escenarios de toda la subcuenca Querococha

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	1329.10647	1499.78293	1211.97338	2035	1226.65608	1120.6238	1349.94662
2020	1400.10711	1469.01074	1441.21103	2036	1188.35461	1272.07323	1255.80998
2021	1265.81669	1353.86427	1381.85958	2037	1130.90154	1426.5685	1353.44869
2022	1366.73476	1227.14764	1244.81191	2038	1307.23	1627.78603	1472.51435
2023	1555.58738	1254.82198	1312.83765	2039	1314.30706	1294.45287	1224.52559
2024	1242.3716	1164.45236	1467.23485	2040	1241.23407	1599.73904	1491.34285
2025	1296.42642	1463.08061	1554.24432	2041	1280.63008	1227.09778	1483.50205
2026	1270.96514	1374.09732	1100.39073	2042	1094.90965	1492.52931	1491.31208
2027	1527.97398	1426.55881	1322.60382	2043	1297.85847	1386.23056	1367.28022
2028	1241.89845	1189.48755	1066.33817	2044	1339.54004	1559.17866	1188.25542
2029	1124.96115	1441.68001	1295.95681	2045	1249.89128	1369.23354	1260.59464
2030	1073.07139	1250.05934	1507.89084	2046	1296.55161	1494.01505	1028.38507
2031	881.981272	1605.12722	1204.25962	2047	1365.43705	1248.27787	1409.38023
2032	1707.47423	1465.6292	972.091712	2048	1477.12782	1196.51527	1381.11403
2033	1460.19017	1149.82057	1246.58516	2049	1277.96259	1309.95588	1644.12244
2034	1394.38878	1439.38247	1448.68197	2050	1284.7349	1450.1018	1172.47198

Tabla 3. Temperatura (°C) media anual de los tres escenarios de toda la subcuenca Querococha

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	3.32923143	3.74240757	3.79735332	2035	3.42014668	5.487893	5.13685618
2020	3.30099806	4.33199168	4.05114965	2036	3.85174536	5.26211715	5.69659452
2021	3.37422536	4.42455648	4.94994258	2037	4.67247997	3.76741842	4.73514202
2022	3.89179035	3.45953824	4.42176888	2038	3.15095225	4.28270869	4.46719616
2023	2.57099217	4.13937487	3.70121225	2039	3.25034134	5.30958627	5.62744573
2024	2.85402845	5.13576859	4.08309893	2040	3.31526906	4.23592174	5.58639497
2025	3.19633831	4.05738122	4.64240832	2041	3.67959249	4.60047235	4.9076691
2026	3.96903641	4.26771505	4.79399486	2042	3.91691225	4.64596944	4.55938953
2027	3.47036278	4.08081821	4.90159396	2043	3.41193777	5.55923333	5.76496575
2028	3.06095668	3.87858834	5.08324523	2044	3.77665881	4.6026245	6.32393836
2029	3.76004749	4.30434309	4.28936236	2045	3.67501182	4.95061479	5.15682635
2030	3.94820451	5.24675042	4.07009344	2046	3.708805	5.61551287	6.27036454
2031	3.90877123	4.42523337	4.97685487	2047	3.27170151	4.71119997	6.54922856
2032	3.24273739	4.14031005	5.51021602	2048	3.64734622	4.44948717	5.20995145
2033	3.29309862	5.13943703	4.37931026	2049	4.15353009	5.38433305	5.65203999
2034	3.83606568	3.90711838	4.81882212	2050	3.35133115	6.01230015	5.826947



Figura 1. Caudal futuro en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050

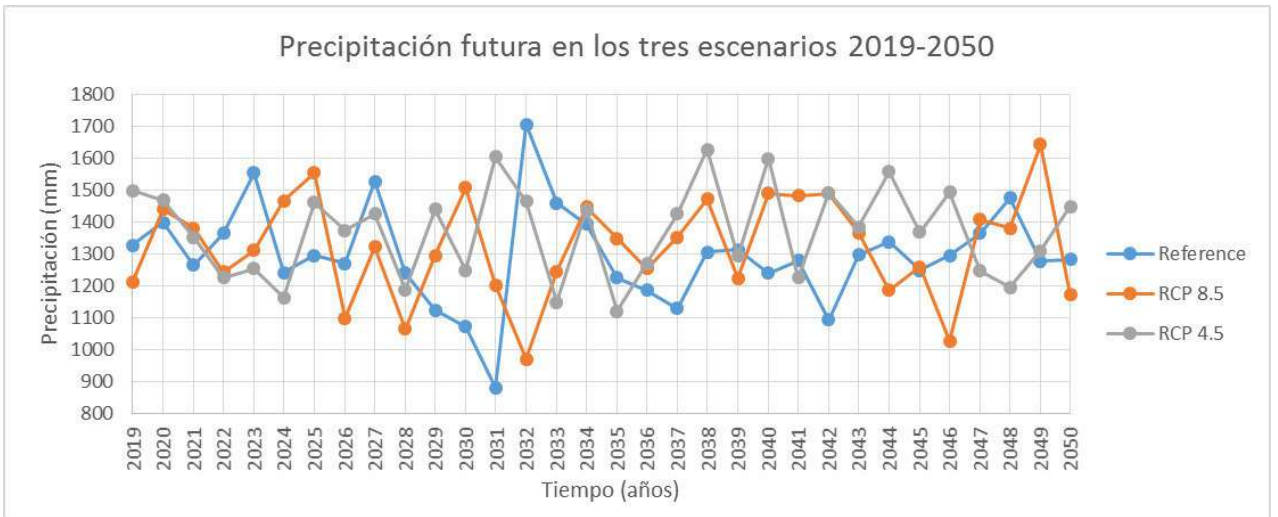


Figura 2. Precipitación futura en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050

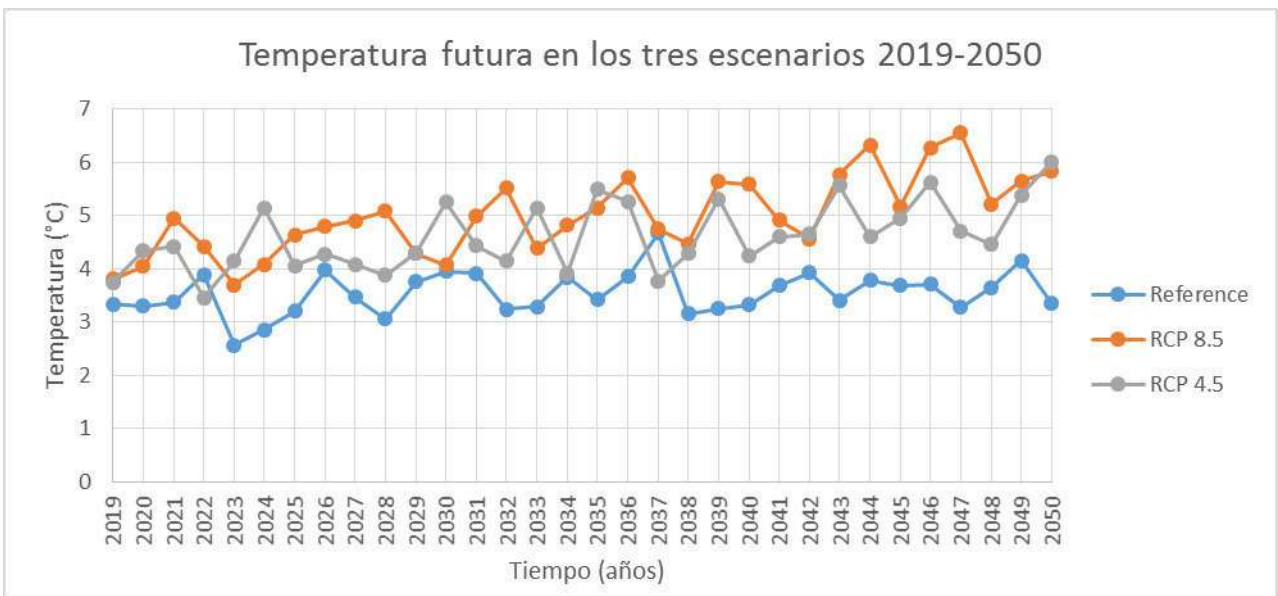


Figura 3. Temperatura futura en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050

Tabla 4. Caudales (m³/s) medios anuales futuros de los tres escenarios a la salida de Yanayacu

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	7.307	8.087	6.806	2035	6.675	6.812	8.002
2020	7.052	7.881	7.589	2036	5.222	7.123	6.38
2021	7.036	8.599	7.684	2037	7.787	6.208	7.209
2022	7.48	6.808	6.799	2038	6.247	9.639	7.175
2023	9.297	6.227	7.854	2039	7.839	7.791	6.998
2024	7.389	7.054	8.695	2040	6.839	8.157	6.976
2025	7.041	6.606	7.553	2041	6.754	6.899	8.597
2026	6.152	6.666	7.122	2042	6.678	8.059	7.801
2027	8.163	9.276	5.684	2043	5.868	8.141	8.757
2028	8.302	7.184	7.399	2044	8.18	7.639	5.914
2029	4.476	6.826	5.732	2045	6.355	8.396	6.854
2030	6.364	6.658	7.186	2046	7.682	6.726	5.411
2031	4.712	7.888	6.497	2047	7.504	8.253	6.487
2032	6.77	9.338	6.226	2048	7.661	6.415	7.615
2033	9.968	6.087	5.492	2049	7.695	6.942	7.813
2034	7.824	7.343	6.837	2050	6.872	7.832	7.905

Tabla 5. Precipitación (mm) media anual de los tres escenarios de toda la cuenca de Yanayacu

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	1230.79778	1490.19201	1217.67164	2035	1184.96199	1116.6436	1332.42415
2020	1373.80291	1455.41092	1426.6408	2036	1185.85586	1263.84308	1234.65084
2021	1243.36001	1338.12263	1370.35114	2037	1267.09677	1411.19254	1324.49229
2022	1353.57437	1222.63384	1241.83317	2038	1285.6359	1615.18186	1453.41135
2023	1526.76934	1248.85085	1316.84832	2039	1325.14176	1286.81148	1216.7504
2024	1208.28456	1155.92055	1453.6933	2040	1296.68368	1590.17502	1469.33267
2025	1262.56503	1453.39296	1533.52139	2041	1298.92759	1222.51831	1455.50302
2026	1253.93572	1367.67706	1108.63446	2042	1139.20188	1486.23811	1454.10796
2027	1495.15347	1421.47988	1320.71651	2043	1284.86225	1371.77394	1342.45525
2028	1208.50952	1181.38655	1075.10333	2044	1273.98653	1553.11016	1185.83238
2029	1064.11348	1433.06132	1269.89964	2045	1312.14209	1357.15083	1252.65559
2030	1059.87223	1242.02817	1478.94867	2046	1341.63775	1480.88949	1029.85967
2031	922.347362	1590.08331	1177.30117	2047	1308.37036	1235.31658	1397.23907
2032	1634.12584	1456.54677	1012.75974	2048	1476.78349	1197.59387	1384.96253
2033	1454.87558	1139.6617	1247.46199	2049	1281.86006	1302.32152	1608.13878
2034	1385.7951	1435.63233	1434.20987	2050	1300.66782	1441.43546	1169.33104

Tabla 6. Temperatura (°C) media anual de los tres escenarios de toda la cuenca de Yanayacu

Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5	Año	Reference	RCP 4.5	RCP 8.5
2019	4.2955499	4.63663344	4.67272498	2035	4.34326111	6.30089655	5.9908921
2020	4.16712945	5.17853103	4.93745712	2036	4.78019826	6.09449867	6.51349532
2021	4.25340727	5.27636434	5.77056603	2037	5.51468062	4.68946024	5.61074098
2022	4.76265844	4.35581263	5.25759219	2038	4.08237236	5.17645205	5.37907173
2023	3.52422656	4.98412497	4.60679716	2039	4.10788196	6.1395245	6.45792986
2024	3.77102088	5.95066777	4.97467115	2040	4.21320493	5.12750712	6.42252206
2025	4.11802464	4.92124955	5.48432429	2041	4.63194655	5.45973725	5.78367849
2026	4.87708819	5.12371985	5.62315581	2042	4.78930362	5.51355228	5.47980862
2027	4.33415474	4.95385535	5.73105136	2043	4.39316964	6.39906505	6.59291817
2028	3.94451147	4.77012974	5.90875507	2044	4.73125177	5.47552413	7.14557618
2029	4.73275156	5.16862701	5.16224881	2045	4.52552658	5.79791541	6.02978058
2030	4.83515336	6.0623735	4.96653892	2046	4.59597656	6.44095445	7.07838107
2031	4.76718147	5.2776429	5.82119176	2047	4.21486407	5.59712012	7.36604218
2032	4.14891099	5.02251012	6.32506037	2048	4.53982728	5.34263698	6.0866476
2033	4.19109379	5.96354861	5.26197883	2049	5.02688299	6.21786169	6.50917657
2034	4.70745901	4.81821541	5.67773583	2050	4.2246075	6.83498387	6.67483935

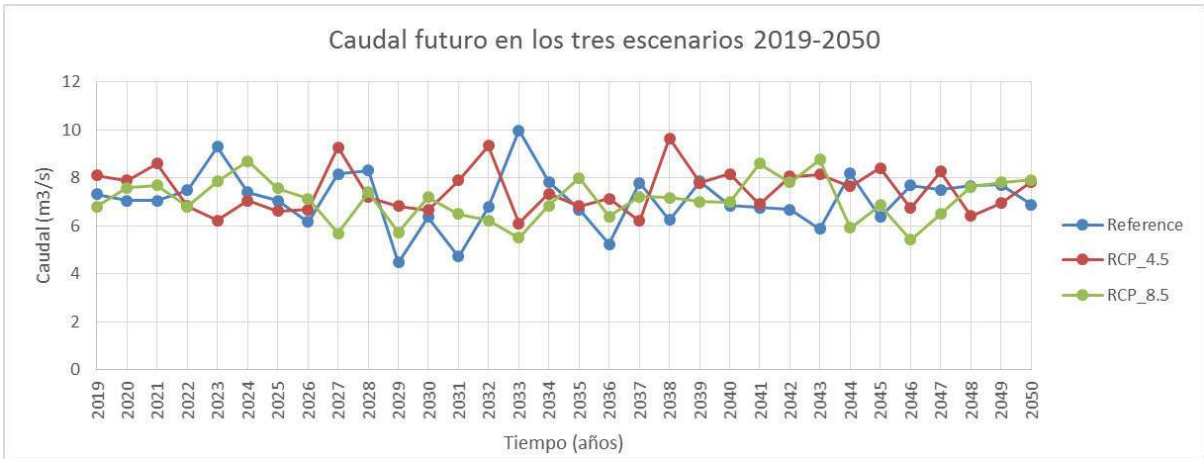


Figura 1. Caudal futuro en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050

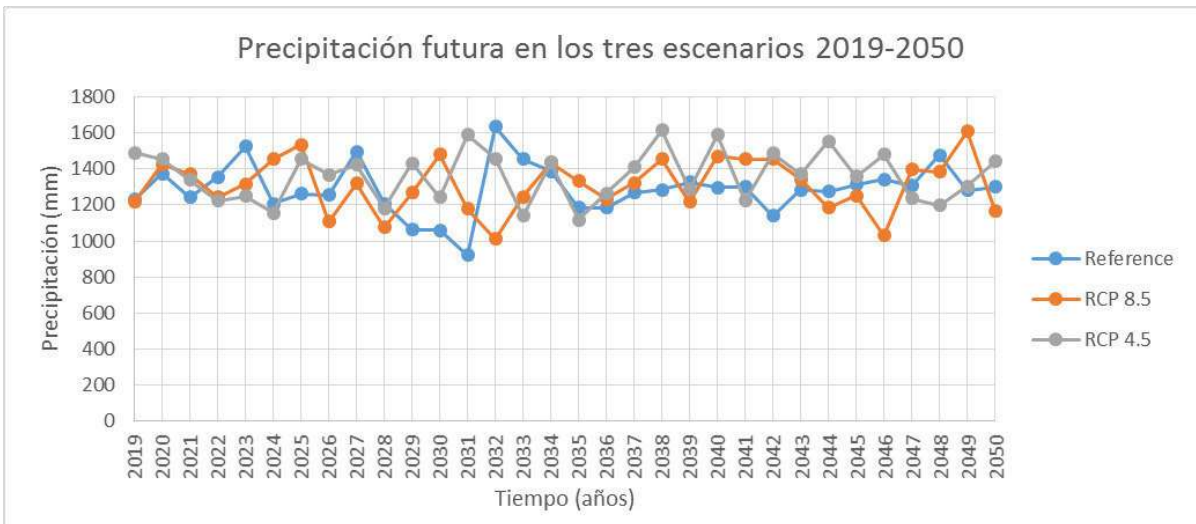


Figura 2. Precipitación futura en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050

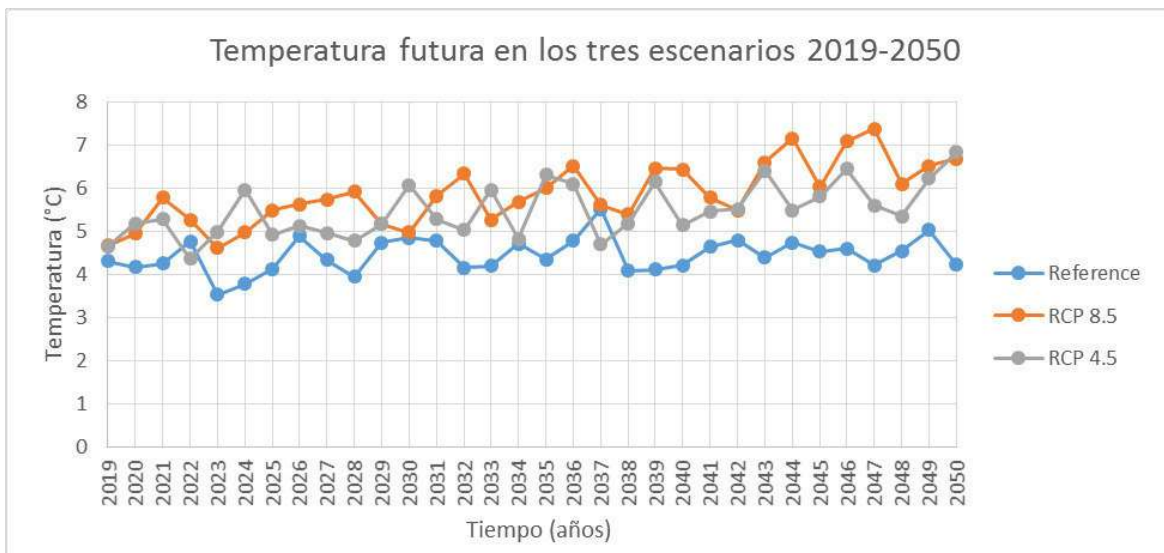


Figura 3. Temperatura futura en los tres escenarios en el periodo 2019 – 2050