



Universidad Nacional
Federico Villarreal

VRIN | VICERRECTORADO
DE INVESTIGACIÓN

FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

**ANALISIS MULTITEMPORAL DE LA SUPERFICIE GLACIAR Y SU INFLUENCIA EN
LA DISPONIBILIDAD HIDRICA EN LA SUBCUENCA SHULLCAS**

**Línea de investigación:
Procesamiento digital de imágenes y señales**

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

AUTOR:

Tunque Raymundo, Royers

ASESORA:

Aylas Humareda, María del Carmen
(ORCID: 0000-0002-2063-0005)

JURADO:

Gonzales Alarcón, Angelino Oscar.
Sánchez Carrera, Dante Pedro.
Valdivia Orihuela, Braulio Armando.

Lima - Perú

2023

DEDICATORIA

A Dios por darme la fortaleza y seguridad para culminar la tesis.

A mis padres, Teodoro Tunque y Feliciano Raymundo, quienes, con su amor, su sacrificio, sus consejos, ánimos y apoyo incondicional hasta el día de hoy, me permitieron cumplir una meta importante en mi vida.

A mis hermanos Isaias y Edison, por sostenerme, apoyarme y su paciencia en todo este proceso.

AGRADECIMIENTO

A mi asesora la Dra. María del Carmen Aylas Humareda por haberme brindado, su tiempo, apoyo, sus consejos y su fortaleza durante este proceso.

A toda mi familia, por brindarme su palabra de aliento y apoyo hasta el día de hoy.

A mis amigos, por brindarme su consejo y apoyo profesional en la elaboración del presente trabajo de investigación.

INDICE

RESUMEN	xiii
ABSTRACT.....	xiv
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1 Descripción y formulación del problema	16
1.1.1 Descripción del Problema	16
1.1.2 Formulación del Problema.....	17
1.2 Antecedentes.....	17
1.3 Objetivos.....	21
1.3.1 Objetivo General	21
1.3.2 Objetivo Específico.....	21
1.4 Justificación.....	21
1.5 Hipótesis	22
II. MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Teledetección.....	23
2.2 Componentes del sistema de teledetección.....	24
2.3 El espectro electromagnético.....	25
2.4 Tipos de sensores.....	27
2.4.1 Sensor Pasivo	28
2.4.2 Sensor Activo.....	30
2.5 Interacción de la atmosfera con la radiación	31
2.5.1 Absorción Atmosférica	32
2.5.2 Dispersión Atmosférica.....	33
2.5.3 Emisión Atmosférica.....	35
2.6 Resolución de los sistemas de sensores	36
2.6.1 Resolución Espacial	36
2.6.2 Resolución Espectral.....	37
2.6.3 Resolución Radiométrica	38
2.6.4 Resolución Temporal	38
2.7 Tipo de imágenes de teledetección.....	39
2.8 Tratamiento digital de imágenes.....	39
2.8.1 Corrección Geométrica	40
2.8.2 Corrección Radiométrica	42
2.8.3 Corrección Atmosférica	43
2.9 Efecto invernadero.....	45
2.9.1 Calentamiento Global	48

2.10	El Perú y el cambio climático.....	53
2.11	Situación de los glaciares	57
III.	MÉTODO	60
3.1	Tipo de investigación.....	60
3.1.1	Tipo de Investigación.....	60
3.1.2	Alcance de la Investigación	60
3.1.3	Diseño de la Investigación	60
3.2	Ámbito temporal y espacial.....	60
3.3	Variables.....	61
3.4	Población y muestra	61
3.4.1	Población.....	61
3.4.2	Muestra	62
3.5	Instrumentos	62
3.6	Procedimiento.....	63
3.6.1	Selección de las Imágenes Satelitales	63
3.6.2	Procesamiento de las Imágenes Satelitales	64
3.6.3	Cálculo de los Cambios de la Cobertura Glaciar y la Superficie de Lagunas.....	65
3.6.4	Cálculo de la Reserva Hídrica Glaciar	66
3.6.5	Cálculo del Aporte Hídrico Glaciar	67
3.6.6	Escenarios Futuros de la Cobertura Glaciar y la reserva Hídrica	68
3.6.7	Escenarios Futuros del Aporte Hídrico Glaciar	69
3.7	Análisis de datos.....	69
IV.	RESULTADOS.....	70
4.1	Características generales de la subcuenca del río Shullcas.....	70
4.1.1	Ubicación	70
4.1.2	Transporte y Comunicación.....	70
4.1.3	Características Físicas de la Subcuenca	72
4.2	Análisis de la cobertura y volumen glaciar.....	94
4.2.1	Evaluación de la cobertura glaciar	94
4.2.2	Tasa de Retroceso Glaciar.....	95
4.2.3	Superficie de las Lagunas	98
4.2.4	Volumen Glaciar o Reserva Hídrica	100
4.3	Comportamiento hidrometeorológico.....	106
4.3.1	Hidrometeorología	106
4.3.2	Aporte Hídrico – Glaciar.....	131
4.3.3	Escenarios futuros de la cobertura glaciar, reserva hídrica y aporte hídrico glaciar...	139

V. DISCUSION Y ANALISIS	149
VI. CONCLUSIONES	150
VII. RECOMENDACIONES	152
VIII. REFERENCIAS.....	153
ANEXOS	164

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Resolución espacial.....	37
Tabla 2 Potencial calentamiento global (GWP).....	47
Tabla 3 Emisiones d GEI por sectores en el Perú.....	48
Tabla 4 Tiempo de vida de gases de efecto invernadero	51
Tabla 5 Características reconocidas por la CMNUCC	54
Tabla 6 Perdidas en el PBI provocadas por el cambio climático para el 2025	57
Tabla 7 Inventario de las 18 cordilleras con superficie glaciara en el Perú.....	59
Tabla 8 Variable independiente	61
Tabla 9 Variable dependiente	61
Tabla 10 Características de las imágenes satelitales (1990 - 2020).....	63
Tabla 11 Ruta de acceso a la subcuenca del río Shullcas.	70
Tabla 12 Ruta de acceso a la subcuenca del río Shullcas	71
Tabla 13 Valores aproximados del factor de forma.....	81
Tabla 14 Valores del coeficiente de compacidad (Kc)	82
Tabla 15 Rango y descripción del coeficiente de masividad.....	83
Tabla 16 Cálculo de altitud media de la subcuenca del rio Shullcas	85
Tabla 17 Cálculo del índice de pendiente	86
Tabla 18 Rango de pendientes	88
Tabla 19 Cálculo de la pendiente media de la subcuenca del río Shullcas.....	88
Tabla 20 Distribución areal de la pendiente en la subcuenca del rio Shullcas	89
Tabla 21 Clasificación de la red hídrica.....	89
Tabla 22 Clasificación de la densidad de drenaje, clases Delgadillo y Páez (2008)	90
Tabla 23 Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Shullcas	93
Tabla 24 Cobertura glaciara de la subcuenca Shullcas (1990-2020).....	94
Tabla 25 Áreas generadas de la subcuenca del rio Shullcas.	96

Tabla 26 Ecuaciones regionales de cada nevado ubicado en la subcuenca del río Shullcas ..	96
Tabla 27 Tasa de cambio y retroceso glaciar de la subcuenca Shullcas y el nevado Chuspi .	97
Tabla 28 Tasa de cambio y retroceso glaciar de los nevados Talves y Huaytapallana.....	97
Tabla 29 Resumen de la tasa de retroceso y cambio glaciar.....	98
Tabla 30 Superficie de las lagunas de la subcuenca Shullcas durante el periodo 1990 – 2020	98
Tabla 31 Rango altitudinal de la subcuenca Shullcas y el nevado Huaytapallana (1990 – 2020)	100
Tabla 32 Rango altitudinal del nevado Talves y Chuspi (1990 - 2020)	100
Tabla 33 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (1990)	101
Tabla 34 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (1994)	102
Tabla 35 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (1999)	102
Tabla 36 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (2004)	102
Tabla 37 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (2009)	102
Tabla 38 Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (2014)	103
Tabla 39 Parámetros y volumen en los nevados en la subcuenca Shullcas (2020)	103
Tabla 40 Cuadro resumen del volumen glaciar de los nevados de la subcuenca Shullcas ...	103
Tabla 41 Volumen generado a partir de la correlación Año – Volumen glaciar	104
Tabla 42 Volumen generado a partir de la correlación Área glaciar – Volumen glaciar	105
Tabla 43 Tasa de cambio y retroceso del volumen glaciar	106
Tabla 44 Estaciones para el cálculo de la temperatura media (1965 – 2013).....	107
Tabla 45 Temperatura media mensual de las estaciones consideradas.....	107
Tabla 46 Estaciones meteorológicas consideras	108
Tabla 47 Ecuaciones regionales de la subcuenca Shullcas	109
Tabla 48 Temperatura mensual de la subcuenca Shullcas	109
Tabla 49 Cálculo de la temperatura media mensual de la subcuenca Shullcas	110

Tabla 50 Estaciones consideradas para la evaluación de la temperatura mínima.....	111
Tabla 51 Temperatura mínima media mensual de las estaciones seleccionadas	111
Tabla 52 Temperatura mínima anual de las estaciones seleccionadas.....	112
Tabla 53 Ecuaciones regionales de la subcuenca Shullcas	113
Tabla 54 Temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas.....	113
Tabla 55 Cálculo de la temperatura mínima de la subcuenca Shullcas	114
Tabla 56 Temperatura máxima anual de las estaciones seleccionadas	115
Tabla 57 Temperatura máxima mensual de las estaciones seleccionadas	115
Tabla 58 Estaciones consideradas para la relación altitud – Temperatura máxima.....	116
Tabla 59 Ecuaciones regionales de la temperatura máxima	117
Tabla 60 Temperatura máxima mensual de la subcuenca Shullcas	117
Tabla 61 Cálculo de la temperatura máxima de la subcuenca Shullcas.....	118
Tabla 62 Estaciones para el cálculo de la precipitación anual de la zona de estudio	119
Tabla 63 Precipitación anual de las estaciones consideradas (1965 – 2013).....	119
Tabla 64 Estaciones meteorológicas consideradas	120
Tabla 65 Ecuaciones regionales de la subcuenca shullcas.....	121
Tabla 66 Precipitación mensual de la subcuenca Shullcas	121
Tabla 67 Cálculo de la precipitación de la subcuenca Shullcas.....	122
Tabla 68 Factores adimensionales de la estación shullcas.....	123
Tabla 69 Precipitación mensual de la subcuenca Shullcas - Método Isoyetas	123
Tabla 70 Estaciones consideradas para el método polígonos de Thiessen	123
Tabla 71 Precipitación mensual - método polígonos Thiessen.....	124
Tabla 72 Precipitación total mensual (mm) de la subcuenca Shullcas	124
Tabla 73 Estaciones consideradas para el cálculo de la ETP.....	125
Tabla 74 Evapotranspiración de las estaciones consideradas	126
Tabla 75 Estaciones consideradas para la relación Altitud – Evapotranspiración.....	126

Tabla 76 Cálculo de la evapotranspiración	128
Tabla 77 Factores adimensionales de la estación Ingenio	129
Tabla 78 Evapotranspiración mensual de la subcuenca Shullcas	129
Tabla 79 Ubicación de la estación chamisería	130
Tabla 80 Caudal medio mensual de la estación chamisería.....	130
Tabla 81 Escorrentía de la estación chamisería	131
Tabla 82 Años más secos de la estación chamisería.....	133
Tabla 83 Escorrentía media mensual del año más seco del periodo 1985 – 2009.....	133
Tabla 84 Precipitación media mensual del año más seco del periodo 1985 – 2009.....	134
Tabla 85 Caudal medio mensual del año 2005	134
Tabla 86 Frecuencias de caudales promedio de los meses de estiaje (m ³ /s).....	135
Tabla 87 Caudales generados a partir de las frecuencias del periodo (1985 – 2009).....	136
Tabla 88 Promedio del área glaciar de la subcuenca shullcas	137
Tabla 89 Balance hídrico glaciar de la subcuenca del río shullcas.....	138
Tabla 90 Escenario futuro de la cobertura glaciar y la reserva hídrica.....	140
Tabla 91 Área de la cobertura glaciar periodo 1990 – 2020.....	142
Tabla 92 Balance hídrico del año 1990.....	143
Tabla 93 Balance hídrico del año 1994.....	143
Tabla 94 Balance hídrico del año 1999.....	143
Tabla 95 Balance hídrico del año 2004.....	144
Tabla 96 Balance hídrico del año 2009.....	144
Tabla 97 Cuadro resumen del balance hídrico del periodo 1990 – 2009.....	145
Tabla 98 Caudales generados de la subcuenca shullcas	145
Tabla 99 Escenarios futuros del aporte hídrico glaciar.....	147

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Componentes del sistema de teledetección	25
Figura 2 Propagación de la energía electromagnética	26
Figura 3 Espectro electromagnético	27
Figura 4 Radiómetro de barrido multiespectral (MSS) LANDSAT.....	29
Figura 5 Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética.....	32
Figura 6 Absorción de la radiación electromagnética por los componentes de la atmosfera .	33
Figura 7 Esquema de la dispersión de la radiación electromagnética	35
Figura 8 Corrección de imágenes satelitales.....	40
Figura 9 Oscilación de la plataforma.....	42
Figura 10 Proceso de calibración de una imagen satelital	44
Figura 11 Efecto invernadero	45
Figura 12 Emisiones de GEI en el Perú.....	46
Figura 13 Concentración de los GEI en los dos últimos milenios.....	47
Figura 14 Variación de la temperatura media desde el año 1980.....	49
Figura 15 Calentamiento global entre los años 1850 – 1900.....	49
Figura 16 Temperatura global y emisiones de GEI	50
Figura 17 Tendencia de la evolución de emergencias – peligros naturales.....	55
Figura 18 Emergencias causadas por peligros climáticos (2003 – 2014).....	55
Figura 19 Retroceso glaciar	56
Figura 20 Correlación Tiempo – Área glaciar de la subcuenca del río Shullcas.....	95
Figura 21 Superficie de las lagunas en la subcuenca Shullcas en el periodo 1990 – 2020	99
Figura 22 Correlación Área de Lagunas – Área Glaciar en la subcuenca Shullcas.....	99
Figura 23 Correlación Volumen glaciar – Tiempo (1990 – 2020)	104
Figura 24 Correlación volumen glaciar – Área glaciar (1990 – 2020).....	105

Figura 25 Relación Altitud – Temperatura media anual.....	108
Figura 26 Tendencia de la temperatura media mensual de la subcuenca Shullcas.....	109
Figura 27 Relación altitud – Temperatura mínima anual	112
Figura 28 Tendencia de la temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas	113
Figura 29 Relación Altitud – Temperatura máxima	116
Figura 30 Tendencia de la temperatura máxima mensual	117
Figura 31 Relación altitud - Precipitación anual (mm).....	120
Figura 32 Tendencia de la precipitación mensual - subcuenca Shullcas	125
Figura 33 Relación Altitud – Evapotranspiración	127
Figura 34 Tendencia de la evapotranspiración mensual de la subcuenca Shullcas	129
Figura 35 Tendencia del caudal medio anual de la estación chamiseria	130
Figura 36 Tendencia de la esorrentía de la estación chamiseria	131
Figura 37 Época de estiaje en la subcuenca Shullcas	132
Figura 38 Curva de duración del promedio de los caudales de los meses de estiaje (1985 – 2009)	136
Figura 39 Relación caudal del glaciar (m ³ /s) - área glaciar (km ²)	145

RESUMEN

En el presente trabajo de investigación el objetivo general fue determinar el cambio de la superficie glaciar y su influencia en el aporte hídrico en la subcuenca Shullcas – Río Mantaro. Para ello fue necesario utilizar la siguiente metodología: el estudio presenta las características de una investigación cuantitativa, desde un alcance correlacional, y un diseño no experimental – longitudinal o evolutivo. La población está constituida por todas las subcuencas que son parte de la cordillera del Huaytapallana y la muestra se constituye por la subcuenca Shullcas ubicada en la región Junín, provincia de Huancayo. Con respecto al objetivo general, se concluye que, el área glaciar de la subcuenca shullcas presenta como tasa de retroceso glaciar un valor de $-0.067 \text{ km}^2/\text{año}$ y una tasa de cambio de -1.53% ; así mismo, al establecer un relación entre la superficie glaciar y el caudal del aporte glaciar obtenido mediante el balance hídrico, se encontró un coeficiente de correlación de 0.83; es decir, existe una fuerte asociación entre ambas variables, de manera que, a mayor superficie glaciar mayor será el aporte por deshielo glaciar y viceversa.

Palabras claves: Análisis multitemporal, aporte glaciar, disponibilidad hídrica, superficie glaciar, teledetección, retroceso glaciar.

ABSTRACT

In the present research work, the general objective was to determine the change of the glacial surface and its influence on the water supply in the Shullcas – Mantaro River sub-basin. For this it was necessary to use the following methodology: the study presents the characteristics of a quantitative research, from a correlational scope, and a non-experimental design – longitudinal or evolutionary. The population is made up of all the sub-basins that are part of the Huaytapallana mountain range and the sample is constituted by the Shullcas sub-basin located in the Junín region, province of Huancayo. With respect to the general objective, it is concluded that the glacial area of the Shullcas sub-basin presents as a glacial retreat rate a value of $-0.067 \text{ km}^2/\text{year}$ and an exchange rate of -1.53% ; likewise, when establishing a relationship between the glacial surface and the flow of the glacial contribution obtained through the water balance, a correlation coefficient of 0.84 was found; that is, there is a strong association between both variables, so that the greater the glacial area, the greater the contribution by glacial melt and vice versa.

Keywords: Multitemporal analysis, glacier contribution, water availability, glacial surface, remote sensing, glacial retreat

I. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global es un problema ambiental que tiene como consecuencia el aumento de la temperatura media. En términos ecosistémicos, la desaparición de los cuerpos de hielo producirá la paulatina reducción y creciente variabilidad interanual en las cuencas hidrográficas de alimentación nivo-glacial (Pedace & Vega, 2011).

En el Perú se han identificado 18 cordilleras con cobertura glaciar, y debido al acelerado retroceso glaciar ocasionado por el cambio climático se ha originado la formación de lagunas nuevas con alto nivel de amenaza física (INAIGEM, 2017).

La cordillera Huaytapallana no es ajeno a los efectos que produce el cambio climático; es decir, que en la zona de estudio se presenta un retroceso glaciar, lo que nos lleva a la siguiente pregunta *¿Cómo influye el cambio de la superficie glaciar en el aporte hídrico de la subcuenca Shullcas?*, la hipótesis central es que la pérdida de la superficie glaciar en la zona de estudio afecta de manera desfavorable en el aporte hídrico por deshielo glaciar. De esta manera, se plantea que el objetivo central es determinar el cambio de la superficie glaciar y su influencia en el aporte hídrico en la subcuenca Shullcas – Río Mantaro.

Para llevar a cabo el estudio, se trabajó mediante la siguiente estructura: Capítulo II “Marco teórico”, se realiza un análisis de las bases teóricas que definen el estudio, Capítulo III “Método de Investigación” se presenta el tipo de investigación, el ámbito temporal, las variables, el procedimiento para realizar la investigación, etc. y el Capítulo IV en donde se describen los resultados que se obtuvieron en el presenta trabajo de investigación.

1.1 Descripción y formulación del problema

1.1.1 Descripción del Problema

El calentamiento global es un problema de carácter mundial que se manifiesta con el incremento gradual de la temperatura ambiental. Las principales consecuencias están asociadas por el incremento del nivel del mar, el retroceso de los glaciares, la alteración de las formas de vida y los servicios ambientales.

De acuerdo con el MINAM (2009), el Perú es el tercer país más vulnerable al cambio climático; debido a que, el 52% de la población vive en condiciones de pobreza y el 21% en condiciones de extrema pobreza, tiene 28 de los 35 climas identificados en el planeta y es uno de los países que alberga el 71% de los glaciares tropicales del mundo.

Los glaciares tropicales andinos tienen una importancia económica, social y ambiental. Sus aguas de deshielo aportan con agua potable e industrial a las principales capitales (La Paz, Quito, Lima) y algunas otras ciudades andinas (Comunidad Andina, 2007).

Actualmente los glaciares en el Perú se encuentran en un proceso de retroceso debido al calentamiento global, encontrándose rangos de pérdidas de más del 40% de la superficie glaciar de acuerdo a estudios realizados por el INAIGEM. Así mismo, esta fusión de glaciares contribuye al incremento del tamaño de lagunas o la aparición de nuevos cuerpos de agua, el incremento por riesgo a inundaciones, sequías, deslizamientos, entre otros.

Una de las cordilleras que viene presentando este proceso de retroceso glaciar es la cordillera Huaytapallana, que mediante el D.S N° 018-2011 MINAM establece su creación como Área de Conservación Regional ya que su importancia radica en el consumo del recurso hídrico (originado en las partes altas) por la población, su aprovechamiento en las actividades agrícolas y comerciales, y la conservación de la diversidad biológica y paisajística.

1.1.1.1 Formulación del Problema

Problema Principal:

- ¿Cómo influye el cambio de la superficie glaciar en el aporte hídrico de la subcuenca Shullcas?

Problema Secundario:

- ¿Cuánto fue la variación de la superficie glaciar entre los años 1989 – 2019 en la cordillera del Huaytapallana?
- ¿Cómo es el comportamiento hidrometeorológico en la subcuenca del río Shullcas durante las épocas de estiaje?
- ¿Cuánto será el cambio de la superficie glaciar en la subcuenca shullcas en un posible escenario futuro?

1.2 Antecedentes

Zubieta & Lagos (2010), presentaron un artículo de investigación titulado *“Estudio de la dinámica superficial de glaciares en la cordillera Huaytapallana por sensoramiento remoto periodo 1976 – 2006 Huancayo – Perú”*. El artículo tiene como objetivo principal analizar el comportamiento espacial del sistema de glaciares de circo que presenta la cordillera Huaytapallana, obteniéndose como resultado el acelerado proceso de ablación de toda la superficie glaciar, alcanzando una pérdida de hasta un 57.4% en toda su superficie para el año 2006.

Arroyo & Gurmendi (2011), presentaron un artículo de investigación titulado *“Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay y Chuspicocha por variaciones en el nevado Huaytapallana”*. Su objetivo general fue: Estimar los efectos de las variaciones de torrentes de agua de los glaciares del nevado Huaytapallana que emanan al sistema hídrico de las lagunas Lasuntay y chuspicocha, cuyos resultados obtenidos fueron que los torrentes de

caudal de agua que emanan del nevado Huaytapallana a los lagos Lasuntay y Chuspicocha en 1 226 700 m³ en la estación de verano; y de 245 340 m³ en la estación de primavera, en el que se deduce que la mayor acumulación en ambas lagunas fue en la estación de verano y la menor acumulación en la estación de primavera.

Loroña (2011), presentó un trabajo de investigación titulado ***“Evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca de Quillcay y la influencia en su rendimiento hídrico”***. El objetivo principal del trabajo de investigación fue el de conocer los cambios de la cobertura glaciar en la subcuenca Quillcay y su influencia en el rendimiento hídrico, obteniéndose una pérdida del 46% de su área y una tasa de retroceso del 0.42 Km²/año; así mismo, se pudo conocer los aportes del caudal del glaciar y su escorrentía, cuyo resultado fue de 2,00 m³/seg a nivel medio anual.

Arroyo et al. (2012), presentaron un artículo de investigación titulado ***“Impacto de las actividades antrópicas en el nevado Huaytapallana”***. Su objetivo principal fue explicar la influencia de las actividades antrópicas en la variación de las capas de acumulación de nieve en los glaciares de la vertiente sur – occidental del nevado Huaytapallana de los Andes centrales del Perú, en el ciclo hidrológico 2011 – 2012. Se encontró que las actividades de turismo vivencial es una de las principales que afectan al glaciar con un 60 % de impacto, seguido de las actividades de reforestación que tiene un 20% de impacto y por último la actividad de pastoreo con un 10% de impacto, y a altitudes superiores a los 5000 msnm se registran impactos menores.

Baldera (2015), presentó un trabajo de investigación titulado ***“Análisis de la variación de la cobertura glaciar y su influencia en el aporte hídrico de la subcuenca Llullán – Rio Santa”***. El objetivo principal del trabajo de investigación fue de conocer la cobertura glaciar en la subcuenca Llullán mediante el empleo de las técnicas de teledetección y SIG con la

finalidad de establecer en que forma influye en el aporte y la disponibilidad hídrica, determinándose un 15.8% de retroceso durante el periodo 1987 – 2010, y como aporte hídrico se obtuvo un valor de 1.6 m³/s.

Arroyo et al. (2015), presentaron un artículo de investigación titulado *“Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú”*. el propósito de la investigación fue identificar los efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú, utilizando en método del índice de precipitación estandarizada (SPI) para el análisis de las anomalías climáticas, el método de transformada rápida de Fourier para la identificación de la variabilidad climática y el método de geoprocesamiento de imágenes satelitales Landsat mediante la técnica de teledetección. Se identificaron cuatro anomalías negativas que corresponden a los años 1991 (extremadamente seco) y 1986, 2005, 2009 (seco), que influyeron en la pérdida de la cobertura de nieve en el nevado del Huaytapallana.

Echegaray (2015), presentó un trabajo de investigación titulado *“Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes”*. Presenta como objetivo principal determinar el efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferente altitudes, siendo los resultados obtenidos como la siguiente relación $y = 0.0319x - 0.1258$, que indica menor pérdida de masa glaciar cuando sea mayor la presencia de la cobertura vegetal nativa; así mismo, se obtuvo una relación directa con la altitud, siendo para el rango altitudinal de 4950 – 5000 la siguiente relación $y = -1.04x + 12.79$ donde a menor altitud menor será la pérdida de masa glaciar, mientras que para el rango altitudinal 5000 – 5050 se determinó la siguiente relación $y = -0.55x + 28.18$, que indica a mayor altitud se producirá menor masa glaciar.

Inoue (2018), presentó un trabajo de investigación titulado *“Evolución de la cobertura glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica de la subcuenca Blanco – Rio Santa.”* El

objetivo principal del trabajo de investigación fue conocer la variación de la cobertura glaciar en la subcuenca Blanco mediante técnicas SIG y la teledetección y analizar su influencia hídrica, obteniéndose un retroceso glaciar del 23.5% durante el periodo 1987 – 2016. Así mismo, se obtuvo que el aporte hídrico del glaciar promedio de la zona es de 1.78 m³/s, tomando para esto los meses en temporada de estiaje debido a la escasez de precipitación, siendo el aporte del glaciar la principal fuente de abastecimiento hídrico de los ríos durante esa época.

Maldonado (2019), presento un trabajo de investigación titulado ***“Impacto ambiental del visitante y capacidad de carga turística en el área de conservación regional Huaytapallana”***. Su objetivo principal fue identificar el impacto ambiental que generan los visitantes y determinar la capacidad de carga en dos senderos turísticos (uno vehicular y otro peatonal) y en dos zonas de ritual del área de conservación regional. Se encontró un impacto ambiental de los visitantes en el medio natural negativo (-532), siendo el suelo, aire y fauna los más afectados, sin embargo, en el factor socioeconómico se encontró un valor positivo (504).

Bulege-Gutiérrez & Custodio (2020), presentaron un artículo de investigación titulado ***“Cambio climático y retroceso glaciar en la cordillera Huaytapallana, Perú”***. Su objetivo general fue: Describir y determinar la relación de la temperatura ambiental, como manifestación del cambio climático, y el retroceso de la masa glaciar de la cordillera Huaytapallana en Perú, en cuyo resultado se encontró una temperatura mínima de 4.757 °C para el año 2016 y que afecta en la reducción de la masa glaciar, encontrándose para el mismo año una superficie de 11.86 Km². Así mismo, indican que existe una relación inversa, moderada y significativa entre el incremento de la temperatura mínima y el retroceso glaciar de la cordillera huaytapallana.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo General

- ❖ Determinar el cambio de la superficie glaciar y su influencia en el aporte hídrico en la subcuenca Shullcas – Río Mantaro.

1.3.2 Objetivo Específico

- ❖ Determinar el cambio de la superficie glaciar mediante técnicas de teledetección y SIG en la subcuenca Shullcas durante el periodo de 1990 - 2020.
- ❖ Analizar el comportamiento hidrometeorológico de la subcuenca Shullcas con la finalidad de conocer el aporte hídrico de la superficie glaciar.
- ❖ Determinar la tendencia evolutiva de la superficie glaciar y el aporte hídrico por deshielo en la subcuenca Shullcas, con la finalidad de conocer sus escenarios futuros.

1.4 Justificación

El calentamiento global es uno de los problemas que mas interés genera en la comunidad científica, siendo una de las causas principales la emisión de gases de efecto invernadero, generado en gran medida por las actividades humanas. Una de las consecuencias propias del calentamiento global es el aumento gradual de la temperatura ambiental, generando el retroceso de los glaciares tropicales y, que en su mayoría se encuentran ubicados en la cordillera de los andes.

Los glaciares en el Perú cumplen un rol importante al ser una fuente natural de reserva hídrica, siendo fuente de agua para las diferentes actividades socioeconómicas como la agricultura, la industria y el consumo doméstico; y que su posible desaparición generaría un estrés hídrico provocando un deterioro del recurso en términos de cantidad y calidad.

A través del presente estudio, se pretende analizar si el cambio de la superficie glaciar tiene influencia en el comportamiento hídrico en el caudal de la subcuenca Shullcas; así mismo,

contribuir con el aporte de información que puede ser de utilidad para las autoridades locales en la toma de decisiones, a fin de poder mejorar el adecuado manejo del recurso hídrico y, que cumplen un rol importante en las diferentes actividades socioeconómicas; así como, al ser un recurso fundamental para el desarrollo de los procesos biológicos, el sostenimiento y la reproducción de la vida.

1.5 Hipótesis

- **Hi:** El retroceso glaciar influye de manera desfavorable en el aporte hídrico de la subcuenca Shullcas (Tipo de Hipótesis: Hipótesis causales bivariados, ya que se establece una relación entre una variable independiente y una variable dependiente) (Hi: $X \rightarrow Y$).

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Teledetección

El término teledetección es una traducción al idioma castellano de la expresión inglesa “*remote sensing*” que hasta los años sesenta del siglo pasado se refería a las fotografías aéreas captadas con métodos *ópticos – químicos* desde cámaras, lentes y películas fotográficas transportadas en globos y aviones. Es a partir de entonces, que se ha reservado este término a las técnicas de captura de imágenes con métodos ópticos electrónicos desde sensores transportados en plataformas, constituidas por aviones dentro de la atmósfera terrestre y, sobre todo, por satélites artificiales, situados en órbitas localizadas fuera de la atmósfera terrestre (Quiróz, 2011).

La teledetección, podría definirse como la ciencia o el arte de adquirir información sobre un determinado objeto, área o fenómeno a través de los datos adquiridos mediante un dispositivo que no está en contacto directo con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Casal & Freire, 2012, p. 109 - 110); así mismo, se encarga de estudiar las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre estas y las características de los diferentes materiales. Los captadores pueden ser cámaras fotográficas, radiómetros de barrido multiespectral (MSS), radares y láseres. Estos aparatos generan imágenes analizando la radiación emitida o reflejada por las formas y objetos de onda en las cuales son sensibles (ultravioleta, visible, infrarrojo próximo, infrarrojo técnico, hiperefrecuencias) con el fin de conocer la variada gama de formas y objetos (Sacristán, 2006, p. 16 - 17).

A pesar de que la teledetección tal y como es aplicada hoy en día, esta técnica ha venido utilizándose desde hace mucho tiempo atrás. En el ámbito internacional, quizás una de las referencias más antiguas sean las observaciones astronómicas de Galileo Galilei a comienzos del siglo XVII. Hubo que esperar un siglo desde estas observaciones hasta la primera referencia

grafica registrada de un hombre observando el suelo desde el aire. Este hecho ocurrió en 1794 durante la batalla de Fleurus (hoy en día Bélgica) cuando los hermanos Montgolfier utilizaron un globo aerostático para observar los movimientos del enemigo. A partir de este momento los avances en teledetección estuvieron ligados a fines militares; hasta relativamente la década de los sesenta, cuando empezaron a cobrar importancia los sensores civiles (Casal & Freire, 2012, p. 110).

2.2 Componentes del sistema de teledetección

La información que se genera a partir de la teledetección es posible gracias a la interacción de la energía electromagnética con la superficie terrestre y su comportamiento reflectivo es variable, ya sea por factores externos (ambientales), como por sus características físico-químicos en el momento que se realiza la captura de imagen (Pérez & Muñoz, 2006).

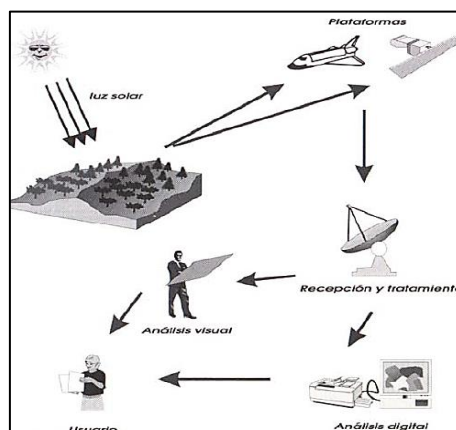
Según Emilio Chuvieco (1995), el sistema de teledetección incluye los siguientes elementos:

- Fuente de energía: responsable del flujo energético detectado por el sensor. Puede tratarse de una fuente externa al sensor (teledetección pasiva), o de un haz energético emitido por el mismo sensor (teledetección activa). La fuente de energía más reconocida es la energía solar.
- Cubierta terrestre: Constituida por la cobertura vegetal, suelo, agua y las construcciones humanas que reciben la fuente de energía, y que a la vez reflejan dicha de acuerdo a sus características físicas.
- Sistema sensor: Tiene como objetivo captar la energía reflejada por la cubierta terrestre, codificarla y enviarla al sistema de recepción.
- Sistema de recepción – comercialización: Es la encargada de recibir la información enviada por el sensor, procesarla y enviarla al interprete.

- Interprete: Analiza la información orientada a facilitar la evaluación de un determinado problema de estudio.
- Usuario final: Encargado de analizar la información derivada de la interpretación, a partir del cual puede emitir una opinión sobre las consecuencias que de él se deriven.

Figura 1

Componentes del sistema de teledetección



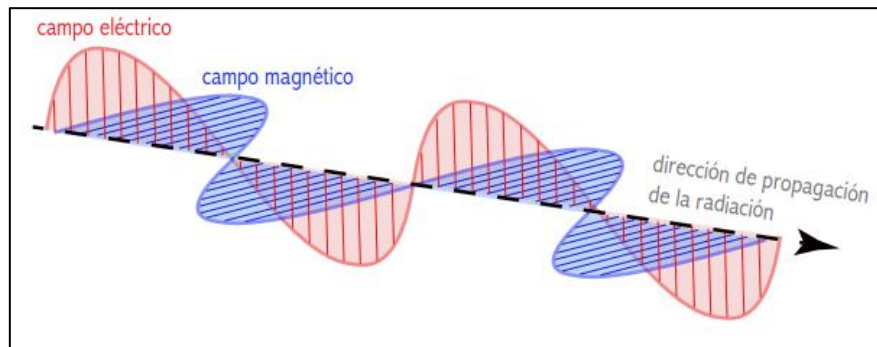
Nota. Reproducida de Componentes de un sistema de teledetección, Pérez & Muñoz (2006).

2.3 El espectro electromagnético

La radiación electromagnética es una combinación de los campos eléctricos y magnéticos oscilantes que se propagan a través del espacio y que transportan energía, se diferencia de los otros tipos de ondas; como el sonido, que necesita un medio de transporte, la radiación electromagnética puede transportarse a través del vacío (Revuelta et al., 2008). Estos campos eléctricos y magnéticos, son mutuamente perpendiculares entre sí, y perpendiculares a la dirección de propagación, dicho flujo recibe el nombre de radiación electromagnética y se explica por dos teorías físicas (Pérez & Muñoz, 2006):

Figura 2

Propagación de la energía electromagnética



Nota. Reproducida de Onda Electromagnética, Lira & Guevara (2018).

- ✓ Siendo la primera la teoría ondulatoria, que se basa en la propagación de dos campos (eléctrico y magnético) como se observa en la figura 2, esta teoría se sustenta en la siguiente formula: $c = \lambda * F$

Donde “c” es la velocidad de propagación de la luz (constante), "λ" y “F” la longitud de onda y la frecuencia respectivamente.

- ✓ Y la otra es la teoría cuántica, que se basa en sus propiedades energéticas siendo la formula esencial: $Q = h * F$

Donde “Q” es la cantidad de energía transporta por una onda, “h” es una constante (la constante de Planck) y “F” es la frecuencia.

Despejando F de la formula precedente y sustituyendo nos encontraríamos con la siguiente expresión:

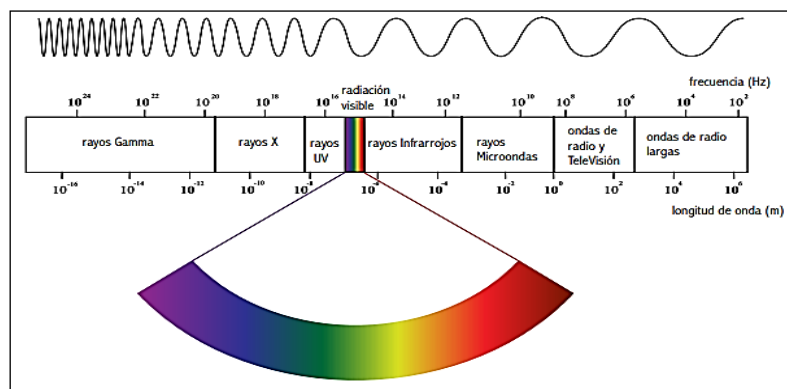
$$Q = h * \left(\frac{c}{\lambda}\right)$$

A partir de esta expresión se deduce que a medida que trabajemos con longitudes de ondas mayores, sus contenidos energéticos serán menores y por lo tanto habrá más dificultades para la detección de estas radiaciones.

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Las longitudes de onda pueden medir desde 108 m hasta 10⁻¹⁶ m, lo que da el enorme intervalo de 22 órdenes de magnitud, que cubre desde los rayos γ (fotón de muy alta energía) hasta las ondas de muy baja frecuencia que son ondas de radio de largo alcance, como son las de las comunicaciones militares. La región del visible ocupa un intervalo muy pequeño del espectro electromagnético: de los 380 nm a los 830 nm. El ultravioleta (UV) está más o menos entre los 10 nm y los 380 nm. La radiación infrarroja (IR) va de los 830 nm a más de 400 000 nm. La radiación solar que recibimos en la Tierra abarca, en un 98%, de los 250 nm a los 2 500 nm (Lira & Guevara, 2018).

Figura 3

Espectro electromagnético



Nota. Reproducida de, Lira & Guevara (2018).

2.4 Tipos de sensores

Un sensor es capaz de captar la radiación que procede del suelo dentro de una cierta banda espectral, y transformarla en una señal que permite la memorización de la información. Existen diversos tipos de sensores adaptados a los diferentes usos. Sumariamente, un sensor se compone de una óptica y de un detector sensible a la radiación electromagnética. Los más

importantes son los aparatos fotográficos, los equipos de barrido multiespectral, radiómetros milimétricos y el radar (Panareda, 1974, p. 229).

Según Reuter (2009), los sistemas de sensores pueden ser divididos en dos categorías:

- Sistemas globales de adquisición: por ejemplo, el ojo humano, cámaras fotográficas y cámaras de TV, que registran una escena completa instantáneamente;
- Sistemas de adquisición secuencial: por ejemplo, radiómetros, radares, lidars y sonares, que adquieren información línea por línea de la escena. Esta segunda categoría es generalmente dividida en sensores pasivos y sensores activos.

2.4.1 Sensor Pasivo

Son de mayor valor en las aplicaciones de la percepción remota en la evaluación de los recursos naturales. Estas señales, generadas por la radiación solar natural, puede proveer información muy rica sobre los objetos percibidos (Bravo, 2017). Los sensores remotos pasivos capturan la energía electromagnética proveniente del sol que es reflejada, así como la emitida por la superficie terrestre en distintas longitudes de onda (Visible: 0,4-0,7 μm , Infrarrojo Cercano: 0,7-1,3 μm , Infrarrojo Medio: 1,3-8 μm , Infrarrojo Térmico: 8-14 μm) (Di Bella et al., 2008, p. 40).

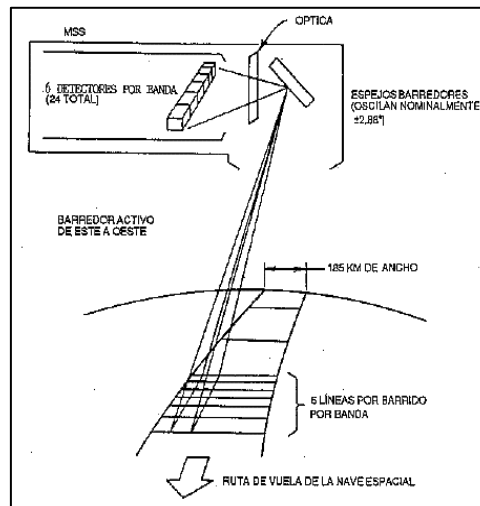
Son algunas las categorías descritas por Reuter (2009):

- ✓ Radiómetro de barredores: estos sensores recolectan una línea de datos a través del uso de un espejo rotativo para barrer la vista perpendicular a la línea de vuelo, por ejemplo, el barredor multiespectral (MSS) del Landsat. El movimiento hacia adelante del satélite o del avión produce líneas subsecuentes de datos
- ✓ Radiómetros de barrido accionado: este tipo de sensor, por ejemplo, el HRV del SPOT, tiene uno o varios arreglos de detectores. Una línea de adquisición es vista

instantáneamente sin ningún movimiento mecánico lo cual es una mejora significativa respecto a los radiómetros de barrido.

Figura 4

Radiómetro de barrido multispectral (MSS) LANDSAT



Nota. Reproducido de Orientación del LANDSAT MSS, Reuter (2009).

Así mismo, Reuter (2009) presenta algunas características propias de los sensores pasivos como las siguientes:

- Campo instantáneo de vista (IFOV) este es definido como el ángulo (en radianes o grados) sobre el cual el detector es sensible a la radiación. El MSS del LANDSAT-2 tiene un IFOV de 0.086 de miliradianes. Al saber que la altitud de un satélite es de 920 km, se puede calcular que el elemento de la fotografía (pixel) representa un área sobre la superficie de la tierra la cual tiene dimensiones de 80 m x 80 m (celda de resolución del terreno) en el punto nadir.
- Amplitud de cobertura: Ésta es definida como la distancia lineal del terreno cubierta en la dirección de la ruta. Para un radiómetro barrido esto depende del campo angular de vista (AFOV) o ángulo de barrido; por ejemplo, el ángulo de barrido del LANDSAT-2 MSS es igual a 11.52° y, a una altitud de 920 km, resulta en una amplitud de barrido de

185 km. Para el radiómetro de barrido accionado, el campo de observación está relacionado al tamaño del arreglo; por ejemplo, los 6000 detectores del HRV del SPOT cubren un ángulo de 4.13° , a una altitud de 832 km, resultando en una amplitud de barrido de 60 km.

2.4.2 Sensor Activo

Es aquel sistema de percepción remota que utiliza su propia fuente de iluminación y, por tanto, se tiene control. Este tipo de sistemas, son los que han permitido extender el campo de estudio de la percepción remota a una diversidad de fenómenos donde la fuente de iluminación ya no emite luz visible para iluminar la escena. En estos casos la fuente puede ser luz ultravioleta o infrarroja, rayos gamma o rayos X, o bien un haz de partículas de protones o neutrones (Lira, 1987).

Los sensores activos son utilizados frecuentemente cuando la radiación natural en una banda particular del espectro no es suficiente para iluminar adecuadamente al objetivo, esto es, la radiación natural está por debajo del umbral de la señal para ruido (Reuter, 2009).

- **RADAR:** Es un radiómetro activo de micro - ondas, que trabaja en una banda comprendida entre 0.1 cm y 1 m. gracias a su flexibilidad puede trabajar en cualquier condición atmosférica (Chuvieco, 1995). Este sistema activo de teledetección proporciona su propia fuente de energía, ilumina el terreno con energía electromagnética, detecta la energía devuelta por el terreno (denominada respuesta radar) y entonces la registra formando una imagen (Reuter, 2009).
- **LIDAR:** Es una tecnología que permite determinar la distancia desde un emisor láser a un objeto o superficie utilizando un haz de láser pulsado. Un LIDAR es un sensor activo que emite y recibe luz en las longitudes de onda visible e infrarroja cercana. El láser es un dispositivo para producir luz. El LIDAR utiliza rayos láser para generar pulsos de

luz cortos y de alto poder. En la medida que el pulso pasa a través de la atmosfera, la luz difusa que regresa es detectada por un sistema óptico y es electrónicamente analizada para proporcionar una medición de la intensidad de la luz reflejada por constituyentes del objetivo, en función de la distancia desde el sensor (Reuter, 2009).

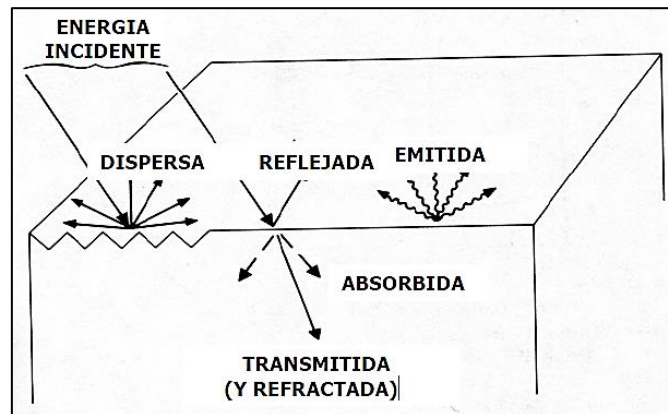
2.5 Interacción de la atmosfera con la radiación

La teledetección es aquella ciencia que nos permite obtener información de un objeto a distancia y, esto no implica que esa información llegue al receptor tal cual salió del receptor. Entre la tierra y los sensores situados en los satélites se encuentra la atmosfera, que perturba la radiación de diversas maneras distorsionando las imágenes que recibimos (Miguélez Pose, 2002).

Se entiende que la atmosfera está compuesta principalmente de gases como el anhídrido carbónico, oxígeno, ozono, nitrógeno, argón, vapor de agua y aerosoles. Entre estos componentes, el anhídrido carbónico, el ozono y el vapor de agua son los principales responsables de la interacción con la energía electromagnética. Existe un efecto triple como son: (i) la absorción de la energía en determinadas bandas del espectro, lo que limita la observación espacial a aquellas bandas en donde esta absorción es menos intensa o nula; (ii) dispersión, de determinados flujos, en función de su longitud de onda, y (iii) emisión, como todo cuerpo caliente, que tiene su mayor importancia en el infrarrojo térmico. Estos procesos introducen modificaciones que alteran, en ocasiones muy severas, la radiación originalmente propagada entre la cubierta y la atmosfera (Chuvieco, 1995).

Figura 5

Interacción de la atmósfera con la radiación electromagnética



Nota. Reproducida de Procesos de interacción entre la energía electromagnética y la materia, Pérez & Muñoz (2006).

2.5.1 Absorción Atmosférica

La atmósfera se comporta como un filtro selectivo, es decir, absorbe y elimina unas longitudes de onda y deja pasar otras (Quiróz Hernández, 2011). Englobamos en este proceso a la energía transferida de la radiación a las moléculas presentes en la atmósfera, que se traduce en un incremento de su energía cinética, tanto en rotación como de traslación y de vibración. Esta transferencia es debido a que la estructura molecular de sus gases atmosféricos es suficientemente compleja como para que aparezcan frecuencias de resonancia a determinadas longitudes de onda (Miguélez Pose, 2002).

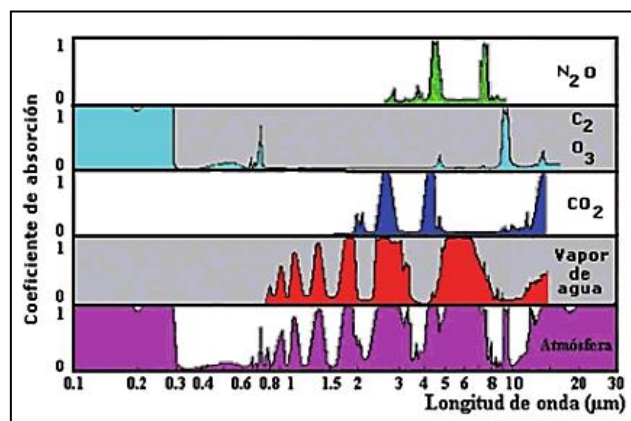
Quiroz Hernández (2011), expone que los distintos componentes de la atmósfera que actúan de un modo diferente sobre las radiaciones:

- El oxígeno (O_2); no deja pasar los ultravioletas por debajo de $0.1 \mu m$, ni el IR térmico ni las microondas.
- El Ozono (O_3); elimina las ultravioletas inferiores a $0.3 \mu m$ y las microondas en torno a los 27 mm de longitud de onda.

- El vapor de agua (H₂O); es el gas que presenta mayor nivel de absorción de todos los compuestos presentes en la atmósfera (Miguélez Pose, 2002), elimina o absorbe las radiaciones en torno a 6 μm, las superiores a 27 mm y las comprendidas entre 0.6 y 2 μm.
- El dióxido de carbono (CO₂); absorbe el IR térmico (>15 μm) y atenúa mucho las radiaciones del IR medio (2.4 - 4.5 μm).
- Los aerosoles dispersan mucho las radiaciones comprendidas dentro del espectro visible.

Figura 6

Absorción de la radiación electromagnética por los componentes de la atmósfera



Nota. Reproducida de Absorción de la atmósfera y sus principales componentes de las radiaciones en función de su longitud de onda, Quiróz Hernández (2011).

2.5.2 *Dispersión Atmosférica*

La dispersión es el fenómeno por medio del cual la radiación o las ondas electromagnéticas directas incidentes salen dispersadas, difundidas o esparcidas, en todas las direcciones del espacio, por las moléculas de aire y por los aerosoles sólidos y/o líquidos (Cachorro Revilla, 2008). La dispersión de la radiación electromagnética es causada por la interacción de ésta y los gases y partículas atmosféricas en suspensión. La reflexión consiguiente a ese choque supone un aporte adicional a la radiancia proveniente de la superficie

terrestre (luz atmosférica). En definitiva, se reduce la radiancia directa, aumentándose la difusa. Puesto que las partículas atmosféricas son muy variables en el tiempo y en el espacio, resulta muy complejo cuantificar su influencia final en la imagen adquirida por el sensor. Pese a ello, convendrá tener en cuenta este factor, especialmente cuando se pretenda convertir los valores digitales de la imagen a parámetros físicos, o se aborden estudios multitemporales (Chuvieco, 1995).

Los principales causantes de la dispersión atmosférica son los aerosoles y el vapor de agua. Los aerosoles son partículas en suspensión de origen muy diverso; como al movimiento oceánico (oceánico), o debido al polvo en suspensión o partículas originadas por la combustión (continental). La dispersión está condicionada en función a las características o al origen de las partículas, lo que implica distintos tipos de dispersión, ya que esta es muy dependiente de su diámetro. De esta forma se habla de la dispersión de Rayleigh, dispersión de Mie y la dispersión no selectiva (Chuvieco, 1995).

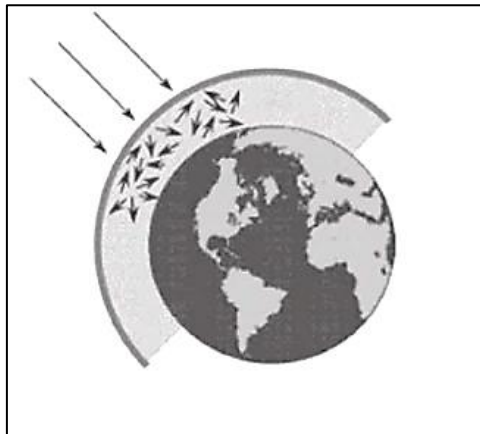
Quiroz Hernández (2011) describe a los tipos de dispersión de la siguiente manera:

- Dispersión de Rayleigh; afecta a longitudes de onda que son inferiores a los diámetros de las partículas o gotículas, como ocurre con las radiaciones de longitud de onda más corta (altas frecuencias). Este tipo es el que se da en el espectro visible, causado por el vapor de agua atmosférico y produce el color azul del cielo.
- Dispersión de Mie; se produce este tipo cuando afecta a longitudes de onda de tamaño similar al diámetro de las partículas que la producen y que están constituidas por polvo y aerosoles, aunque también está presente en incendios forestales o en brumas costeras (Chuvieco, 1995). Afecta a longitudes de onda algo mayores que el tipo anterior.

- **Dispersión no selectiva;** afecta este tipo por igual a cualquier tamaño de longitud de onda del visible y la producen las nubes. Por esto las nubes aparecen de color blanco, ya que afectan del mismo modo a todas las longitudes de onda del espectro visible.
- **Dispersión selectiva;** es la responsable de que llegue luz a las zonas de sombra y se vean iluminadas. Esta iluminación atmosférica debe distinguirse de la propia solar directa (Gutierrez Claverol, 1993).

Figura 7

Esquema de la dispersión de la radiación electromagnética



Nota. Reproducido de Efecto atmosférico de dispersión de las radiaciones, Quiroz Hernández (2011).

2.5.3 Emisión Atmosférica

El efecto de emisión atmosférica resulta fundamental en el trabajo dentro del infrarrojo térmico, si se pretende obtener mediciones de temperatura a partir de las imágenes espaciales. Al igual que cualquier cuerpo por encima del cero absoluto, la propia atmosfera emite su propia energía calorífica; como por ejemplo el metano y el vapor de agua (Quiroz Hernández, 2011), por lo que ese parámetro debe considerarse para estimar la emitancia espectral originalmente proveniente del suelo (Chuvieco, 1995).

Como se produce absorción y emisión de manera simultánea en este intervalo del espectro electromagnético, las correcciones atmosféricas de las imágenes en el IR térmico

suelen basarse en la absorción diferencial entre dos bandas contiguas dentro del sector del IR. Estas técnicas son como algoritmos de ventana partida. También se utilizan técnicas que ponen en valor las diferencias entre dos o más ángulos de captación (corrección angular) (Quiróz Hernández, 2011).

2.6 Resolución de los sistemas de sensores

Las imágenes satelitales tienen diferentes características. Estas dependen de los sensores o detectores con las que son obtenidas (González Bernal, 2017). La resolución de las imágenes satelitales se relaciona con las características del sensor para captar y diferenciar información (Díaz González et al., 2014), es su habilidad para registrar información en detalle de las distintas cubiertas. La resolución depende de la capacidad de los sensores para distinguir variaciones de la energía electromagnética del detalle espacial que captura y del número y ancho de las bandas que alberga (SEMAR, 2009).

2.6.1 Resolución Espacial

Esta corresponde al área sobre la tierra que cubre cada pixel de la imagen (González Bernal, 2017); así mismo, está relacionada con la escala de trabajo y la fiabilidad de la información (SEMAR, 2009). La resolución espacial hace referencia al nivel de detalle en la imagen; esta resolución indica el tamaño mínimo del objeto que se puede distinguir, el cual se determina por el tamaño del pixel, medido en metros sobre el terreno (Díaz González et al., 2014).

En los sensores ópticos – electrónicos la unidad de resolución espacial es el IFOV (Instantaneous field of view): *sección angular observada desde el sensor, medida en radianes*; aunque también se utiliza de un modo generalizado la unidad en metros de *la distancia sobre el terreno que se corresponde con dicho ángulo*:

$$d = 2 * H * tg \frac{IFOV}{2}$$

Esta distancia en metros “ d ” tiene una correspondencia en su valor escalar con la unidad de información mínima en la imagen o pixel, aunque también puede captarse objetos de tamaño inferior a un pixel, lo normal es que su tamaño cubra varios pixeles. La dificultad en las diferenciaciones radica en que un pixel mixto o compuesto de varias cubiertas no se parece a ninguna de ellas por separado. Esta resolución depende de la altura orbital, la velocidad de exploración o barrido, en número de detectores en los sensores, el radio de abertura en los radares y la longitud de onda (Quiróz Hernández, 2011).

Tabla 1

Resolución espacial

SATÉLITE	SENSOR	RES. ESPACIAL
QUICKBIRD	---	0.61 m.
IKONOS	---	1 m.
ORBVIEW 3	---	1 m.
SPOT 5	---	2.5 m.
SPOT 3	HRV pan	10 m.
LANDSAT 7	ETM + pan	15 m.
LANDSAT 5	TM pan	30 m.
MOS	VTIR	900 m.
NOAA	AVHRR	1100 m.
METEOSAT	VISSR	5000 m.

Nota. Reproducida de, Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto (2006)

2.6.2 Resolución Espectral

La resolución espectral indica el número y el ancho de las bandas espectrales en que un sensor capta la energía reflejada de la superficie terrestre. La resolución espectral de un sensor permite discriminar las coberturas de la superficie terrestre y se obtiene una mejor resolución a mayor número de bandas y menor ancho (Díaz González et al., 2014). La elección del número, anchura y localización de las bandas espectrales de un sensor dependen de la aplicación. Los satélites pueden clasificarse como monoespectrales para el caso de los radares que presenta una sola banda, multispectrales de 2 a varias bandas e hiperespectrales capaces de obtener información simultánea de cientos de bandas (SEMAR, 2009).

2.6.3 Resolución Radiométrica

Hace mención a la sensibilidad del sensor, esto es, a su capacidad para detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe (Chuvieco, 1995). La resolución radiométrica es la capacidad del sensor para discriminar niveles de intensidades de radiancia espectral. En los sistemas analógicos como la fotografía, la resolución radiométrica viene determinada por el número de niveles de gris que pueden obtenerse. En los sistemas óptico – electrónicos, la radiancia incidente en el sensor es registrada matricialmente por un arreglo de celdas, cada una de la cuales reporta un nivel digital (ND) proporcional a la cantidad de energía electromagnética recibida (Tristán et al., Mayo 2008). De este modo el sensor TM de LANDSAT tiene una resolución radiométrica de 8 bits con lo que pueden registrarse valores decimales equivalentes en un rango de 0 a 255, es decir 256 (2^8). Algunos sensores llegan a ofrecer hasta 10 o 12 bits (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006). En el dominio infrarrojo térmico, esta resolución se traduce en medidas de temperatura diferente (NEdT); mientras que, en el visible, determina los valores de reflectividad (Gandía & Meliá, 1991).

2.6.4 Resolución Temporal

Mide el tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto. Con ello se determina la periodicidad de adquisición de imágenes de una misma zona. De este modo podemos cuantificar la capacidad que tiene un sistema sensor para registrar los cambios temporales acaecidos sobre una determinada cubierta, lo cual es de vital importancia a la hora de abordar estudios evolutivos (Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto, 2006). El ciclo de cobertura está en función de las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación), así como el diseño del sensor (Bravo Morales, 2017):

- ❖ Alta resolución: < 1 día – 3 días.
- ❖ Media resolución: 4 – 16 días.
- ❖ Baja resolución: > 16 días.

2.7 Tipo de imágenes de teledetección

Bravo Morales (2017), describe cuatro tipos de imágenes que son obtenidas por los sensores ubicados en los satélites, los cuales son:

- ❖ Imagen multiespectral; es aquella que tiene asociado varios valores numéricos en cada pixel, tal como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. Es el producto más útil, ya que nos proporciona la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen.
- ❖ Imagen pancromática; es aquella que dispone de una sola banda espectral que abarca en gran parte del visible y parte del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen en la escala de grises (blanco y negro).
- ❖ Imagen fusionada; es aquel tipo de imagen que se obtiene mediante la fusión de una imagen multiespectral y una imagen pancromática.
- ❖ Imagen estéreo; es aquel tipo de imagen representado mediante dos imágenes de una misma zona tomados mediante una visión distinta.

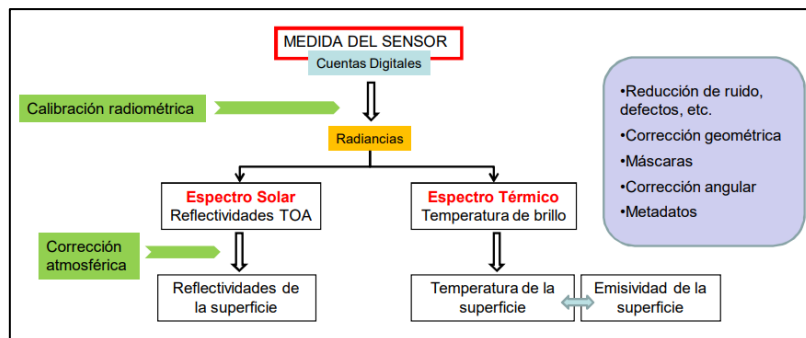
2.8 Tratamiento digital de imágenes

Las imágenes digitales satelitales y las fotografías aéreas juegan un papel importante en la elaboración general de mapas, en la adquisición y visualización de datos en los sistemas de información geográfica, y además de proporcionar una base para la colección de información espacial. Antes de que esta información pueda ser recogida de una forma que sea útil para un sistema de elaboración de mapas o sistema de información geográfica, los datos de imágenes satelitales deben prepararse de forma que se elimine la distorsión de la imagen debido a las variaciones espaciales ocurridas en el proceso de captura de la información e inherentes al movimiento del sensor (aleteo, cabeceo, variaciones de altura y velocidad, etc.) (MINAM, 2014).

Las imágenes satelitales deben ser procesadas para mejorar la visualización de los datos que contienen, los cuales posteriormente serán interpretados con la consiguiente interpretación de información. El proceso de las imágenes satelitales consiste en dos grandes pasos: pre – procesamiento (correcciones radiométricas y geométricas), y procesamiento (mejoras visuales y clasificación). El pre – procesamiento involucra las correcciones radiométricas y geométricas. Las primeras se refieren a la calibración de los sensores en la etapa de prelanzamiento del satélite y sus posteriores actualizaciones mensuales. La segunda se refiere a las correcciones que deben efectuarse debido a las alteraciones conocidas del sistema denominadas correcciones sistemáticas (Tardivo et al., 2008).

Figura 8

Corrección de imágenes satelitales



Nota. Reproducida de Jiménez Muñoz et al. (2011).

2.8.1 Corrección Geométrica

Las imágenes digitales proporcionadas por los distintos sensores presentan una serie de distorsiones con respecto a la “imagen real”. La corrección geométrica pretende eliminar esas deformaciones “recolocando” los píxeles, y rellenando los “huecos” existentes (Jiménez Muñoz et al., 2011). Esta parte del proceso es determinante pues tiene implicaciones directas en la precisión de la posición de los resultados a obtener en el procesamiento, y en el caso de estimación de cambios entre coberturas garantiza que los cambios reportados entre dos imágenes de la misma zona y distintas fechas, se deban a cambios en las coberturas de la tierra

detectadas durante el periodo establecido, y no a diferencias en la posición de las imágenes en el periodo de análisis.

Esta transformación puede basarse en funciones numéricas, que permiten modificar muy flexiblemente la geometría de la imagen. La expresión general de este tipo de funciones sería:

$$f(x) = f_1(c, l)$$

$$f(y) = f_2(c, l)$$

Esto es, las coordenadas x , y de la imagen corregida son función de las coordenadas c , l (columna, línea) de la imagen de entrada. Esta transformación puede emplearse tanto para corregir cartográficamente una imagen, como para superponer dos o más imágenes entre sí. En el primer caso, se pretende transformar coordenadas de la imagen en coordenadas cartográficas (UTM u otras proyecciones), con objeto de que la imagen resultante pueda superponerse sobre mapas convencionales. En el segundo, se busca ajustar dos o más imágenes entre sí, normalmente con objeto de realizar estudios multitemporales (Chuvieco, 1995).

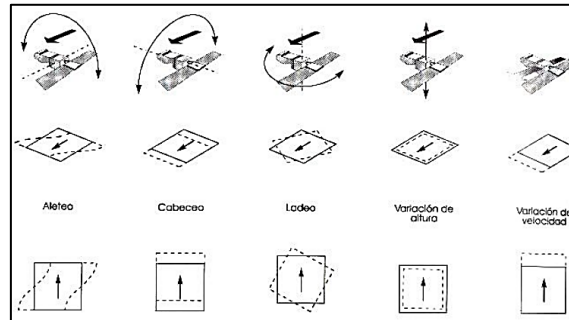
En la presentación de Jiménez Muñoz et al. (2011), presenta a los principales factores que originan distorsiones geométricas:

- Rotación de la tierra;
- Oscilación de la plataforma;
- El sensor;
- Tiempo de barrido;
- Distorsión del aspecto;
- Distorsión panorámica;
- Curvatura de la tierra;

Así mismo, menciona los métodos de corrección, siendo los principales; el método de puntos de control y los modelos orbitales.

Figura 9

Oscilación de la plataforma



Nota. Reproducida de Jiménez Muñoz et al. (2011).

2.8.2 Corrección Radiométrica

Es un término muy genérico, que designa aquellas técnicas que modifican los niveles digitales, con objeto de acercarlos a los que habría presentes en la imagen caso de una recepción ideal (Chuvieco, 1995). Idealmente, cualquier superficie capturada en dos diferentes imágenes de satélite (con el mismo sensor) deberían aparecer con los mismos valores de intensidad. En la práctica esto nunca sucede de la misma manera, debido a las inevitables diferentes condiciones atmosféricas y de iluminación (Ambrosio et al., 2002); así como, los problemas radiométricos derivados del mal funcionamiento del sensor (Chuvieco, 1995).

Para Jiménez Muñoz (2005) la corrección radiométrica, consiste en la conversión del dato medido por el sensor (cuentas digitales, CD) en una magnitud de significado físico, como es la radiancia espectral (L : energía por unidad de tiempo, de área, de ángulo sólido y de longitud de onda). Este proceso también se conoce como calibración radiométrica, y viene dada por:

$$L_{\lambda} = a_{\lambda} CD + b_{\lambda} \quad (a, b: \text{coeficientes radiométricos o de calibración})$$

Una vez tenemos valores de radiancias, es posible obtener distintos parámetros en función del rango espectral en el que se encuentran las bandas del sensor. Así, cuando trabajamos con bandas del visible e infrarrojo cercano las radiancias se transforman a reflectividades, mientras que cuando trabajamos con bandas situadas en la región del infrarrojo térmico, las radiancias se transforman a temperaturas de brillo.

Además; se presentan el caso de los efectos topográficos que produce sombras, afectando a determinados pixeles de la imagen, problema que puede resolverse si se dispone de un modelo de elevación digital (DEM) lo suficientemente preciso. Así mismo; la cubierta nubosa supone el principal obstáculo a la hora de trabajar con imágenes de satélite, sobre todo en la óptica y térmica. Corregir este problema resulta muy complicado, por lo que al final suele aplicarse algoritmos o tests de detección de nubes con el fin de eliminar estos pixeles. Uno de los algoritmos más conocidos es el de Saunders y Kriebel (1988), aplicado a imágenes NOAA-AHVR, y que está determinado por cinco pasos:

- ❖ Prueba de umbral térmico
- ❖ Prueba de coherencia y uniformidad espacial
- ❖ Prueba de reflectividad dinámica
- ❖ Prueba del cociente entre reflectividades
- ❖ Prueba de la diferencia de temperaturas de brillo.

2.8.3 Corrección Atmosférica

El modo particular en que la atmosfera afecta a las imágenes de satélite depende de las características de los sistemas de teledetección. Desde este punto de vista, debe prestarse especial interés a las siguientes características:

- ❖ Resolución espacial,
- ❖ Bandas espectrales y

❖ Características de polarización

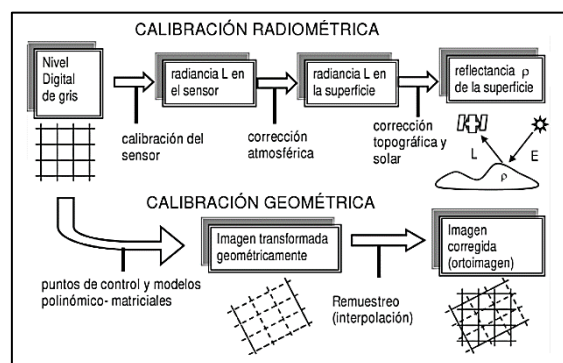
Para conseguir la corrección de la imagen captada deben estimarse las magnitudes de los procesos que contamina la imagen (Sobrino, 2000).

La corrección atmosférica es un proceso que se aplica a las imágenes digitales, con el propósito de eliminar el efecto de los aerosoles y la radiancia intrínseca que se introduce en el sensor y se ve reflejado en la imagen, como producto de la interacción del sensor con la atmosfera. Con el proceso de corrección atmosférica se logra mejorar la calidad visual de la imagen; así como, eliminar el componente intrusivo de la atmosfera (Aguilar Arias et al., 2014).

La dispersión atmosférica no es constante en la imagen sino, que determinadas zonas pueden haber sido más afectadas que otras, en función de la diversa presencia de aerosoles o vapor de agua. Además, el efecto es de la longitud de onda, y varía entre dos imágenes de forma difícil de predecir (Chuvieco, 1995).

Figura 10

Proceso de calibración de una imagen satelital



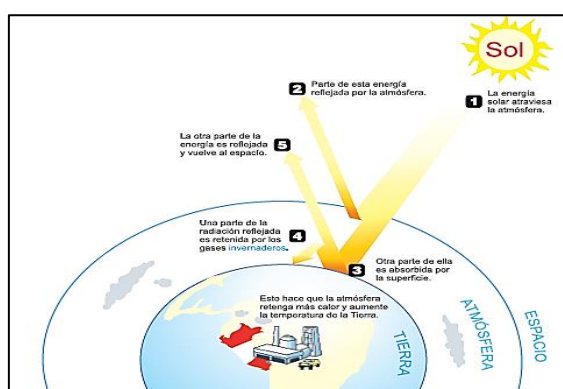
Nota. Reproducida de Procesos de calibración de la imagen satelital, Pérez Gutiérrez & Muñoz Nieto (2006).

2.9 Efecto invernadero

La temperatura del planeta está definida por su masa, la distancia con respecto al sol y la composición de la atmosfera. Esta composición está determinada por 78% de nitrógeno, 21% de oxígeno y el 1% de otros gases, entre ellos los de invernadero como el vapor de agua, dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O), estos gases tienen la capacidad de retener parte de la radiación infrarroja emitida por la superficie terrestre, manteniéndola así aún más caliente de los que estaría en su ausencia, lo que ocasionaría que la temperatura media fuera de alrededor de -20 grados centígrados (Estrada Porrúa, 2001). La emisión continua de estos gases provoca un mayor calentamiento de la superficie terrestre, ya que absorben mayor radiación de la que posteriormente es devuelta por la superficie terrestre (CEPSA, 2015). Es claro, entonces, que la composición de la atmosfera afecta de manera fundamental al clima; mientras más gases de invernadero como el CO₂ se encuentren en la atmosfera terrestre, mayor será la temperatura global del planeta, y mientras haya menos, más fría será la temperatura de la tierra.

Figura 11

Efecto invernadero



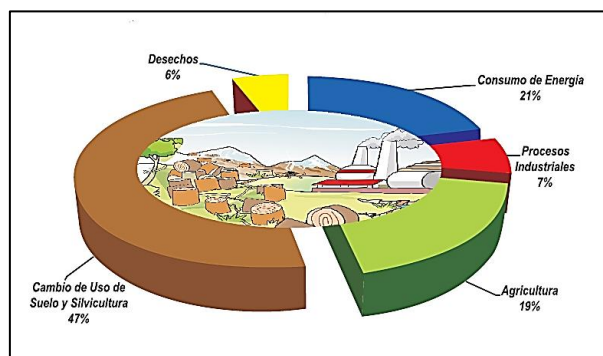
Nota. Reproducida de Efecto Invernadero, MINAM (2009).

Desde el inicio de la revolución industrial a mediados del siglo XVII y debido a las actividades humanas, el planeta ha venido experimentando un aumento constante de las

concentraciones atmosféricas del óxido nitroso (NO₂), dióxido de carbono (CO₂) y metano (CH₄). Las emisiones de las principales acciones humanas que inciden, directa o indirectamente, en el cambio del clima son las siguientes: i) la cantidad y alta frecuencia de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) producida por las industrias de energía y de las diversas manufacturas, en particular del cemento, y las provocadas por el transporte de vehículos terrestres, aéreos y marítimos movilizadas por consumo de combustibles fósiles; ii) la combustión cotidiana, en localizaciones urbanas y rurales, sean comerciales o domésticas, de carbón mineral y vegetal; iii) las emisiones de los residuos sólidos humanos y de la ganadería rumiante; v) las emisiones de los procesos agrícolas y el manejo de fertilizantes; y v) la emitida por la deforestación de bosques húmedos y secos, y el cambio del uso del suelo por el paso de bosques a tierras para actividades agrícolas y ganaderas (Tapia Rojas, 2018).

Figura 12

Emisiones de GEI en el Perú



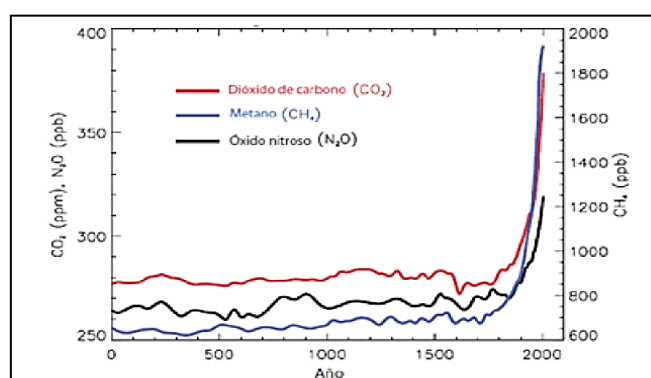
Nota. Reproducida de Emisiones de GEI en el Perú por sectores, MINAM (2009).

Se trata de dos tipos de acciones humanas concurrentes que inciden en la densificación de la capa de gases que bloquea la liberación de la radiación a la estratosfera y provoca el calentamiento de la tierra. De una parte, el incremento sostenido de la emisión de gases de efecto invernadero; y, de otra parte, la deforestación de los bosques húmedos y secos, los mismos que estando en crecimiento, constituyen sumideros naturales y reservas de carbono. La actividad humana emite gases y simultáneamente destruye los sumideros naturales de

carbono (Tapia Rojas, 2018). La mayor parte de mundo científico está de acuerdo sobre las consecuencias a largo plazo de la emisión continua de GEI si no se llevan a cabo mayores esfuerzos adicionales a las actuales: un mayor calentamiento y cambios en el clima global, aumentando la probabilidad de grandes, generalizados e irreversibles cambios en la población y los ecosistemas (CEPSA, 2015).

Figura 13

Concentración de los GEI en los dos últimos milenios



Nota. Reproducida de Concentración de los principales GEI en los dos últimos milenios, Constantini et al., (2018).

A los gases de efecto invernadero se los caracteriza por su potencial calentamiento global (GWP por su sigla en inglés), que es la medida de cómo una cantidad determinada de GEI contribuye al calentamiento global. El GWP es calculado sobre un intervalo de tiempo específico, y este valor debe ser declarado para la comparación (Constantini et al., 2018).

Tabla 2

Potencial calentamiento global (GWP)

Gas	Potencial Calentamiento Global (GWP)
CO2	1
CH4	21
N2O	296
HFC	140 – 11 700
PFC	6 500 – 9 200

Nota. Reproducida de Potencial de calentamiento global de algunos gases de efecto invernadero (en 100 años). Adaptado de IPCC (2007). Constantini et al., (2018).

Tabla 3*Emisiones d GEI por sectores en el Perú*

Sector	Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero (INGEI) (%)			
	2010	2012	2014	2016
Cambio de uso de la tierra y silvicultura (UTCUTS)	35	50	45	55
Energía	33	26	30	24

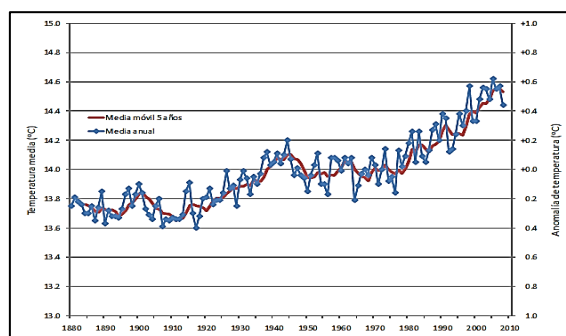
Nota. Reproducida de Porcentaje de emisiones GEI por sector, Soto & Florián (2021).

2.9.1 Calentamiento Global

El calentamiento global se refiere al incremento gradual, observado o proyectado, en la temperatura media de la superficie global terrestre, consecuencia de la alteración del balance energético del planeta (diferencia entre la radiación absorbida y la reflejada) causado por las emisiones resultantes de la actividad humana sobre el ecosistema (CEPSA, 2015). En la discusión sobre el calentamiento global y sus consecuencias en el cambio climático, cabe preguntarse primero si es verdad que la tierra se está calentando y, de ser así, a que ritmo. En cuanto a lo primero, debe aclararse que ya no se trata de ninguna teoría, sino de las conclusiones basadas en la observación sistemática de la temperatura media del planeta (promedio de muchas mediciones de la temperatura del aire cerca de la superficie y de los océanos). Los resultados de los últimos cien años confirman, sin lugar a dudas, que la temperatura media se ha incrementado en un aproximado de 0.1°C por década. Normalmente, los registros indican anomalía o desviación de la temperatura de un valor medio registrado entre los años 1951 y 1980 (este valor medio es muy cercano a 14°C) (Power Porto, 2009).

Figura 14

Variación de la temperatura media desde el año 1980.

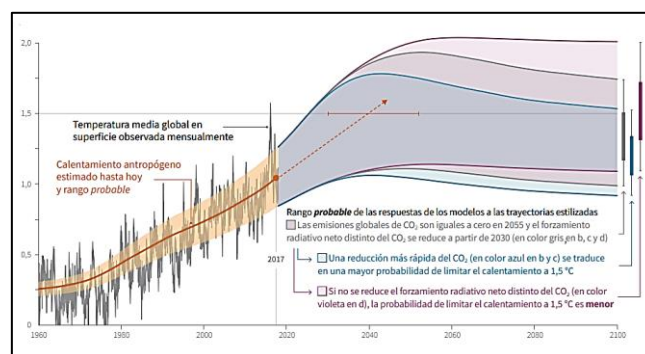


Nota. La línea azul delgada con marcadores se refiere a la temperatura media anual y la línea roja a la media móvil cada cinco años. Reproducida de Variación de la temperatura media global desde 1980, Power Porto (2009).

La denominación “calentamiento global” lleva implícito la influencia de las actividades humanas. La opinión científica mayoritaria sobre el cambio del clima habla que, la mayor parte del calentamiento observado en los últimos 50 años es atribuible a la actividad humana. La principal causa del componente de calor inducido por los humanos se debería al aumento de dióxido de carbono (Barboza Lizano, 2013). Se estima que las actividades humanas han causado un calentamiento global de aproximadamente de 1.0°C con respecto a los niveles preindustriales, con un rango probable de 0.8°C a 1.2°C . Es probable que el calentamiento global llegue a 1.5°C entre 2030 y 2052 si continúa aumentando al ritmo actual (IPCC, 2019).

Figura 15

Calentamiento global entre los años 1850 – 1900



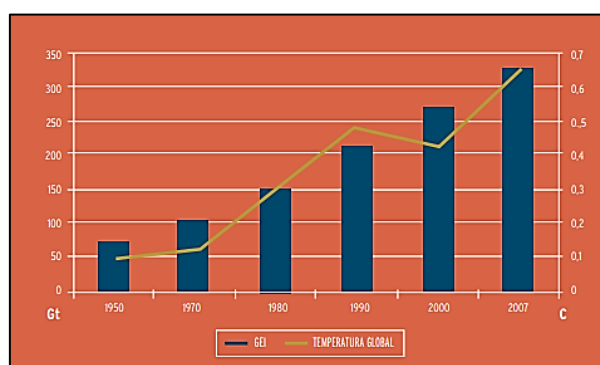
Nota. Reproducida de Calentamiento global con respecto a 1850 – 1900, IPCC (2019).

Las energías fósiles actualmente proveen más del 80% de la energía mundial, y siguen siendo las más convenientes y baratas particularmente para países en desarrollo. Sin embargo, combustibles como el petróleo, el carbón y el gas natural producen grandes cantidades de dióxido de carbono, metano, ozono y óxido nítrico, siendo estos los más abundantes gases invernaderos. Estos gases atrapan la radiación solar y el calor dentro de la atmosfera, aumentando así las temperaturas globales. El 90% del calor es absorbido en el océano. Al mismo tiempo, las temperaturas en la superficie terrestre aumentan, generando olas de calor y sequias (Paterson, 2017).

La extracción de enormes y crecientes volúmenes de combustible fósil está en la raíz del problema del calentamiento global, ya que son los Petro – fósiles la base de nuestra civilización y todo lo que se utiliza en ella este hecho en base de aleación de petróleo y de sus derivados para distribuirlos por las redes del comercio global. Existen otras fuentes de emisiones de gases de efecto invernadero como la deforestación (por la que se libera el carbono retenido en la biomasa del bosque) (Barboza Lizano, 2013).

Figura 16

Temperatura global y emisiones de GEI



Nota. Reproducida de Temperatura global y emisión de GEI, Barco & Vargas (2010).

No debe olvidarse tampoco que el dióxido de carbono no es el único gas de efecto invernadero, y que otros, como el metano, y especialmente los gases de la era industrial, tienen

mayor potencial de calentamiento global (GWP por sus siglas en ingles), porque a pesar de estar presentes en menor concentración tiene un tiempo de vida mucho mayor en la atmosfera (Power Porto, 2009).

Tabla 4

Tiempo de vida de gases de efecto invernadero

Gas	Tiempo de vida atmosférico (años)	GWP a 100 años	GWP a 20 años	GWP a 500 años
CO ₂	5 - 200	1	1	1
CH ₄	12 ± 3	21	556	6,5
N ₂ O	120	310	280	170
HFC-23	264	11.700	9.100	9.800
HFC-125	32,6	2.800	4.600	920
HFC-134a	14,6	1.300	3.400	420
HFC-143a	48,3	3.800	5.000	1.400
HFC-152a	1,5	140	460	42
HFC-227ea	36,5	2.900	4.300	950
HFC-236fa	209	6.300	5.100	4.700
HFC-4310mee	17,1	1.300	3.000	400
CF ₄	50.000	6.500	4.400	10.000
C ₂ F ₆	10.000	9.200	6.200	14.000
C ₄ F ₁₀	2.600	7.000	4.800	10.100
C ₆ F ₁₄	3.200	7.400	5.000	10.700
SF ₆	3.200	23.900	16.300	34.900

Nota. El GWP se define como la fuerza radiante acumulada, integrada de efectos directos e indirectos en un periodo de tiempo, de la emisión de una unidad de masa de un gas relativo a un gas de referencia (CO₂). Reproducida de Tiempo de vida (años) y potencial calentamiento global (GWP) de varios gases de efecto invernadero, Power Porto (2009).

Los efectos del calentamiento global ya se han sentido en nuestro planeta, quizás uno de los más claros es que los glaciares se derriten, tanto de las montañas como los que forman los casquetes polares (Ártico y antártico) (Caballero et al., 2007).

Segin Jimeno Bula (2009), las principales consecuencias del calentamiento global están consideradas por:

- ❖ Aumento del nivel del mar; causado por el aumento de la temperatura ambiental ocasionando el deshielo de los glaciares, la reducción de los casquetes polares y el

descongelamiento del hielo marino. De acuerdo al IPCC, estimo que la fusión de los glaciares periféricos de Groenlandia aumento el nivel del mar en 0.57 ± 0.1 mm por año, hasta el 2005 y para el año 2010, se estima que el nivel del mar aumente entre 16 y 50 cm.

- ❖ Problemas de salud; este es considerado como el menor de los problemas ya que el número de persona mueren por causa de las olas de calor se cuentan como casos aislados y casi siempre, como resultado de una combinación de diferentes patologías. En una publicación de Paterson (2017) menciona que, los científicos creen que las olas de calor se convertirán en fenómeno común en muchos países de América del Sur, ya que las temperaturas intensas causan estrés y saturación calórica en aquellas personas no acostumbradas a esas condiciones, siendo especialmente peligrosas para ancianos y niños. La ola de calor que se dejó sentir en Europa el verano de 2003 causo 70 000 muertes, mientras que las altas temperaturas en Rusia provocaron 56 000 fallecidos en el año 2010.
- ❖ Alteraciones de la vida animal; con el cambio en los procesos de reproducción y crecimiento de los insectos, ya que su adaptación a esos cambios se preserva y transmiten con cada nueva generación.

Una de las preocupaciones en América del Sur es la desaparición de los glaciares en los altiplanos andinos. Según glaciólogos, las temperaturas en las regiones altiplánicas aumentaron más 1,1 grados Celsius durante el siglo XX dando como resultado el derretimiento de glaciares con una rapidez preocupante desde 197. En Perú, los glaciares se han derretido más del 40% de su tamaño original; dos de los glaciares más grandes de Bolivia también se derritieron más del 40% entre 1983 y 2006, según el instituto Medioambiental de Estocolmo. En Colombia solamente queda un 16% de nieves andinas con respecto a mediciones del año 1850 (Paterson, 2017).

2.10 El Perú y el cambio climático

El Perú es uno de los países de América del Sur más vulnerables a los impactos del cambio climático, debido a los procesos ambientales y climáticos relacionados con el calentamiento global; siendo la escasez del agua, uno de los principales problemas que afecta al desarrollo de los objetivos de las comunidades vulnerables (Bergmann et al., 2021). Además, es un país particularmente vulnerable, pues presenta cuatro de las cinco características reconocidas por la CMNUCC; en donde indica que los países de baja latitud y otros países insulares pequeños, los países con zonas costeras bajas, zonas áridas y semiáridas, o zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación, y los países en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles, son particularmente vulnerables a los efectos del cambio climático. Así mismo, presenta siete de las nueve características relacionadas a países cuyas necesidades y preocupaciones deben ser atendidas, de acuerdo a lo establecido en el artículo 4.8 de la convención (MINAM, 2010).

El cambio climático se ha convertido en un tópico noticioso normal en el Perú, lo cual refleja una tendencia mundial, donde el deterioro del ambiente ha pasado a ocupar las primeras planas. Sin embargo, todavía existe mucha confusión respecto a este fenómeno, debido a que el público recibe información de diferentes calidades y de distintos actores, no siempre adecuadamente preparados u honestos (Ráez Luna, 2019).

Tabla 5*Características reconocidas por la CMNUCC*

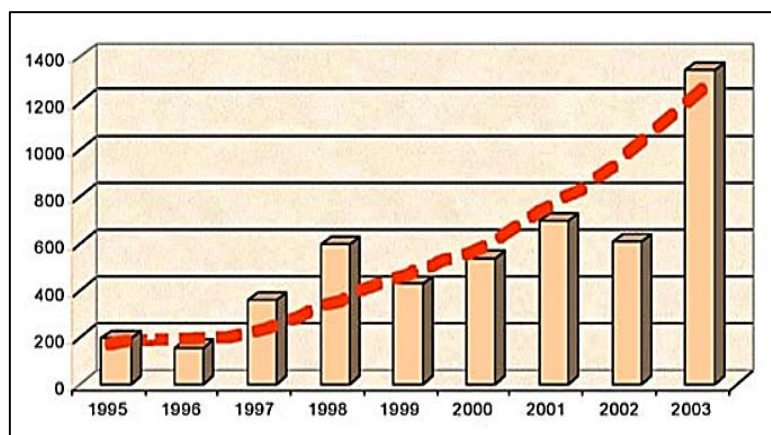
CARACTERÍSTICAS RECONOCIDAS POR LA CMNUCC	PERÚ
Países de baja latitud y otros países insulares	x
Países con zonas costeras bajas	✓
Zonas áridas y semiáridas; zonas con cobertura forestal y zonas expuestas al deterioro forestal	✓
Zonas expuestas a inundaciones, sequía y desertificación	✓
Países con zonas propensas a los desastres naturales	✓
Países en desarrollo con ecosistemas montañosos frágiles; los países con ecosistemas frágiles, incluidos los ecosistemas montañosos.	✓
Los países con zonas de alta contaminación atmosférica urbana	✓
Los países cuyas economías dependan en gran medida de los ingresos generados por la producción, el procesamiento y la exportación de combustibles fósiles y productos asociados de energía intensiva, o de su consumo.	✓
Los países sin litoral y los países de tránsito.	x

Nota. Reproducida de Perú, país vulnerable a los efectos del cambio climático, MINAM (2010).

Así mismo, el Perú es un país vulnerable a los impactos del cambio climático, debido a su alta exposición a fenómenos naturales y a su dependencia económica de sectores productivos sensibles al cambio climático (Ramírez Miranda, 2012). La gran diversidad territorial y geomorfológica del país trae consigo una gran biodiversidad, poseemos múltiples pisos ecológicos (alrededor del 84% de las zonas de vida del mundo), y variados climas (28 de los 35 climas mundiales). Sin embargo, esta diversidad también se traduce en variedad de peligros naturales en nuestro territorio: heladas, aluviones, aludes y avalanchas, inundaciones, sequías, vientos huracanados, deslizamientos; entre otros peligros meteorológicos, y al estar situados dentro del anillo de Fuego del Pacífico, tenemos alta sismicidad y vulcanismo (Cigarán & García, 2006). El cambio climático contribuye a la formación o la ampliación de condiciones de riesgo en la sociedad y sus medios de vida. (MINAM, 2016).

Figura 17

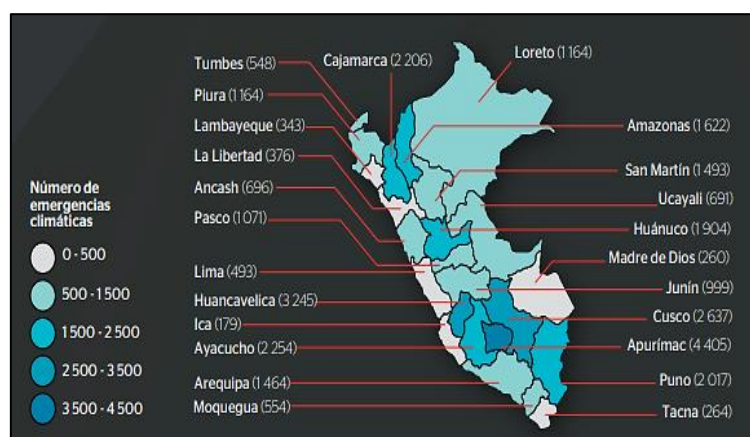
Tendencia de la evolución de emergencias – peligros naturales



Nota. Reproducida de Evolución de las emergencias – Peligros naturales, Cigarán & García (2006).

Figura 18

Emergencias causadas por peligros climáticos (2003 – 2014)



Nota. Reproducida de Emergencias causadas por peligros climáticos por región (2003 – 2014), MINAM (2016).

Los principales efectos del cambio climático en el Perú se asocian preliminarmente con:

- i) El retroceso glaciar, ii) el aumento de la frecuencia e intensidad del Fenómeno del Niño y
- iii) elevación del nivel del mar (Barco & Vargas, 2010). En cuanto a el retroceso glaciar, según el CONAM en los últimos 22 a 35 años se ha perdido el 22% de la superficie glaciar, con un efecto mayor sobre los glaciares pequeños y de menor cota. Es ese sentido, se proyecta que

para el 2025 los glaciares del Perú por debajo de los 5 500 metros sobre el nivel del mar habrán desaparecido (Ramírez Miranda, 2012).

Este hecho tendría consecuencias negativas sobre la disponibilidad de agua considerando que la mayor parte de los ríos de la vertiente occidental de nuestros andes se abastecen del escurrimiento por infiltración de las zonas altas o por la fusión del hielo de los glaciares durante el periodo de estiaje, entre mayo y noviembre. Un continuo proceso de desglaciación generaría, inicialmente, una mayor circulación de agua en las cuencas hidrográficas alcanzado una máxima disponibilidad durante los próximos 25 a 50 años; seguidamente, se iniciaría un progresivo desabastecimiento, reduciendo la disponibilidad de agua para consumo humano, procesos industriales y para la generación hidroeléctrica (Barco & Vargas, 2010).

Figura 19

Retroceso glaciar



Nota. Reproducida de Vistas del glaciar Yanamarey (4 768 m.s.n.m) en la cordillera Blanca, Ancash en 1982 (izquierda) y 2005 (derecha), Cigarán & García (2006).

Por otro lado, el cambio climático produciría un calentamiento de la capa superior del océano, lo que podría afectar la frecuencia e intensidad del Fenómeno del Niño. Así se estima que de duplicar las concentraciones de CO₂ al 2070, se llegaría a un calentamiento de 3.49°C en el pacífico oriental, lo que provocaría un escenario climático similar al de un evento del Niño de intensidad media (Ramírez Miranda , 2012).

Por otro lado, la economía peruana se ha basado en la explotación, procesamiento y exportación de recursos naturales, específicamente mineros, agropecuarios y pesqueros, con una gran dependencia de la actividad agrícola (MINAM, 2010). En una publicación de Barco & Vargas (2010), menciona el estudio realizado por Vargas en el año 2009, en el que efectúa una medición del impacto del cambio climático en la economía peruana. De acuerdo a esta estimación, un aumento de 1°C en la temperatura y de 10% en la variabilidad en la precipitación implicaría que la tasa de crecimiento del PBI per cápita en 2030, fluctúe entre 0,56 y 0,67 puntos porcentuales por debajo de su nivel potencial. Este último valor es consistente con una caída promedio de la tasa de crecimiento de 0,34% entre 2009 y 2030, lo que implicaría una reducción en el nivel del PBI de 6,8%.

Tabla 6

Perdidas en el PBI provocadas por el cambio climático para el 2025

País	PBI sin cambio climático	PBI con cambio climático	Perdidas por efecto del cambio climático	Valor % del PBI
Bolivia	35,4	32,9	2,6	7,3
Colombia	318,0	303,8	14,2	4,5
Ecuador	90,4	84,8	5,6	6,2
Perú	225,3	215,4	9,9	4,4
TOTAL	669,2	639,8	29,8	4,5

Nota. Reproducida de Pérdidas provocadas por el cambio climático para el 2025 en el PBI de los países de la comunidad andina (Miles de millones de US\$ del 2005), Ramírez Miranda (2012).

2.11 Situación de los glaciares

A lo largo de los andes se desarrollan glaciares allí donde la temperatura, la precipitación, o una combinación de ambos factores permiten la acumulación de agua en fase sólida de un año a otro. Los glaciares, glaciares de roca y nieves eternas son resultado de la permanencia de precipitación sólida durante más de un año (Lascano & Villalba, 2007). En tal sentido en Perú tiene un gran potencial hídrico en las cuencas hidrográficas, siendo necesario

el estudio de los glaciares en cuanto a la cantidad, distribución, caracterización y dinámica (ANA, 2014).

El incremento de la temperatura producirá consecuencias e impactos en las áreas glaciares (Schauwecker et al., 2017). Los glaciares son una de las más importantes reservas de agua dulce; sin embargo, son muy sensibles al cambio climático, presentado un acelerado retroceso siendo probable se desaparición en las próximas décadas (INAIGEM, 2017).

En el Perú se viene observando desde hace más de 30 años un proceso de desglaciación como consecuencia del incremento de la temperatura global y una disminución de las precipitaciones que están conduciendo a la desaparición parcial o total de algunos glaciares (Codom et al., 2018). Para mejorar el estudio de los glaciares el INAIGEM (2018) realizó un inventario nacional de glaciares y lagunas por subcuencas, donde trabajó en 20 cordilleras: 18 con superficie glaciario y dos extintas que han perdido la totalidad de su superficie glaciario, pero albergan lagunas alimentadas por nieve de temporada en sus partes altas.

Tabla 7*Inventario de las 18 cordilleras con superficie glaciar en el Perú*

Cordillera	HDROANDINA S.A.		CONAM 2001 (km ²) (3)	MINAGRI – ANA 2014 (km ²) (4)	INAIGEM 2018 (km ²) (5)	(2) – (5) (km ²)
	Corporación Peruana del Santa & Electroperú (km ²) (1)	Corporación Peruana del Santa & Electroperú (km ²) (2)				
Blanca	723.37	726.26	611.48	527.62	448.41	38.20
Huallanca	20.91	21.05	17.64	7.01	5.24	75.11
Huayhuash	84.97	86.89	71.68	55.27	53.06	38.93
Raura	55.2	55.31	28.92	28.34	25.62	53.68
Huagoruncho	23.4	23.70	13.38	9.71	7.58	68.02
La Viuda	28.6	28.60	14.99	6.03	3.84	86.57
Central	116.5	117.20	79.32	51.91	42.44	63.79
Huaytapallana	59.08	68.05	37.57	26.40	21.42	68.52
Chonta	17.85	17.85	9.35	1.40	0.39	97.82
Ampato	146.73	146.73	99.78	60.96	50.05	65.89
Vilcabamba	37.74	261.45	25.66	129.15	101.00	61.37
Urbamba	41.48	76.16	28.21	26.39	23.54	69.09
Chila	36.93	39.31	25.11	4.51	2.91	92.60
Huanzo	33.89	33.89	23.05	0.93	0.19	99.44
La Raya	11.27	11.27	7.66	3.06	1.90	83.14
Vilcanota	418.43	495.05	375.75	279.40	255.44	48.40
Carabaya	104.23	107.17	70.88	34.53	31.05	71.03
Apolobamba	81.12	83.12	55.16	45.25	39.63	52.32

Nota. Reproducida de Resultados del inventario por cordillera glaciar al 2016, INAIGEM (2018).

III. MÉTODO

3.1 Tipo de investigación

3.1.1 *Tipo de Investigación*

- ✓ El presente estudio presenta las características de una “*Investigación Cuantitativa*”. Este tipo de investigación se basa en la recolección de datos numéricos, y a partir de un análisis estadístico probar una hipótesis previamente establecida. Es secuencial y probatorio.

3.1.2 *Alcance de la Investigación*

- ✓ El presente estudio presenta un “*Alcance Correlacional*”, siendo la principal utilidad de ésta, la de analizar cómo es el comportamiento de una variable al conocer el comportamiento de una o las otras variables relacionadas.

3.1.3 *Diseño de la Investigación*

- ✓ El diseño del presente trabajo de investigación es el de “*Diseño no experimental – Longitudinal o Evolutivo*”. La investigación no experimental, no se centra en la manipulación de las variables, solo se basa en la observación de los fenómenos naturales en su ambiente natural para poder analizarlos; así mismo, es longitudinal o evolutivo, porque se basa en la recolección de datos en diferentes periodos o tiempos y; por consiguiente, deducir los cambios, sus determinantes y consecuencias.

3.2 **Ámbito temporal y espacial**

El presente trabajo de investigación desarrollará un diagnóstico del cambio de la superficie glaciaria en la Subcuenca Shullcas, que se encuentra ubicado en la provincia de Huancayo - Región Junín; y para ello, es necesario realizar un análisis multitemporal del periodo comprendido entre los años 1990 – 2020.

3.3 Variables

La variable de investigación es aquello que se va a estudiar, medir, controlar y/o manipular; así mismo, se dividen en variables dependientes y las variables independientes. También se encuentran los indicadores, siendo ésta una medida que permite cuantificar a las variables.

Tabla 8

Variable independiente

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD
Superficie Glaciar	Precipitación	mm
	Temperatura	°C
	Área glaciar	Km ²
	Reflectancia	%
	Altitud	m
	Radiación	Joule (J)

Nota. Elaboración propia.

Tabla 9

Variable dependiente

VARIABLE	INDICADOR	UNIDAD
Disponibilidad Hídrica	Escorrentía	mm
	Volumen glaciar	m ³
	Caudal	m ³ /s
	Precipitación	mm
	Temperatura	°C
	Evaporación	mm

Nota. Elaboración propia.

3.4 Población y muestra

3.4.1 Población

La población es el conjunto de sujetos que presentan características similares o que se ajustan a determinadas especificaciones y, que es determinada por el investigador de acuerdo al estudio que pretende realizar. De manera que, para el presente estudio se definió como población a todas las subcuencas de la que es parte de la cordillera del Huaytapallana, que

cuenta con una superficie de 21.42 km² de acuerdo al inventario realizado por el MINAM en el año 2018.

3.4.1.1 Muestra

La muestra es aquel subgrupo considerado como una parte representativa de la población. Cabe mencionar que, para el presente estudio, se realizó un muestreo no probabilístico; es decir, que la selección de las unidades que serán estudiadas por el investigador, se realizará de acuerdo a su criterio.

Por lo tanto, para el presente estudio se seleccionó como muestra de estudio a la subcuenca Shullcas que se encuentra ubicada en la Región Junín y que cuenta con una superficie aproximada de 223.11 km².

3.5 Instrumentos

Para el presente trabajo de investigación se utilizaron los siguientes instrumentos:

- ❖ Software ENVI 5.3 para el procesamiento de las imágenes satelitales.
- ❖ Software ArcGIS 10.3 para el procesamiento de los parámetros geomórficos; así mismo, para la elaboración de mapas temáticos.

Por otro lado, es necesario el uso de los siguientes materiales:

- ❖ Laptop HP Intel (R) Core (TM) i7, con una memoria RAM instalada de 12 GB y sistema operativo de 64 bits.
- ❖ Disco duro externo Western Digital con una capacidad de almacenamiento de 1 TB.
- ❖ Cartas nacionales; siendo necesario para la caracterización de la zona de estudio, en el que se utilizara las hojas 24m y 25m, información elaborada por el Instituto Geográfico Nacional a una escala de 1/100 000.

- ❖ Mapas temáticos; para entender los fenómenos geográficos de la zona de estudio, siendo la información requerida como el mapa geológico, mapa de la red vial nacional, mapa de clasificación climática, etc.
- ❖ Imágenes satelitales; información que será adquirida a través de la página de United States Geological Survey (USGS).
- ❖ Información hidrometeorológica; siendo la información requerida de los caudales, precipitación, temperatura, etc., esta información será obtenida a partir de la página de las instituciones como la Autoridad Nacional de Agua (ANA) y el SENHAMI.

3.6 Procedimiento

3.6.1 Selección de las Imágenes Satelitales

Para la presente investigación se seleccionó las imágenes satelitales del Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI-TIRS, obtenido a partir de la página oficial de la United States Geological Survey (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Para la selección se tuvo en cuenta alguno criterios, entre ellos que se encuentre dentro de los meses de estiaje comprendido entre los meses de mayo y septiembre; es decir, aquellos meses en donde se presente una baja o nula nubosidad.

Tabla 10

Características de las imágenes satelitales (1990 - 2020)

Fecha	Sensor	Resolución (m)	Path/Row	Proyección
25/05/1990	Landsat 5 TM	30	006/068	UTM
05/06/1994	Landsat 5 TM	30	006/068	UTM
03/06/1999	Landsat 5 TM	30	006/068	UTM
16/06/2004	Landsat 5 TM	30	006/068	UTM
30/06/2009	Landsat 5 TM	30	006/068	UTM
14/07/2014	Landsat 8 OLI-TIRS	30	006/068	UTM
27/05/2020	Landsat 8 OLI-TIRS	30	006/068	UTM

Nota. Elaboración propia.

3.6.2 *Procesamiento de las Imágenes Satelitales*

3.6.2.1 Corrección Radiométrica. La corrección geométrica consiste convertir los niveles digitales (ND) a valores de radiancia, dicha corrección se realizó utilizando el programa ENVI 5.3, mediante la herramienta “Radiometric Calibration”.

Otro proceso de calibración, es utilizando la fórmula de calibración de imágenes landsat de Chander (2009):

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{máx\lambda} - L_{mín\lambda}}{Q_{calmáx} - Q_{calmín}} \right) * (Q_{cal} - Q_{calmín}) + L_{mín\lambda} \quad \text{Ec. (1)}$$

$$L_{\lambda} = G_{rescale} * Q_{cal} + B_{rescale} \quad \text{Ec. (2)}$$

Donde:

- ❖ L_{λ} : Radiancia espectral en la apertura del sensor, en $W/(m^2.sr.\mu m)$.
- ❖ $LMÁX_{\lambda}$: Radiancia máxima espectral en el sensor que es escalado a $Q_{cal} máx$, en $W/(m^2.sr.\mu m)$.
- ❖ $LMÍN_{\lambda}$: Radiancia mínima espectral en el sensor que es escalado a $Q_{cal} mín$, en $W/(m^2.sr.\mu m)$.
- ❖ $Q_{calmáx}$: Valor máximo cuantificado de pixel calibrado, en niveles digitales (DN).
- ❖ $Q_{calmín}$: Valor mínimo cuantificado de pixel calibrado, en niveles digitales (DN).
- ❖ Q_{cal} : Valor cuantificado del pixel calibrado, en niveles digitales (DN)
- ❖ $G_{rescale}$: Factor de ganancia para reajuste específico por banda, en $[W/(m^2.sr.\mu m)]/DN$.
- ❖ $B_{rescale}$: Factor de sesgo para reajuste específico por banda, en $[W/(m^2.sr.\mu m)]/DN$.

Los datos requeridos para el uso de la ecuación se encuentran en los metadatos de las imágenes satelitales.

3.6.2.2 Corrección Atmosférica. Para realizar este procedimiento se utilizó el programa ENVI 5.3 aplicando la herramienta FLAASH Atmospheric correction, lo que permite eliminar el efecto de los aerosoles y mejorar la calidad visual de las imágenes adquiridas.

La herramienta FLAASH Atmospheric correction utiliza las variables como las coordenadas geográficas, el tipo de sensor, altitud del sensor, elevación altitudinal de la imagen adquirida, fecha y hora de adquisición de la imagen satelital, etc., toda esta información se encuentran en el metadato de la imagen adquirida.

3.6.3 *Cálculo de los Cambios de la Cobertura Glaciar y la Superficie de Lagunas*

Con las imágenes satelitales corregidas, se procede a calcular el área de la cobertura glaciar y la superficie de las lagunas de los diferentes años considerados en el presente trabajo de investigación. Para determinar el área de la superficie glaciar se utilizó el Índice Normalizada de Nieve (NDSI); así mismo, para el área de la superficie de las lagunas se utilizó el Índice Normalizado de Agua (NDWI). Para aplicar tanto el NDSI y el NDWI se utilizaron las siguientes ecuaciones:

$$NDSI (Landsat 5) = \frac{B_2 - B_5}{B_2 + B_5} \quad \text{Ec. (3)}$$

$$NDSI (Landsat 8) = \frac{B_3 - B_6}{B_3 + B_6} \quad \text{Ec. (4)}$$

Donde:

- ❖ B_n : Banda espectral “n”
- ❖ NDSI: Índice Normalizada de Nieve.

$$NDWI(landsat 5) = \frac{B_2 - B_4}{B_2 + B_4} \quad \text{Ec. (5)}$$

$$NDWI(landsat 8) = \frac{B_3 - B_5}{B_3 + B_5} \quad \text{Ec. (6)}$$

Donde:

- ❖ B_n : Banda espectral “n”
- ❖ NDWI: Índice Normalizado de Agua.

3.6.4 Cálculo de la Reserva Hídrica Glaciar

Para determinar el volumen del glaciar en la zona de estudio se utilizó el método espesor dependiente – pendiente recomendada para glaciares a una escala regional (Colonia, 2013); así mismo, esta metodología presenta una incertidumbre del $\pm 30\%$ (Linsbauer, et al., 2012). Este método; según Hoelzle M. (2007) sigue lineamientos, donde cada parámetro del glaciar como la pendiente y la altitud media se obtuvieron a partir del modelo de elevación digital (DEM); para ello, se utilizó el DEM ALOS 30 m que es uno de los DEM más corregidos actualmente, siendo utilizado para la elaboración de mapas topográficos, relieve, fisiográfico, pendiente, ortorrectificación de imágenes satelitales, etc.

El cálculo del volumen glaciar se realizó mediante la siguiente ecuación:

$$V = A * h_F \quad \text{Ec. (7)}$$

Donde, “V” es el volumen del glaciar, “A” es el área del glaciar, y “(h_F)” es el espesor promedio del glaciar. Para determinar el espesor promedio del glaciar, se utilizó la siguiente ecuación:

$$h_F = h_f \left(\frac{\pi}{4} \right) \quad \text{Ec. (8)}$$

Donde, “h_F” es el espesor promedio del glaciar y “h_f” es el espesor del flujo central, este último parámetro es determinado mediante la siguiente ecuación:

$$h_f = \frac{\tau}{f * \rho * g * \text{sen}(\alpha)} \quad \text{Ec. (9)}$$

Donde:

- ❖ τ : Fuerza del corte basal promedio en el flujo del hielo central.
- ❖ f : Factor de forma $\rightarrow 0.8$
- ❖ ρ : Densidad del hielo $\rightarrow 900 \text{ kg/m}^3$
- ❖ g : Gravedad $\rightarrow 9.8 \text{ m/s}^2$
- ❖ α : Pendiente del hielo del flujo central ($^\circ$)

la fuerza del corte basal promedio (τ), está determinado en función del rango altitudinal (ΔH):

- ✓ Si: $\Delta H > 1600 \text{ m}$

$$\tau = 1.5 \text{ bar} \quad \text{Ec. (10)}$$

- ✓ Si: $\Delta H < 1600 \text{ m}$

$$\tau = 0.005 + 1.598 * \Delta H - 0.435 * \Delta H^2 \quad \text{Ec. (11)}$$

Así mismo, la pendiente del hielo del flujo central (α) puede calcularse mediante la longitud del glaciar (L) y el rango de elevación (ΔH) utilizando la siguiente expresión:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta H}{L}\right) \quad \text{Ec. (12)}$$

3.6.5 Cálculo del Aporte Hídrico Glaciar

Para el cálculo del aporte hídrico glaciar en la zona de estudio se realizó mediante cuatro métodos, los cuales son:

- Caudales Mínimos Anuales: Esta metodología consiste en calcular un promedio de los caudales mínimos anuales registrados en los meses de estiaje de los 6 años más secos; en tal sentido, se utilizó la estación Chamisería, que cuenta con un registro histórico desde el año 1985 hasta el año 2009 y que se encuentra ubicado en el río Shullcas; es decir, dentro de la zona de estudio.

- Caudal De Estiaje: Esta metodología consiste en calcular el promedio de un caudal mínimo de los meses de estiaje; para ello, se seleccionó el año más seco del registro histórico.
- Curva De Duración: Se elaboró a partir del promedio del caudal de los meses de estiaje (Mayo – Septiembre); de manera que, se seleccionó como aporte hídrico del glaciar para la zona de estudio al caudal con una persistencia del 99%.
- Balance Hídrico: Se determinó a partir de la siguiente expresión:

$$Agl = Es - Pp + ETP$$

Donde, “Agl” es el aporte hídrico del glaciar, “Es” es la esorrentía, “Pp” es la precipitación y “ETP” es la evapotranspiración. Para la presente investigación, no se consideró la infiltración; debido a que, la subcuenca shullcas es una zona montañosa que presenta una elevada pendiente; por lo tanto, existe una menor capacidad de infiltración.

3.6.6 Escenarios Futuros de la Cobertura Glaciar y la reserva Hídrica

La estimación de los escenarios futuros del área de la superficie glaciar y el volumen glaciar, se utilizó la expresión adaptada por Colonia Torres (2011):

$$N = N_0 * (1 + r)^t \quad \text{Ec. (13)}$$

Donde, “N” es el área glaciar de la superficie glaciar del año “n”, “N₀” es el área glaciar de la superficie glaciar del “n+1”, “r” es la tasa de cambio y “t” es la diferencia del tiempo en años. Así mismo, para determinar la tasa de cambio se presenta la siguiente expresión derivada de la ecuación 13:

$$r = \left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1/t} - 1 \right] * 100 \quad \text{Ec. (14)}$$

3.6.7 Escenarios Futuros del Aporte Hídrico Glaciar

Se realizó un balance hídrico de los diferentes años que fueron seleccionados para calcular las áreas de la superficie glaciar. Se utilizaron los registros históricos de la precipitación de la estación pluviométrica shullcas; así mismo, fue necesario la data histórica de la estación hidrométrica chamiseria, ambas estaciones meteorológicas se encuentran ubicadas dentro de la zona de estudio. Además, la evapotranspiración determinada para la subcuenca shullcas fue utilizada para los diferentes años seleccionados.

Finalmente se estableció una correlación entre el área glaciar y el caudal promedio obtenido a partir de los balances hídricos, obteniéndose una ecuación que será utilizada para calcular los valores de los caudales del deshielo glaciar para los años futuros.

3.7 Análisis de datos

Para el presente trabajo de investigación, el análisis de datos se realizará a partir de los softwares ENVI 5.3 y ArcGIS 10.3, en el que se analizará las características de la zona de estudio; así mismo, será necesario el uso del software Excel para el análisis estadístico del cambio de la superficie glaciar y la información hidrometeorológica, a fin de establecer una relación estadística y para poder llegar a los objetivos planteados.

IV. RESULTADOS

4.1 Características generales de la subcuenca del río Shullcas

4.1.1 Ubicación

A. Ubicación Política:

La subcuenca del río Shullcas se encuentra localizado en la cuenca del río Mantaro; así mismo, política y administrativamente el área de estudio se encuentra ubicado en el departamento de Junín, provincia de Huancayo, y en los distritos de El Tambo y Huancayo.

B. Ubicación geográfica:

La ubicación geográfica de la subcuenca del río Shullcas se encuentra entre los paralelos 11°52'30'' y 12°04'30'' de latitud sur y los meridianos 75°02'00'' y 75°14'00'' de longitud oeste. Hidrológicamente se encuentra ubicado en la vertiente del Atlántico, en la cordillera del Huaytapallana a la margen derecha del río Mantaro.

4.1.2 Transporte y Comunicación

Esta modalidad permite el transporte de productos de primera necesidad a la capital del Perú; así mismo, permite conectar a los departamentos Huánuco, Pasco y Junín con el resto del país. El acceso a la subcuenca del río Shullcas se presente en las siguientes tablas:

Tabla 11

Ruta de acceso a la subcuenca del río Shullcas.

Tramo	Estado	Distancia (km)	Tiempo (Horas)
Lima – Chosica	Asfaltado	18.2	0.30
Chosica – San Mateo	Asfaltado	85.7	2.00
San Mateo – Ticlio	Asfaltado	37	1.00
Ticlio – La Oroya	Asfaltado	44.5	1.00
La Oroya – Jauja	Asfaltado	82.6	1.30
Jauja – Huancayo	Asfaltado	48.1	1.00
Huancayo - Quebrada	Asfaltado	26.8	1.00

Nota. Elaboración propia.

Tabla 12*Ruta de acceso a la subcuenca del río Shullcas*

Tramo	Estado	Distancia (km)	Tiempo (Horas)
Lima – San Vicente de Cañete	Asfaltado	148	2.00
San Vicente de Cañete - Lunahuaná	Asfaltado	30.9	0.75
Lunahuaná - Yauyos	Asfaltado	104	2.90
Yauyos - Chupaca	Asfaltado	149	3.65
Chupaca – Huancayo	Asfaltado	9.70	0.38
Huancayo – Quebrada	Asfaltado	28.1	1.15

Nota. Elaboración propia.*Vía Nacional:*

La provincia de Huancayo cuenta con dos vías nacionales de acceso, siendo las rutas PE – 22 y PE – 3S las principales vías; así mismo, se encuentran en buenas condiciones y en su mayor parte de manera asfaltada.

- ✓ **Cod. Ruta: PE – 1S;** Santa Anita (Vía de Evitamiento) – Lurín – Chilca – Pte. Asia – División San Vicente de Cañete.
- ✓ **Cod. Ruta: PE – 24;** Emp. PE – 1S, San Vicente de Cañete – Lunahuaná – Div. Yauyos – Chupaca – Pte. La Breña.
- ✓ **Cod. Ruta: PE – 22;** Emp. PE – 1N, Pte. Huachipa – Chosica – San Mateo – Morococha – Repartición la Oroya.
- ✓ **Cod. Ruta: PE – 3S;** Repartición la Oroya – Pte. Stuart – Concepción – Huancayo.

Vía Vecinal:

Son aquellas que nacen de las vías departamentales o de las vías nacionales, siendo el estado de la mayoría de ellas si afirmar y trocha; por lo general todos los caminos vecinales necesitan su rehabilitación, excepto algunas que han sido priorizadas por Provias descentralizados, el Instituto de viabilidad Provincial de Huancayo y algunos gobiernos locales. De acuerdo al clasificador de rutas aprobado con D.S N° 004-2008-MTC y D.S

N° 036-2011-MTC reclasificaciones, la provincia de Huancayo registra 57 rutas vecinales. (PROVIAS DESCENTRALIZADO, 2021).

La ruta vecinal de acceso al nevado Huaytapallana está determinada por:

- ✓ **Cod Ruta: JU- 1066;** Emp. JU – 108, Cumbre Huaytapallana – Lago Asuntay – Pta. Carretera.

Vía Departamental:

Las características principales de las vías departamentales encontradas en la provincia de Huancayo son: plataforma de rodadura afirmada, sin afirmar, trocha y en su mayor parte se encuentran en regulares condiciones (PROVIAS DESCENTRALIZADO, 2021).

La vía de acceso al nevado Huaytapallana desde la ciudad de Huancayo esta determinada por la siguiente ruta:

- ✓ **Cod. Ruta: JU – 108.** Emp. PE – 3S, que en su recorrido recorre a las siguientes localidades de Vilcacoto – Acopalca - Abra Huaytapallana.

4.1.3 Características Físicas de la Subcuenca

4.1.3.1 Geología

A. Grupo Mitu (PET-m): Es aquel grupo de rocas clásticas continentales, constituidos principalmente por areniscas, lodolitas, lutitas, conglomerados, formando estratos medianos a gruesos; se diferencian por su color rojo morado y su resistencia a la erosión.

B. Deposito Coluvial (Q-cl): Es aquella que ha sido originado por la acumulación de material transportado por la escorrentía, estos depósitos se encuentran formados por arena y grava, y se encuentran ubicados en las laderas de las corrientes fluviales.

- C. Depósito Glaciar (Q-gl): Originado por los sedimentos directamente depositados por los glaciares, los cuales no tiene estratificación.
- D. Formación Chambará (Ts-ch): Pertenece al grupo Pucara, son calizas de color gris a gris oscuro y en la parte superficial presenta coloraciones de beige a marrón claro, también descritas como biomicritas, calizas dolomíticas, algunas dolomitas espárticas y calizas micríticas dolomitizadas.
- E. Grupo Copacabana (PEc-c): Esta unidad estratigráfica está constituida por calizas, limolitas, areniscas con lutitas, lomiarcellas y margas.
- F. Grupo Tarma (Cp-t): Esta unidad estratigráfica aflora en la cordillera oriental del cuadrángulo de Tarma y al Noreste del cuadrángulo de la Oroya, constituido por los siguientes tipos de rocas: lutitas y limolitas grises o negras, calizas grises, areniscas glauconíticas y conglomerados plimictico.
- G. Grupo Cabanillas (D-c): Está compuesto principalmente por areniscas y lutitas micáceas intercaladas en estratos medianos y largos.
- H. Grupo Pucará (TsJi-p): Corresponde a la edad Triásico – Jurásico, litológicamente está compuesto por calizas que fueron afectadas por la motorización y la erosión kárstica.
- I. Depósito Fluvial (Q-fl): Está compuesto por depósito de cantos rodados, arena y grava debido al transporte de la escorrentía fluvial, estos se encuentran en los cauces del río y varían dependiendo a la proximidad y la distancia de transporte.
- J. Complejo del Marañón – Gneis, esquistos (NP-cm-gn,esq): Compuesta por rocas metamórficas de bajo grado, meta andesita verdosa y mica-esquisto verdoso.
- K. Formación Aramachay (Ji-a): Compuesta por calizas arenosas y areniscas calcáreas de color negro, sus afloramientos corresponden a aquellas zonas que se encuentran cubiertos por pastos y cultivos.

- L. Grupo Jauja (NQ-ja): Dollfus (1965), Mégard (1968) y Paredes (1972, 1994) propusieron para el relleno Neógeno y cuaternario de la depresión de Jauja-Huancayo una columna estratigráfica que fue modificada por Blanc (1984), en una tesis dedicada esencialmente a la neotectónica de esta depresión. Uno de los aportes de este trabajo es la atribución a la Formación Mataula, parte superior del Grupo Jauja, de unos conglomerados y arenas gruesas deformados por anticlinales y flexuras, que Mégard había atribuido a la terraza la más antigua en la región de Chupaca-Huarisca (Huancayo, valle del río Cunas) (Megard, Caldas V., Paredes, & De la Cruz, 1996).
- M. Depósito Aluvial (Q-al): Es aquel depósito de sedimentos detríticos que fueron transportados y sedimentados por un flujo o aluvión (arena, sedimentos, grava y barro).
- N. Riolita, Dacita (PE.ri-da): La riolita es una roca ígnea extrusiva, volcánica félsica compuesta por fenocristales de cuarzo y sadina; así mismo, la dacita es una roca ígnea volcánica con alto contenido de hierro.
- O. Pórfido riolítico (PET-pri): Es una roca de color gris verdoso, holocristalina, inequigranular porfirítica, los fenocristales de cuarzo redondeados, la ortoclasa euhedral, con abundantes ferromagnesianos, parcialmente reemplazados por óxidos de hierro (Alvarez, 2006).

4.1.3.2 Geomorfología. En la subcuenca del río Shullcas se presenta los siguientes tipos de unidades geomorfológicas:

- A. Morrenas (Mo): Es aquel conjunto de materiales que son arrastrados durante el curso de un glaciar, tienen una forma de líneas a lo largo del curso del glaciar; así mismo, están compuestas por un material denominado "Till".
- B. Llanura o planicie aluvial (Pl-al): Es aquella que se forma de manera gradual a partir de los depósitos de sedimentación ocasionados por las corrientes de ríos. Tiene la forma

plana o cuesta suave y que tienen el riesgo de ser inundadas ante eventos de crecida de las aguas del río.

- C. Planicie Inundable (Pl-i): Son aquellas superficies bajas, cercanas a los ríos y que están sujetos a inundación; así mismo, están ocupadas por áreas urbanas y por las actividades agrícolas. Son aquellos terrenos planos y que están compuestos por material no consolidado.
- D. Colina en Roca Intrusiva (RC-ri): Corresponde a aquellas áreas compuestas por el afloramiento de rocas intrusivas que fueron reducidos por procesos de erosión (meteorización, transporte y deposición), adquiriendo formas alargadas, con laderas disectadas y que presentan una pendiente moderada.
- E. Colina en Roca Sedimentaria (RC-rs): Corresponde a aquellas áreas compuestas por el afloramiento de rocas sedimentarias que fueron reducidos por procesos de erosión (meteorización, transporte y deposición), adquiriendo una forma alargada, con laderas disectadas y que presenta una pendiente que no supera los 10°.
- F. Montaña en Roca Sedimentaria (RM-rs): Están conformadas por rocas sedimentarias tipo limo arcillas y areniscas.
- G. Montañas y Colinas en Roca Sedimentaria (RMC-rs): Corresponde a aquellas áreas compuestas por el afloramiento de rocas sedimentarias que fueron reducidos por procesos de erosión (meteorización, transporte y deposición), adquiriendo una forma alargada, con laderas disectadas y que presentan pendientes entre los 25° y 50°.
- H. Terraza Baja Aluvial (Tb-al): son superficies que presentan una forma plana de origen aluvial, expuestas a inundaciones que pueden ser provocadas por las precipitaciones pluviales, ocasionando el aumento del nivel de agua de los ríos.

- I. Vertiente glacial o de gelifracción (V-gl): Las rocas de la vertiente presenta una rotura como consecuencia a las tensiones que soporta al congelarse el agua que contiene en su interior, discontinuidades mineralógicas, etc.
- J. Valle Glaciar con Laguna (Vll-gl/l): Son aquellas ubicadas en las zonas más altas generalmente por encima de los 3900 m.s.n.m., muchos de estos valles presentan lagunas glaciares y que se encuentran represadas por diques naturales.

4.1.3.3 Uso Mayor de Suelos. Mediante el D.S N° 017-2009-AG, la subcuenca del río Shullcas presenta la siguiente clasificación de tierras por su capacidad de uso mayor:

- A. Tierra Aptas para Cultivo Limpio (A): Reúne a las tierras que presentan características climáticas, de relieve y edáficas para la producción de cultivos en limpio, que demandan remociones o araduras periódicas y continuadas del suelo. Estas tierras, debido a sus características ecológicas, también pueden destinarse a otras alternativas de uso, ya sea cultivos permanentes, pastos, producción forestal y protección, en concordancia a las políticas e interés social del Estado, y privado, sin contravenir los principios del uso sostenible.
- B. Tierras Aptas para cultivo Permanente (C): Reúne a las tierras cuyas características climáticas, relieve y edáficas no son favorables para la producción de cultivos que requieren la remoción periódica y continuada del suelo (cultivos en limpio), pero permiten la producción de cultivos permanentes, ya sean arbustivos o arbóreos (frutales principalmente). Estas tierras, también pueden destinarse a otras alternativas de uso, ya sea producción de pastos, producción forestal, protección, en concordancia a las políticas e interés social del Estado, y privado, sin contravenir los principios del uso sostenible.
- C. Tierra Aptas para Pastos (P): Reúne a las tierras cuyas características climáticas, relieve y edáficas no son favorables para cultivos en limpio, ni permanentes, pero sí

para la producción de pastos naturales o cultivados, que permitan el pastoreo continuado o temporal, sin deterioro de la capacidad productiva del recurso suelo. Estas tierras, según su condición ecológica (zona de vida), podrán destinarse también para producción forestal o protección cuando así convenga, en concordancia a las políticas e interés social del Estado, y privado, sin contravenir los principios del uso sostenible.

D. Tierras Aptas para Producción Forestal (F): Son aquellas que, por su valor intrínseco, características ecológicas y edáficas, tienen capacidad para la producción permanente y sostenible de bienes y servicios forestales, o potencial para la forestación o reforestación. De acuerdo al artículo 8 de la Ley N° 29763, son denominadas Tierras de Capacidad de Uso Mayor Forestal.

E. Tierras de Protección (X): Son aquellas que, por sus condiciones biológicas de fragilidad ecosistémica y edáfica, no son aptas para el aprovechamiento maderable u otros usos que alteren la cobertura vegetal o remuevan el suelo. Las tierras de protección se destinan a la conservación de las fuentes de agua, nacientes o cabeceras de cuencas, riberas de ríos hasta del tercer orden, y a la protección contra la erosión.

En ellas es posible la recolección y aprovechamiento de productos forestales no maderables, el manejo y aprovechamiento de la fauna silvestre, así como usos recreativos y actividades educativas o de investigación científica, en la medida en que no se afecte su existencia ni sus funciones protectoras. De acuerdo al artículo 9 de la Ley N° 29763, son denominadas Tierras de Capacidad de Uso Mayor para Protección. Sin perjuicio de lo antes mencionado y para efectos del presente Reglamento, se consideran en este grupo los escenarios glaciáricos (nevados), afloramientos líticos, tierras con cárcavas, playas y otras.

4.1.3.4 Cobertura Vegetal. Esta información se obtuvo a partir del geoservidor del MINAM, una plataforma que ofrece información disponible para la descarga gratuita de información y que contribuye a generar buenas prácticas de gestión, permitiendo la transparencia e intercambio de información entre las diferentes instituciones del sector ambiental. En la subcuenca Shullcas se identificaron los siguientes tipos de cobertura vegetal:

- ✓ Agricultura costera y andina
- ✓ Área altoandina con escasa y sin vegetación
- ✓ Área urbana
- ✓ Glaciar
- ✓ Lagunas lagos y cochas
- ✓ Matorral arbustivo
- ✓ Pajonal andino
- ✓ Plantación forestal

De acuerdo a la memoria descriptiva del mapa nacional de cobertura vegetal del MINAM (2015), se describen los siguientes tipos de cobertura vegetal identificadas en la subcuenca del río Shullcas.

- A. *Agricultura Costera y Andina (AGRI)*: En esta cobertura se encuentran todas las áreas donde se realiza la actividad agropecuaria, y que se ubican en todos los valles que atraviesan la zona costera y que ascienden a las zonas altoandinas hasta el límite con el pajonal altoandino; así mismo, abarcan los cultivos de bajo riego y en seco.
- B. *Matorral Arbustivo (Ma)*: En la región andina abarca desde los 1500 – 3800 m.s.n.m. tanto en la zona sur y centro del país, hasta el límite de los pajonales naturales. Este tipo de cobertura vegetal se divide en tres subtipos:

- ✓ El subtipo de matorral de piso inferior ubicado aproximadamente a partir de los 1500 m.s.n.m.
- ✓ El subtipo de matorral de piso medio y alto comprendido entre los 2500 – 3800 m.s.n.m.

C. Pajonal Andino (Pj): Este tipo de cobertura vegetal se encuentra ubicado entre los 3800 – 4800 m.s.n.m. Se desarrolla sobre terrenos que van desde casi planos como en las altiplanicies hasta empinados o escarpados, en las depresiones y fondo de valles glaciares.

En esta cobertura vegetal se encuentran tres subunidades tales como el pajonal (hierbas en formas de manojos de hasta 80 cm de alto), césped (hierbas de porte de hasta 15 cm de alto) y tolar (arbustos de hasta 1.20 m. de alto).

D. Plantación Forestal (PF): Esta cobertura vegetal abarca a todas las áreas reforestadas en tierras con la condición forestal en la región andina, se ubica entre los 3000 – 3800 m.s.n.m.

En esta superficie se han establecido árboles que conforman una masa boscosa, que tienen una planificación y especies definidas para poder cumplir sus objetivos planteados.

4.1.3.5 Parámetros Geomorfológicos

A. Área (A):

Corresponde a la superficie que está delimitada por la divisoria de aguas de una determinada zona de estudio, en la mayoría de los casos se expresa en Km². Teniendo en cuenta que la forma de una cuenca es irregular, existen algunos métodos para el cálculo de su área:

- ✓ Uso de la balanza analítica

- ✓ Uso de planímetro.

B. Perímetro (P):

Se entiende como la medida del borde de la cuenca sobre un plano horizontal, que en muchos casos es de forma irregular; así mismo, se obtiene una vez delimitada la cuenca. Existen los siguientes métodos para su cálculo:

- ✓ Uso de un mecate (hilo).
- ✓ Uso de curvímetro.

C. Longitud de la cuenca:

Es aquella distancia horizontal que parte desde el punto de desfogue o desembocadura hasta otro punto ubicado aguas arriba o la última cota.

D. Ancho Medio:

Se define como la relación entre la longitud del cauce principal y el área de la cuenca.

$$A_m = \frac{L_c}{A} \quad \text{Ec. (15)}$$

Donde: “A_m” es el ancho medio, “L_c” es la longitud del cauce principal, y “A” es el área total de la cuenca.

E. Factor de Forma (Ff):

Es la relación entre el Área de la cuenca y la longitud del río más largo (L_c). Este parámetro mide la tendencia de la cuenca hacia las crecidas, rápidas y muy intensas o lentas y sostenidas, según su factor de forma tienda a valores extremos o pequeños.

$$F_f = \frac{A}{L_c} \quad \text{Ec. (16)}$$

Donde, “ F_f ” es el factor de forma, “ A ” es el área total de la cuenca, y “ L ” es la longitud del río más largo.

Tabla 13

Valores aproximados del factor de forma

Valores Aproximados	Forma de la Cuenca (F_f)
> 0.22	Muy Alargada
0.22 – 0.30	Alargada
0.30 – 0.37	Ligeramente Alargada
0.37 – 0.45	Ni alargada ni ensanchada
0.45 – 0.60	Ligeramente ensanchada
0.60 – 0.80	Ensanchada
0.80 – 1.20	Muy ensanchada
> 1.20	Rodeando el desagüe

Nota. Reproducida de Gómez Crispín & Paytan Quispe (2018).

Las cuencas más ensanchadas poseen una mayor susceptibilidad a generar crecidas, debido a que el tiempo de recorrido del agua a través de la cuenca es mucho más corto a comparación de las cuencas alargadas; es decir, las cuencas ensanchadas tienen menor tiempo de concentración generando una mayor concentración en los flujos superficiales y por ende mayor violencia en sus crecidas. Caso contrario ocurre en las cuencas más alargadas donde el tiempo de viaje del agua es mucho más largo, generando picos de crecidas sean menos repentinos.

En la subcuenca del río Shullcas el factor de forma presenta un valor de 0.55, lo que indica que es una cuenca ligeramente ensanchada; es decir, que durante una tormenta posee una ligera susceptibilidad a generar crecidas.

F. Coefficiente de Compacidad (K_c):

Es un parámetro adimensional que relaciona el perímetro de la cuenca y el perímetro de un círculo de igual área que el de la cuenca. Este parámetro describe la geometría de la cuenca y está estrechamente relacionado con el tiempo de concentración del sistema hidrológico.

$$K_c = 0.28 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad \text{Ec. (17)}$$

Donde, “Kc” es el coeficiente de compacidad, “P” es el perímetro de la cuenca, y “A” es el área total de cuenca.

Los valores de Kc nunca serán inferiores a la unidad. El grado de aproximación de este parámetro a la unidad indicara la tendencia a concentrar fuertes volúmenes de aguas de escurrimiento, siendo más acentuado cuanto más cercano sea a la unidad; es decir, que entre más bajo sea el Kc mayor será la concentración del agua.

Tabla 14

Valores del coeficiente de compacidad (Kc)

Rango	Forma
1.00 – 1.25	Redonda a oval redonda (Compacta)
1.25 – 1.50	Oval redonda a oval oblonga
1.50 – 1.75	Oval oblonga a rectangular oblonga
> 1.75	Casi rectangular (alargada)

Nota. Reproducida de Apailla Nalvarte (2010).

En la subcuenca del río Shullcas se encontró un valor de 1.68 para el coeficiente de compacidad; es decir, que tiene una forma oval oblonga a rectangular oblonga e indica que aumenta el tiempo de concentración, además de presentar una torrencialidad baja.

G. Coeficiente de masividad (Km):

Este parámetro representa la relación que existe entre la elevación media de la cuenca y su superficie. De esta manera podemos evidenciar la condición de si una cuenca es muy montañosa o, por el contrario, es una cuenca plana.

$$K_m = \frac{H_m}{A} \quad \text{Ec. (18)}$$

Donde:

- K_m : Coeficiente de masividad.
- H_m : Altura media.
- A : Área de la cuenca.

Tabla 15

Rango y descripción del coeficiente de masividad

Rango	Descripción
0 – 35	Muy montañosa
35 – 70	Montañosa
70 – 105	Moderadamente montañosa

Nota. Reproducida de Verdugo Cardenas (2017).

La subcuenca del río Shullcas presenta un coeficiente de masividad cuyo valor es de 21.20, que de acuerdo a la Tabla 13 presenta una topografía muy montañosa.

H. Rectángulo Equivalente:

Permite la transformación geométrica de la cuenca en una superficie rectangular de lados “L” (lado mayor) y “l” (lado menor), de tal forma que las curvas de nivel se transforman en rectas paralelas al lado menor (l) del rectángulo.

$$L = \frac{P}{4} + \sqrt{\left(\frac{P}{4}\right)^2 - A} \quad \text{Ec. (19)}$$

$$l = \frac{P}{2} - L \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde:

- L: lado mayor del rectángulo equivalente.
- l: Lado menor del rectángulo equivalente.
- P: Perímetro.
- A: Área.

Respecto a la subcuenca del río Shullcas, presenta un rectángulo equivalente cuyo lado mayor “L” presenta un valor de 36.96 km, y el lado menor “l” presenta un valor de 5.49 km.

I. Desnivel Total de la Subcuenca (Dt):

Este valor representa la diferencia entre la cota más alta y la cota más baja.

$$D_t = H_M - H_n \quad \text{Ec. (21)}$$

Donde, “D_t” es el desnivel de la cuenca, “H_M” es la cota mayor y “H_n” es la Cota menor. El desnivel total de la subcuenca del río Shullcas presenta un valor de 2335 m.s.n.m.

J. Altitud Media de la Subcuenca (H_m):

Se obtiene a partir de la operación que abarcan a las áreas ubicadas entre los contornos de las diferentes altitudes. Su importancia radica en la influencia que radica en la precipitación, evaporación, así como, en el caudal medio.

$$H_m = \frac{\sum(ci*ai)}{A} \quad \text{Ec. (22)}$$

Donde, “H_m” representa a la altitud media de la subcuenca, “ci” es la cota media entre los rangos de las diferentes altitudes, “ai” representa a las áreas de dicho rango altitudinal y “A” es el área total de la subcuenca.

Tabla 16*Cálculo de altitud media de la subcuenca del río Shullcas*

N°	Cota (m.s.n.m)			Área (km ²)	Área * Promedio
	Mínima	Máxima	Promedio		
1	3188	3300	3244	6.21	20160.32
2	3300	3500	3400	7.80	26530.77
3	3500	3700	3600	6.83	24576.15
4	3700	3900	3800	10.99	41750.13
5	3900	4100	4000	18.26	73024.91
6	4100	4300	4200	30.32	127351.16
7	4300	4500	4400	49.41	217401.19
8	4500	4700	4600	52.89	243280.15
9	4700	4900	4800	13.43	64462.72
10	4900	5100	5000	3.49	17430.80
11	5100	5300	5200	2.46	12812.82
12	5300	5523	5412	0.89	4823.90
TOTAL				202.98	873605.02

Nota. Elaboración propia.

Y se tiene que para la subcuenca del río Shullcas la altitud media presenta un valor de:

$$H_m = \frac{873605.02}{202.98} = \mathbf{4303.96 \text{ m}}$$

K. Índice de Pendiente (Ip):

Es una ponderación que se establece entre las pendientes y el tramo recorrido por el río. Este parámetro permite establecer el tipo de granulometría que se encuentra en el cauce; así mismo, expresa el relieve de la cuenca.

$$I_p = \sum_{i=1}^n \sqrt{\beta_i (a_i - a_{(i-1)})} * \frac{1}{\sqrt{L}} \quad \text{Ec. (23)}$$

Donde, “Ip” es el Índice de pendiente, “n” es el número de curvas de nivel existente en el rectángulo equivalente, incluidos los extremos a₁, a₂, a₃, ..., a_n, cotas de curvas de nivel

consideradas (Km) y “ β_i ” es la fracción de la superficie total de la cuenca comprendida entre las cotas $a_i - a_{i-1}$ y “L” Longitud del lado mayor del rectángulo equivalente (Km).

$$\beta_i = \frac{A_i}{A_T}$$

Tabla 17

Cálculo del índice de pendiente

N°	COTA (m.s.n.m)			CÁLCULO		
	Mínima	Máxima	Diferencia de altura (km) (1)	Área (km ²)	(1) * b_i	$\sqrt{(1) * b_i}$
1	3188	3300	0.1	6.21	0.00343	0.05856
2	3300	3500	0.2	7.80	0.00769	0.08769
3	3500	3700	0.2	6.83	0.00673	0.08202
4	3700	3900	0.2	10.99	0.01083	0.10405
5	3900	4100	0.2	18.26	0.01799	0.13412
6	4100	4300	0.2	30.32	0.02988	0.17285
7	4300	4500	0.2	49.41	0.04868	0.22065
8	4500	4700	0.2	52.89	0.05211	0.22828
9	4700	4900	0.2	13.43	0.01323	0.11503
10	4900	5100	0.2	3.49	0.00344	0.05861
11	5100	5300	0.2	2.46	0.00243	0.04927
12	5300	5523	0.2	0.89	0.00098	0.03129
Total				202.98	---	1.34241

Nota. Elaboración propia.

Para la subcuenca del río Shullcas se encontró como índice de pendiente al siguiente valor:

$$I_p = \frac{1.34241}{\sqrt{33.56}} = 23.17\%$$

L. Pendiente Media (S):

Es un parámetro muy importante en el estudio de una cuenca, ya que tiene una relación importante y compleja con la infiltración, la escorrentía superficial, la humedad del suelo y la contribución del agua subterránea a la escorrentía. Es uno de los factores que controla el tiempo de escurrimiento y concentración de la lluvia en los canales de drenaje,

y tiene una importancia directa en la relación a la magnitud en las crecidas (Villón Béjar, 2002).

i. Criterio del Rectángulo equivalente:

Utiliza la siguiente relación:

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec. (24)}$$

Donde, “S” es la pendiente media de la cuenca, “H” el desnivel total (cota en la parte más alta – cota en la estación de aforo) y “L” Lado mayor del rectángulo equivalente (km).

Cabe indicar que este método no proporciona un valor significativo de la pendiente media de la cuenca, pero puede tomarse como una aproximación. En el caso de la subcuenca del río Shullcas se encontró un valor de 6.32%.

ii. Criterio topográfico:

Representa el valor medio del declive respecto a la horizontal de la vertiente a la cual se ubica la cuenca.

Se determinaron los rangos de pendiente tomando como referencia lo establecido en el Reglamento de clasificación de tierras D.S. N° 017-2009-AG en el anexo IV, en el que se proponen 7 rangos para pendientes de laderas cortas y 8 rangos para laderas largas.

Tabla 18*Rango de pendientes*

Rango (%)	Descripción
0 - 4	Plana a ligeramente inclinada
4 - 8	Moderadamente inclinada
8 - 15	Fuertemente inclinada
15 - 25	Moderadamente empinada
25 - 50	Empinada
50 - 75	Muy empinada
> 75	Extremadamente empinada

Nota. Reproducida del D.S N° 017-2009-AG.

El cálculo de pendiente media se realizó mediante un promedio ponderado entre la pendiente media por rango (P_m), el área parcial (A_i) y el área total de la cuenca, siendo el resultado obtenido en la tabla 19:

Tabla 19*Cálculo de la pendiente media de la subcuenca del río Shullcas*

Rango de Pendiente (%)	Promedio Pendiente (1)	Área (km²) (2)	(1)*(2)
0 - 4	2.0	9.14	18.28
4 - 8	6.0	10.27	61.61
8 - 15	11.5	22.38	257.41
15 - 25	20.0	39.29	785.85
25 - 50	37.5	80.46	3017.25
50 - 75	62.5	31.58	1973.91
75 - 100	87.5	9.85	861.96
Total		202.98	6896.38

Nota. Elaboración propia.

Siendo la pendiente media para la subcuenca del río Shullcas el siguiente valor:

$$S = \frac{6896.38}{202.98} = 33.98 \%$$

Y la distribución de pendientes a través de los rangos descritos en la Tabla 20 se presenta de la siguiente manera:

Tabla 20*Distribución areal de la pendiente en la subcuenca del río Shullcas*

Símbolo	Rango (%)	Descripción	Área (km²)	Porcentaje (%)
	0 - 4	Plana a ligeramente inclinada	9.14	4.50
	4 - 8	Moderadamente inclinada	10.27	5.06
	8 - 15	Fuertemente inclinada	22.38	11.03
	15 - 25	Moderadamente empinada	39.29	19.36
	25 - 50	Empinada	80.46	39.64
	50 - 75	Muy empinada	31.58	15.56
	> 75	Extremadamente empinada	9.85	4.85

Nota. Elaboración propia.**M. Orden de la Red Hídrica:**

La clasificación de la red hídrica de una cuenca es un método que asigna un orden numérico a una red de ríos. Permite identificar y clasificar los tipos de ríos basado en la cantidad de afluentes. El método más usado para definir la jerarquía en una jerarquía de una red hídrica en una cuenca es el método Horton – Strahler, también conocido como el método Strahler, el cual modifica ligeramente el ordenamiento de Horton (Mesa, 2018). Para la presente se encontró el siguiente orden hídrico detallado en el siguiente cuadro.

Tabla 21*Clasificación de la red hídrica*

Orden	Cantidad	Distancia (km)
1	25	63.86
2	10	13.89
3	2	5.39
4	8	11.01

Nota. Elaboración propia.**N. Longitud del cauce principal (Lc):**

Corresponde a la longitud del cauce que da nombre a la cuenca de estudio, se tiene que cuenta la sinuosidad; así mismo, está determinada en kilómetros (km).

El cauce principal de subcuenca Shullcas, está determinada por el cauce cuyo nombre da a la cuenca, siendo así el río Shullcas el cauce principal y cuya longitud presenta un valor de 19.86 km.

O. Densidad de Drenaje (Dd):

Cuantifica el grado de desarrollo de un sistema hidrográfico. Este parámetro está determinado por la relación entre la longitud total de la red hídrica y el área total de la cuenca; por lo que, a mayor densidad de drenaje menor tiempo de escorrentía.

$$D_d = \frac{L_t}{A} \quad \text{Ec. (25)}$$

Tabla 22

Clasificación de la densidad de drenaje, clases Delgadillo y Páez (2008)

Rangos (Km/Km²)	Clases
< 1	Baja
1 – 2	Moderada
2 – 3	Alta
> 3	Muy Alta

Nota. Reproducida de Camino et al. (2018)

La subcuenca del río Shullcas presenta una densidad de drenaje de 0.46 km/km², y que de acuerdo a la Tabla 20 presenta una baja densidad de drenaje; es decir, su tiempo de escorrentía es alto.

P. Extensión Media de escurrimiento (Es):

Se define como la distancia media que el agua tendría que recorrer sobre la superficie de la cuenca, en un supuesto que el escurrimiento se daría en línea recta, desde cualquier lugar que se dé la precipitación hasta el curso de agua más próximo.

$$E_s = \frac{A}{4Li} \quad \text{Ec. (26)}$$

Donde, “Es” es la extensión media de escurrimiento, “A” es el área total de la cuenca, y “Li” es la longitud total de la red hídrica. La extensión media de escurrimiento de la subcuenca del río Shullcas es de 0.54 km.

Q. Frecuencia de Ríos (Fr):

Este parámetro permite conocer la relación que existe entre el número total de todos los ríos con la superficie total de la cuenca. Muestra el valor del número de ríos por Km².

$$F_r = \frac{N}{A} \quad \text{Ec. (27)}$$

La subcuenca del río Shullcas presenta una frecuencia de 0.22 ríos/km².

R. Relación de Bifurcación (Rb):

Es la proporción que existe entre el número de segmentos de un orden (N_i) y el número de segmentos de un orden superior (N_{i+1}).

$$R_b = \frac{N_i}{N_{i+1}} \quad \text{Ec. (28)}$$

En la subcuenca del río Shullcas se encontró una relación de bifurcación de 2.58; es decir, que existe en promedio de 2.58 veces de tantos números de cursos como del inmediato superior.

S. Coefficiente de Torrencialidad (Ct):

Se determina a partir de la relación del número de cauces del orden uno con respecto al área total de la cuenca. A mayor magnitud, mayor grado de torrencialidad.

$$C_t = \frac{N^{\circ} \text{ de caudes Orden 1}}{A} \quad \text{Ec. (29)}$$

La subcuenca del río Shullcas presenta un coeficiente de torrencialidad de 0.12 ríos/km²; es decir, presenta una baja torrencialidad y baja susceptibilidad a la erosión.

T. Pendiente Media del Cauce principal:

La pendiente media del cauce influye sobre la velocidad del flujo, es un parámetro que permite conocer el comportamiento del recurso hídrico en el tránsito de las avenidas, para el aprovechamiento hidroeléctrico, etc.

$$S = \frac{H}{L} \quad \text{Ec. (30)}$$

Donde, “S” es la pendiente media del cauce principal, “H” es la diferencia de la cota superior y la cota inferior del cauce principal, y “L” es la longitud del lado mayor del rectángulo equivalente.

La pendiente media del cauce principal de la subcuenca del río Shullcas presenta un valor de 9.33%.

Tabla 23*Parámetros geomorfológicos de la subcuenca del río Shullcas*

Grupo	Parámetro Fisiográfico	Unidad	Valor	
General	Área	km ²	202.98	
	Perímetro	km	84.90	
Centro de Gravedad	Centroide X	m	488000	
	Centroide Y	m	8675041	
	Centroide Z	m	3984	
Relaciones de forma	Longitud de la cuenca	km	27.69	
	Ancho Promedio	km	10.22	
	Factor de forma		0.51	
	Coeficiente de compacidad		1.68	
	Coeficiente de masividad		21.20	
	Rectángulo Equivalente	Lado Mayor	km	36.96
		Lado Menor	km	5.49
Relieve	Cota Mínima	m.s.n.m.	3188	
	Cota Máxima	m.s.n.m.	5523	
	Desnivel total de la subcuenca	m.s.n.m.	2335	
	Altitud media de la subcuenca	m.s.n.m.	4303.96	
	Índice de pendiente	%	22.08	
	Pendiente media (C. Rectángulo equivalente)	%	6.32	
	Pendiente media (C. Topográfico)	%	33.98	
Sistema de drenaje	Orden de la red hídrica		4	
	Longitud total de los ríos	Orden 1	km	63.86
		Orden 2	km	13.89
		Orden 3	km	5.39
		Orden 4	km	11.01
	Número de ríos	Orden 1		25
		Orden 2		10
		Orden 3		2
		Orden 4		8
	Longitud del cauce principal	km	19.86	
	Longitud de la red hídrica	km	94.15	
	Densidad de drenaje	km/km ²	0.46	
	Extensión media de escurrimiento	km	0.54	
Frecuencia de ríos	Ríos/km ²	0.22		
Relación de la bifurcación		2.58		
Coeficiente de la torrencialidad	Ríos/km ²	0.12		
Pendiente media del cauce principal	%	9.33		

Nota. Elaboración propia.

4.2 Análisis de la cobertura y volumen glaciar

Una vez realizado el proceso de corrección de las imágenes satelitales seleccionadas, se realizaron los procesos para obtener los valores de la superficie y volumen glaciar mediante la aplicación índices (NDSI / NDWI); así como, una serie de criterios aplicados con el software ENVI 5.3 y el ArcGIS 10.5.

4.2.1 Evaluación de la cobertura glaciar

La evaluación de la cobertura glaciar en la subcuenca del río Shullcas se realizó mediante la aplicación del Índice de Diferencia Normalizado de Nieve (NDSI) para el periodo comprendido entre los años 1990 - 2020, los resultados obtenidos se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 24

Cobertura glaciar de la subcuenca Shullcas (1990-2020)

Años	Área (Km ²)
1990	6.02
1994	5.37
1999	5.16
2004	4.69
2009	4.58
2014	4.19
2020	3.84

Nota. Elaboración propia.

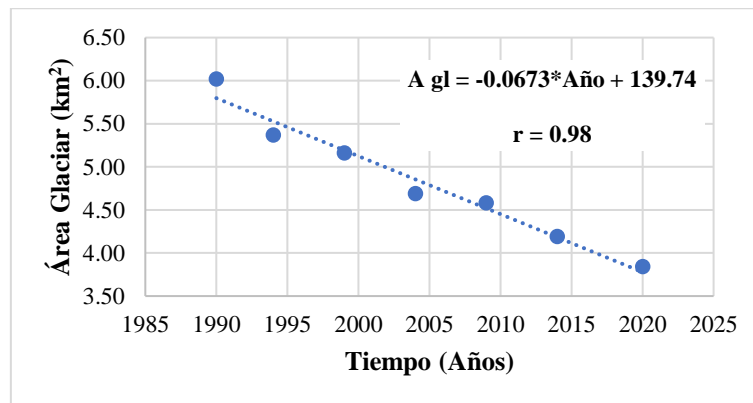
El área glaciar de la subcuenca del río Shullcas presenta una pérdida de 2.18 km² para el año 2020 con respecto al área encontrada en el año 1990; es decir, se encontró una pérdida del 36.21% de cobertura glaciar para el periodo de análisis.

4.2.2 Tasa de Retroceso Glaciar

4.2.2.1 Correlación Tiempo – Área Glaciar. Las áreas glaciares encontradas a partir de las imágenes satelitales de la subcuenca Shullcas fueron relacionada con sus respectivos años, obteniéndose una ecuación lineal con una correlación negativa cuyo coeficiente de correlación (r) fue de 0.98, lo que indica una fuerte asociación entre las dos variables.

Figura 20

Correlación Tiempo – Área glaciar de la subcuenca del río Shullcas



Nota. Elaboración propia.

Así mismo, se determinaron áreas artificiales a partir de la ecuación generada anteriormente, en donde se reemplazaron los años que fueron seleccionados para determinar la cobertura glaciar en la subcuenca Shullcas. Además, se encontró un error máximo de 3.71% y un error medio de 0.31% con respecto a las áreas encontradas con el tratamiento de las imágenes satelitales.

Tabla 25

Áreas generadas de la subcuenca del río Shullcas.

Año	Área (km²)	Área Generada (km²)	Error (%)
1990	6.02	5.81	-3.56
1994	5.37	5.54	3.14
1999	5.16	5.21	0.91
2004	4.69	4.87	3.71
2009	4.58	4.53	-1.01
2014	4.19	4.20	0.19

Nota. Elaboración propia.

De la misma manera, se encontraron las ecuaciones lineales de los nevados que componen a toda la subcuenca del río Shullcas y se muestran en la siguiente tabla.

Tabla 26

Ecuaciones regionales de cada nevado ubicado en la subcuenca del río Shullcas

Nevado	Ecuación de Retroceso Glaciar	Coefficiente de correlación (r)
Chuspi	$Agl = -0.0134 * Año + 27.618$	0.99
Talves	$Agl = -0.0276 * Año + 57.428$	0.96
Huaytapallana	$Agl = -0.0216 * Año + 45.288$	0.98

Nota. Elaboración propia.

4.2.2.2 Tasa de Cambio Promedio Anual.

Para el cálculo de estos datos se utilizó la siguiente expresión:

$$N = N_0 * (1 + r)^t$$

Donde, “N” es la superficie glaciar en el tiempo 1, “N₀” es la superficie glaciar en el tiempo 0, “t” es la diferencia del tiempo en años, y “r” es la tasa de cambio.

De la ecuación anterior, se puede obtener la tasa de cambio en porcentaje:

$$r = \left[\left(\frac{N}{N_0} \right)^{1/t} - 1 \right] * 100$$

En los siguientes cuadros se muestran los valores obtenidos a partir de la aplicación de la ecuación anteriormente descrita, donde “Agl” es el área glaciar, “Var” es la variación del

área glaciar, “TR” es la tasa de retroceso glaciar, y “TC” es la tasa de cambio promedio anual de la superficie glaciar de la subcuenca Shullcas.

Tabla 27

Tasa de cambio y retroceso glaciar de la subcuenca Shullcas y el nevado Chuspi

Año	Nevado Subcuenca del río Shullcas				Nevado Chuspi			
	Agl (Km ²)	Var. (km ²)	TC (%)	TR (km ² /Año)	Agl (Km ²)	Var. (km ²)	TC (%)	TR (km ² /Año)
1990	5.81	---	---	---	0.95	---	---	---
1994	5.54	0.27	-1.18	-0.067	0.90	0.05	-1.44	-0.013
1999	5.21	0.34	-1.24	-0.067	0.83	0.07	-1.92	-0.013
2004	4.87	0.34	-1.33	-0.067	0.76	0.07	-2.08	-0.013
2009	4.53	0.34	-1.42	-0.067	0.70	0.07	-2.27	-0.013
2014	4.20	0.34	-1.53	-0.067	0.63	0.07	-2.49	-0.013
2020	3.79	0.40	-2.50	-0.067	0.55	0.08	-3.35	-0.013
Periodo (1990 - 2020)			-1.53	-0.067	Periodo (1990 - 2020)		-2.26	-0.013
Área glaciar pérdida (km2)				2.02	A. Glaciar perdida (km2)			0.40
%				34.7	%			42.2

Nota. Elaboración propia.

Tabla 28

Tasa de cambio y retroceso glaciar de los nevados Talves y Huaytapallana

Año	Nevado Talves				Nevado Huaytapallana			
	Agl (Km ²)	Var. (km ²)	TC (%)	TR (km ² /Año)	Agl (Km ²)	Var. (km ²)	TC (%)	TR (km ² /Año)
1990	2.50	---	---	---	2.30	---	---	---
1994	2.39	0.11	-1.12	-0.028	2.22	0.09	-0.95	-0.022
1999	2.25	0.14	-1.47	-0.028	2.11	0.11	-1.24	-0.022
2004	2.12	0.14	-1.57	-0.028	2.00	0.11	-1.31	-0.022
2009	1.98	0.14	-1.67	-0.028	1.89	0.11	-1.38	-0.022
2014	1.84	0.14	-1.79	-0.028	1.79	0.11	-1.46	-0.022
2020	1.68	0.17	-2.33	-0.028	1.66	0.13	-1.87	-0.022
Periodo (1990 - 2020)			-1.66	-0.028	Periodo (1990 - 2020)		-1.37	-0.022
Área glaciar pérdida (km2)				0.83	A. Glaciar perdida (km2)			0.65
%				33.1	%			28.1

Nota. Elaboración propia.

Para el periodo 1990 – 2020 el nevado Talves presenta la mayor área glaciar perdida (0.83 km²), en donde su mayor tasa de cambio (-2.33%) se dio en el periodo 2014 – 2020;

mientras que el nevado chuspi presenta la menor área glaciaria perdida (0.40 km^2) y su mayor tasa de cambio (-3.35%) se dio en el periodo de 2014 – 2020.

Así mismo, el nevado Talves presenta la mayor tasa de retroceso glaciario con $-0.028 \text{ km}^2/\text{Año}$ siendo su pérdida de manera constante, y que tiene una de las tasas de cambio promedio anual más altas con un valor de -1.66% .

Además, el nevado Chuspi presenta el mayor porcentaje de pérdida de área glaciaria con un 42.2% y el nevado Huaytapallana presenta el menor porcentaje de pérdida de área glaciaria con un 28.1% .

Tabla 29

Resumen de la tasa de retroceso y cambio glaciario

Nevado	Tasa de Retroceso Glaciario ($\text{Km}^2/\text{Año}$)	Tasa de Cambio promedio anual (%)
Chuspi	-0.013	-2.26
Talves	-0.028	-1.66
Huaytapallana	-0.022	-1.37

Nota. Elaboración propia.

4.2.3 Superficie de las Lagunas

La evaluación de la superficie de las lagunas se realizó mediante la aplicación del Índice Normalizado de Agua (NDWI) durante el periodo comprendido entre los años 1990 – 2020 en la subcuenca del río Shullcas, los resultados obtenidos se presentan en el siguiente cuadro.

Tabla 30

Superficie de las lagunas de la subcuenca Shullcas durante el periodo 1990 – 2020

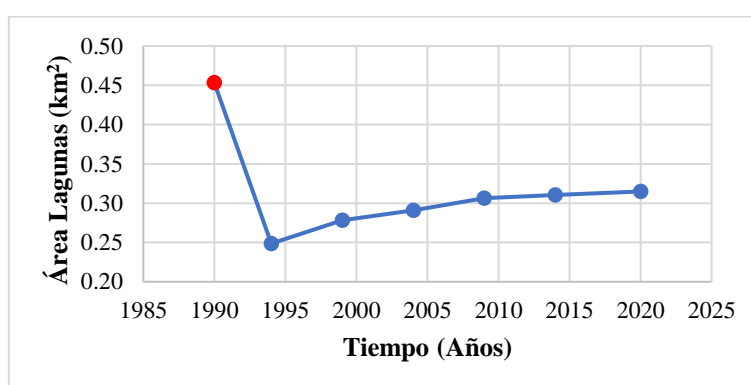
Año	Área (m^2)	Variación (m^2)
1990	453145.44	---
1994	248645.55	---
1999	278168.71	29523.17
2004	290678.98	12510.27
2009	306231.72	15552.73
2014	310354.70	4122.98
2020	314840.15	4485.45

Nota. Elaboración propia.

Para establecer una relación entre el área glaciar y la superficie de las lagunas, este se realizó durante el periodo 1994 – 2020, debido a que en el periodo 1990 – 1994 existió un desembalse provocado por la caída de un bloque de hielo ocasionando la inundación de varios barrios en la ciudad de Huancayo (RPP, 2018), siendo a partir de este incidente que se realizó una gestión hídrica de la laguna Chuspicocha, evitando a que el incidente vuelva a suceder.

Figura 21

Superficie de las lagunas en la subcuenca Shullcas en el periodo 1990 – 2020

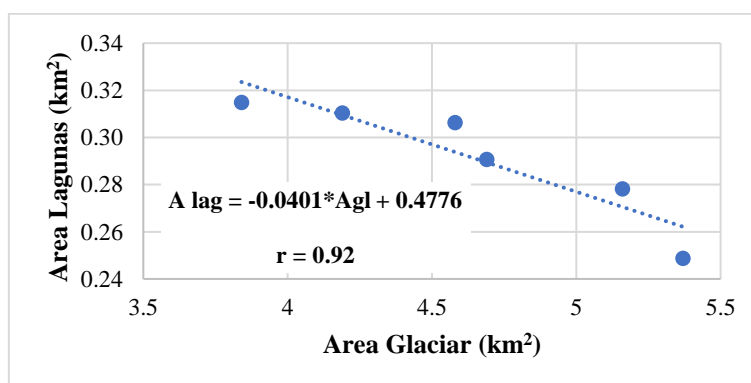


Nota. Elaboración propia.

De acuerdo a la correlación área glaciar y superficie de las lagunas en el periodo 1994 – 2020, la ecuación obtenida es de tipo lineal y presenta un coeficiente de correlación de 0.92; es decir, existe una alta relación entre ambas variables.

Figura 22

Correlación Área de Lagunas – Área Glaciar en la subcuenca Shullcas



Nota. Elaboración propia.

Donde, “A lag” es el área de las lagunas y “Agl” es el área de la superficie glaciar; así mismo, la correlación indica que a medida que el área glaciar disminuye, el área de la superficie de las lagunas aumenta; de modo que, existe una relación inversa entre las dos variables.

4.2.4 Volumen Glaciar o Reserva Hídrica

Para determinar la reserva hídrica o volumen glaciar; en primer lugar, se calculó el rango altitudinal del glaciar (ΔH) donde se consideró la cota mínima y máxima encontrada a partir del modelo de elevación digital (DEM ALOS 30m).

Tabla 31

Rango altitudinal de la subcuenca Shullcas y el nevado Huaytapallana (1990 – 2020)

Año	Subcuenca Shullcas			Huaytapallana		
	Cota Mínima	Cota Máxima	Rango de Altitud (m)	Cota Mínima	Cota Máxima	Rango de Altitud (m)
1990	4649	5523	874	4646	5520	874
1994	4694	5523	829	4696	5520	824
1999	4666	5523	857	4666	5520	854
2004	4650	5523	873	4650	5520	870
2009	4650	5523	873	4650	5520	870
2014	4665	5523	858	4665	5520	855
2020	4727	5523	796	4727	5520	793

Nota. Elaboración propia.

Tabla 32

Rango altitudinal del nevado Talves y Chuspi (1990 - 2020)

Año	Talves			Chuspi		
	Cota Mínima	Cota Máxima	Rango de Altitud (m)	Cota Mínima	Cota Máxima	Rango de Altitud (m)
1990	4647	5505	858	4770	5381	611
1994	4694	5505	811	4779	5381	602
1999	4757	5505	748	4806	5381	575
2004	4770	5505	735	4813	5381	568
2009	4792	5505	713	4818	5381	563
2014	4810	5505	695	4857	5381	524
2020	4840	5505	665	4893	5381	488

Nota. Elaboración propia.

Seguidamente se calculó el esfuerzo cortante promedio basal a partir de la siguiente ecuación:

$$\text{Si: } \Delta H > 1600 \text{ m} \quad \tau = 1.5 \text{ bar}$$

$$\Delta H < 1600 \text{ m} \quad \tau = 0.005 + 1.598 * \Delta H - 0.435 * \Delta H^2$$

Además, la pendiente de la superficie (α) se puede estimar a partir de la longitud del glaciar (L) y el rango altitudinal (ΔH) con la siguiente ecuación:

$$\alpha = \arctan\left(\frac{\Delta H}{L}\right)$$

Seguidamente se procede a calcular el espesor medio de hielo; previamente se calculó el espesor promedio del flujo de hielo central, y finalmente se estimó el volumen del glaciar a través de las siguientes ecuaciones:

$$h_F = h_f \left(\frac{\pi}{4}\right)$$

$$V_F = A * (h_F)$$

Donde, “ h_F ” es el espesor promedio de hielo, “A” es el área del glaciar, “ V_F ” es el volumen del glaciar.

Tabla 33

Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (1990)

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hr)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.89	611	0.82	1086.47	29.4	23.65	18.58	16.53
Talves	2.63	858	1.06	1699.81	26.8	33.17	26.05	68.52
Huaytapallana	2.34	874	1.07	1664.84	27.7	32.57	25.58	59.86

Nota. Elaboración propia.

Tabla 34*Parámetros y volumen de los nevados en la subcuena Shullcas (1994)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hr)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.86	602	0.81	1023.22	30.5	22.60	17.75	15.26
Talves	2.26	811	1.01	1609.82	26.7	31.94	25.08	56.69
Huaytapallana	2.15	824	1.03	1654.49	26.5	32.60	25.60	55.04

Nota. Elaboración propia.**Tabla 35***Parámetros y volumen de los nevados en la subcuena Shullcas (1999)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hr)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.82	575	0.78	934.81	31.6	21.08	16.56	13.58
Talves	2.14	748	0.96	1579.8	25.3	31.66	24.86	53.21
Huaytapallana	2.04	854	1.05	1592.93	28.2	31.54	24.77	50.53

Nota. Elaboración propia.**Tabla 36***Parámetros y volumen de los nevados en la subcuena Shullcas (2004)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hr)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.75	568	0.77	906.79	32.1	20.60	16.18	12.13
Talves	2.03	735	0.94	1528.41	25.7	30.86	24.23	49.20
Huaytapallana	1.88	870	1.07	1600.72	28.5	31.61	24.82	46.67

Nota. Elaboración propia.**Tabla 37***Parámetros y volumen de los nevados en la subcuena Shullcas (2009)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hr)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.68	563	0.77	888.24	32.4	20.28	15.93	10.83
Talves	2.01	713	0.92	1501.2	25.4	30.47	23.93	48.10
Huaytapallana	1.86	870	1.07	1576.35	28.9	31.23	24.53	45.63

Nota. Elaboración propia.

Tabla 38*Parámetros y volumen de los nevados en la subcuenca Shullcas (2014)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hf)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.58	524	0.72	636.42	39.5	16.10	12.65	7.33
Talves	1.83	695	0.91	1461.13	25.4	29.85	23.44	42.90
Huaytapallana	1.75	855	1.05	1537.17	29.1	30.68	24.10	42.17

Nota. Elaboración propia.**Tabla 39***Parámetros y volumen en los nevados en la subcuenca Shullcas (2020)*

Nevado	Área (km ²)	Rango de altitud (m)	Esfuerzo cortante (bar)	Longitud (m)	Pendiente (°)	Línea de flujo central (hf)	Espesor Promedio (m)	Volumen (10 ⁶ *m ³)
Chuspi	0.5	488	0.68	624.79	38.0	15.67	12.31	6.15
Talves	1.66	665	0.88	1425.54	25.0	29.31	23.02	38.22
Huaytapallana	1.65	793	1.00	1525.16	27.5	30.65	24.07	39.72

Nota. Elaboración propia.

Luego de estimar los volúmenes de los nevados que se encuentran dentro de la subcuenca Shullcas, se presenta el siguiente cuadro resumen:

Tabla 40*Cuadro resumen del volumen glaciar de los nevados de la subcuenca Shullcas*

Años	Chuspi	Talves	Huaytapallana	Volumen total (*10 ⁶ m ³)	Área (km ²)
1990	16.53	68.52	59.86	144.92	6.02
1994	15.26	56.69	55.04	126.99	5.37
1999	13.58	53.21	50.53	117.31	5.16
2004	12.13	49.20	46.67	108.00	4.69
2009	10.83	48.10	45.63	104.56	4.58
2014	7.33	42.90	42.14	92.40	4.19
2020	6.15	38.22	39.72	84.09	3.84

Nota. Elaboración propia.

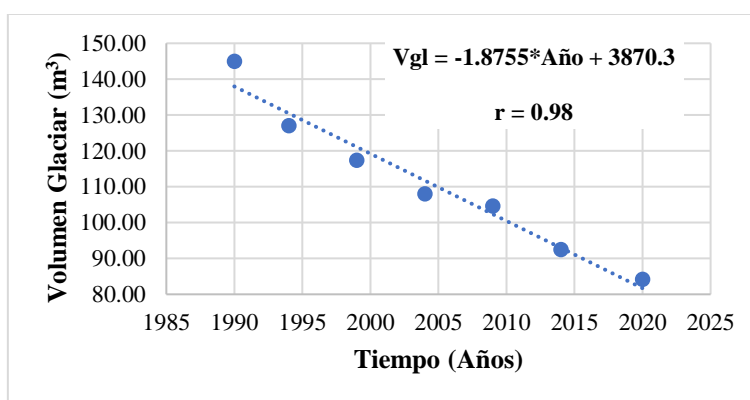
Del cuadro resumen se aprecia que a medida que el área de la superficie glaciar disminuye, lo mismo ocurre con el volumen del glaciar; así mismo, se registra una pérdida de $60.83 \times 10^6 \text{ m}^3$, que representa una disminución del 41.98% de volumen glaciar para el periodo

de 1990 – 2020. Además, el nevado Chuspi registra la mayor pérdida de volumen glaciar con un $10.38 \times 10^6 \text{ m}^3$ que representa el 62.79%; y en el caso del nevado Huaytapallana presenta una reducción del 33.65%, siendo una pérdida de $20.14 \times 10^6 \text{ m}^3$ de volumen glaciar.

Seguidamente se realizó una correlación entre el volumen glaciar y el tiempo seleccionado (1990 – 2020) obteniéndose el siguiente resultado.

Figura 23

Correlación Volumen glaciar – Tiempo (1990 – 2020)



Nota. Elaboración propia.

Se encontró una ecuación lineal con un coeficiente de correlación de 0.98; así mismo, se generaron los volúmenes glaciares a partir de la ecuación descrita en la figura 23 y que se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 41

Volumen generado a partir de la correlación Año – Volumen glaciar

Año	Volumen ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Volumen Generado ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Error (%)
1990	144.92	138.06	-4.74
1994	126.99	130.55	2.80
1999	117.31	121.18	3.29
2004	108.00	111.80	3.52
2009	104.56	102.40	-2.04
2014	92.40	93.40	0.70
2020	84.09	81.79	-2.73
Promedio			0.11

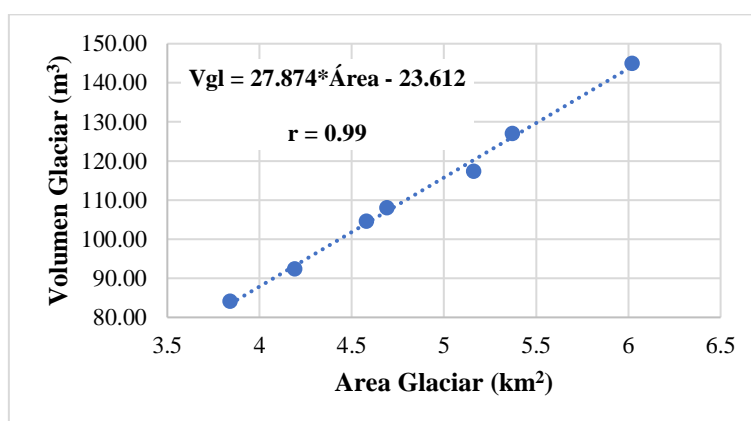
Nota. Elaboración propia.

En donde se encontró un error máximo de 4.74% y un error medio del 0.11%.

De la misma manera se realizó una correlación Área glaciar – Volumen glaciar para la subcuenca Shullcas durante el periodo 1990 – 2020 y el resultado se detalla en la siguiente figura:

Figura 24

Correlación volumen glaciar – Área glaciar (1990 – 2020)



Nota. Elaboración propia.

Se encontró una ecuación lineal con un coeficiente de correlación de 0.99; así mismo, se generaron los volúmenes glaciares a partir de la ecuación descrita en la figura 24 y los valores encontrados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 42

Volumen generado a partir de la correlación Área glaciar – Volumen glaciar

Área (km²)	Volumen (x10 ⁶ m ³)	Volumen Generado (x10 ⁶ m ³)	Error (%)
6.02	144.92	144.19	-0.50
5.37	126.99	126.07	-0.72
5.16	117.31	120.22	2.48
4.69	108.00	107.12	-0.81
4.58	104.56	104.05	-0.48
4.19	92.40	93.18	0.85
3.84	84.09	83.42	-0.79
Promedio			0.001

Nota. Elaboración propia.

En donde, se presenta un erro máximo de 2.48% y un error medio de 0.001%.

4.2.4.1 Tasa de Cambio Promedio Anual. Para determinar de la tasa de cambio y retroceso del volumen glaciar en la subcuenca shullcas, se utilizó la misma metodología para el cálculo de la tasa de cambio y retroceso de la superficie glaciar, donde los resultados obtenido se presentan en la siguiente tabla:

Tabla 43

Tasa de cambio y retroceso del volumen glaciar

Año	Volumen glaciar (x10 ⁶ m ³)	Variación del volumen glaciar	TC (%)	TR (x10 ⁶ m ³ /Año)
1990	181.95	---	---	---
1994	154.42	27.53	-4.02	6.88
1999	143.99	10.43	-1.39	2.09
2004	126.81	17.18	-2.51	3.44
2009	123.87	2.94	-0.47	0.59
2014	111.09	12.78	-2.15	2.56
2020	101.16	9.93	-1.55	1.65
Periodo (1990-2020)			-2.01	2.87
Volumen glaciar perdido (x10⁶ m³)			80.79	
%			44.4	

Nota. Elaboración propia.

En donde se aprecia que la subcuenca shullcas presenta una tasa de retroceso de $2.87 \times 10^6 \text{ m}^3$; así mismo, presenta una tasa de cambio de -2.01%.

4.3 Comportamiento hidrometeorológico

4.3.1 Hidrometeorología

4.3.1.1 Temperatura (°C)

A. Temperatura Media

Para determinar la temperatura media de la subcuenca Shullcas, se realizó mediante un análisis de regionalización debido a la falta de información dentro de la subcuenca, entre las estaciones utilizadas se encuentran: Jauja, Ingenio, San Juan de Jarpa, Junín,

Marcapomacocha y Yantac; esta información fue adquirida a partir del informe final “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Mantaro” realizado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) en el año 2015.

Tabla 44

Estaciones para el cálculo de la temperatura media (1965 – 2013)

Estación	C. Geográficas		Distrito	Altitud (m.s.n.m)	T. Media (°C)
	Latitud	Longitud			
Jauja	11°46'59"	75°28'46"	Jauja	3360	11.7
Ingenio	11°52'51"	75°17'16"	Santa Rosa de Ocopa	3422	11.5
S. Juan de Jarpa	12°02'01"	75°25'01"	Chambara	3650	9.7
Junín	11°08'07"	75°59'59"	Junín	4120	6.3
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	Marcapomacocha	4479	4.6
Yantac	11°20'01"	76°24'01"	Marcapomacocha	4684	4.5

Nota. Reproducida de la Autoridad Nacional del Agua (2015).

Tabla 45

Temperatura media mensual de las estaciones consideradas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
Jauja	12.5	12.2	12.2	12	11	10.1	9.8	10.8	11.8	12.5	12.9	12.8	11.7
Ingenio	12.1	12.1	11.8	11.9	10.9	9.8	9.6	10.5	11.7	12.2	12.7	12.3	11.5
San Juan de Jarpa	10.6	10.6	10.3	10	9	8.1	7.8	8.7	9.7	10.5	10.9	10.6	9.7
Junín	7	6.8	6.8	6.9	6.1	5.2	4.8	5.3	6	7	7.1	7	6.3
Marcapomacocha	5.1	5.1	5.1	5	4.5	3.8	3.2	3.8	4.3	4.9	5.2	5.2	4.6
Yantac	5	5	5	5	4.3	4	3.2	3.8	4	4.8	5.2	5	4.5

Nota. Reproducida de la Autoridad Nacional del Agua (2015).

RELACION ALTITUD – TEMPERATURA MEDIA (°C)

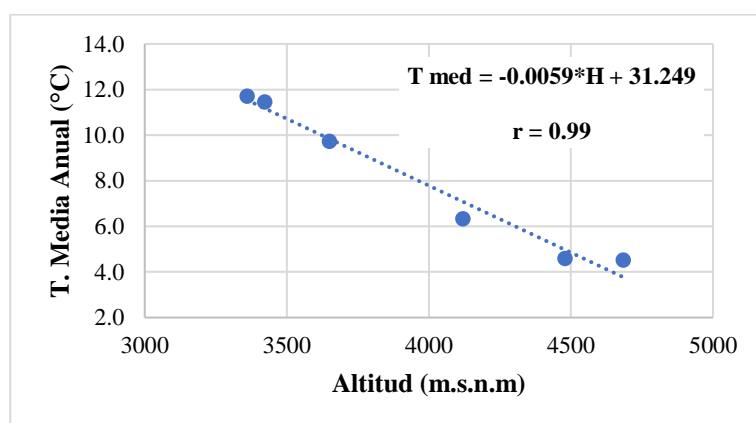
Para conocer el comportamiento de la temperatura de la zona de estudio, se estableció una relación entre la altitud y la temperatura media de las estaciones consideradas.

Tabla 46*Estaciones meteorológicas consideradas*

Estación	Altitud (m.s.n.m)	T. Media (°C)
Jauja	3360	11.7
Ingenio	3422	11.5
San Juan de Jarpa	3650	9.7
Junín	4120	6.3
Marcapomacocha	4479	4.6
Yantac	4684	4.5

Nota. Reproducida de la Autoridad Nacional del Agua (2015).

A partir de la relación efectuada entre la altitud y la temperatura media de las estaciones consideradas, se obtiene el siguiente resultado.

Figura 25*Relación Altitud – Temperatura media anual*

Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se aprecia que existe una relación inversa entre la altitud y la temperatura media; es decir, a medida que la altitud aumenta la temperatura media descende. Además, se encontró un coeficiente de correlación de 0.99 lo que indica una fuerte asociación entre ambas variables.

Además, se obtuvieron las ecuaciones regionales de la temperatura media mensual de cada mes relacionando la altura con la temperatura media mensual de cada una de las estaciones seleccionadas:

Tabla 47*Ecuaciones regionales de la subcuenca Shullcas*

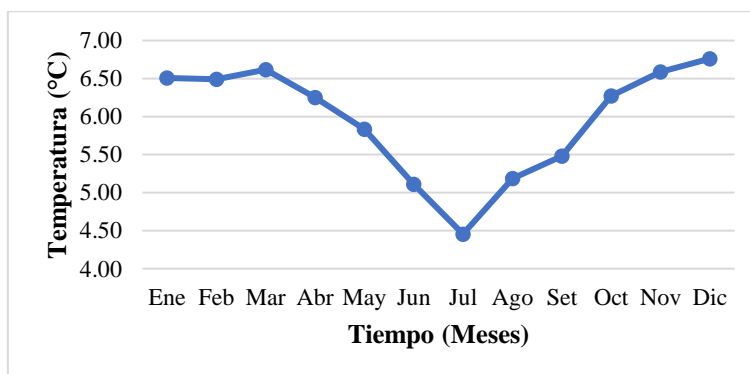
Mes	Ecuación	C. de Correlación
Ene	$T_{med} = -0.0061 \cdot H + 32.762$	0.99
Feb	$T_{med} = -0.0060 \cdot H + 32.314$	0.99
Mar	$T_{med} = -0.0058 \cdot H + 31.582$	0.99
Abr	$T_{med} = -0.0058 \cdot H + 31.212$	0.99
May	$T_{med} = -0.0054 \cdot H + 29.074$	0.99
Jun	$T_{med} = -0.0050 \cdot H + 26.631$	0.99
Jul	$T_{med} = -0.0054 \cdot H + 27.697$	0.98
Ago	$T_{med} = -0.0057 \cdot H + 29.720$	0.98
Set	$T_{med} = -0.0064 \cdot H + 33.025$	0.99
Oct	$T_{med} = -0.0063 \cdot H + 33.388$	0.99
Nov	$T_{med} = -0.0064 \cdot H + 34.132$	0.99
Dic	$T_{med} = -0.0062 \cdot H + 33.446$	0.99

Nota. Elaboración propia.

A partir de esta información adquirida, se procedió a reemplazar la altura media en cada una de las ecuaciones con el fin de obtener la temperatura media mensual de cada mes y se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 48*Temperatura mensual de la subcuenca Shullcas*

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media
T(°C)	6.51	6.49	6.62	6.25	5.83	5.11	4.46	5.19	5.48	6.27	6.59	6.76	5.96

Nota. Elaboración propia.**Figura 26***Tendencia de la temperatura media mensual de la subcuenca Shullcas**Nota.* Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA MEDIA MENSUAL

Para el cálculo de la temperatura media de la subcuenca Shullcas, se utilizó el método de isotermas, que son aquellas isolíneas que presenta la misma temperatura. Se obtuvo a partir de la ecuación regional encontrada en la sección anterior y que los resultados encontrados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 49

Cálculo de la temperatura media mensual de la subcuenca Shullcas

Nº	T. Mínima (°C)	T. Máxima (°C)	T. Promedio (°C) (1)	Área (km ²) (2)	(1)*(2)
1	-0.23	0	-0.12	0.68	-0.08
2	0	1	0.50	3.64	1.82
3	1	2	1.50	3.84	5.77
4	2	3	2.50	4.95	12.38
5	3	4	3.50	35.08	122.78
6	4	5	4.50	56.30	253.34
7	5	6	5.50	34.16	187.88
8	6	7	6.50	24.93	162.06
9	7	8	7.50	14.86	111.42
10	8	9	8.50	5.58	47.42
11	9	10	9.50	4.08	38.80
12	10	11	10.50	3.08	32.37
13	11	12	11.50	8.24	94.78
14	12	12.42	12.21	3.49	42.59
TOTAL				202.91	1070.73

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, la temperatura media mensual de la subcuenca Shullcas es:

$$T_{med} = \frac{1070.73}{202.91} = 5.28^{\circ}\text{C}$$

Finalmente, para la presente investigación se consideró como temperatura media para la zona de estudio al promedio de los resultados obtenidos de las ecuaciones regionales y el método de las isotermas; por ende, se tiene que la temperatura media anual de la zona de estudio es de 5.68 °C.

B. Temperatura Mínima

Para determinar la temperatura mínima de la subcuenca Shullcas se realizó un análisis de regionalización debido a la falta de información dentro de la zona de estudio, por lo que, se utilizaron la información de las siguientes estaciones meteorológicas: Jauja, Ingenio, San Juan de Jarpa, Junín y Marcapomacocha; esta información fue adquirida del informe final “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Mantaro” realizado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) en el año 2015.

Tabla 50

Estaciones consideradas para la evaluación de la temperatura mínima

Estación	C. Geográficas		Distrito	Altitud (m.s.n.m)	T. Mínima (°C)
	Latitud	Longitud			
Jauja	11°46'59"	75°28'46"	Jauja	3360	4.3
Ingenio	11°52'51"	75°17'16"	Santa Rosa de Ocopa	3422	4.0
S. Juan de Jarpa	12°02'01"	75°25'01"	Chambara	3650	3.2
Junín	11°08'07"	75°59'59"	Junín	4120	0.1
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	Marcapomacocha	4479	-1.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

Tabla 51

Temperatura mínima media mensual de las estaciones seleccionadas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
Jauja	6.5	6.6	6.4	5	2.7	1.1	0.3	1.7	4	5.3	5.7	6.2	4.3
Ingenio	5.9	6.4	6.1	4.8	2.1	0.6	0.3	1.6	3.8	4.9	5.3	5.9	4.0
San Juan de Jarpa	5.3	5.7	5.5	4	1.5	0	-0.5	0.7	2.7	4	4.1	5.1	3.2
Junín	2.7	2.8	2.8	1.3	-0.9	-2.6	-3.8	-3.3	-1.3	0.5	0.8	1.9	0.1
Marcapomacocha	0	0	0.1	-0.4	-1.9	-3.1	-4.2	-3.7	-2.4	-1.3	-1	-0.4	-1.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

RELACION ALTITUD – TEMPERATURA MINIMA

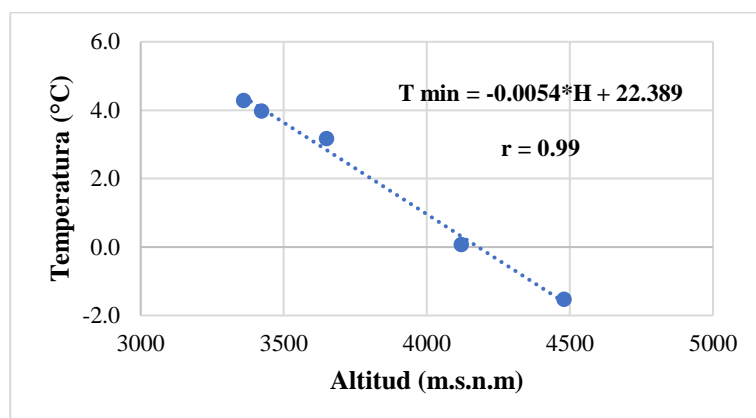
Para conocer el comportamiento de la temperatura mínima de la zona de estudio, se estableció una relación entre la altitud y la temperatura mínima de las estaciones consideradas.

Tabla 52*Temperatura mínima anual de las estaciones seleccionadas*

Estación	Altitud (m.s.n.m)	T. Media (°C)
Jauja	3360	4.3
Ingenio	3422	4.0
San Juan de Jarpa	3650	3.2
Junín	4120	0.1
Marcapomacocha	4479	-1.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

A partir de la relación Altitud – Temperatura mínima anual de las estaciones seleccionadas, se obtiene lo siguiente:

Figura 27*Relación altitud – Temperatura mínima anual*

Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se aprecia que existe una relación inversa entre la altitud y la temperatura mínima; es decir, a medida que la altitud aumenta la temperatura mínima anual descende. Además, se encontró un coeficiente de correlación de 0.99 lo que indica una fuerte relación entre ambas variables.

Además, se obtuvieron las ecuaciones regionales para la subcuenca Shullcas relacionando la altura con la temperatura mínima mensual de cada una de las estaciones seleccionadas, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 53*Ecuaciones regionales de la subcuenca Shullcas*

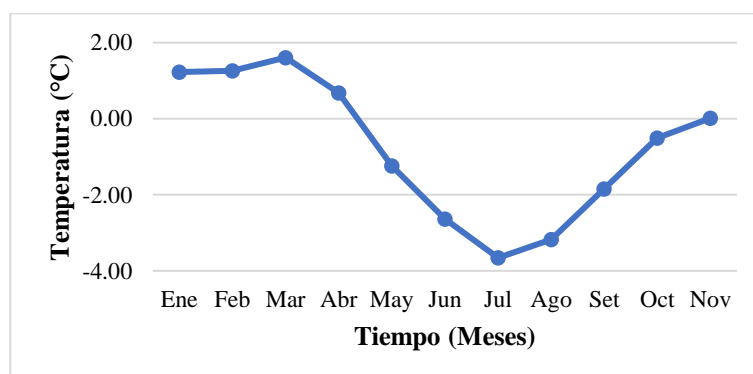
Mes	Ecuación	C. de Correlación
Ene	$T_{\min} = -0.0056 \cdot H + 25.325$	0.99
Feb	$T_{\min} = -0.0059 \cdot H + 26.651$	0.99
Mar	$T_{\min} = -0.0055 \cdot H + 25.280$	0.99
Abr	$T_{\min} = -0.0049 \cdot H + 21.765$	0.99
May	$T_{\min} = -0.0041 \cdot H + 16.410$	0.99
Jun	$T_{\min} = -0.0039 \cdot H + 14.152$	0.98
Jul	$T_{\min} = -0.0045 \cdot H + 15.710$	0.97
Ago	$T_{\min} = -0.0054 \cdot H + 20.067$	0.97
Set	$T_{\min} = -0.0062 \cdot H + 24.840$	0.99
Oct	$T_{\min} = -0.0061 \cdot H + 25.751$	0.99
Nov	$T_{\min} = -0.0061 \cdot H + 26.265$	0.99
Dic	$T_{\min} = -0.0060 \cdot H + 26.451$	0.99

Nota. Elaboración propia.

A partir de esta información adquirida, se procedió a reemplazar la altura media en cada una de las ecuaciones con el fin de obtener la temperatura mínima mensual de cada mes y que se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 54*Temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas*

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
T(°C)	1.22	1.26	1.61	0.68	-1.24	-2.63	-3.66	-3.17	-1.84	-0.50	0.01	0.63	-0.64

Nota. Elaboración propia.**Figura 28***Tendencia de la temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas**Nota.* Elaboración propia.

ESTIMACION DE LA TEMPERATURA MINIMA

Para el cálculo de la temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas, se utilizó el método de isotermas, que son aquellas isolíneas que presenta la misma temperatura.

Tabla 55

Cálculo de la temperatura mínima de la subcuenca Shullcas

Nº	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	T. Promedio (1)	Área (km2) (2)	(1)*(2)
1	-6.42	-6	-6.21	1.50	-9.33
2	-6	-5	-5.50	4.01	-22.05
3	-5	-4	-4.50	4.43	-19.94
4	-4	-3	-3.50	7.90	-27.65
5	-3	-2	-2.50	60.44	-151.11
6	-2	-1	-1.50	49.34	-74.00
7	-1	0	-0.50	31.77	-15.89
8	0	1	0.50	18.20	9.10
9	1	2	1.50	6.27	9.41
10	2	3	2.50	4.43	11.09
11	3	4	3.50	3.40	11.90
12	4	5	4.50	9.93	44.68
13	5	5.16	5.08	1.27	6.47
TOTAL				202.91	-227.33

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, la temperatura mínima mensual de la subcuenca Shullcas es:

$$T_{min} = \frac{-227.33}{202.91} = -1.12^{\circ}\text{C}$$

De esta manera se tiene que la temperatura mínima anual de la subcuenca Shullcas está dada por el promedio de los resultados obtenidos de las ecuaciones regionales y el método de las isotermas; por ende, se tiene que la temperatura media anual de la zona de estudio es de -0.88 °C.

C. Temperatura Máxima

Para determinar la temperatura máxima de la subcuenca Shullcas, se realizó mediante un análisis de regionalización debido a la falta de información dentro de la subcuenca, entre las estaciones utilizadas se encuentran: Jauja, Pilchaca, San Juan de Jarpa, Junín, Marcapomacocha y Yantac; esta información fue adquirida a partir del informe final “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Mantaro” realizado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) en el año 2015.

Tabla 56

Temperatura máxima anual de las estaciones seleccionadas

Estación	C. Geográficas		Distrito	Altitud (m.s.n.m)	T. Máxima (°C)
	Latitud	Longitud			
Jauja	11°46'59"	75°28'46"	Jauja	3360	19.2
Pilchaca	12°24'23"	75°05'05"	Pilchaca	3650	17.8
S. Juan de Jarpa	12°02'01"	75°25'01"	Chambara	3650	16.4
Junín	11°08'07"	75°59'59"	Junín	4120	12.8
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	Marcapomacocha	4479	10.7
Yantac	11°20'01"	76°24'01"	Marcapomacocha	4684	9.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

Tabla 57

Temperatura máxima mensual de las estaciones seleccionadas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Prom.
Jauja	18.6	18.2	17.9	18.9	19.5	19.2	19.1	19.6	19.8	19.9	20.1	19.5	19.2
Pilchaca	17.0	16.8	16.9	17.8	18.7	18.2	17.8	18.0	17.9	18.4	18.8	17.7	17.8
San Juan de Jarpa	16.1	15.7	15.3	16.1	16.7	16.2	16.0	16.6	16.8	17.0	17.5	16.3	16.4
Junín	12.4	12.1	11.9	12.4	13.0	12.7	12.8	13.5	13.2	13.2	13.4	12.6	12.8
Marcapomacocha	10.3	10.2	10.1	10.6	10.8	10.5	10.5	11.0	11.0	11.0	11.4	10.7	10.7
Yantac	9.2	9.1	8.7	9.4	10	9.8	9.9	10	9.7	9.5	9.8	9.2	9.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

RELACION ALTITUD – TEMPERATURA MÁXIMA

Para conocer el comportamiento de la temperatura máxima de la zona de estudio, se estableció una relación entre la altitud y la temperatura máxima de las estaciones consideradas.

Tabla 58

Estaciones consideradas para la relación altitud – Temperatura máxima

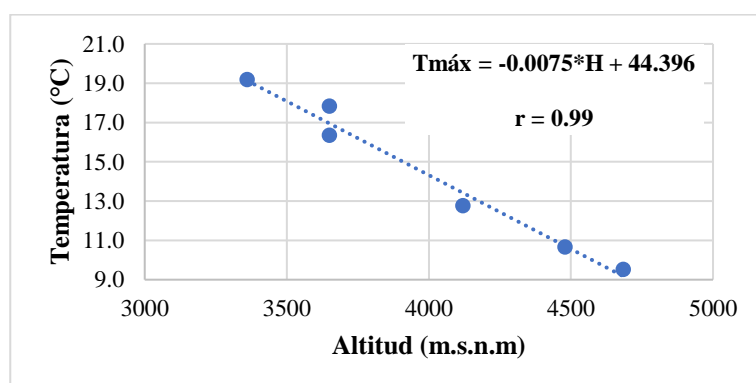
Estación	Altitud (m.s.n.m)	T. Máxima (°C)
Jauja	3360	19.2
Ingenio	3650	17.8
San Juan de Jarpa	3650	16.4
Junín	4120	12.8
Marcapomacocha	4479	10.7
Yantac	4684	9.5

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

A partir de la relación Altitud – Temperatura mínima anual de las estaciones seleccionadas, se obtiene lo siguiente:

Figura 29

Relación Altitud – Temperatura máxima



Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se observa que existe una relación inversa entre la altitud y la temperatura; es decir, a medida que la altura aumenta la temperatura disminuye. Además, se encontró como coeficiente de correlación un valor de 0.99, lo que indica que existe una fuerte relación entre ambas variables.

Además, se obtuvieron las ecuaciones regionales para la subcuenca Shullcas relacionando la altura con la temperatura máxima mensual de cada una de las estaciones seleccionadas, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 59*Ecuaciones regionales de la temperatura máxima*

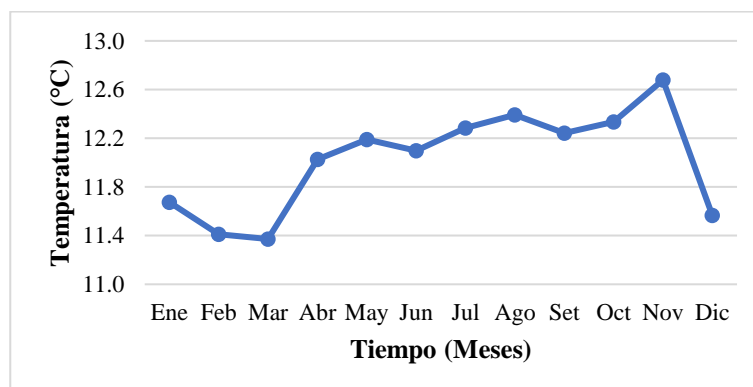
Mes	Ecuación	C. de Correlación
Ene	$T \text{ máx} = -0.0073 * H + 43.094$	0.99
Feb	$T \text{ máx} = -0.0071 * H + 41.969$	0.99
Mar	$T \text{ máx} = -0.0071 * H + 41.930$	0.99
Abr	$T \text{ máx} = -0.0074 * H + 43.876$	0.98
May	$T \text{ máx} = -0.0077 * H + 45.329$	0.98
Jun	$T \text{ máx} = -0.0075 * H + 44.378$	0.98
Jul	$T \text{ máx} = -0.0072 * H + 43.273$	0.98
Ago	$T \text{ máx} = -0.0074 * H + 44.242$	0.99
Set	$T \text{ máx} = -0.0077 * H + 45.382$	0.99
Oct	$T \text{ máx} = -0.0080 * H + 46.767$	0.99
Nov	$T \text{ máx} = -0.0080 * H + 47.110$	0.99
Dic	$T \text{ máx} = -0.0081 * H + 46.428$	0.99

Nota. Elaboración propia.

Seguidamente, se reemplazó la altura media en cada una de las ecuaciones regionales para obtener la temperatura máxima de cada mes, siendo los valores obtenidos:

Tabla 60*Temperatura máxima mensual de la subcuenca Shullcas*

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
T(°C)	11.7	11.4	11.4	12.0	12.2	12.1	12.3	12.4	12.2	12.3	12.7	11.6	12.0

Nota. Elaboración propia.**Figura 30***Tendencia de la temperatura máxima mensual**Nota.* Elaboración propia.

ESTIMACIÓN DE LA TEMPERATURA MÁXIMA

Para la estimación de la temperatura máxima, se utilizó el método de las isotermas y se entiende como un conjunto de isolíneas que presentan la misma temperatura.

Tabla 61

Cálculo de la temperatura máxima de la subcuenca Shullcas

N°	Temperatura mínima (°C)	Temperatura máxima (°C)	T. Promedio (1)	Área (km ²) (2)	(1)*(2)
1	4.38	6	5.19	4.48	23.23
2	6	8	7.00	6.43	45.02
3	8	10	9.00	46.54	418.83
4	10	12	11.00	73.03	803.38
5	12	14	13.00	38.81	504.59
6	14	16	15.00	14.28	214.27
7	16	18	17.00	6.03	102.57
8	18	20.00	19.00	10.31	195.93
9	20	20.47	20.24	2.99	60.58
TOTAL				202.92	2307.82

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, la temperatura máxima de la subcuenca Shullcas es:

$$T_{m\acute{a}x} = \frac{2307.82}{202.92} = \mathbf{11.37^{\circ}C}$$

Finalmente, se considera como temperatura máxima anual para la subcuenca Shullcas al promedio de los valores encontrados por el método de ecuaciones regionales y el método de las isotermas, siendo el resultado encontrado de 11.70°C.

4.3.1.2 Precipitación (Pp). Para determinar la precipitación anual de la zona de estudio, se realizó mediante tres metodologías las cuales son: el método de regionalización, método de isoyetas y el método de polígonos de Thiessen; siendo el resultado considerado para el presente trabajo de investigación, el promedio aritmético de las tres metodologías anteriormente mencionadas. Así mismo, se utilizó la información de las siguientes estaciones meteorológicas: Comas, Huanta, Huamanga, Shullcas y Alpamarca; esta información fue adquirida a partir del informe final “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca del Mantaro” realizado por la Autoridad Nacional de Agua (ANA) en el año 2015.

Tabla 62

Estaciones para el cálculo de la precipitación anual de la zona de estudio

Estación	Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)
	Longitud	Latitud		
Comas	75°7'45.1"	11°44'55"	3640	901.9
Huanta	74°15'00"	12°56'00"	2682	572.6
Huamanga	74°13'01"	13°09'01"	2761	635.5
Shullcas	75°10'00"	12°00'00"	3750	941.5
Alpamarca	76°27'01"	11°13'01"	4715	2010.8

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

Tabla 63

Precipitación anual de las estaciones consideradas (1965 – 2013)

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Comas	128.3	146.4	135.8	56.7	26.7	14.2	20.1	26.4	54	86.3	88.5	118.5	901.9
Huanta	89.4	85.3	86.2	42.3	13.6	10.2	14.1	20.9	27.9	46.8	48.5	87.4	572.6
Huamanga	107.4	106.3	93.7	34.1	20.3	12	17.2	28.6	32	43.1	57.4	83.4	635.5
Shullcas	171.1	165.6	133.4	51	23.5	10.5	18.3	25.1	39	88.9	84.1	131	941.5
Alpamarca	320.5	375.2	332	121.9	92	23	19.8	44.9	92.3	153.3	175.4	260.5	2010.8

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

RELACION ALTITUD – PRECIPITACION ANUAL (mm)

Para conocer el comportamiento de la precipitación de la zona de estudio, se estableció una relación entre la altitud y la precipitación anual de las estaciones consideradas.

Tabla 64

Estaciones meteorológicas consideradas

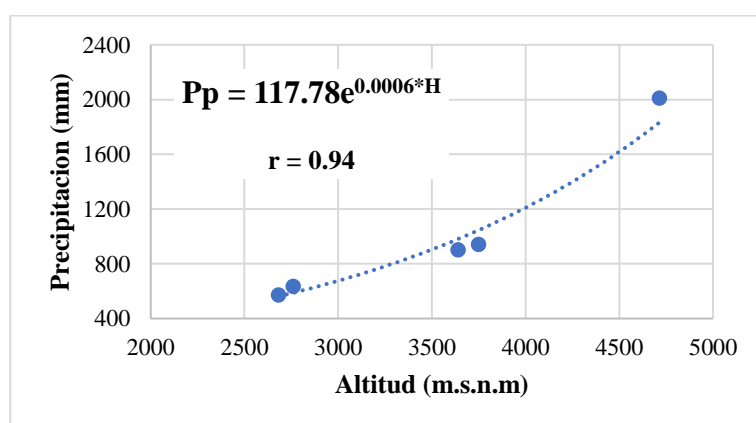
Estaciones	Altitud (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)
Comas	3640	901.9
Huanta	2682	572.6
Huamanga	2761	635.5
Shullcas	3750	941.5
Alpamarca	4715	2010.8
Comas	3640	901.9

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

A partir de la relación efectuada entre la altitud y la precipitación anual de las estaciones consideradas, se obtiene el siguiente resultado.

Figura 31

Relación altitud - Precipitación anual (mm)



Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se aprecia que existe una relación directa entre la altitud y la precipitación anual; es decir, a medida que la altitud aumenta la precipitación anual

aumenta. Además, se encontró un coeficiente de correlación de 0.94 lo que indica una fuerte asociación entre ambas variables.

Además, se obtuvieron las ecuaciones regionales para la subcuenca Shullcas relacionando la altura con la precipitación mensual de cada una de las estaciones seleccionadas, los cuales se muestran a continuación:

Tabla 65

Ecuaciones regionales de la subcuenca shullcas

Mes	Ecuación	C. de Correlación
Ene	$P_{med} = 19.224 * e^{0.0006 * H}$	0.94
Feb	$P_{med} = 14.657 * e^{0.0007 * H}$	0.94
Mar	$P_{med} = 15.415 * e^{0.0006 * H}$	0.92
Abr	$P_{med} = 8.0471 * e^{0.0005 * H}$	0.91
May	$P_{med} = 1.6523 * e^{0.0008 * H}$	0.88
Jun	$P_{med} = 4.2191 * e^{0.0003 * H}$	0.83
Jul	$P_{med} = 8.4316 * \ln(H) - 50.743$	0.78
Ago	$P_{med} = 0.0090 * H - 2.3232$	0.81
Set	$P_{med} = 6.6077 * e^{0.0005 * H}$	0.93
Oct	$P_{med} = 8.4412 * e^{0.0006 * H}$	0.99
Nov	$P_{med} = 10.325 * e^{0.0006 * H}$	0.96
Dic	$P_{med} = 18.87 * e^{0.0005 * H}$	0.94

Nota. Elaboración propia.

Seguidamente se reemplazó la altura media en cada una de las ecuaciones, obteniéndose el siguiente resultado:

Tabla 66

Precipitación mensual de la subcuenca Shullcas

Mes	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Pp (mm)	254.3	298.2	203.9	69.2	51.7	15.3	19.8	36.4	56.8	111.7	136.6	162.3	1416.3

Nota. Elaboración propia.

ESTIMACION PRECIPITACION – METODO ISOYETAS

Las isoyetas son aquellas curvas que unen puntos que presentan igual valor precipitación. En el siguiente cuadro se detalla los resultados obtenidos:

Tabla 67

Cálculo de la precipitación de la subcuenca Shullcas

N°	Precipitación Mínima (mm)	Precipitación Máxima (mm)	T. Promedio (1)	Área (km2) (2)	(1)*(2)
1	667.00	700	683.50	6.23	4261.53
2	700	800	750.00	6.26	4697.23
3	800	900	850.00	3.56	3026.82
4	900	1000	950.00	5.15	4892.50
5	1000	1100	1050.00	10.34	10854.24
6	1100	1200	1150.00	24.87	28602.44
7	1200	1300	1250.00	37.24	46550.09
8	1300	1400	1350.00	59.06	79728.22
9	1400	1500	1450.00	37.76	54748.17
10	1500	1600	1550.00	5.23	8113.87
11	1600	1700	1650.00	4.19	6913.54
12	1700	1782.14	1741.07	3.13	5447.38
TOTAL				202.99	257836.02

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, la precipitación anual de la subcuenca Shullcas es:

$$Pp = \frac{257836.02}{202.99} = \mathbf{1269.96 \text{ mm}}$$

Para determinar la precipitación mensual, se utilizó los factores adimensionales de la estación shullcas, dicha variables fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$Fa = \frac{Pp \text{ Mensual}}{Pp \text{ Anual}}$$

A partir de la aplicación de la ecuación de los factores adimensionales, se tiene el siguiente cuadro.

Tabla 68*Factores adimensionales de la estación shullcas*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	171.1	165.6	133.4	51	23.5	5.9	18.3	25.1	39	88.9	84.1	131	936.9
Fa	0.18	0.18	0.14	0.05	0.03	0.01	0.02	0.03	0.04	0.09	0.09	0.14	1.00

Nota. Elaboración propia.**Tabla 69***Precipitación mensual de la subcuenca Shullcas - Método Isoyetas*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	231.9	224.5	180.8	69.13	31.85	8.00	24.81	34.02	52.9	120.5	114.0	177.6	1269.96

Nota. Elaboración propia.

METODOS POLÍGONOS DE THIESSEN

Según Villón (2002), este método requiere conocer la ubicación de las estaciones en la zona de estudio; ya que, para su aplicación es necesario conocer la influencia de cada una de las estaciones consideradas.

Para la aplicación de este método, fue necesario la creación de estaciones ficticias, las cuales fueron determinadas a partir de la ecuación regional hallada en las secciones anteriores, y se describen a continuación:

Tabla 70*Estaciones consideradas para el método polígonos de Thiessen*

Estación	Coordenadas UTM		Altura (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)
	Latitud	Longitud		
Shullcas	481 856.79	8 673 440.88	3750	941.5
P1	476 972.78	8 667 482.57	3279	861.11
P2	485 121.97	8 670 181.32	4314	1539.66
P3	487 622.28	8 677 285.40	4415	1605.87
P4	493 972.30	8 678 449.57	4580	1714.05
P5	494 048.20	8 683 318.24	5293	2181.49
P6	493 094.37	8 685 660.47	5358	2224.10
P9	496 687.59	8 663 073.94	4502	1662.91

Nota. Elaboración propia.

Mediante esta información se procedió a construir en el software ArcGIS los polígonos Thiessen; así mismo, se utilizó la tabla 69 que contiene los factores adimensionales de la estación Shullcas. A partir del procedimiento anteriormente mencionado, se obtuvo el siguiente resultado:

Tabla 71

Precipitación mensual - método polígonos Thiessen

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	284.3	275.68	222.1	84.90	39.12	9.82	30.46	41.78	64.92	149.9	140.0	218.1	1559.7

Nota. Elaboración propia.

Para el presente trabajo de investigación, se consideró como precipitación media mensual para la subcuenca Shullcas, al promedio de los valores encontrados por los tres métodos anteriormente descritos. En la siguiente tabla se detalla el resultado obtenido.

Tabla 72

Precipitación total mensual (mm) de la subcuenca Shullcas

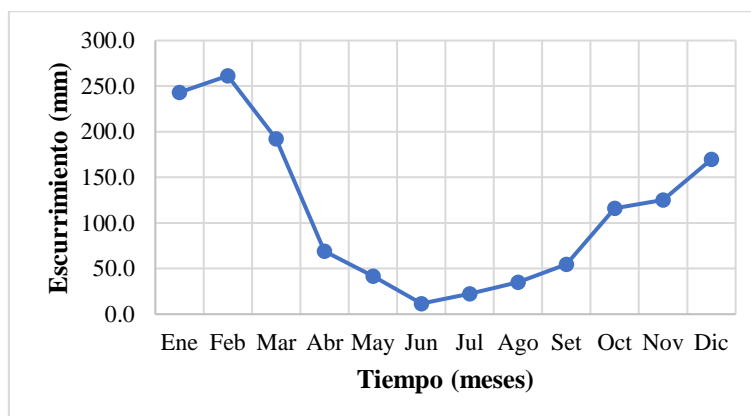
Mes	Ecuaciones Regionales	Isoyetas	Polígonos de Thiessen	Promedio
Ene	254.3	231.92	284.83	243.1
Feb	298.2	224.47	275.68	261.3
Mar	203.9	180.82	222.07	192.4
Abr	69.2	69.13	84.90	69.2
May	51.7	31.85	39.12	41.8
Jun	15.3	8.00	9.82	11.7
Jul	19.8	24.81	30.46	22.3
Ago	36.4	34.02	41.78	35.2
Set	56.8	52.86	64.92	54.9
Oct	111.7	120.50	147.99	116.1
Nov	136.6	114.00	140.00	125.3
Dic	162.3	177.57	218.08	169.9
Anual	1416.28	1269.96	1559.67	1343.12

Nota. Elaboración propia.

Del cuadro anteriormente presentado, se observa que la época de estiaje se encuentra en los meses de mayo, junio, julio y agosto, y que se apoya en la siguiente figura:

Figura 32

Tendencia de la precipitación mensual - subcuenca Shullcas



Nota. Elaboración propia.

4.3.1.3 Evapotranspiración (ETP). La evapotranspiración se define como la cantidad de agua que regresa a la atmósfera por evaporación del agua y por la transpiración de las plantas. Esta es en función de la temperatura, la radiación solar, la radiación atmosférica, la humedad del aire y la velocidad del viento. (SENAMHI, 2015)

Para el cálculo de la evapotranspiración de la subcuenca Shullcas se utilizó el método FAO Penman-Monteith, que utiliza información meteorológica como por ejemplo datos de radiación, temperatura del aire, humedad atmosférica y velocidad del viento; para ello, las estaciones meteorológicas consideradas son: Huayao, Ingenio, Jauja, Marcapomacocha, Pachachaca y Santa Ana.

Tabla 73

Estaciones consideradas para el cálculo de la ETP

Estación	C. Geográficas		Distrito	Altitud (m.s.n.m)
	Latitud	Longitud		
Huayao	12°02'00"	75°16'00"	Sicaya	3360
Ingenio	11°52'51"	75°17'16"	Santa Rosa de Ocopa	3422
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	Marcapomacocha	4479
Pachachaca	11°30'00"	75°55'00"	La Oroya	4084
Santa Ana	12°00'15"	75°13'15"	El Tambo	3302

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

El procedimiento y las variables para determinar la evapotranspiración de la zona de estudio se presenta en el anexo III; así mismo, el resultado obtenido para cada una de las estaciones seleccionadas se presenta en la sección antes mencionada.

De las expresiones anteriores, se presenta el cuadro resumen con la evapotranspiración obtenida para cada una de la estación consideradas.

Tabla 74

Evapotranspiración de las estaciones consideradas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Huayao	80.14	71.60	76.67	76.55	80.36	77.22	84.20	91.25	91.16	90.89	88.01	85.11
Ingenio	76.37	67.10	72.45	71.51	73.32	67.01	74.03	83.41	82.04	83.02	80.94	80.14
Marcapomacocha	62.31	52.95	58.63	60.50	63.79	59.84	62.44	71.09	71.36	68.95	69.01	64.99
Pachachaca	70.70	63.27	67.06	65.76	66.64	60.65	64.12	70.82	71.83	74.12	72.95	73.61
Santa Ana	81.08	70.05	77.20	78.09	80.70	76.25	87.06	94.18	90.94	88.02	89.73	85.17

Nota. Elaboración propia.

RELACION ALTITUD – EVAPOTRANSPIRACIÓN

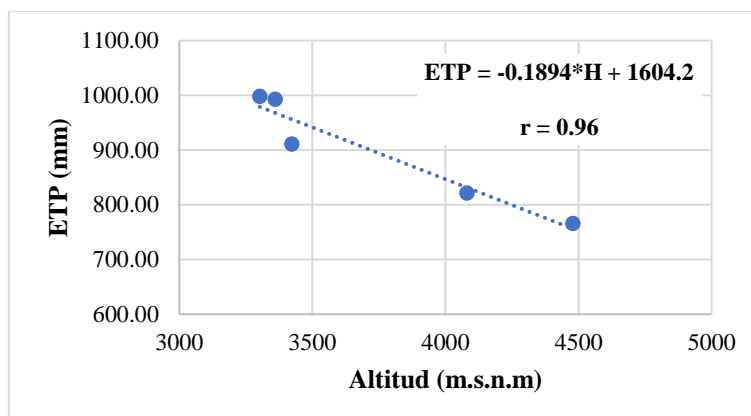
Para conocer el comportamiento de la evapotranspiración de la zona de estudio, se estableció una relación entre la altitud y la evapotranspiración de las estaciones consideradas.

Tabla 75

Estaciones consideradas para la relación Altitud – Evapotranspiración

Estación	Altitud (m.s.n.m)	ETP (mm)
Huayao	3360	993.17
Ingenio	3422	911.34
Marcapomacocha	4479	765.87
Pachachaca	4081	821.51
Santa Ana	3302	998.47

Nota. Elaboración propia.

Figura 33*Relación Altitud – Evapotranspiración*

Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se aprecia que existe una relación inversa entre la altitud y la evapotranspiración; es decir, a medida que aumenta la altura, la evapotranspiración disminuye. Así mismo, se encontró un coeficiente de correlación de 0.96, lo que indica una fuerte relación entre ambas variables.

Además, al reemplazar la altura media de la subcuenca Shullcas en la ecuación regional, se obtiene que la evapotranspiración anual para la zona de estudio es de **789.03** mm.

ESTIMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN

Para la estimación de la evapotranspiración, se utilizó el método de las isóneas de evaporación y se entiende como un conjunto de isóneas que presentan la misma evapotranspiración. Para determinar este parámetro se utilizó la ecuación de la figura 31, y los resultados se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 76*Cálculo de la evapotranspiración*

N°	ETP Mínima	ETP Máxima	Promedio (1)	Área (km2) (2)	(1)*(2)
1	593.61	600	596.80	0.57	338.56
2	600	650	625.00	5.73	3581.03
3	650	700	675.00	7.37	4973.38
4	700	750	725.00	65.57	47541.02
5	750	800	775.00	64.85	50258.30
6	800	850	825.00	32.83	27086.91
7	850	900	875.00	8.49	7427.11
8	900	950	925.00	5.28	4887.43
9	950	994.84	972.42	12.22	11880.11
TOTAL				202.91	157973.85

Nota. Elaboración propia.

Siendo la evapotranspiración anual para la subcuenca Shullcas:

$$ETP = \frac{157973.85}{202.91} = 778.54 \text{ mm.}$$

Para la investigación, se consideró como evapotranspiración al promedio de los resultados encontrados por ambos métodos (ecuaciones regionales y método de isolíneas de evaporación), siendo la evapotranspiración anual representativa para la subcuenca Shullcas de **783.79** mm.

Para determinar la evapotranspiración de cada mes, se utilizó los factores adimensionales de la estación ingenio, dicha variables fue calculada a partir de la siguiente ecuación:

$$Fa = \frac{ETP \text{ Mensual}}{ETP \text{ Anual}}$$

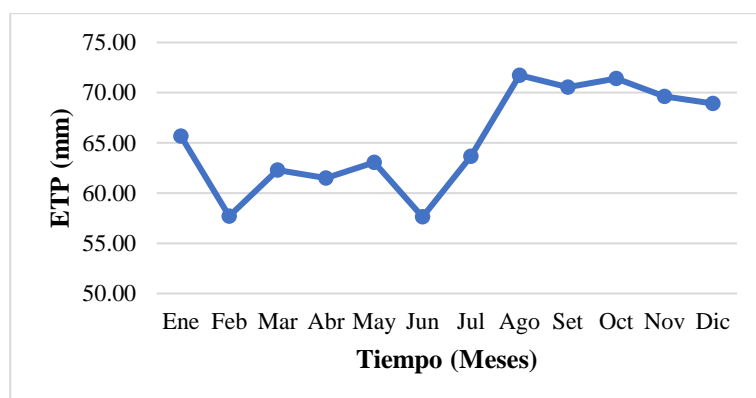
A partir de la aplicación de la ecuación de los factores adimensionales, se tiene el siguiente cuadro.

Tabla 77*Factores adimensionales de la estación Ingenio*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	76.37	67.10	72.45	71.51	73.32	67.01	74.03	83.41	82.04	83.02	80.94	80.14	911.34
Fa	0.08	0.07	0.08	0.08	0.08	0.07	0.08	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	1.00

Nota. Elaboración propia.**Tabla 78***Evapotranspiración mensual de la subcuenca Shullcas*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93	783.79

Nota. Elaboración propia.**Figura 34***Tendencia de la evapotranspiración mensual de la subcuenca Shullcas**Nota.* Elaboración propia.

4.3.1.4 Hidrometría. Es la parte de hidráulica que tiene por objeto medir el volumen de agua que pasa por unidad de tiempo por una sección transversal de un río o tubería. Además, se encarga de medir, registrar, calcular y analizar los volúmenes de agua que circulan una sección transversal, comprende también el planear, ejecutar y procesar la información que se registra de un sistema de riego (MIDAGRI, 2013).

Para la presente investigación se utilizó el registro histórico de la estación chamisería que comprende el periodo de 1985 – 2009, que se encuentran en la parte

intermedia de la zona de estudio, esta información fue obtenida del estudio “Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del Mantaro” en el año 2010.

Tabla 79

Ubicación de la estación chamiseria

Estación	Coordenadas UTM		Altitud (m.s.n.m)
	Latitud	Longitud	
Chamiseria	484 449	8 673 402	3602

Nota. Elaboración propia.

Tabla 80

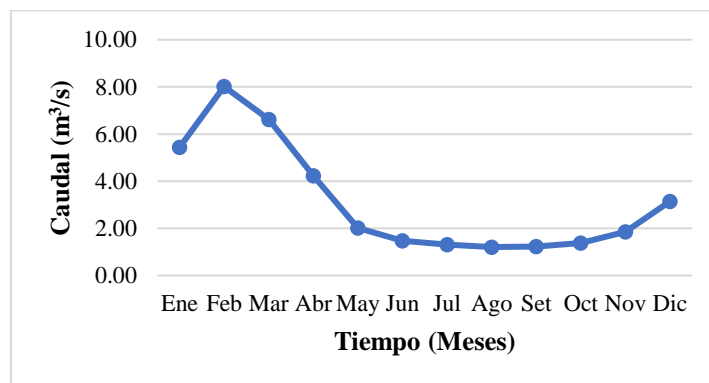
Caudal medio mensual de la estación chamiseria

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media
Q (m ³ /s)	5.44	8.02	6.62	4.23	2.02	1.47	1.31	1.21	1.23	1.37	1.86	3.15	3.16

Nota. Elaboración propia.

Figura 35

Tendencia del caudal medio anual de la estación chamiseria



Nota. Elaboración propia.

La estación chamiseria presenta un área colectora de 141.28 km², lo que representa el 69.6% del área total de la subcuenca Shullcas, el registro histórico de la estación seleccionada se presenta en el anexo II.

Para la presente investigación será necesario determinar el escurrimiento de la zona de estudio, y para ello se utilizó la siguiente ecuación:

$$Es = \frac{Q \cdot t}{A} \quad \text{Ec. (31)}$$

Donde; “Es” es la escorrentía superficial, “Q” es el caudal (m³/s), “t” es el tiempo, y “A” es el area de la zona de estudio, a partir de la expresion anterior se presenta el siguiente cuadro:

Tabla 81

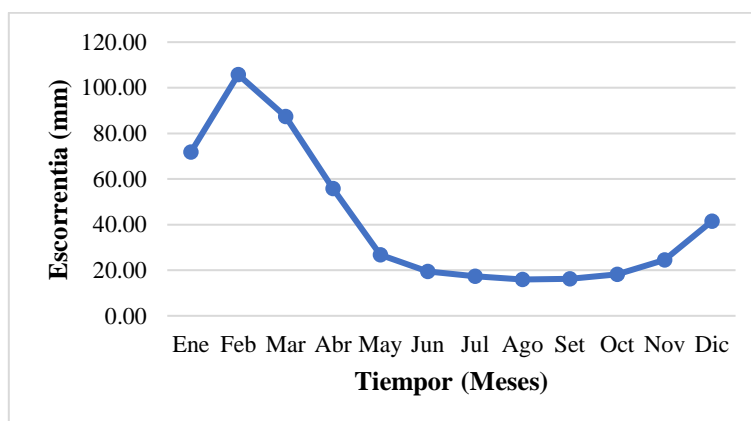
Escorrentía de la estación chamiseria

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
Esc. (mm)	86.2	126.9	104.8	66.9	32.0	23.3	20.7	19.1	19.4	21.7	29.4	49.8	600.5
	0	2	5	4	3	4	5	2	1	6	0	2	5

Nota. Elaboración propia.

Figura 36

Tendencia de la escorrentía de la estación chamiseria



Nota. Elaboración propia.

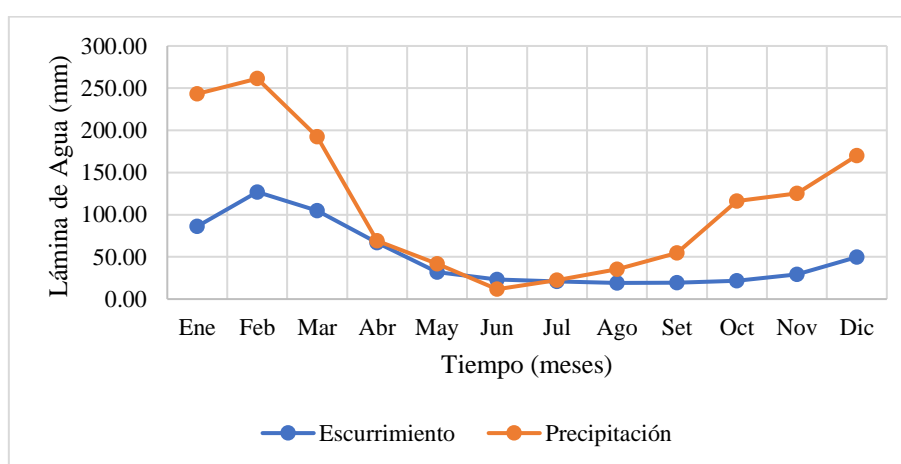
4.3.2 Aporte Hídrico – Glaciar

Para estimar el aporte hídrico glaciar en la subcuenca Shullcas; primeramente, se identificó la temporada seca, que está caracterizada por la poca presencia de precipitaciones y la demanda de agua no se encuentra satisfecha, permitiendo que los ríos y la vegetación de la zona se sequen. Por el contrario, la temporada de lluvias es aquella con abundancia de precipitaciones y que sobrepasan la demanda de la agricultura, y generan el aumento del caudal de los ríos.

La temporada seca de la subcuenca shullcas se determinó mediante la comparación de los datos de escurrimiento y precipitación, siendo los meses de junio y julio los que componen la época de estiaje. En estos meses los glaciares regulan, mantienen y alimentan al caudal en base al deshielo de la superficie glaciar ocasionado por el incremento de la temperatura del aire.

Figura 37

Época de estiaje en la subcuenca Shullcas



Nota. Elaboración propia.

Para determinar el aporte hídrico – glaciar de la subcuenca shullcas se utilizó cuatro métodos, los cuales se describen a continuación.

4.3.2.1 Caudales Mínimos. Para determinar esta variable se utilizó la tabla 104 – Anexo II que presenta el registro histórico del caudal medio mensual de la estación chamiseria del periodo 1985 – 2009; en ese sentido, se identificó los seis años más secos, los cuales son 1990 (2.15 m³/s), 1991 (1.98 m³/s), 1992 (1.72 m³/s), 2005 (2.03 m³/s), 2008 (m³/s) y el año 2009 (2.00 m³/s).

Seguidamente, se estimó el promedio de los caudales mínimos identificados de los años previamente seleccionados tal como se muestra en el siguiente cuadro.

Tabla 82*Años más secos de la estación chamisería*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
1990	4.61	2.09	1.89	1.89	1.30	1.29	1.16	1.03	0.92	1.86	4.67	3.04	2.15
1991	4.12	2.05	4.29	2.20	1.57	1.09	1.01	1.12	1.23	1.25	1.92	1.86	1.98
1992	1.92	3.12	2.56	4.06	1.39	1.19	1.14	1.12	1.08	1.05	1.00	1.06	1.72
2005	2.96	3.19	4.77	2.00	1.43	1.13	0.96	1.05	0.97	1.66	1.55	2.73	2.03
2008	6.93	5.03	4.06	1.67	1.07	0.97	1.04	1.04	1.03	1.13	1.17	1.36	2.21
2009	1.43	4.90	3.69	2.43	1.26	1.16	1.12	1.10	1.15	1.21	1.93	2.64	2.00

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

$$Q_{gl} = \frac{1.16 + 1.01 + 1.14 + 0.96 + 0.97 + 1.12}{6} = 1.06 \text{ m}^3/\text{s}$$

Siendo 1.06 m³/s el caudal de aporte glaciar para la subcuenca shullcas, debido a que los caudales mínimos identificados se encuentran en la época de estiaje; por lo tanto, se asume que el único aportante de agua para los ríos proviene del deshielo de los glaciares.

4.3.2.2 Caudal de Estiaje. Es aquel caudal de agua que presenta una corriente durante un periodo seco prolongado. En este caso se utilizó el registro histórico de la estación pluviométrica Shullcas (1965 – 2013) y la estación hidrométrica chamisería (1985 – 2009).

Este método consiste en determinar el promedio del caudal en la época de estiaje, donde se deberá escoger el año más seco; es decir, aquel año que presente el caudal más bajo del registro histórico de 1985 – 2009; así mismo, deberá presentar el registro de precipitación más bajo. De acuerdo a lo anteriormente mencionado se presentan los siguientes cuadros:

Tabla 83*Escorrentía media mensual del año más seco del periodo 1985 – 2009*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2005	39.1	38.0	62.9	25.5	18.9	14.4	12.7	13.9	12.4	21.9	19.8	36.0	315.5

Nota. Elaboración propia.

Tabla 84*Precipitación media mensual del año más seco del periodo 1985 – 2009*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2005	89.0	109.0	105.0	11.0	14.0	0.0	0.0	8.0	17.0	128.0	65.0	86.0	632.0

Nota. Elaboración propia.

El año 2005 es uno de los cuatro años más secos del periodo 1985 – 2009, con una escorrentía total anual de 315.5 mm; Así mismo, se seleccionó porque el mismo año presenta el menor valor de precipitación anual con un valor de 632.0 mm. En tal sentido, estos valores nos permiten tener una idea del aporte glaciar, debido a que, en los 4 meses de estiaje identificados se presenta una precipitación de 25.0 mm; además, de presentar una escorrentía de estiaje de 71.5 mm.

Tabla 85*Caudal medio mensual del año 2005*

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Total
2005	2.96	3.19	4.77	2.00	1.43	1.13	0.96	1.05	0.97	1.66	1.55	2.73	2.03

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{\text{estiaje}} = \frac{0.96 + 1.05}{2} = 1.05 \text{ m}^3/\text{s}$$

4.3.2.3 Curva de Duración. También llamada curva de persistencia, permanencia de caudales o curva de caudales clasificados, es una curva que indica el porcentaje del tiempo durante el cual los caudales han sido igualados o excedidos. Puede ser determinada para caudales diarios, mensuales, anuales, etc. (Villón Béjar, 2002).

Para determinar la curva de duración de la zona de estudio y analizar el aporte hídrico glaciar, en primer lugar, se determinó el promedio de los caudales de los meses de estiaje, que de acuerdo a la **figura 36** son los meses de junio y julio; seguidamente, se ordenó de mayor a menor y se le asignó un porcentaje de frecuencia de acuerdo a su número de orden.

Tabla 86*Frecuencias de caudales promedio de los meses de estiaje (m³/s)*

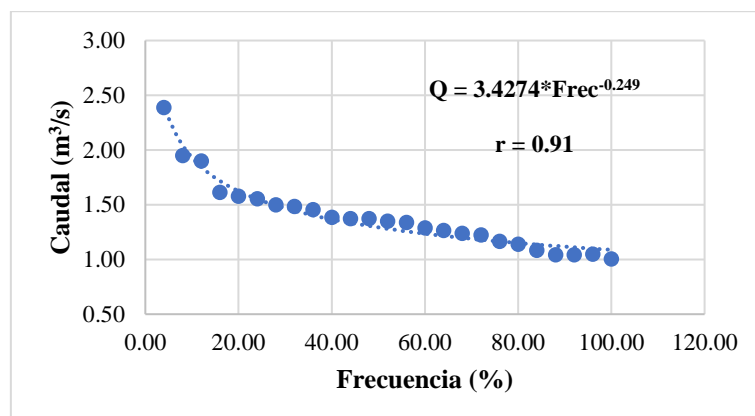
N°	P = n/m	P (%)	Jun	Jul	Media
1	0.04	4.00	2.43	2.35	2.39
2	0.08	8.00	2.46	1.44	1.95
3	0.12	12.00	1.96	1.84	1.90
4	0.16	16.00	1.71	1.52	1.62
5	0.20	20.00	1.76	1.40	1.58
6	0.24	24.00	1.54	1.57	1.56
7	0.28	28.00	1.60	1.40	1.50
8	0.32	32.00	1.63	1.34	1.49
9	0.36	36.00	1.66	1.25	1.46
10	0.40	40.00	1.67	1.10	1.39
11	0.44	44.00	1.50	1.25	1.38
12	0.48	48.00	1.16	1.59	1.38
13	0.52	52.00	1.42	1.28	1.35
14	0.56	56.00	1.35	1.33	1.34
15	0.60	60.00	1.24	1.34	1.29
16	0.64	64.00	1.27	1.26	1.27
17	0.68	68.00	1.36	1.12	1.24
18	0.72	72.00	1.29	1.16	1.23
19	0.76	76.00	1.19	1.14	1.17
20	0.80	80.00	1.16	1.12	1.14
21	0.84	84.00	1.11	1.06	1.09
22	0.88	88.00	1.13	0.96	1.05
23	0.92	92.00	1.20	0.89	1.05
24	0.96	96.00	1.09	1.01	1.05
25	1.00	100.00	0.97	1.04	1.01

Nota. Elaboración propia.

A partir de la relación de la frecuencia y el caudal promedio de se tiene la siguiente curva de duración:

Figura 38

Curva de duración del promedio de los caudales de los meses de estiaje (1985 – 2009)



Nota. Elaboración propia.

De la figura anterior se muestra que existe una relación inversa proporcional y que presenta un coeficiente de correlación de 0.91, lo que indica una asociación fuerte entre las dos variables. Así mismo, encontrada la ecuación de la curva de duración, se determinó el caudal al 99% obteniendo un valor de $1.09 \text{ m}^3/\text{s}$.

Tabla 87

Caudales generados a partir de las frecuencias del periodo (1985 – 2009)

P (%)	5	10	15	20	25	30	40	50	60	70	80	90	95	97	99
Q gener. (m³/s)	2.30	1.93	1.75	1.63	1.54	1.47	1.37	1.29	1.24	1.19	1.15	1.12	1.10	1.10	1.09

Nota. Elaboración propia.

4.3.2.4 Balance Hídrico. Se puede definir como el principio físico de conservación de masa a través del cual se evalúa la entrada y salida de agua a un sistema con la finalidad de poder conocer la disponibilidad de agua. El aporte de agua al sistema puede estar constituido por escorrentía de ingreso, rocío, precipitación y aplicación de riego, mientras que la salida del sistema puede ocurrir por escorrentía de salida, infiltración y evapotranspiración.

La subcuenca shullcas es una zona montañosa y además tiene una pendiente elevada, que de acuerdo a la tabla 16 presenta una geografía empinada; por lo tanto, no se consideró a la infiltración porque a mayor pendiente menor capacidad de infiltración.

Para determinar el balance hídrico en la zona de estudio, se utilizó la siguiente expresión:

$$Esc. gl = Esc - Pp + ETP \quad \text{Ec. (32)}$$

Donde, “Esc. gl” es la escorrentía del glaciar de la subcuenca shullcas, “Esc” es la escorrentía de la zona de estudio, “Pp” es la precipitación, y “ETP” es la evapotranspiración.

Para calcular el caudal (m³/s) proveniente del glaciar, se consideró como área total a la de los nevados considerados en el presente estudio.

Tabla 88

Promedio del área glaciar de la subcuenca shullcas

Años	Área (Km²)
1990	6.02
1994	5.37
1999	5.16
2004	4.69
2009	4.58
2014	4.19
2020	3.84
Promedio	4.84

Nota. Elaboración propia.

Utilizando los datos de evapotranspiración, escorrentía, precipitación, que fueron determinadas previamente en las secciones anteriores, se presenta el siguiente cuadro con el balance hídrico realizado:

Tabla 89

Balance hídrico glaciar de la subcuenca del río shullcas

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Días	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
PP (mm)	243.12	261.32	192.37	69.18	41.77	11.67	22.31	35.22	54.85	116.08	125.29	169.94
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	86.20	126.92	104.85	66.94	32.03	23.34	20.75	19.12	19.41	21.76	29.40	49.82
E. Glaciar (mm)	-91.23	-76.69	-25.22	59.27	53.31	69.30	62.11	55.64	35.11	-22.92	-26.28	-51.19
Q. Glaciar (m ³ /s)	-0.165	-0.138	-0.046	0.111	0.096	0.129	0.112	0.100	0.066	-0.043	-0.049	-0.096

Nota. Elaboración propia.

Por lo tanto, se determina el caudal del glaciar mediante el promedio de los caudales de los meses de estiaje:

$$Q_{gl} = \frac{0.129 + 0.112}{2} = 0.12 \text{ m}^3/\text{s}$$

Para la presente investigación, se consideró como caudal del glaciar al promedio de los valores obtenidos por los cuatro métodos, siendo el valor final encontrado de 0.83 m³/s, este valor representa el 25.9% del caudal promedio anual registrado en la estación chamiseria.

4.3.3 Escenarios futuros de la cobertura glaciar, reserva hídrica y aporte hídrico glaciar

4.3.3.1 Cobertura y Volumen Glaciar. Para determinar los escenarios futuros de la cobertura glaciar y la reserva hídrica de la subcuenca shullcas se utilizó la siguiente expresión:

$$N = N_0 * (1 + r)^t$$

Donde, “N” es la superficie glaciar en el tiempo 1, “N₀” es la superficie glaciar en el tiempo 0, “t” es la diferencia del tiempo en años, y “r” es la tasa de cambio.

Para el caso del valor de la tasa de cambio y retroceso glaciar, se utilizarán aquellos valores obtenidos en las secciones anteriores, lo cuales se muestran a continuación:

- Tasa de cambio de la cobertura glaciar: -1.53%
- Tasa de cambio del volumen glaciar: -2.01%

De lo anterior, se tiene que la cobertura glaciar de la subcuenca shullcas para el año 1991 es:

$$Agl_{1991} = 6.02 * (-0.0153 + 1)^1$$

$$Agl_{1991} = 5.93 \text{ Km}^2$$

De igual manera, se determina la reserva hídrica para el año 1991 utilizando la misma ecuación y su correspondiente tasa de cambio, obteniendo el siguiente valor:

$$Vgl_{1991} = 181.95 * (-0.0201 + 1)^1$$

$$Vgl_{1991} = 178.28 * 10^6 \text{ m}^3$$

Este procedimiento se aplicará para estimar las áreas de cobertura glaciar y la reserva hídrica de los siguientes años, los resultados obtenidos se muestran en el siguiente cuadro:

Tabla 90

Escenario futuro de la cobertura glaciar y la reserva hídrica

Año	Área Glaciar (km²)	Volumen Glaciar (106*m3)	Año	Área Glaciar (km²)	Volumen Glaciar (10⁶*m³)
1990	6.02	181.95	2007	4.63	128.74
1991	5.93	178.28	2008	4.56	126.14
1992	5.84	174.69	2009	4.49	123.60
1993	5.75	171.17	2010	4.42	121.11
1994	5.66	167.73	2011	4.35	118.67
1995	5.57	164.35	2012	4.29	116.28
1996	5.49	161.04	2013	4.22	113.94
1997	5.40	157.79	2014	4.15	111.64
1998	5.32	154.61	2015	4.09	109.40
1999	5.24	151.50	2016	4.03	107.19
2000	5.16	148.45	2017	3.97	105.03
2001	5.08	145.46	2018	3.91	102.92
2002	5.00	142.53	2019	3.85	100.84
2003	4.92	139.65	2020	3.79	98.81
2004	4.85	136.84	2030	3.24	80.62
2005	4.77	134.08	2040	2.78	65.77
2006	4.70	131.38	2050	2.38	53.66
Pérdida				3.64	128.29
% Pérdida				60.43	70.51

Nota. Elaboración propia.

Del cuadro se aprecia que el área glaciar sufre una reducción de 3.64 km² desde el año 1990 hasta el año 2050, lo que representa una pérdida del 60.43%; así mismo, para la reserva hídrica existe una pérdida del 128.29*10⁶ m³ de volumen glaciar desde el año 1990 hasta el año 2050; es decir, se estima una pérdida del 70.51% de la reserva hídrica glaciar.

4.3.3.2 Aporte Hídrico – Glaciar. Para estimar los posibles registros de los próximos años del aporte hídrico de la cobertura glaciar en la subcuenca shullcas, se realizó un balance hídrico de los años seleccionados para encontrar las áreas glaciares; por otra parte, se utilizó los valores de la evapotranspiración determinada previamente como valores únicos para todos los años de análisis.

A. INFORMACION PLUVIOMETRICA

Al contar con el registro histórico de la estación shullcas (1965 – 2013); que es una estación pluviométrica ubicada dentro de la zona de estudio obtenida del informe final “Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Mantaro” realizado por la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en el año 2015, se utilizó la data histórica para para realizar el balance hídrico de los años considerados en el cálculo de la cobertura glaciar para el periodo 1990 – 2020.

B. INFORMACIÓN DE LA EVAPOTRANSPIRACION MEDIA MENSUAL

Al no contar con un registro histórico de la evapotranspiración, y tampoco con estaciones que cuenten con registro histórico que sirvan de apoyo, se utilizó la evapotranspiración de la subcuenca shullcas determinada previamente como único valor para los diferentes años de análisis del balance hídrico (ver **Tabla 81**).

C. INFORMACION DE LA ESCORRENTIA MENSUAL

La zona de estudio de la presente investigación, cuenta con una estación hidrométrica con un registro histórico del caudal medio mensual (m^3/s) que abarca el periodo 1985 – 2009 (ver **Tabla 104**). A partir de esta información se puede obtener la escorrentía mensual de los diferentes años para el cálculo del balance hídrico.

D. BALANCE HÍDRICO

Una vez determinado los parámetros requeridos para el balance hídrico de los diferentes años seleccionados, se procede a utilizar la siguiente expresión:

$$Esc. gl = Es - Pp + ETP$$

Donde, “Esc gl” es la escorrentía glaciar de la subcuenca shullcas, “Es” es la lámina de agua superficial de la subcuenca shullcas, “Pp” es la precipitación, “ETP” es la evapotranspiración.

Para el cálculo de la escorrentía de la subcuenca shullcas, se utilizó el área de la superficie glaciar encontrada de lo diferentes años:

Tabla 91

Área de la cobertura glaciar periodo 1990 – 2020

Años	Área (km ²)	Área Media (km ²)
1990	6.02	5.97
1991	5.93	
1994	5.66	5.62
1995	5.57	
1999	5.24	5.20
2000	5.16	
2004	4.85	4.81
2005	4.77	
2009	4.49	4.45
2010	4.42	
2014	4.15	4.12
2015	4.09	
2020	3.79	3.76
2021	3.73	

Nota. Elaboración propia.

En los siguientes cuadros, se muestran los resultados del balance hídrico aplicado para los diferentes años:

Tabla 92*Balance hídrico del año 1990*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
PP (mm)	198.00	252.00	157.00	86.00	22.00	1.00	10.00	11.00	28.00	61.00	105.00	159.00
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	60.83	24.91	24.94	24.13	17.15	16.47	15.31	13.59	11.75	24.54	59.63	40.11
E. Glaciar (mm)	-71.49	-169.4	-69.76	-0.37	58.21	73.10	68.97	74.33	54.30	34.94	24.24	-49.96
Q. Glaciar (m ³ /s)	-0.16	-0.38	-0.16	0.00	0.13	0.16	0.15	0.17	0.12	0.08	0.05	-0.11

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{gl} = \frac{0.16 + 0.15}{2} = 0.159 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 93*Balance hídrico del año 1994*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
PP (mm)	279.0	218.0	214.0	48.0	25.0	5.0	0.0	26.0	25.0	47.0	72.0	107.0
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	85.24	148.85	135.24	103.04	44.07	20.43	18.47	16.36	14.05	17.15	15.71	26.92
E. Glaciar (mm)	-128.1	-11.44	-16.45	116.55	82.13	73.06	82.14	62.10	59.60	41.55	13.32	-11.16
Q. Glaciar (m ³ /s)	-0.28	-0.02	-0.04	0.25	0.18	0.16	0.18	0.14	0.13	0.09	0.03	-0.02

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{gl} = \frac{0.18 + 0.16}{2} = 0.169 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 94*Balance hídrico del año 1999*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
PP (mm)	125.00	209.00	153.00	31.00	22.00	23.00	14.00	0.00	64.00	80.00	84.00	106.00
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	67.56	136.46	126.14	56.31	25.07	25.03	24.28	20.85	19.66	27.97	16.47	36.55
E. Glaciar (mm)	8.24	-14.83	35.45	86.81	66.13	59.65	73.95	92.59	26.22	19.37	2.09	-0.53
Q. Glaciar (m ³ /s)	0.02	-0.03	0.07	0.18	0.13	0.12	0.15	0.19	0.05	0.04	0.00	0.00

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{gl} = \frac{0.13 + 0.15}{2} = 0.142 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 95*Balance hídrico del año 2004*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
PP (mm)	52.00	164.00	102.00	40.00	23.00	13.00	18.00	19.00	51.00	92.00	104.00	179.00
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	41.43	82.47	59.77	32.43	25.99	22.47	18.47	14.25	15.71	16.23	24.13	67.82
E. Glaciar (mm)	55.11	-23.82	20.08	53.93	66.05	67.10	64.14	66.99	35.26	-4.37	-10.25	-42.25
Q. Glaciar (m ³ /s)	0.10	-0.05	0.04	0.10	0.13	0.13	0.12	0.13	0.07	-0.01	-0.02	-0.08

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{gl} = \frac{0.13 + 0.13}{2} = 0.126 \text{ m}^3/\text{s}$$

Tabla 96*Balance hídrico del año 2009*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
PP (mm)	97.00	179.00	143.00	46.00	26.00	23.00	9.00	35.00	48.00	63.00	99.00	169.00
ETP (mm)	65.68	57.71	62.31	61.50	63.06	57.63	63.67	71.74	70.56	71.40	69.61	68.93
Escorrentía (mm)	18.87	58.40	48.69	31.03	16.63	14.81	14.78	14.51	14.68	15.97	24.64	34.83
E. Glaciar (mm)	-12.45	-62.89	-32.01	46.53	53.68	49.44	69.45	51.25	37.24	24.36	-4.74	-65.24
Q. Glaciar (m ³ /s)	-0.02	-0.11	-0.06	0.08	0.09	0.09	0.12	0.09	0.07	0.04	-0.01	-0.12

Nota. Elaboración propia.

$$Q_{gl} = \frac{0.09 + 0.12}{2} = 0.109 \text{ m}^3/\text{s}$$

En los cuadros anteriormente presentados; donde se detalla los datos utilizados para realizar un balance hídrico simple y obtener el aporte hídrico del glaciar de la zona de estudio, se seleccionaron los caudales de mayor valor encontrados en los meses de estiaje, calculándose el promedio; y de tal manera, obtener el caudal aportado a partir del deshielo del glaciar en la subcuenca shullcas. Por tanto, se presenta el siguiente cuadro resumen:

Tabla 97

Cuadro resumen del balance hídrico del periodo 1990 – 2009

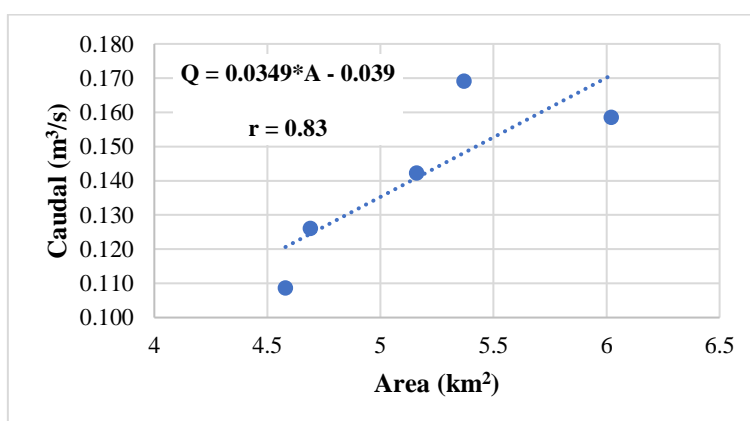
Años	Q (m ³ /s)	Área (Km ²)
1990	0.159	6.02
1994	0.169	5.37
1999	0.142	5.16
2004	0.126	4.69
2009	0.109	4.58
Promedio	0.141	5.164

Nota. Elaboración propia.

Del cuadro anterior, se realizó una relación entre el caudal del glaciar y el área de la cobertura glaciar, obteniendo la siguiente figura:

Figura 39

Relación caudal del glaciar (m³/s) - área glaciar (km²)



Nota. Elaboración propia.

Tabla 98

Caudales generados de la subcuenca shullcas

Año	Área (km ²)	Caudal (m ³ /s)	Caudal G. (m ³ /s)	Error (%)
1990	6.02	0.159	0.172	8.70
1994	5.37	0.169	0.148	-12.35
1999	5.16	0.142	0.141	-1.27
2004	4.69	0.126	0.123	-2.37
2009	4.58	0.109	0.119	9.52
Promedio	5.164	0.141	0.141	0.44

Nota. Elaboración propia.

En la figura 39, se aprecia que existe una relación directa entre ambas variables; es decir, a mayor área glaciar mayor será el aporte hídrico glaciar y viceversa; así mismo, se determinó un coeficiente de correlación de 0.83. Además, los caudales generados a partir de la ecuación obtenida de la relación área – caudal de la figura 39 presentan un error máximo de -12.35%, y un error medio del 0.44%.

Por lo tanto, a partir de la ecuación de correlación obtenida se determinaron los caudales para los diferentes años, siendo la variable independiente el área glaciar obtenida con la tasa de cambio anual. En el siguiente cuadro se muestran los siguientes resultados:

Tabla 99*Escenarios futuros del aporte hídrico glaciar*

Año	Área Glaciar (km²)	A. Glaciar Media (km²)	Q. Glaciar (m³/s)	R. Hídrico (lt/s*km²)
1990	6.02	5.98	0.171	28.42
1991	5.94	5.89	0.168	28.33
1992	5.85	5.81	0.165	28.24
1993	5.77	5.73	0.162	28.14
1994	5.69	5.65	0.160	28.05
1995	5.61	5.57	0.157	27.95
1996	5.53	5.49	0.154	27.85
1997	5.46	5.42	0.151	27.75
1998	5.38	5.34	0.149	27.65
1999	5.30	5.27	0.146	27.55
2000	5.23	5.19	0.144	27.44
2001	5.16	5.12	0.141	27.34
2002	5.09	5.05	0.138	27.23
2003	5.01	4.98	0.136	27.12
2004	4.94	4.91	0.134	27.01
2005	4.88	4.84	0.131	26.90
2006	4.81	4.77	0.129	26.79
2007	4.74	4.71	0.126	26.67
2008	4.67	4.64	0.124	26.56
2009	4.61	4.58	0.122	26.44
2010	4.54	4.51	0.120	26.32
2011	4.48	4.45	0.117	26.20
2012	4.42	4.39	0.115	26.07
2013	4.36	4.33	0.113	25.95
2014	4.30	4.27	0.111	25.82
2015	4.24	4.21	0.109	25.69
2016	4.18	4.15	0.107	25.56
2017	4.12	4.09	0.105	25.43
2018	4.06	4.03	0.103	25.30
2019	4.00	3.98	0.101	25.16
2020	3.95	3.76	0.099	25.02
2030	3.43	3.22	0.081	23.53
2040	2.98	2.76	0.065	21.82
2050	2.59	2.37	0.051	19.84
Pérdida	3.43	3.61	0.120	8.58
(%) Perdida	56.97	60.43	69.96	30.18

Nota. Elaboración propia.

Del cuadro anterior, se aprecia una reducción de 0.120 m³/s de aporte hídrico de la superficie glaciar en la subcuenca shullcas desde el año 1990 hasta el año 2050, que

representa una pérdida del 69.96%; así mismo, para el rendimiento hídrico se observa una pérdida de 8.58 lt/s*km^2 para el periodo de 1990 – 2050, lo que representa una reducción del 30.18% con respecto al año 1990.

V. DISCUSION Y ANALISIS

En la evaluación del área glaciar de la zona de estudio durante el periodo comprendido entre los años 1990 – 2020, se encontró una pérdida del 36.21% de su cobertura glaciar, valor diferente al encontrado por Zubieta & Lagos (2010) que es de 57.4% para la cordillera Huaytapallana, siendo una de las razones principales la diferencia de área glaciar analizada; debido a que, la cordillera Huaytapallana presenta un área glaciar de 17.1 Km² para el año 2006 (periodo de análisis comprendido entre 1976 – 2006); mientras tanto, la subcuenca shullcas presenta un área glaciar de 3.84 km² para el año 2020.

Por otro lado, en la subcuenca shullcas se determinó una tasa de cambio de -1.53% y -2.01% para la superficie y volumen glaciar respectivamente. A diferencia del estudio realizado por Inoue (2018) en la subcuenca blanco de la cordillera blanca, donde determina que la tasa de cambio fue de -0.93% y -1.33% para el área y volumen glaciar respectivamente. Esta diferencia se debería a la presencia de mayor superficie glaciar en la subcuenca blanco a comparación del área glaciar presente en la subcuenca shullcas; así mismo, la subcuenca blanco ubicado en la cordillera blanca cuenta con una mayor superficie de lagunas, lo que ocasionaría una mayor evaporación y por lo tanto una mayor precipitación.

Y, por último, el caudal del glaciar determinado en el presenta trabajo de investigación fue de 0.83 m³/s, comparado con el estudio de Baldera (2015) que determinó un caudal de 1.6 m³/s para la subcuenca Llullán. Esta diferencia se debería al área glaciar que presenta cada zona de estudio, y como se vio en los resultados, el área glaciar tiene una relación muy directa con el caudal que proviene del deshielo de los glaciares.

VI. CONCLUSIONES

- El área glaciar de la subcuenca shullcas presenta una tasa de retroceso glaciar de $-0.067 \text{ km}^2/\text{año}$ y una tasa de cambio de -1.53% ; así mismo, al establecer una relación entre la superficie glaciar y el caudal del aporte glaciar obtenido mediante el balance hídrico, se encontró un coeficiente de correlación de 0.83; es decir, existe una fuerte asociación entre ambas variables, de manera que, a mayor superficie glaciar mayor será el aporte por deshielo glaciar y viceversa. Por otro lado, se determinó un aporte hídrico de $0.83 \text{ m}^3/\text{s}$, obtenido mediante el promedio de los siguientes métodos: caudales mínimos, caudal de estiaje, curva de duración y balance hídrico; siendo así, que el resultado obtenido representa el 25.9% del caudal registrado por la estación hidrométrica chamisería.
- Mediante la aplicación de las técnicas de teledetección, la superficie glaciar de la subcuenca shullcas presenta una pérdida de 2.18 km^2 que representa el 36.21% con respecto al área encontrada en el año 1990.
- Se determinó que la subcuenca shullcas presenta una temperatura media anual de 5.68°C , una evapotranspiración anual de 783.79 mm , se determinó una precipitación anual de 1343.12 mm mediante la aplicación de tres metodologías la cuales son: ecuaciones regionales, isoyetas y polígonos de Thiessen; así mismo, se consideró al registro histórico de la estación hidrométrica de la estación chamisería (1985 – 2009), como representativa para la zona de estudio al encontrarse dentro de la misma; de manera que, el caudal medio para la subcuenca shullcas es de $3.16 \text{ m}^3/\text{s}$.
- Para los posibles escenarios futuros de la superficie glaciar en la subcuenca Shullcas se encontró una reducción de 3.43 km^2 de cobertura glaciar desde el año 1990 al 2050 lo que representa una pérdida del 56.97% de área glaciar. En cuanto al aporte hídrico glaciar, se determinó una tendencia evolutiva en base al balance hídrico realizado para

los años seleccionados en el trabajo de investigación, encontrándose una pérdida de 0.12 m³/s de aporte hídrico glaciar desde el año 1990 al 2050, que representa una pérdida del 69.96%.

VII. RECOMENDACIONES

- ❖ Es necesario realizar mediciones in situ del espesor de la superficie glaciar en la subcuenca shullcas con la finalidad de cuantificar el error del método empírico aplicado en el presente trabajo de investigación, permitiendo un mejor control de los errores en la estimación de la reserva hídrica.
- ❖ Es necesario el mantenimiento constante de la estación shullcas, con la finalidad obtener un registro histórico del caudal actualizado, lo que permitirá realizar estudios e investigaciones para la adecuada gestión de los recursos hídricos y la implementación de estrategias de acuerdo a las características hidrometeorológicas de la zona; así mismo, facilitará el estudio del aporte hídrico del nevado ubicado dentro de la subcuenca shullcas.
- ❖ Mantenimiento constante de las estaciones meteorológicas, que contemplen la medición de la temperatura, precipitación, humedad relativa, etc., con la finalidad de contar con información actualizada y completa, permitiendo disminuir los errores en el análisis hidrometeorológico y el aporte hídrico glaciar de la zona de estudio.
- ❖ Se debe realizar un monitoreo constante de la superficie glaciar con la finalidad de determinar el aporte hídrico glaciar, por lo que el estado debe promover y facilitar tal actividad, brindando el equipo necesario a las autoridades responsables; así mismo, establecer acuerdos de mutua cooperación con organizaciones privadas nacionales e internacionales.
- ❖ Se debe promover estudios y/o investigaciones referentes a la emisión de gases de efecto invernadero en la ciudad de Huancayo y analizar su impacto en el retroceso glaciar, con la finalidad de que las autoridades adopten las medidas necesarias.

VIII. REFERENCIAS

- Administración Local de Agua Mantaro. (2010). *Evaluación de recursos hídricos superficiales en la cuenca del mantaro*. Huancayo, Junín.
- Aguilar Arias, H., Mora Zamora, R., & Vargas Bolaños, C. (2014). Metodología para la Corrección Atmosférica de Imágenes ASTER, RAPIDEYE, SPOT 2 y LANDSAT 8 con el Módulo FLAASH del Software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, 2(53), 39 - 59. Obtenido de <https://www.revistas.una.ac.cr/index.php/geografica/article/view/6609>
- Alvarez, E. (2006). *Inventario Físico de los Recursos Minerales del Municipio Tierra Nueva, San Luis de Potosí*. Obtenido de https://mapserver.sgm.gob.mx/InformesTecnicos/InventariosMinerosWeb/T2406AASE0001_01.pdf
- Ambrosio, G., Gonzáles, J., & Arévalo, V. (2002). Corrección radiométrica y geométrica de imágenes para la detección de cambios en una serie temporal. *Trabajo presentado en la Conferencia: X Congreso de Métodos Cuantitativos, Sistemas de Información Geográfica y Teledetección en la Universidad de Málaga*. España. Obtenido de <http://mapir.isa.uma.es/varevalo/drafts/ambrosio2002crg.pdf>
- ANA. (2014). *Inventario de glaciares del Perú (2da actualización)*.
- Apaella Nalvarte, R. (2010). *Estudio de máximas avenidas en las cuencas de la zona centro de la vertiente del pacífico*. Lima. Obtenido de <https://repositorio.ana.gob.pe/bitstream/handle/20.500.12543/796/ANA0000602.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Arroyo Aliaga, J., & Gurmendi Párraga, P. (2011). Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay y Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. *Apuntes de*

Ciencia & Sociedad, 1(2), 141 - 150. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=5042974>

Arroyo Aliaga, J., Gurmendi Párraga, P., & Machuca Enrique, E. (2015). Efectos de las anomalías climáticas en la cobertura de nieve de los glaciares centrales del Perú. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 5(1), 146 - 156. Obtenido de <http://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/310>

Arroyo Aliaga, J., Schulz, N., & Gurmendi Párraga, P. (2012). Impactos de las actividades antrópicas en el nevado Huaytapallana. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 2(1), 3 - 14. Obtenido de <http://journals.continental.edu.pe/index.php/apuntes/article/view/41/40>

Autoridad Nacional del Agua. (2015). *Evaluación de Recursos Hídricos en la Cuenca de Mantaro*. Obtenido de <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/36>

Baldera Santisteban, J. A. (2015). *Análisis de la variación de la cobertura glaciar y su influencia en el aporte hídrico de la subcuenca Llullan - Río Santa* [Tesis para optar el título profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio Institucional.

Barboza Lizano, Ó. (2013). CALENTAMIENTO GLOBAL : “LA MÁXIMA EXPRESIÓN DE LA CIVILIZACIÓN PETROFÓSIL ”. *Revista del CESLA*(16), 35 - 68. Obtenido de <https://www.redalyc.org/pdf/2433/243329724003.pdf>

Barco, D., & Vargas, P. (2010). El cambio climático y sus efectos en el Perú. *Revista Moneda*, 25 - 29. Obtenido de <https://www.bcrp.gob.pe/docs/Publicaciones/Revista-Moneda/Moneda-143/Moneda-143-05.pdf>

Bergmann, J., K. Vinke, C. A., Fernández Palomino, C., C. Gornott, S., R. Laudien, A., Lobanova, J., . . . H.J. Schellnhuber. (2021). *Evaluación de la evidencia: Cambio*

climático y migración en el Perú. Instituto Potsdam para la Investigación sobre el Impacto del Cambio y Organización Internacional para las Migraciones (OIM).

Bravo Morales, N. F. (2017). *Teledetección espacial LANDSAT, SENTINEL 2, ASTER LIT y MODIS*. GEOMÁTICA AMBIENTAL S.R.L. Obtenido de https://acolita.com/wp-content/uploads/2018/01/Teledeteccion_espacial_ArcGeek.pdf

Bulege-Gutiérrez, W., & Custodio, M. (2020). Cambio climático y retroceso glaciar en la cordillera Huaytapallana. *Teconología y Ciencias del Agua*, 11(2), 229 - 261. Obtenido de <http://www.revistatyca.org.mx/ojs/index.php/tyca/article/view/1406/1716>

Caballero, M., Lozano, S., & Ortega, B. (2007). Efecto invernadero, calentamiento global y cambio climático: Una perspectiva desde las ciencias de la tierra. *Revista Digital Universitaria*, 8(10), 1 - 12. Obtenido de https://www.revista.unam.mx/vol.8/num10/art78/oct_art78.pdf

Cachorro Revilla, V. E. (2008). *LA RADIACIÓN SOLAR EN EL SISTEMA TIERRA-ATMÓSFERA*. UNIVERSIDAD DE VALLADOLID.

Camino, M. A., Bó, M. J., Cionchi, J. L., Del Río, J. L., López de Armendia, A., & De Marco, S. G. (2018). Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires. *Revista Universitaria de Geografía*, 27(1), 1 - 19. Obtenido de <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=383257036005>

Casal, G., & Freire, J. (2012). Síntesis de la evolución histórica de la teledetección en España (1889-2012). *Revista de teledetección: Revista de la Asociación Española de Teledetección*(38), 109 - 120. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7391724>

- CEPSA. (Noviembre de 2015). *CEPSA*. Obtenido de El Cambio Climático y los Gases de Efecto Invernadero (GEI) en CEPSA: https://www.cepsa.com/stfls/CepsaCom/Coorp_Comp/Medio%20Ambiente_Seguridad_Calidad/Art%C3%ADculos/Dossier-Cambio-Climatico-y-GEI.pdf
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. EDICIONES RIALP S.A.
- Cigarán, M. P., & García, J. (2006). Cambio climático en el Perú: variable a considerar para el desarrollo sostenible. *Tecnología & Sociedad*(7), 55 - 68. Obtenido de <http://bvpad.indeci.gob.pe/download/TyS7.pdf#page=55>
- Codom, T., SCart, J. E., Rabatel, A., Mourre, L., Cochachin, A., Santillán, N., . . . Villacis, M. (20 de Noviembre de 2018). *OpenEdition Books*. Obtenido de El Perú frente al cambio climático: Resultado de investigaciones franco-peruanas: <https://books.openedition.org/irdeditions/19580?lang=es>
- Comunidad Andina. (2007). *¿El fin de las cumbres nevadas? Glaciares y Cambio Climático en la Comunidad Andina*. Obtenido de Comunidad Andina: http://www.comunidadandina.org/StaticFiles/OtrosTemas/MedioAmbiente/libro_fin_cumbres_nevadas.pdf
- Constantini, A., Perez, G. M., González, F., Consentino, V., Romaniuk, R., & Taboada, M. A. (2018). Emisiones de Gases de Efecto Invernadero en la Producción Ganadera. *CIENCIA E INVESTIGACIÓN*, 68(5), 47 - 54. Obtenido de <http://aargentinapciencias.org/wp-content/uploads/2018/11/4-Costantini-cei68-5-5.pdf>
- Di Bella, C. M., Posse, G., Beget, M. E., Fischer, M. A., & Veron, S. (2008). La teledetección como herramienta para la prevención, seguimiento y evaluación de incendios e inundaciones. *ecosistemas*, 17(3), 39-52. Obtenido de <https://www.revistaecosistemas.net/index.php/ecosistemas/article/view/85>

- Díaz González, F. A., Quientero Torres, S. V., Triana Correa, J. S., & Morón Hernández, D. C. (2014). *APROXIMACIÓN A LOS SISTEMAS DE PERCEPCIÓN REMOTA EN SATÉLITES PEQUEÑOS*. Digiprint.
- Echegaray Cristobal, D. Z. (2015). *Efecto de la cobertura vegetal nativa sobre la desglaciación del nevado Huaytapallana en diferentes altitudes* [Tesis para optar el grado de título profesional, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/3501>
- Estrada Porrúa, M. (2001). Cambio Climático Global: Causas y Consecuencias. *Revista de Información y Análisis*(16), 7 - 17. Obtenido de <https://www.ucipfg.com/Repositorio/MGTS/MGTS15/MGTSV15-02/SEMANA3/climatico.pdf>
- FAO. (2006). *Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos*. FAO. Obtenido de <https://www.fao.org/3/x0490s/x0490s.pdf>
- Gandía, S., & Meliá, J. (1991). *La Teledetección en el seguimiento de los fenomenos naturales. Recursos renovables: Agricultura*. UNIVERSIDAD DE VALENCIA.
- Gómez Crispín, W. J., & Paytan Quispe, J. C. (2018). *Estimación de los caudales medios naturalizados en la cuenca del río Ichu mediante el metodo de regionalización estadística* [Tesis para obtener el grado de título profesional, Univesidad Nacional de Huancavelica]. Repositorio Institucional.
- González Bernal, J. (2017). La percepción remota. *Noche de las Estrellas*, 1-2.
- Gutierrez Claverol, M. (1993). *COMPENDIO DE TELEDETECCIÓN GEOLÓGICA*. UNIVERSIDAD DE OVIEDO.

- INAIGEM. (2017). *Informe de la situación de los glaciares y ecosistemas de montaña del Perú*. INAIGEM.
- INAIGEM. (2018). *Informe de la situación de los glaciares y ecosistemas de montaña*. Huaraz: INAIGEM.
- INAIGEM. (2018). *Inventario Nacional de Glaciares: Las Cordilleras Glaciares del Perú*. Gráfica Publi Industria E.I.R.L.
- Inoue Velarde, J. H. (2018). *Evolución de la cobertura glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica de la subcuenca Blanco - Río Santa* [Tesis para optar el grado de título profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio institucional. Obtenido de <http://repositorio.unfv.edu.pe/handle/UNFV/2706>
- IPCC. (2019). *Calentamiento global de 1,5°C*.
- Jiménez Muñoz, J. C. (2005). *Corrección de Imágenes de Satélite*. Universidad de Valencia, Valencia. Obtenido de https://www.uv.es/sobrino/sobrino_files/courses/Curso-Teruel_Correcciones_2005.pdf
- Jiménez Muñoz, J. C., Sobrino, J. A., & Sòria, G. (2011). *Introducción al Procesamiento Digital de Imágenes de Satélite*. Universidad de Valencia, Valencia. Obtenido de https://www.uv.es/ucg/CURSO_TD4.pdf
- Jimeno Bula, A. (2009). Calentamiento global: verdades y especulaciones. *Dimensión Empresarial*, 7(2), 33 - 39. Obtenido de <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=3990330>
- Lascano, M. E., & Villalba, R. (2007). Algunas precisiones sobre el rol de los glaciares en el escurrimiento andino. *XXI Congreso Nacional del Agua*, (págs. 1 - 17). Tucumán.

- Lira Oliver, A., & Guevara Mon, A. B. (2018). *Radiación Solar: Comprensión del espectro electromagnético en la región del espectro electromagnético*. Obtenido de http://leias.fa.unam.mx/wp-content/uploads/2018/07/180515_Practica3_LES.pdf
- Lira, J. (1987). *La percepción remota: Nuestros ojos desde el espacio*. Fondo de Cultura Económica.
- Loroña Calderón, F. (2011). *Evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca de Quillcay y la influencia en su rendimiento hidrico* [Tesis para optar el grado de título profesional, Universidad Nacional Federico Villarreal]. Repositorio institucional.
- Maldonado Oré, E. M. (2019). *Impacto ambiental del visitante y capacidad de carga turística en el área de conservación regional del Huaytapallana* [Tesis para optar el grado de doctora en ciencias ambientales y desarrollo sostenible, Universidad Nacional del Centro del Perú]. Repositorio Institucional. Obtenido de <https://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5316>
- Megard, F., Caldas V., J., Paredes, J., & De la Cruz, N. (1996). *Geología de los Cuadrángulos de Tarma, La Oroya y Yauyos*. INGEMMET. Obtenido de <https://hdl.handle.net/20.500.12544/192>
- Mesa, O. J. (2018). Cuatro modelos de redes de drenaje. *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 379 - 391. Obtenido de <https://raccefyn.co/index.php/raccefyn/article/view/641/511>
- MIDAGRI. (2013). *Guía de capacitación y entrenamiento a las OAs Hidrometría*.
- Miguélez Pose, F. (2002). *Teledetección de Pesquerías y Predicción de Mareas Tóxicas*. NETBIBLO.
- MINAM. (2009). *Cambio Climático y Desarrollo Sostenible en el Perú*. Impresiones Kerigma.

- MINAM. (2010). *El Perú y el cambio climático*. Impresiones & Ediciones Aguilar S.A.C.
- MINAM. (2014). *PROTOCOLO ORTORRECTIFICACIÓN DE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT*. Burcon Impresores y Derivados S.A.C.
- MINAM. (2016). *El Perú y el Cambio Climático - Tercera Comunicación Nacional del Perú a la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Gráfica Biblos S.A.
- Panareda Clopes, J. M. (1974). Curso de percepción remota de los recursos naturales. *Revista de geografía*, 227-232. Obtenido de <https://www.raco.cat/index.php/RevistaGeografia/article/download/45889/57589>
- Paterson, P. (2017). Calentamiento global y cambio climático en Sudamérica. *Revista Política y Estrategia*(130), 153 - 188. Obtenido de <https://www.politicayestrategia.cl/index.php/rpye/article/view/133/239>
- Pedace, R., & Vega, C. (2011). Glaciares: Algo más que hielo... para entender los impactos del cambio climático sobre los ecosistemas, las comunidades y el agua. En P. C. Sustentable, *Glaciares Andinos: Recursos Hídricos y Cambio Climático* (págs. 9 - 21). MasGráfica.
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. L. (2006). *Teledetección: Nociones y Aplicaciones*. UNIVERSIDAD DE SALAMANCA.
- Power Porto, G. (2009). El calentamiento global y las emisiones de carbono. *INGENIERÍA INDUSTRIAL*(27), 101 - 122. Obtenido de https://revistas.ulima.edu.pe/index.php/Ingenieria_industrial/article/view/626/607

- PROVIAS DESCENTRALIZADO. (2021). *Plan Vial Provincial Participativo de Huancayo 2012 - 2021*. Huancayo. Obtenido de http://www.proviasdes.gob.pe/planes/junin/pvpp/PVPP_Huancayo_2012_2021.pdf
- Quiróz Hernández, M. (2011). *Tecnologías de información geográficas (TIG) cartografía, fotointerpretación y SIG*. Gráficas CERVANTES.
- Ráez Luna, E. F. (2019). *Cambio climático en el Perú: contribuciones nacionales, su definición y estado de avance*. Gamagráfica S.A.
- Ramírez Miranda , D. E. (2012). Efectos socioeconómicos del cambio climático en el Perú (2006 - 2011). *Investigaciones Sociales*, 16(28), 81 - 96. Obtenido de [https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/chile-peru-ecuador/Miranda.--2012.--Efectos-Socioeconomicos-del-CC-en-el-Peru-\(2006-2011\)-\[esp\].pdf](https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/coast-climate-adaptation-library/latin-america-and-caribbean/chile-peru-ecuador/Miranda.--2012.--Efectos-Socioeconomicos-del-CC-en-el-Peru-(2006-2011)-[esp].pdf)
- Reuter, F. (2009). *PRINCIPIOS DE TELEDETECCIÓN*. Obtenido de <https://fcf.unse.edu.ar/archivos/series-didacticas/SD-33-Principios-teledeteccion-REUTER.pdf>
- Revuelta, M. A., Fernandez, J. G., Hidalgo, R. M., Rivera, R. R., & Gemin, W. A. (2008). Las radiaciones eletromagnéticas y sus efectos en el cuerpo humano. 24-33.
- RPP. (16 de Marzo de 2018). Huancayo: Inspeccionaron las lagunas del Huaytapallana por posibles desembalses. *RPP Noticias*.
- Sacristán Romero, F. (2006). La teledetección satelital y los sistemas de protección ambiental. *AquaTIC: revista electrónica de acuicultura*(24), 13 - 41. Obtenido de http://www.revistaaquatic.com/aquatic/pdf/24_02.pdf

- Schauwecker, S., Kronenberg, M., & Cruz, R. (2017). *El futuro del clima y de los glaciares en el Perú*. CARE Perú.
- SEMAR. (03 de Mayo de 2009). *Percepción Remota*. Obtenido de Secretaría de Marina: <http://2006-2012.semar.gob.mx/informacion-sector/ciencia/ermexs/temas-de-interes/384-percepcion-remota.html>
- SENAMHI. (2015). Estimación de la evapotranspiración de referencia (FAO-56-Penman-Monteith) con limitados datos climáticos en la cuenca andina amazónica Peruana. *Revista Peruana Geo - Atmosférica RPGA(4)*, 31 - 43. Obtenido de https://web2.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper3.pdf
- Sobrino, J. A. (2000). *Teledetección*. Guada Impresiones S.L.
- Soto, G., & Florián, J. (Abril de 2021). *El cambio climático en el bicentenario del Perú: ¿Cuáles son las propuestas desde sociedad civil para el cumplimiento de los compromisos climáticos del país?* Obtenido de DAR: <https://dar.org.pe/el-cambio-climatico-en-el-bicentenario-del-peru-cuales-son-las-propuestas-desde-sociedad-civil-para-el-cumplimiento-de-los-compromisos-climaticos-del-pais/>
- Tapia Rojas, R. (2018). *Emisión de Gases de Efecto Invernadero y Contribución del Perú en Mitigación y Adaptación al Cambio Climático*. Lima.
- Tardivo, R., Graciani, S., & Canoba, C. (2008). *Procesamiento digital de información geográfica: Teledetección*. Obtenido de Biblioteca Digital de Agrimensura: <http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASH01b5.dir/doc.pdf>
- Tristán, P., Wainschenker, R., & Doorn, J. H. (Mayo 2008). Normalización de imágenes satelitales en el análisis multi-temporal. *Trabajo presentado en X Workshop de*

Investigadores en Ciencias de la Computación Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Buenos Aires. Obtenido de <http://sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/20582>

UTEC. (26 de Marzo de 2021). *Cambio climático: ¿cuáles son las consecuencias del calentamiento global en el Perú?* Obtenido de Universidad de Ingeniería y Tecnología: <https://www.utec.edu.pe/blog-de-carreras/ingenieria-ambiental/cambio-climatico-cuales-son-las-consecuencias-del-calentamiento-global-en-el-peru>

Verdugo Cardenas, M. (2017). *Análisis morfométrico de las microcuencas a las que pertenece el bosque y vegetación protectora aguarongo (BVPA), influencia en el comportamiento hidrológico.* Cuenca, Ecuador.

Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología.* Cartago - Costa Rica: Taller de Publicaciones del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

Zubieta, R., & Lagos, P. (2010). Estudio de la dinámica superficial de glaciares en las cordilleras Huaytapallana por sensoramiento remoto perío 1976 - 2006 Huancayo - Perú. *Sociedad Geológica del Perú*(9), 351 - 356. Obtenido de <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/CPG15-086.pdf>

ANEXOS

- Anexo A. Registro histórico de la precipitación de la estación Shullcas
- Anexo B. Registro histórico de la estación hidrométrica Chamiseria.
- Anexo C. Procedimiento de cálculo de la evapotranspiración mediante el método FAO Penman – Monteith.
- Anexo D. Matriz de consistencia.
- Anexo E. Mapas temáticos de la investigación.

Anexo A. Registro histórico de la precipitación de la estación shullcas

Tabla 1-A

Estación pluviométrica shullcas (1965 – 2013)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Total
1965	88.0	143.0	159.0	56.0	39.0	2.0	17.0	19.0	43.0	77.0	97.0	121.0	861.0
1966	81.0	130.0	89.0	55.0	29.0	4.0	8.0	31.0	27.0	110.0	107.0	145.0	816.0
1967	90.0	136.0	121.0	39.0	23.0	6.0	340.0	36.0	28.0	91.0	75.0	117.0	1,102.0
1968	122.0	135.0	120.0	46.0	43.0	14.0	1.0	19.0	49.0	76.0	60.0	89.0	774.0
1969	57.0	142.0	88.0	55.0	21.0	1.0	2.0	40.0	57.0	95.0	98.0	137.0	793.0
1970	188.0	121.0	76.0	56.0	29.0	3.0	4.0	1.0	46.0	87.0	67.0	132.0	810.0
1971	139.0	146.0	80.0	57.0	28.0	3.0	3.0	23.0	39.0	205.0	98.0	198.0	1,019.0
1972	145.0	122.0	200.0	47.0	22.0	0.0	6.0	2.0	45.0	88.0	93.0	147.0	917.0
1973	252.0	179.0	187.0	76.0	18.0	6.0	15.0	23.0	51.0	95.0	56.0	113.0	1,071.0
1974	431.0	182.0	153.0	50.0	20.0	17.0	16.0	23.0	23.0	47.0	25.0	94.0	1,081.0
1975	121.0	175.0	110.0	53.0	42.0	8.0	7.0	35.0	43.0	63.0	100.0	162.0	919.0
1976	206.0	99.0	73.0	36.0	41.0	35.0	33.0	53.0	48.0	69.0	52.0	137.0	882.0
1977	178.0	162.0	137.0	56.0	28.0	5.0	2.0	39.0	46.0	54.0	114.0	84.0	905.0
1978	234.0	118.0	236.0	82.0	26.0	0.0	4.0	4.0	39.0	111.0	105.0	106.0	1,065.0
1979	80.0	170.0	62.0	53.0	37.0	5.0	20.0	45.0	36.0	70.0	112.0	129.0	819.0
1980	92.0	135.0	149.0	58.0	27.0	1.0	30.0	40.0	30.0	137.0	91.0	135.0	925.0
1981	156.0	436.0	106.0	45.0	5.0	1.0	0.0	42.0	53.0	127.0	104.0	169.0	1,244.0
1982	137.0	145.0	106.0	45.0	10.0	0.0	0.0	53.0	50.0	73.0	111.0	125.0	855.0
1983	150.0	115.0	118.0	66.0	18.0	8.0	2.0	1.0	36.0	85.0	55.0	73.0	727.0
1984	192.0	428.0	237.0	48.0	26.0	11.0	0.0	26.0	38.0	66.0	113.0	96.0	1,281.0
1985	178.0	134.0	157.0	45.0	27.0	7.0	156.0	27.0	21.0	52.0	91.0	161.0	1,056.0
1986	128.0	135.0	91.0	36.0	43.0	6.0	0.0	54.0	59.0	245.0	109.0	215.0	1,121.0
1987	482.0	124.0	130.0	50.0	25.0	9.0	67.0	42.0	19.0	72.0	80.0	105.0	1,205.0
1988	230.0	125.0	121.0	53.0	27.0	1.0	0.0	7.0	28.0	80.0	79.0	119.0	870.0
1989	196.0	229.0	145.0	48.0	20.0	1.0	3.0	39.0	19.0	110.0	82.0	185.0	1,077.0
1990	198.0	252.0	157.0	86.0	22.0	1.0	10.0	11.0	28.0	61.0	105.0	159.0	1,090.0
1991	143.0	127.0	125.0	31.0	15.0	2.0	1.0	41.0	20.0	77.0	50.0	112.0	744.0
1992	99.0	148.0	89.0	46.0	13.0	0.0	4.0	38.0	41.0	60.0	89.0	120.0	747.0
1993	281.0	146.0	182.0	59.0	29.0	4.0	0.0	22.0	30.0	71.0	55.0	108.0	987.0
1994	279.0	218.0	214.0	48.0	25.0	5.0	0.0	26.0	25.0	47.0	72.0	107.0	1,066.0
1995	99.0	128.0	158.0	54.0	22.0	1.0	1.0	11.0	30.0	105.0	48.0	101.0	758.0
1996	269.0	134.0	159.0	41.0	10.0	0.0	0.0	15.0	43.0	79.0	68.0	133.0	951.0
1997	176.0	197.0	114.0	45.0	15.0	2.0	3.0	17.0	51.0	80.0	117.0	204.0	1,021.0
1998	205.0	231.0	73.0	85.0	8.0	6.0	0.0	10.0	8.0	125.0	107.0	128.0	986.0
1999	125.0	209.0	153.0	31.0	22.0	23.0	14.0	0.0	64.0	80.0	84.0	106.0	911.0
2000	228.0	173.0	173.0	65.0	10.0	4.0	4.0	39.0	35.0	63.0	18.0	102.0	914.0
2001	248.0	99.0	152.0	36.0	35.0	3.0	12.0	4.0	33.0	51.0	63.0	113.0	849.0
2002	111.0	163.0	207.0	39.0	14.0	5.0	37.0	13.0	60.0	125.0	83.0	157.0	1,014.0
2003	170.0	181.0	173.0	80.0	27.0	1.0	1.0	53.0	53.0	47.0	74.0	165.0	1,025.0
2004	52.0	164.0	102.0	40.0	23.0	13.0	18.0	19.0	51.0	92.0	104.0	179.0	857.0
2005	89.0	109.0	105.0	11.0	14.0	0.0	0.0	8.0	17.0	128.0	65.0	86.0	632.0
2006	225.0	110.0	116.0	43.0	3.0	11.0	0.0	26.0	37.0	98.0	108.0	103.0	880.0
2007	94.0	113.0	120.0	59.0	26.0	0.0	26.0	15.0	37.0	101.0	99.0	92.0	782.0
2008	228.0	123.0	57.0	45.0	15.0	8.0	0.0	8.0	34.0	116.0	69.0	117.0	820.0
2009	97.0	179.0	143.0	46.0	26.0	23.0	9.0	35.0	48.0	63.0	99.0	169.0	937.0
2010	233.0	198.0	110.0	37.0	21.0	4.0	1.0	9.0	46.0	81.0	112.0	178.0	1,030.0
2011	195.0	154.0	133.0	72.0	26.0	0.0	3.0	30.0	56.0	52.0	85.0	153.0	959.0
2012	106.0	266.0	126.0	57.0	27.0	10.0	13.0	24.0	44.0	88.0	101.0	123.0	985.0
2013	81.0	128.0	147.0	32.0	28.0	9.0	3.0	32.0	47.0	79.0	73.0	111.0	770.0
Media	171.1	165.6	133.4	51.0	23.5	5.9	18.3	25.1	39.0	88.9	84.1	131.0	936.9

Nota. Reproducida de Autoridad Nacional del Agua (2015).

Anexo B. Registro histórico de la estación hidrométrica chamiseria (1985 - 2009).

Tabla 1 - B

Estación Chamiseria (1985 - 2009)

Año	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Media
1985	6.33	9.03	9.13	4.38	2.5	1.66	1.25	1.04	1.29	1.23	2.51	5.10	3.79
1986	7.70	10.59	10.52	9.04	4.59	2.46	1.44	1.27	1.14	1.05	1.12	3.96	4.57
1987	8.35	5.65	4.38	3.02	1.85	1.27	1.26	1.20	1.17	1.38	2.87	4.21	3.05
1988	10.6	7.7	5.21	6.8	2.41	1.54	1.57	1.45	1.36	1.14	1.00	1.70	3.54
1989	5.01	14.02	5.29	3.87	2.46	1.67	1.10	1.04	0.99	1.27	1.58	1.56	3.32
1990	4.61	2.09	1.89	1.89	1.3	1.29	1.16	1.03	0.92	1.86	4.67	3.04	2.15
1991	4.12	2.05	4.29	2.2	1.57	1.09	1.01	1.12	1.23	1.25	1.92	1.86	1.98
1992	1.92	3.12	2.56	4.06	1.39	1.19	1.14	1.12	1.08	1.05	1.00	1.06	1.72
1993	3.17	3.18	3.56	3.25	2.68	1.63	1.34	1.24	1.24	1.33	2.31	6.15	2.59
1994	6.46	12.49	10.25	8.07	3.34	1.60	1.40	1.24	1.10	1.30	1.23	2.04	4.21
1995	3.36	6.97	7.85	3.68	2.36	2.43	2.35	2.00	2.18	2.26	1.61	2.33	3.28
1996	4.04	11.42	6.29	4.67	2.12	1.71	1.52	1.43	1.33	1.40	1.49	2.49	3.33
1997	5.75	6.62	6.8	2.63	1.42	1.16	1.59	1.52	1.42	1.3	2.26	6.39	3.24
1998	7.34	12.34	7.77	4.43	1.69	1.11	1.06	0.96	1.21	1.39	2.97	4.04	3.86
1999	5.12	11.45	9.56	4.41	1.90	1.96	1.84	1.58	1.54	2.12	1.29	2.77	3.80
2000	6.78	17.38	13.43	5.25	1.50	1.20	0.89	0.81	1.10	1.26	1.19	1.85	4.39
2001	13.59	16.97	11.12	5.97	1.8	1.35	1.33	1.22	1.28	1.42	1.81	4.07	5.16
2002	1.75	8.30	9.87	6.11	1.90	1.36	1.12	1.10	1.33	1.63	2.34	4.14	3.41
2003	3.97	8.55	10.19	6.74	2.70	1.42	1.28	1.15	1.03	1.04	1.20	2.42	3.47
2004	3.14	6.92	4.53	2.54	1.97	1.76	1.40	1.08	1.23	1.23	1.89	5.14	2.74
2005	2.96	3.19	4.77	2.00	1.43	1.13	0.96	1.05	0.97	1.66	1.55	2.73	2.03
2006	6.39	6.77	3.46	3.6	1.65	1.50	1.25	1.20	1.17	1.26	1.76	3.21	2.77
2007	5.29	3.67	5.08	2.99	1.71	1.24	1.34	1.20	1.15	1.19	1.75	2.41	2.42
2008	6.93	5.03	4.06	1.67	1.07	0.97	1.04	1.04	1.03	1.13	1.17	1.36	2.21
2009	1.43	4.90	3.69	2.43	1.26	1.16	1.12	1.1	1.15	1.21	1.93	2.64	2.00
Media	5.44	8.02	6.62	4.23	2.02	1.47	1.31	1.21	1.23	1.37	1.86	3.15	3.16
Min	1.43	2.05	1.89	1.67	1.07	0.97	0.89	0.81	0.92	1.04	1.00	1.06	1.72
Max	13.59	17.38	13.43	9.04	4.59	2.46	2.35	2.00	2.18	2.26	4.67	6.39	5.16

Nota. Reproducida de Admnsitración Local de Agua Mantaro (2010).

Anexo C. Procedimiento de cálculo de la evapotranspiración mediante el método FAO

Penman – Monteith.

En los siguientes cuadros se presentan las variables requeridas para el cálculo de la evapotranspiración de la subcuenca Shullcas mediante el método FAO Penman-Monteith, entre las estaciones consideradas se encuentran Huayao, Ingenio, Marcapomacocha, pachachaca y Santa Ana.

Tabla 1 - C

Variables climáticas de la estación Huayao

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
H. Relativa*	66.4	68.1	68.8	63.5	57.5	54.3	52.3	53.1	55.1	56.8	56	60.3
T. Mínima*	6.7	6.9	6.6	4.8	2.1	0.7	0.1	2	4.3	5.6	5.6	6.2
T. Máxima*	19.1	18.7	18.4	19.4	20	19.5	19.4	20.1	20.3	20.6	20.9	19.9
T. Media*	12.9	12.8	12.5	12.1	11.1	10.1	9.8	11.1	12.3	13.1	13.3	13.1
V. Viento**	1.28	1.34	1.37	1.33	1.31	1.37	1.31	1.17	1.25	1.30	1.23	1.25
% Insolación**	11.0	10.0	12.0	24.0	38.0	45.0	54.0	51.0	34.0	22.0	18.0	14.0

Nota. Elaboración propia.

Tabla 2 - C

Variables climáticas de la estación Ingenio

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
H. Relativa	76.24	76.54	76.32	74.58	74.95	74.12	73.05	70.77	72.61	72.82	72.79	74.24
T. Máxima*	18.6	18.2	17.5	18.7	19.5	19	18.8	19.3	19.4	19.5	20	18.9
T. Mínima*	5.9	6.4	6.1	4.8	2.1	0.6	0.3	1.6	3.8	4.9	5.3	5.9
T. Media*	12.1	12.1	11.8	11.9	10.9	9.8	9.6	10.5	11.7	12.2	12.7	12.3
V. Viento*	1.56	1.72	1.55	1.71	1.74	1.67	1.61	1.68	1.62	1.58	1.65	1.69
% Insolación**	11.0	9.0	12.0	23.0	38.0	44.0	53.0	50.0	34.0	21.0	17.0	13.0

Nota. Elaboración propia.

Tabla 3 - C*Variables climáticas de la estación Marcapomacocha*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
H. Relativa*	82.8	84.7	82.9	81.7	79.2	77	81.6	80	79.3	82.3	77.5	81.5
T. Máxima*	10.3	10.2	10.1	10.6	10.8	10.5	10.5	11	11	11	11.4	10.7
T. Mínima*	0	0	0.1	-0.4	-1.9	-3.1	-4.2	-3.7	-2.4	-1.3	-1	-0.4
T. Media*	5.15	5.1	5.1	5.1	4.45	3.7	3.15	3.65	4.3	4.85	5.2	5.15
V. Viento*	3.36	3.42	3.37	3.33	3.43	3.36	3.39	3.33	3.37	3.32	3.36	3.5
% Insolación**	13.0	11.0	13.0	30.0	48.0	55.0	65.0	64.0	47.0	30.0	23.0	17.0

Nota. Elaboración propia.**Tabla 4 - C***Variables climáticas de la estación Pachachaca*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
H. Relativa*	76.7	76.5	78.1	77.5	76.7	76.1	77.2	76.9	76.5	75.6	75.2	75.2
T. Máxima*	14.6	13.9	14.1	14.4	15.2	14.5	14.1	14.2	14.3	14.3	14.8	14.9
T. Mínima*	1.4	1.8	1.7	0.2	-3.6	-5.2	-6	-4	-1.6	-0.2	0.4	0
T. Media*	8	7.85	7.9	7.3	5.8	4.65	4.05	5.1	6.35	7.05	7.6	7.45
V. Viento*	3.4	3.7	3.2	3.4	3.4	3.5	3.4	3.1	3.4	3.2	3.3	3.3
% Insolación**	11.0	10.0	12.0	24.0	38.0	44.0	52.0	50.0	35.0	22.0	18.0	14.0

Nota. Elaboración propia.**Tabla 5 - C***Variables climáticas de la estación santa ana*

Variable	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
H. Relativa ¹	72.99	75.85	75.11	71.12	68.03	62.04	59.41	58.53	62.27	66.44	63.65	70.13
T. Máxima*	19.4	19.1	19	19.9	21	20.4	20.3	20.7	20.7	20.7	21.3	20.2
T. Mínima*	6.5	6.7	6.3	4.3	1.8	0	-0.2	1.5	3.7	5.2	5.4	6.2
T. Media*	12.8	12.9	13.3	12.6	11.6	9.9	8.9	10	11.4	12.6	13.4	13.5
V. Viento*	2.05	2.13	2.32	2.33	2.12	1.90	2.24	2.16	2.12	1.78	1.94	1.80
% Insolación**	11.0	10.0	13.0	24.0	38.0	44.0	53.0	50.0	34.0	21.0	18.0	14.0

Nota. Elaboración propia.

Donde, “¹” es la información obtenida del geo servido SENAMHI, “*” es la información obtenida a partir del informe final Evaluación de Recursos hídricos en la cuenca de Mantaro realizado por el ANA en el año 2015, y “**” data obtenida de la página web Weather Spark (<https://es.weatherspark.com/>).

Para determinar la evapotranspiración de la zona de estudio, se inició con el cálculo de la radiación extraterrestre (R_a) y la insolación máxima diaria, siendo necesario utilizar la Tabla 110; adicionalmente se determinó la duración de la insolación (n), siendo necesario la información determinada de la insolación máxima diaria (N).

Tabla 6 - C

Radiación extraterrestre (R_a) de las estaciones consideradas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Huayao	39.9	39.5	37.7	34.2	30.5	28.4	29.2	32.3	36.1	38.6	39.7	39.8
Ingenio	40.1	39.6	37.7	34.0	30.3	28.2	29.0	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0
Marcapomacocha	39.9	39.5	37.7	34.2	30.5	28.4	29.2	32.3	36.1	38.6	39.7	39.8
Pachachaca	40.0	39.5	37.7	34.2	30.4	28.4	29.1	32.3	36.1	38.6	39.7	39.9
Santa Ana	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0

Nota. Elaboración propia.

Tabla 7 - C

Insolación máxima diaria (N) de las estaciones consideradas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Huayao	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
Ingenio	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
Marcapomacocha	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
Pachachaca	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7
Santa Ana	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7

Nota. Elaboración propia.

Tabla 8 - C

Duración de la insolación (n) de las estaciones consideradas

Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Huayao	1.4	1.2	1.5	2.8	4.3	5.1	6.2	5.9	4.0	2.7	2.3	1.8
Ingenio	1.4	1.1	1.5	2.7	4.3	5.0	6.0	5.8	4.0	2.6	2.1	1.7
Marcapomacocha	1.6	1.4	1.6	3.5	5.5	6.2	7.4	7.4	5.6	3.7	2.9	2.2
Pachachaca	1.4	1.2	1.5	2.8	4.3	5.0	5.9	5.8	4.2	2.7	2.3	1.8
Santa Ana	1.4	1.2	1.6	2.8	4.3	5.0	6.0	5.8	4.0	2.6	2.3	1.8

Nota. Elaboración propia.

Tabla 9 - C

Radiación extraterrestre (Ra) y la insolación máxima diaria (n) para diferentes latitudes del hemisferio sur

Lat. Grad.	Radiación extraterrestre (Ra)												Insolación máxima diaria (N)												
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Ene.	Feb.	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	
70	41.4	28.6	15.8	4.9	0.2	0.0	0.0	2.2	10.7	23.5	37.3	45.3	24.0	17.4	13.0	8.4	2.7	0.0	0.0	6.4	11.2	15.7	21.7	24.0	
68	41.0	29.3	16.9	6.0	0.8	0.0	0.0	3.2	11.9	24.4	37.4	44.7	21.9	16.7	12.9	8.7	4.3	0.0	1.7	7.0	11.3	15.3	19.9	24.0	
66	40.9	30.0	18.1	7.2	1.5	0.1	0.5	4.2	13.1	25.4	37.6	44.1	20.1	16.2	12.8	9.1	5.3	2.0	3.7	7.6	11.3	15.0	18.8	22.1	
64	41.0	30.8	19.3	8.4	2.4	0.6	1.2	5.3	14.4	26.3	38.0	43.9	19.0	15.8	12.8	9.3	6.1	3.7	4.8	8.0	11.4	14.7	18.0	20.3	
62	41.2	31.5	20.4	9.6	3.4	1.2	2.0	6.4	15.5	27.2	38.3	43.9	18.3	15.5	12.7	9.6	6.7	4.8	5.6	8.3	11.4	14.5	17.4	19.2	
60	41.5	32.3	21.5	10.8	4.4	2.0	2.9	7.6	16.7	28.1	38.7	43.9	17.6	15.2	12.6	9.8	7.2	5.6	6.3	8.7	11.5	14.3	16.9	18.4	
58	41.7	33.0	22.6	12.0	5.5	2.9	3.9	8.7	17.9	28.9	39.1	44.0	17.1	14.9	12.6	9.9	7.6	6.2	6.8	8.9	11.5	14.1	16.5	17.8	
56	42.0	33.7	23.6	13.2	6.6	3.9	4.9	9.9	19.0	29.8	39.5	44.1	16.7	14.7	12.5	10.1	8.0	6.7	7.2	9.2	11.6	13.9	16.1	17.3	
54	42.2	34.3	24.6	14.4	7.7	4.9	6.0	11.1	20.1	30.6	39.9	44.3	16.3	14.5	12.5	10.2	8.3	7.2	7.6	9.4	11.6	13.8	15.8	16.9	
52	42.5	35.0	25.6	15.6	8.8	6.0	7.1	12.2	21.2	31.4	40.2	44.4	16.0	14.3	12.5	10.4	8.6	7.5	8.0	9.6	11.6	13.7	15.5	16.5	
50	42.7	35.6	26.6	16.7	10.0	7.1	8.2	13.4	22.2	32.1	40.6	44.5	15.7	14.2	12.4	10.5	8.8	7.9	8.3	9.7	11.7	13.6	15.3	16.1	
48	42.9	36.2	27.5	17.9	11.1	8.2	9.3	14.6	23.3	32.8	40.9	44.5	15.4	14.0	12.4	10.6	9.0	8.2	8.5	9.9	11.7	13.4	15.0	15.8	
46	43.0	36.7	28.4	19.0	12.3	9.3	10.4	15.7	24.3	33.5	41.1	44.6	15.2	13.9	12.4	10.7	9.2	8.5	8.8	10.0	11.7	13.3	14.8	15.5	
44	43.2	37.2	29.3	20.1	13.5	10.5	11.6	16.8	25.2	34.1	41.4	44.6	14.9	13.7	12.4	10.8	9.4	8.7	9.0	10.2	11.7	13.3	14.6	15.3	
42	43.3	37.7	30.1	21.2	14.6	11.6	12.8	18.0	26.2	34.7	41.6	44.6	14.7	13.6	12.3	10.8	9.6	9.0	9.2	10.3	11.7	13.2	14.4	15.0	
40	43.4	38.1	30.9	22.3	15.8	12.8	13.9	19.1	27.1	35.3	41.8	44.6	14.5	13.5	12.3	10.9	9.8	9.2	9.4	10.4	11.8	13.1	14.3	14.8	
38	43.4	38.5	31.7	23.3	16.9	13.9	15.1	20.2	28.0	35.8	41.9	44.5	14.4	13.4	12.3	11.0	9.9	9.4	9.6	10.5	11.8	13.0	14.1	14.6	
36	43.4	38.9	32.4	24.3	18.1	15.1	16.2	21.2	28.8	36.3	42.0	44.4	14.2	13.3	12.3	11.1	10.1	9.6	9.8	10.6	11.8	12.9	13.9	14.4	
34	43.4	39.2	33.0	25.3	19.2	16.2	17.4	22.3	29.6	36.7	42.0	44.3	14.0	13.2	12.2	11.1	10.2	9.7	9.9	10.7	11.8	12.9	13.8	14.3	
32	43.3	39.4	33.7	26.3	20.3	17.4	18.5	23.3	30.4	37.1	42.0	44.1	13.9	13.1	12.2	11.2	10.4	9.9	10.1	10.8	11.8	12.8	13.7	14.1	
30	43.1	39.6	34.3	27.2	21.4	18.5	19.6	24.3	31.1	37.5	42.0	43.9	13.7	13.0	12.2	11.3	10.5	10.1	10.2	10.9	11.8	12.7	13.5	13.9	
28	43.0	39.8	34.8	28.1	22.5	19.7	20.7	25.3	31.8	37.8	41.9	43.6	13.6	13.0	12.2	11.3	10.6	10.2	10.4	11.0	11.8	12.7	13.4	13.8	
26	42.8	39.9	35.3	29.0	23.5	20.8	21.8	26.3	32.5	38.0	41.8	43.3	13.5	12.9	12.2	11.4	10.7	10.4	10.5	11.1	11.9	12.6	13.3	13.6	
24	42.5	40.0	35.8	29.8	24.6	21.9	22.9	27.2	33.1	38.3	41.7	43.0	13.3	12.8	12.2	11.4	10.8	10.5	10.7	11.2	11.9	12.6	13.2	13.5	
22	42.2	40.1	36.2	30.6	25.6	23.0	24.0	28.1	33.7	38.4	41.4	42.6	13.2	12.7	12.1	11.5	10.9	10.7	10.8	11.2	11.9	12.5	13.1	13.3	
20	41.9	40.0	36.6	31.3	26.6	24.1	25.0	28.9	34.2	38.6	41.2	42.1	13.1	12.7	12.1	11.5	11.1	10.8	10.9	11.3	11.9	12.5	13.0	13.2	
18	41.5	40.0	37.0	32.1	27.5	25.1	26.0	29.8	34.7	38.7	40.9	41.7	13.0	12.6	12.1	11.6	11.2	10.9	11.0	11.4	11.9	12.4	12.9	13.1	
16	41.1	39.9	37.2	32.8	28.5	26.2	27.0	30.6	35.2	38.7	40.6	41.2	12.9	12.5	12.1	11.6	11.3	11.1	11.1	11.5	11.9	12.4	12.8	12.9	
14	40.6	39.7	37.5	33.4	29.4	27.2	27.9	31.3	35.6	38.7	40.2	40.6	12.7	12.4	12.1	11.7	11.4	11.2	11.2	11.5	11.9	12.3	12.7	12.8	
12	40.1	39.6	37.7	34.0	30.2	28.1	28.9	32.1	36.0	38.6	39.8	40.0	12.6	12.4	12.1	11.7	11.4	11.3	11.4	11.6	11.9	12.3	12.6	12.7	
10	39.5	39.3	37.8	34.6	31.1	29.1	29.8	32.8	36.3	38.5	39.3	39.4	12.5	12.3	12.1	11.8	11.5	11.4	11.5	11.7	11.9	12.2	12.5	12.6	
8	38.9	39.0	37.9	35.1	31.9	30.0	30.7	33.4	36.6	38.4	38.8	38.7	12.4	12.3	12.1	11.8	11.6	11.5	11.5	11.6	11.7	12.0	12.2	12.4	12.5
6	38.3	38.7	38.0	35.6	32.7	30.9	31.5	34.0	36.8	38.2	38.2	38.0	12.3	12.2	12.0	11.9	11.7	11.7	11.7	11.7	11.8	12.0	12.1	12.3	12.3
4	37.6	38.3	38.0	36.0	33.4	31.8	32.3	34.6	37.0	38.0	37.6	37.2	12.2	12.1	12.0	11.9	11.8	11.8	11.8	11.9	12.0	12.1	12.2	12.2	12.2
2	36.9	37.9	38.0	36.4	34.1	32.6	33.1	35.2	37.1	37.7	37.0	36.4	12.1	12.1	12.0	12.0	11.9	11.9	11.9	11.9	12.0	12.0	12.1	12.1	12.1
0	36.2	37.5	37.9	36.8	34.8	33.4	33.9	35.7	37.2	37.4	36.3	35.6	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0	12.0

Nota. Reproducida de FAO (2006)

Tabla 10 - C*σTK4 (de acuerdo a la ley Stefan-Boltzmann) para diferentes temperaturas*

T (°C)	σTK ⁴ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σTK ⁴ (MJ m ⁻² d ⁻¹)	T (°C)	σTK ⁴ (MJ m ⁻² d ⁻¹)
1.0	27.70	17.0	34.75	33.0	43.08
1.5	27.90	17.5	34.99	33.5	43.36
2.0	28.11	18.0	35.24	34.0	43.64
2.5	28.31	18.5	35.48	34.5	43.93
3.0	28.52	19.0	35.72	35.0	44.21
3.5	28.72	19.5	35.97	35.5	44.50
4.0	28.93	20.0	36.21	36.0	44.79
4.5	29.14	20.5	36.46	36.5	45.08
5.0	29.35	21.0	36.71	37.0	45.37
5.5	29.56	21.5	36.96	37.5	45.67
6.0	29.78	22.0	37.21	38.0	45.96
6.5	29.99	22.5	37.47	38.5	46.26
7.0	30.21	23.0	37.72	39.0	46.56
7.5	30.42	23.5	37.98	39.5	46.85
8.0	30.64	24.0	38.23	40.0	47.15
8.5	30.86	24.5	38.49	40.5	47.46
9.0	31.08	25.0	38.75	41.0	47.76
9.5	31.30	25.5	39.01	41.5	48.06
10.0	31.52	26.0	39.27	42.0	48.37
10.5	31.74	26.5	39.53	42.5	48.68
11.0	31.97	27.0	39.80	43.0	48.99
11.5	32.19	27.5	40.06	43.5	49.30
12.0	32.42	28.0	40.33	44.0	49.61
12.5	32.65	28.5	40.60	44.5	49.92
13.0	32.88	29.0	40.87	45.0	50.24
13.5	33.11	29.5	41.14	45.5	50.56
14.0	33.34	30.0	41.41	46.0	50.87
14.5	33.57	30.5	41.69	46.5	51.19
15.0	33.81	31.0	41.96	47.0	51.51
15.5	34.04	31.5	42.24	47.5	51.84
16.0	34.28	32.0	42.52	48.0	52.16
16.5	34.52	32.5	42.80	48.5	52.49

Nota. Reproducida de FAO (2006).

El método Penman-Monteith indica que la velocidad del viento debe ser medida a 2 metros del suelo, y para los casos en que la medida no se haya realizado tal como se menciona, es necesario realizar un ajuste utilizando la siguiente ecuación:

$$U_2 = U_z \frac{4.87}{\ln(67.8 * z - 5.42)} \quad \text{Ec. (33)}$$

Donde, “U₂” es la velocidad del viento a 2 m. del suelo, “U_z”, velocidad del viento medida a Z m. de la superficie, y “z” altura de medición sobre la superficie.

Seguidamente se calculó al Constante Psicométrica (γ); previamente es necesario determinar la presión (P), utilizando la siguiente ecuación:

$$P = 101.3 \left(\frac{293 - 0.0064 * z}{293} \right)^{5.26} \quad \text{Ec. (34)}$$

$$\gamma = 0.665 * 10^{-3} * P \quad \text{Ec. (35)}$$

Luego se determina la pendiente de la curva de la presión de vapor “Δ”, para lo cual es necesario la temperatura media (T) y que se utilizará la siguiente ecuación:

$$\Delta = \frac{4.098 \left(0.6108 * \exp \left(\frac{17.27 * T}{T + 237.3} \right) \right)}{(T + 237.3)^2} \quad \text{Ec. (36)}$$

Para el cálculo del déficit de presión de vapor real (ea), es necesario determinar la presión de vapor de saturación (es), ambas variables se calculan a partir de las siguientes ecuaciones:

$$e_{T_{\text{máx}}} = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 * T_{\text{máx}}}{T_{\text{máx}} + 237.3} \right) \quad \text{Ec. (37)}$$

$$e_{T_{\text{mín}}} = 0.6108 \exp \left(\frac{17.27 * T_{\text{mín}}}{T_{\text{mín}} + 237.3} \right) \quad \text{Ec. (38)}$$

$$e_s = \frac{e_{T_{\text{máx}}} + e_{T_{\text{mín}}}}{2} \quad \text{Ec. (39)}$$

$$e_a = \frac{HR}{100} * e_s \quad \text{Ec. (40)}$$

Donde, “T_{máx}” es la temperatura máxima, “T_{mín}”, es la temperatura mínima, “e_s” presión de vapor de saturación, y “e_a” presión de vapor real.

De igual manera es necesario el cálculo de la radiación neta en la superficie (R_{nl}), siendo necesario para esta variable determinar previamente la radiación neta de onda corta (R_{ns}), la radiación solar entrante (R_s) y la radiación extraterrestre (R_a).

$$R_{ns} = 0.77 * R_s \quad \text{Ec. (41)}$$

$$R_s = \left(0.25 + 0.5 \frac{n}{N}\right) R_a \quad \text{Ec. (42)}$$

$$R_{nl} = \frac{\sigma T_{m\acute{a}x} K^4 + \sigma T_{min} K^4}{2} (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \left(1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35\right) \quad \text{Ec. (43)}$$

$$R_{so} = \left(0.75 + \frac{2 * z}{100000}\right) R_a \quad \text{Ec. (44)}$$

Donde, “ R_a ” es la radiación extraterrestre, y para el “ $\sigma T_{max} K^4 + \sigma T_{min} K^4$ ” es necesario utilizar la Tabla 111, y “ R_{so} ” es la radiación solar en un día despejado. Para el cálculo de flujo de calor del suelo (G), se utilizó la siguiente expresión:

$$G_{mes,i} = 0.14(T_{mes,i} - T_{mes,i-1}) \quad \text{Ec. (45)}$$

Donde, “ $T_{mes,i}$ ” es la temperatura en el mes i , “ $T_{mes,i-1}$ ” es la temperatura en el mes $i-1$.

Finalmente, para determinar la evapotranspiración se utilizará la siguiente expresión:

$$ETP = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad \text{Ec. (46)}$$

Una vez aplicado las ecuaciones anteriormente descritas para las estaciones consideradas, se presenta los siguientes cuadros con los resultados obtenidos:

Tabla 11 - C*Evapotranspiración de la estación huayao*

Variables	Año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Velocidad del viento a 2 m. de altura (m/s)	0.96	1.12	1.15	1.11	1.10	1.15	1.10	0.98	1.05	1.09	1.03	1.05
Constante Psicométrica (kPa/°C)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)	0.10	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.10	0.10
Presión de vapor de saturación (kPa)	1.56	1.53	1.51	1.53	1.50	1.44	1.42	1.49	1.56	1.61	1.63	1.61
Presión del vapor real (kPa)	1.02	1.01	1.01	0.96	0.80	0.67	0.65	0.71	0.78	0.92	0.90	1.00
Radiación neta en la superficie del cultivo (Mj/m ² /día)	8.37	8.18	7.95	8.01	7.72	7.27	8.02	9.13	9.26	9.04	8.94	8.64
Flujo del calor del suelo (Mj/m ² /día)	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04	-0.04
Temperatura del aire a 2 m. de altura (°C)	12.55	12.4	12.15	11.95	11.1	10.15	9.7	10.65	11.9	12.6	12.9	12.85
EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO DIARIA	2.59	2.56	2.47	2.55	2.59	2.57	2.72	2.94	3.04	2.93	2.93	2.75
DIAS POR MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EVAPOTRANSPIRACION POR MES	80.14	71.60	76.67	76.55	80.36	77.22	84.20	91.25	91.16	90.89	88.01	85.11

Nota. Elaboración propia.

Tabla 12 - C*Evapotranspiración de la estación Ingenio*

Variables	Año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Velocidad del viento a 2 m. de altura (m/s)	1.17	1.44	1.30	1.43	1.46	1.40	1.35	1.41	1.36	1.32	1.38	1.42
Constante Psicométrica (kPa/°C)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)	0.09	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.09	0.10	0.09
Presión de vapor de saturación (kPa)	1.54	1.53	1.47	1.51	1.49	1.42	1.40	1.46	1.53	1.57	1.61	1.56
Presión del vapor real (kPa)	1.17	1.17	1.12	1.12	1.12	1.05	1.02	1.03	1.11	1.14	1.18	1.16
Radiación neta en la superficie del cultivo (Mj/m ² /día)	8.47	8.15	8.00	8.00	7.94	7.55	8.36	9.38	9.51	9.09	9.01	8.64
Flujo del calor del suelo (Mj/m ² /día)	-0.03	0.00	-0.04	0.01	-0.14	-0.15	-0.03	0.13	0.17	0.07	0.07	-0.06
Temperatura del aire a 2 m. de altura (°C)	12.1	12.1	11.8	11.9	10.9	9.8	9.6	10.5	11.7	12.2	12.7	12.3
EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO DIARIA	2.46	2.40	2.34	2.38	2.37	2.23	2.39	2.69	2.73	2.68	2.70	2.59
DIAS POR MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EVAPOTRANSPIRACION POR MES	76.37	67.10	72.45	71.51	73.32	67.01	74.03	83.41	82.04	83.02	80.94	80.14

Nota. Elaboración propia.

Tabla 13 - C*Evapotranspiración de la estación marcapomacocha*

Variable	Año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Velocidad del viento a 2 m. de altura (m/s)	2.51	2.87	2.82	2.79	2.88	2.82	2.84	2.79	2.82	2.78	2.82	2.93
Constante Psicométrica (kPa/°C)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06	0.05	0.06	0.06	0.06	0.06	0.06
Presión de vapor de saturación (kPa)	0.93	0.93	0.93	0.94	0.91	0.88	0.86	0.89	0.91	0.93	0.96	0.94
Presión del vapor real (kPa)	0.77	0.79	0.77	0.76	0.72	0.68	0.70	0.71	0.72	0.77	0.74	0.77
Radiación neta en la superficie del cultivo (Mj/m ² /día)	8.68	8.39	8.15	8.65	8.67	8.27	9.24	10.55	10.71	10.01	9.61	9.06
Flujo del calor del suelo (Mj/m ² /día)	0.00	-0.01	0.00	0.00	-0.09	-0.11	-0.08	0.07	0.09	0.08	0.05	-0.01
Temperatura del aire a 2 m. de altura (°C)	5.15	5.1	5.1	5.1	4.45	3.7	3.15	3.65	4.3	4.85	5.2	5.15
EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO DIARIA	2.01	1.89	1.89	2.02	2.06	1.99	2.01	2.29	2.38	2.22	2.30	2.10
DIAS POR MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EVAPOTRANSPIRACION POR MES	62.31	52.95	58.63	60.50	63.79	59.84	62.44	71.09	71.36	68.95	69.01	64.99

Nota. Elaboración propia.

Tabla 14 - C*Evapotranspiración de la estación pachachaca*

Variable	Año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Velocidad del viento a 2 m. de altura (m/s)	2.54	3.10	2.68	2.85	2.85	2.93	2.85	2.60	2.85	2.68	2.77	2.77
Constante Psicométrica (kPa/°C)	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04	0.04
Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07	0.07
Presión de vapor de saturación (kPa)	1.17	1.14	1.15	1.13	1.10	1.03	1.00	1.04	1.09	1.12	1.16	1.15
Presión del vapor real (kPa)	0.90	0.87	0.90	0.88	0.84	0.79	0.77	0.80	0.83	0.84	0.87	0.87
Radiación neta en la superficie del cultivo (Mj/m ² /día)	8.46	8.25	8.03	8.13	8.00	7.64	8.41	9.49	9.63	9.19	9.09	8.73
Flujo del calor del suelo (Mj/m ² /día)	0.08	-0.02	0.01	-0.08	-0.21	-0.16	-0.08	0.15	0.18	0.10	0.08	-0.02
Temperatura del aire a 2 m. de altura (°C)	8	7.85	7.9	7.3	5.8	4.65	4.05	5.1	6.35	7.05	7.6	7.45
EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO DIARIA	2.28	2.26	2.16	2.19	2.15	2.02	2.07	2.28	2.39	2.39	2.43	2.37
DIAS POR MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EVAPOTRANSPIRACION POR MES	70.70	63.27	67.06	65.76	66.64	60.65	64.12	70.82	71.83	74.12	72.95	73.61

Nota. Elaboración propia.

Tabla 15 - C*Evapotranspiración de la estación Santa Ana*

Variable	Año											
	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic
Velocidad del viento a 2 m. de altura (m/s)	1.53	1.79	1.94	1.95	1.78	1.59	1.88	1.81	1.78	1.49	1.63	1.51
Constante Psicométrica (kPa/°C)	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
Pendiente de la curva de presión de vapor (kPa/°C)	0.10	0.10	0.10	0.10	0.09	0.08	0.08	0.08	0.09	0.10	0.10	0.10
Presión de vapor de saturación (kPa)	1.61	1.60	1.58	1.58	1.59	1.50	1.49	1.56	1.62	1.66	1.72	1.66
Presión del vapor real (kPa)	1.18	1.21	1.18	1.12	1.08	0.93	0.89	0.91	1.01	1.11	1.09	1.16
Radiación neta en la superficie del cultivo (Mj/m ² /día)	8.46	8.25	8.09	8.05	7.85	7.38	8.14	9.19	9.39	9.04	9.05	8.73
Flujo del calor del suelo (Mj/m ² /día)	-0.10	0.01	0.06	-0.10	-0.14	-0.24	-0.14	0.15	0.20	0.17	0.11	0.01
Temperatura del aire a 2 m. de altura (°C)	12.8	12.9	13.3	12.6	11.6	9.9	8.9	10	11.4	12.6	13.4	13.5
EVAPOTRANSPIRACION PROMEDIO DIARIA	2.62	2.50	2.49	2.60	2.60	2.54	2.81	3.04	3.03	2.84	2.99	2.75
DIAS POR MES	31	28	31	30	31	30	31	31	30	31	30	31
EVAPOTRANSPIRACION POR MES	81.08	70.05	77.20	78.09	80.70	76.25	87.06	94.18	90.94	88.02	89.73	85.17

Nota. Elaboración propia.

Anexo D

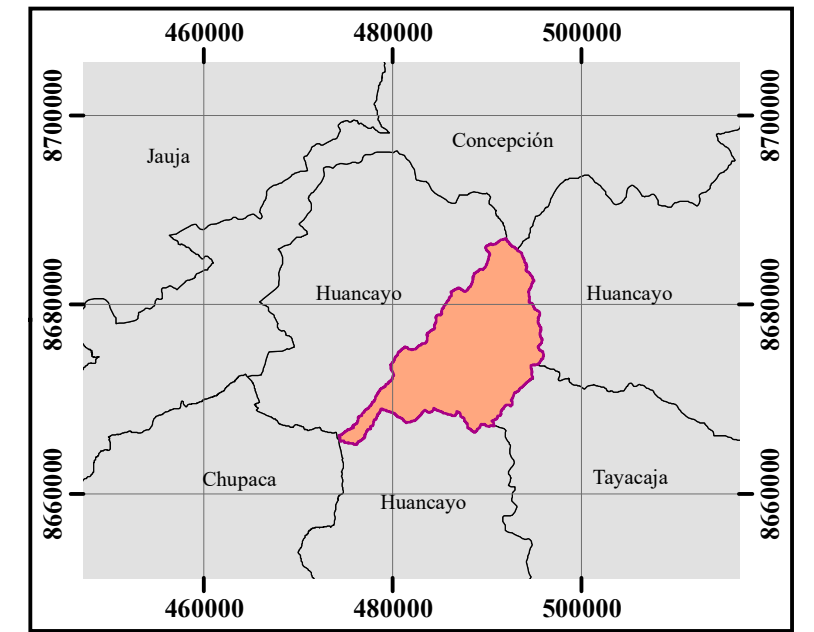
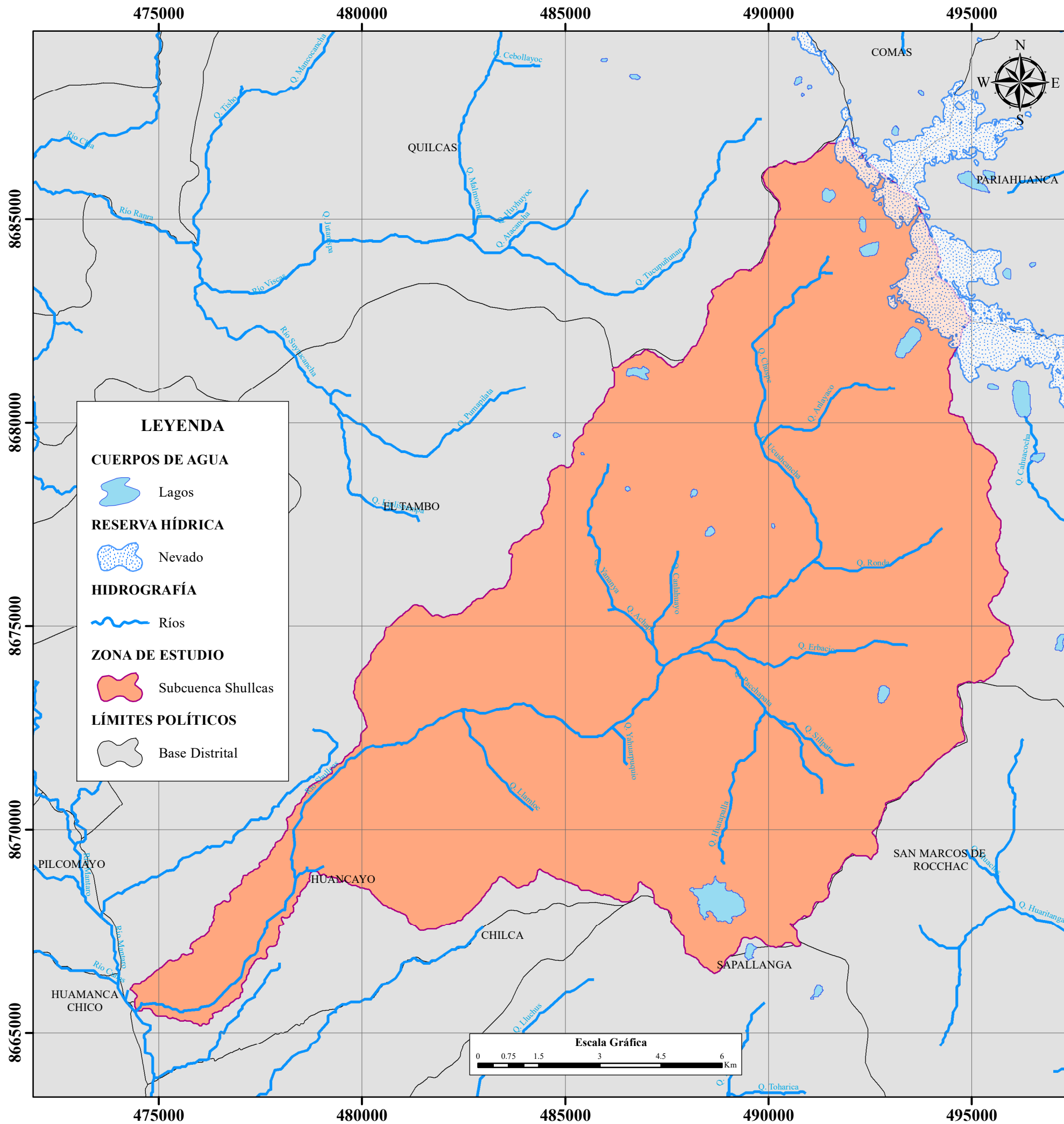
Matriz de consistencia

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA SUPERFICIE GLACIAR Y SU INFLUENCIA EN LA DISPONIBILIDAD HÍDRICA EN LA SUBCUENCA SHULLCAS

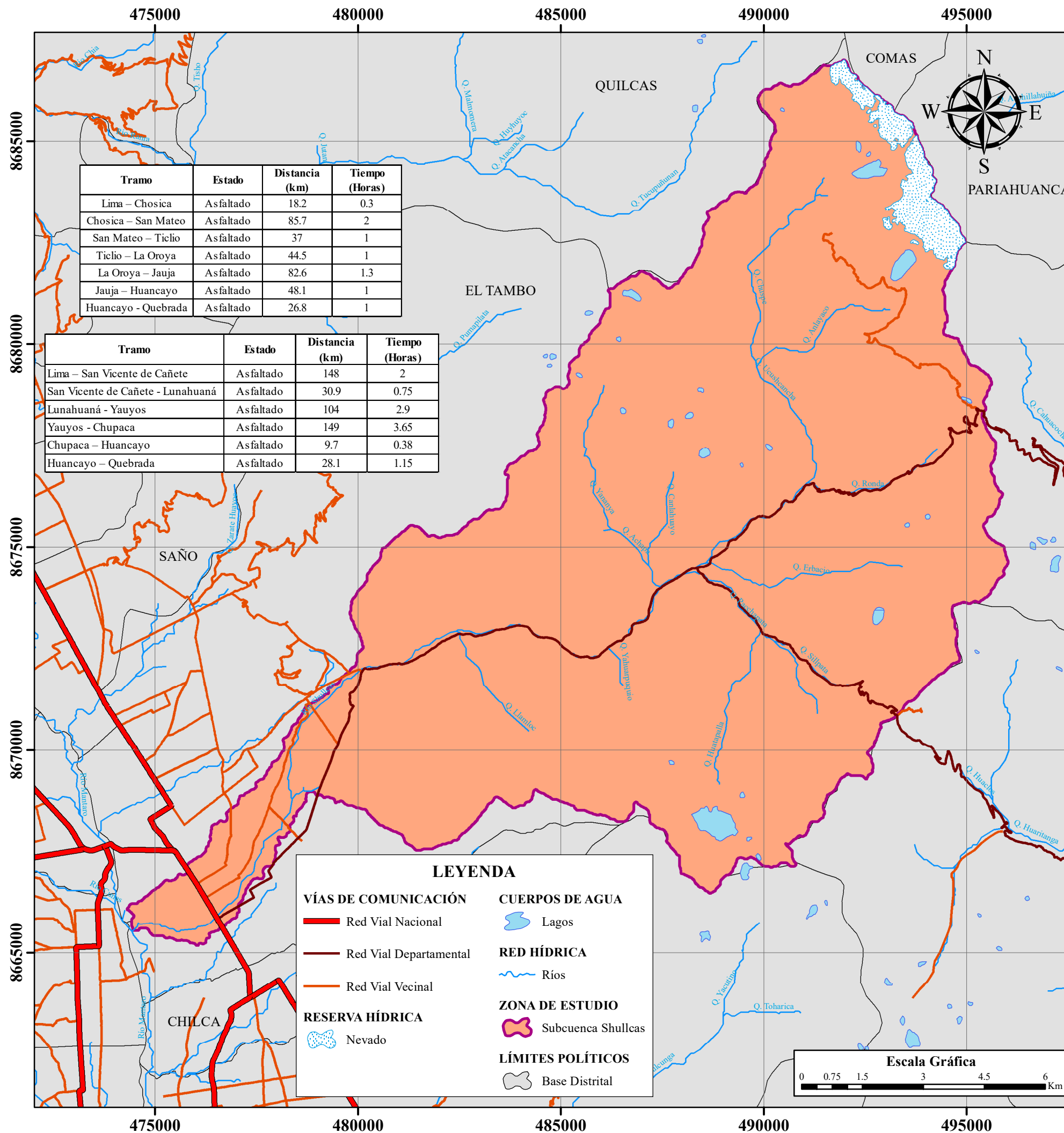
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODO	INDICADORES
<p>Problema Principal</p> <p>¿Cómo influye el cambio de la superficie glaciar en el aporte hídrico de la subcuena Shullcas?</p> <p>Problemas Específicos</p> <p>¿Cuánto fue la variación de la superficie glaciar entre los años 1989 – 2019 en la cordillera Huaytapallana?</p> <p>¿Cómo es el comportamiento hidrometeorológico en la subcuena del río Shullcas durante la época de estiaje?</p> <p>¿Cuánto será el cambio de la superficie glaciar en la subcuena Shullcas en un posible escenario posible?</p>	<p>Objetivo General</p> <p>Determinar el cambio de la superficie glaciar y su influencia en el aporte hídrico en la subcuena Shullcas – Río Mantaro</p> <p>Objetivos Específicos</p> <p>Determinar el cambio de la superficie glaciar mediante técnicas de teledetección y SIG en la subcuena Shullcas durante el periodo de 1990 – 2020</p> <p>Analizar el comportamiento hidrometeorológico de la subcuena Shullcas con la finalidad de conocer sus escenarios futuros.</p> <p>Determinar la tendencia evolutiva de la superficie glaciar y el aporte hídrico por deshielo en la subcuena Shullcas, con la finalidad de conocer sus escenarios futuros.</p>	<p>El retroceso glaciar influye de manera desfavorable en el aporte hídrico de la subcuena Shullcas.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>Superficie glaciar.</p> <p>Variable Dependiente</p> <p>Disponibilidad hídrica.</p>	<p>Tipos de Investigación</p> <p>Investigación cuantitativa.</p> <p>Alcance</p> <p>Alcance correlacional.</p> <p>Diseño</p> <p>Diseño no experimental – longitudinal o evolutivo.</p> <p>Ámbito temporal y espacial</p> <p>Se desarrollará un diagnóstico del cambio de la superficie glaciar en la Subcuena Shullcas, que se encuentra ubicado en la provincia de Huancayo - Región Junín, durante el periodo de 1990 - 2020.</p> <p>Muestra</p> <p>Subcuena Shullcas.</p> <p>Instrumento</p> <p>Imágenes satelitales.</p>	<p>Variable Independiente</p> <p>Precipitación (mm) Temperatura (°C) Área glaciar (Km²) Reflectancia (%) Altitud (m) Radiación (J)</p> <p>Variable Dependiente</p> <p>Escorrentía (mm) Volumen glaciar (m³) Caudal (m³/s) Precipitación (mm) Temperatura (°C) Evaporación (mm)</p>

Anexo E.

Mapas temáticos de la investigación



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
<i>Mapa de ubicación de la subcuenca del río Shullcas</i>			
Tesis:			
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista:		Asesor:	
Bach. Royers Tunque Raymundo		Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración:	Escala Numérica:	Formato:	
18/05/2022	1/100 000	A3	
Fuente:	Proyección:	Mapa:	
DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú	DATUM WGS - 84, ZONA 18S	01	

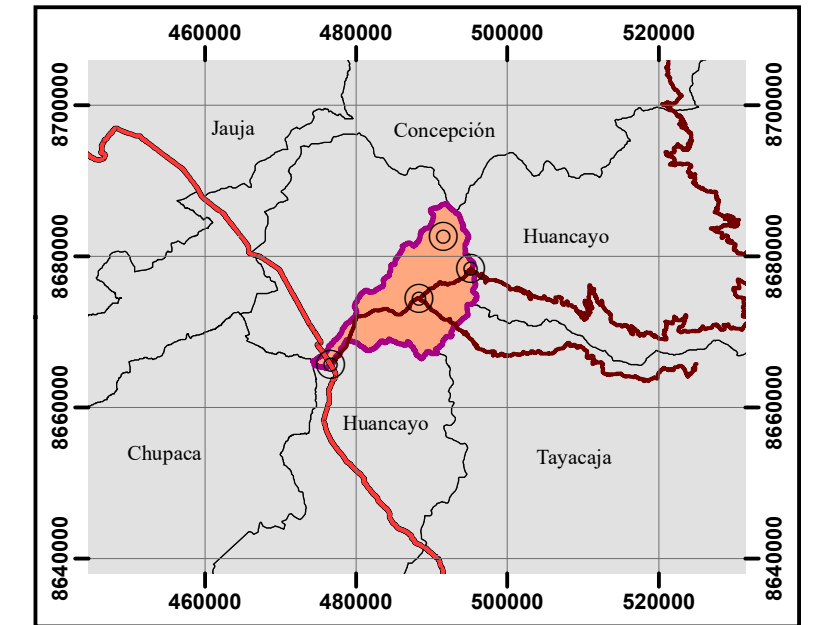
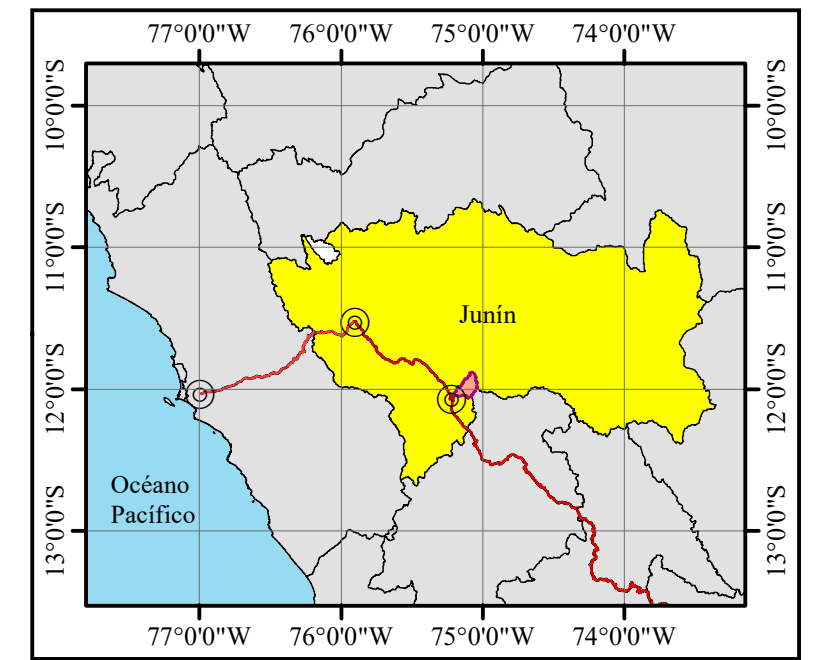
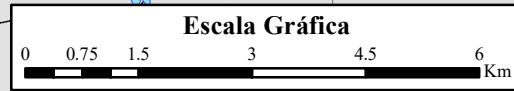


Tramo	Estado	Distancia (km)	Tiempo (Horas)
Lima – Chosica	Asfaltado	18.2	0.3
Chosica – San Mateo	Asfaltado	85.7	2
San Mateo – Ticlio	Asfaltado	37	1
Ticlio – La Oroya	Asfaltado	44.5	1
La Oroya – Jauja	Asfaltado	82.6	1.3
Jauja – Huancayo	Asfaltado	48.1	1
Huancayo – Quebrada	Asfaltado	26.8	1

Tramo	Estado	Distancia (km)	Tiempo (Horas)
Lima – San Vicente de Cañete	Asfaltado	148	2
San Vicente de Cañete - Lunahuaná	Asfaltado	30.9	0.75
Lunahuaná - Yauyos	Asfaltado	104	2.9
Yauyos - Chupaca	Asfaltado	149	3.65
Chupaca – Huancayo	Asfaltado	9.7	0.38
Huancayo – Quebrada	Asfaltado	28.1	1.15

LEYENDA

VÍAS DE COMUNICACIÓN	CUERPOS DE AGUA
Red Vial Nacional	Lagos
Red Vial Departamental	RED HÍDRICA
Red Vial Vecinal	Ríos
RESERVA HÍDRICA	ZONA DE ESTUDIO
Nevado	Subcuenca Shullcas
	LÍMITES POLÍTICOS
	Base Distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
 Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
 Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

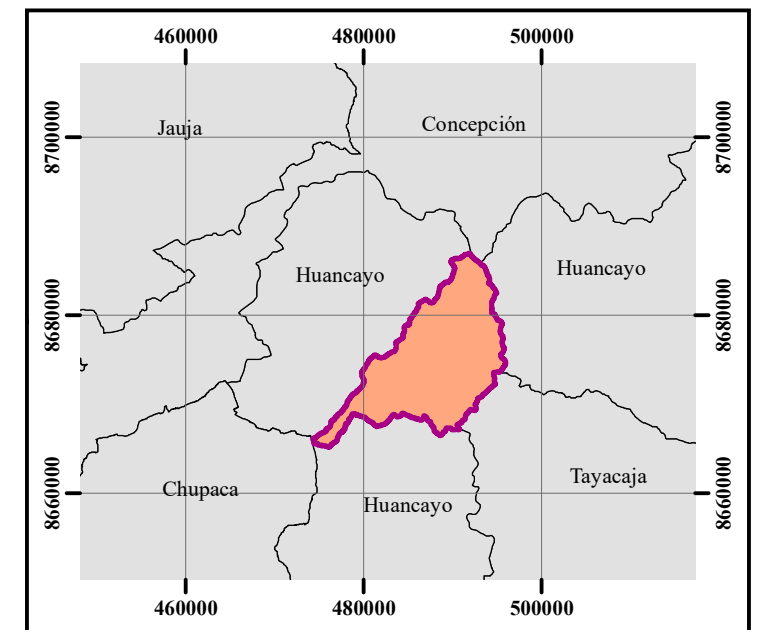
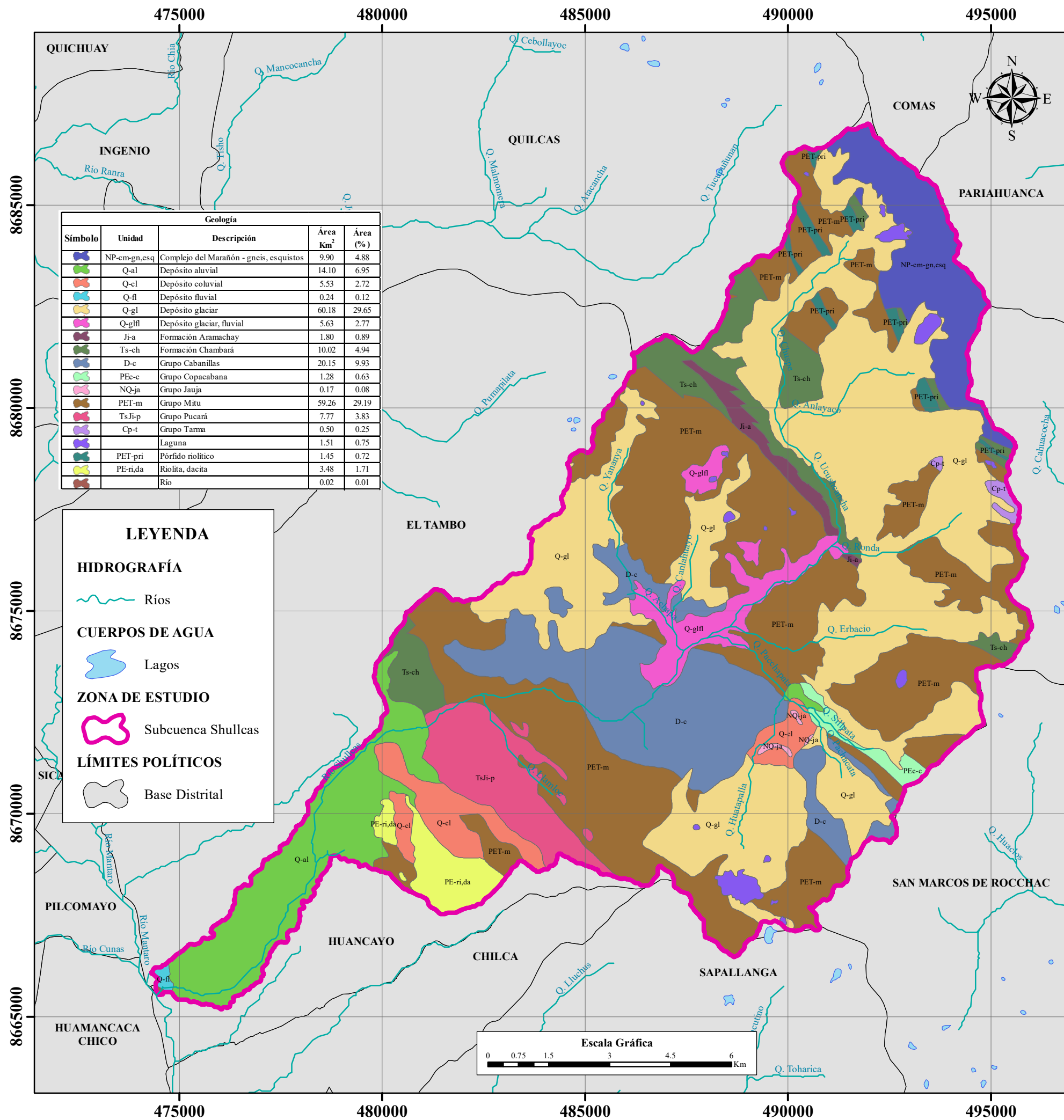
Mapa de transporte y comunicación de la subcuenca del río Shullcas

Tesis:
 "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

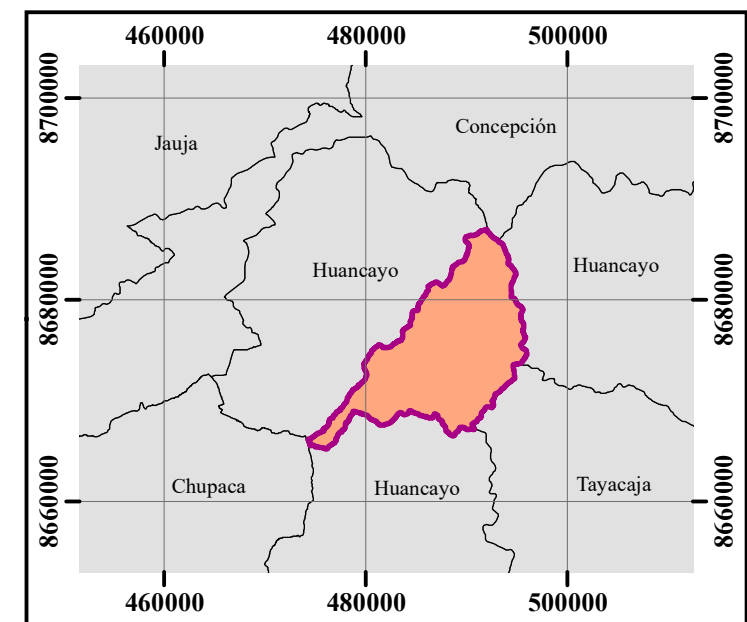
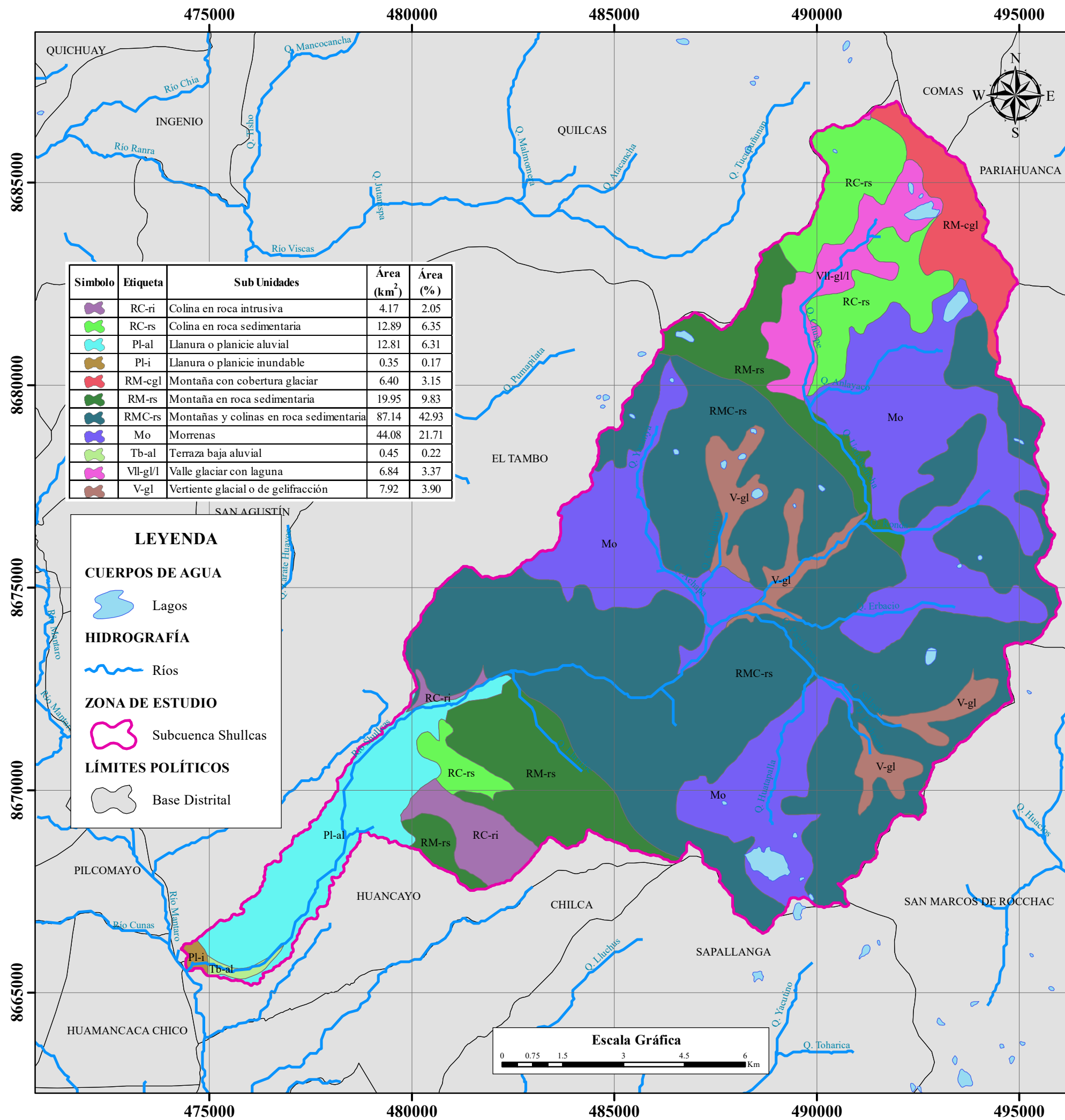
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo	Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda
---	--

F. de Elaboración: 31/05/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
---	--------------------------------------	------------------------------

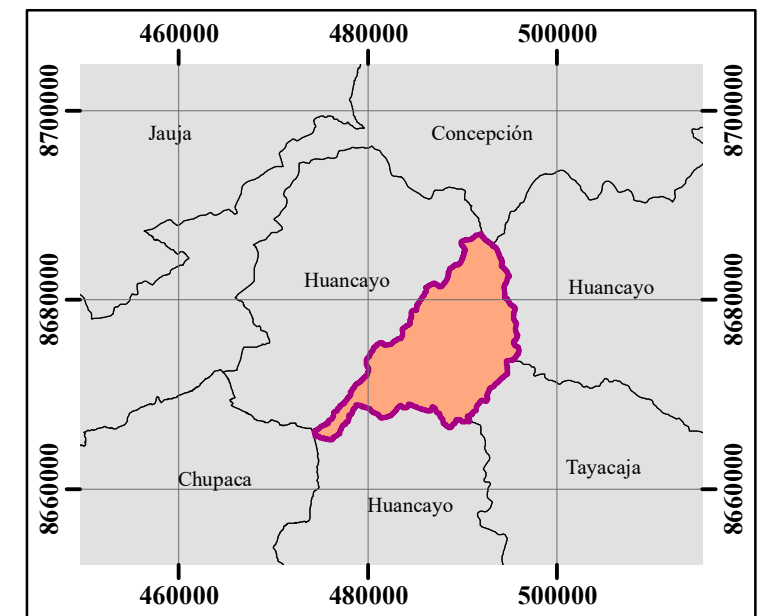
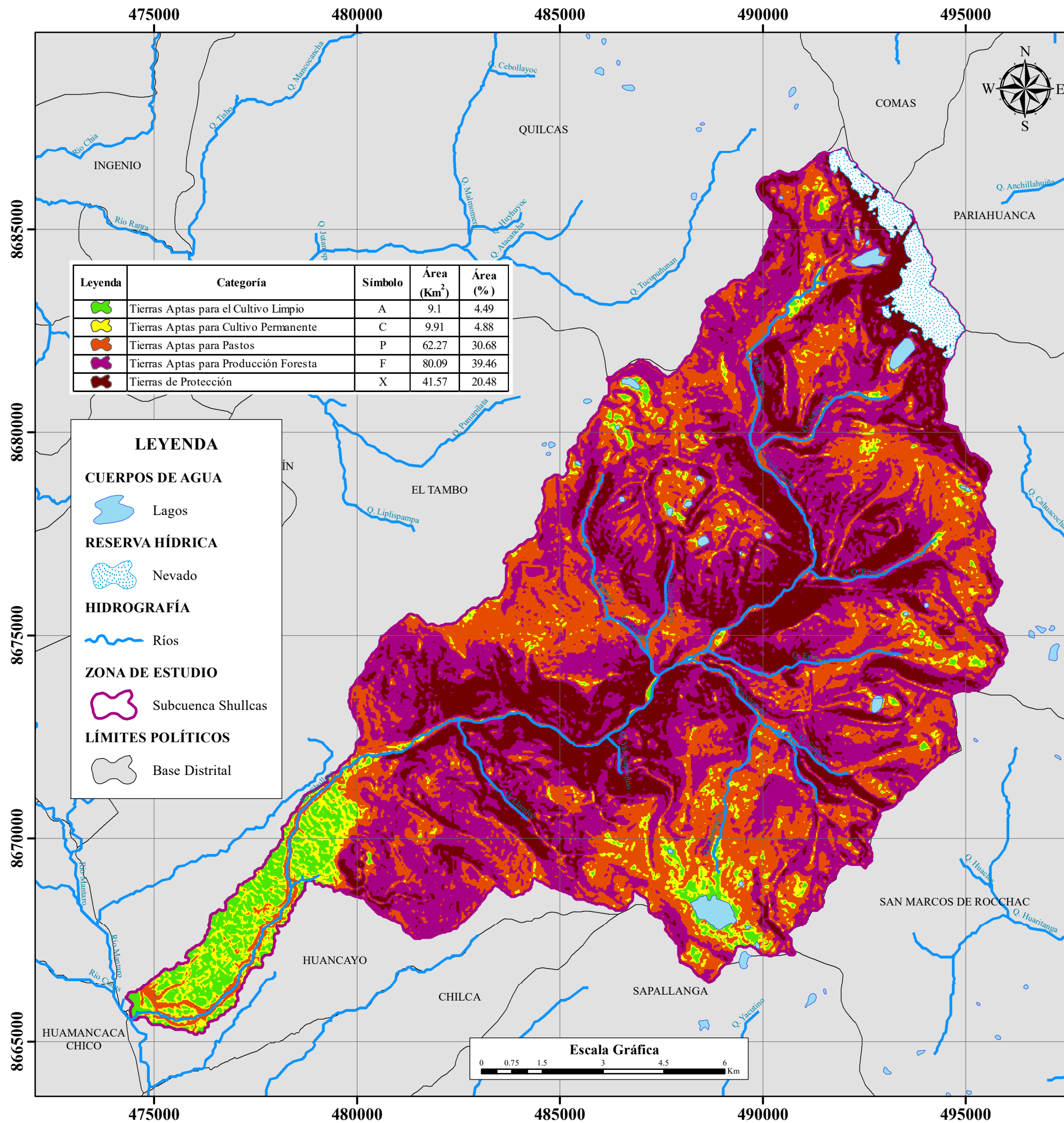
Fuente: DEM ALOS 30m, Geo servidor del MTC - Perú	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 02
---	--	---------------------------



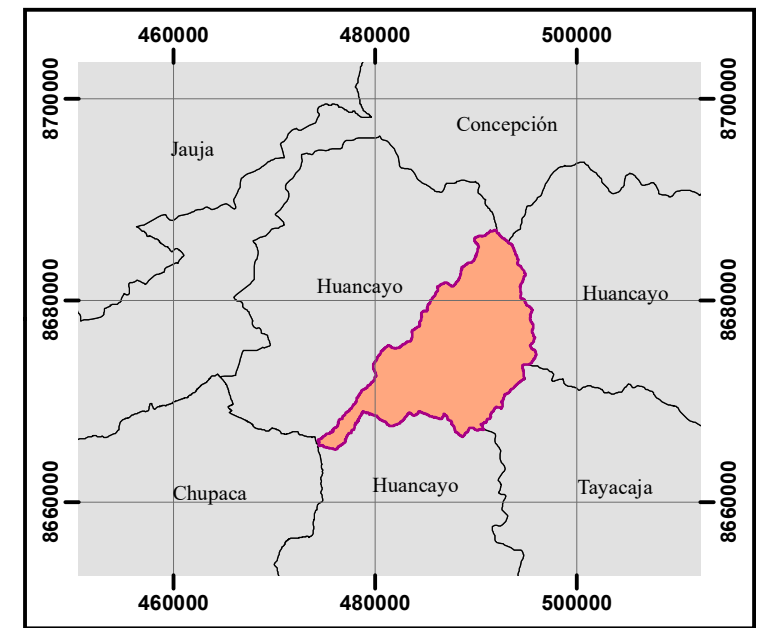
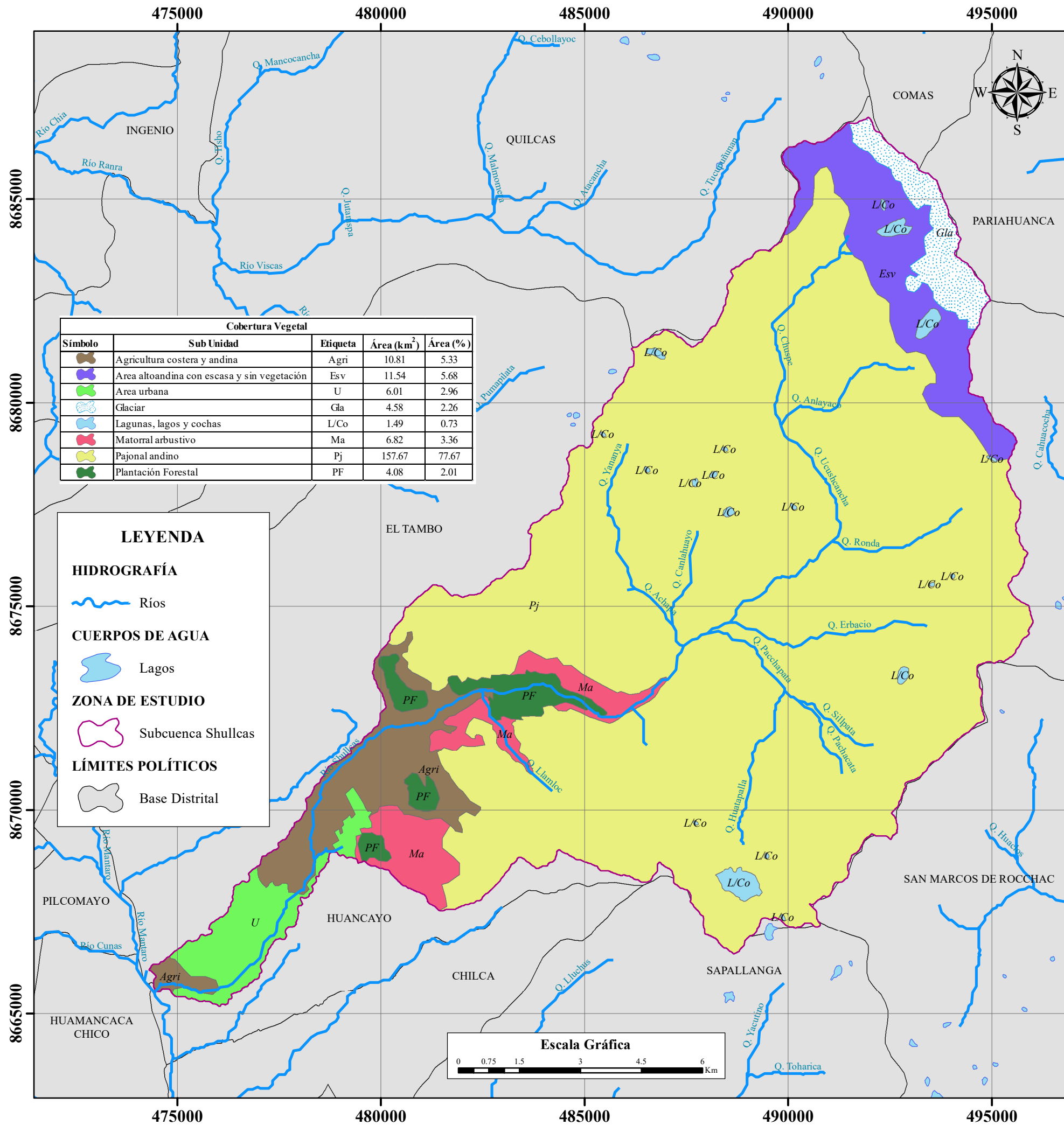
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL		
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo		
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental		
Mapa geológico de la subcuenca del Río Shullcas		
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"		
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo	Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 18/05/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del INGENMET - Perú	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 03



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa geomorfológico de la Subcuenca del Río Shullcas			
Tesis:			
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista:		Asesor:	
Bach. Royers Tunque Raymundo		Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración:	Escala Numérica:	Formato:	
25/05/2022	1/100 000	A3	
Fuente:	Proyección:	Mapa:	
DEM ALOS 30m, Geoservidor del INGENMET - Perú	DATUM WGS - 84, ZONA 18S	04	



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de uso mayor de suelos de la Subcuenca del Río Shullcas			
Tesis:			
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista:		Asesor:	
Bach. Royers Tunque Raymundo		Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración:	Escala Numérica:	Formato:	
17/05/2022	1/100 000	A3	
Fuente:	Proyección:	Mapa:	
DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú	DATUM WGS - 84, ZONA 18S	05	



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Mapa de cobertura vegetal de la Subcuenca del Río Shullcas

Tesis:

"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo

Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 18/05/2022

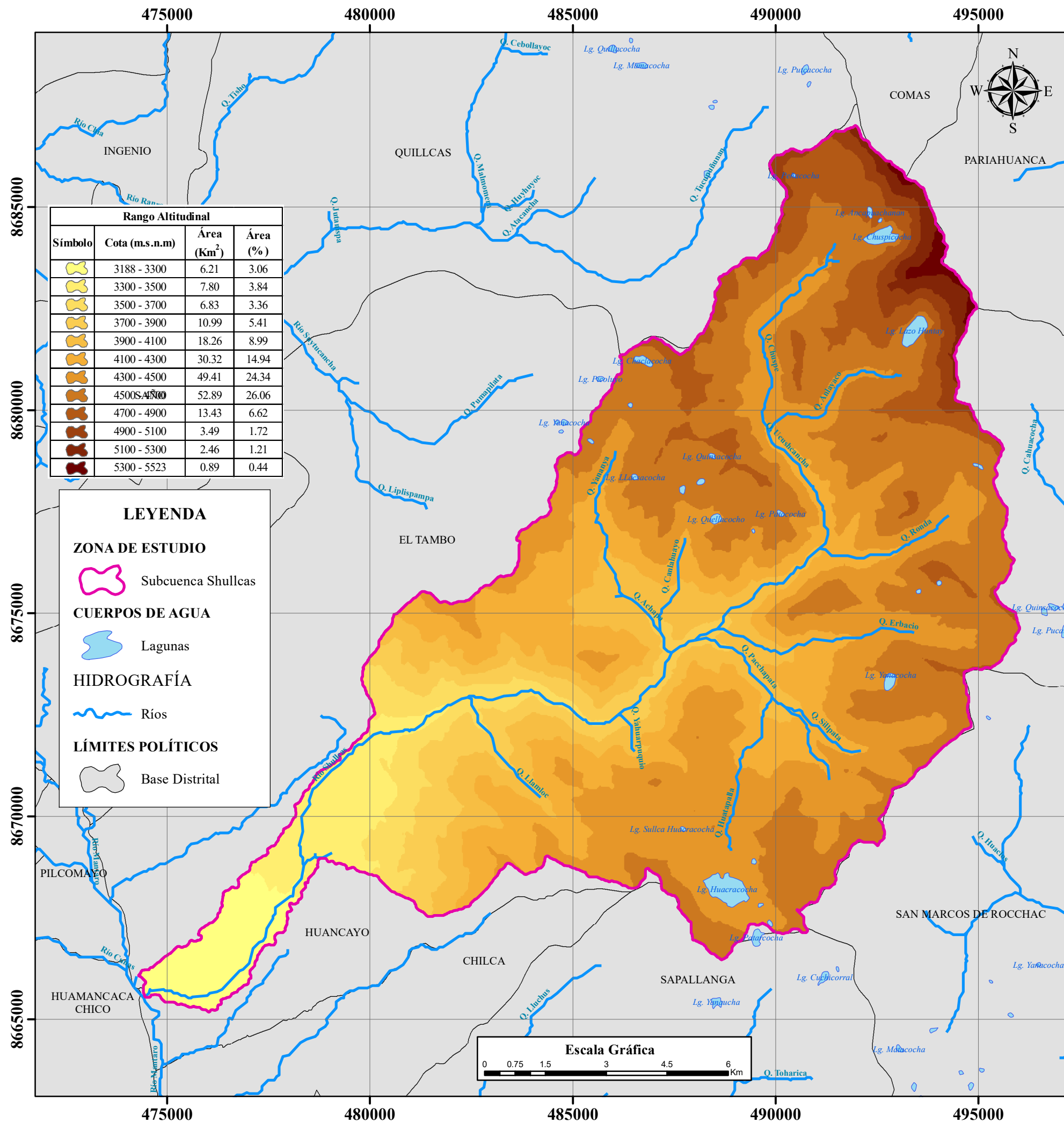
Escala Numérica: 1/100 000

Formato: A3

Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM - Perú

Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S

Mapa: 06



Rango Altitudinal			
Símbolo	Cota (m.s.n.m)	Área (Km ²)	Área (%)
	3188 - 3300	6.21	3.06
	3300 - 3500	7.80	3.84
	3500 - 3700	6.83	3.36
	3700 - 3900	10.99	5.41
	3900 - 4100	18.26	8.99
	4100 - 4300	30.32	14.94
	4300 - 4500	49.41	24.34
	4500 - 4700	52.89	26.06
	4700 - 4900	13.43	6.62
	4900 - 5100	3.49	1.72
	5100 - 5300	2.46	1.21
	5300 - 5523	0.89	0.44

LEYENDA

ZONA DE ESTUDIO

- Subcuenca Shullcas

CUERPOS DE AGUA

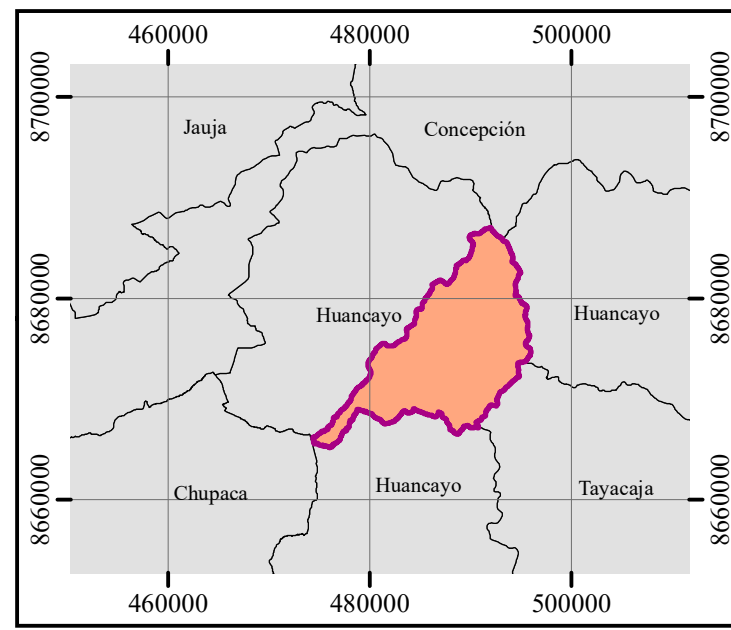
- Lagunas

HIDROGRAFÍA

- Ríos

LÍMITES POLÍTICOS

- Base Distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

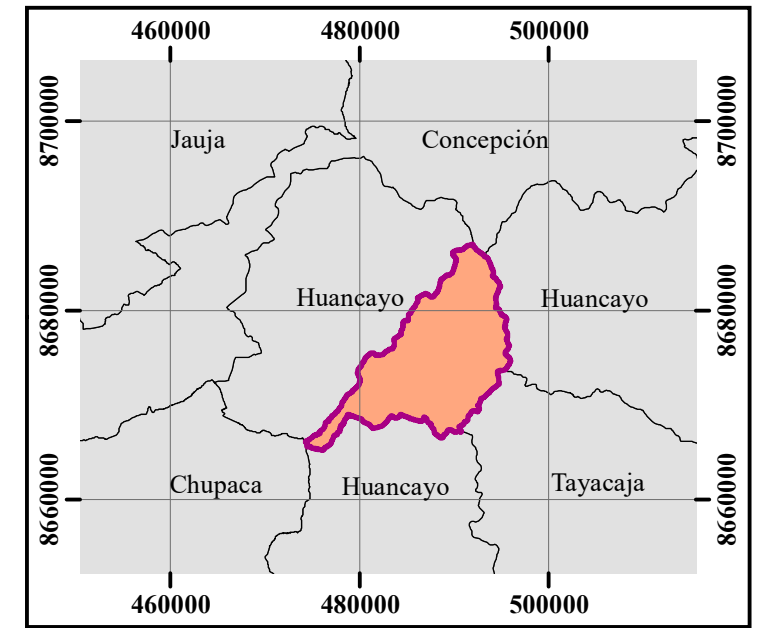
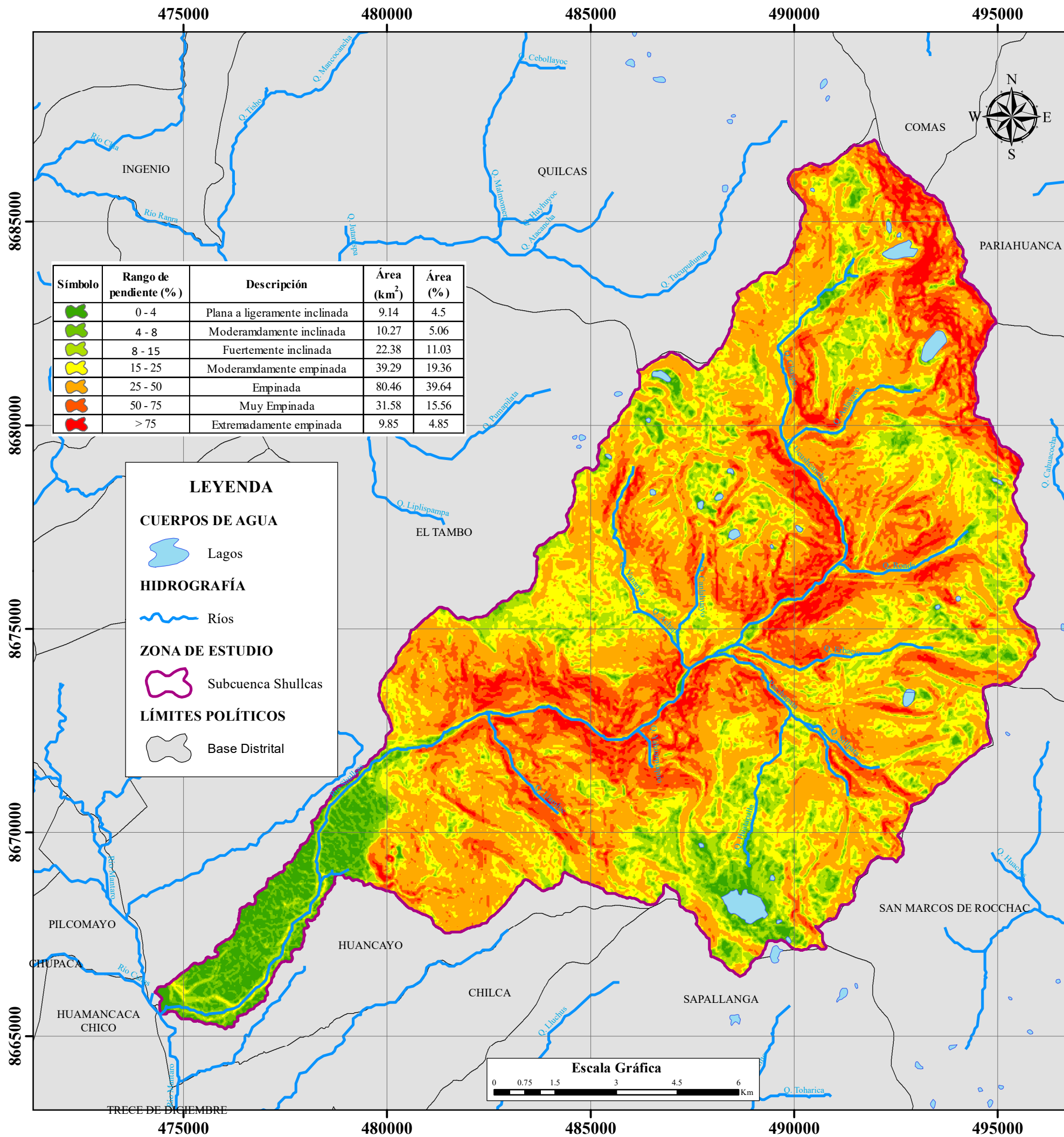
Mapa de Rango Altitudinal de la Subcuenca del Río Shullcas

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo

Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 14/12/2021	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 07



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

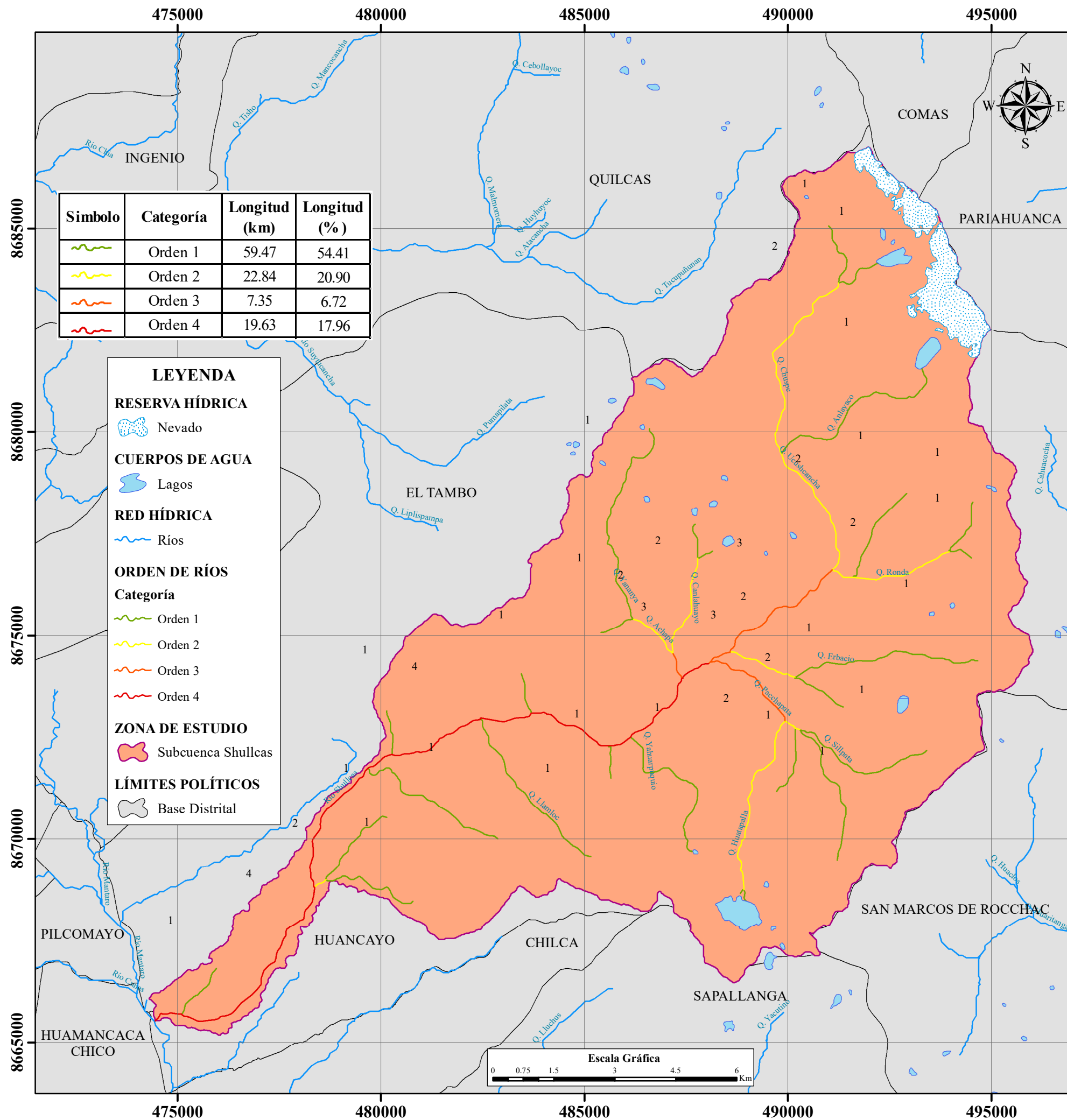
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Mapa de pendientes de la Subcuenca del Río Shullcas

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo **Asesor:** Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 18/05/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 08



Simbolo	Categoría	Longitud (km)	Longitud (%)
	Orden 1	59.47	54.41
	Orden 2	22.84	20.90
	Orden 3	7.35	6.72
	Orden 4	19.63	17.96

LEYENDA

RESERVA HÍDRICA

- Nevado

CUERPOS DE AGUA

- Lagos

RED HÍDRICA

- Ríos

ORDEN DE RÍOS

Categoría

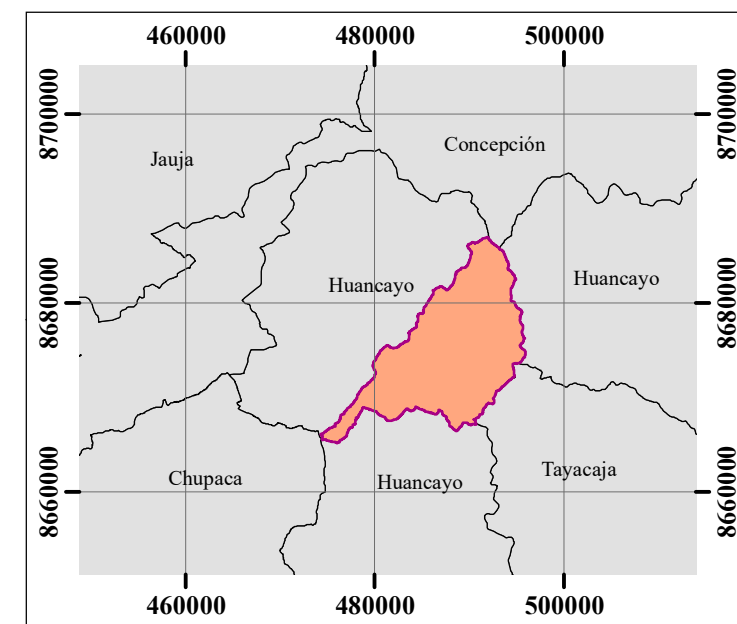
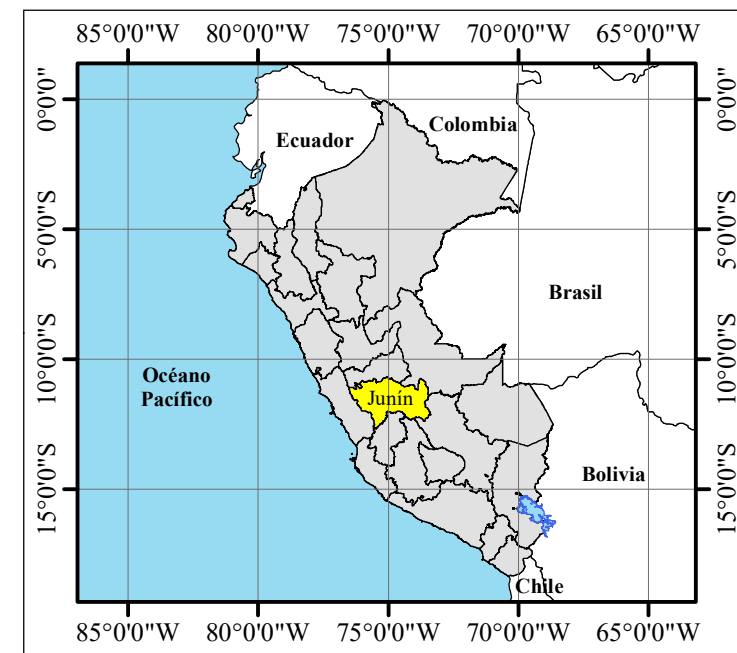
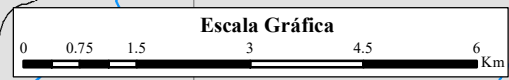
- Orden 1
- Orden 2
- Orden 3
- Orden 4

ZONA DE ESTUDIO

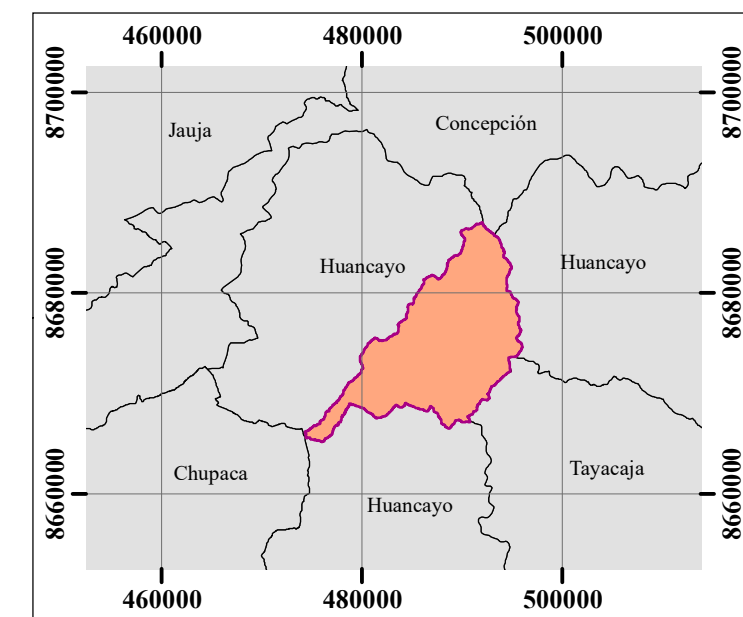
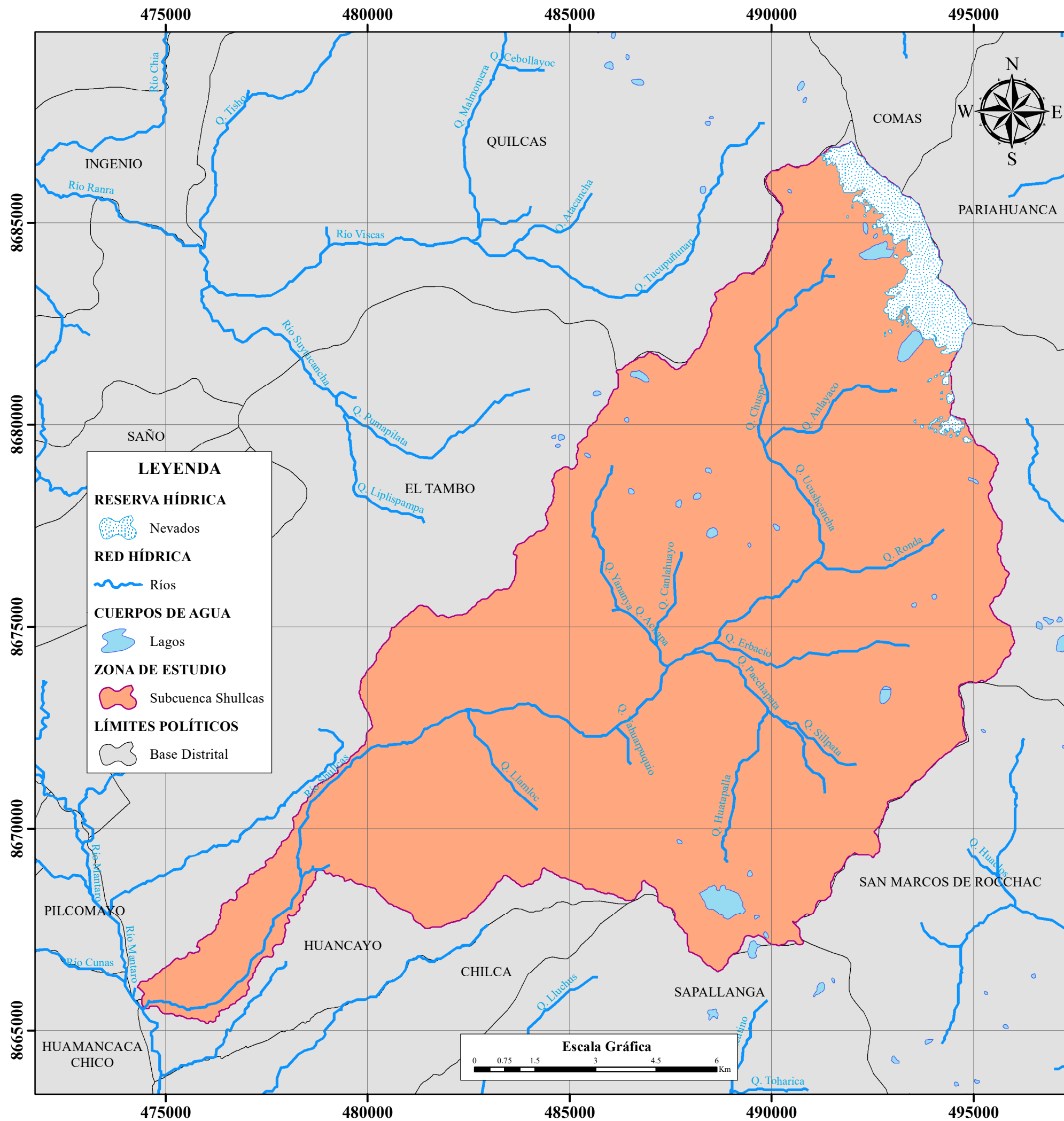
- Subcuenca Shullcas

LÍMITES POLÍTICOS

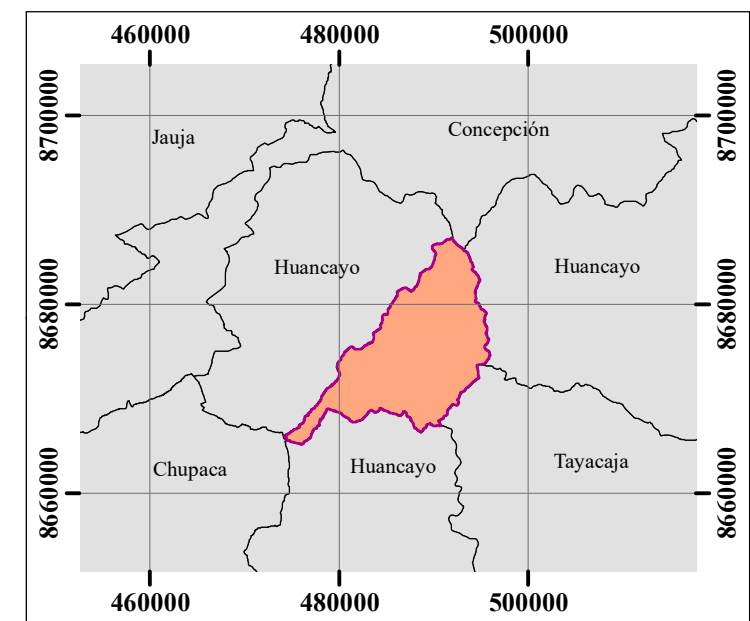
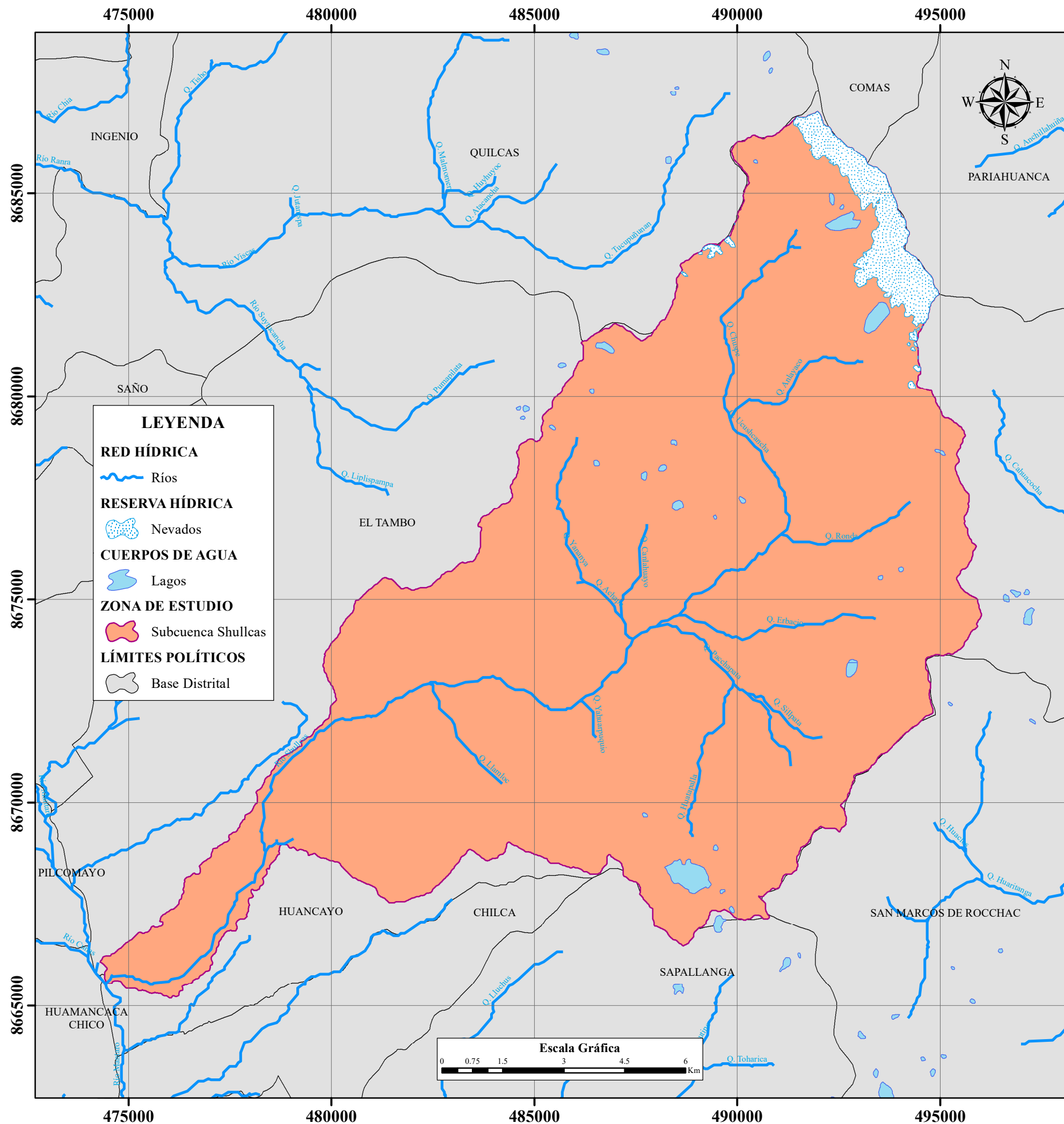
- Base Distrital




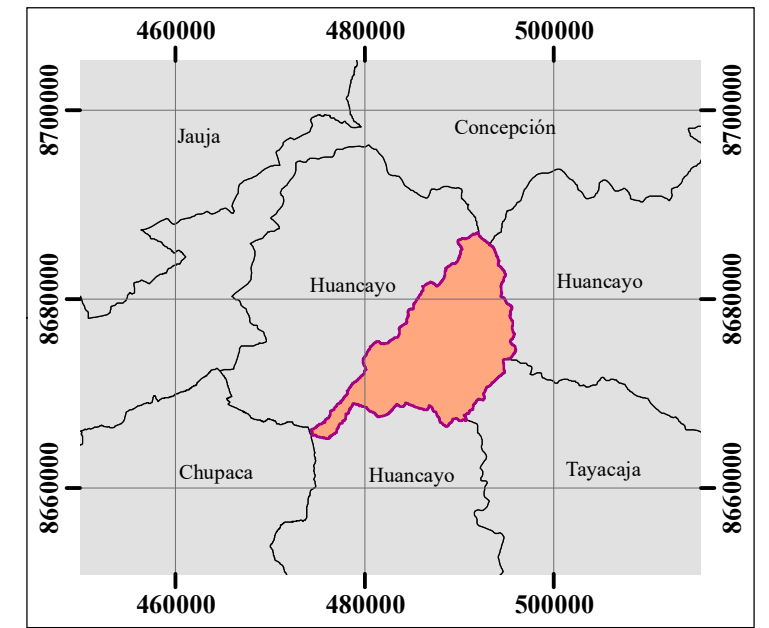
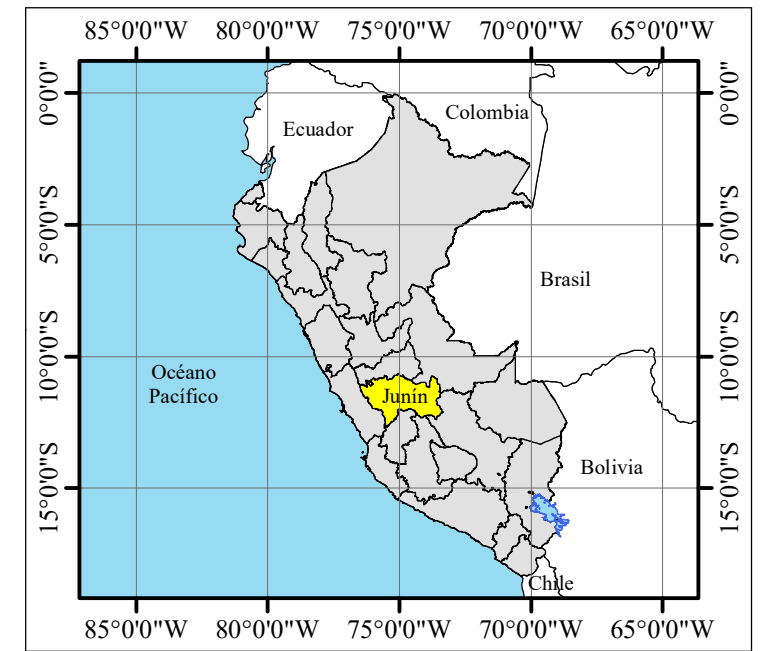
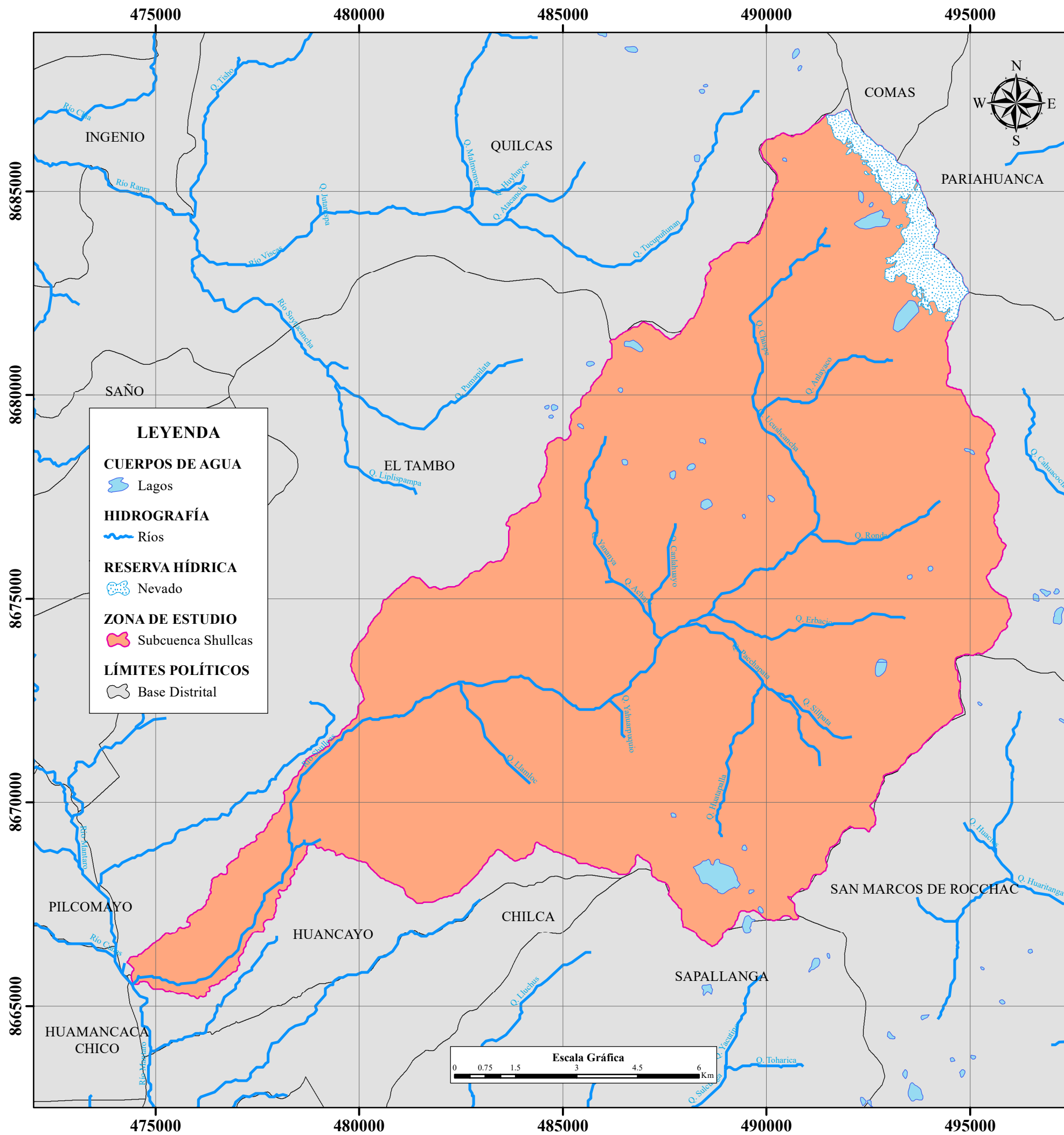
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de orden de la red hídrica de la subcuenca del río Shullcas			
Tesis:			
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista:		Asesor:	
Bach. Royers Tunque Raymundo		Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración:	Escala Numérica:	Formato:	
12/06/2022	1/100 000	A3	
Fuente:	Proyección:	Mapa:	
DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú	DATUM WGS - 84, ZONA 18S	09	



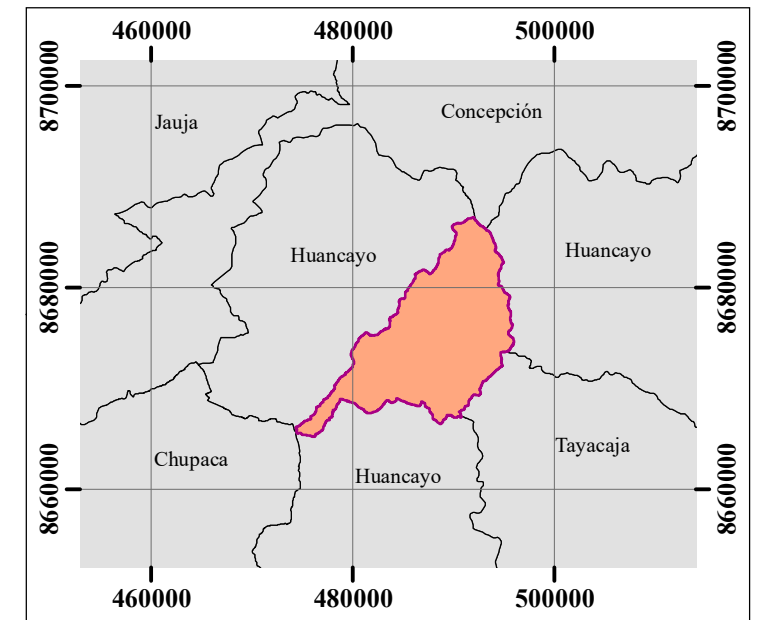
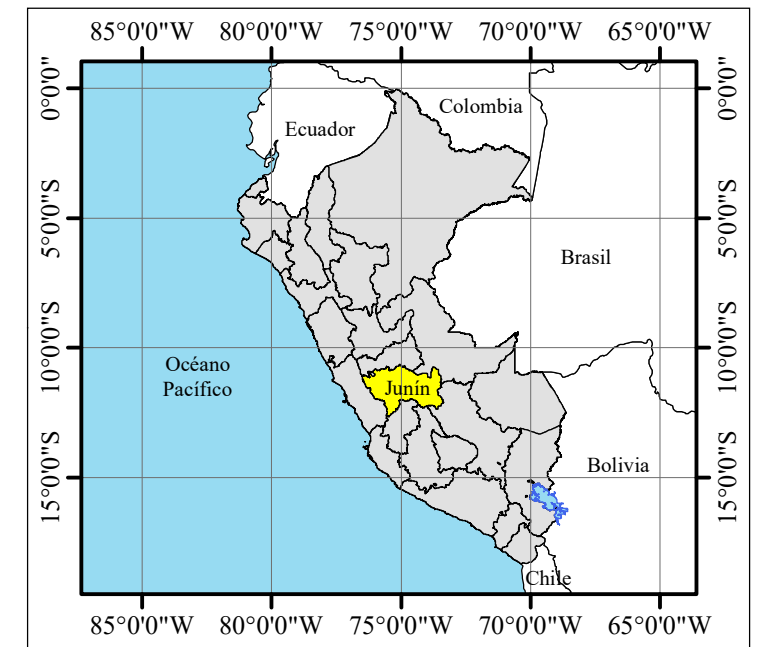
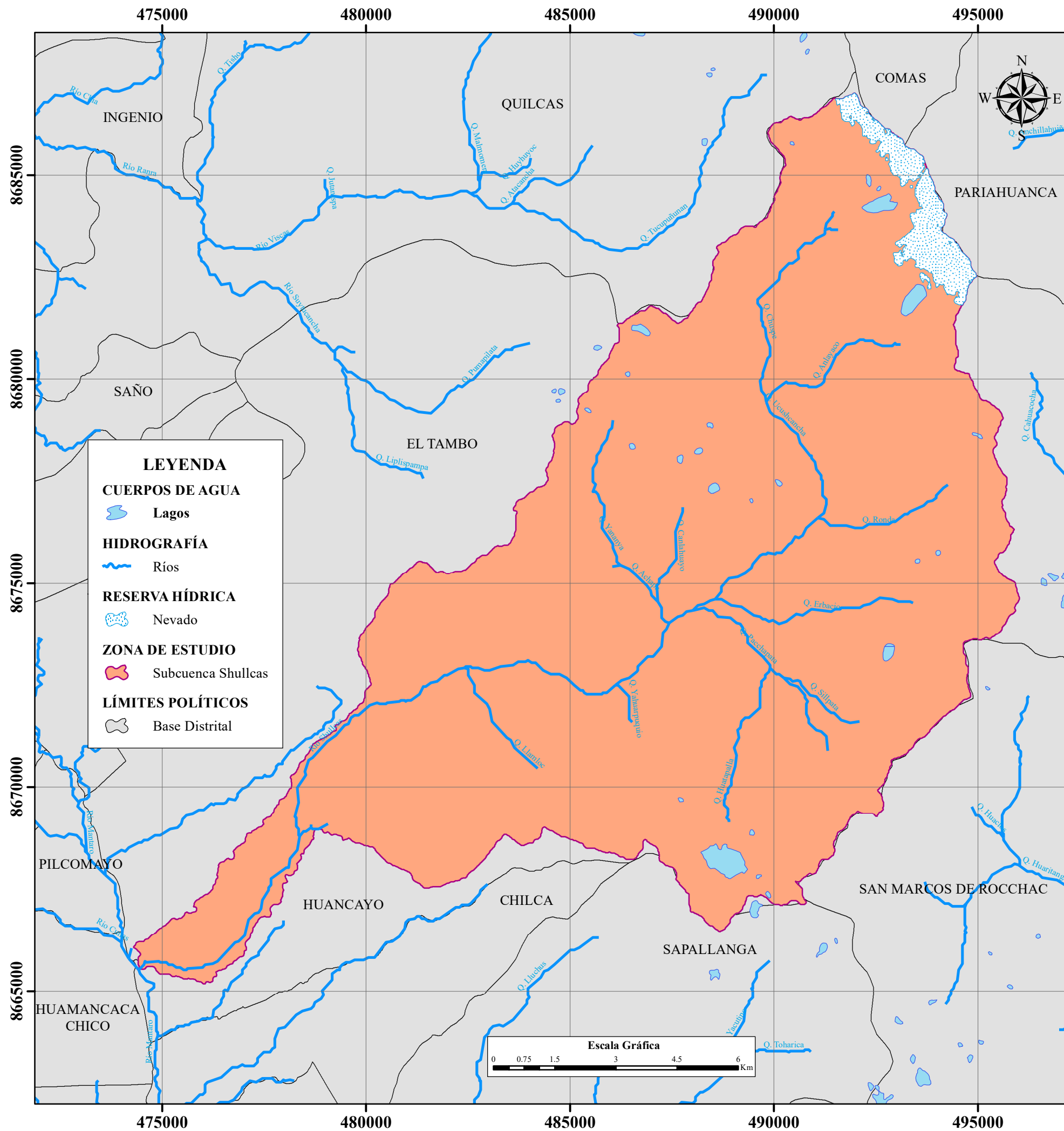
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de la cobertura glaciar en la subcuenca del río Shullcas en el año 1990			
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo		Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 14/12/2021	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3	
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, USGS.	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 10	



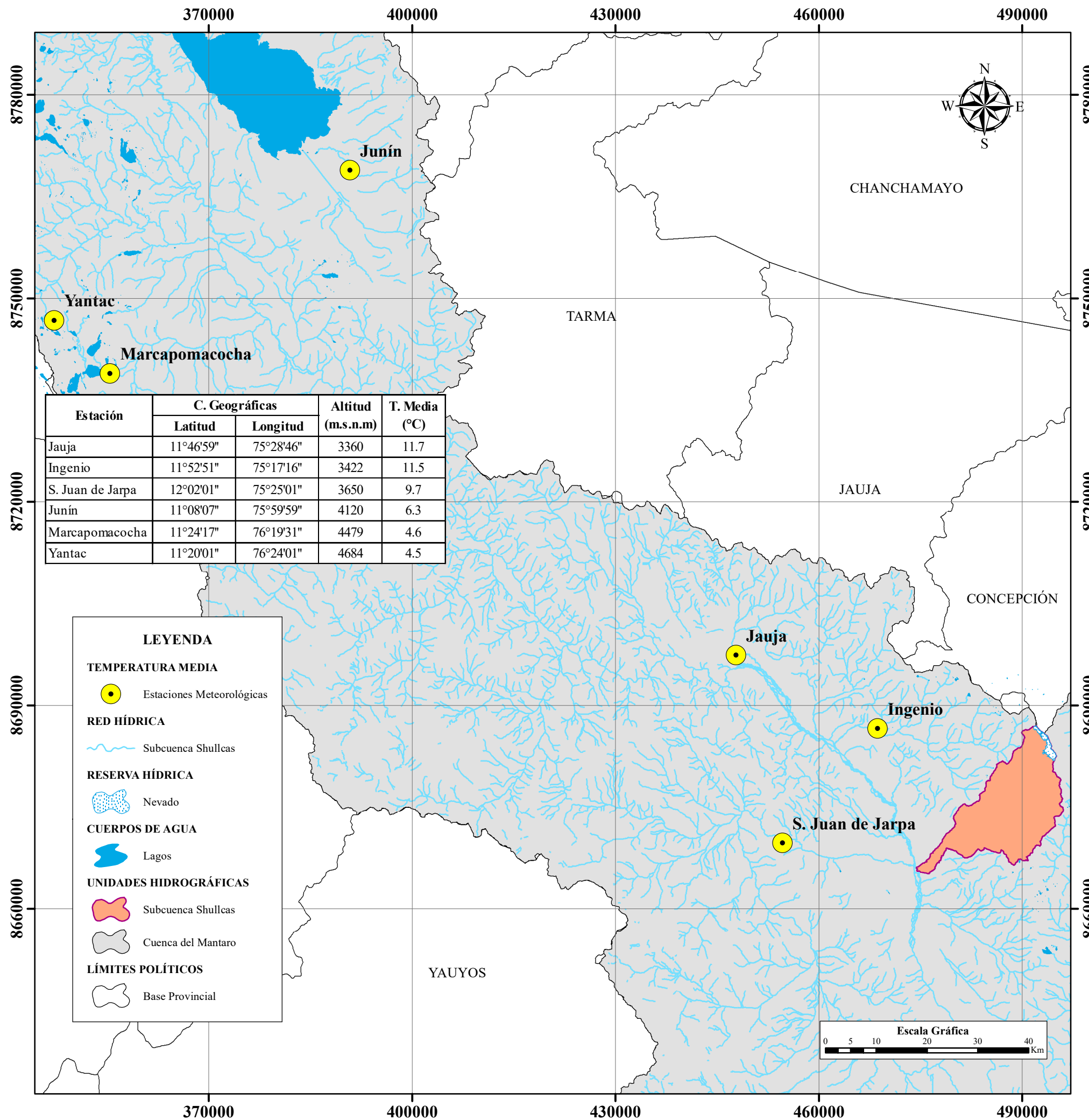
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de la cobertura glaciar en la subcuenca del río Shullcas en el año 1999			
Tesis:			
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista:		Asesor:	
Bach. Royers Tunque Raymundo		Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración:	Escala Numérica:	Formato:	
10/06/2022	1/100 000	A3	
Fuente:	Proyección:	Mapa:	
DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, USGS.	DATUM WGS - 84, ZONA 18S	12	



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL		
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo		
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental		
Mapa de la cobertura glaciar en la subcuenca del río Shullcas en el año 2009		
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"		
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo	Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 12/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del M INEDU - Perú, USGS.	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 14



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL			
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo			
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de la cobertura glaciaria en la subcuenca del río Shullcas en el año 2014			
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciaria y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo		Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 10/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3	
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, USGS.	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 15	



Estación	C. Geográficas		Altitud (m.s.n.m)	T. Media (°C)
	Latitud	Longitud		
Jauja	11°46'59"	75°28'46"	3360	11.7
Ingenio	11°52'51"	75°17'16"	3422	11.5
S. Juan de Jarpa	12°02'01"	75°25'01"	3650	9.7
Junín	11°08'07"	75°59'59"	4120	6.3
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	4479	4.6
Yantac	11°20'01"	76°24'01"	4684	4.5

LEYENDA

TEMPERATURA MEDIA

- Estaciones Meteorológicas

RED HÍDRICA

- Subcuenca Shullcas

RESERVA HÍDRICA

- Nevado

CUERPOS DE AGUA

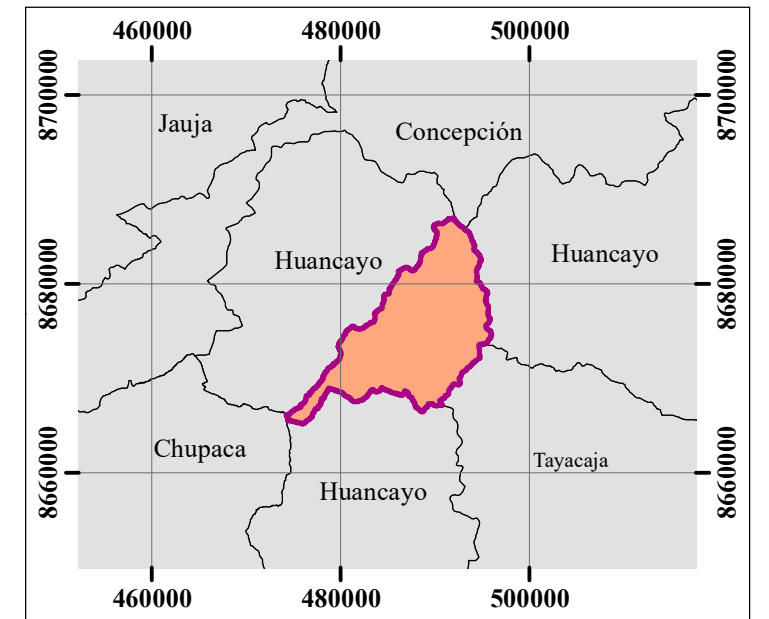
- Lagos

UNIDADES HIDROGRÁFICAS

- Subcuenca Shullcas
- Cuenca del Mantaro

LÍMITES POLÍTICOS

- Base Provincial



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

Mapa de estaciones de temperatura media

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo

Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 14/06/2022

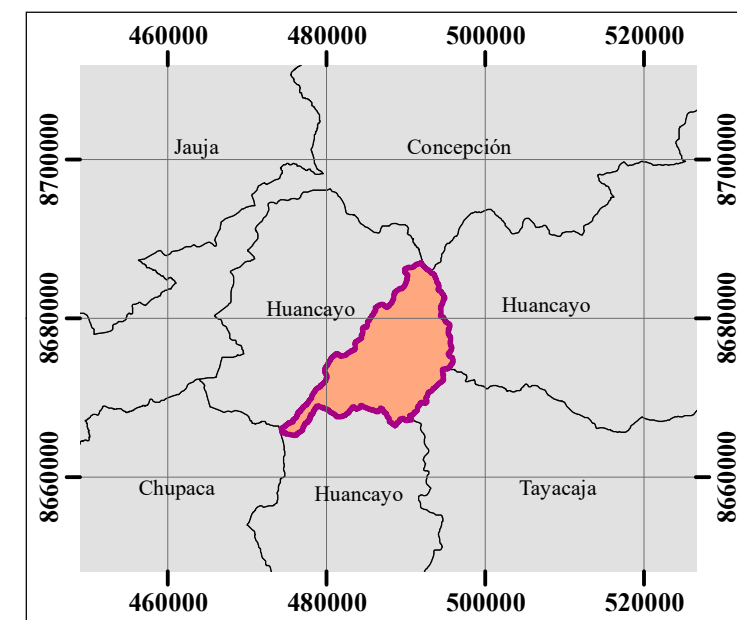
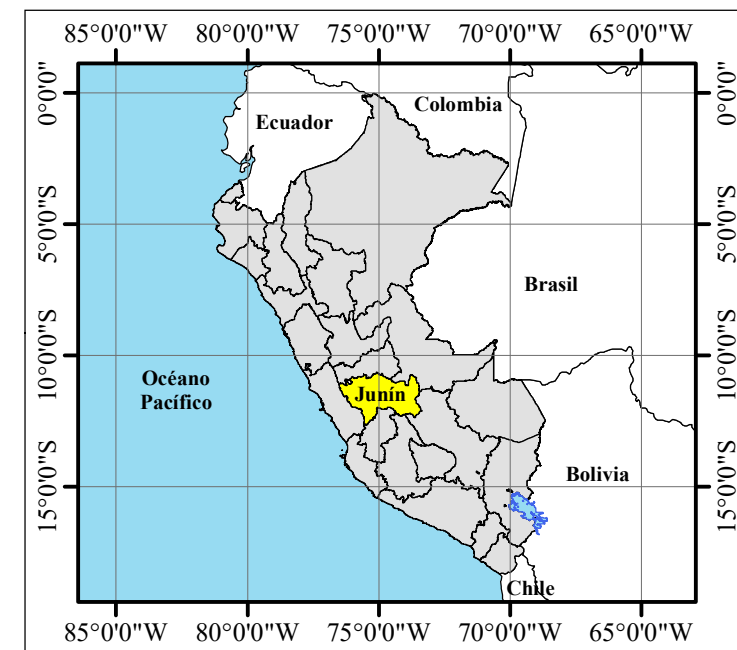
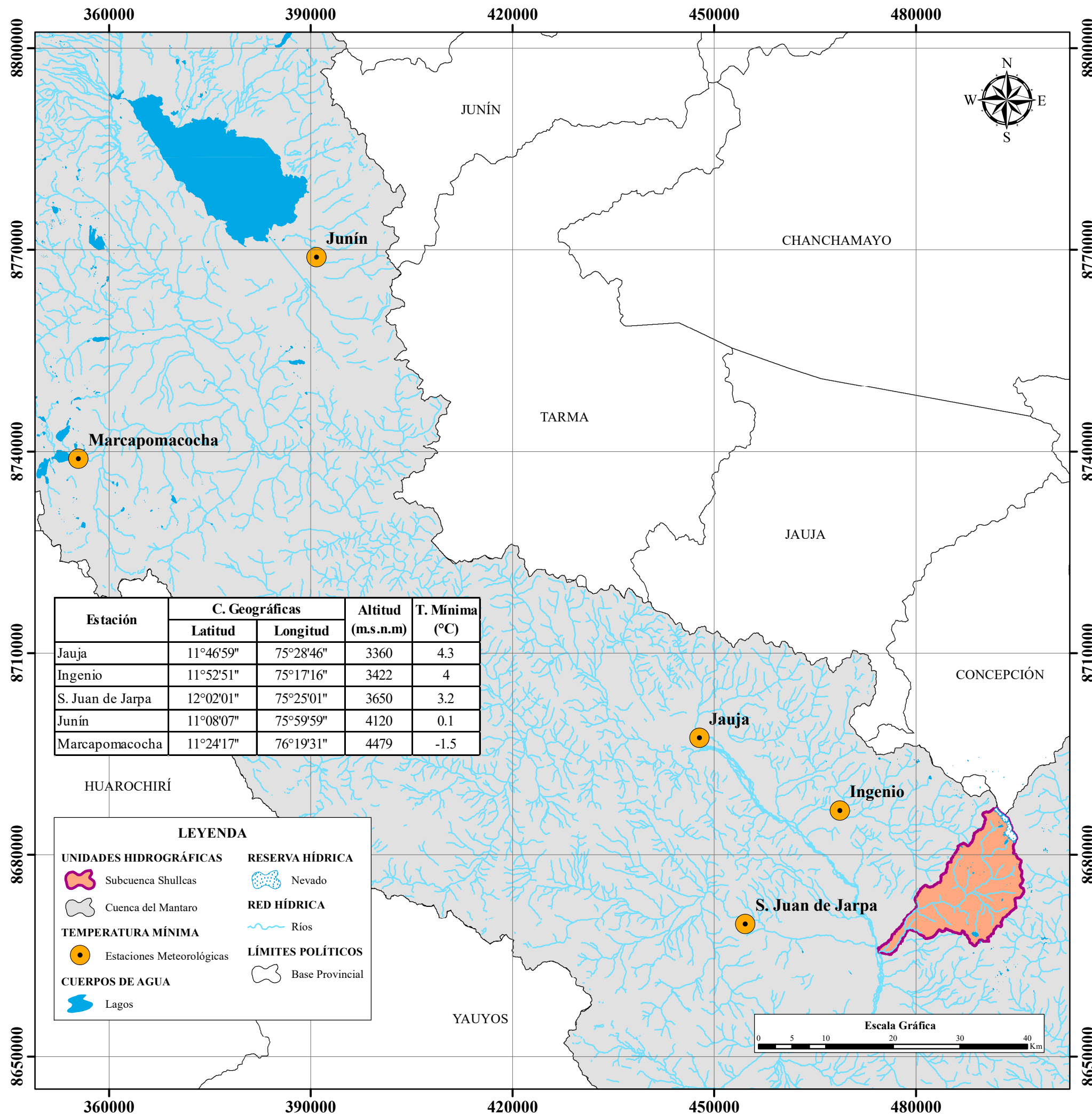
Escala Numérica: 1/600 000

Formato: **A3**

Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM, ANA

Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S

Mapa: **17**



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

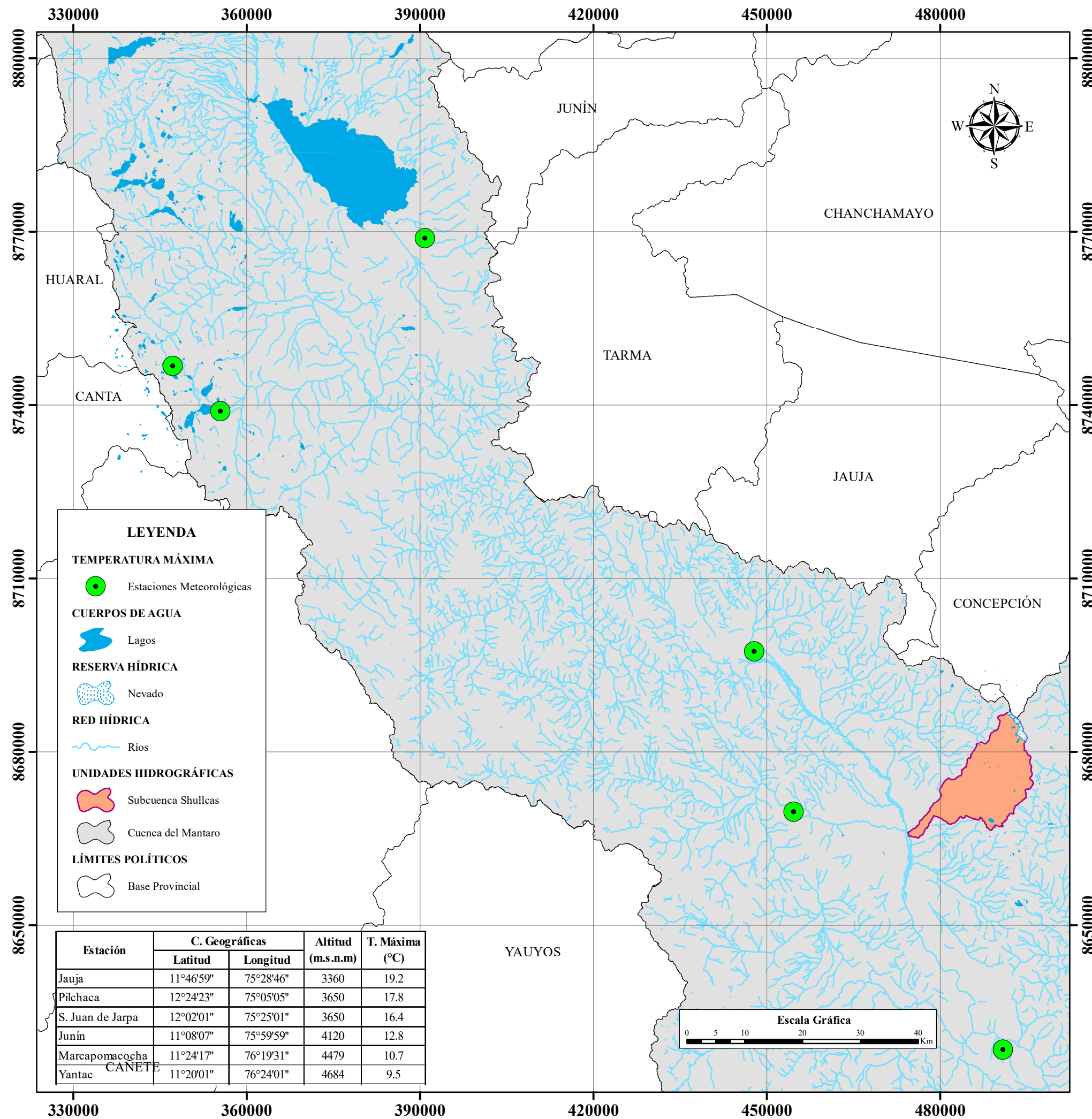
Mapa de estaciones de temperatura mínima

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo

Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 14/06/2022	Escala Numérica: 1/600 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 18



LEYENDA

TEMPERATURA MÁXIMA

- Estaciones Meteorológicas

CUERPOS DE AGUA

- Lagos

RESERVA HÍDRICA

- Nevado

RED HÍDRICA

- Ríos

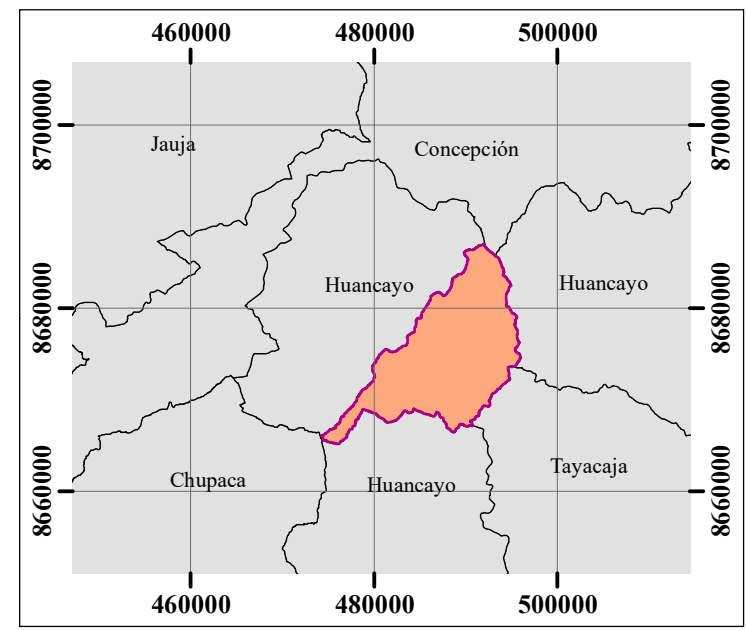
UNIDADES HIDROGRÁFICAS

- Subcuenca Shullcas
- Cuenca del Mantaro

LÍMITES POLÍTICOS

- Base Provincial

Estación	C. Geográficas		Altitud (m.s.n.m)	T. Máxima (°C)
	Latitud	Longitud		
Jauja	11°46'59"	75°28'46"	3360	19.2
Pilchaca	12°24'23"	75°05'05"	3650	17.8
S. Juan de Jarpa	12°02'01"	75°25'01"	3650	16.4
Junín	11°08'07"	75°59'59"	4120	12.8
Marcapomacocha	11°24'17"	76°19'31"	4479	10.7
Yantac	11°20'01"	76°24'01"	4684	9.5



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

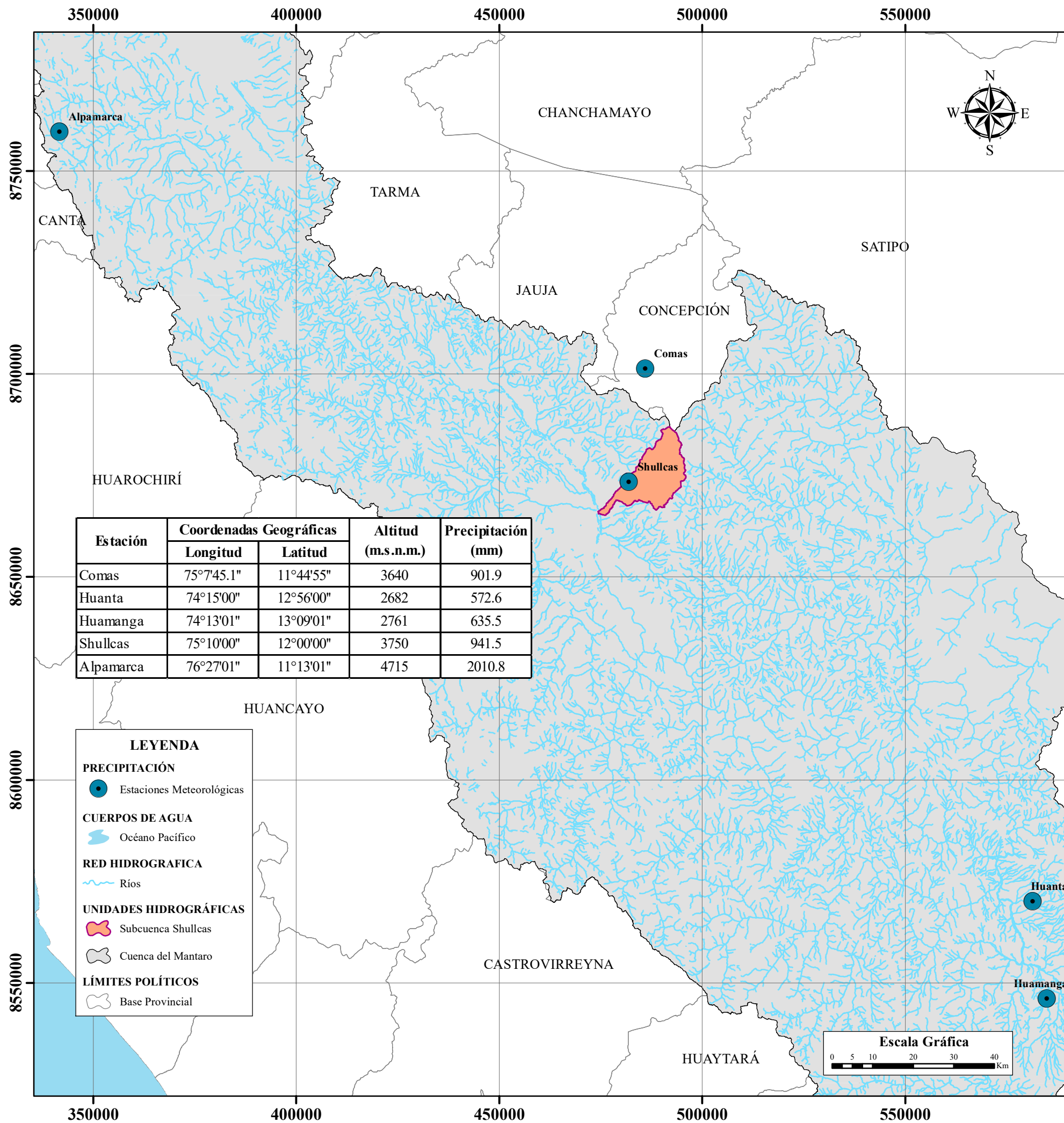
Mapa de estaciones de temperatura máxima

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

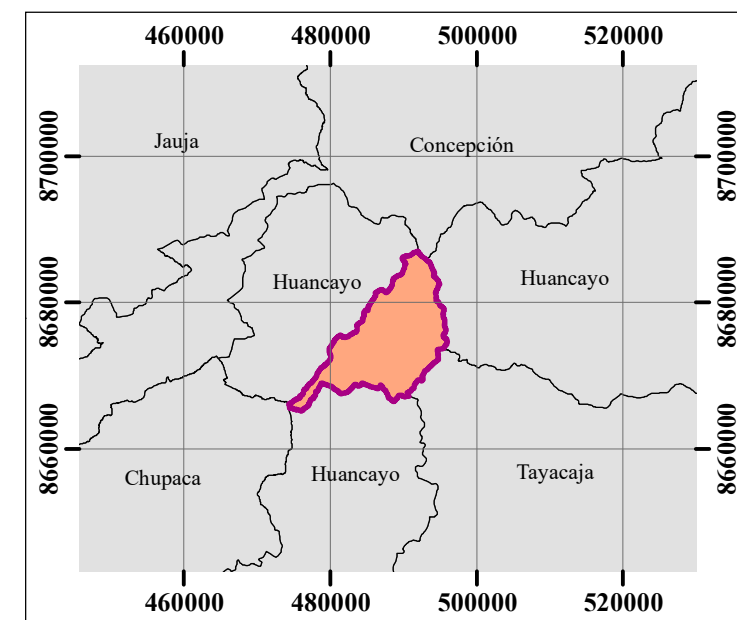
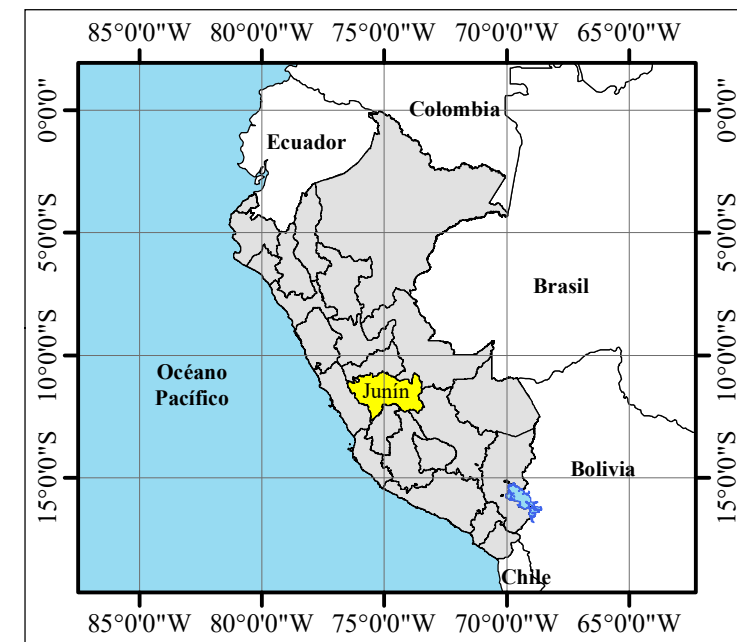
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo **Asesor:** Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 14/06/2022 **Escala Numérica:** 1/700 000 **Formato:** **A3**

Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM, ANA **Proyección:** DATUM WGS - 84, ZONA 18S **Mapa:** **19**



Estación	Coordenadas Geográficas		Altitud (m.s.n.m.)	Precipitación (mm)
	Longitud	Latitud		
Comas	75°7'45.1"	11°44'55"	3640	901.9
Huanta	74°15'00"	12°56'00"	2682	572.6
Huamanga	74°13'01"	13°09'01"	2761	635.5
Shullcas	75°10'00"	12°00'00"	3750	941.5
Alpamarca	76°27'01"	11°13'01"	4715	2010.8



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental

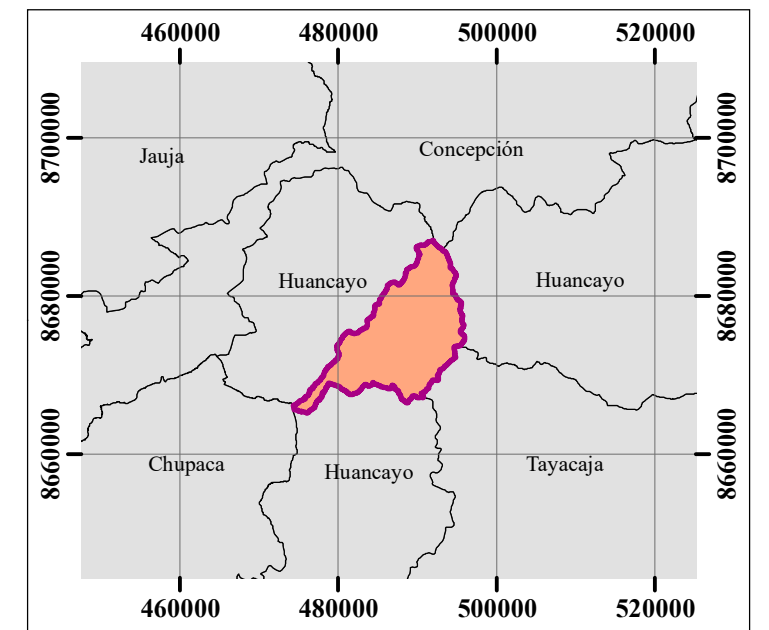
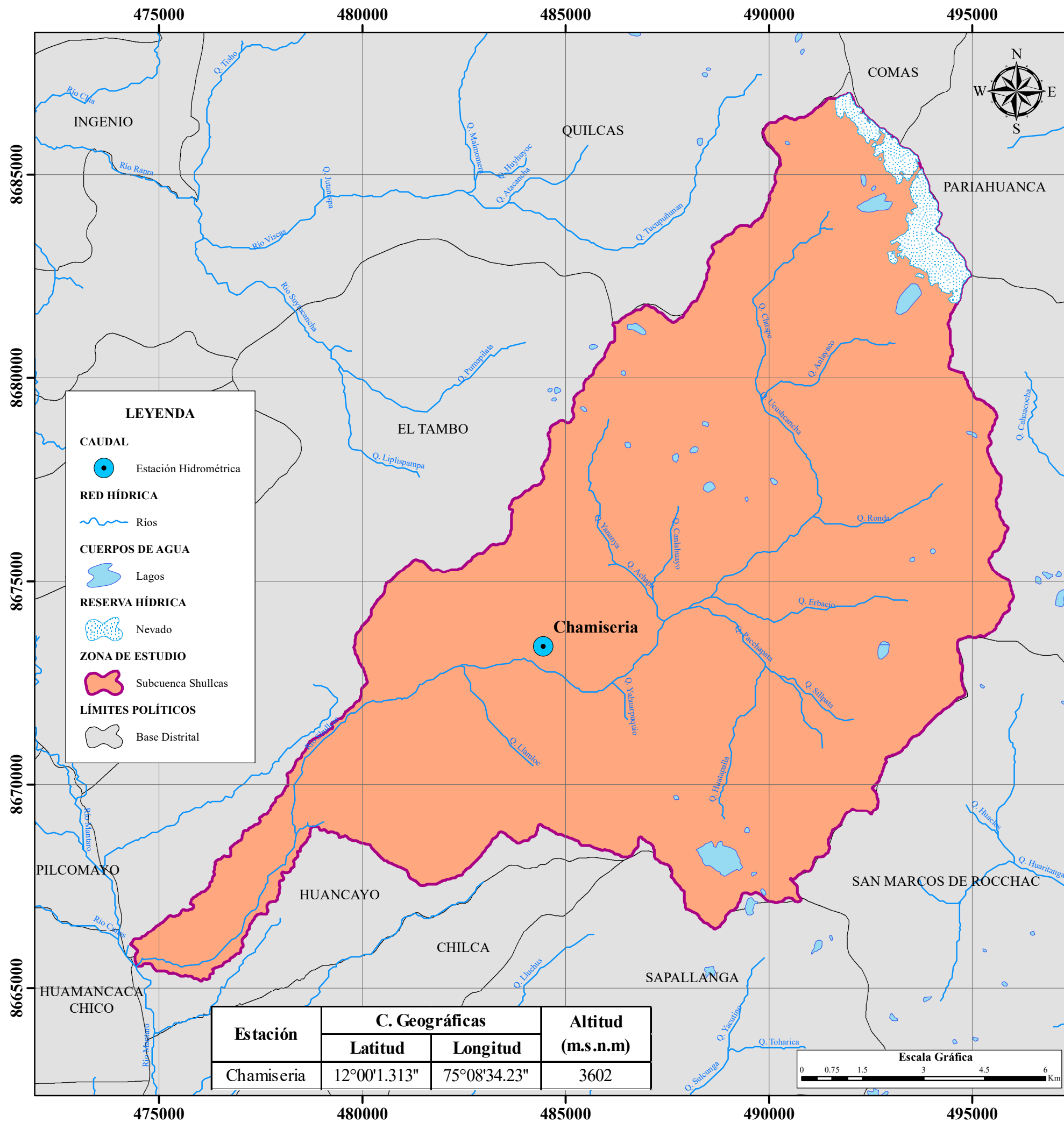
Mapa de ubicación de las estaciones pluviométricas

Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo

Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 14/06/2022	Escala Numérica: 1/1 000 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 20



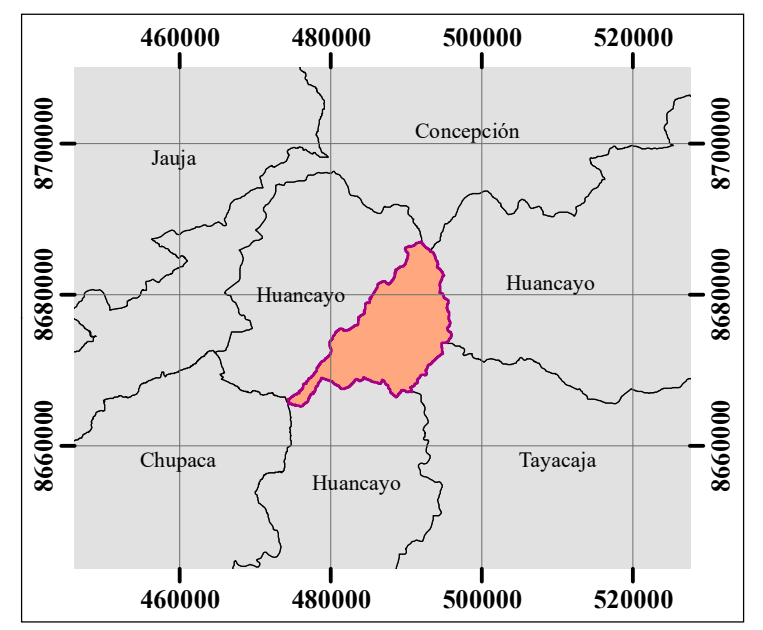
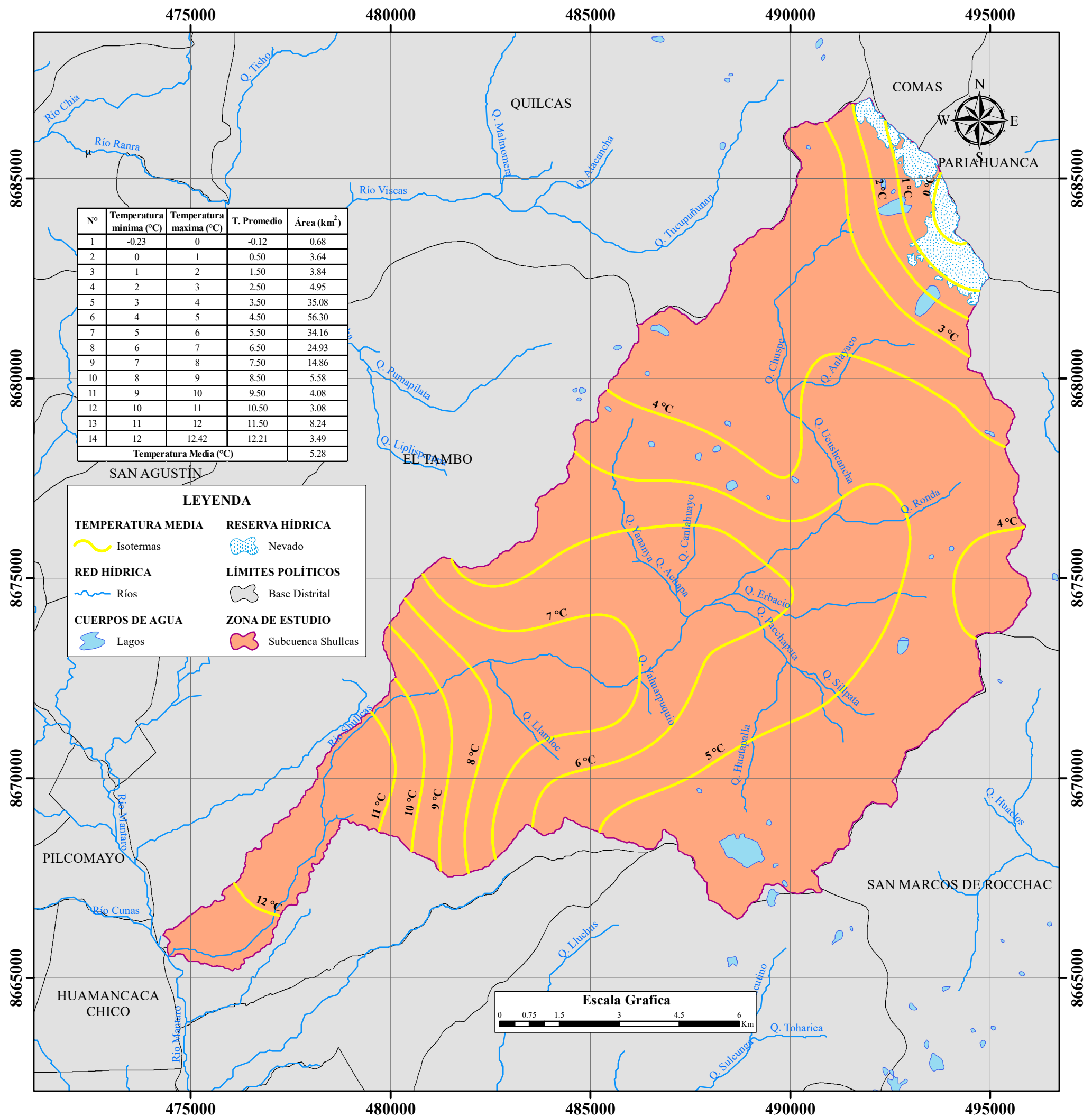
UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental


Mapa de ubicación de la estación hidrométrica Chamiseria

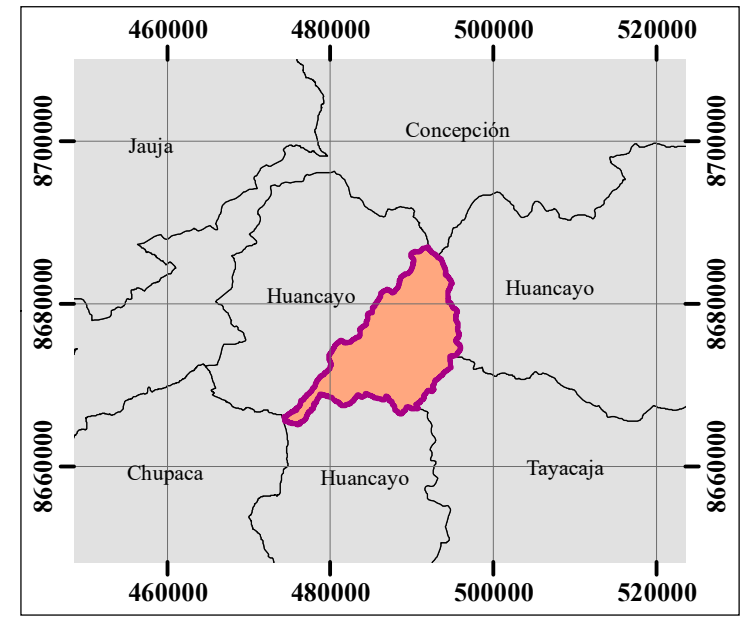
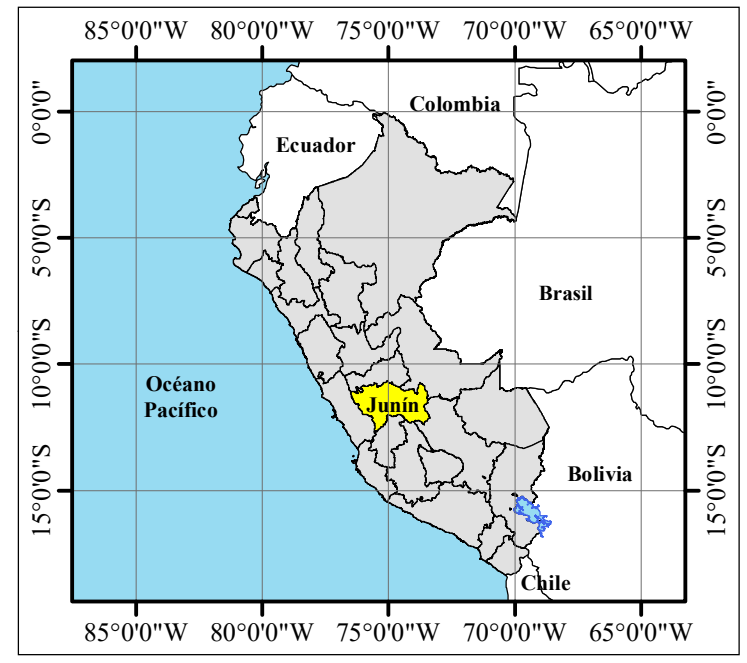
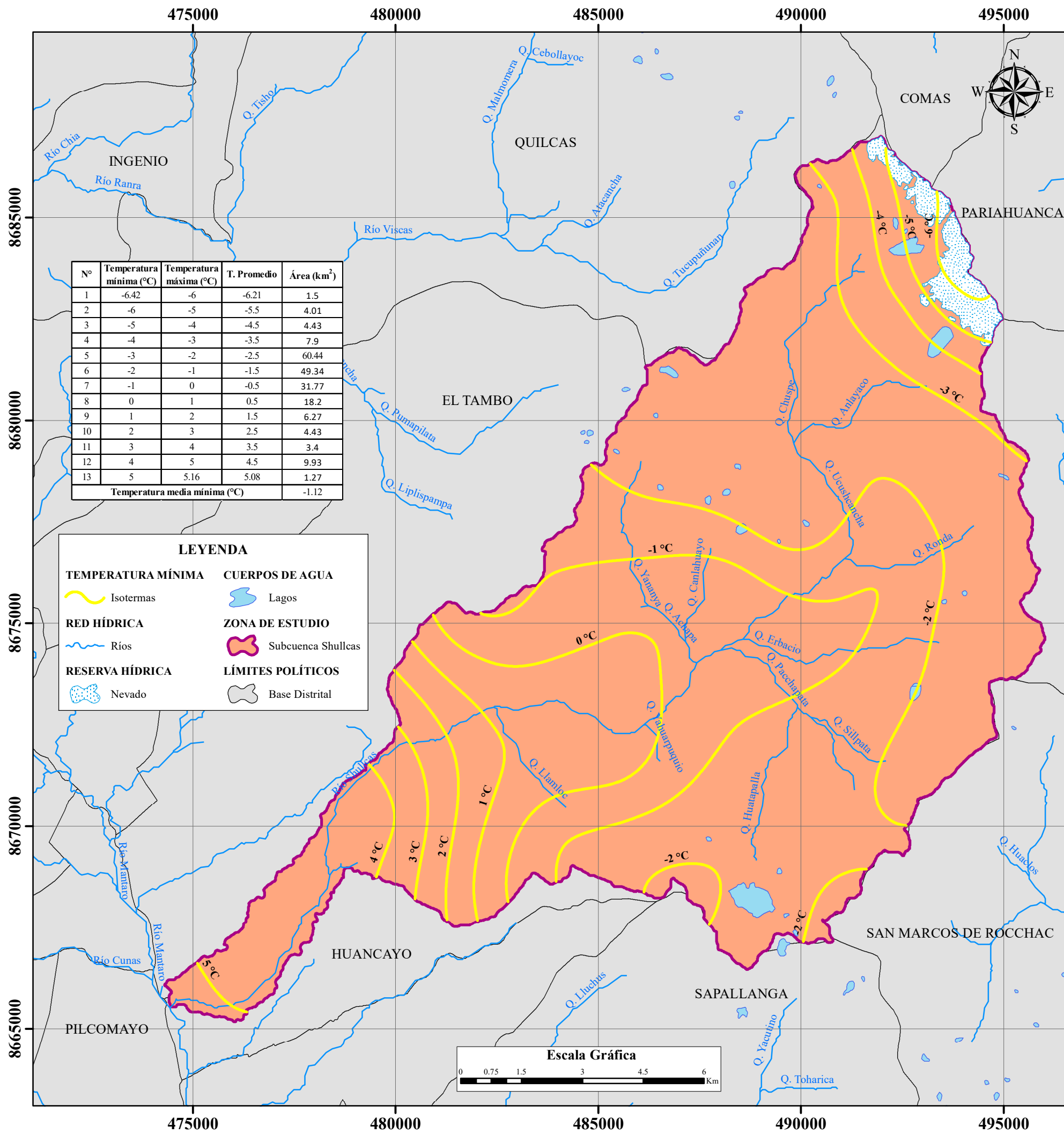
Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciaria y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo
Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 16/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINAM, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 22

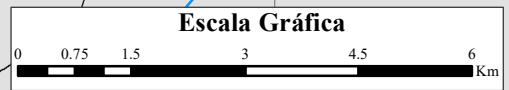


UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de isothermas de la subcuenca del río Shullcas			
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo		Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 29/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3	
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 23	



LEYENDA

TEMPERATURA MÍNIMA	CUERPOS DE AGUA
Isotermas	Lagos
RED HÍDRICA	ZONA DE ESTUDIO
Ríos	Subcuenca Shullcas
RESERVA HÍDRICA	LÍMITES POLÍTICOS
Nevado	Base Distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo

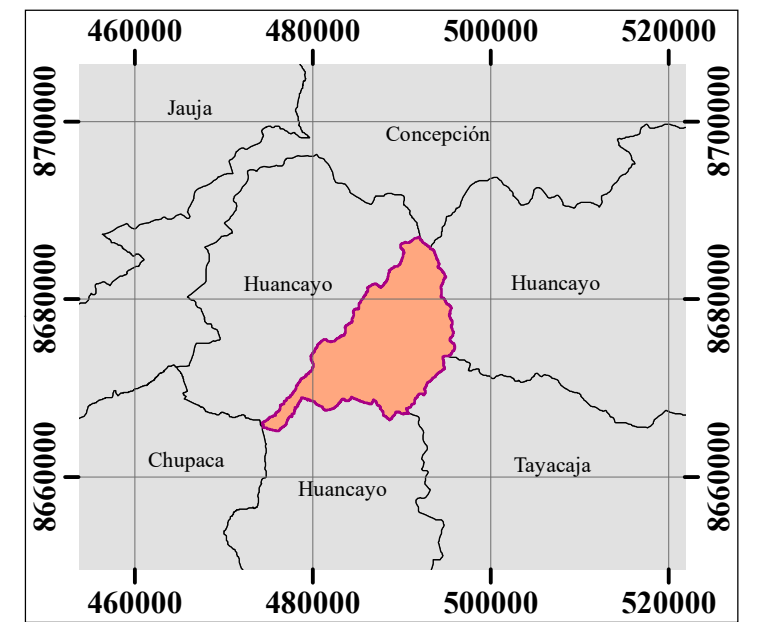
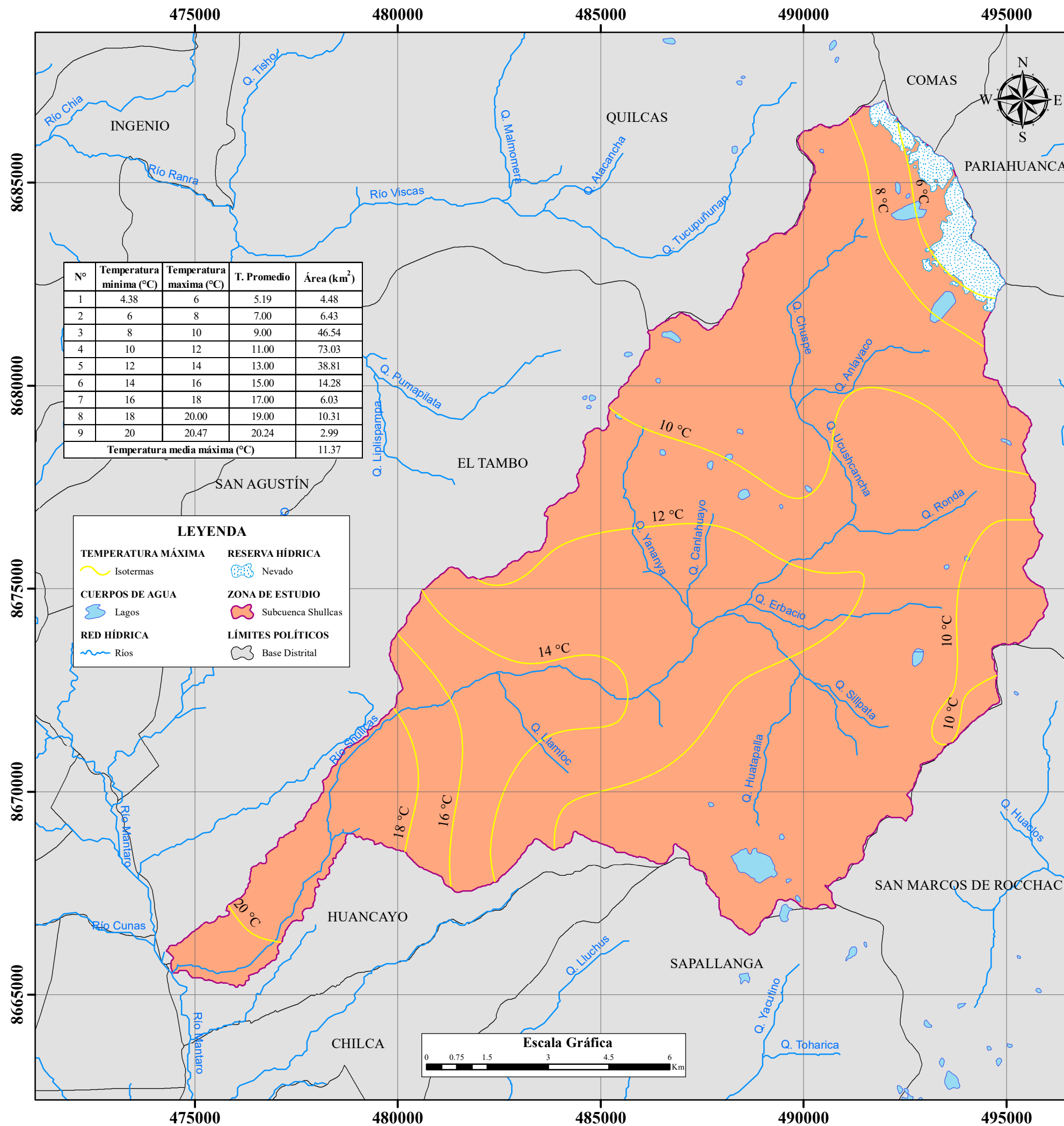
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental


Mapa de isólinas de temperatura mínima en la subcuenca del río Shullcas

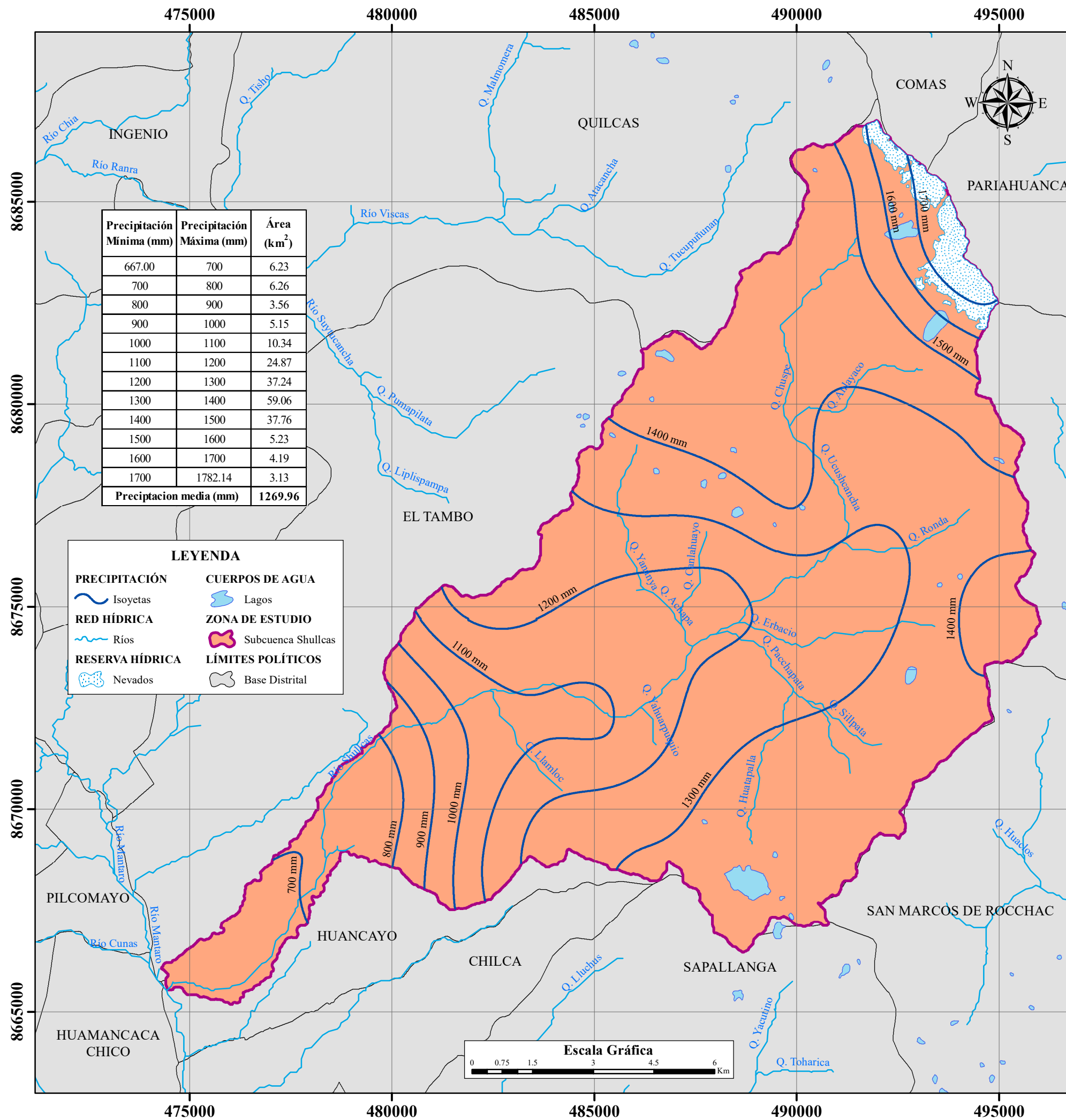
Tesis:
"Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"

Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo **Asesor:** Dra. María del Carmen Aylas Humareda

F. de Elaboración: 29/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 24

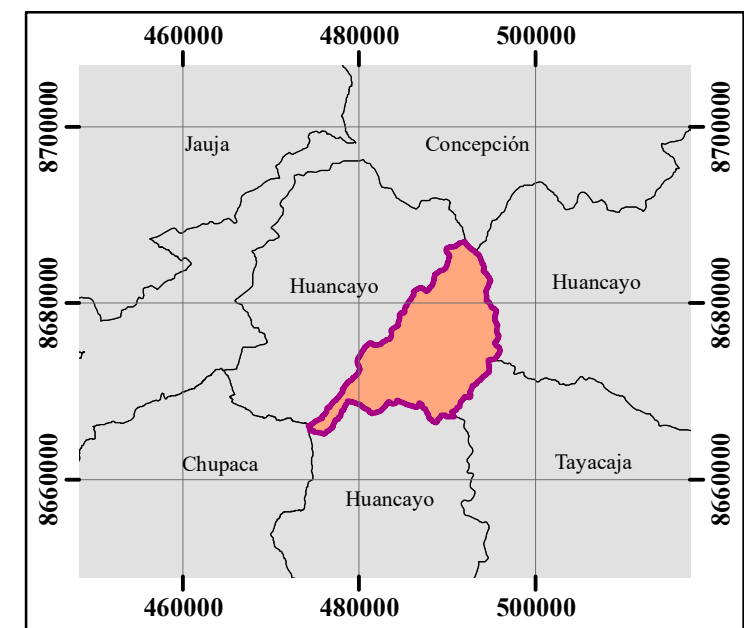
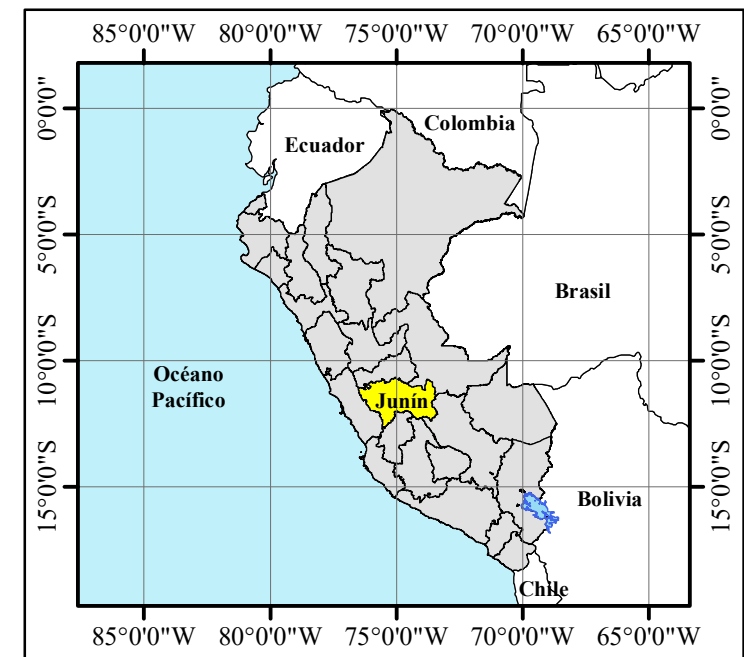


UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental			
Mapa de isoclinas de temperatura máxima en la subcuenca del río Shullcas			
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"			
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo		Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 30/06/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3	
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 25	

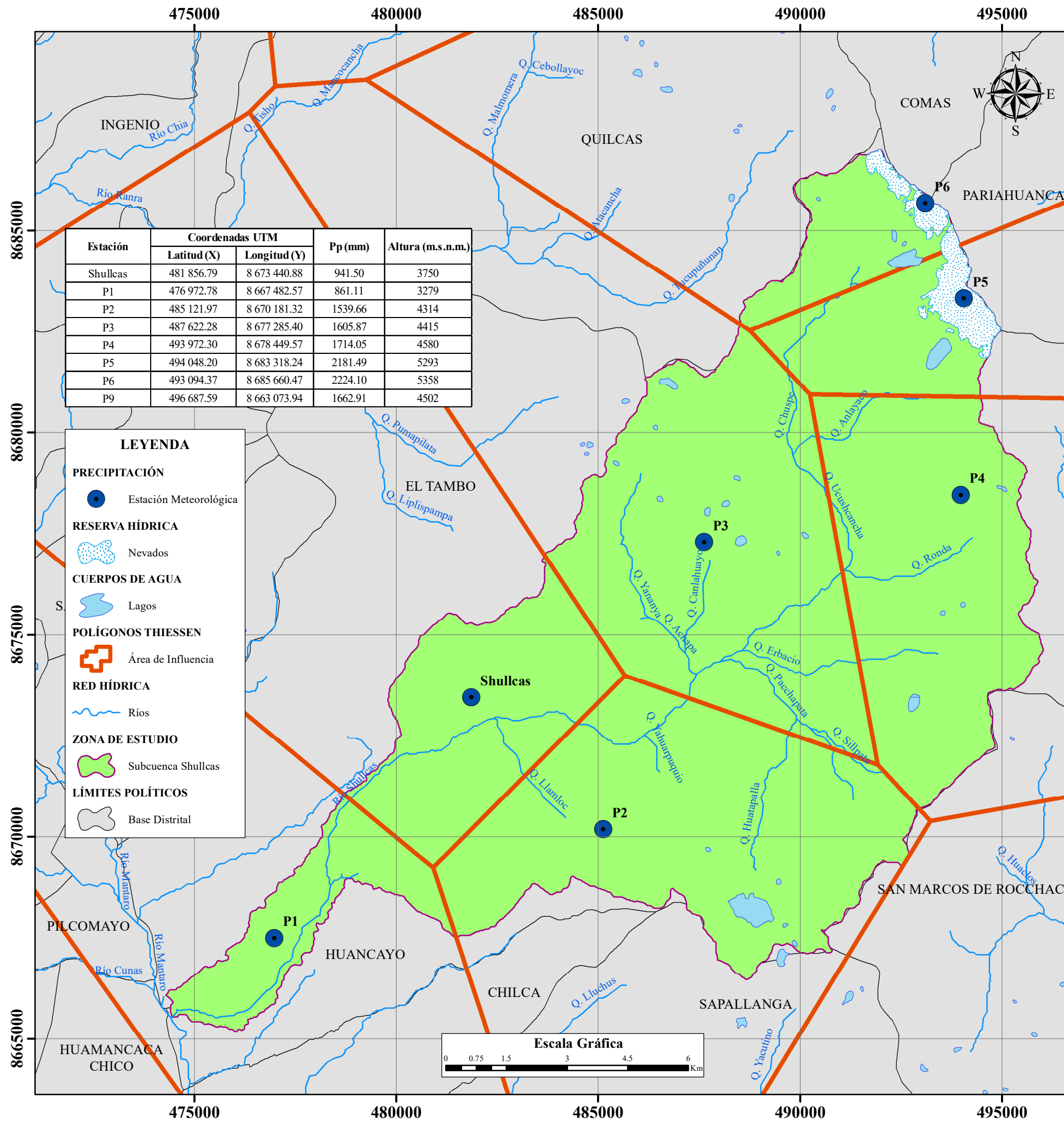


Precipitación Mínima (mm)	Precipitación Máxima (mm)	Área (km ²)
667.00	700	6.23
700	800	6.26
800	900	3.56
900	1000	5.15
1000	1100	10.34
1100	1200	24.87
1200	1300	37.24
1300	1400	59.06
1400	1500	37.76
1500	1600	5.23
1600	1700	4.19
1700	1782.14	3.13
Precipitación media (mm)		1269.96

LEYENDA	
PRECIPITACIÓN	CUERPOS DE AGUA
Isoyetas	Lagos
RED HÍDRICA	ZONA DE ESTUDIO
Ríos	Subcuenca Shullcas
RESERVA HÍDRICA	LÍMITES POLÍTICOS
Nevados	Base Distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL		
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo		
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental		
Mapa de isoyetas de la subcuenca del ríos Shullcas		
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"		
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo	Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 10/07/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 27



Estación	Coordenadas UTM		Pp (mm)	Altura (m.s.n.m.)
	Latitud (X)	Longitud (Y)		
Shullcas	481 856.79	8 673 440.88	941.50	3750
P1	476 972.78	8 667 482.57	861.11	3279
P2	485 121.97	8 670 181.32	1539.66	4314
P3	487 622.28	8 677 285.40	1605.87	4415
P4	493 972.30	8 678 449.57	1714.05	4580
P5	494 048.20	8 683 318.24	2181.49	5293
P6	493 094.37	8 685 660.47	2224.10	5358
P9	496 687.59	8 663 073.94	1662.91	4502

LEYENDA

PRECIPITACIÓN
● Estación Meteorológica

RESERVA HÍDRICA
☁ Nevados

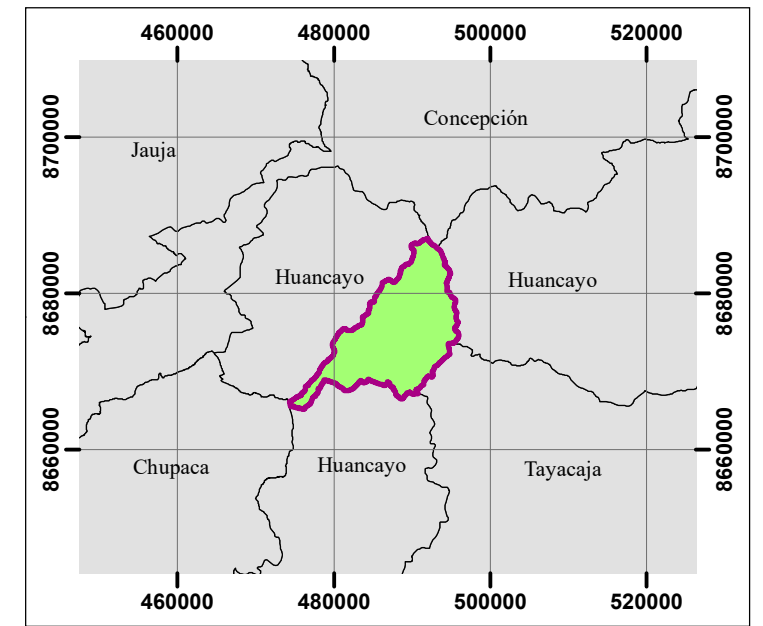
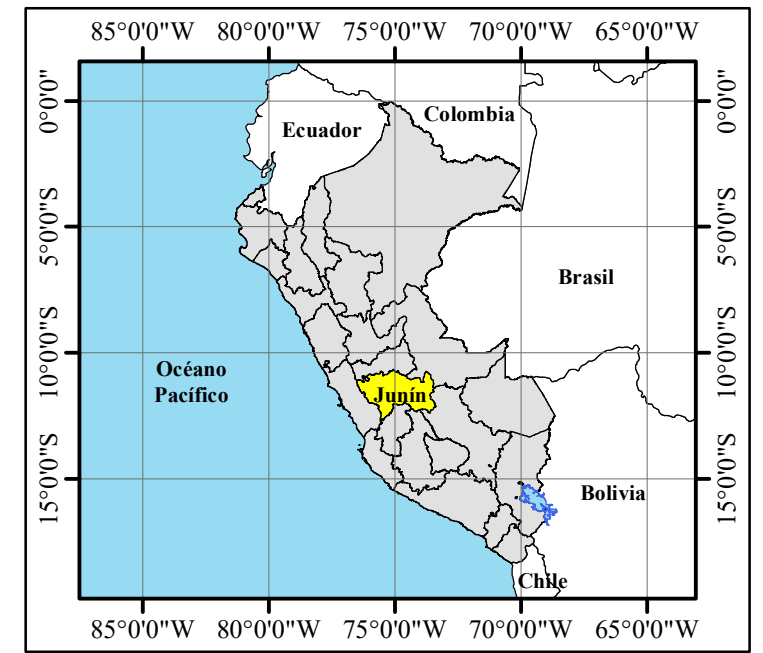
CUERPOS DE AGUA
🌊 Lagos

POLÍGONOS THIESSSEN
📐 Área de Influencia

RED HÍDRICA
🌊 Ríos

ZONA DE ESTUDIO
🟩 Subcuenca Shullcas

LÍMITES POLÍTICOS
📄 Base Distrital



UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL		
Facultad de Ingeniería Geográfica, Ambiental y Ecoturismo		
Escuela Profesional de Ingeniería Ambiental		
Mapa de polígonos de Thiessen de la subcuenca del ríos Shullcas		
Tesis: "Análisis multitemporal de la superficie glaciar y su influencia en la disponibilidad hídrica en la subcuenca Shullcas"		
Tesista: Bach. Royers Tunque Raymundo	Asesor: Dra. María del Carmen Aylas Humareda	
F. de Elaboración: 12/07/2022	Escala Numérica: 1/100 000	Formato: A3
Fuente: DEM ALOS 30m, Geoservidor del MINEDU - Perú, ANA	Proyección: DATUM WGS - 84, ZONA 18S	Mapa: 28