TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

FACULTAD DE CIENCIAS AMBIENTALES

CARRERA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

"EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA COBERTURA GLACIAR EN EL RENDIMIENTO HÍDRICO: CASO DE ESTUDIO SUBCUENCA DEL RÍO SHULLCAS"

Tesis para optar el título de:

INGENIERO(A) AMBIENTAL

Presentado por:

Keytel Francell Cáceres Torres

Asesor:

Mg. Sc. Wilfredo Baldeón Q.

Lima – Perú

2020

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

Lima, 28 de febrero de 2020.

Los integrantes del Jurado de tesis:

Presidente: Dr. Julio Cesar Alegre Orihuela
Miembro: Mg. Mirtha Rosario Nazario Ramirez
Miembro: Mg. Jose Fernando Delgado Andrade

Se reúnen para evaluar la tesis titulada:
EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DE LA COBERTURA GLACIAR EN EL RENDIMIENTO HÍDRICO: CASO DE ESTUDIO SUBCUENCA DEL RÍO SHULLCAS

Presentada por el bachiller:

- Keytel Francell Caceres Torres

Para optar el Titulo Profesional de Ingeniero Ambiental

Asesorada por:

- Mg. Wilfredo Celestino Baldeon Quispe

Luego de haber evaluado el informe final de tesis y evaluado el desempeño de los estudiantes de la carrera de Ingeniería Ambiental en la sustentación, concluyen de manera unánime (X) por mayoría simple ( ) calificar a:

• Tesista: Keytel Francell Caceres Torres		Nota (en letras): DIECIOCHO	
Aprobado ( )	Aprobado - Muy buena (X)	Aprobado - Sobresaliente ( )	Desaprobado ( )

Los miembros del jurado firman en señal de conformidad.

Dr. Julio Cesar Alegre Orihuela
Presidente del Jurado

Mg. Wilfredo Celestino Baldeon Quispe
Asesor

Mg. Mirtha Rosario Nazario Ramirez
Miembro 1

Mg. Jose Fernando Delgado Andrade
Miembro 2

T/(511) 610 6400
opción 2
www.cientifica.edu.pe

Campus
Panamericana Sur
km 19 - Lima 42

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

I. DEDICATORIA

Dedicar este trabajo de investigación a Dios, a mamita Cristina Mendoza, a mis padres, hermanos, familiares y RS de quienes he recibido el mayor de los apoyos en todo momento y lugar. A mi grupo de amigos del C.I quienes me motivaron a continuar con esta línea de investigación. A todos ellos con el mayor respeto y estima posible, muchas gracias.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

II. AGRADECIMIENTOS

La elaboración de este documento no hubiera sido posible sin la colaboración de muchas personas y profesionales.

Un agradecimiento especial al Mg.sc. Wilfredo Baldeón Q. y al Ing. Salvador Alvarado T. quienes guiaron este esfuerzo desde sus inicios hasta su presentación final.

Del mismo modo, agradecer a la Dra. Lauren Sommers quién aportó importantes recomendaciones para un mejor desarrollo de este proyecto y por impulsar la investigación de los glaciares tropicales en el Perú.

Agradecer de sobremanera a Lía Oré por la hospitalidad y ayuda brindada en las estadías en la ciudad de Huancayo. Al personal docente y administrativo de la Facultad de Ciencias Ambientales, su colaboración fue muy valiosa.

Al personal técnico de la Autoridad Local del Agua – Mantaro y al SENAMHI por el valioso apoyo en este proyecto.

¡Muchas gracias a todos!

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

III. INDICE GENERAL

I. DEDICATORIA 3
II. AGRADECIMIENTOS 4
III. INDICE GENERAL 5
IV. INDICE DE FIGURAS 7
V. INDICE DE TABLAS 8
VI. INDICE DE ANEXOS 9
VII. RESUMEN 10
VIII. ABSTRACT 11
IX. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 12
X. MARCO TEÓRICO 14
1. Delimitación Hidrogeológica 16
1.1. Cuenca Fluvial 16
1.2. Sistema Hidrológico Superficial 16
2. Conceptos Generales de Glaciología 17
2.1. Glaciares Tropicales 17
3. Evaluación de los Glaciares 20
3.1. Relación Área-Volumen 20
3.2. Satélites Artificiales 21
3.3. Imágenes de satélite 21
3.4. Espectro Electromagnético 21
3.5. Bandas Espectrales 22
3.6. NDSI (Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve) 25
3.7. Modelo de Elevación Digital 25
3.8. Ortorrectificación 25
4. Evaluación Hídrica Superficial 25
4.1. Método de la Curva de Duración 26
4.2. Escurrimiento Superficial 26
4.3. Rendimiento Hídrico 27
4.4. Déficit de Escurrimiento 27
XI. OBJETIVOS / HIPÓTESIS 29

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

XII. METODOLOGÍA 30
1. Área de Estudio y Estaciones de Muestreo 30
2. Materiales 32
3. Metodología 33
3.1. Fase de Planificación 33
3.2. Fase de Campo 34
3.3. Fase de Gabinete 35
4. Análisis Estadístico 38
XIII. RESULTADOS 39
1. Subcuenca del río Shullcas 39
1.1. Parámetros Fisiográficos 39
2. Evaluación Multitemporal del Área Glaciar Shullcas 40
3. Análisis Pluvial 45
4. Análisis de Caudales y Rendimiento Hídrico 46
XIV. DISCUSIÓN 8
1. Análisis Multitemporal del Área Glaciar Shullcas 8
2. Análisis de Caudales y Aporte Glaciar 9
3. Cobertura Glaciar y Rendimiento Hídrico 10
XV. CONCLUSIONES 12
XVI. RECOMENDACIONES 13
XVII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS 14
XVIII. ABREVIATURA 22
XIX. ANEXOS 23
1. Anexo 1: Imágenes Satelitales en combinación RGB 23
2. Anexo 2: Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) aplicado a las Imágenes Satelitales. 29

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

IV. INDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de transformación de nieve a hielo..... 18
Figura 2. Espectro Electromagnético. 22
Figura 3. Mapa Hídrico de la Subcuenca del río Shullcas. Elaboración propia. Fuente: 30
Figura 4. Mapa de las Estaciones Meteorológicas en el ámbito de la Subcuenca del río Shullcas. Elaboración propia. 31
Figura 5. Esquema Procedimental de Análisis Multitemporal del glaciar Shullcas. 37
Figura 6. Mapa de Cobertura Glaciar de la Subcuenca del río Shullcas del año 2003. 41
Figura 7. Mapa de Cobertura Glaciar de la Subcuenca del río Shullcas del año 2005. 41
Figura 8. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2007. 42
Figura 9. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2010. 42
Figura 10. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2013. 43
Figura 11. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2016. 43
Figura 12. Mapa de Isoyetas de precipitación anual del año 2014-2015. 45
Figura 13. Mapa de Isoyetas de precipitación anual del año 2015-2016. 46
Figura 14. Gráfica del caudal promedio mensual durante el periodo 2002-2016. 5
Figura 15. Curva de duración de los caudales registrados entre los años 2003-2016. 6
Figura 16. Relación entre la cobertura glaciar y rendimiento hídrico entre los años 2003-2016. 7

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

V. INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Características del espectro electromagnético del sensor TM. 23
Tabla 2 Aplicaciones de las bandas espectrales del sensor TM. 23
Tabla 3 Características del espectro electromagnético del sensor OLI/TIRS 24
Tabla 4 Aplicaciones de las bandas espectrales del sensor OLI/TIRS 24
Tabla 5 Cuadro de valores de la escorrentía superficial. 26
Tabla 6 Relación de estaciones meteorológicas de la Subcuenca del río Shullcas. 31
Tabla 7 Estación Hidrométrica de la subcuenca del río Shullcas. 32
Tabla 8 Características de las imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio. 33
Tabla 9 Relación de las instituciones fuente del suministro de información. 34
Tabla 10 Plantilla de resultados de evaluación hidrológica. 38
Tabla 11 Características Fisiográficas de la subcuenca del río Shullcas. 39
Tabla 12 Intervalos de clasificación del NDSI 40
Tabla 13 Registros de la cobertura glaciar entre 2003-2016. 44
Tabla 14 Registros de la cobertura y volumen glaciar entre 2003-2016. 44
Tabla 15 Registro de datos hídricos correspondiente al área de estudio Subcuenca del río Shullcas entre 2002-2016. 0

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

VI. INDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2003. 23
Anexo 2. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2005. 24
Anexo 3. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2007. 25
Anexo 4. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2010. 26
Anexo 5. Imagen Satelital Landsat 8 en combinación RGB: 7, 5, 3 del año 2013. 27
Anexo 6. Imagen Satelital Landsat 8 en combinación RGB: 7, 5, 3 del año 2016. 28
Anexo 7. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2003. 29
Anexo 8. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2003. 30
Anexo 9. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2005. 31
Anexo 10. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2005. 32
Anexo 11. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2007. 33
Anexo 12. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2007. 34
Anexo 13. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2010. 35
Anexo 14. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2010. 36
Anexo 15. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2013. 37
Anexo 16. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2013. 38
Anexo 17. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2016. 39
Anexo 18. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2016. 40

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

VII. RESUMEN

La condición imperante de déficit hídrico en la subcuenca del río Shullcas ha implicado la afectación de centros urbanos y rurales en el suministro del recurso hídrico dentro de esta área hidrográfica; de este modo, se ha determinado que Huancayo presenta un alto nivel de vulnerabilidad a causa la gran presión de la demanda hídrica y su alta dependencia del río Shullcas.

El objetivo de la presente investigación es el evaluar la influencia de la cobertura glaciar en el rendimiento hídrico de la Subcuenca del río Shullcas – Provincia de Huancayo entre los años 2003 -2016. Para esto se determinó la relación entre la cobertura glaciar y el rendimiento de hídrico mediante técnicas hidrológicas, y metodologías y herramientas de teledetección. Se realizaron tres visitas al área de estudio para la recopilación de información, reconocimiento y cuantificación de las dimensiones de la estación hidrométrica del río Shullcas. La curva de duración dio como resultado que los caudales mínimo y máximo en el periodo de estudio fueron de 198,9 L/s (julio 2008) y 6638,34 L/s (enero 2015), respectivamente. Mientras que el aporte glaciar varió entre 198,9 L/s y 789,6 L/s.

Los resultados de recesión glaciar, aporte glaciar y escorrentía superficial presentan relación con estudios realizados en la región anteriormente. La reducción de la cobertura glaciar entre el año 2003-2016 fue de 1,084 Km2, y 2,314 L/s*Km2 en el rendimiento hídrico, las cuales se vieron afectadas por anomalías climáticas. La relación entre ambas variables fue del 65,3%.

Palabra clave: cobertura glaciar, escorrentía, rendimiento hídrico.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

VIII. ABSTRACT

The prevailing condition of water deficit in the sub-basin of the Shullcas River has implied the involvement of urban and rural centers in the supply of water resources within this hydrographic area; Thus, it has been determined that Huancayo has a high level of vulnerability due to the high pressure of the water demand and its high dependence on the Shullcas River.

The purpose of this research is to evaluate the influence of glacier coverage on the water performance of the Sub-basin of the Shullcas River - Huancayo Province between the years 2003-2016. For this, the relationship between glacier coverage and water performance was determined through hydrological techniques, and remote sensing methodologies and tools. Three visits were made to the study area for the collection of information, recognition and quantification of the dimensions of the Shullcas river hydrometric station. The duration curve resulted in the minimum and maximum flows in the study period being 198.9 L / s (July 2008) and 6638.34 L / s (January 2015), respectively. While the glacier contribution varied between 198.9 L / s and 789.6 L / s.

The results of glacial recession, glacier contribution and surface runoff are related to studies conducted in the region previously. The reduction in glacier coverage between 2003-2016 was 1,084 km2, and 2,314 L / s * km2 in water performance, which were affected by climatic anomalies. The relationship between both variables was 65.3%.

Keyword: glacier cover, runoff, water performance.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

IX. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Políticamente, la Subcuenca glaciar del río Shullcas, se emplaza en la jurisdicción de los distritos de El Tambo y Huancayo en la provincia de Huancayo departamento de Junín. Tiene una extensión superficial de 223.11 km^2 siendo la principal fuente hídrica del río Mantaro y la importante ciudad de Huancayo. El río Shullcas se forma de las descargas de las lagunas glaciares Cuspicocha y Lazo Huntay y es fuente para fines agrícolas de 2 350 usuarios pertenecientes a las comisiones de regantes de las márgenes derecha e izquierda del rio del mismo nombre, a los cuales se destina 50% del caudal y el porcentaje restante es destinado al servicio de agua potable a cargo de la Empresa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Municipal de Huancayo (SEDAM) (Martínez, 2007).

La provisión del recurso hídrico, como elemento vital, para la ejecución de las actividades en toda la subcuenca está estrechamente relacionado al aporte de las reservas glaciares del Huaytapallana, la cual se ha visto afectada por un proceso generalizado de retroceso glaciar en el Perú, debido al cambio climático; ello ha supuesto una gran reducción de su cobertura nival, la cual asciende a un 58.4% en los periodos 1970-2011 (Gutierrez et al., 2010). Es importante mencionar que en los últimos 25-30 años se ha dado una importante tasa de recesión glaciar ascendente a 0.52 km^2/año (López-Moreno et al., 2014; Del Pilar, 2015), lo que provocaría la desglaciación de esta importante fuente de agua dulce en un tiempo de 20 años (Ávalos et al. 2012; Ordoñez et al. 2011). La reducción del área glaciar del Huaytapallana implicaría un desbalance hídrico de la subcuenca del río Shullcas, pronosticando un futuro crítico en el abastecimiento de agua dentro del área hidrográfica del río Shullcas.

En los últimos 30 años, ha existido una gran presión del sector agrícola y el sector poblacional en relación a las enormes deficiencias en la oferta hídrica, cuya situación se agrava en épocas de sequía, cada vez más marcadas por efectos del cambio climático. El caudal tiende a disminuir de 5 m3/s, en épocas de avenida, a 1.5 m3/s en épocas de estiaje (Ordoñez et al., 2011; Ávalos et al., 2012). Además, se ha reportado que la subcuenca del río Shullcas presenta importantes valores de déficit hídrico, oscilantes entre -0.102 m3/s y -0.272 m3/s, entre los meses de junio-octubre en el balance hídrico superficial realizado para el periodo 1985-2013 (Gutierrez et al., 2010). La información existente del déficit hídrico correspondiente al balance hídrico superficial entre 1985 y 2013 realizada por Gutierrez et al. (2010) se ha realizado sin considerar el aporte glaciar en la subcuenca del rio Shullcas, variable que requiere ser analizada en profundidad por su importancia actual respecto a los efectos del Cambio Climático en los glaciares.

La condición imperante de déficit hídrico en la subcuenca del río Shullcas ha implicado la afectación de centros urbanos y rurales en el suministro del recurso hídrico dentro de esta área hidrográfica; de este modo, se ha determinado que Huancayo presenta un alto nivel de vulnerabilidad a causa la gran presión de la demanda hídrica y su alta dependencia del

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

río Shullcas, formando parte de casos de gran importancia como viene ocurriendo en países como Chile y Bolivia (Arana, 2011).

Una de las actividades que también se ve involucrada respecto a las variaciones del caudal del río Shullcas es la generación de energía. La pequeña central hidroeléctrica Chamisería I, ubicada en el sector del mismo nombre aporta una potencia de 0.25 MW (Ávalos et al. 2012) a la red que abastece la ciudad de Huancayo. En épocas secas el flujo glaciar mantiene, parcialmente, en funcionamiento esta central, lo cual hace relevante su cuantificación.

Establecer la relación entre el rendimiento hídrico, asociada al presente fenómeno de déficit hídrico de la subcuenca del río Shullcas, y el retroceso del glaciar aportante a la misma permitirá a los actores correspondientes el planteamiento de soluciones oportunas a la problemática hídrica del área de estudio. Por ende, el presente estudio pretende evaluar en qué medida la evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca del río Shullcas influye en su rendimiento hídrico.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

X. MARCO TEÓRICO

La subcuenca del río Shullcas es una región montañosa glaciar de los andes centrales que ha experimentado rápidas tasas de recesión de los glaciares en los últimos 25-30 años (Lopez-Moreno et al, 2012). En razón de ello se han llevado a cabo diversos estudios de las cuales se ha basado la presente investigación:

Loroña (2011) en su estudio de Determinación de la evolución de la cobertura glaciar en la subcuenca del Quillcay y su influencia en el rendimiento hídrico, donde se pudo comprobar que la evolución de la cobertura glaciar si influye en el rendimiento hídrico de la cuenca. El autor procedió, en primera instancia, a determinar la tasa de retroceso glaciar, haciendo uso de las herramientas de teledetección lo que le permitió realizar la clasificación de los glaciares por el método NDSI (Índice Normalizado de Diferencia de Nieve) y determinar el área de la cobertura glaciar. En seguida, realizó el estudio del aporte de los glaciares con las mediciones del caudal de la subcuenca del Quillcay y el análisis pluviométrico. Además, en dicho estudio se propusieron dos fases metodológicas, una fase de campo, en la que se generó información hidrológica de la subcuenca, y la fase de gabinete, donde se procesaba y analizaba la información generada para poder cumplir con el objetivo del estudio. El trabajo, al igual que la presente investigación, se limitó al análisis hidrológico en presencia del glaciar. Este estudio involucra ambas variables en estudio y por ende será la principal referencia en el desarrollo de la presente investigación.

Alva & Meléndez (2009) por su parte han planteado una alternativa en la metodología de la obtención de la generación cartográfica multitemporal del glaciar en su estudio multitemporal de la recesión glaciar en la Cordillera Blanca, distritos de Huaraz e Independencia para los periodos de 1989, 1998 y 2005. Esta alternativa a comparación de la propuesta de Loroña (2011) es más simple pero obtienen resultados con igual o mayor confiabilidad. En este estudio se estableció un proceso metodológico partiendo desde la recopilación y recolección de la información hasta la generación cartográfica multitemporal de los glaciares. Esta alternativa será implementada en la presente investigación, debido a las razones antes expuestas, por esa razón este estudio constituirá una de las principales fuentes bibliográficas.

Las metodologías descritas anteriormente se basan en el uso de imágenes satelitales, las cuales han sido evaluadas en los glaciares tropicales. De esta forma Vargas et al. (2009) & Pasapera (2012) ha realizado un estudio de evolución de la cobertura de glaciares tropicales de la cordillera blanca, haciendo uso del Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (Normalized Difference Snow Index-NDSI) e imágenes satelitales LANDSAT. La amplia inclusión del uso de imágenes satelitales y el NDSI en los estudios referidos a la evaluación del área glaciar sustentan la incorporación de las mismas en la presente investigación.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

En otro sentido, se han llevado a cabo estudios de caracterización hidrológica de la subcuenca del río Shullcas, la cual estaba asociado a la determinación de la oferta hídrica. Ávalos *et al.* (2012) y Crumbley (2015) realizaron dichos estudios y en ambos se mostraron una amplia descripción de la subcuenca del río Shullcas. Los primeros autores evaluaron la oferta hídrica superficial mediante el balance hídrico para proceder a hacer un análisis de escorrentía superficial en el Plan de gestión integrada de recursos hídricos de la subcuenca del río Shullcas. El estudio permitió conocer que en el periodo de mayo a setiembre se presenta deficiencia hídrica siendo el más acentuado en julio, mientras que los meses restantes sirvieron para alimentar las reservas hídricas debido al exceso de oferta hídrica. Este estudio muestra que la lámina de escorrentía anual generada en la subcuenca del río Shullcas desde los años 1998 al 2008 es de 263 mm, que representa un caudal promedio anual del río Shullcas de 2,0 m3/s, sin considerar aporte glaciar.

Por su lado, Crumbley (2015) estimó la cantidad de agua proveniente de las fuentes de fusión del glaciar Huaytapallana a través de su Investigación de la contribución del derretimiento de los glaciares a la descarga de la corriente y las experiencias del cambio climático en la subcuenca del río Shullcas en Perú. Este autor identificó las estaciones hidrometeorológicas y de caudales y el recorrido y usos que se hacen en la subcuenca del río Shullcas; utilizó un método denominado caracterización de la cuenca hidroquímica y en adición al procedimiento de análisis de cuencas hidrográficas pudo afirmar que la contribución del glaciar fue entre 8.9% y 16.6% del caudal del río Shullcas. El aporte de esta investigación será importante para la comparación de los resultados obtenidos de aporte glaciar.

En la región, se han desarrollado diversas investigaciones similares sobre recesión glaciar haciendo uso de imágenes satelitales LANDSAT y clasificación nival a través del NDSI. En Venezuela y Colombia los glaciares Sierra Nevada de Santa Marta, Sierra Nevada de Cucuy y el macizo Ruiz-Tolima han evidenciado una recesión de 62,07 km^2 en un periodo de 20 años (Morris, J. et al., 2006) y una reducción en promedio del 57,4% hasta 1998 (Hoyos-Patiño, 1998).

En Bolivia, la investigación glaciar más importante se ha dado en el glaciar Chacaltaya, cuya acelerada reducción glaciar ha generado que pierda su categoría pasando a tener únicamente nieve estacional. El área glaciar del Chacaltaya pasó de tener 0,223 Km^2 en 1940 a tener 0,01 Km^2 en el 2005 (Francou, B., 2013). El volumen glaciar de este nevado también ha presentado una seria reducción y por ende su aporte glaciar en un 93% desde 1940 (Francou et al., 2000).

En Argentina y Chile, se desarrollaron varias investigaciones haciendo uso de sensores remotos para la determinación de la superficie glaciar y la aplicación del NDSI de la cuenca del Aconcagua. Pitte et al (2009) usaron imágenes satelitales LANDSAT y el NDSI para delimitación del área glaciar en un enfoque multitemporal. En dicho estudio se concluye que la factibilidad de la aplicación del método de clasificación NDSI depende de una adecuada delimitación de las áreas hídricas. Asimismo, Bown et al. (2008) ha estudiado la variación glaciar en la cuenca del Aconcagua haciendo uso de imágenes LANDSAT con un enfoque multitemporal al igual que el presente estudio. Los resultados de esta evaluación

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

demuestran una recesión glaciar en una razón de 0,63 km^2 por año entre 1955 hasta el 2003. Los estudios de referencia demuestran, en general, una recesión en la región y un amplio uso de las imágenes satelitales y el NDSI para la determinación de cambios en la superficie glaciar.

1. Delimitación Hidrogeológica

1.1. Cuenca Fluvial

Se denomina cuenca fluvial a aquella depresión territorial con pendiente, en la cual el agua drena desde las cúspides más altas, concentrándose en el cauce de un río (Hoffman & Salmerón, 1997). El uso del término cuenca hidrográfica fue desarrollado para describir, identificar y clasificar porciones de la superficie terrestre en la que ocurre una parte del ciclo del agua (ANA, 2016).

Asimismo, las cuencas hidrográficas son unidades de planificación debido a la presencia de recursos naturales y poblaciones dentro de su ámbito geográfico que le otorgan condiciones físicas, biológicas, económicas, sociales y culturales siendo particulares en cada una (Tapia, 1997).

Dentro del ámbito de una cuenca existen subdivisiones denominadas subcuencas, las cuales desarrollan su drenaje de manera directa al curso principal de la cuenca, siendo, en muchos casos, importantes abastecedores del recurso agua en los mismos.

1.2. Sistema Hidrológico Superficial

Un sistema hidrológico es un proceso de interacción de componentes como la precipitación, evaporación, escurrimiento entre otras fases que componen del ciclo hidrológico, cuyo agrupamiento se da en subsistemas del ciclo total, donde se acepta agua, se opera internamente y produce salidas. Este concepto se asocia muy bien a los procesos que ocurren dentro de una cuenca fluvial en los que intervienen, además, variaciones de acuerdo a las características variables del suelo, del uso y del clima (Canales, 2015).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

2. Conceptos Generales de Glaciología

2.1. Glaciares Tropicales

a. Definición

Los glaciares tropicales reciben esta denominación por encontrarse dentro del cinturón tropical del planeta (trópicos de Capricornio y de Cáncer). Es preciso señalar que en América del Sur se emplazan más del 95% de los glaciares tropicales del planeta, es decir, aproximadamente 2,500 km^2, de los cuales el 22% se encuentran en Bolivia (Vilela, 2011).

Para que un glaciar pueda ser llamado tropical debe contemplar 3 características importantes. La primera está relacionada a la ubicación en los trópicos (23.5º N/S) como ya se explicó; la segunda, que se precisa que la variación de la temperatura media diaria sea mayor o igual a la temperatura media anual y por último, que el glaciar se encuentre emplazado dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCI), cuya característica geográfica hace que la humedad sea mayor que en latitudes medias y altas (Kaser, 1995; Kaser & Osmaston, 2002).

Garín (1987) define a un glaciar como una agregación sobre la tierra de hielo constante. Cuyo flujo lento, a causa de su peso, hacia alturas inferiores en un proceso de acumulación, compactación y recristalización. Una definición más reciente asocia a los glaciares como un ecosistema constituido por grandes masas de hielo, con presencia o no de agua intersticial, teniendo bordes bien definidos, cuyo origen sobre la tierra se realice a causa del metamorfismo a hielo de agregaciones de nieve, y que fluyen de manera lenta deformándose bajo el influjo de gravedad (Gutierrez. et al., 2010).

b. Formación

El proceso de formación de glaciares se basa en la trasformación de nieve a hielo, proceso conocido como diagénesis. En este proceso se genera por asentamiento de hielo en consecutivos estratos de agrregación, con lo cual se pierden las burbujas de aire, lo que ocasiona que aumente la densidad de los granos que lo forman parte, pasando de textura suave y esponjosa a granular y más dura (Rivera, 1990). La compactación de la masa de nieve durante muchos años logra un cambio en la densidad de sus componentes iniciales como cristales de hielo, nieve (0.1 g/cm3), neviza o firn (0.6 g/cm3), agua, aire y detritos de rocas para llegar a convertirse en un glaciar con una densidad entre 0.8-0.9 g/cm3 (Tarbuck & Lutgens, 2005; Carenas, et al., 2014). Dicho proceso se puede apreciar en la siguiente figura:

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

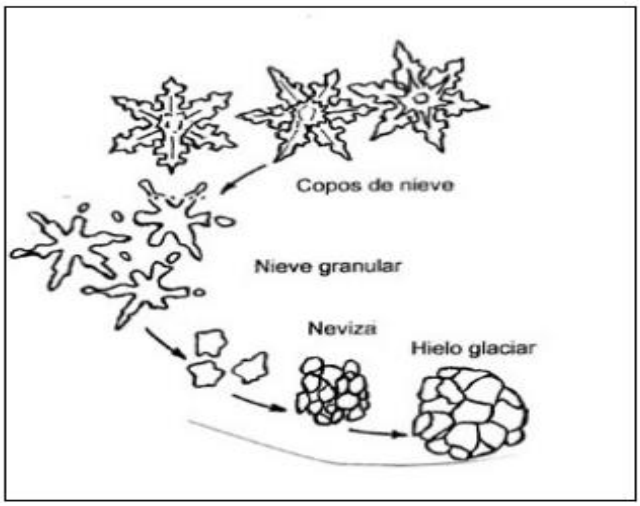


Figura 1. Proceso de transformación de nieve a hielo.

Fuente: Recuperado del Centro de Estudios Científicos de la Universidad de Chile.

La existencia de los glaciares requiere de condiciones particulares en el clima y relieve. Herr (2014) sostiene que la extrema altitud es el factor condicionante para la existencia de glaciares en zonas de bajas latitudes. Esto da a conocer que mientras haya una mayor disponibilidad de energía, se requerirá una mayor altitud para que la existencia de glaciares sea posible. Un punto en común de muchos autores es la afirmación de que el factor glaciodinámico influye en este proceso, el cual está asociado con la velocidad del hielo.

c. Clasificación

Se ha notado un trabajo intenso de clasificación para los glaciares durante muchos años. Los puntos de clasificación utilizada son por su forma, dinámica (avances/retrocesos), clima, estructura interna y estado térmico. La clasificación más común usada para los glaciares tropicales es sobre la categoría de estructura interna y estado térmico.

En función a su estructura interna, que hace referencia a la presencia y distribución de los detritos rocosos en los glaciares, se clasifican en:

Glaciares descubiertos o blancos: Este tipo de glaciares se caracterizan porque toda su superficie se encuentra de manera visible, con un mínimo de porcentaje de fragmentos detríticos e impurezas, que son causadas por acción del viento y al desprendimiento de las laderas cercanas. Dicho concepto fue desarrollado por Lliboutry (1956) y es considerado como el tipo de glaciar más conocido y estudiado por la comunidad científica.

Glaciares cubiertos: La principal característica de este tipo de glaciares es que se encuentran bajo una capa detrítica, que cumple una función aislante. Caviedes (1979) sostiene que el glaciar cubierto se originó de un glaciar del tipo descubierto, la cual sufrió

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

el deslizamiento de rocas y fue cubierto por la cubierta detrítica que actúa como un aislante del medio.

Glaciares de rocas: Son formaciones complejas, las cuales se encuentran conformados por un cuerpo de hielo con mezcla de detritos rocosos. Este sistema dinámico se encuentra conformado por un suelo congelado o también conocido como permafrost, así como de una capa elementos granulares que provocan un efecto aislante frente a la radiación solar. Eso hace que el derretimiento sea en gran medida menor en un glaciar descubierto. Diversos autores (Naveroy, 1987; Croce & Milana, 2002) sostienen que esta capa de material granual es activa y tiene un descongelamiento estacional que cumple un rol hidrológico importante, ya que permite acumular agua en estado de congelamiento en los glaciares de rocas y realizar el aporte glaciar en forma continua en los meses de verano, otoño e invierno (Croce y Milana, 2002).

Dentro de la categoría de estado térmico de la masa de hielo, la clasificación está basada en niveles de temperatura, entre ellos se tiene:

Los **Glaciares Fríos,** la denominación de este tipo de glaciares se adjudica debido a que la temperatura de la base del hielo es menor a 0°C en la zona de acumulación, la de estos galciares es de largos periodos, debido a que no ocurre fusión superficial. Este tipo de glaciares se encuentran ubicadas a grandes alturas en la cordillera de los Andes donde se presentan temperaturas entre -15º C a -20º C.

Los **Glaciares Templados**, se refieren a los glaciares donde su masa está a temperatura de fusión de hielo. Esto fluctúa según el apisonamiento a la cual se encuentra y eso depende de los factores de espesor de hielo, la densidad del mismo, el espesor y la aceleración de la gravedad.

Los **Glaciares Politermales**, este tipo de glaciares poseen una gradiente de tempertarura en su cuerpo de hielo. El cuerpo de hielo se encuentra a una temperatura menor al punto de congelación, sin embargo, en la base de la lengua terminal, su temperatura se eleva hasta alcanzar el punto de derretimiento, lo cual provoca una fusión corta de verano.

d. Función

Los glaciares cumplen las funciones de estabilidad y de seguridad en el abastecimiento de agua. La importancia de los mismos recae en la provisión de un flujo mínimo de agua en la cuenca, debido a que en los periodos de mínimas o nulidad de precipitaciones se genera un contexto de sequía e intensas crisis en los sistemas naturales y antrópicos, por causa del estrés hídrico, la cual puede doblegar la integridad y provisión de recursos de una región (Bórquez et al., 2006).

De este modo, se puede afirmar que los glaciares cumplen un papel importante para los ecosistemas alrededor, así también como los que se ubican aguas abajo, los cuales

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

presentan diversos servicios ambientales tanto a nivel local como regional. Los glaciares constituyen el 2% de agua en el mundo y son la principal fuente de abastecimiento de agua dulce en nuestro país, a causa del gran almacenamiento de este recurso en estado sólido, cuyos procesos de fusión contribuyen al aporte hídrico en toda la cuenca (Herr, 2014).

Los glaciares, sobre todo los glaciares blancos, presentan un valor escénico y cultural importante en la cosmovisión andina, y que a la vez, dada su belleza, son fuente de múltiples actividades turísticas y recreativas (Bórquez et al., 2006). Asimismo, las actividades económicas como la agricultura, industria, generación eléctrica, minería y otras, que se encuentran a lo largo de su área hidrográfica asociada, dependen del aporte que los glaciares lo que los hace fundamentales en el desarrollo socioeconómico de la población.

Por los motivos mencionados anteriormente, según Iza & Brunilda (2006), los glaciares deberían ser considerados como reservas estratégicas de agua, debido a los múltiples beneficios sociales, económicos y ambientales a nivel local y regional, y al importante papel que cumple para el mantenimiento de la vida.

3. Evaluación de los Glaciares

3.1. Relación Área-Volumen

Consiste en un método basado en principios de análisis dimensional de amplio uso para relacionar el volumen glaciar en base al área del mismo. Esta relación se basa en un estudio de más de 25 años, compilando más de 144 glaciares que fueron realizados por Bahr D. *et al.* (2015). Los resultados muestran una alta relación entre ambas variables con un resultado de R^2=0,9684. La ecuación integra dos constantes empíricas; γ se establece de acuerdo a la clase geométrica del glaciar y c que depende de la combinación de parámetros adimensionales.

Ecuación 1.

$$V = cS^{\gamma}$$

Donde:

c = 0.048$km^{3-2\gamma}$; γ = 1,36 definidas según las características del glaciar del presente estudio dados por su extensión y clase geométrica.

Los valores de las variables c y γ están sustentadas en estudios realizados en la región (Mernild et al., 2015; Moya Quiroga et al., 2013) donde las características de los glaciares andinos no difieren en gran medida al glaciar de la subcuenca del río Shullcas. Además, cabe mencionar que los valores se encuentran dentro del rango de los valores resultantes de los distintos estudios glaciares desarrollados en diversos glaciares, cuyos valores varían entre 0.02 hasta 0.0597 para c y entre 1,12 hasta 1,5 para γ (Macheret et al., 1984; Yafeng et al., 1981; Meier and Bahr, 1996; Radic and Hock, 2010; Grinsted, 2013).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

3.2. Satélites Artificiales

Según la Real Academia Española, afirma que “los satélites artificiales se definen como un vehículo tripulado o no, el cual es establecido en órbita alrededor de la Tierra o de otro astro, y que lleva la tecnología necesaria y adecuada para recopilar información y retransmitirla”. Luego de 1957, fecha donde el primer satélite (Sputnik) fue lanzado al espacio, los satélites artificiales han desempeñado un importante papel en el campo científico, comunicación, navegación, meteorológico y militar (Briones, 2012).

La familia de satélites artificiales Landsat se destaca como uno de los programas más fructíferos en la observación de recursos terrestres en su labor de brindar información a sus usuarios durante más de 25 años (Chuvieco, 2009). Dentro de esta familia se encuentran los satélites artificiales Landsat 5 TM (Thematic Mapper) y Landsat 8 OLI/TIRS (Operational Land Imagery / Thermal Infrared Sensor) ambos con resolución espacial de 30 m. El primero fue lanzado en 1984 y operó hasta el año 2013, cuenta con 7 bandas espectrales las cuales operan simultáneamente; el satélite Landsat 8 OLI/TIRS fue lanzado en 2013 y está compuesto por nueve bandas espectrales en el sensor OLI y dos bandas en el sensor TIRS (Díaz et al., 2017).

3.3. Imágenes de satélite

Son aquellas fuentes de información provistas por satélites; consisten en el resultado de la síntesis de la energía electromagnética emitida por un cuerpo en la tierra para la cual se han estudiado sus propiedades físicas por acción de un sensor, que presenta como base de estudio las variaciones con la frecuencia (Rodríguez & Arredondo, 2005).

3.4. Espectro Electromagnético

Se denomina espectro electromagnético a la organización de una serie de bandas de longitudes de ondas que manifiestan un comportamiento similar. El espectro electromagnético comprende las longitudes de onda más corta, tal como los rayos gamma o los rayos x, hasta las longitudes de onda kilométricas como las ondas de telecomunicación (Chuvieco, 1996).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

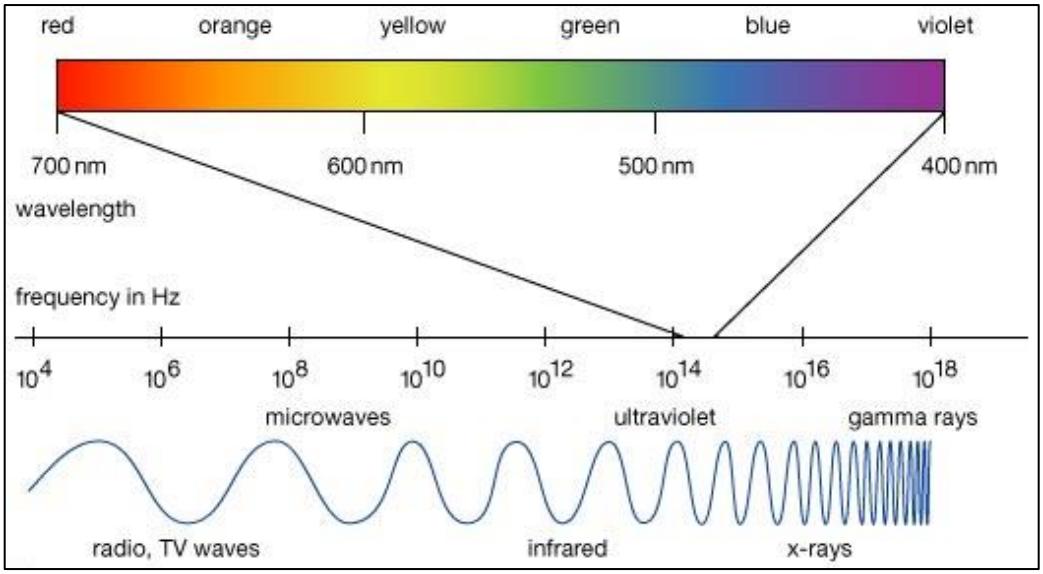


Figura 2. Espectro Electromagnético.
Fuente: Fontal (2005).

3.5. Bandas Espectrales

La radiación electromagnética se encuentra en forma de una distribución continua de frecuencias, que recibe el nombre de espectro electromagnético (EE). Dicho espectro suele estar estructurado en una serie de bandas espectrales donde la radiación electromagnética manifiesta un comportamiento similar (Fontal, 2005). Todas las bandas presentan un enfoque diferente de evaluación, puesto que la combinación de una con otra banda otorgará información precisa sobre la imagen satelital, como puede ser la cobertura vegetal, presencia de minerales o la discriminación de hielo en los nevados.

A continuación, en la Tabla 1 se presentan las bandas espectrales correspondientes al sensor ETM, en esta se muestra el número de bandas, los límites de longitudes de onda en los que es sensible cada banda espectral y la resolución espacial.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tabla 1
Características del espectro electromagnético del sensor TM.

Bandas	Amplitud de onda	Resolución espacial
1 = Azul	0.45 - 0.52 µm	30 m
2 = Verde	0.52 - 0.60 µm	30 m
3 = Rojo	0.63 - 0.90 µm	30 m
4 = Infrarrojo Cercano	0.76 – 0.90 µm	30 m
5= Infrarrojo Medio	1.55 – 1.75 µm	30 m
6= Infrarrojo Termal	10.40 – 12.50 µm	60 m
7= Infrarrojo Medio	2.08 – 2.35 µm	30 m
8= Pancromático	0.52 – 0.90 µm	15 m

Nota. Recuperado de Pérez (2007). *Introducción a los Sensores Remotos -Aplicaciones en Geología*. UBA.

Del mismo modo, en la Tabla 2, se presenta las aplicaciones de cada una de las bandas para el desarrollo de información requerida.

Tabla 2
Aplicaciones de las bandas espectrales del sensor TM.

Bandas	Aplicaciones
1 = Azul	Aguas costeras, diferenciación entre suelo y vegetación, vegetación conífera y caducifolia.
2 = Verde	Mapeo de vegetación, calidad de agua.
3 = Rojo	Diferenciación de especies vegetales y áreas urbanas, uso del suelo, agricultura, calidad de agua.
4 = Infrarrojo cercano	Cuerpos de agua, mapeo geomorfológico, mapeo geológico, áreas de incendio, áreas húmedas (agricultura y vegetación).
5 = Infrarrojo medio	Uso de suelo, humedad de la vegetación, diferenciación de nubes y nieve.
6 = Infrarrojo termal	Estrés térmico en plantas, corrientes marinas, propiedades termales del suelo.
7 = Infrarrojo medio	Identificar minerales, mapeo hidrotermal.
8 = Pancromático	Catastro rural, infraestructura, uso de suelo.

Nota. Recuperado de Pérez (2007). *Introducción a los Sensores Remotos -Aplicaciones en Geología*. UBA.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tabla 3

Características del espectro electromagnético del sensor OLI/TIRS

Bandas	Amplitud de onda	Resolución espacial
1 = Aerosol Costero	0.43 - 0.45 µm	30 m
2 = Azul	0.45 - 0.51 µm	30 m
3 = Verde	0.53 - 0.59 µm	30 m
4 = Rojo	0.64 – 0.67 µm	30 m
5= Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85 – 0.88 µm	30 m
6= SWIR 1	1.57 – 1.65 µm	30 m
7= SWIR 2	2.11 – 2.29 µm	30 m
8= Pancromático	0.50 – 0.68 µm	15 m
9= Cirrus	1.36 – 1.38 µm	30 m
10= Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	10.60 – 11.19 µm	100 m
11= Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	11.50 – 12.51 µm	100 m

Nota. Recuperado de Pérez (2007). *Introducción a los Sensores Remotos -Aplicaciones en Geología*. UBA.

Del mismo modo, en la Tabla 4, se presenta las aplicaciones de cada una de las bandas para el desarrollo de información requerida.

Tabla 4

Aplicaciones de las bandas espectrales del sensor OLI/TIRS

Bandas	Aplicaciones
1 = Aerosol Costero	Estudios costeros y de aerosoles.
2 = Azul	Cartografía batimétrica, que distingue el suelo de la vegetación y la vegetación caducifolia de la vegetación de conífera.
3 = Verde	Destacan los picos de máxima vegetación, que son útiles para evaluar el vigor de las plantas.
4 = Rojo	Distingue las laderas de vegetación.
5= Infrarrojo Cercano (NIR)	Destaca el contenido de biomasa y las costas.
6= SWIR 1	Distingue la humedad del suelo y de la vegetación; penetra a través de nubes finas.
7= SWIR 2	Mejora la lectura de la humedad del suelo y la vegetación y la penetración a través de nubes finas.
8= Pancromático	Catastro rural, infraestructura y uso de suelo.
9= Cirrus	Mejor detección de la contaminación en cirros.
10= Infrarrojo Térmico (TIRS) 1	Mapeo Térmico y humedad estimada del suelo.
11= Infrarrojo Térmico (TIRS) 2	Mapeo Térmico y humedad estimada del suelo.

Nota. Recuperado de Pérez (2007). *Introducción a los Sensores Remotos -Aplicaciones en Geología*. UBA.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

3.6. NDSI (Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve)

Este método es utilizado para el cartografiado de superficies glaciares (hielo). Fue desarrollado por Dozier (1989) y su utilidad consiste en la eliminación de cuerpos de agua, nubes y nieve que podrían cartografiarse cuando se utilizan imágenes satelitales, la fórmula para su determinación es la siguiente:

Ecuación 2.

Landsat 5 TM

$$NDSI = \frac{Banda\ 2 - Banda\ 5}{Banda\ 2 + Banda\ 5}$$

Landsat 8 OLI/TIRS

$$NDSI = \frac{Banda\ 3 - Banda\ 6}{Banda\ 3 + Banda\ 6}$$

3.7. Modelo de Elevación Digital

Los modelos de elevación digital (DEM) se constituyen como productos estándar de análisis fotogramétrico digital de fotografías aéreas o imágenes satelitales (Miller & Small, 2003). Permite representar la información de elevación en un formato digital por medio de técnicas de comparación de imágenes para la estimación de su elevación en el terreno.

La calidad de los Modelos de Elevación Digital depende de la topografía del terreno y la calidad de la información entre otros factores. Aun así, constituye una herramienta importante debido a su disponibilidad y su alta calidad (Sulebak, 2000).

3.8. Ortorrectificación

Se denomina Ortorrectificación al proceso de preparación de las imágenes satelitales, en la cual se elimina la distorsión de la imagen debido a las variaciones espaciales ocurridas en el proceso de captación de la información y el movimiento del sensor en la ejecución de la misma y por la necesidad de ajustar la información espacial a un sistema de referencia determinado (García *et al.*, 2013). El resultado de la ortorrectificación es una imagen con la precisión cartográfica y la escala invariable de un mapa, pero con el nivel de detalle de una fotografía. Las correcciones geométricas de las imágenes de interés glaciológico presentan resultados correctos tomando como fuente los modelos de elevación digital gratuitos con determinados ajustes (Pérez & Francois, 2009). Según INAIGEM (2017) en su Estudio del Inventario Nacional de Glaciares Tropicales, sugiere que los modelos de elevación digitales usados para el análisis multitemporal de glaciares deben corresponder a un rango de resolución espacial entre 12,5 m – 30 m.

4. Evaluación Hídrica Superficial

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

4.1. Método de la Curva de Duración

La curva de duración consiste en un procedimiento gráfico para el análisis de la frecuencia de los datos de caudales. Es una gráfica que representa el tiempo durante el cual un determinado caudal es igualado o superado durante un periodo de tiempo. Los datos de caudales se establecen en la escala vertical de la gráfica, mientras que en la escala horizontal se representa la probabilidad de que los caudales puedan ser igualados o excedidos (Pizarro, 2003).

Para poder ingresar los valores en la escala horizontal de la gráfica, se realizará mediante la siguiente fórmula:

Ecuación 3.

$$P = \frac{m}{N} x100$$

Donde:

P = Probabilidad de excedencia

m= Número de veces que el caudal se presenta en este tiempo

N = Número total de datos

La curva de duración destaca su importancia en su utilidad para conocer la distribución de los caudales en el tiempo y constituye una herramienta importante para el diseño de proyectos que dependen de un caudal mínimo. Mediante este método es posible trabajar con datos como caudal diario, mensual o anual se pueden usar para la construcción de esta curva.

4.2. Escurrimiento Superficial

El escurrimiento se define como el agua resultante no infiltrada de la precipitación que circula sobre la superficie terrestre y que se concentra a una corriente para finalmente ser drenada hasta la salida de la cuenca. Los principales factores que afectan el escurrimiento son el tipo de suelos, uso de suelo y pendiente media (CHS, 2016).

Por esta razón, es que se ha desarrollado el concepto del coeficiente de escurrimiento, la cual integra los factores antes mencionados para otorgar un valor adimensional y es definida como la relación entre la lámina de agua precipitada sobre una superficie y la lámina de agua que escurre superficialmente. El coeficiente de escurrimiento varía entre los valores de 0.1 a 0.82, en relación a la combinación de los factores que se muestran en la Tabla 5 (Moll, 2013).

Tabla 5
Cuadro de valores de la escorrentía superficial.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Uso del suelo y pendiente del terreno	Textura del suelo		
	Gruesa	Media	Fina
Bosque			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.25	0.35	0.50
Escarpado (11-30% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Pastizales			
Plano (0-5% pendiente)	0.10	0.30	0.40
Ondulado (6-10% pendiente)	0.16	0.36	0.55
Escarpado (11-30% pendiente)	0.22	0.42	0.60
Terreno cultivados			
Plano (0-5% pendiente)	0.30	0.50	0.60
Ondulado (6-10% pendiente)	0.40	0.60	0.70
Escarpado (11-30% pendiente)	0.52	0.72	0.82

Recuperado de "Aplicaciones cartográficas para la valoración de superficies de escorrentía. Río Girona (Alicante)", Moll (2013).

4.3. Rendimiento Hídrico

Se define al rendimiento hídrico como el volumen de agua superficial que transcurre por unidad de superficie de una cuenca, en un intervalo de tiempo dado (Ecuación 1). Este concepto de rendimiento hídrico ha permitido expresar la escorrentía por unidad de área para cuantificar la oferta hídrica superficial (Sánchez-Cordero *et al.*, 2009).

Ecuación 4.

$$Rendimiento\ Hídrico = Q/A$$

Donde:
Q = Caudal Superficial (m^3/s)
A = Área de la cuenca (Km^2)

El rendimiento hídrico ha sido asociado a la evolución de la cobertura glaciar en estudios realizados en la Cordillera Blanca, donde se ha evidenciado una relación entre ambas variables y asimismo es un componente importante para saber la proporción del caudal respecto a las entradas por precipitación en una cuenca, las cuales han sido objeto de investigación en diversos países de la región (Celleri *et al.*, 2004).

4.4. Déficit de Escurrimiento

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

El déficit de escurrimiento se define como la cantidad de precipitación que no ha generado escorrentía. Ordoñez *et al.* (2011) sostiene que en una cuenca hidrológicamente cerrada y en un periodo preferiblemente mayor a la década el concepto de déficit de escurrimiento es equivalente al concepto de Evapotranspiración. Por esa razón, es que el déficit hídrico se calculará mediante la fórmula de Coutagne, fórmula empírica como resultado del análisis de la precipitación y la escorrentía total de numerosas cuencas, y que en anterioridad ha sido aplicada a la subcuenca del río Shullcas.

Ecuación 5.

$$D = P - XP^2$$

Donde:

D = Déficit de escurrimiento
P = Precipitación media anual (metros/año)
X = $\frac{1}{0{,}8+0{,}14\ t}$
t = temperatura media anual (°C)

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

XI. OBJETIVOS / HIPÓTESIS

OBJETIVO PRINCIPAL: Determinar la influencia de la evolución de la cobertura glaciar en el rendimiento hídrico en la subcuenca del río Shullcas.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS:

- Evaluar el comportamiento hídrico superficial de la subcuenca del río Shullcas mediante técnicas hidrológicas.
- Evaluar el proceso de evolución del glaciar Huaytapallana respecto a la subcuenca del río Shullcas mediante el empleo de técnicas de teledetección.
- Analizar y determinar la correlación entre los datos del rendimiento hídrico y los aportes del glaciar en la subcuenca del río Shullcas entre los años 2003-2016.

HIPÓTESIS:

- La reducción de la cobertura glaciar influye de manera favorable en el rendimiento hídrico del río Shullcas mediante técnicas hidrológicas.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

XII. METODOLOGÍA

1. Área de Estudio y Estaciones de Muestreo

El área de estudio comprendió la zona media y alta de la subcuenca del río Shullcas definida entre las zonas mesoandina y altoandina (3172 –4923 m.s.n.m) entre las coordenadas 12°00'12.65" de latitud sur y 75°08'42.46" de longitud oeste (correspondiente al punto de la estación hidrométrica Shullcas) y las coordenadas 11°55'10.89" de latitud sur y 75°02'23.66" de longitud oeste (como punto más extremo de la subcuenca). Esta área hidrográfica glaciar presenta una extensión de 115,94 km^2 y se encuentra ubicada en el ámbito de los distritos de El Tambo y Huancayo en la provincia de Huancayo, departamento de Junín.

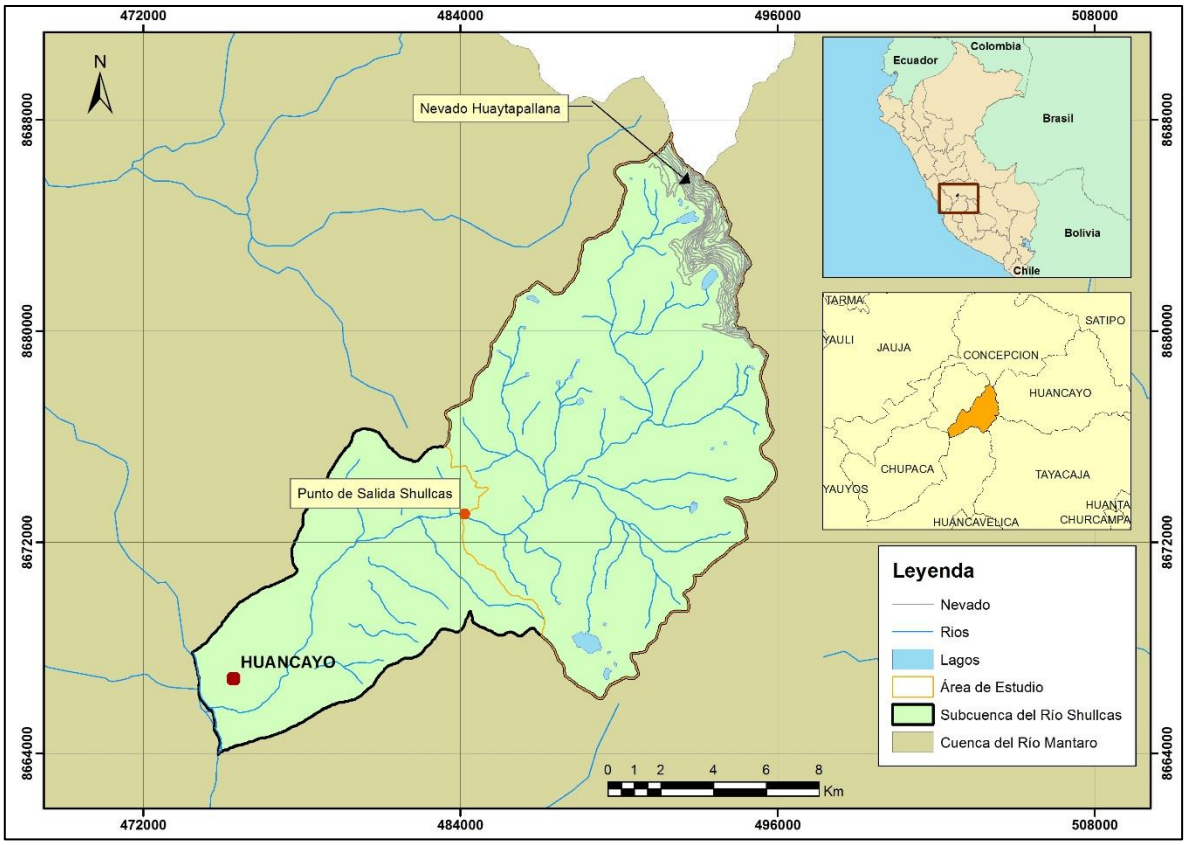


Figura 3. Mapa Hídrico de la Subcuenca del río Shullcas. Elaboración propia.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

En la Tabla 6 se presentan la lista de las estaciones meteorológicas y el tipo de información que se obtuvo de ellas, correspondientes a la subcuenca del río Shullcas. La ubicación de las estaciones meteorológicas se muestra en la Figura 4.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tabla 6
Relación de estaciones meteorológicas de la Subcuenca del río Shullcas.

Estación	Altitud	Latitud	Longitud	Tipo de información
Huaytapallana	4684	11 55' 36"	75 3' 42"	Pp. Total media mensual
Shullcas	3750	12 0' 11"	75 9' 31"	Pp. Total media mensual
Santa Ana	3295	12 0' 15"	75 13' 15"	Pp. Total media mensual
Puente Breña	3220	12 2' 53"	75 14' 31"	Pp. Total media mensual

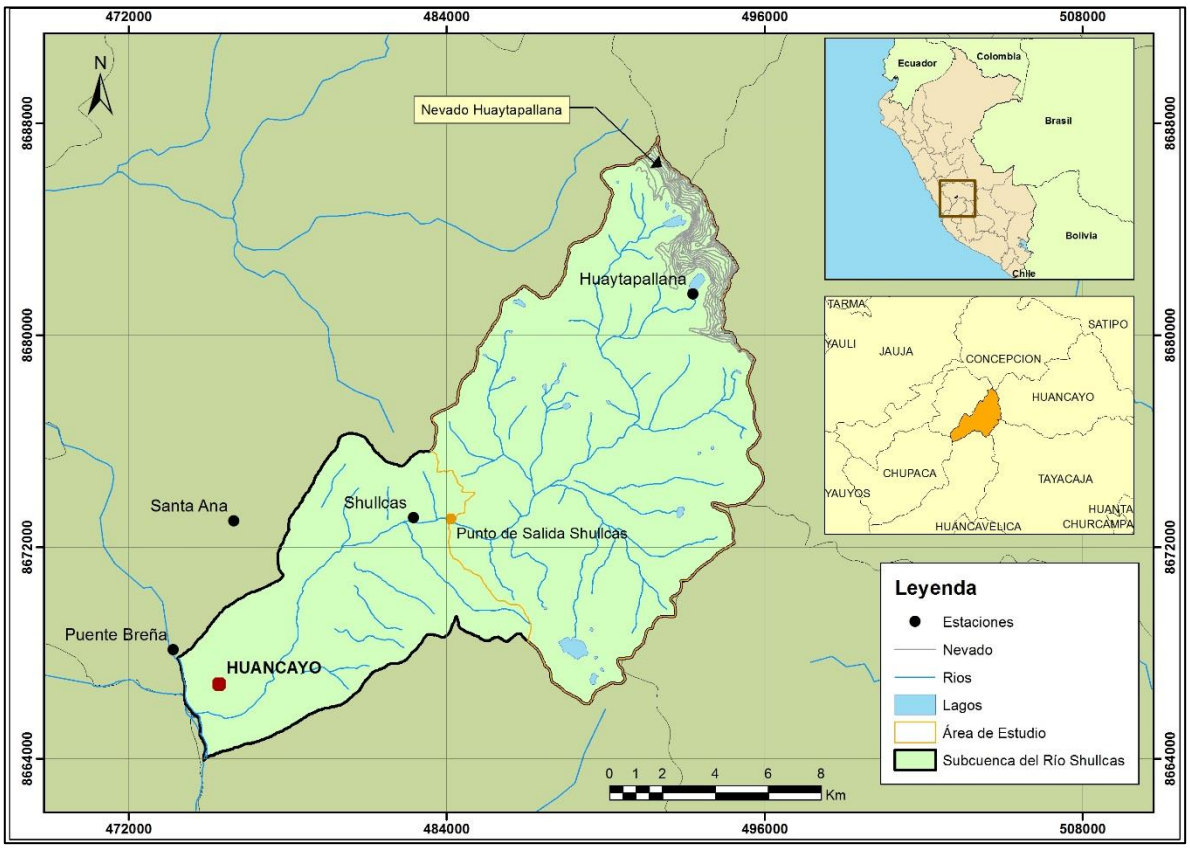


Figura 4. Mapa de las Estaciones Meteorológicas en el ámbito de la Subcuenca del río Shullcas. Elaboración propia.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Del mismo modo, se presenta la ubicación de la estación hidrométrica del Shullcas, de la cual se obtuvo la información de los niveles medios mensuales y anuales.

Tabla 7
Estación Hidrométrica de la subcuenca del río Shullcas.

Estación	Altitud	Latitud	Longitud	Tipo de Informacion
Shullcas	3750	12 0’ 11’’	75 9’ 31’’	Niveles Medios Diarios y Mensuales

*Nota. I*nformación proporcionada por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI). Elaboración propia.

2. Materiales

Cartas Nacionales
- 24-m
- 25-m
- 25-n

Imágenes Satelitales
- Imágenes LANDSAT TM y OLI/TIRS Ortorrectificadas

Equipos
- Computadora Core i3
- Caudalímetro

Software
- ArcGis v.10.3
- Excel
- Envi 5.2
- IBM SPSS Statistics 22

Registros
- Caudales medio anuales
- Precipitación media anual
- Escáner Hp A3

La selección y descarga de las imágenes satelitales se realizó a través del proveedor US Geological Survey.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tabla 8
Características de las imágenes satelitales utilizadas en el presente estudio.

AÑO	Tipo de Imagen	Sensor	Satélite	Path/Row	Fecha
2003	Multiespectral (MS)	TM	Landsat 5	008/68	14/06/2003
2005	Multiespectral (MS)	TM	Landsat 5	008/68	05/07/2005
2007	Multiespectral (MS)	TM	Landsat 5	008/68	09/06/2007
2010	Multiespectral (MS)	TM	Landsat 5	008/68	17/06/2010
2013	Multiespectral (MS)	OLI/TIRS	Landsat 8	008/68	11/07/2013
2016	Multiespectral (MS)	OLI/TIRS	Landsat 8	008/68	17/06/2016

Nota. Imágenes descargadas de los satélites Landsat 5 y 8. Elaboración propia.

Fuente: US Geological Survey (https://earthexplorer.usgs.gov)

3. Metodología

La presente metodología está basada en los procedimientos utilizados en el desarrollo de las investigaciones realizadas por Loroña (2011) y Alva & Meléndez (2009). La metodología está conformada por tres fases:

3.1. Fase de Planificación

Durante esta fase se identificó los actores clave para el suministro de información para la evaluación de la cobertura glaciar y el análisis de caudales en concordancia con los objetivos de esta investigación. Los actores clave en esta investigación se muestran en la Tabla 9.

La información fue solicitada en mesa de partes en el marco de la Ley de Transparencia y Acceso a la Información Pública – Ley Nº 27806. El ingreso de la solicitud se realizó en el mes de marzo del 2019 en la ciudad de Lima y en el mes de abril del 2019 en la ciudad de Huancayo.

La Autoridad Nacional del Agua y SENAMHI, solicitaron información detallada de la investigación. La primera, solicitó una pequeña entrevista realizada el mismo día de la presentación de la solicitud; luego del visto bueno de las instituciones, la información fue recibida en el plazo de un mes vía correo electrónico.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Esta etapa consistió principalmente en la identificación, compilación y análisis de la información existente de la zona de estudio.

Tabla 9
Relación de las instituciones fuente del suministro de información.

Fuente	Ciudad	Tipo de Información
SEDAM (Empresa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Municipal de Huancayo)	Huancayo	Niveles de Agua del Río Shullcas entre 2001 – 2016.
Autoridad Nacional del Agua (ANA)	Huancayo	Niveles de Agua del Río Shullcas entre 2001 – 2016.
SENAMHI (Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú)	Lima	Registro de Precipitación y Caudal mensual.
Instituto Geográfico Nacional (IGN)	Lima	Cartas Nacionales 24-m, 25-m y 25-n.

Asimismo, se planificaron los recorridos de identificación del área de estudio y la medición de las dimensiones de la estación hidrométrica Shullcas. Un guía con amplia experiencia fue contratado para el mes de junio donde se estableció la primera visita dentro de la zona media y alta y de la subcuenca del río Shullcas.

3.2. Fase de Campo

La información disponible en la fase de planificación requería ser corroborada en la zona de estudio, por ello, se realizaron 3 visitas a la subcuenca del río Shullcas. La primera visita se realizó en el mes de abril, en la cual un guía experimentado de la zona colaboró en el reconocimiento de toda el área hidrográfica desde la desembocadura del río Shullcas, en la ciudad de Huancayo, hasta su naciente en el glaciar Huaytapallana. En esta visita también fueron entregadas las solicitudes de información a las instituciones mencionadas en la Tabla 9.

Cabe mencionar que a lo largo de toda esta visita muchos campesinos, comerciantes y habitantes de la zona transmitieron su preocupación por los cambios en el régimen del caudal del río Shullcas, la intensidad de las lluvias y las heladas en los últimos años.

La segunda visita se realizó en el mes de mayo, en esta se realizó las mediciones de las dimensiones del cauce de río Shullcas en la zona de estación hidrométrica Shullcas para poder corroborar la ecuación de calibración del SENAMHI.

Asimismo, los campesinos de la zona expresaron que reciben asistencia técnica de ONG's en la racionalización del recurso hídrico para el riego de sus cultivos, debido a que los periodos de sequía se han incrementado en época seca.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

La última visita fue en el mes de julio, en dicha fecha estaba programada una visita técnica a las instalaciones de la Planta de Tratamiento de Agua Residual de SEDAM, ubicada a la salida de la ciudad de Huancayo en la margen derecha del río Shullcas. Aquella visita técnica sirvió para entender que la subcuenca del río Shullcas se encontraba en un contexto de variabilidad climática que se manifestó más en las últimas dos décadas.

3.3. Fase de Gabinete

En esta etapa se ejecutó la metodología para la obtención de los resultados de la cobertura glaciar y rendimiento hídrico. Los datos y resultados de las fases anteriores fueron compilados y analizados para poder ser comparados con estudios regionales similares.

Se realizó la elaboración de productos cartográficos de los índices de Nieve y los cambios de la cobertura glaciar para los años de descarga de las imágenes satelitales para evaluar el comportamiento general de los cambios glaciares. Asimismo, se realizó una intensa revisión bibliográfica de diversos estudios que tengan alcances similares con los objetivos de la investigación.

Asimismo, se realizaron dos procedimientos para la obtención de los resultados a las variables planteadas en la pregunta de investigación. Por un lado, se realizó el análisis temporal del área glaciar de la subcuenca del río Shullcas (*Figura 5*), mediante técnicas de teledetección, donde se obtuvo como resultado el volumen glaciar y por el otro se realizó un estudio de manera detallada de los caudales mensuales y anuales en época de estiaje por medio del método de la curva de duración; paralelamente, con la información pluvial recopilada se generaron isoyetas de precipitación para el rango de años de estudio. El tratamiento de los resultados de la escorrentía y los caudales reales registrados nos permitió conocer el aporte glaciar. Estos resultados se muestran de manera detallada en la Tabla 15.

a. Análisis temporal del glaciar shullcas

Recopilación y Recolección de la Información

Las imágenes satelitales LANDSAT fueron descargadas del proveedor U.S Geological Survey (USGS) correspondientes a los años 2003, 2005, 2007, 2010. 2013 y 2016 y a la ubicación Path y Row (008/68) (*Tabla 8*), en la cual se encuentra la subcuenca de río Shullcas. Mientras que las Cartas Nacionales 24-m, 25-m, 24-n y 25-n fueron provistas por el IGN. La bibliografía recopilada en fase de planificación y gabinete fueron compiladas, revisadas y analizadas en este punto.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Ortorrectificación

Se hizo uso de un DEM gratuito obtenido de la plataforma Earthexplorer con 30 metros de resolución espacial sobre el cual se realizó la corrección geométrica mediante las herramientas del software Envi 5.2. La ortorrectificación nos permitirá corregir las distorsiones de desplazamientos del relieve.

Delimitación de masas glaciares

En esta etapa se aplicó el índice NDSI (índice de Nieve de Diferencia Normalizada) sobre las imágenes satelitales corregidas mediante el software ENVI 5.2, con la finalidad de discriminar las áreas cubiertas de hielo en los periodos definidos 2003, 2005, 2007, 2010, 2013 y 2016, separando los cuerpos de agua, nubes y nieve que pueden interferir en los resultados. Los intervalos del valor del NDSI fueron definidos teniendo en cuenta los resultados obtenidos de diversos estudios, quienes establecen valores mínimos entre 0,18 (Maestro, I. & Recio, J., 2004) hasta 0,4 (Dozier,J., 1989). Los intervalos del NDSI se muestran en la tabla 12.

A continuación, las áreas discriminadas resultantes fueron superpuestas con un parámetro adicional empleado por Cogliati et al. (2013), el cual consiste en excluir las áreas glaciares con temperaturas mayores a 277 K, las cuales se efecturaron mediante la aplicación de la banda térmica de las imágenes Landsat.

La discriminación glaciar, luego del resultado del NDSI, debe ser complementada con una digitalización manual en las zonas cercanas a las áreas con presencia de agua donde generalmente se presentan superposiciones por el cercano valor de reflectancia (Copé de los Mozos, 2012; Yap, A., 2015; Guardamino, L. & Drenkhan, F., 2016). Se hizo una evaluación para cada año de evaluación, de tal forma que el área glaciar obtenida por el NDSI presente una adecuada relación con la superficie glaciar presentada en la imagen satelital, teniendo en cuenta los límites mínimos empleados por la bibliografía. Del mismo modo se diferenciaron las áreas hídricas para cada imagen satelital, de este modo, la comparación y delimitación de las áreas glaciares se hace más efectiva.

Obtención de Áreas que presentan Retroceso Glaciar

La obtención de las áreas que presentan retroceso glaciar se realizaron mediante el software ArcGis 10.3, el cual permitió superponer las áreas ocupadas por los glaciares para el periodo de estudio con el objetivo de mostrar la evolución de las masas de hielo en las dos últimas décadas. Finalmente se elaboraron los productos cartográficos donde se representó el proceso de retroceso glaciar.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Volumen Glaciar

Con los resultados obtenidos del área glaciar entre los años de estudio 2003-2016, se procedió a estimar el volumen glaciar para los periodos de interés mediante la ecuación empírica propuesta por Barth D. & Kaser (2015). Los valores de las constantes c y γ usados en la ecuación empírica están basados y sustentados en estudios realizados en la región (Mernild et al., 2015; Moya Quiroga et al., 2013) y en Perú (Alva, M. & Ramos, R., 2017; Condom, T., et al., 2010). Los valores del volumen glaciar se muestran en la tabla 14.

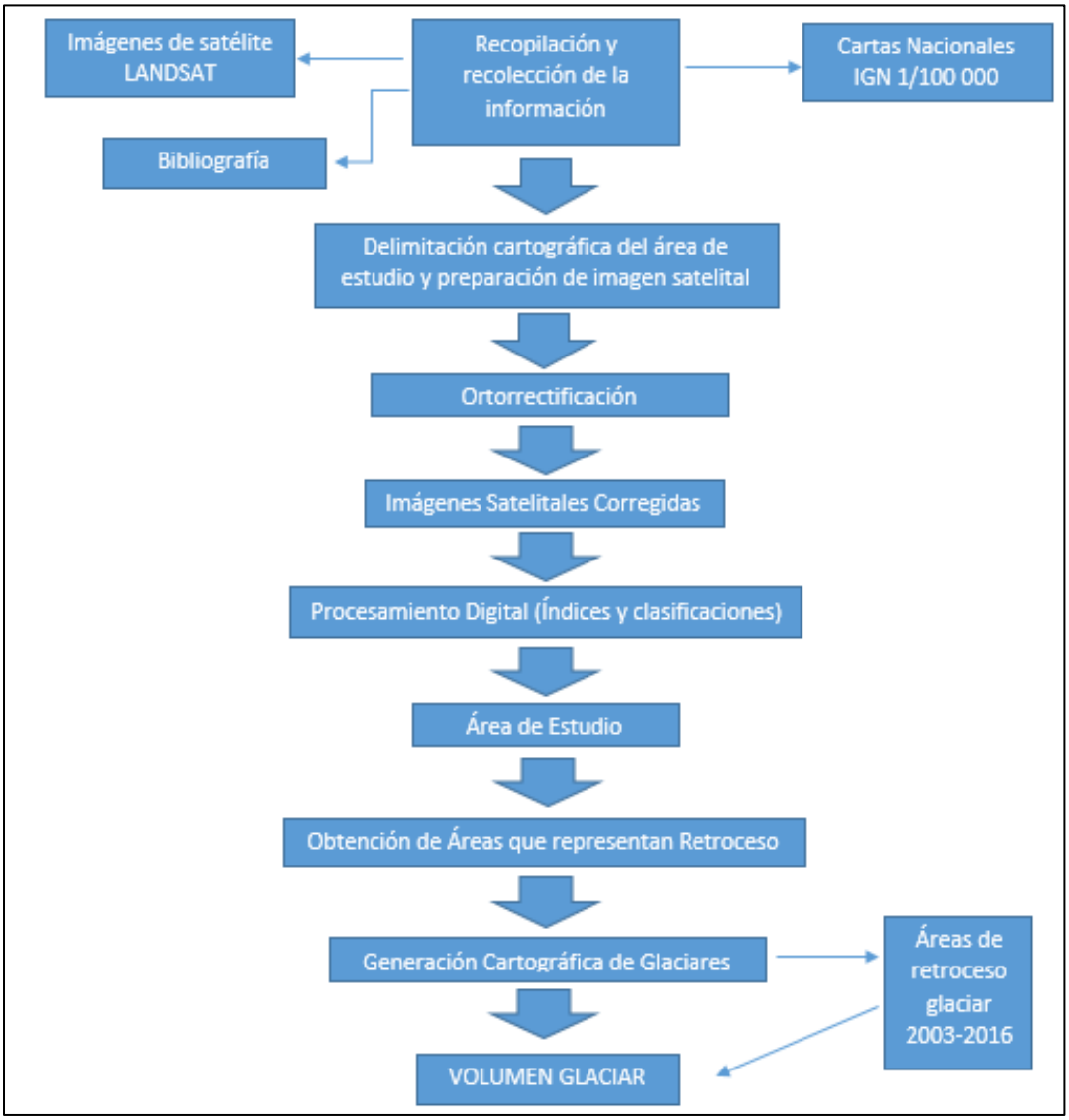


Figura 5. Esquema Procedimental de Análisis Multitemporal del glaciar Shullcas.

Fuente: Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca", Alva & Meléndez (2009).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

b. Cálculo del Aporte Hídrico del Nevado

Método análisis de la curva de duración

Luego de haber transformado los niveles de agua en caudales bajo la ecuación de calibración proporcionada por SENAHMI, los datos fueron utilizados para poder desarrollar el método de la curva de duración, con el cual se pudo obtener la probabilidad de excedencia de los caudales mínimos promedios mensuales de la subcuenca del río Shullcas en los años hidrológicos secos, y de esta forma se conoció el aporte glaciar permanente entre el periodo 2003-2013.

Análisis Pluviométrico

Se sintetizó la información pluviométrica media mensual por años hidrológicos entre los periodos 2002-2003 hasta 2015-2016. A partir de esos datos y la temperatura media anual, se procedió a hallar la ecuación de déficit de escurrimiento para este periodo de estudio bajo la ecuación de Coutagne y, consecuentemente, se obtuvo el escurrimiento superficial para cada año hidrológico.

En seguida, se determinó el caudal superficial por lluvias en metros cúbicos por segundo para homogenizar las dimensiones de las unidades con el caudal real medido en la estación hidrológica del Shullcas. La diferencia entre el caudal real y el caudal superficial por lluvias nos dio como resultado el caudal de aporte del glaciar obteniendo un cuadro semejante como se presenta a continuación. El caudal específico fue evaluado bajo el área de la subcuenca del río Shullcas en unidades de metros cúbicos por segundo por hectáreas.

Tabla 10
Plantilla de resultados de evaluación hidrológica.

Año	Mes	Pp. Total Mensual (mm)	Escorrentía (mm)	Caudal Escorrentía (L/s)	Caudal Real (L/s)	Caudal Nevado (L/s)	Rend. Hídrico (L/s/km2)

Nota. Recuperada de "Evaluación de la Cobertura Glaciar y su influencia en el Rendimiento Hídrico en la subcuenca del Quillcay", Loroña (2011).

4. Análisis Estadístico

Se realizó una prueba de correlación de Pearson donde se determinó la relación entre los cambios en la cobertura glaciar y los caudales reportados en la estación hidrométrica Shullcas. Los resultados del R como resultado del análisis combinatorio de las dos variables cuantitativas para el rango de años (2003-2016) sirvieron como indicador de una mayor relación y por lo tanto de una mayor influencia. El procedimiento y obtención de resultados se realizaron mediante el software estadístico IBM SPSS Statistics 22.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

XIII. RESULTADOS

1. Subcuenca del río Shullcas

1.1. Parámetros Fisiográficos

A lo largo de todo su recorrido, el área de estudio (Subcuenca del río Shullcas) se encuentra bajo la influencia de 13 centros poblados comprendidos entre los distritos de Huancayo y el Tambo, pertenecientes a la provincia de Huancayo, departamento de Junín. La subcuenca del río Shullcas limita con la subcuenca del Río Viscas, por el norte, y la subcuenca del Río Tulumayo, por el sur.

La fisiografía en las zonas altas de esta área hidrogeografica es abrupta, donde predominan los paisajes de colinas y grandes montañas. Es importante mencionar que en esta zona se encuentra presente el lado sur de la cordillera Huaytapallana, por ende se puede encontrar la presencia de importantes nevados en su área de influencia.

Las características fisiográficas de la subcuenca del río Shullcas se presentan en el siguiente cuadro:

Tabla 11
Características Fisiográficas de la subcuenca del río Shullcas.

Parámetros	Valor	Unidad
Área	232,55	Km^2
Perímetro	90,20	Km
Longitud del Río Principal	35,90	Km
Altura de la salida de la Cuenca	3 200	m.s.n.m
Longitud total de Ríos	159.89	Km
Pendiente Media del Río Principal	4,3	%
Altura Media de la Cuenca	4 241	M
Densidad de Drenaje	68,75	Km/Km^2
Índice de Compacidad	1,56	Adimensional
Lado Mayor del Rectángulo Equivalente	39,16	Km
Lado Menor del Rectángulo Equivalente	5,94	Km
Factor de Forma	0,4	Adimensional

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

2. Evaluación Multitemporal del Área Glaciar Shullcas

En el Anexo 1 se muestran las imágenes satelitales del periodo de evaluación del presente estudio en combinación RGB: 7, 4, 2 para las imágenes Landsat 5 y 7 y RGB: 7, 5, 3 para las imágenes Landsat 8.

En Anexo 2 se muestran los resultados de la evaluación mediante el Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) aplicada a cada imagen satelital del presente estudio. Los intervalos de clasificación del NDSI para la diferenciación empírica entre el Hielo y Agua se muestran en la Tabla 12.

Tabla 12
Intervalos de clasificación del NDSI

Año de la Imagen Satelital	Hielo	Agua
2003	<0,6685 0,2750≤	0,6685≤
2005	<0,6250 0,2500≤	0,6250≤
2007	<0,5701 0,2067≤	0,5701≤
2010	<0,5735 0,26700≤	0,5735≤
2013	<0,61200 0,27600≤	0,5910≤
2016	<0,6981 0,2700≤	<0,6981

Luego del cruce de información, la data fue procesada en el software ENVI y posteriormente en el software ARCGIS para obtener los resultados cartográficos de la cobertura glaciar desde el año 2003 al 2016. Dichos resultados se muestran a continuación.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

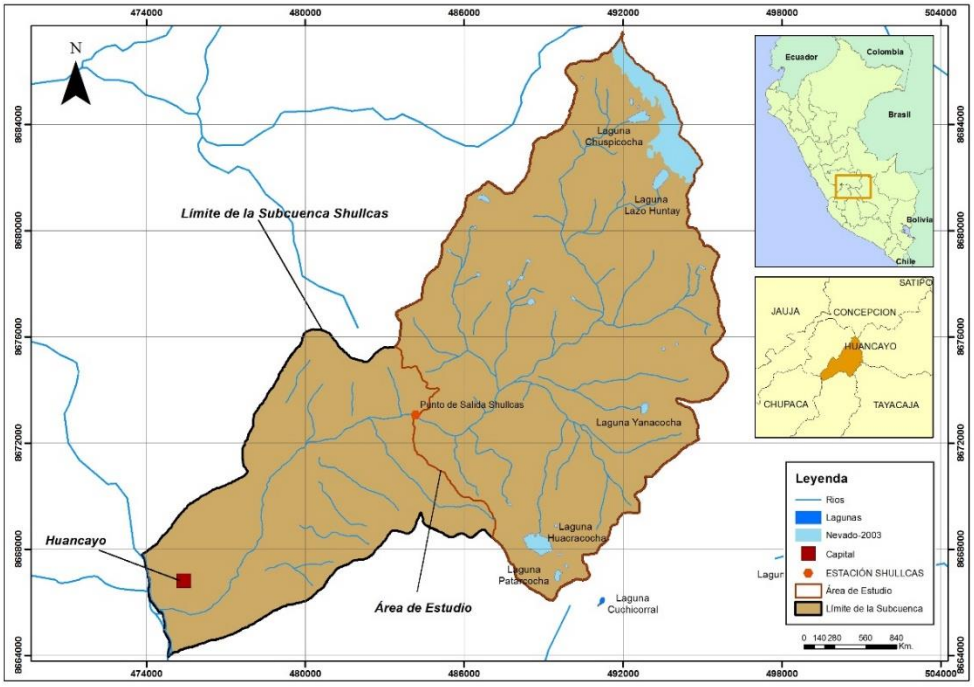


Figura 6. Mapa de Cobertura Glaciar de la Subcuenca del río Shullcas del año 2003.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

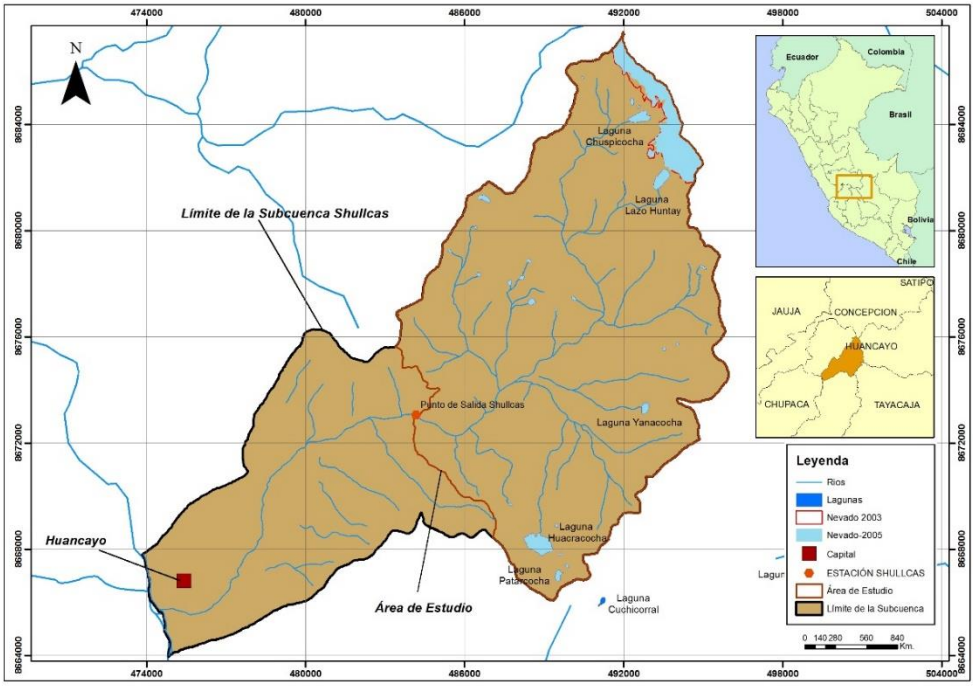


Figura 7. Mapa de Cobertura Glaciar de la Subcuenca del río Shullcas del año 2005.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

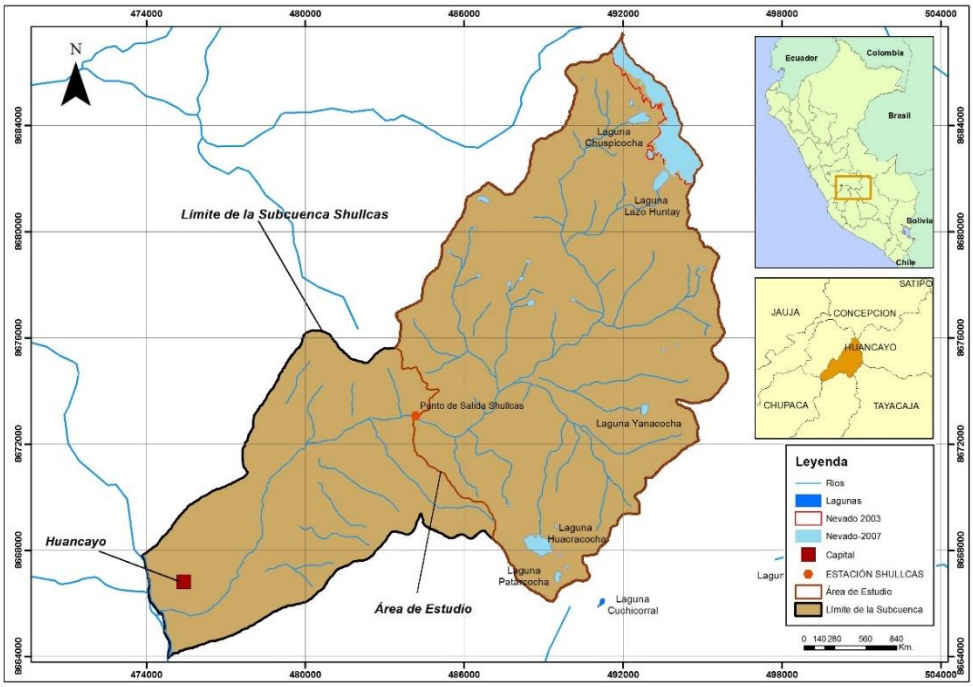


Figura 8. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2007.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

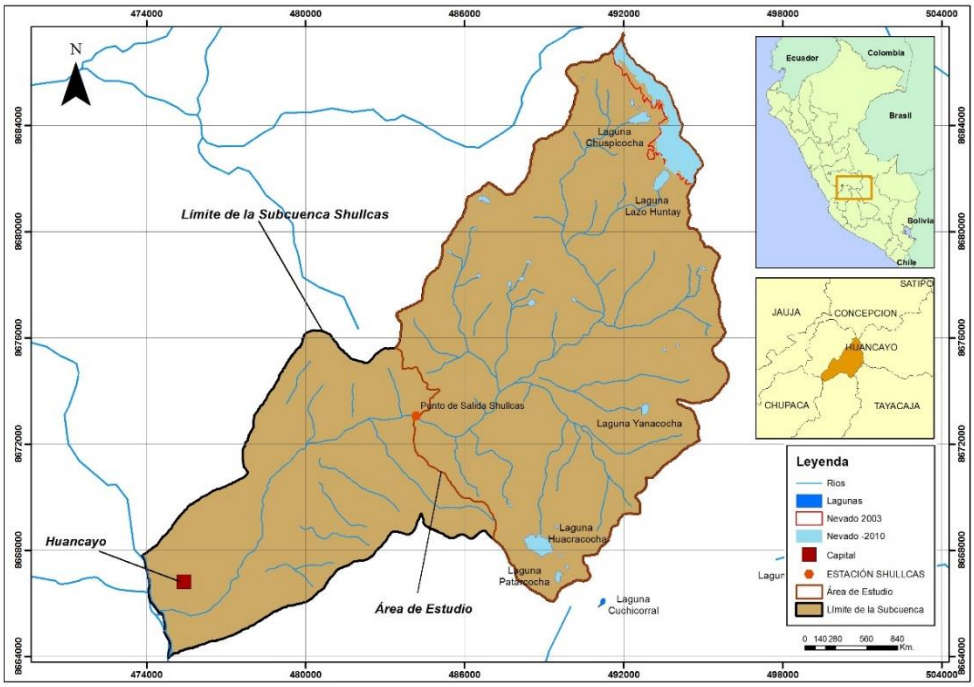


Figura 9. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2010.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

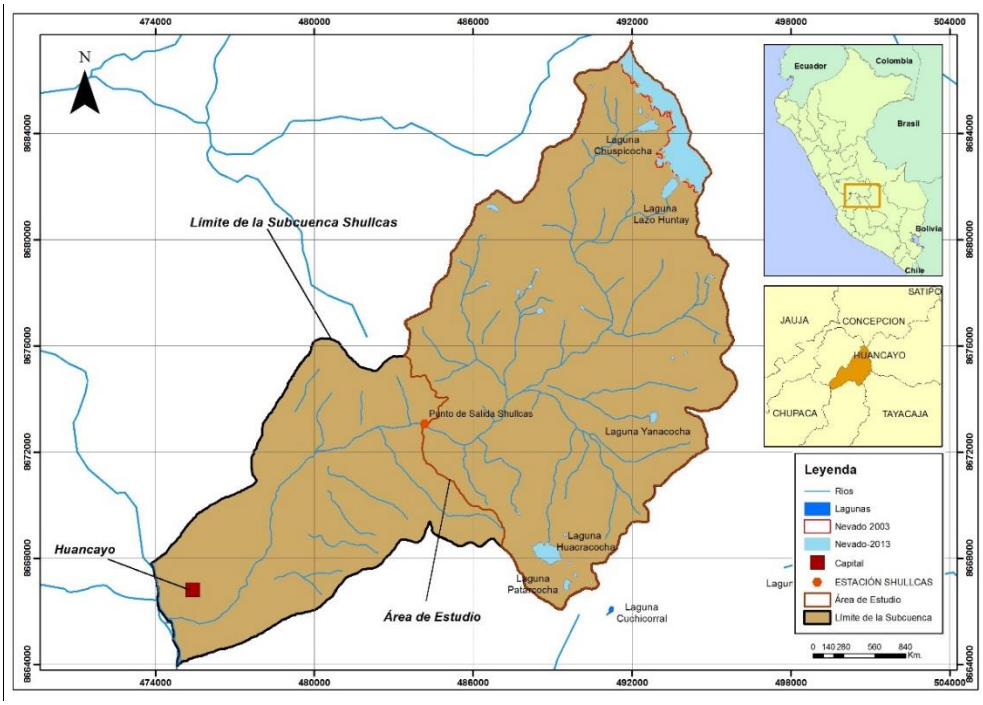


Figura 10. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2013.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

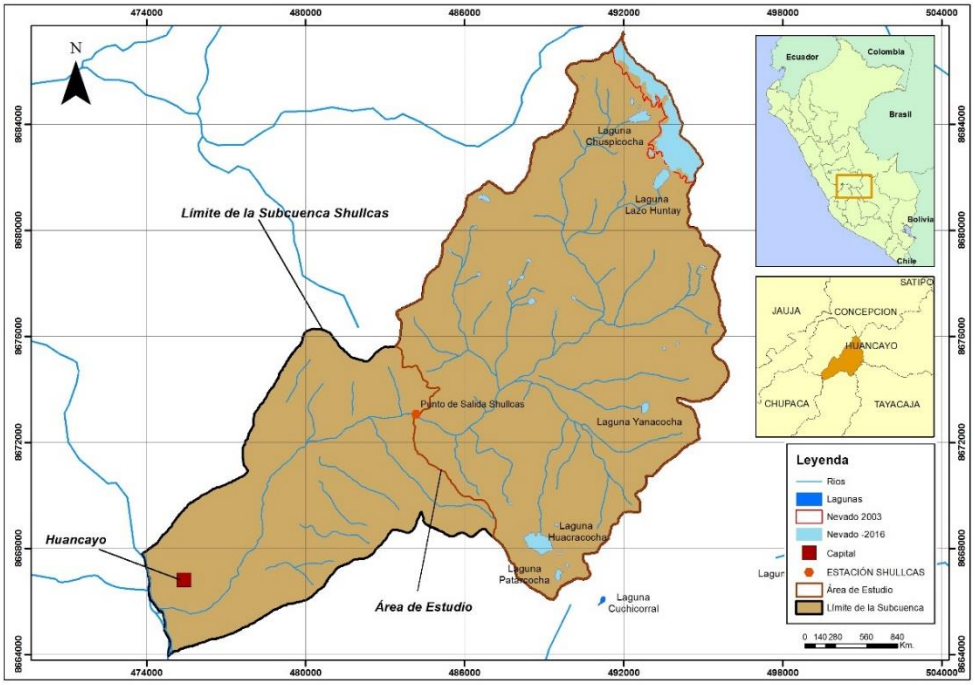


Figura 11. Mapa de Cobertura Glaciar de la subcuenca del río Shullcas del año 2016.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

En la Tabla 13 y 14 se muestra el registro de las áreas y volúmenes glaciares desde el año 2003 hasta el año 2016, respectivamente. Los valores muestran una tendencia descendente hasta el año 2013, donde existe una recuperación de la masa glaciar asociada a anomalías climáticas positivas. El último año de evaluación (2016) tuvo la menor área glaciar con un valor de 3,7124 km^2. La tasa de recesión glaciar anual general entre el primer y último año es de 0,0833 km^2.

En términos generales, la recesión glaciar de la subcuenca del río Shullcas en el periodo de evaluación del presente estudio correspondiente a 1,0835 km^2.

Tabla 13
Registros de la cobertura glaciar entre 2003-2016.

Año	Unidad	Valor
2003	Km^2	4,7959
2005	Km^2	4,4576
2007	Km^2	4,2363
2010	Km^2	3,9293
2013	Km^2	4,5320
2016	Km^2	3,7124

Posteriormente, se procedió a calcular el volumen glaciar de acuerdo al método de escala Volumen-Área (Bahr, D.,2011). Para este método se usó los parámetros de: C : 0,048$km^{3-2\gamma}$, γ = 1,36. Dichos valores están sustentados en la sección 3.

Tabla 14
Registros de la cobertura y volumen glaciar entre 2003-2016.

Año	Área (Km^2)	Volumen (Km^3)
2003	4,7959	0,4048
2005	4,4576	0,3664
2007	4,2363	0,3419
2010	3,9293	0,3087
2013	4,5320	0,3748
2016	3,7124	0,2857

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

3. Análisis Pluvial

Existen cuatro estaciones meteorológicas que ejercen influencia dentro de la Subcuenca del río Shullcas, de ellas solo las estaciones Shullcas y Huaytapallana, se encuentran dentro del límite hidrogeográfico. En cuanto se refiere al área de estudio, las estaciones se limitan a tres siendo la estación meteorológica Huaytapallana la más reciente de todas ellas, ya que comenzó a operar desde el año 2013.

Con la información de las estaciones Santa Ana, Shullcas y Huaytapallana se desarrollaron dos mapas de isoyetas para los años hidrológicos 2014-2015 y 2015-2016, los cuales se muestran en las Figuras 12 y 13. Los resultados de los mapas de Isoyetas muestran el mismo comportamiento pluvial en la estación meteorológico e hidrométrica Shullcas.

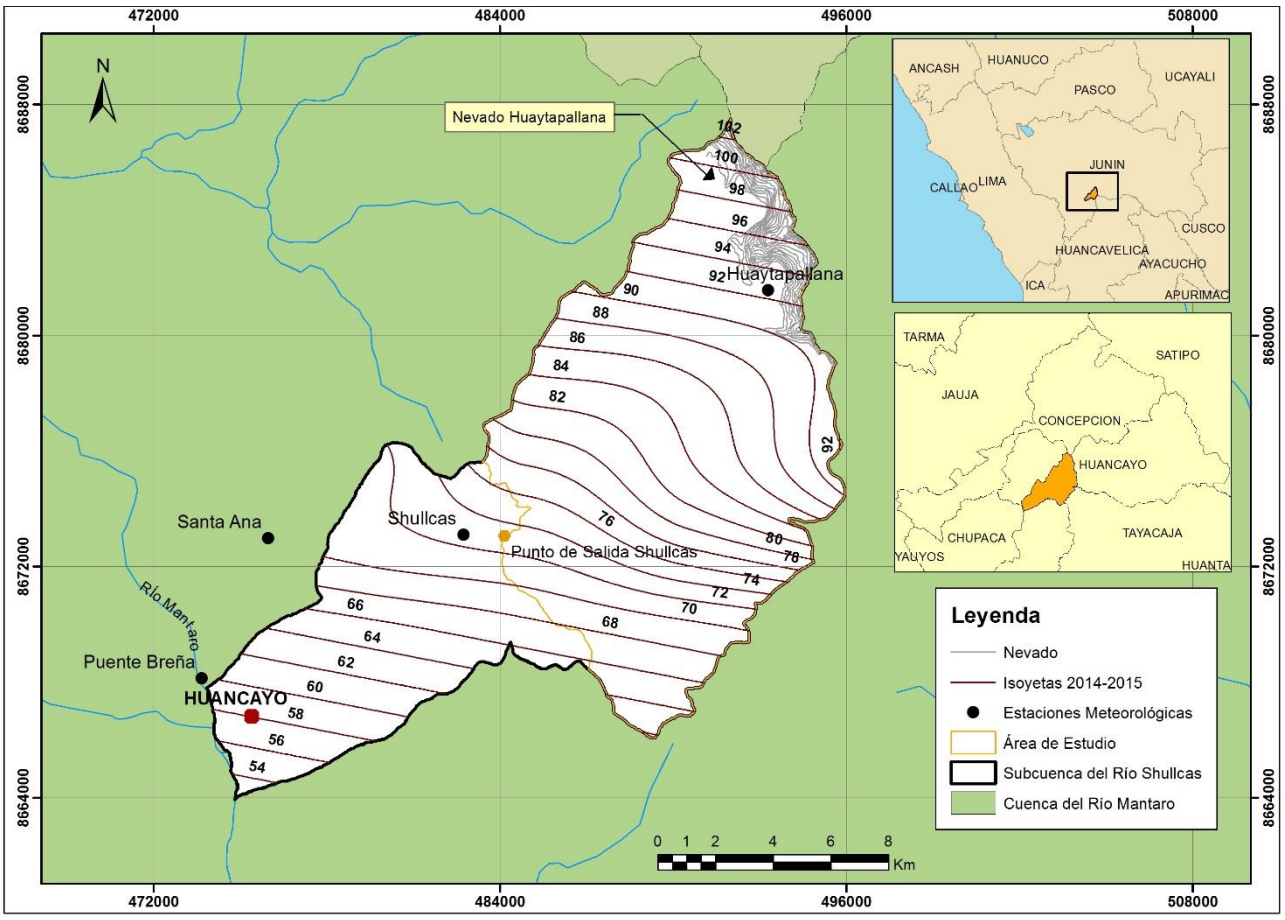


Figura 12. Mapa de Isoyetas de precipitación anual del año 2014-2015.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

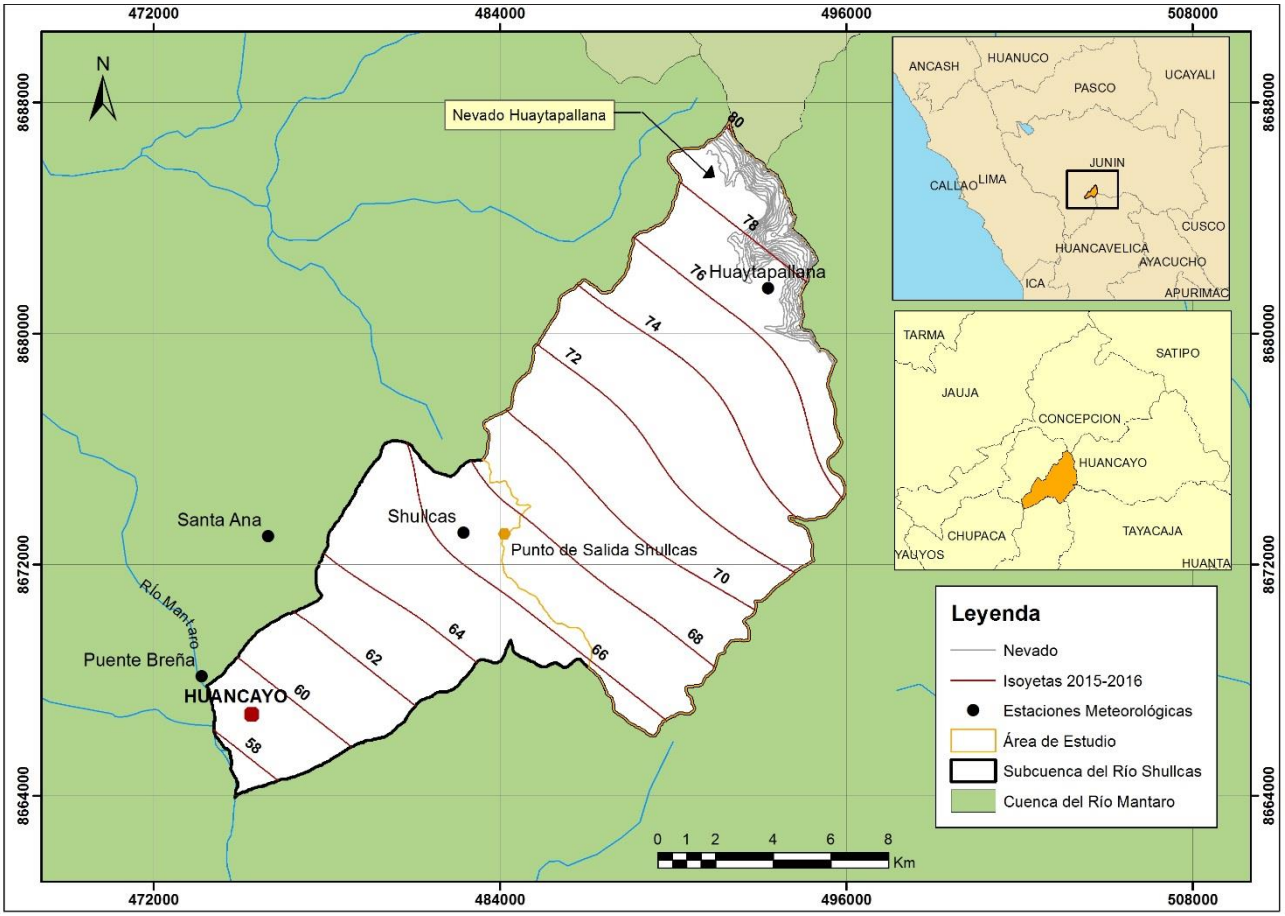


Figura 13. Mapa de Isoyetas de precipitación anual del año 2015-2016.
Fuente: INEI (2007), ANA (2009), MINEDU (2004).

4. Análisis de Caudales y Rendimiento Hídrico

Con la información disponible se puede afirmar que el aporte glaciar mínimo corresponde al año hidrológico 2015-2016 con 17,501 L/s; contrariamente, el periodo hidrológico de mayor aporte glaciar es el 2010-2011 con 66,997 L/s, lo cual hace una diferencia cercana a la cuarta parte entre ambos registros.

No se puede asegurar un claro comportamiento general de los datos del aporte glaciar, sin embargo, se puede apreciar que a partir del año hidrológico 2010-2011 hasta el año 2015-2016 el aporte glaciar ha disminuido notablemente. El caudal promedio de la descarga superficial del área glaciar al río Shullcas en el periodo de evaluación 2003 – 2016 es de 38,020 L/s. El comportamiento del rendimiento hídrico fue similar al aporte glaciar. Mejores rendimientos hídricos se registraron entre 2009-2011, teniendo como valor máximo a 0,6260 L/s*Km^2. El rendimiento hídrico promedio del área de estudio en el periodo de evaluación 2001-2016 es de 0,3712 L/s*Km^2.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tabla 15

Registro de datos hídricos correspondiente al área de estudio Subcuenca del río Shullcas entre 2002-2016.

Año	Mes	Pp. Total Mensual (mm)	Escorrentía (mm)	Caudal Escorrentía (L/s)	Caudal Real (L/s)	Caudal Nevado (L/s)	Rend. Hídrico (L/s/km2)
2002	Setiembre	52,20	25,12	1123,75	1455,87	332,12	12,56
	Octubre	44,80	17,36	776,55	1047,77	271,22	9,04
	Noviembre	72,90	54,84	2453,20	2874,53	421,33	24,79
	Diciembre	164,70	164,70	4167,02	4764,87	597,85	41,10
2003	Enero	174,40	174,40	4275,90	4891,76	615,86	42,19
	Febrero	181,30	181,30	4556,54	5295,98	739,44	45,68
	Marzo	168,30	168,30	4128,05	4876,55	748,50	42,06
	Abril	75,80	53,03	1372,13	1891,86	519,73	16,32
	Mayo	26,70	6,57	353,68	734,05	380,37	6,33
	Junio	0,80	0,01	79,24	564,90	485,66	4,87
	Julio	1,20	0,01	124,49	504,47	379,98	4,35
	Agosto	52,80	22,64	1012,56	1484,72	472,16	12,81
	Setiembre	50,00	21,35	954,98	1285,62	330,64	11,09
	Octubre	92,10	70,57	2156,76	2587,88	431,12	22,32
	Noviembre	103,60	95,31	3363,15	3783,89	420,74	32,64
	Diciembre	167,40	167,40	4327,79	5022,13	694,34	43,32
2004	Enero	50,50	24,23	4483,69	5164,54	680,85	44,54
	Febrero	164,50	164,50	4658,07	5364,48	706,40	46,27
	Marzo	135,62	135,62	3566,27	4337,60	771,32	37,41
	Abril	41,60	15,78	2305,96	2856,85	550,89	24,64
	Mayo	22,80	4,39	796,48	1221,69	425,21	10,54
	Junio	9,40	0,69	80,75	432,77	352,02	3,73
	Julio	11,00	0,83	337,13	573,45	236,32	4,95
	Agosto	19,00	2,85	621,40	825,87	204,47	7,12
	Setiembre	78,00	48,00	1147,16	1568,12	420,96	13,53
	Octubre	120,20	115,30	2657,15	3231,56	574,41	27,87
	Noviembre	95,30	84,65	3786,17	4425,78	639,61	38,17
	Diciembre	95,60	77,04	3446,21	3958,43	512,22	34,14
2005	Enero	85,80	66,11	2956,99	3581,67	624,68	30,89
	Febrero	108,90	101,51	4540,75	5252,89	712,14	45,31
	Marzo	118,50	118,50	4100,50	4815,23	714,73	41,53
	Abril	34,10	10,09	1651,47	2254,32	602,85	19,44
	Mayo	14,00	1,62	472,33	823,30	350,97	7,10
	Junio	0,00	0,00	0,00	322,73	322,73	2,78

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

	Julio	5,40	0,24	210,57	601,12	390,55	5,18
	Agosto	8,30	0,53	523,73	859,54	335,81	7,41
	Setiembre	36,40	11,61	1519,16	1957,54	438,38	16,88
	Octubre	82,40	63,96	2860,91	3228,42	367,51	27,85
	Noviembre	70,40	43,37	2939,78	3187,87	248,09	27,50
	Diciembre	169,30	169,30	4572,78	5289,98	717,20	45,63
2006	Enero	224,70	224,70	5250,82	5992,98	742,17	51,69
	Febrero	153,80	153,80	5879,46	6598,42	718,96	56,91
	Marzo	119,60	119,60	5349,70	5879,23	529,53	50,71
	Abril	39,90	14,07	3629,50	4198,54	569,04	36,21
	Mayo	2,80	0,07	333,20	823,78	490,58	7,11
	Junio	7,40	0,46	20,38	276,65	256,27	2,39
	Julio	0,00	0,00	0,00	356,87	356,87	3,08
	Agosto	25,70	4,61	206,21	615,44	409,23	5,31
	Setiembre	37,50	11,88	531,52	1016,96	485,44	8,77
	Octubre	91,70	73,83	3302,41	3839,36	536,95	33,12
	Noviembre	93,60	81,30	3636,62	4100,19	463,57	35,36
	Diciembre	92,40	88,79	3971,69	4285,39	313,70	36,96
2007	Enero	105,20	102,92	4603,76	5248,25	644,48	45,27
	Febrero	112,70	112,70	5041,06	5645,57	604,51	48,69
	Marzo	123,40	123,40	5519,67	5981,74	462,07	51,59
	Abril	55,80	27,77	1242,31	1617,88	375,56	13,95
	Mayo	26,40	5,82	260,31	675,46	415,15	5,83
	Junio	0,00	0,00	0,00	282,28	282,28	2,43
	Julio	12,00	1,04	46,38	343,60	297,22	2,96
	Agosto	15,20	1,73	77,30	436,60	359,29	3,77
	Setiembre	33,90	8,64	386,56	653,60	267,04	5,64
	Octubre	116,40	116,40	4206,56	4679,15	472,59	40,36
	Noviembre	68,70	45,69	2043,56	2615,45	571,89	22,56
	Diciembre	117,00	117,00	5233,40	5627,70	394,30	48,54
2008	Enero	212,00	453,04	5564,25	6018,92	454,67	51,91
	Febrero	131,50	171,37	4765,20	5106,94	341,74	44,05
	Marzo	53,80	25,09	1122,49	1750,01	627,52	15,09
	Abril	39,80	13,62	609,34	1118,62	509,28	9,65
	Mayo	15,50	2,02	90,16	712,11	621,95	6,14
	Junio	8,20	0,49	21,72	329,22	307,51	2,84
	Julio	0,00	0,00	0,00	198,99	198,99	1,72
	Agosto	8,00	0,49	21,73	378,68	356,96	3,27
	Setiembre	48,00	21,01	939,89	1412,95	473,06	12,19
	Octubre	62,70	35,47	1586,57	2114,39	527,81	18,24

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

	Noviembre	99,60	96,57	4319,69	4787,95	468,25	41,30
	Diciembre	168,50	168,50	4536,99	5196,43	659,43	44,82
2009	Enero	96,50	86,23	3857,13	4363,09	505,96	37,63
	Febrero	169,20	169,20	4568,31	5260,00	691,69	45,37
	Marzo	137,70	137,70	4159,31	4716,54	557,22	40,68
	Abril	45,70	18,34	820,21	1294,74	474,53	11,17
	Mayo	26,30	5,42	242,32	501,96	259,64	4,33
	Junio	8,00	0,44	19,77	415,27	395,50	3,58
	Julio	9,10	0,56	25,16	474,36	449,20	4,09
	Agosto	34,70	9,63	430,69	954,28	523,59	8,23
	Setiembre	12,20	1,29	57,59	614,78	557,19	5,30
	Octubre	70,40	47,91	2142,87	2616,79	473,92	22,57
	Noviembre	39,30	15,67	700,87	1218,39	517,52	10,51
	Diciembre	369,10	369,10	5309,82	5990,03	680,21	51,66
2010	Enero	232,90	232,90	5117,60	5710,71	593,11	49,26
	Febrero	174,60	174,60	4809,85	5212,08	402,24	44,95
	Marzo	110,10	104,03	3653,44	4186,79	533,35	36,11
	Abril	31,60	8,64	386,36	862,34	475,98	7,44
	Mayo	10,50	0,83	37,07	426,80	389,73	3,68
	Junio	0,50	0,00	0,08	313,48	313,40	2,70
	Julio	5,00	0,19	8,34	501,32	492,98	4,32
	Agosto	5,80	0,28	12,43	314,69	302,26	2,71
	Setiembre	70,30	47,79	2137,64	2567,14	429,50	22,14
	Octubre	59,70	31,86	1425,23	1816,00	390,77	15,66
	Noviembre	68,10	44,01	1968,61	2520,04	551,43	21,74
	Diciembre	159,90	159,90	4152,32	4820,04	667,72	41,57
2011	Enero	243,30	243,30	5682,79	6249,11	566,32	53,90
	Febrero	248,30	248,30	5106,44	5729,67	623,23	49,42
	Marzo	184,30	184,30	4243,73	4642,00	398,27	40,04
	Abril	74,70	53,96	2413,60	2839,81	426,20	24,49
	Mayo	21,70	4,50	201,15	532,87	331,72	4,60
	Junio	0,40	0,00	0,06	317,19	317,13	2,74
	Julio	6,70	0,36	16,18	419,17	402,99	3,62
	Agosto	3,10	0,07	3,28	292,79	289,51	2,53
	Setiembre	66,20	35,94	1607,42	1914,92	307,50	16,52
	Octubre	65,10	38,78	1734,53	2217,79	483,26	19,13
	Noviembre	72,70	51,11	2286,09	2824,58	538,49	24,36
	Diciembre	207,90	207,90	4019,35	4537,22	517,86	39,13
2012	Enero	100,90	92,03	4116,70	4763,18	646,48	41,08
	Febrero	202,30	202,30	5748,87	6536,04	787,17	56,37

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

	Marzo	141,20	141,20	4315,87	4748,92	433,05	40,96
	Abril	47,80	19,76	884,04	1521,55	637,51	13,12
	Mayo	17,90	2,58	115,37	641,45	526,08	5,53
	Junio	0,60	0,00	0,14	314,87	314,73	2,72
	Julio	14,00	1,54	68,91	413,85	344,94	3,57
	Agosto	22,00	4,08	182,29	616,24	433,95	5,32
	Setiembre	48,20	16,03	717,04	1218,52	501,49	10,51
	Octubre	80,10	51,52	2304,51	2920,77	616,25	25,19
	Noviembre	82,60	57,79	2584,89	2821,99	237,10	24,34
	Diciembre	167,60	167,60	5496,74	5868,63	371,89	50,62
2013	Enero	165,10	165,10	5384,91	5725,90	340,99	49,39
	Febrero	165,20	165,20	5389,39	5831,40	442,01	50,30
	Marzo	125,30	125,30	3604,66	4105,23	500,57	35,41
	Abril	44,30	15,96	713,67	1379,65	665,98	11,90
	Mayo	18,80	2,89	129,32	544,67	415,35	4,70
	Junio	1,20	0,01	0,48	656,67	656,19	5,66
	Julio	3,20	0,06	2,57	418,23	415,66	3,61
	Agosto	9,80	0,65	28,95	452,91	423,96	3,91
	Setiembre	44,60	16,21	725,15	1227,76	502,61	10,59
	Octubre	84,20	65,51	2930,18	3335,78	405,60	28,77
	Noviembre	74,60	54,32	2429,55	2949,80	520,25	25,44
	Diciembre	132,60	132,60	5931,19	6398,54	467,35	55,19
2014	Enero	142,80	142,80	5387,44	5712,68	325,24	49,27
	Febrero	164,80	164,80	4371,49	4938,92	567,43	42,60
	Marzo	98,50	85,19	3810,35	4454,64	644,29	38,42
	Abril	42,40	15,35	686,73	1084,23	397,50	9,35
	Mayo	18,40	2,88	129,02	632,56	503,54	5,46
	Junio	3,45	0,09	4,13	475,44	471,31	4,10
	Julio	8,40	0,51	22,79	571,76	548,97	4,93
	Agosto	14,60	1,61	71,89	613,12	541,23	5,29
	Setiembre	40,40	13,22	591,35	934,83	343,48	8,06
	Octubre	88,10	70,79	3166,25	3636,78	470,53	31,37
	Noviembre	68,80	43,17	1930,95	2540,23	609,28	21,91
	Diciembre	154,80	154,80	4924,19	5672,22	748,03	48,92
2015	Enero	178,80	178,80	5997,71	6638,34	640,63	57,26
	Febrero	126,00	126,00	5635,97	6122,25	486,28	52,81
	Marzo	76,20	51,27	2293,34	2801,65	508,31	24,16
	Abril	37,56	13,33	596,32	1070,76	474,44	9,24
	Mayo	17,90	2,53	113,08	453,42	340,34	3,91
	Junio	4,68	0,18	7,86	423,12	415,26	3,65

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

	Julio	2,50	0,04	1,90	315,82	313,92	2,72
	Agosto	19,70	3,15	140,96	611,11	470,15	5,27
	Setiembre	38,20	12,17	544,37	819,33	274,96	7,07
	Octubre	78,60	57,95	2592,07	2942,12	350,05	25,38
	Noviembre	80,50	64,93	2904,41	3555,34	650,93	30,67
	Diciembre	122,80	122,80	5492,84	6282,45	789,61	54,19
2016	Enero	96,20	88,10	3940,81	4410,24	469,43	38,04
	Febrero	139,80	139,80	5253,25	5942,54	689,29	51,26
	Marzo	102,80	100,92	4514,27	5108,24	593,97	44,06
	Abril	51,20	24,14	1079,94	1469,98	390,04	12,68
	Mayo	20,40	3,61	161,58	625,32	463,74	5,39
	Junio	6,20	0,28	12,62	296,54	283,92	2,56
	Julio	9,00	0,59	26,27	329,32	303,05	2,84
	Agosto	9,10	0,65	29,23	411,22	381,99	3,55

Fuente: SENAMHI, SEDAM-HUANCAYO, AUTORIDAD LOCAL DEL AGUA – MANTARO.

Los datos en la Tabla 15 muestran la oscilación típica entre los meses húmedos y secos de los caudales registrados entre el periodo hidrológico 2002-2003 y 2015-2016. El promedio del caudal multianual es de 2664,39 L/s.

Asimismo, se puede denotar que el año hidrológico con menor promedio, es decir el año hidrológico más seco fue el 2009-2010 con un promedio de 2330,68 L/s. Por el contrario el año hidrológico con mayor promedio del caudal real fue 2005-2006 con 3200,48 L/s. Estos resultados pueden apreciarte de mejor manera en la Figura 14.

El aporte glaciar varió entre los valores de 198,9 L/s hasta 789,6 L/s registrados en los meses de julio y diciembre, respectivamente. Asimismo, es preciso denotar que el valor mínimo del aporte glaciar corresponde al mes de julio del 2008, mes en el cual no se registraron lluvias, por lo tanto, el valor mínimo del caudal real y el aporte glaciar es el mismo. El caudal real mínimo y la distribución de los caudales según su frecuencia se muestran en la curva de duración en la Figura 15.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

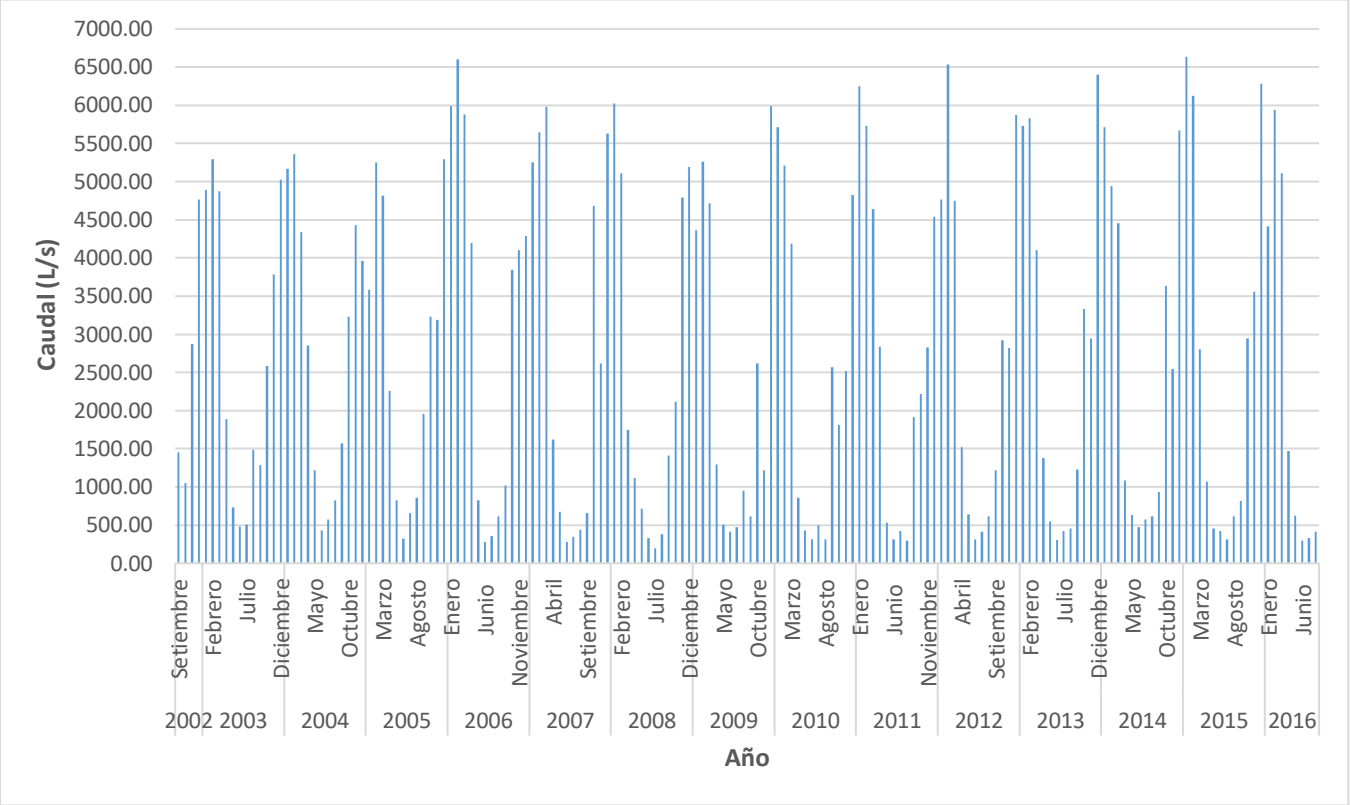


Figura 14. Gráfica del caudal promedio mensual durante el periodo 2002-2016.

Con los datos presentados en la Tabla 15 se procedió a representar el tiempo durante el cual un determinado caudal es igualado o superado durante un periodo de tiempo y de esta forma confirmar el valor mínimo multianual, se procederá a aplicar el método de la curva de duración. Los resultados de la curva de duración sirvieron de utilidad para conocer la distribución de los caudales en el tiempo.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

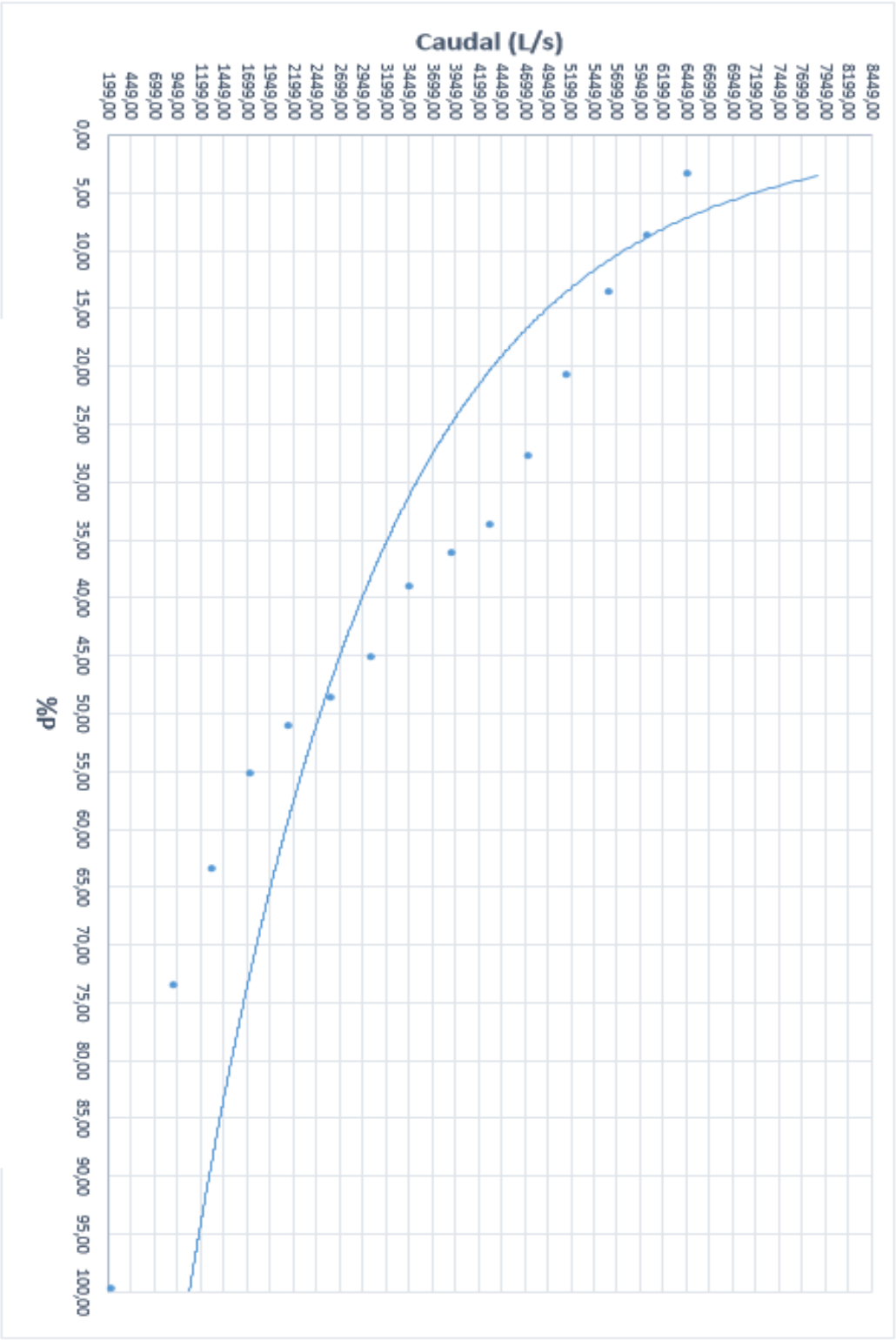


Figura 15. Curva de duración de los caudales registrados entre los años 2003-2016.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Como se puede apreciar en la Figura 15, el caudal mínimo registrado (198,9 L/s) presenta la máxima probabilidad de excedencia, lo cual puede ser interpretado como el caudal del aporte glaciar en el periodo 2003-2016. Por su parte, el caudal máximo registrado presenta una probabilidad de excedencia del 3,57% por el próximo caudal registrado en la siguiente lectura.

La correlación entre las variables de la cobertura glaciar y el rendimiento hídrico se presentan en la Figura 16.

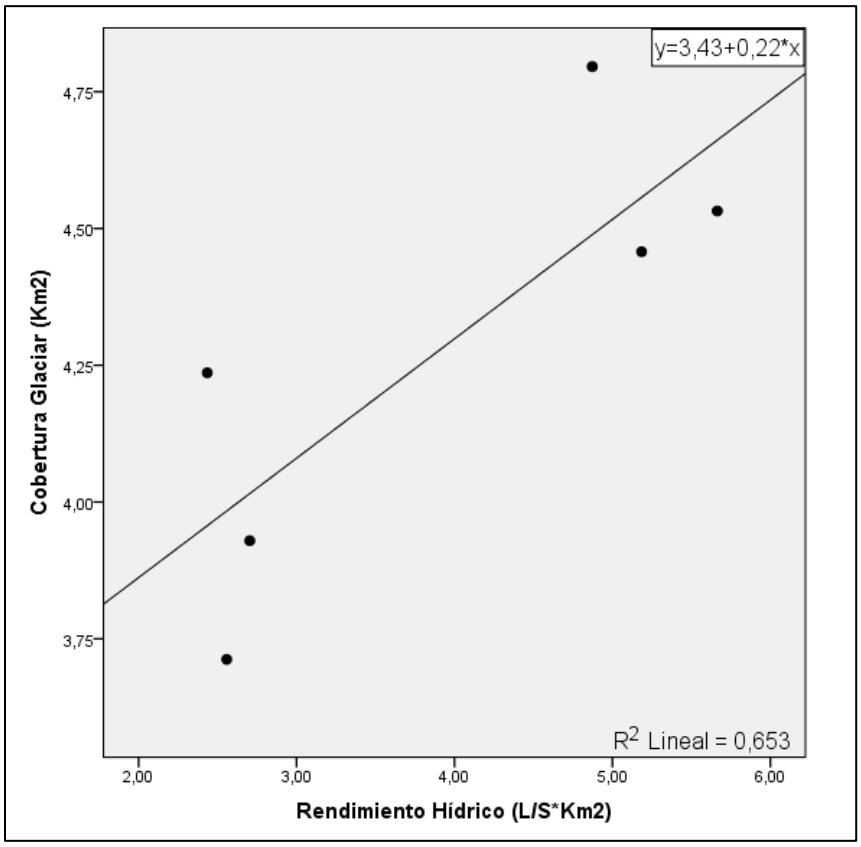


Figura 16. Relación entre la cobertura glaciar y rendimiento hídrico entre los años 2003-2016.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

XIV. DISCUSIÓN

1. Análisis Multitemporal del Área Glaciar Shullcas

La discriminación del área glaciar se realizó interceptando los resultados de los parámetros de evaluación del Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) y la temperatura menor a 277 K. Cogliati et al. (2013) obtuvieron resultados más representativos en la obtención de área glaciar, considerando dentro de sus parámetros, la información de la banda térmica que tienen las imágenes satelitales LANDSAT. La temperatura de superficie excluye a los píxeles que son clasificados como nieve con una temperatura superior a 277K. Los resultados obtenidos en el presente trabajo de investigación confirman una mejoría en los resultados tras la inserción del parámetro de la temperatura para la discriminación del área glaciar.

Los umbrales establecidos para la obtención de resultados del NDSI para cada imagen satelital se basaron en diversos estudios realizados por Morris., et al. (2006); Zeballos., et al. (2014); Ávila., et al. (2018); Polonio, A. (2017). El valor recomendado son los píxeles con un valor mayor a 0,4, sin embargo, estos pueden ser ajustados visualmente sobre la base de umbrales obtenidos en investigaciones similares. Los resultados obtenidos en la presente investigación concuerdan en gran medida con los estudios antes mencionados, lo cual valida la veracidad del presente estudio.

El glaciar Huaytapallana evidencia un proceso de recesión glaciar, el cual, consecuentemente, también se desarrolla en el área glaciar de la subcuenca del río Shullcas. Los resultados obtenidos en los estudios realizados por la Autoridad Nacional del Agua (2016) y López-Moreno, J. et al. (2014) evidencian una notable reducción en el área glaciar del Huaytapallana entre los años 1970-2011, los cuales coinciden con el comportamiento de los resultados en el presente estudio. Cabe mencionar que en el periodo de evaluación 2003-2010, el área glaciar de la subcuenca del río Shullcas constituyó el 18% del área glaciar del glaciar Huaytapallana, lo cual evidencia su importancia.

Durante el periodo 2010-2013 el glaciar Huaytapallana ha mostrado una recuperación de su masa glaciar (Arroyo, J., et al., 2015), lo cual coincide con los resultados obtenidos en la presente investigación, donde se registró un incremento de 0,603 Km^2 en el mismo periodo. Este incremento nival puede ser explicado por anomalías climáticas positivas iniciadas desde el año 2010, donde se registraron eventos húmedos significativos y precipitaciones atípicas, el cual ha generado la acumulación de nieve en toda la cordillera Huaytapallana (Arroyo, J., et al., 2015)

En el periodo entre el 2002-2009 se registraron dos eventos de El Niño, los cuales no estuvieron relacionados con la pérdida del área glaciar en la subcuenca del río Shullcas. Esta afirmación es validada por el estudio realizado por López-Moreno, J. et al. (2014), los cuales en un periodo de estudio de 28 años no encontraron una reducción significativa del área glaciar asociada al evento de El Niño en el Huaytapallana.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

La concentración de los estudios acerca de los efectos de los eventos climáticos de El Niño y La Niña sobre los glaciares tropicales en la cordillera blanca han limitado la base bibliográfica de la presente área de estudio, aun así la ocurrencia de los eventos El Niño ocurridos entre los años 2003-2016 sostienen la recesión glaciar del Huaytapallana y varios nevados de la Cordillera Blanca (Medina, G. & Mejía, A., 2010; Arroyo, J., et al., 2015)

2. Análisis de Caudales y Aporte Glaciar

El aporte hídrico del área glaciar del Shullcas también fue estudiado por Arroyo, J. & Gurmendi, P. (2011), los resultados obtenidos en dicho estudio muestran un mayor caudal del torrente de agua del glaciar en los meses de octubre y noviembre, y caudales moderados en el mes de junio, el cual constituye el periodo de análisis del presente estudio, debido al enfoque hídrico superficial. La fusión de los nevados y el régimen hídrico de caudales a las lagunas glaciares Lasuntay y Chuspicocha de la subcuenca del río Shullcas es de poco más de 0,3 m^3/s, el cual cerca del 10% es registrado en la estación Shullcas en este periodo de tiempo.

Si bien, los registros se encuentran espacialmente distantes, la data obtenida en la investigación de Arroyo, J. & Gurmendi, P. (2011) puede ser de gran referencia en la comparación de datos que se obtuvieron en la presente investigación; aun cuando el tiempo de evaluación sea diferente, se trata de una investigación con un alto valor in situ.

Crumbley, R (2015) sostiene que el 8,9% - 16,6% del flujo del río Shullcas es constituido por el aporte glaciar. Los resultados demuestran que el promedio del aporte glaciar correspondió al 18%, lo cual se asemeja mucho a la bibliografía consultada. Es preciso mencionar que si bien los resultados coinciden, el enfoque entre ambos estudio difieren ya que el presente análisis se centra solamente en el flujo superficial, el cual difiere con el análisis y metodología aplicada por el autor, cuyo objetivo incluía la evaluación de flujo subterráneo.

El aporte glaciar sostiene el flujo del río Shullcas en épocas de estiaje, es decir, entre los meses de junio-julio, donde el flujo del río Shullcas y las precipitaciones son las más bajas dentro del año hidrológico, el aporte glaciar es el responsable del flujo superficial dentro de su cauce. Las imágenes satelitales fueron elegidos de estos meses por la misma razón.

El incremento del caudal del río Shullcas así como el de las lluvias, las cuales fueron evidenciadas en los resultados de la presente investigación, concuerdan con la percepción general de los habitantes de las comunidades de Acopalca y Chamisería, comunidades que se encuentran en la parte media de la subcuenca del río Shullcas entre los 3,500 – 4,000 m.s.n.m. Las encuestas realizadas en estas comunidades en el estudio desarrollado por Ho, R (2012) dan como resultado una notable percepción de cambios en la variabilidad climática como el decrecimiento de nieve, incremento de la intensidad de lluvias y decrecimiento de los periodos anuales de lluvias. Dichas características han sido imperantes en el desarrollo de los resultados de la presente investigación.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

El comportamiento de las precipitaciones resultantes del presente estudio difiere de la tendencia pronosticada de algunos estudios realizados en la misma área hidrográfica (Ávalos, G. *et al.*, 2012). En este se concluyó que la tendencia de las precipitaciones iría decreciendo a ritmo de 2,53 mm por año, sin embargo las anomalías climáticas positivas y negativas dentro del periodo de evaluación han concluido en resultados oscilantes sin una clara tendencia, tal como lo demuestra el presente estudio.

El aporte glaciar fue analizado en el mes donde menos precipitación ocurre dentro del área de estudio. Según Ordoñez, J., et al. (2011) la menor pluviometría corresponde al mes de Julio, con apenas 0,9% de la precipitación anual en un estudio realizado entre 1994-2009. El caudal medio anual registrado en este periodo fue de 60 L/s. El resultado expuesto concuerda en gran medida con el resultado del caudal medio obtenido en esta investigación, pues, la diferencia entre ambos promedios es de 2,12 L/s, lo cual confirma la concordancia de este resultado con diversas investigaciones. Además, el menor caudal registrado corresponde a principios del mes de julio, registro que concuerda con la afirmación de Ordoñez, J., et al. (2011).

El Proyecto Regional Andino de Adaptación al Impacto del Retroceso Acelerado de Glaciares de los Andes Tropicales – PRAA, llevado a cabo en Perú, Bolivia y Ecuador durante los años 2008-2013, tuvo acciones que reforzaron la resiliencia de los ecosistemas y economías locales ante los impactos del retroceso glaciar de los Andes Tropicales. En el área de estudio de la Subcuenca del río Shullcas, una de esas actividades fue el desarrollo de zanjas de infiltración que buscaba incrementar el proceso de recarga de acuíferos a través de la captación de los aportes de la precipitación.

Las zanjas de infiltración captan entre 12% - 18,77% de la precipitación en esta área hidrográfica (CONDESAN, 2015). Esto ha generado un cambio en el rendimiento hídrico de la subcuenca del río Shullcas entre los años 2010 y 2013, periodo donde se el proyecto PRAA se encontraba en desarrolló de esta actividad. El cambio en el rendimiento hídrico se evidencia en el registro de la relación decreciente entre el retroceso glaciar y el rendimiento hídrico, lo cual es contraria al comportamiento de general de los demás años.

3. Cobertura Glaciar y Rendimiento Hídrico

La relación positiva entre ambas variables mostradas en la Figura 16, evidencia un incremento del rendimiento hídrico a medida que ocurren los cambios en la cobertura glaciar. Según Baraer, M. et al. (2012) el incremento de caudal por causa del retroceso glaciar es un comportamiento típico en varias cuencas hasta alcanzar el punto de transición crítico y que posterior a la desaparición del glaciar la descarga anual llega a ser entre 2 - 30% menor a la registrada en aquel punto. Esta afirmación confirma el comportamiento mostrado en los resultados, y advierte, además, la preocupación de alcanzar el punto de transición crítico en el contexto de recesión glaciar en la subcuenca del río Shullcas. El aporte al rendimiento hídrico se debe en más del 50% al río Shullcas y el nevado Huaytapallana que lo alimenta (Altamirano, 2014). Esta afirmación es validada con el

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

registro de aporte glaciar multianual obtenido en los resultados; asimismo, los mismos demuestran que la relación cobertura glaciar – rendimiento hídrico positivo no hacen más que confirmar que nos encontramos en un contexto de cambio climático y recesión glaciar en la zona intertropical que coinciden con varios estudios de la región (Francou, B. et al., (1995); Herrera & Ruiz (2009); López, C. & Ramírez, J. (2010)).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

XV. CONCLUSIONES

Existe una tendencia creciente en el aumento de la recesión glaciar, dicho fenómeno causado en mayor medida por el cambio climático.

Durante los 13 años de estudio (2003 - 2016), la superficie glaciar se ha reducido de 4,7959 km^2 a 3,7124 km^2 lo que representa una pérdida de 1,0835 km^2, lo cual confirma la tendencia de recesión glaciar en la región. Los cambios en la cobertura glaciar influyeron positivamente en el rendimiento hídrico de la subcuenca del río Shullcas con un nivel de correlación del 65%.

Si bien durante el periodo 2010-2013, la superficie glaciar aumentó 0,6027 km^2, suceso también reportado por Arroyo, J., et al (2015), lo que pudo haberse debido a anomalías climáticas positivas iniciadas desde el año 2010; el porcentaje de pérdida de superficie glaciar fue de 22.6% en el contexto general de recesión.

El aporte glaciar evidenció un incremento en un contexto de recesión glaciar con valores oscilantes entre 198,9 L/s hasta 789,6 L/s, en los meses de julio y diciembre, respectivamente. En promedio, el aporte glaciar superficial correspondió al 18% del caudal registrado en la estación Hidrométrica Shullcas, siendo el año hidrológico 2009-2010, el año más seco con un promedio de 2330,69 L/s.

La cuantificación del aporte glaciar y el cambio de cobertura glaciar son una clara evidencia de la minoración de los recursos hídricos en la subcuenca del río Shullcas. Dicha información constituye un gran aporte en la toma de decisiones por parte de los gestores de los recursos hídricos a lo largo del área hidrogeográfica Shullcas para temas vinculados a las actividades económicas, sociales y ambientales.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

XVI. RECOMENDACIONES

La presente tesis sugiere que la inserción del parámetro de la capa de temperatura menor al punto de fusión, como parte del análisis de discriminación del área glaciar, demuestra mejores resultados a nivel general en un tipo de estudio multitemporal.

Asimismo, es preciso recomendar que la data obtenida del rendimiento hídrico y aporte glaciar multitemporal puedan ser usadas como información alternativa importarte para la gestión del ámbito hidrográfico del río Shullcas por parte de las autoridades locales y administrativas del agua, así como las unidades de gestión política de la provincia de Huancayo, debido a que dicha información pone en evidencia el comportamiento hídrico presente y futuro de la principal reserva y fuente de agua dulce de esta provincia.

Se recomienda que las autoridades del sector agricultura puedan difundir y apoyar la implementación de técnicas de riego más eficientes dentro de la zona agrícola de la zona media y baja de la subcuenca del río Shullcas, debido a que si bien los niveles de caudal del río Shullcas presentan un ligero incremento no se debe olvidar que en, subcuencas glaciares, esta característica forma parte del fenómeno de Punto de transición crítico y que llegado a ese punto la disponibilidad hídrica será menor cada año.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

XVII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Altamirano, T. (2014). Refugiados Ambientales: Cambio Climático y migración forzada. Fondo Editorial de la Pontificia Universidad Católica del Perú. 225 pp.

Alva, M. & Meléndez, J. (2009). Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. Investigaciones Sociales, 13(22), 71-83.

Alva, M. & Ramos, R. 2017. Evolución de los Glaciares de los Nevados Collquepucre, LLongote, Pariacaca y Ticcla en la cuenca del río Cañete. Investigaciones Sociales. 21 (38). 97-106.

Ames, A. & Francou, B. (1995). Cordillera Blanca Glaciares en la Historia. Bull. Inst. Fr. Études andines. 24 (1). 37-64 p.

ANA (Autoridad Nacional del Agua). (2016). Priorización de Cuencas para la Gestión de los Recursos Hídricos. (137 pp.)

Arana, V. (2011). Informe Perú: Vulnerabilidad de las ciudades frente al cambio climático en agua potable y saneamiento. Lima, Perú: Sociedad Urbanística del Perú.

Arroyo, J., & Gurmendi, P. (2011). Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay y Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. Apunt. Cienc. Soc. 01(2).

Arroyo, J., Machuca, E. & Gurmendi,P. (2013). Balance Hídrico Superficial mediante el método del Índice Climático del Valle del Mantaro, 2010-2013. Apuntes de Ciencia y Sociedad, 03(01), 06-15.

Arroyo, J., Gurmendi, P., & Machuca, E. (2015). Efectos de las Anomalías Climáticas en la cobertura de Nieve de los glaciares centrales del Perú. Apuntes de Ciencias Sociales. 5(1).

Ávalos, G., Oria, C., Cubas, F., Díaz, A., Acuña, D., Quispe, N., Rosas, G. & Solís, O. (2012). Plan de Gestión Integrado de Recursos Hídricos de la Subcuenca del río Shullcas. Ministerio del Ambiente de Perú– Proyecto PRAA. Lima - Perú.

Ávila, E., Carrillo, H., Guzmán, J. & Otárola, A. (2018). Cuantificación del Retroceso Glaciar del Nevado de Tolima, aplicando técnicas de teledetección. Revista de topografía Azimut. 9, 37-45.

Bahr, D., Tad, W. & Kaser, G. (2015). A review of volumen-area scaling of glaciers. Review of Geophysics. 53, 95-140.

Barraer, M., Mark, B., McKenzie, J., Condom, T., Bury, J., HUH, K., Portocarrero, C., Gómez, J., & Rathay, S. (2012). Recesión de Glaciares y Recursos Hídricos en la Cordillera Blanca de El Perú. Journal of Glaciology

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Bórquez, R., Larraín, S., Polanco, R., & J. Urquidi. (2006). Glaciares chilenos. Reservas estratégicas de agua dulce para la sociedad, los ecosistemas y la economía. Chile Sustentable, LOM ediciones, Santiago, 124.

Bown, F., Rivera, A., & Acuña, C. 2008. Recent glacier variations at the Aconcagua basin, central Chilean Andes. Annals of Glaciology, 48, 43-48.

Briones, I. (2012). Diseño y ensayos en tierra de las baterías para un satélite de órbita baja. Universidad Politécnica de Madrid. Escuela Universitaria de Ingeniería Técnica Aeronáutica.

CAN (Climate Action Network). (2013). Glaciares Andinos: La necesidad de una agenda transversal. Lima – Perú.

Canales, M. (2015). Modelación del Proceso Precipitación Escorrentía en la Cuenca del Río Ica. Universidad Nacional Agraria La Molina.

Carenas, M., Giner, J., González, J. & Pozo, M. (2014). Geología. Madrid – España: Parainfo.

Castillo, Y. (2015). Caracterización de la hidrología glaciar de la cuenca del Río Maipo mediante la implementación de un modelo glacio-hidrológico semi-distribuido físicamente basado. Santiago, Chile: Universidad de Chile – Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas.

Caviedes, J, (1979). Inventario de Glaciares de la Hoya del río Cachapoal y Predicción

CEAS (Centro de Estudios Ambientales Universidad de Lima). (2009). Elaboración de la Línea Base para la Subcuenca del río Shullcas Región Junín. Lima.

Celleri, R., De Biévre, B. & Iñeguez, V. (2004). Efectos de la Cobertura Vegetal en la Regulación Hidrológica de Microcuenca de Páramo. Cuenca, Ecuador: Universidad de Cuenca.

Condom, T., Suarez, W., Cochachin, A. & Gómez, J. 2010. Variaciones Glaciares y Disponibilidad de Agua en la Cordillera Blanca del Perú desde hace 40 años. En: Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio Climático y amenazas. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Ministerio de Minas y Energía.

Chevallier, P., Pouyaud, B., Suarez, W., & Condom, T. (2010). Climate Change Threats to Environment in the Tropical A and Water Resources. Reg. Environ. Change. 11, 179-187.

Choquehuanca, J., Zuazo, M., Hoffmann, D., Saginés, D. & Olivares, R. (2007). Retroceso de los Glaciares y Recursos Hídricos en Bolivia – De la Investigación a la Acción. La Paz-Bolivia.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

Chuvieco, E. (1996). Fundamentos de Teledetección Espacial. Editorial: Rialp. Madrid.

Chuvieco, E. (2009). Detección y Análisis de Incendios Forestales desde Satélites de Teledetección. Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. España. 103(1). 173-181.

Cogliati, M. G, Groch, D. & Finessi, F. G. (2013b). Estimación de la cubierta de nieve en el norte de la provincia de Neuquén. Boletín Geográfico. 35, 47-58. Departamento de Geografía. Universidad Nacional de Comahue.

Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN). (2015). Caracterización y Análisis de la Cuenca del Río Shullcas (Huaytapallana) y de la Cuenca Alta del Río Cachi, como fuente de agua y servicios ecosistémicos hidrológicos para las empresas de Agua Potable. Ministerio del Ambiente del Perú.

Confederación Hidrográfica del Segura (CHS). (2016). Plan Hidrológico de la cuenca del Segura (2015–2021). Confederación Hidrográfica del Segura. España: Ministerio de Agricultura, Alimentación y Medio Ambiente.

Colonia & Torres. (2013). Disponibilidad Hídrica glaciar en la subcuenca Quillcay, teniendo en cuenta el retroceso glaciar y el cambio climático, 1970-2013-2050. Huaraz-Perú.

Comisión Multisectorial (CM). (2012). Informe de la Comisión Multisectorial: Ejes Estratégicos de la Gestión Ambiental. Lima.

Croce, F. & Milana, J.P. (2002). Estudio de la capa activa, el permafrost y la hidrología del glaciar de rocas El Paso, Agua Negra, San Juan. XV Congreso Geológico Argentino, Calafate, Argentina. 6 pp.

Crumbley, R. (2015). Investigating Glacier Melt Contribution to Stream Discharge and Experiences of Climate Change in the Shullcas River Watershed in Perú. The Ohio State University.

Del Pilar, C. (2019). Balance de Masa Reciente y Dinámica de los Glaciares de la Península Hurd (Isla Livingston, Antártida) en un contexto de clima cambiante. Universidad Complutense de Madrid.

Díaz, R., Sanchez, S., Lujano, E. & Lujano, A. (2017). Análisis Multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. Revista Investigación Altoandina. 19 (3), 265-274.

Dozier, J. (1989).Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper. California, United States: University of California.

Embid Irujo, A. (2010). The foundations and principles of modern water law. In: Garrido A. & Llamas, M.R. (eds.), Water Policy in Spain. CRC Press, Taylor & Francis, Leiden: 60-61.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Flores, L., Arzola-González, J., Ramírez-Soto, M. & Osorio-Pérez., A. (2012). Repercusiones del cambio climático global en el estado de Sinaloa, México. Sinaloa - México.

Francou, B., Ribstein, P., Sémiond, H., Portocarrero, C. & Rodríguez, A. (1995). Balances de Glaciares y Clima en Bolivia y Perú: Impacto de los Eventos ENSO. 24 (3), 661-670.

Francou, B., Ramirez, E., Cáceres, B. & Mendoza, J. 2000. Glacier Evolution in the Tropical Andes during the last decades of the 20th Century: Chacaltaya, Bolivia, and Antizana, Ecuador. Royal Swedish Academy of Sciences. 29 (7). 416-422.

Francou, B. 2013. El rápido retroceso de los glaciares en los andes tropicales: Un desafío para el estudio de la dinámica de los ecosistemas de alta montaña. Ecología en Bolivia. 48 (2). 69-71.

Fondal, B. (2005). El Espectro Electromagnético y sus Aplicaciones. Caracas, Venezuela: Escuela Venezolana para la enseñanza de la Química.

Fontal, B. (2005). El espectro electromagnético y sus aplicaciones. Mérida, Venezuela: Escuela Venezolana para la Enseñanza de la Química. (pp. 150).

García, W., Marchand, G., Llactayo, W., Salcedo, K., Victoria, E. & Zambrano, A. (2013). Ortorectificación de Imágenes Satelitales Landsat. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.

Garín, C. (1987). Inventario de Glaciares de los Andes Chilenos desde los 18º a los 32º de latitud sur. Revista de Geografía Norte Grande. 14, 35-48.

Guardamino, L. & Drenkhan, F. 2016. Evolución y potencial amenaza de lagunas glaciares en La Cordillera de Vilcabamba (Cusco y Apurímac, Perú) entre 1991-2004. Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña. 1(1). 21-26.

Gutierrez, E., Janampa, M., Rojas, R. & Valentino, R. (2010). Evaluación de Recursos Hídricos Superficiales en la Cuenca del Río Mantaro. Ministerio de Agricultura. Lima – Perú.

Herrera, G. & Ruiz, J. (2009). Retroceso Glaciar en la Sierra Nevada del Cocuy, Boyacá – Colombia, 1986-2007. Perspectiva Geográfica. 13, 27-36.

Herr, L. (2014). Los Glaciares y su Protección Jurídica en Chile. Universidad de Chile. 333 pp.

Ho, R. (2012). “Where the Rain Falls” Project. Case study: Perú. Results from Huancayo Province, Junín Region.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Hoffman, O. & Salmerón, F. (1997). Nueve Estudios sobre el Espacio: Representación y Formas de Apropiación. CIESAS.

Hoyos-Patiño, F. 1998. Glaciers of South America – Glaciers of Colombia. In: Williams, R. S., Jr. & Ferrigno, J.G. (eds), Satellite Image Atlas of Glaciers of the World, U.S. Geological Survey Professional Paper. 1386(1). 11-30.

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2017). Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares. Huaraz-Perú.

Iza, A. & Rovere, M. (2006). Aspectos jurídicos de la conservación de los glaciares. Gland, Suiza: Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza (UICN).

Kaser, G. (1995). Some notes on the behavior of tropical glaciers. Bull. Ist. Fr. Etudes Andines 24 (3), 671-681.

Kaser, G., & Osmaston, H. (2002). Tropical Glaciers. Cambridge University Press. Journal of Glaciology. 49.

Lliboutry, L. (1956). Nieves y Glaciares de Chile. Fundamentos de Glaciología. Ediciones de la Universidad de Chile.

López, C. & Ramírez, J. (2010). Glaciares, nieves y hielos de América Latina. Cambio Climático y amenazas. Instituto Colombiano de Geología y Minería. Ministerio de Minas y Energía.

López-Moreno, J. I., Fontaneda, S., Bazo, J., Revuelto, J., Azorin-Molina, C., Valero-Garcés, B. & Alejo-Cochachín, J. (2014). Recent glacier retreats and climate trends in Cordillera Huaytapallana, Peru. Global and Planetary Change, 112, 1-11.

Loroña, F. (2011). Evolución de la cobertura glaciar en la Subcuenca Quillcay y la influencia en su rendimiento hídrico. Universidad Federico Villarreal. Lima – Perú.

Macheret, Y. Y., Zhuravlev, A. B., & Bobrova, L. I. 1984. Thickness, subglacial topography and volume of Svalbard glaciers from radio echo-sounding data. Data of glaciological studies. 51. 59–62.

Maestro, I. & Recio, J. 2004. Análisis comparativo de distintos métodos de estimación de la superficie glaciar en el Pirineo axial aragonés a partir de imágenes Landsat", GeoFocus (Artículos). 4. 79-92.

Martínez, A. (2007). Análisis de la vulnerabilidad ante los efectos del cambio climático y propuestas de adaptación en la ciudad de Huancayo, Junín: El recurso agua y el género. En Diez, A. SEPIA (Ed.), Género y Gestión de recursos naturales resúmenes de investigaciones, experiencias y lecciones aprendidas (pp. 87-123).

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Medina, G., & Mejía, A. (2010). Incidencia de los eventos El Niño y La Niña en el comportamiento de glaciares tropicales en Perú. Revista ECI Perú.

Medina, G. (2011). Análisis multifractal de la deglaciación de los nevados Huandoy y Pastoruri en los andes de Perú. Lima, Perú: Universidad Nacional Agraria La Molina.

Medina, G., & Mejía, A. (2014). Análisis Multitemporal y Multifractal de la Deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. Ecología Aplicada, 13(1), 35 - 42.

Meier, M. F. and Bahr, D. B. 1996. Counting Glaciers: Use of Scaling Methods to Estimate the Number and Size Distribution of the Glaciers in the World, edited by: Hanover, N. H., CRREL Spec. Rep., US Army. 89–95.

Mernild, S. H., Beckerman, A. P., Yde, J. C., Hanna, E., Malmros, J. K., Wilson, R., & Zemp, M. 2015. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the sub-Antarctic islands. Global and Planetary Change. 133. 109 –119.

Morris, J.N., Poole, A,J. & Klein, A.G. 2006. Retreat of tropical glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as measured from ASTER and Landsat images. In: Proceedings of 63rd Eastern Snow Conference, pp. 181-191, Newark, Delaware, USA.

Moya Quiroga, V., Mano, A., Asaoka, Y., Udo, K., Kure, S. & Mendoza, J. 2013. Probabilistic estimation of glacier volumen and glacier bed topography: The andean glacier Huayna West, The cryosphere Discuss. 7. 3931 – 3967.

Radic, V. and Hock, R. 2010. Regional and global volumes of glaciers derived from statistical up scaling of glacier inventory data. J. Geophys. Res. 115. 1–10.

Grinsted, A. 2013. An estimate of global glacier volume, The Cryosphere, 7, 141–151.

Miller, R. & Small, C. (2003). Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy. Environmental Science & Policy 6: 129-137.

Moll, M. (2013). Aplicaciones cartográficas para la valoración de superficies de escorrentía. Río Girona (Alicante). Alicante, España: Biblioteca Virtual Miguel de Cervantes.

Morris, J., Poole, A. & Klein, A. (2006). Retreat of Tropical Glaciers in Colombia and Venezuela from 1984 to 2004 as Measured from ASTER and Landsat Images. In: Proc. 63rd Eastern Snow Conference, Newark, Dalaware, USA, 181-191.

Naveroy, C. (1987). Inventario de Glaciares de la Hoya del río Mataquito. Dirección General de Aguas. Ministerio de Obras Públicas. Gobiernos de Chile. 38pp.

Ordoñez, J., Obando, O., Arboleda, F. & Carranza, L. (2011). Disponibilidad hídrica actual y futura en la subcuenca del río Shullcas. Ministerio del Ambiente de Perú- Proyecto PRAA. Lima – Perú.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Pasapera, G. J. (2012). Realidad Actual de los Glaciares Tropicales usando Técnicas de Teledetección. Maestría en aplicaciones espaciales de alerta y respuesta temprana a emergencia. 29 pp.

Paz, M. & Montecinos, T. (2011). Glaciares Andinos Recursos Hídricos y Cambio Climático: Desafíos para la Justicia Climática en el Cono Sur. Chile.

Pérez (2007). Introducción a los Sensores Remotos -Aplicaciones en Geología. Buenos Aires, Argentina. UBA.

Pérez, A. & Francois, J. (2009). Evaluación de los errores de modelos digitales de elevación obtenidos por cuatro métodos de interpolación. Investigaciones Geográficas, Boletín del Instituto de Geografía: UNAM.

Pitte, P., Ferri Hidalgo, L. & Espizua, L. E. 2009. Aplicación de sensores remotos al estudio de glaciares en el Cerro Aconcagua. Anais XIV Simposio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Natal, Brasil, April 25–30, 2009. 1473–1480.

Pizarro, R. Sangüesa, R. & Martínez, E. (2003). Módulo 2: Curvas Itensidad Duración Frecuencia, Sociedad Estándares de Ingeniería para Aguas y Suelos LTDA.

Polonio, A. (2017). Monitorización y análisis comparativo de glaciares mediante imágenes Landsat. Escola Politecnica Superior d' Edificació de Barcelona. Universidad Politécnica de Barcelona.

Ramírez, E. (2008). Impactos del cambio climático y gestión del agua sobre la disponibilidad de recursos hídricos para las ciudades de La Paz y El Alto. Revista Virtual REDESMA, 2(3), 50-61.

Rivera, A. (1990). Apuntes de Glaciología Teórica. Departamento de Geografía de la Universidad de Chile. 29 p.

Rodríguez, O. & Arredondo, H. (2005). Manual para el manejo y procesamiento de imágenes satelitales obtenidas del sensor remoto Modis de la Nasa, aplicado en Estudios de Ingeniería Civil. Bogotá, Colombia: Pontificia Universidad Javeriana.

Sánchez-Cordero et al. (2009). Deforestation and biodiversity conservation in Mexico. En COLUMBUS, A. & L. Kuznetsov (Eds.), Endangered Species: New Research. New Haven, USA: Nova Science Publishers, pp. 279-298.

Sulebak, J. (2000). Applications of Digital Elevation Models. Departament of Geographic Information Technology. 1-11.

Tacsi, A. (2014). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas. Huaraz, Perú: Autoridad Nacional del Agua.

Tarbuck, E. J. & Lutgens, F. K. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la Geología Física. Pearson Prentice Hall. 8ª ed. 710 pp.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

Tapia, M. (1997).Manejo Integral de Cuencas. Marco Teórico Sobre Cuencas Hidrográficas. (196 pp.)

Vargas C., Villon C. & Pasapera J. 2009. Comparación de Técnicas para el Mapeo de Cobertura Glaciar con Imágenes LANDSAT y ASTER en la Cordillera Blanca. Simposio Brasileiro de Sensoramiento Remoto. Natal, Brasil: INPE, 6911-6917.

Vilela, M. (2011). Retroceso de Glaciares Tropicales en Bolivia. Problemática y Desafíos. En Paz, M. (Ed.), Glaciares Andinos Recursos Hídricos y Cambio Climático: Desafíos para la Justicia Climática en el Cono Sur. (pp. 66).

Yafeng, S., Zongtai, W., and Chaohai, L. 1981. Note on the glacier inventory in Qilian Shan Mountains, in: Glacier Inventory of China. Qilian Mountains, Lanzhou, Institution of Glaciology and Geocryology. 1–9.

Zeballos, G., Soruco, A., Cusicanqui, D., Joffré, R. & Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. Ecología en Bolivia. 49(3), 14-26.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

XVIII. ABREVIATURA

ANA: Autoridad Local del Agua.

IGN: Instituto Geográfico Nacional.

INAIGEM: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

NDSI : Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve.

Pp, : Precipitación.

Rend. : Rendimiento.

SEDAM: Empresa de Servicios de Agua Potable y Alcantarillado Municipal de Huancayo.

USGS: United States Geological Survey.

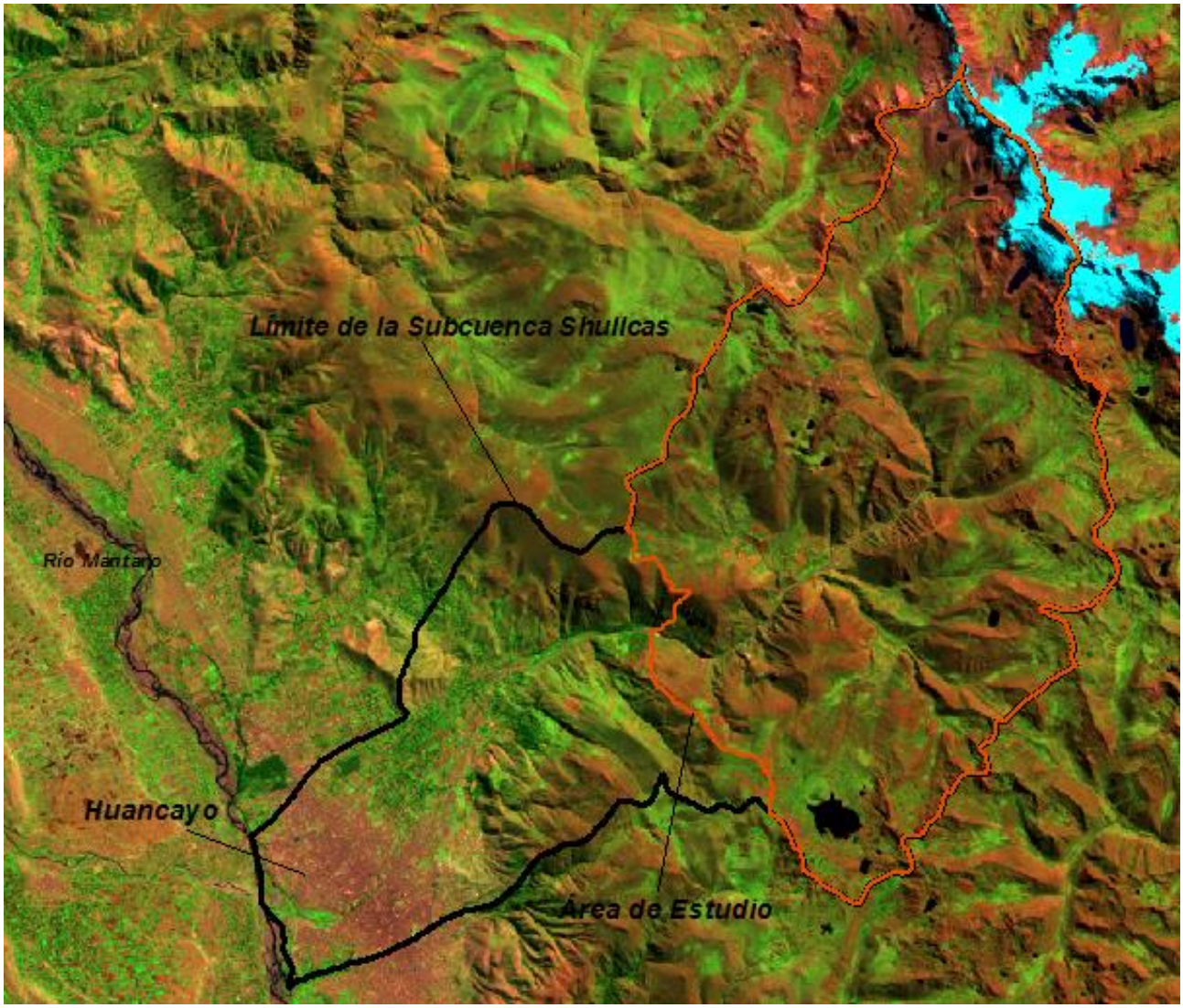
MINEDU: Ministerio de Educación del Perú

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

XIX. ANEXOS

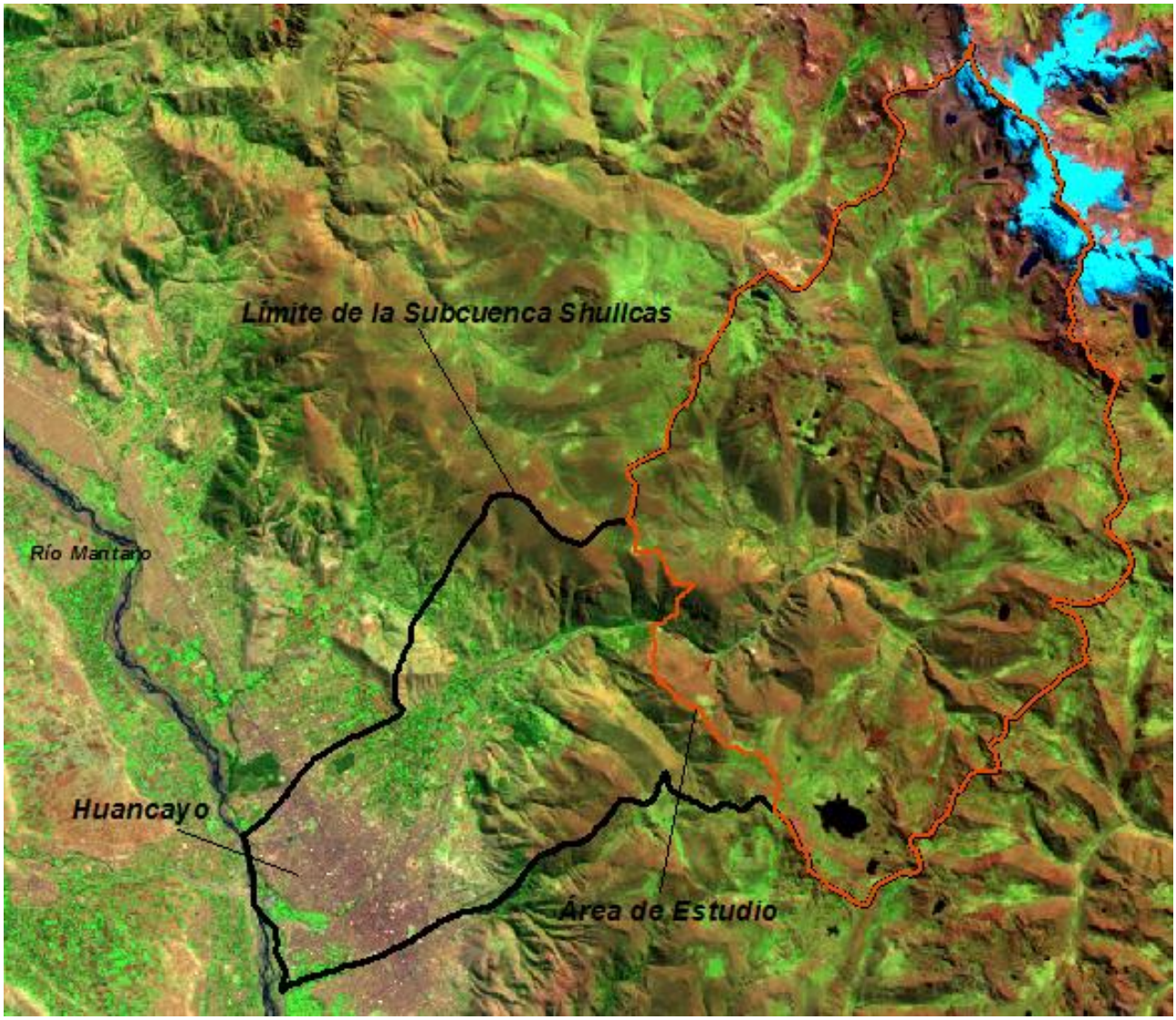
1. Anexo 1: Imágenes Satelitales en combinación RGB



Anexo 1. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2003.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

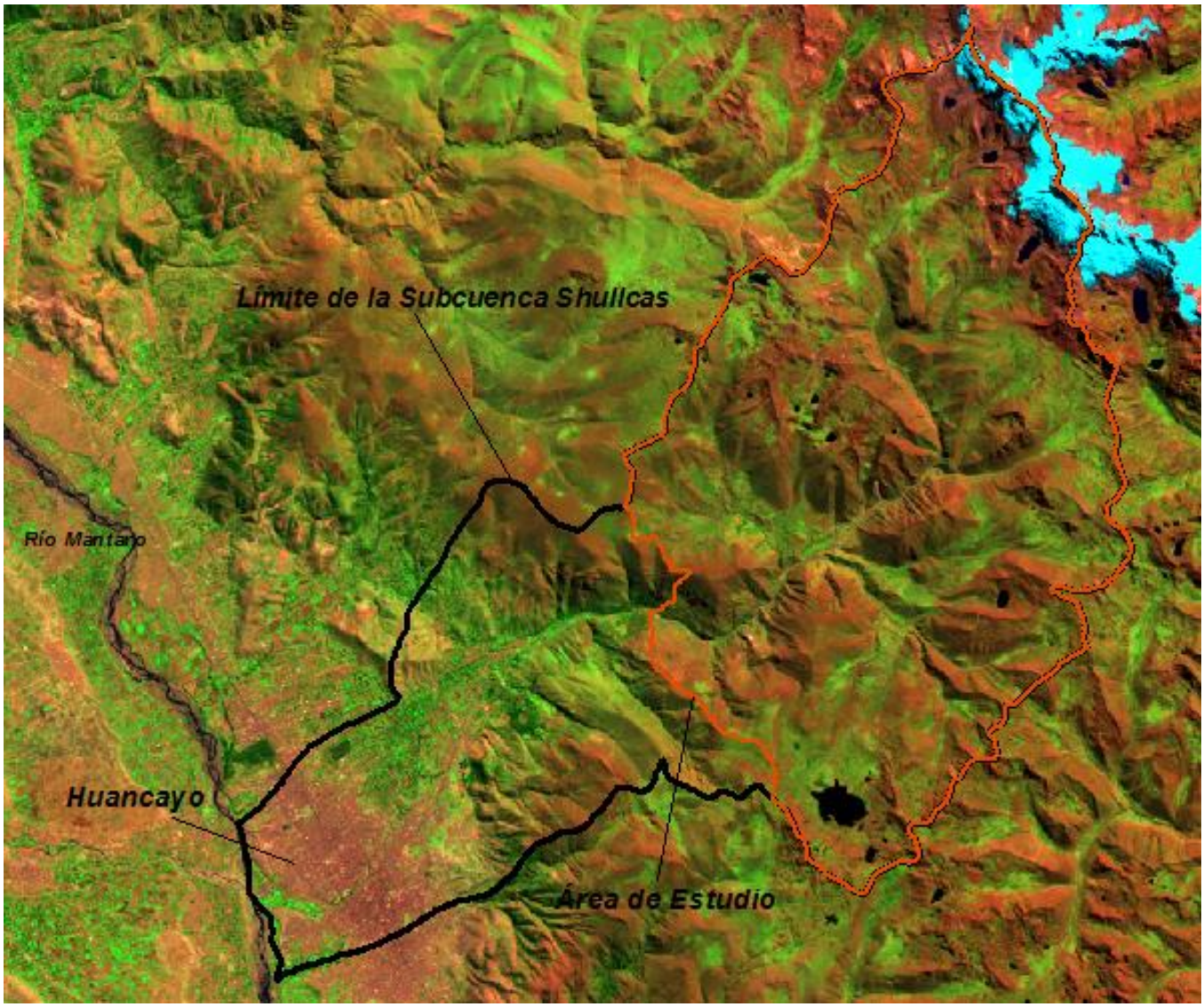
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 2. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2005.

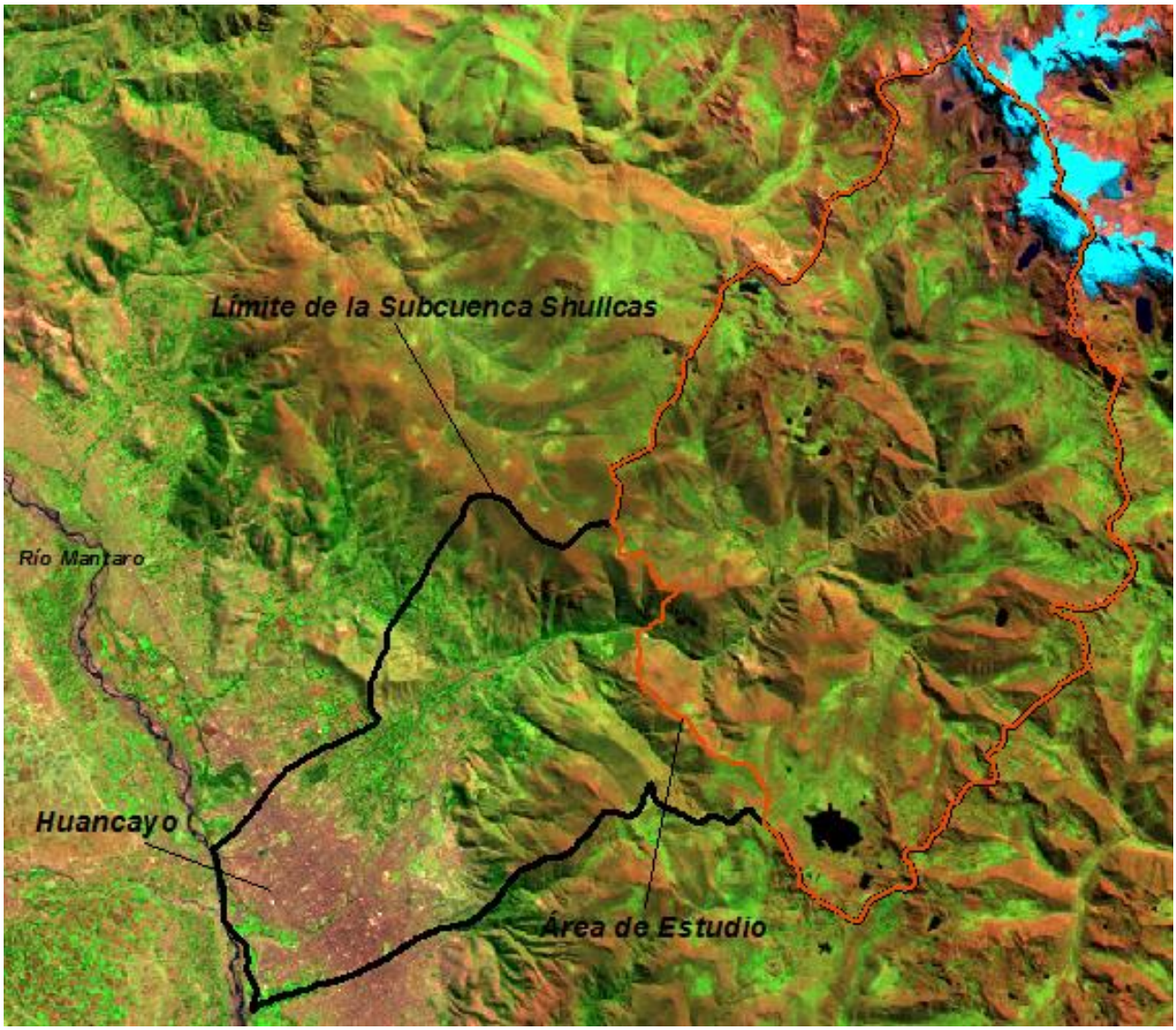
Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 3. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2007.

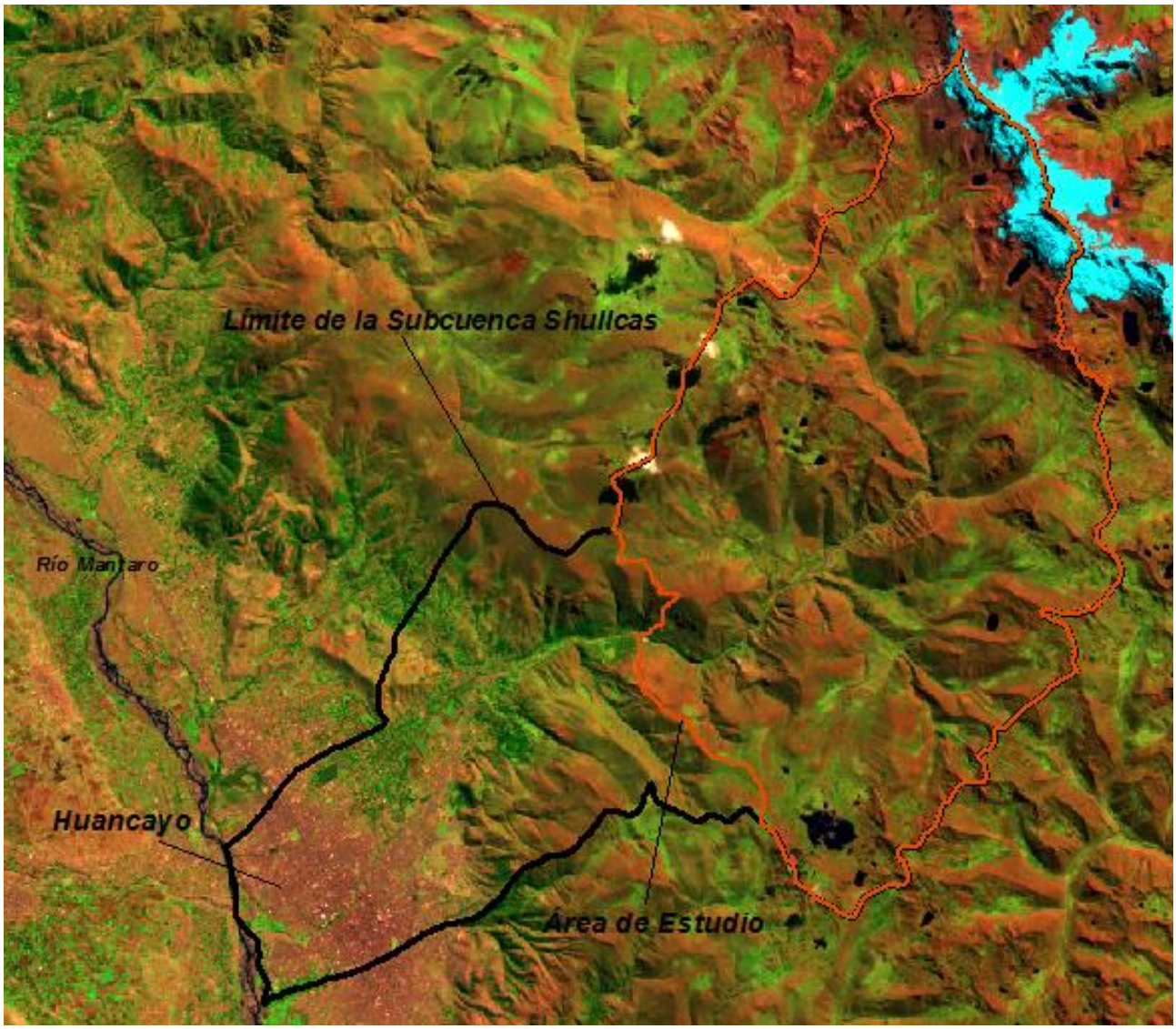
Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis



Anexo 4. Imagen Satelital Landsat 5 en combinación RGB: 7, 4, 2 del año 2010.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

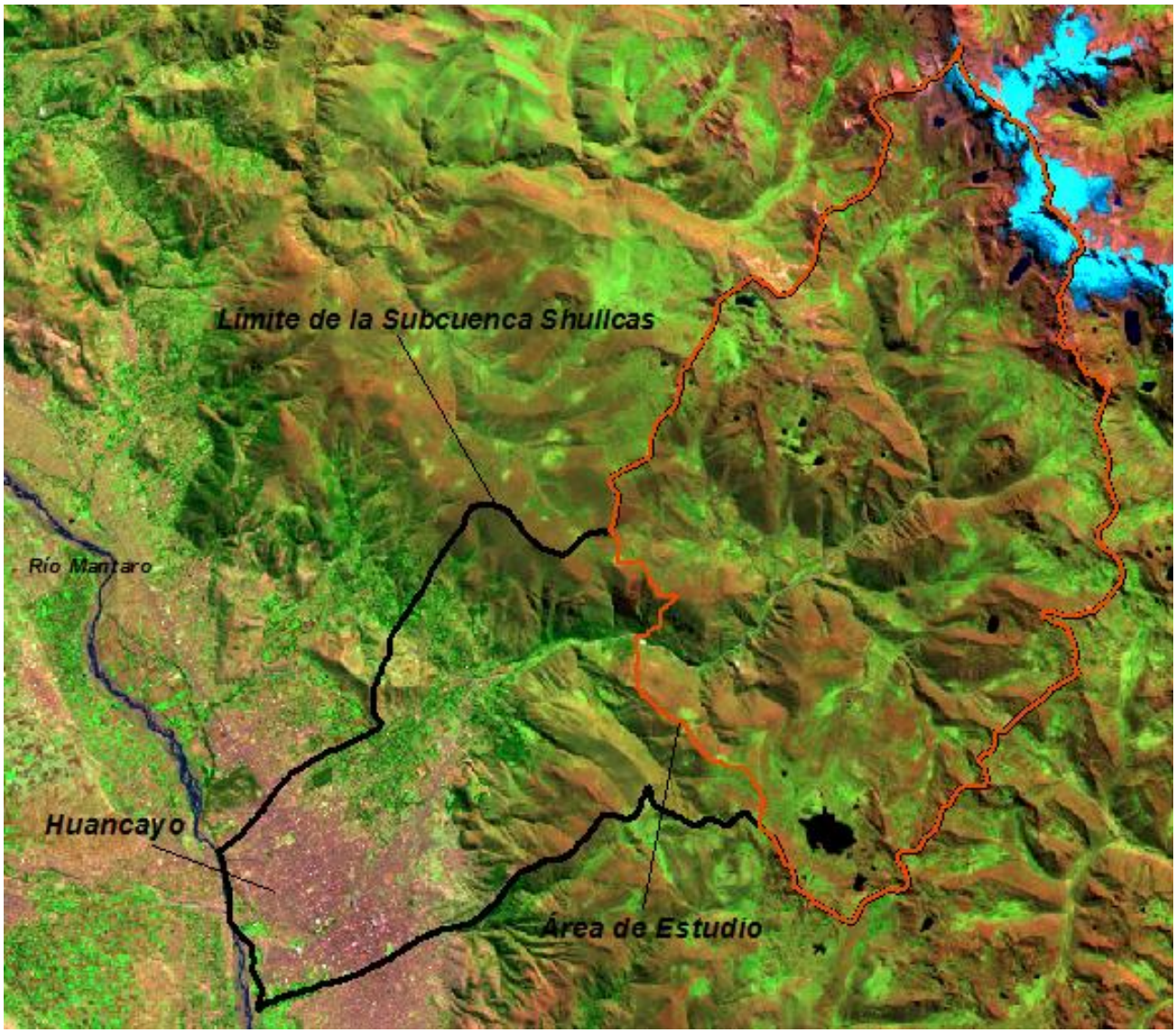
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 5. Imagen Satelital Landsat 8 en combinación RGB: 7, 5, 3 del año 2013.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

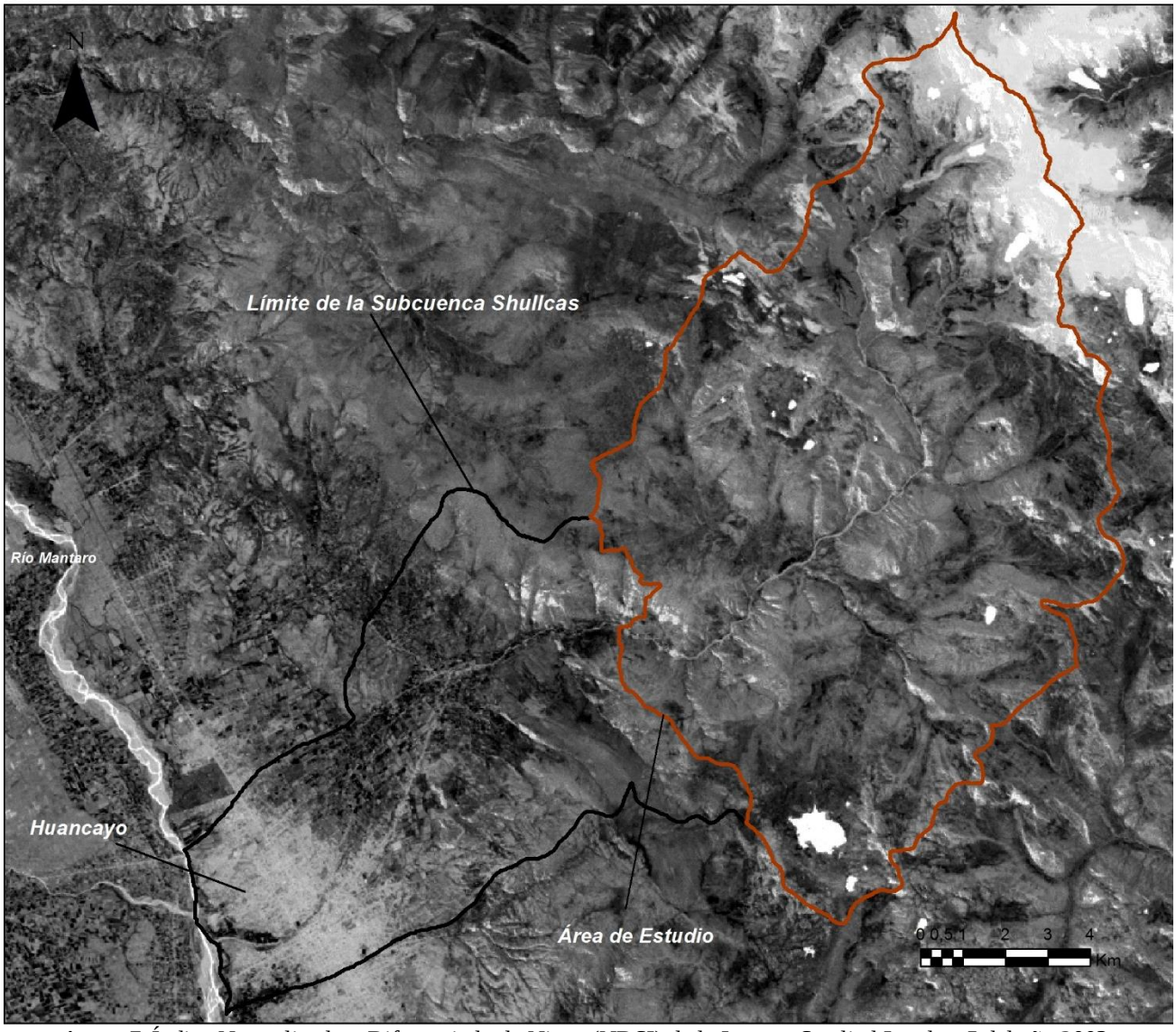


Anexo 6. Imagen Satelital Landsat 8 en combinación RGB: 7, 5, 3 del año 2016.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR

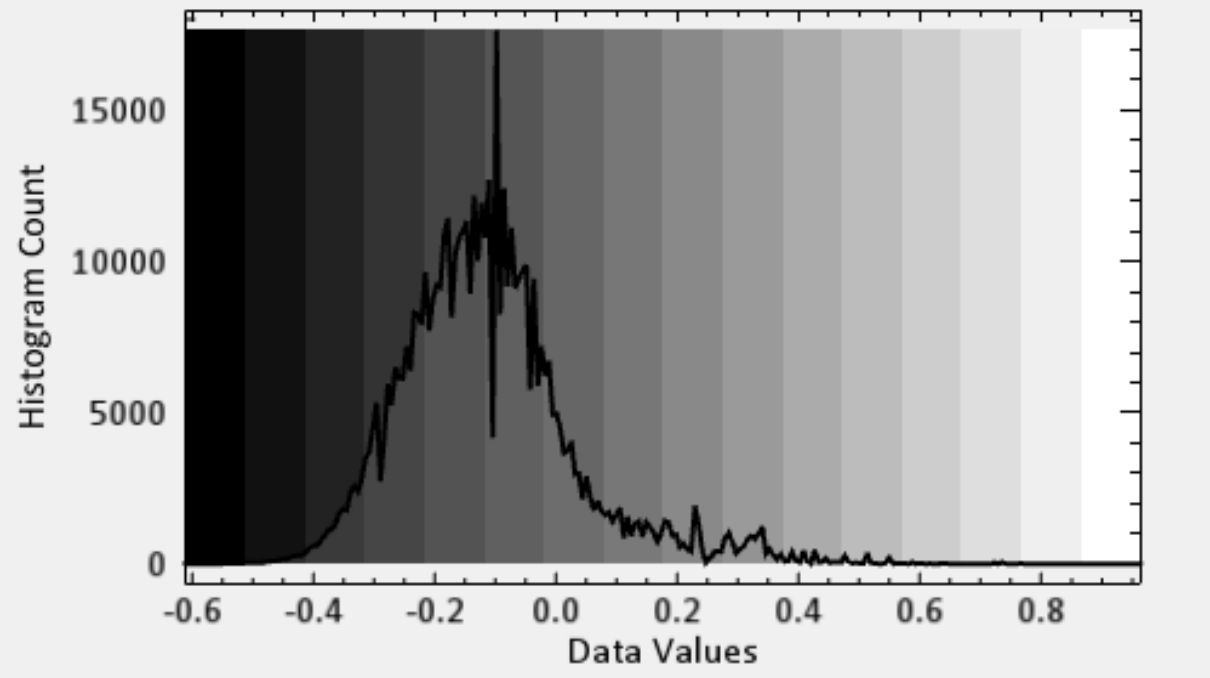
2. Anexo 2: Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI) aplicado a las Imágenes Satelitales.



Anexo 7. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2003.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

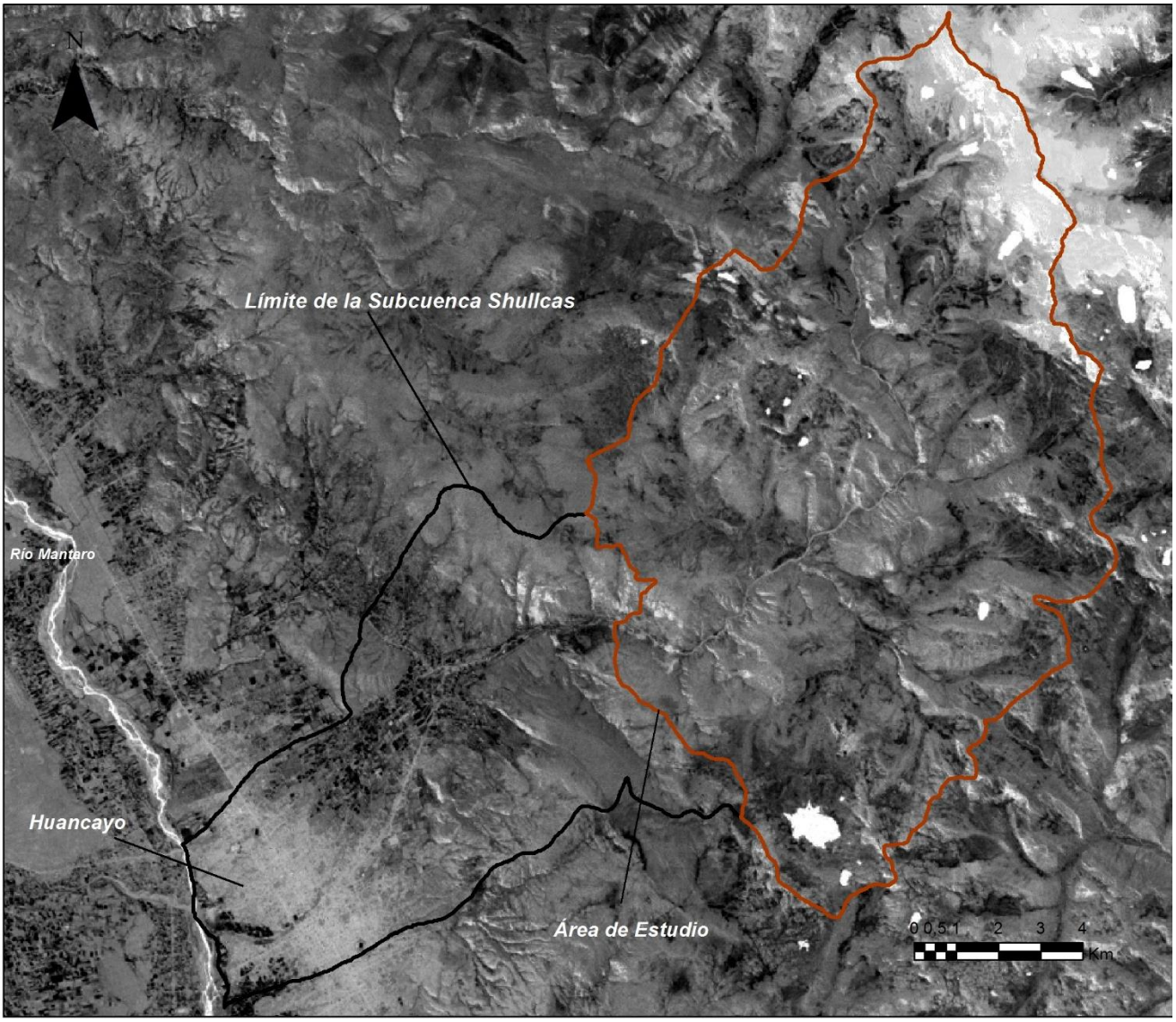
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 8. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2003.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

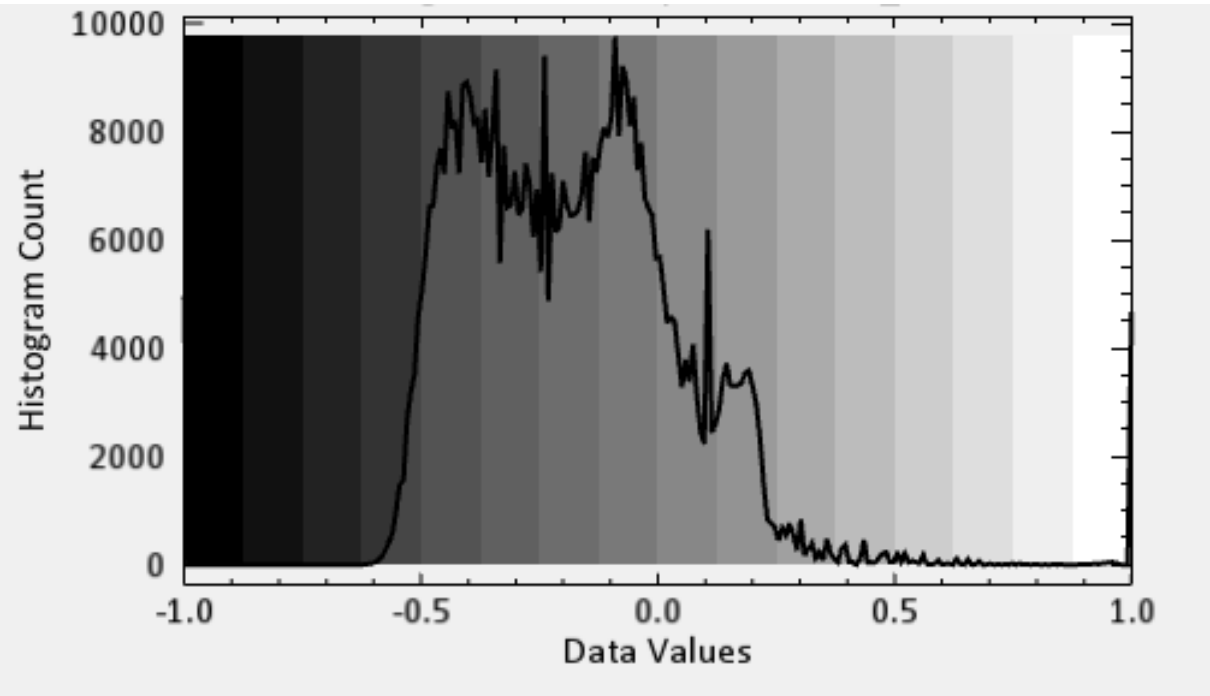
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 9. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2005.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

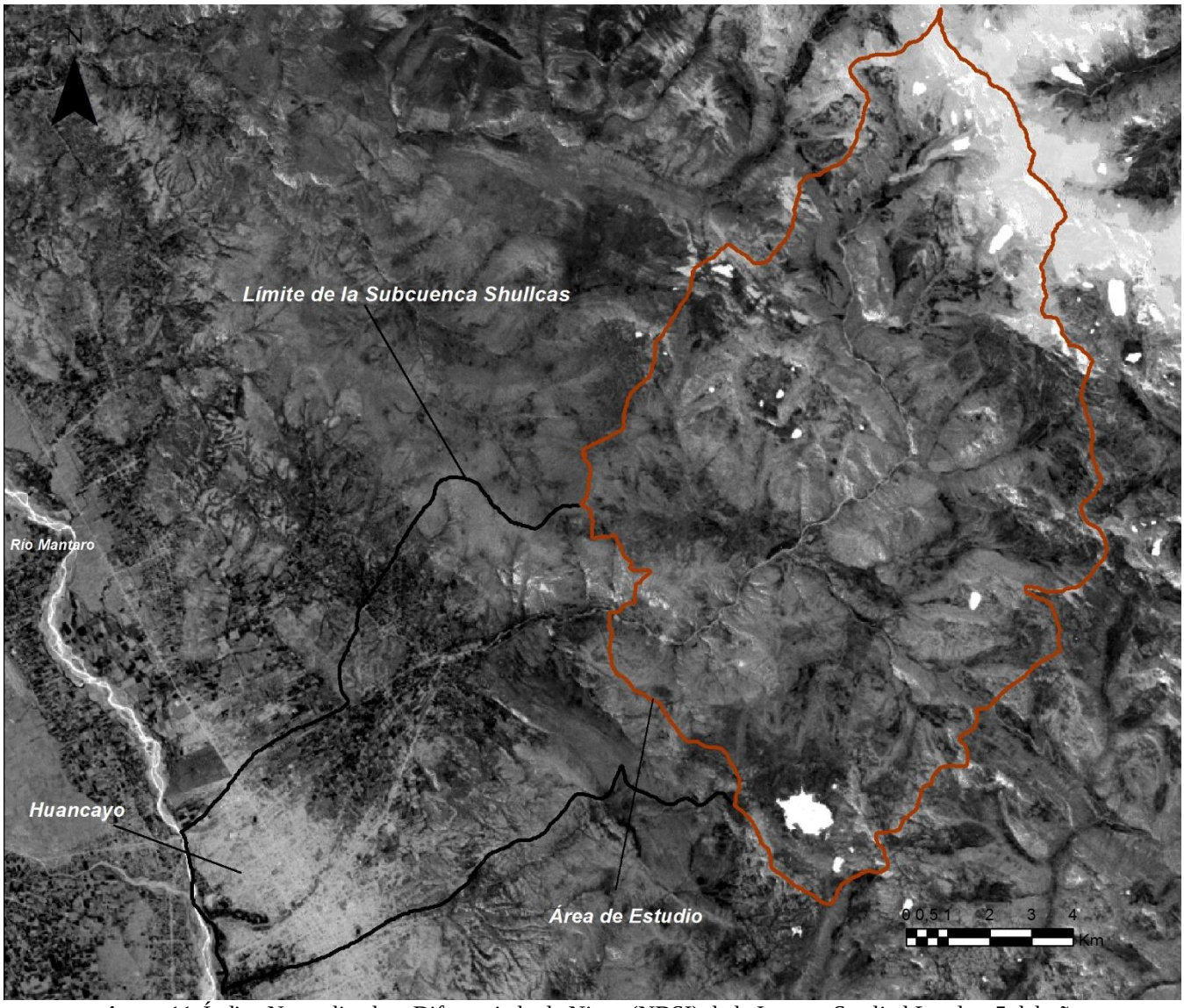
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 10. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2005.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

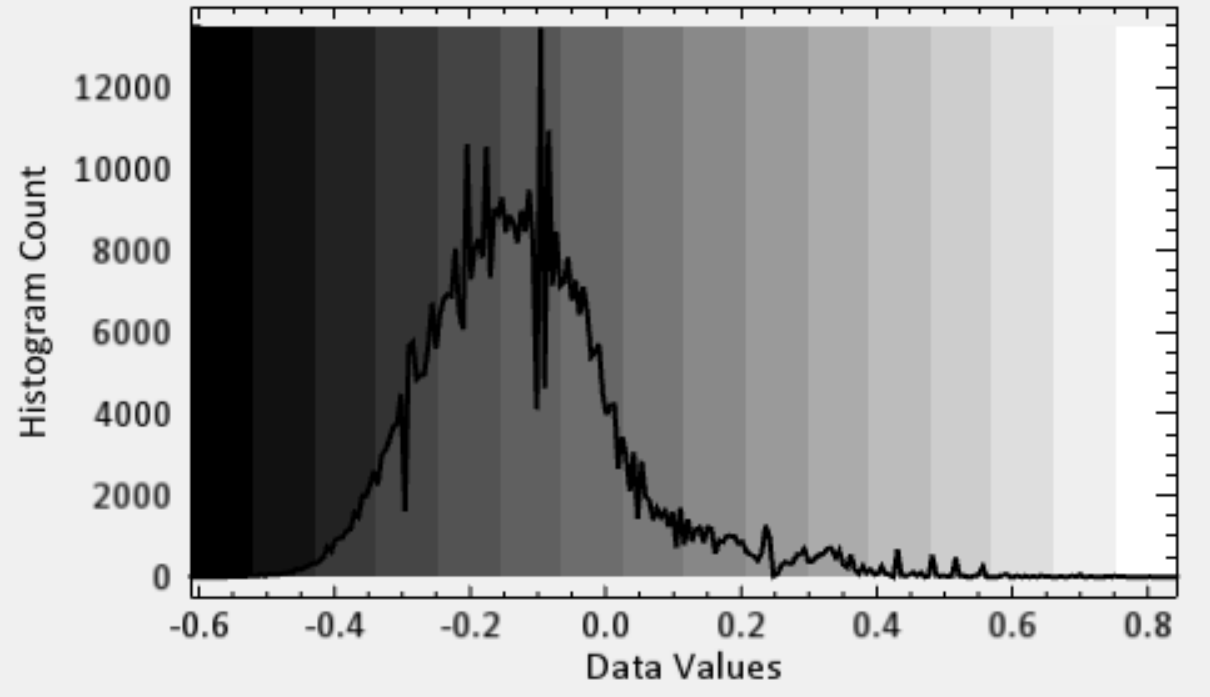
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 11. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2007.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

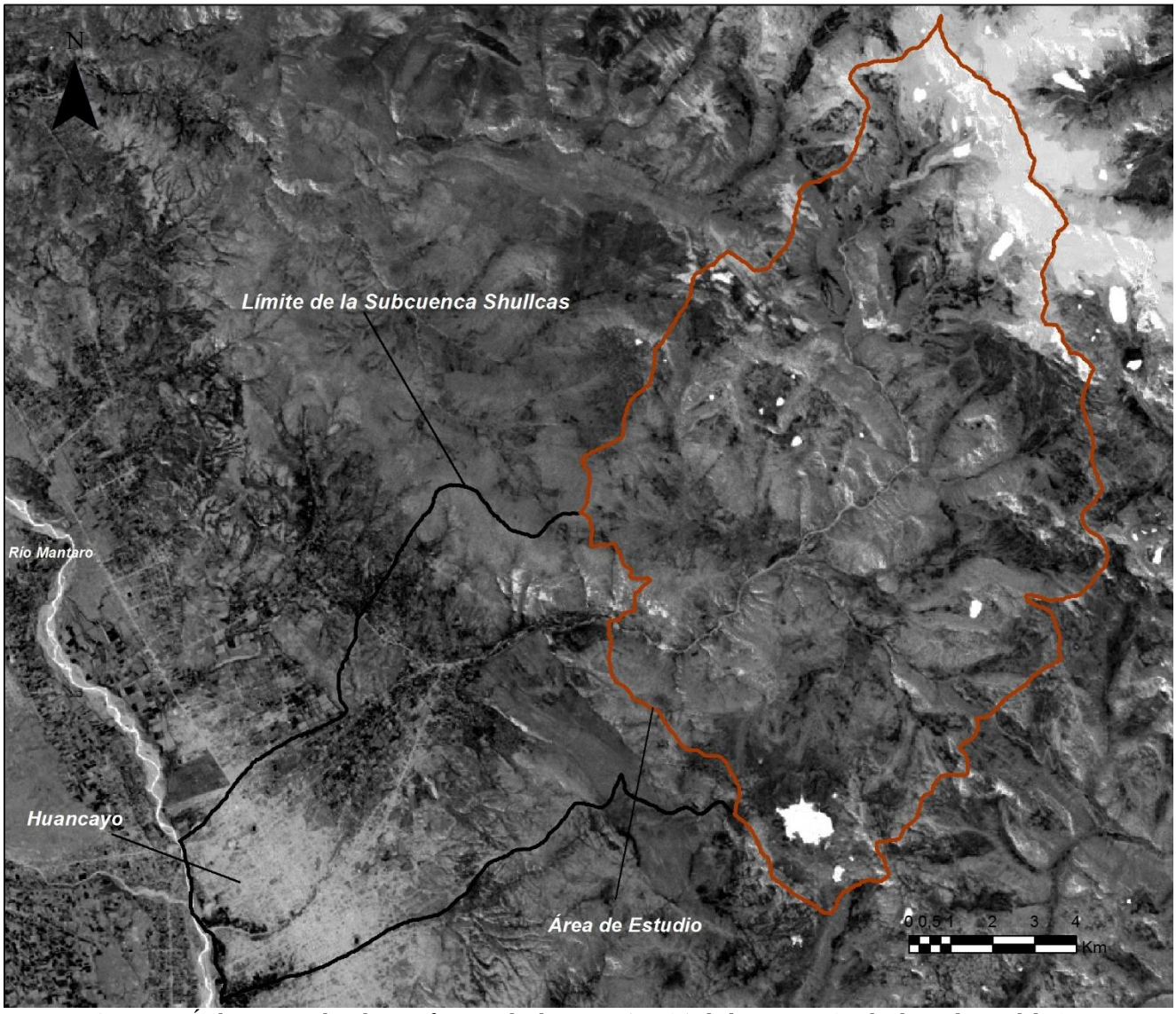
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 12. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2007.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

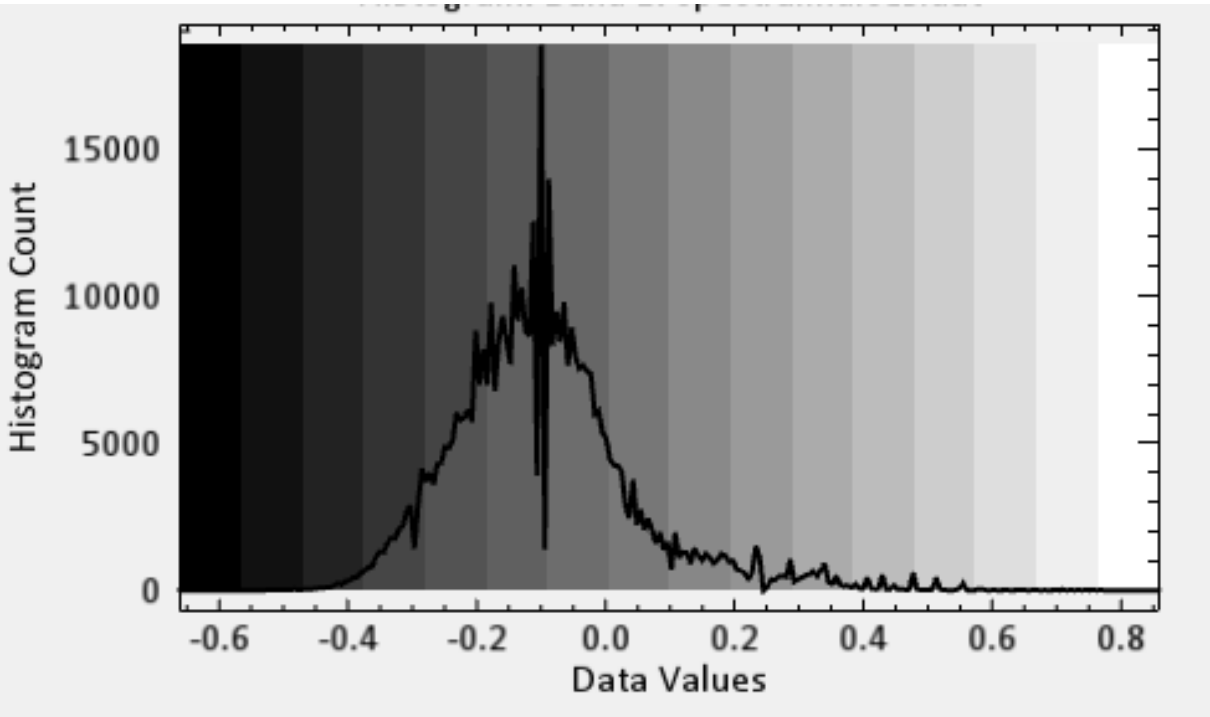
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 13. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2010.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

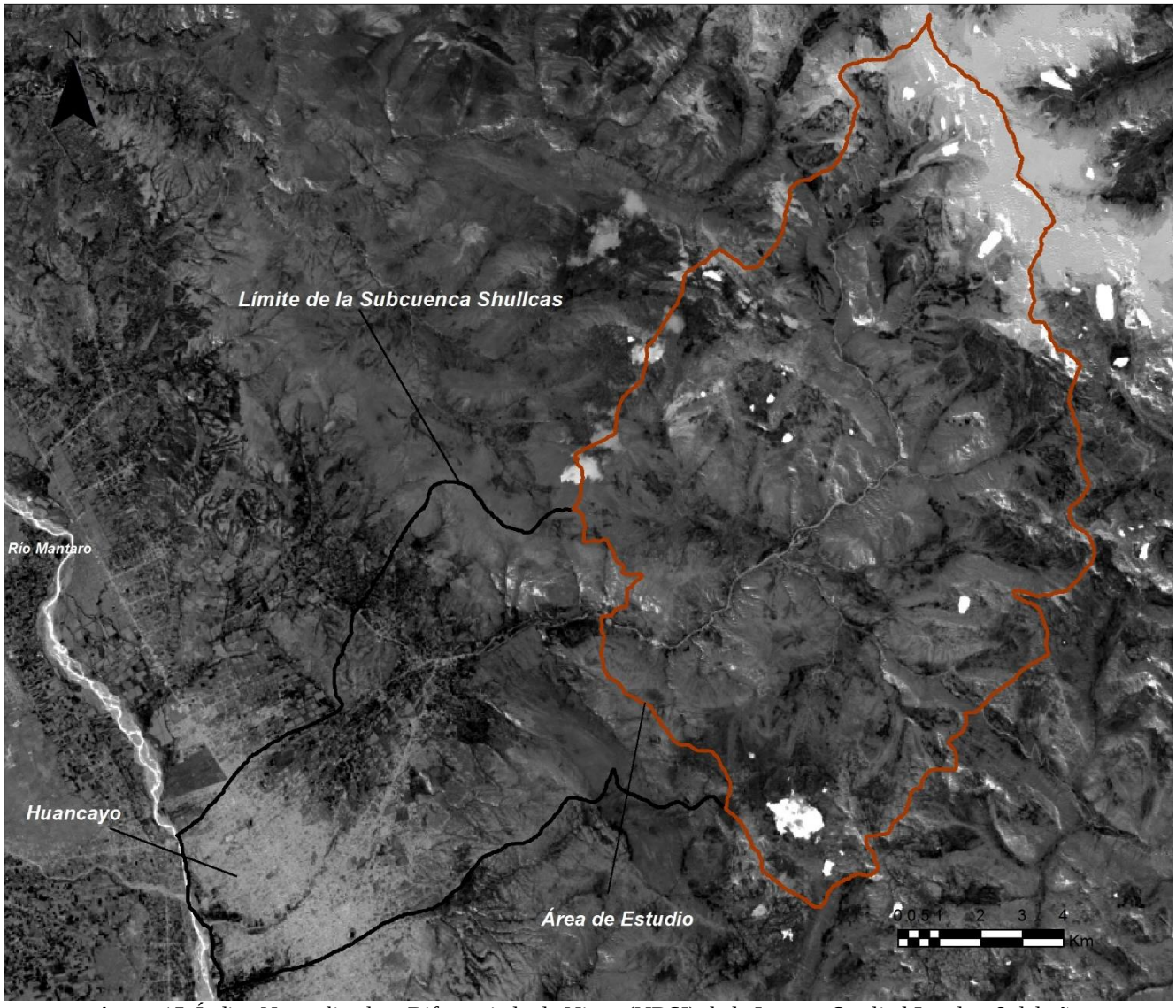
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 14. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 5 del año 2010.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

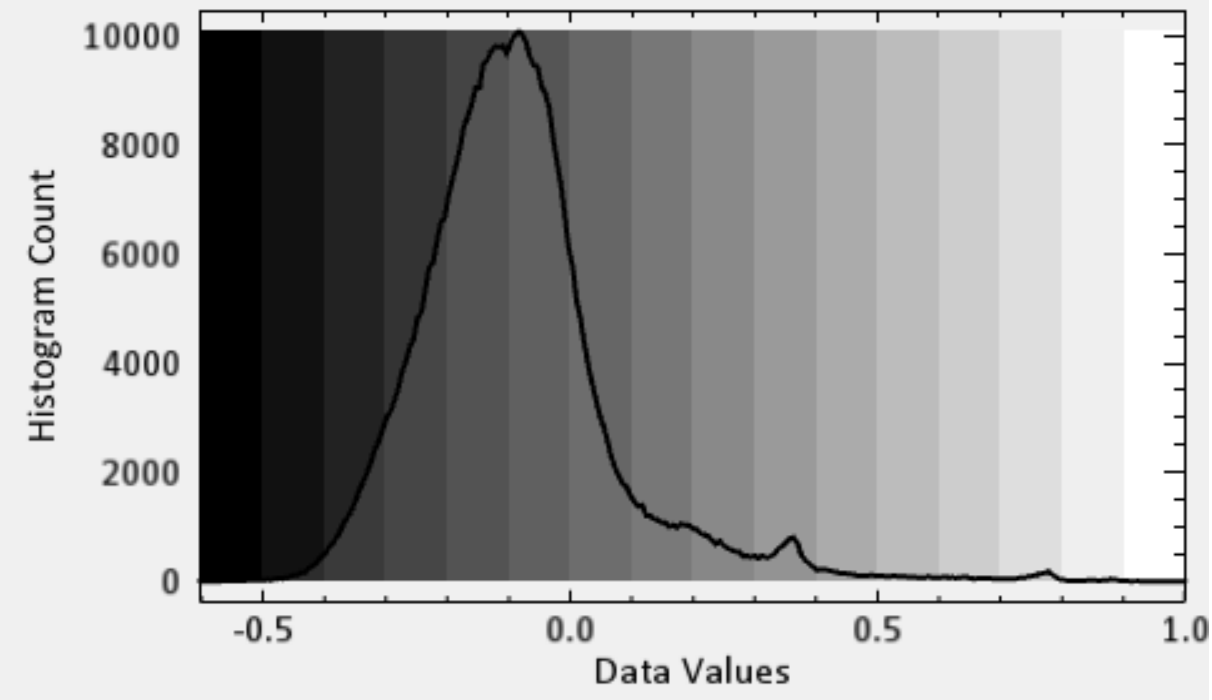
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 15. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2013.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

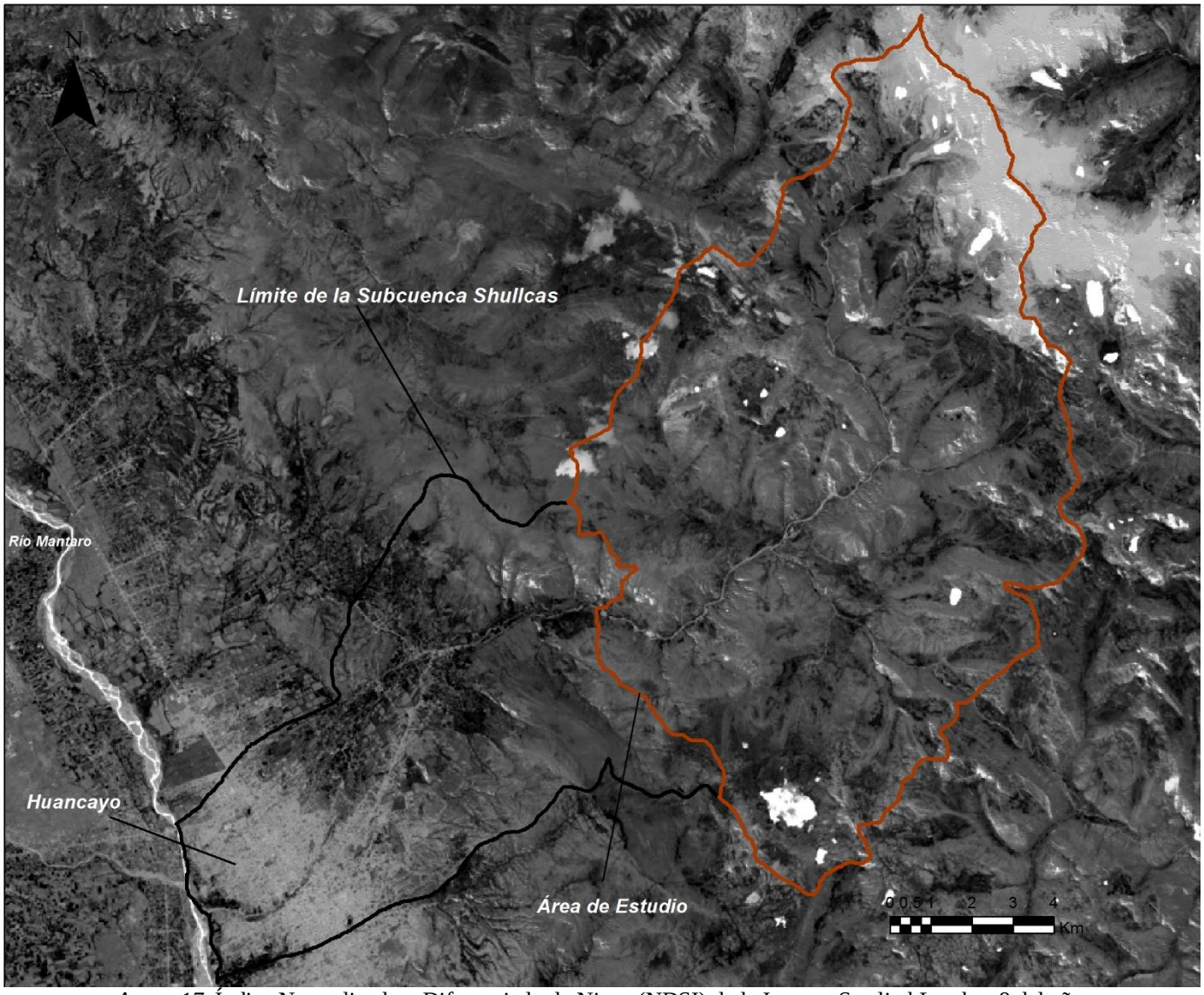
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 16. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2013.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

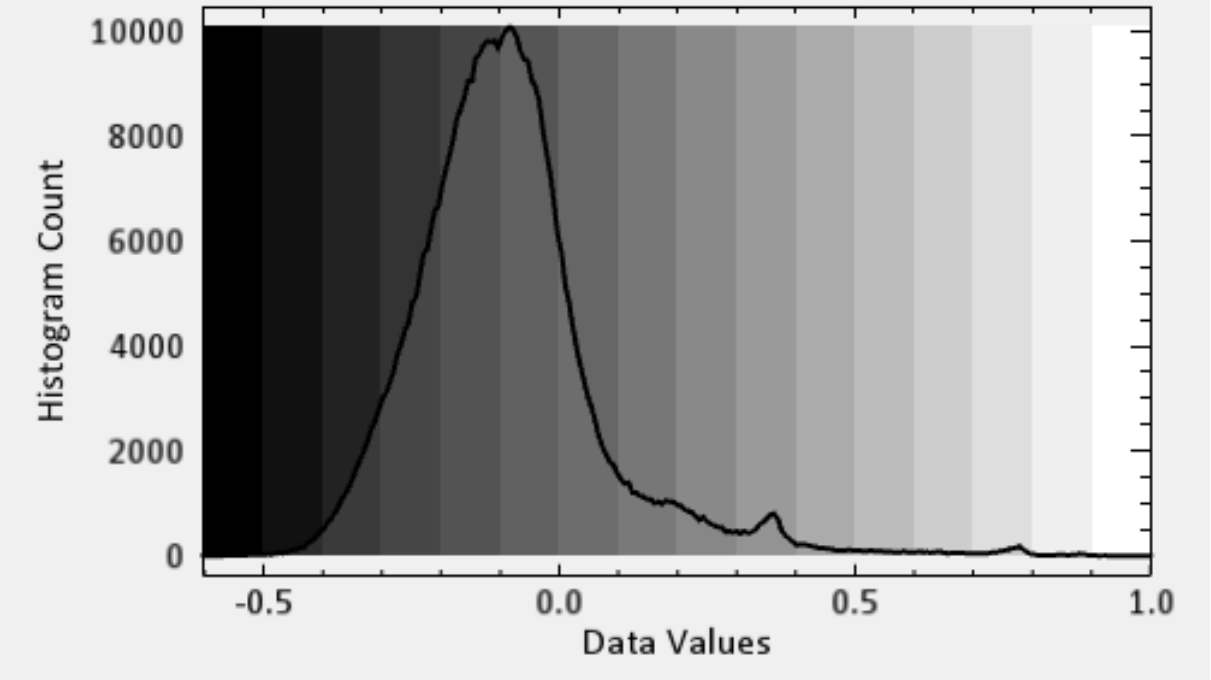
TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 17. Índice Normalizado y Diferenciado de Nieve (NDSI) de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2016.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis

TESIS
UNIVERSIDAD CIENTÍFICA DEL SUR



Anexo 18. Histograma de los valores obtenidos del NDSI de la Imagen Satelital Landsat 8 del año 2016.

Tesis publicada con autorización del autor
No olvide citar esta tesis