

FACULTAD DE INGENIERÍA

Escuela Académico Profesional de Ingeniería Ambiental

Tesis

**Estimación del retroceso y predicción del tiempo de
permanencia del nevado Ausangate mediante el
análisis multitemporal años 1985-2020, Cusco**

Darwin Cunza Robles

Para optar el Título Profesional de
Ingeniero Ambiental

Cusco, 2024

Repositorio Institucional Continental
Tesis digital



Esta obra está bajo una Licencia "Creative Commons Atribución 4.0 Internacional" .

INFORME DE CONFORMIDAD DE ORIGINALIDAD DE TESIS

A : Felipe Nestor Gutarra Meza
Decano de la Facultad de Ingeniería

DE : Steve Dann Camargo Hinostroza

ASUNTO : Remito resultado de evaluación de originalidad de tesis

FECHA : 15 de febrero de 2024

Con sumo agrado me dirijo a vuestro despacho para saludarlo y en vista de haber sido designado asesor de la tesis titulada: "**Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco**", perteneciente al/la/los/las estudiante(s) **Darwin Cunza Robles**, de la E.A.P. de **Ingeniería Ambiental**; se procedió con la carga del documento a la plataforma "Turnitin" y se realizó la verificación completa de las coincidencias resaltadas por el software dando por resultado 20 % de similitud (informe adjunto) sin encontrarse hallazgos relacionados a plagio. Se utilizaron los siguientes filtros:

- Filtro de exclusión de bibliografía SI NO
- Filtro de exclusión de grupos de palabras menores
(Nº de palabras excluidas: 15) SI NO
- Exclusión de fuente por trabajo anterior del mismo estudiante SI NO

En consecuencia, se determina que la tesis constituye un documento original al presentar similitud de otros autores (citas) por debajo del porcentaje establecido por la Universidad.

Recae toda responsabilidad del contenido de la tesis sobre el autor y asesor, en concordancia a los principios de legalidad, presunción de veracidad y simplicidad, expresados en el Reglamento del Registro Nacional de Trabajos de Investigación para optar grados académicos y títulos profesionales – RENATI y en la Directiva 003-2016-R/UC.

Esperando la atención a la presente, me despido sin otro particular y sea propicia la ocasión para renovar las muestras de mi especial consideración.

Atentamente,



Asesor de tesis

DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD

Yo, **Darwin Cunza Robles**, identificado(a) con Documento Nacional de Identidad No. **71834388**, de la E.A.P. de **Ingeniería Ambiental** de la Facultad de **Ingeniería** la Universidad Continental, declaro bajo juramento lo siguiente:

1. La tesis titulada: "**Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco**", es de mi autoría, la misma que presento para optar el Título Profesional de **Ingeniero Ambiental**.
2. La tesis no ha sido plagiada ni total ni parcialmente, para la cual se han respetado las normas internacionales de citas y referencias para las fuentes consultadas, por lo que no atenta contra derechos de terceros.
3. La tesis es original e inédita, y no ha sido realizado, desarrollado o publicado, parcial ni totalmente, por terceras personas naturales o jurídicas. No incurre en autoplagio; es decir, no fue publicado ni presentado de manera previa para conseguir algún grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados son reales, pues no son falsos, duplicados, ni copiados, por consiguiente, constituyen un aporte significativo para la realidad estudiada.

De identificarse fraude, falsificación de datos, plagio, información sin cita de autores, uso ilegal de información ajena, asumo las consecuencias y sanciones que de mi acción se deriven, sometiéndome a las acciones legales pertinentes.



22 de febrero de 2024.

Darwin Cunza Robles

DNI. No. **71834388**

Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco

ORIGINALITY REPORT

20%

SIMILARITY INDEX

19%

INTERNET SOURCES

5%

PUBLICATIONS

10%

STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	repositorio.unsa.edu.pe Internet Source	1%
2	mriuc.bc.uc.edu.ve Internet Source	1%
3	Submitted to Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga Student Paper	1%
4	dspace.esPOCH.edu.ec Internet Source	1%
5	qdoc.tips Internet Source	1%
6	Submitted to INACAP Student Paper	1%
7	repositorio.unap.edu.pe Internet Source	1%
8	Submitted to The University of Manchester Student Paper	<1%

9	www.geomatica.pe Internet Source	<1 %
10	www.scielo.org.pe Internet Source	<1 %
11	docplayer.es Internet Source	<1 %
12	repositorio.lamolina.edu.pe Internet Source	<1 %
13	doczz.com.br Internet Source	<1 %
14	tesis.pucp.edu.pe Internet Source	<1 %
15	repository.udca.edu.co Internet Source	<1 %
16	ateneo.unmsm.edu.pe Internet Source	<1 %
17	repositorio.inaigem.gob.pe Internet Source	<1 %
18	repositorio.unam.edu.pe Internet Source	<1 %
19	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Student Paper	<1 %
20	repositorio.unfv.edu.pe	

Internet Source

<1 %

21

fdocuments.ec

Internet Source

<1 %

22

repositorio.upao.edu.pe

Internet Source

<1 %

23

repositorio.unica.edu.pe

Internet Source

<1 %

24

Submitted to The American College of Greece
Libraries

Student Paper

<1 %

25

Submitted to Universidad Militar Nueva
Granada

Student Paper

<1 %

26

dspace.ups.edu.ec

Internet Source

<1 %

27

www.grida.no

Internet Source

<1 %

28

revistasinvestigacion.unmsm.edu.pe

Internet Source

<1 %

29

repositorio.uap.edu.pe

Internet Source

<1 %

30

repository.unimilitar.edu.co

Internet Source

<1 %

31	Submitted to Curtin University of Technology Student Paper	<1 %
32	repositorio.utea.edu.pe Internet Source	<1 %
33	idoc.pub Internet Source	<1 %
34	www.gob.pe Internet Source	<1 %
35	Submitted to Universidad Internacional del Ecuador Student Paper	<1 %
36	repositorio.upt.edu.pe Internet Source	<1 %
37	repositoriodemo.continental.edu.pe Internet Source	<1 %
38	Submitted to University of Northumbria at Newcastle Student Paper	<1 %
39	repositorio.unh.edu.pe Internet Source	<1 %
40	Submitted to Infile Student Paper	<1 %
41	distancia.udh.edu.pe Internet Source	<1 %

42	repositorio.unasam.edu.pe Internet Source	<1 %
43	Submitted to Universidad Ricardo Palma Student Paper	<1 %
44	acofipapers.org Internet Source	<1 %
45	core.ac.uk Internet Source	<1 %
46	Submitted to Universidad Cesar Vallejo Student Paper	<1 %
47	es.unionpedia.org Internet Source	<1 %
48	acolita.com Internet Source	<1 %
49	Submitted to Universidad Nacional del Centro del Peru Student Paper	<1 %
50	repositorio.udh.edu.pe Internet Source	<1 %
51	Submitted to Universidad Católica de Santa María Student Paper	<1 %
52	tesis.ucsm.edu.pe Internet Source	<1 %

53	addi.ehu.eus Internet Source	<1 %
54	mathmag.spbu.ru Internet Source	<1 %
55	renati.sunedu.gob.pe Internet Source	<1 %
56	repositorio.uceva.edu.co Internet Source	<1 %
57	MARÍA JOSÉ PELÁEZ CANO. "El desempeño exportador basado en la creación de capital social a través del uso de las tecnologías de la Información. Un estudio en el sector del plástico", Universitat Politecnica de Valencia, 2011 Publication	<1 %
58	es.slideshare.net Internet Source	<1 %
59	opensource.dell.com Internet Source	<1 %
60	repositorio.upsc.edu.pe Internet Source	<1 %
61	www.ncei.noaa.gov Internet Source	<1 %
62	Submitted to Universidad Industrial de Santander UIS	<1 %

63

dokumen.pub

Internet Source

<1 %

64

es.mongabay.com

Internet Source

<1 %

65

www.minenergia.gov.co

Internet Source

<1 %

66

harbeli.wixsite.com

Internet Source

<1 %

67

www.gdacs.org

Internet Source

<1 %

68

Submitted to Universidad Privada del Norte

Student Paper

<1 %

69

Submitted to Universidad de artes, ciencias y comunicación UNIACC

Student Paper

<1 %

70

chileestuyo.cl

Internet Source

<1 %

71

ecpamericas.org

Internet Source

<1 %

72

helvia.uco.es

Internet Source

<1 %

73

revistasdigitales.upec.edu.ec

Internet Source

<1 %

74	www.dspace.uce.edu.ec Internet Source	<1 %
75	www.hdi.com.mx Internet Source	<1 %
76	Submitted to Universidad de Oviedo Student Paper	<1 %
77	cybertesis.unmsm.edu.pe Internet Source	<1 %
78	repositorio.espe.edu.ec Internet Source	<1 %
79	Submitted to University of Arizona Student Paper	<1 %
80	repositorio.unsch.edu.pe Internet Source	<1 %
81	ri.ues.edu.sv Internet Source	<1 %
82	www.jree.ir Internet Source	<1 %
83	#N/A. "PMR en el Distrito de Oropesa 2016-IGA0007515", O.M. N° 020-2016-MDO/Q, 2020 Publication	<1 %
84	María de las Mercedes De Obesso, Carlos Alberto Pérez Rivero, Sergio Cardona Herrero. "Impacto y percepción de	<1 %

actividades de learning by teaching en
estudiantes universitarios", HUMAN REVIEW.
International Humanities Review / Revista
Internacional de Humanidades, 2022

Publication

85

Submitted to Universidad de Medellin

Student Paper

<1 %

86

repositorio.ute.edu.ec

Internet Source

<1 %

87

repositorio.uwiener.edu.pe

Internet Source

<1 %

Exclude quotes On

Exclude matches < 15 words

Exclude bibliography On

Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco

GRADEMARK REPORT

FINAL GRADE

GENERAL COMMENTS

/0

PAGE 1

PAGE 2

PAGE 3

PAGE 4

PAGE 5

PAGE 6

PAGE 7

PAGE 8

PAGE 9

PAGE 10

PAGE 11

PAGE 12

PAGE 13

PAGE 14

PAGE 15

PAGE 16

PAGE 17

PAGE 18

PAGE 19

PAGE 20

PAGE 21

PAGE 22

PAGE 23

PAGE 24

PAGE 25

PAGE 26

PAGE 27

PAGE 28

PAGE 29

PAGE 30

PAGE 31

PAGE 32

PAGE 33

PAGE 34

PAGE 35

PAGE 36

PAGE 37

PAGE 38

PAGE 39

PAGE 40

PAGE 41

PAGE 42

PAGE 43

PAGE 44

PAGE 45

PAGE 46

PAGE 47

PAGE 48

PAGE 49

PAGE 50

PAGE 51

PAGE 52

PAGE 53

PAGE 54

PAGE 55

PAGE 56

PAGE 57

PAGE 58

PAGE 59

PAGE 60

PAGE 61

PAGE 62

PAGE 63

PAGE 64

PAGE 65

PAGE 66

PAGE 67

PAGE 68

PAGE 69

PAGE 70

PAGE 71

PAGE 72

PAGE 73

PAGE 74

PAGE 75

PAGE 76

PAGE 77

PAGE 78

PAGE 79

PAGE 80

PAGE 81

PAGE 82

PAGE 83

PAGE 84

PAGE 85

PAGE 86

PAGE 87

PAGE 88

PAGE 89

PAGE 90

PAGE 91

PAGE 92

PAGE 93

PAGE 94

PAGE 95

PAGE 96

PAGE 97

PAGE 98

PAGE 99

PAGE 100

PAGE 101

PAGE 102

PAGE 103

PAGE 104

PAGE 105

PAGE 106

PAGE 107

PAGE 108

PAGE 109

PAGE 110

PAGE 111

PAGE 112

PAGE 113

PAGE 114

PAGE 115

PAGE 116

PAGE 117

PAGE 118

PAGE 119

PAGE 120



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE
INGENIERÍA AMBIENTAL**

TESIS

**“Estimación del retroceso y predicción del tiempo de
permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis
multitemporal años 1985 – 2020, Cusco”**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE
INGENIERO AMBIENTAL**

**PRESENTADO POR:
BACH. Darwin Cunza Robles**

**HUANCAYO - PERÚ
2024**

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, agradezco a Dios y a mi familia por orientarme, darme aliento y permitirme cumplir mis objetivos para alcanzar mis sueños en la vida.

Expreso mi profundo agradecimiento a mi padre, Mario, por ser mi referente de esfuerzo y resiliencia. A mi madre, Nancy, por enseñarme que la vida no es fácil, que todo esfuerzo tiene su recompensa y por ser mi ejemplo de constancia y voluntad. A mis hermanos, agradezco su compañía y motivación. A mi novia, Silvia, por su apoyo incondicional, por confiar en mis capacidades y motivarme cada día a ser una mejor persona, siendo también mi ejemplo de constancia y superación.

Al Ing. Dagner Gustavo Chicata Cespedes, quien desempeñó un papel fundamental en el desarrollo de esta investigación, aportando su experiencia y conocimientos.

Finalmente, extiendo mi gratitud a todos mis familiares y amigos que estuvieron presentes con frases de aliento y motivación. Su apoyo ha sido invaluable en este camino hacia el logro de mis metas.

DEDICATORIA

A mis padres, Nancy Felicitas Robles Altamirano y Mario Rene Cunza Echeagaray, quienes han sido un ejemplo para mí, enseñándome que todo es posible y confiando en mis capacidades.

A mis hermanos, Cristian y Brandon, les agradezco por brindarme sus consejos.

A mi novia, Silvia, le expreso mi gratitud por brindarme su amor, apoyarme en momentos difíciles e impulsarme a seguir mis sueños profesionales.

RESUMEN

El objetivo de la presente investigación es estimar el retroceso glaciar del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal entre los años 1985 - 2020, Cusco. El método general se basó en el enfoque científico, con un diseño no experimental, de enfoque cuantitativo y nivel descriptivo.

En cuanto a los resultados, el modelo exhibió un R cuadrado ajustado que tiene un valor de 0.7287, el cual confirma que el nivel de explicación del modelo es bueno. Asimismo, se afirmó que el modelo es significativo y que la variable independiente, años, incide en la variación del área glaciar total del nevado Ausangate.

El nevado Ausangate presenta un área de 45.90 km² para el año 1985, reduciéndose a 22.68 km² para el año 2020, lo que representa un retroceso glaciar del 50.59 % durante este periodo. Se estima que el glaciar del nevado Ausangate desaparecerá por completo para el año 2076.

Palabras clave: Glaciar, Desglaciación, Nevado.

ABSTRACT

The objective of this research is to estimate the glacial retreat of the Ausangate snow-capped mountain through multi-temporal analysis between the years 1985 - 2020, Cusco. The general method was based on the scientific approach, with a non-experimental design, quantitative approach and descriptive level.

Regarding the results, the model exhibited an adjusted R square that has a value of 0.7287, which confirms that the level of explanation of the model is good. Likewise, it was stated that the model is significant and that the independent variable, years, affects the variation of the total glacial area of the Ausangate snow-capped mountain.

The snowy Ausangate has an area of 45.90 km² for the year 1985, reducing to 22.68 km² for the year 2020, which represents a glacier retreat of 50.59 % during this period. It is estimated that the Ausangate glacier will completely disappear by the year 2076.

Keywords: Glacier, Deglaciation, Snowy.

INTRODUCCIÓN

El retroceso glaciar del nevado Ausangate está directamente vinculado al cambio climático, puesto que este genera cambios significativos en la forma y funcionamiento de los ecosistemas, es así como los glaciares experimentan variaciones en su área de manera acelerada. Este proceso involucra una reducción acelerada de la masa glaciar en la zona de acumulación, al mismo tiempo que se registra un aumento en la temperatura global y la pérdida de recursos hídricos a mediano y largo plazo.

La presente investigación tiene como objetivo estimar el retroceso glaciar del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal entre los años 1985 - 2020, en la región Cusco. La elección de este glaciar se fundamenta en su consideración como uno de los más representativos de la región, siendo el nevado más alto de Cusco y el quinto más alto de Perú. Internacionalmente, es conocido por formar parte del Área de Conservación Regional Ausangate.

En este sentido, plantearon tres objetivos específicos. El primero consistió en cuantificar la pérdida de área glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco. El segundo objetivo se enfocó en cuantificar la variación del perímetro glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco. Ambos objetivos se llevaron a cabo mediante el uso del programa de sistema de información geográfico ArcGIS en su versión 10.5. Finalmente, el tercer objetivo tuvo como propósito estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

Las imágenes satelitales utilizadas fueron adquiridas a través de la página del Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS). El procesamiento de estas imágenes se realizó con el software ArcGIS, mientras que el procesamiento estadístico se llevó a cabo empleando el paquete estadístico de Excel.

El autor.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS	i
DEDICATORIA	ii
RESUMEN.....	iii
ABSTRACT.....	iv
INTRODUCCIÓN	v
INDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS.....	x
CAPÍTULO I.....	1
1. PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO	1
1.1. Planteamiento y formulación del problema.....	1
1.1.1. Planteamiento del problema	1
1.1.2. Formulación del problema	2
1.1.2.1. Problema general.....	2
1.2. Objetivos	2
1.2.1. Objetivo general	2
1.2.2. Objetivos específicos.....	2
1.3. Justificación.....	2
1.4. Hipótesis y descripción de variables	3
1.4.1. Hipótesis general.....	3
1.4.2. Hipótesis específicas	3
1.5. Variables	3
CAPÍTULO II	1
2. MARCO TEÓRICO	1
2.1. Antecedentes de la investigación	1
2.1.1. Antecedentes internacionales	1
2.1.2. Antecedentes nacionales	2
2.1.3. Antecedentes locales	3
2.2. Fundamento teórico.....	3
2.2.1. Cambio Climático	3
2.2.2. Glaciar	3
2.2.3. La formación de los glaciares.....	4
2.2.4. Partes de un glaciar	4
2.2.5. Clasificación de los glaciares	5
2.2.6. Glaciares en Sudamérica	9
2.2.7. Glaciares Tropicales.....	10
2.2.8. Glaciares en el Perú.....	10

2.2.9.	Nieve	10
2.2.10.	El cambio climático y los glaciares	10
2.2.11.	Disminución de glaciares en el Perú	11
2.2.12.	Teledetección	13
2.2.13.	Componentes de un sistema de teledetección	14
2.2.14.	Sensores.....	15
2.2.15.	Resolución de los sensores remotos	15
2.2.16.	Clasificación digital.....	17
2.2.17.	Tipos de imágenes de teledetección	19
2.2.18.	Bandas Espectrales	21
2.2.19.	Misión LandSat	23
2.2.20.	Identificación de los productos.....	23
2.2.21.	Índice Diferencial Normalizado de Nieve.....	24
2.2.22.	Cálculo del NDSI	24
2.3.	Ubicación geográfica.....	24
2.4.	Términos básicos.....	28
CAPÍTULO III		30
3.	METODOLOGÍA	30
3.1.	Método y alcance de la investigación.....	30
3.1.1.	Método de investigación	30
3.1.2.	Nivel de investigación.....	30
3.1.3.	Diseño de la investigación.....	30
3.2.	Población y muestra	30
3.2.1.	Población.....	30
3.2.2.	Muestra.....	30
3.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	30
3.3.1.	Técnicas de recolección de datos	30
CAPITULO IV		60
4.	RESULTADOS Y DISCUSIONES	60
4.1.	Resultados	60
4.1.1.	Resultados para el OE1	60
4.1.2.	Resultados para el OE2	72
4.1.3.	Resultados para el OE3	75
4.2.	Discusión.....	79
CONCLUSIONES		81
RECOMENDACIONES		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		83

ANEXOS..... 90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Matriz de operacionalización de variables	1
Tabla 2. Escala del mapa mediante la resolución espacial (m)	15
Tabla 3. Descripción de los tipos de Resolución Temporal	17
Tabla 4. Bandas espectrales del satélite LandSat 4 y 5	22
Tabla 5. Bandas espectrales del satélite LandSat 7	22
Tabla 6. Bandas espectrales del satélite LandSat 8	22
Tabla 7. Formulas del NDSI según Misión LandSat.....	24
Tabla 8. Coordenadas de la zona de estudio	31
Tabla 9. Coordenadas UTM del área de estudio del nevado Ausangate	33
Tabla 10. Descripción de las Imágenes satelitales	42
Tabla 11. Tabla de área por años.....	71
Tabla 12. Tabla de perímetro por años.....	74
Tabla 13. Estadística de la regresión realizada en el paquete estadístico Excel para el retroceso glaciar del Nevado Ausangate durante el periodo de 1985 a 2020	75
Tabla 14. Análisis de varianza	75
Tabla 15. Cálculo de valores para determinar la prueba de Durbin - Watson.....	75
Tabla 16. Presupuesto de la investigación	90
Tabla 17. Formato para la recolección de imágenes satelitales del Nevado Ausangate	90
Tabla 18. Matriz de consistencia.....	93
Tabla 19. Matriz de operacionalización de variables	94

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Partes de un glaciar	5
Figura 2. Glaciarete en las laderas del Cerro Brujo, ejemplo de glaciarete	5
Figura 3. Glaciar en la caldera del Volcán Nevados de Sollipulli, ejemplo de glaciar de cráter ..	6
Figura 4. Glaciar Romanche en el canal Beagle, ejemplo de glaciar de montaña.....	7
Figura 5. Glaciar Universidad, ejemplo de glaciar de valle	8
Figura 6. Glaciar rocoso en el Valle de Navarro, ejemplo de glaciar rocoso.....	9
Figura 7. Glaciar Quelccaya, Departamento del Cusco	12
Figura 8. Imagen Landsat-5 del Glaciar Quelccaya, captada en el año 1988.....	12
Figura 9. Imagen Landsat-5 del Glaciar Quelccaya, captada en el año 2010.....	13
Figura 10. Resolución espacial – Comparación de tamaño de pixel de una imagen.....	15
Figura 11. Comparación de bandas SENTINEL 2, LANDSAT 7 y 8	16
Figura 12. Resolución radiométrica: comparación en los niveles de grises o niveles digital	16
Figura 13. La fórmula para determinar niveles de gris	16
Figura 14. Codificación de los ND de una imagen Landsat 8bits	17
Figura 15. Ejemplo de clasificación supervisada	18
Figura 16. Ejemplo de clasificación no supervisada	19
Figura 17. Ejemplo de imagen multiespectral	20
Figura 18. Ejemplo de imagen pancromática	20
Figura 19. Ejemplo de imagen fusionada	21
Figura 20. Ejemplo de imagen estéreo	21
Figura 21. Bandas espectrales del satélite LandSat 8.....	23
Figura 22. Nevado Ausangate	25
Figura 23. Ecosistema de glaciares y pajonales andinos del Área de Conservación Regional Ausangate.....	25
Figura 24. Mapa de Ubicación Geográfica del Nevado Ausangate	27
Figura 25. Puntos de las coordenadas UTM de la zona de estudio	31
Figura 26. Búsqueda del área de estudio en el programa Google Earth Pro	32
Figura 27. Proceso para la delimitación del área de estudio en el programa Google Earth Pro .	33
Figura 28. Área de estudio delimita en el programa Google Earth Pro	33
Figura 29. Delimitación del área de estudio en formato KMZ. en el programa Google Earth Pro	34
Figura 30. Ingresando en el buscador a la página de la USGS.....	35
Figura 31. Página del Servicio Geológico de los Estados Unidos o USGS	35
Figura 32. Procedimiento para cargar el área de estudio en la plataforma de la USGS.....	36
Figura 33. Procedimiento para seleccionar la fecha de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS.....	37

Figura 34. Procedimiento para seleccionar la cobertura de nubes de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS.....	38
Figura 35. Fechas de las Misiones LandSat	38
Figura 36. Procedimiento para seleccionar la Misión LandSat de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS.....	39
Figura 37. Resultado de la búsqueda avanzada de las imágenes satelitales	40
Figura 38. Previsualización de la imagen satelital elegida.....	40
Figura 39. Procedimiento para la descarga de imágenes satelitales de la USGS	41
Figura 40. Distribución de carpetas de trabajo dentro del computador.....	44
Figura 41. Carpetas de "entrada" y "salida" dentro de cada carpeta anual.....	45
Figura 42. Archivos de la imagen satelital descargada en su respectiva carpeta anual.....	45
Figura 43. Vista del Programa ArcGIS 10.5 desde el computador	46
Figura 44. Procedimiento para la composición de bandas espectrales.....	46
Figura 45. Procedimiento para el agrupamiento de las bandas espectrales.....	47
Figura 46. Procedimiento para generar el filtro o composición RGB	47
Figura 47. Resultado de la generación del filtro o composición RGB.....	48
Figura 48. Combinación RGB de color natural para LandSat 4.....	48
Figura 49. Procedimiento para la carga del polígono del área de estudio	49
Figura 50. Procedimiento para modificar el color del polígono del área de estudio.....	49
Figura 51. Resultado del cambio de color del polígono del área de estudio	50
Figura 52. Proceso para el cálculo del NDSI	51
Figura 53. Resultado del NDSI	51
Figura 54. Procedimiento para el recorte del área de estudio.....	52
Figura 55. Resultado del proceso de recorte del área de estudio.....	52
Figura 56. Procedimiento para la reclasificación del Raster del NDSI.....	53
Figura 57. Resultado de la reclasificación del Raster del NDSI	53
Figura 58. Procedimiento para convertir Raster a Polígono	54
Figura 59. Resultado del procedimiento para convertir Raster a Polígono.....	54
Figura 60. Procedimiento para cuantificar área.....	55
Figura 61. Resultado del procedimiento para cuantificar área	55
Figura 62. Zona del estudio al finalizar el proceso en el programa ArcGIS 10.5	55
Figura 63. Procedimiento para cuantificar perímetro.....	56
Figura 64. Resultado del procedimiento para cuantificar perímetro	56
Figura 65. Zona del estudio al finalizar el proceso en el programa ArcGIS 10.5	56
Figura 66. Procedimiento para realizar regresión en el paquete estadístico Excel.....	57
Figura 67. Procedimiento para calcular regresión.....	58
Figura 68. Resultado del cálculo de regresión en el paquete estadístico Excel	58

Figura 69. Ecuación de Durbin – Watson	59
Figura 70. Gráfico de Durbin – Watson.....	59
Figura 71. Comportamiento del área glaciar en km ² del nevado Ausangate durante los años 1985 - 1995	60
Figura 72. Comparación del área glaciar del nevado Ausangate de los años 1985 y 1995.....	61
Figura 73. Variación del área glaciar del nevado Ausangate durante los años 1985 - 1995	62
Figura 74. Comportamiento del área glaciar en km ² del nevado Ausangate durante los años 1996 - 2005	63
Figura 75. Comparación del área glaciar del nevado Ausangate de los años 1996 y 2005.....	64
Figura 76. Variación del área glaciar del nevado Ausangate durante los años 1996 - 2005.....	65
Figura 77. Comportamiento del área en km ² del nevado Ausangate durante los años 2006 - 2020	66
Figura 78. Comparación del área glaciar del nevado Ausangate de los años 2006 y 2020.....	67
Figura 79. Variación del área glaciar del nevado Ausangate durante los años 2006 - 2020.....	68
Figura 80. Variación del área glaciar del nevado Ausangate en intervalos de 5 años durante el periodo de 1985 a 2020.....	69
Figura 81. Comportamiento del área en km ² del nevado Ausangate durante los años 1985 - 2020	70
Figura 82. Comportamiento del perímetro en km del nevado Ausangate durante los años 1985 - 2020.....	73
Figura 83. Proyección del tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate	78
Figura 84. Evidencia de recolección de datos del estudio.....	92
Figura 85. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 1985	95
Figura 86. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 1995	96
Figura 87. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 1996	97
Figura 88. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 2005	98
Figura 89. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 1985	99
Figura 90. Área glaciar del Nevado Ausangate para el año 1985	100
Figura 91. Mapa de la variación del área glaciar del Nevado Ausangate en intervalos de 5 años durante el periodo de 1985 a 2020	101
Figura 92. Variación del área glaciar del Nevado Ausangate durante el periodo de 1985 a 2020	102

CAPÍTULO I

PLANTEAMIENTO DEL ESTUDIO

1.1. Planteamiento y formulación del problema

1.1.1. Planteamiento del problema

Los glaciares andinos figuran como una de las fuentes primordiales del recurso hídrico en Suramérica, en el transcurso de las últimas décadas se vieron afectadas significativamente como producto de la variabilidad del clima y el cambio climático (1).

El cambio climático ha generado cambios en la dinámica y forma de los ecosistemas fluviales a nivel mundial. La reducción de los ríos de montaña ha evidenciado la capacidad de los glaciares para inducir cambios sistémicos en la diversidad biológica de los invertebrados acuáticos. Siendo aun desconocido el impacto de la pérdida de hielo en los taxones y en la función general del ecosistema. La clara asociación entre niveles ecológicos de hongos y funciones de los ecosistemas en los ríos de montaña advierte que la persistente disminución de la capa de hielo global modificará funciones primordiales en los ecosistemas, abarcando incluso los procesos del ciclo del carbono (2).

Las nevadas en las zonas montañosas están reduciendo de manera acelerada, un problema que se intensificará en las próximas décadas debido al cambio climático. Este fenómeno desencadena una serie de efectos que se extenderán desde zonas montañosas hasta las tierras de baja altitud, con impactos negativos en los ecosistemas, la economía y los medios de vida humanos. El incremento del forzamiento radiativo y el aumento de la temperatura del aire, los glaciares se reducirán y, en algunos casos, desaparecerán; la superficie de permafrost se verá disminuida, la proporción de lluvia y nieve disminuirá y el tiempo y la magnitud de los mínimos y máximos caudales cambiarán. Estas modificaciones afectarán los niveles de erosión, el flujo de sedimentos y nutrientes, y la biogeoquímica de los lagos y ríos preglaciares, todo ello influyendo en el hábitat acuático y su calidad. Las variaciones en la temporalidad de estaciones darán cabida a que los seres vivos de baja altitud amplíen sus rangos de áreas de hábitat hacia altitudes mayores. Las fallas en las laderas debido a la pérdida de hielo del permafrost y las inundaciones repentinas de lagos represados por morrenas son una amenaza constante a las poblaciones que habitan aguas abajo. Las sociedades que habitan en la cuenca baja dependen del agua proveniente del deshielo de los glaciares y la nieve para el suministro de agua potable, energía hidroeléctrica, riego, agricultura, minería y recreación (3).

Perú cuenta con la superficie glacial más extensa de Sudamérica, albergando un 70% de agua dulce en estado sólido, razón por la cual se toma en cuenta como uno de los recursos primordiales en el mundo (4).

Los glaciares tropicales son considerados indicadores del calentamiento global debido a su vulnerabilidad a cambios extremos, provocando un retroceso rápido de las áreas glaciares,

como se evidencia a través de registros fotogramétricos y satelitales de los últimos 50 años (5).

1.1.2. Formulación del problema

1.1.2.1. Problema general

¿Cómo retrocedió el glaciar del nevado Ausangate mediante un análisis multitemporal, en la provincia de Quispicanchi, región Cusco?

1.1.2.2. Problemas específicos

PE1: ¿Cuánto de área glaciar se perdió en el nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, en la provincia de Quispicanchi, región Cusco?

PE2: ¿Cuánto del perímetro glaciar vario en el nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, de la provincia de Quispicanchi, región Cusco?

PE3: ¿Cuánto tiempo permanecerá la cobertura glaciar del nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, de la provincia de Quispicanchi, región Cusco?

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Estimar el retroceso glaciar del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal entre los años 1985 - 2020, Cusco.

1.2.2. Objetivos específicos

OE1: Cuantificar la pérdida del área glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

OE2: Cuantificar la variación del perímetro glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

OE3: Estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

1.3. Justificación

Los glaciares abarcan alrededor de la décima parte de la superficie terrestre de nuestro planeta; sin embargo, estos experimentan un retroceso acelerado, y muchos de ellos se extinguirán en unas pocas décadas. Este fenómeno, de alcance global, siendo una advertencia para los recursos hídricos y la diversidad biológica, especialmente en países en vías del desarrollo (6).

El presente estudio ha optado por investigar sobre la evolución del retroceso glaciar y su predicción temporal mediante el análisis multitemporal del nevado Ausangate, en la provincia de Quispicanchi, región Cusco. Se justifica la identificación de la pérdida del área glaciar, la disminución del perímetro glaciar y la estimación del tiempo en el que el área

glaciar del nevado Ausangate se extinguirá. Este enfoque permitirá la toma de decisiones a largo, mediano y corto plazo basándose en resultados obtenidos.

La relevancia social de esta investigación es innegable, ya que los recursos hídricos, esenciales para la vida cotidiana, sustentan a las generaciones futuras. Por esta razón, la investigación no solo se limitará a diagnosticar el retroceso glaciar, sino que los resultados se utilizarán para generar conciencia, educar e informar a los funcionarios públicos. De este modo, se espera que tomen decisiones acertadas en temas de mitigación, prevención y adaptación. Frente a la problemática expuesta, el estudio demuestra una finalidad social evidente, buscando impactar positivamente en el manejo de los recursos hídricos y en la futura planificación sostenible.

1.4. Hipótesis y descripción de variables

1.4.1. Hipótesis general

El análisis multitemporal estima el retroceso glaciar del nevado Ausangate entre los años 1985 – 2020.

1.4.2. Hipótesis específicas

HE1: El análisis multitemporal permite cuantificar el área de pérdida del nevado Ausangate desde 1985 a 2020.

HE2: El análisis multitemporal permite cuantificar la variación del perímetro del nevado Ausangate desde 1985 a 2020.

HE3: El análisis multitemporal permite estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate de la provincia de Quispicanchi, región Cusco.

1.5. Variables

V1: Retroceso de cobertura glaciar

V2: Tiempo de permanencia de la cobertura glaciar

Tabla 1. *Matriz de operacionalización de variables*

Titulo					
Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco					
VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
V1: Retroceso de cobertura glaciar	Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña(7).	El retroceso de la cobertura glaciar se medirá a través de la tendencia de retroceso glaciar a partir del área y perímetro del mismo que se medirán a través del software ArcGIS en el campo de los Sistemas de Información Geográfica.	Espacial	Perímetro Área	km km ²
V2: Tiempo de permanencia de la cobertura glaciar	Es la estimación del retroceso de la cobertura glaciar expresado como el tiempo máximo en el cual desaparecerá por completo la cobertura glaciar(8).	La predicción de la cobertura glaciar se medirá a través del análisis multitemporal del 1985 al 2020, el cual a partir de la obtención de información geográfica se estimará el tiempo máximo en el cual desaparecerá por completo la cobertura glaciar del nevado Ausangate.	Temporal	Tiempo	años

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de la investigación

2.1.1. Antecedentes internacionales

Rico (9) cuantificó el retroceso de los glaciares en los Pirineos para comprender la variabilidad de su respuesta al clima. Cabe señalar que esta investigación se enfocó en glaciares de valle y montaña, con escasa información experimental. Se empleó un enfoque integral que combinó medidas in situ, parámetros topográficos, climatología y teledetección. Además, se evaluaron opciones y limitaciones para el uso de escáneres láser terrestres (TLS), GPS diferencial (DGPS), señalando que, aunque el uso de TLS y GPR a tales glaciares es prometedora, se identificaron brechas al emplear el GPS diferencial como técnica para monitorear los glaciares en menos de diez años. Finalmente, se reafirmó la importancia de mantener un programa de monitoreo del permafrost a lo largo del tiempo, incorporando estándares, métodos y técnicas para entender de mejor manera la respuesta de los glaciares en los Pirineos, la cueva de hielo y el permafrost en el cambiante escenario actual.

Salas y Duarte (10) llevaron a cabo un análisis del comportamiento glaciar a lo largo del tiempo en el nevado Ruíz. Su objetivo principal fue estimar el retroceso glaciar utilizando imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 correspondientes a los años 1999, 2002, 2014 y 2016. Este enfoque permitió examinar el retroceso glaciar durante un intervalo de tiempo de 17 años. A través del procesamiento digital de las imágenes, se clasificaron los promedios de las imágenes satelitales utilizando el clasificador de distancia mínima. La homogeneización por radiación generó imágenes comparables entre sí, y la calidad del clasificador se confirmó mediante el coeficiente Kappa. Con base en la información recopilada durante estos cuatro periodos, se procuró ajustar la tendencia de derretimiento mediante una regresión para determinar el año de extinción del área glaciar.

Díaz y Cárdenas (11) llevaron a cabo un análisis del comportamiento glaciar en el volcán nevado Cotopaxi. Utilizaron imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 7 ETM obtenidas en los años 1998, 2007 y 2016. Este análisis abarcó un periodo total de 18 años, con un enfoque parcial en un periodo de 9 años, con el propósito de determinar el retroceso glaciar. Este retroceso se atribuye al aumento de temperatura en nuestro planeta, fenómeno ampliamente respaldado por estudios y aplicaciones de sensores remotos que utilizan imágenes satelitales para señalar áreas de fusión de glaciares en diversas regiones a nivel mundial. La investigación se centró en evaluar el comportamiento glaciar del volcán nevado Cotopaxi mediante el uso del programa ArcGIS y sus funciones múltiples. Este enfoque permitió estimar la superficie de hielo, proporcionando valores aproximados de la zona de pérdida de hielo durante el periodo activo. Basándose en estos hallazgos, se formuló una proyección de

la pérdida de hielo del volcán cubierto de nieve, proyectando que esta pérdida se mantendrá hasta el año 2025.

2.1.2. Antecedentes nacionales

Díaz et al. (12) llevaron a cabo un análisis multitemporal abarcando el periodo de 1975 a 2015 para evaluar las variaciones en la capa de hielo en las cordilleras Allin Capac y Chichi Capac en Perú. La estimación del área cubierta por glaciares se realizó mediante un método de clasificación supervisada para imágenes Landsat 2, y un índice de diferencia de nieve normalizado para imágenes Landsat 5 y Landsat 8. Este análisis reveló una marcada reducción en la cobertura glaciaria en ambas cadenas montañosas. En 1975, la extensión glaciaria abarcaba 52,3 km², disminuyendo a 16,9 km² en 2015, lo que representó una pérdida total de 35,6 km². En 1975, el 35% del área glaciaria se encontraba por debajo de los 5000 m.s.n.m., mientras que, en 2015, esta cifra se redujo al 9% del área total del glaciar. La mayor reducción fue evidente en las últimas tres décadas del siglo XX, con una disminución menor en los primeros 20 años del siglo XXI. Los resultados indicaron una disminución del 67 % en la capa de hielo de los picos montañosos Allin Capac y Chichi Capac en los últimos 40 años, equivalente a una reducción del 17% por década, con una velocidad promedio de 0,89 km²/año.

Paucar (13) realizó un estudio sobre el retroceso glaciario en la Reserva Nacional Ampere y su impacto en la agricultura en la comunidad de Huayllabamba. Este enfoque multitemporal utilizó el programa ArcGIS en su versión 10.3 como herramienta y consideró los glaciares y la producción agrícola como factores cambiantes. La investigación, de naturaleza básica o sustantiva, adoptó una estructura longitudinal. Se emplearon observaciones y una encuesta para medir la producción agrícola y conciencia en la comunidad de Huayllabamba. Utilizando imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8 proporcionadas por cortesía de la NASA, se recolectaron 10 imágenes Landsat entre 1991 y 2017. A través de un proceso similar en geoinformática, se identificaron áreas agrícolas para determinar el impacto del retroceso de los glaciares en la agricultura. No se recurrió a estadísticas paramétricas para probar la hipótesis, sino a la prueba de RHO Pearson, ya que el alcance de la prueba era causal. Los resultados señalaron impactos negativos y significativos del retroceso glaciario del nevado Ampay en la agricultura de la comunidad de Huayllabamba.

Gaita (14) caracterizó el estado actual de los recursos naturales en la microcuenca Lullán mediante Sistemas de Información Geográfica (SIG) y teledetección, permitiendo formular alternativas del manejo adecuado y gestión de la microcuenca ante la problemática del retroceso glaciario. La cuantificación del retroceso glaciario se realizó mediante el análisis multitemporal de 4 imágenes satelitales en un periodo de 27 años, generando mapas de coberturas para los años 1987, 2001, 2009 y 2014. Además, se estimó la influencia de

variables físicas, climáticas, biológicas y poblacionales en el área de estudio para elaborar un modelo de riesgo que identifica poblaciones y zonas vulnerables a deslizamientos.

2.1.3. Antecedentes locales

Follanos y Sarmientos (15) identificaron el retroceso glaciar en las montañas de Verónica y Salkantay entre 1990 y 2020 mediante un análisis multitemporal en la región de Cusco. Este estudio descriptivo, longitudinal y comparativo utilizó imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) de 1990, 1997, 2004, 2011 y 2020. Se empleó el software ArcGIS 10.6 para elaborar mapas temáticos, concluyendo que las montañas experimentaron un significativo deshielo en un periodo de 30 años (1990-2020). La pérdida total del área de hielo fue de 1691,65 hectáreas (16,9165 km) en las cumbres del Salkantay y 1851,47 hectáreas en el pico nevado Verónica (18,5147 km²). La variabilidad entre los dos nevados fue notable, y con los cambios climáticos recientes, se pronostica que el retroceso del hielo continuará siendo exponencial, con consecuencias negativas para los habitantes de las cuencas de estos nevados.

Aedo y Quispe (16) se enfocaron en identificar la evolución del retroceso glaciar y su predicción temporal mediante un análisis multitemporal del nevado Chicón en la provincia de Urubamba, Región Cusco. La metodología adoptada fue cuantitativa, de diseño no experimental y de tipo básico. Los resultados del modelo revelaron un R cuadrado ajustado del 76,47 %, indicando un buen nivel de explicación del modelo sobre el cambio del área total del nevado Chicón. La prueba de $(\text{Prob} > F) = 0.00$ afirmó la significatividad del modelo, demostrando que la variable independiente, años, influye en la variación del área total del nevado Chicón.

2.2. Fundamento teórico

2.2.1. Cambio Climático

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas para el Cambio Climático, el cambio climático es la alteración del clima atribuida indirecta o directamente a la actividad antrópica, que modifica la composición de la atmósfera y se suma a la variabilidad natural del clima en períodos de tiempo comparables (17).

2.2.2. Glaciar

Conforme al tercer informe sobre Cambio Climático del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, se define el termino glaciar a cualquier cuerpo de agua en estado sólido natural, con una extensión de tiempo mínima de 10 años, con capacidad para conservar hielo y nieve superficial estacional, ya sea con o sin escombros de rocas compuestas o superficiales, y que muestre la existencia de flujos pasados o actuales, independientemente de su ubicación, geometría y tamaño (18).

Los glaciares son cuerpos de hielo gruesos que se desplazan lentamente debido a la gravedad. Representan alrededor del 10% de la superficie terrestre y acumulan alrededor del 75% del agua dulce mundial (19).

Actualmente, los glaciares abarcan casi el 10 por ciento de la superficie de la Tierra. Sin embargo, en el pasado geológico, los casquetes polares ocupaban vastas extensiones con hielo de miles de metros de grosor. Muchas regiones aún conservan las huellas de esos antiguos glaciares. El carácter distintivo de lugares tan diversos como los Alpes, Cape Cod y el Valle de Yosemite fue moldeado por las masas de hielo glacial que ahora han desaparecido. Además, regiones como Long Island, los Grandes Lagos y los fiordos de Noruega y Alaska deben su existencia a la acción de los glaciares (20).

2.2.3. La formación de los glaciares

La formación de los glaciares, conocida como glaciación, se origina a partir del proceso de transición de la nieve en hielo. Este fenómeno ocurre mediante la acumulación y apisonamiento de la nieve, lo que resulta en la pérdida de burbujas de aire y el incremento de la densidad del hielo. Este proceso transforma la textura inicial suave y esponjosa de la nieve en una textura granular y más fuerte (21).

2.2.4. Partes de un glaciar

- a. **Zona de acumulación:** Zona donde se acumula el hielo y la nieve a lo largo de lo que se considera un año hidrológico. Proporciona información crucial sobre las precipitaciones sólidas (7).
- b. **Zona de ablación:** Zona donde prevalecen los procesos de derretimiento del glaciar, acompañados del desprendimiento de masas de hielo (7).
- c. **Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA):** Es la línea teórica que separa la zona de ablación y acumulación (7).

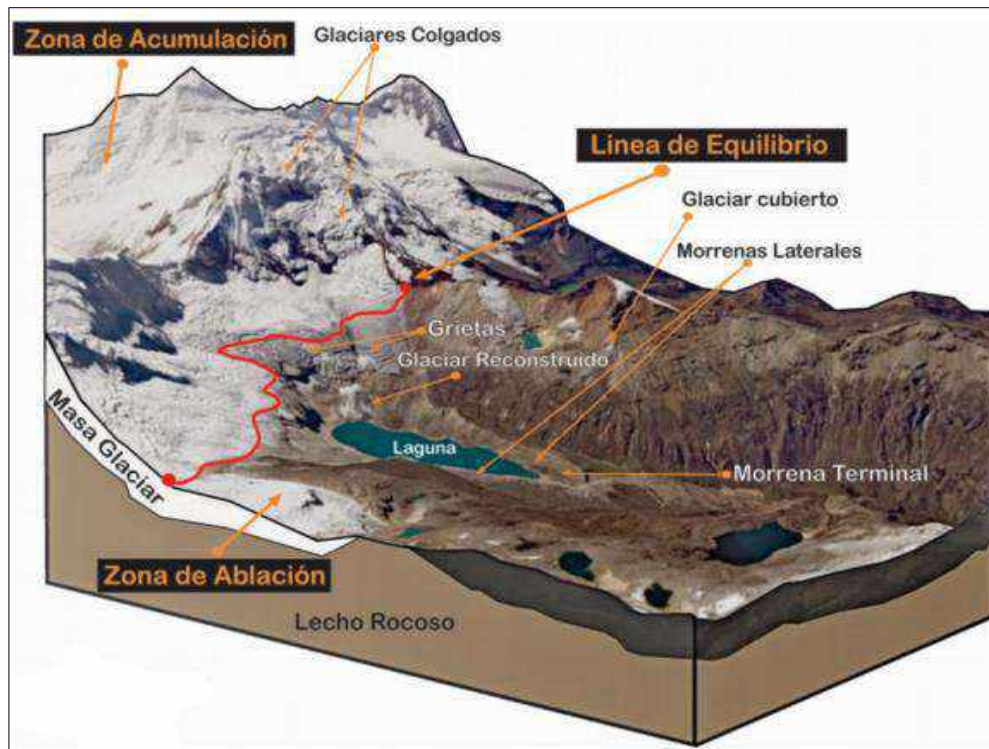


Figura 1. Partes de un glaciar. Tomado de «Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares», por INAIGEM, 2017.

En la figura Nro.1 se muestra las partes de un glaciar, como son: la zona de acumulación, la zona de ablación y la línea de equilibrio.

2.2.5. Clasificación de los glaciares

- a. **Glaciarettes:** Son pequeñas áreas de hielo que no muestran límites claros (22).



Figura 2. Glaciarrete en las laderas del Cerro Brujo, ejemplo de glaciarrete. Tomado de «Clasificación de glaciares según formas», por Laboratorio de Glaciología, 2023.

En la figura Nro. 2 se aprecia un ejemplo de glaciar de tipo glaciarete. Este se encuentra ubicado en las laderas del Cerro el Brujo, en la región del Libertador Bernardo O'Higgins, Chile (23).

- b. **Glaciar de cráter:** Los glaciares de cráter ocupan depresiones topográficas circundadas por cadenas montañosas que obstaculizan la descarga superficial del hielo acumulado, llevándolo a fluir hacia el centro de la depresión o masa a través de la ablación superficial. El calor geotérmico presente dentro de conos y cráteres facilita el crecimiento del hielo (22).



Figura 3. Glaciar en la caldera del Volcán Nevados de Sollipulli, ejemplo de glaciar de cráter. Tomado de «Clasificación de glaciares según formas», por Laboratorio de Glaciología, 2023.

En la figura Nro. 3 se aprecia un ejemplo de glaciar de tipo cráter. Este se encuentra ubicado en el nevado Sollipulli, entre las comunas de Melipeuco y Curarrehue, en la Araucanía del Sur de Chile (24).

- c. **Glaciares de montaña:** Son indicadores del cambio climático y de sus impactos. Representan manifestaciones palpables de cómo el cambio climático global afecta las elevadas montañas y, por ende, el suministro de agua para las comunidades circundantes. Estos glaciares, situados en las partes altas de las cordilleras, adoptan diversas formas y son considerados indicadores clave para los sistemas de monitoreo climático global (22).



Figura 4. Glaciar Romanche en el canal Beagle, ejemplo de glaciar de montaña. Tomado de «Clasificación de glaciares según formas», por Laboratorio de Glaciología, 2023.

En la figura Nro. 4 podemos apreciar un ejemplo de glaciar de montaña. El glaciar Romanche se ubica en la cordillera Darwin situado en el parque nacional Alberto de Agostini, en la región de Magallanes y Antártica Chilena, Chile (25).

- d. Glaciares de valle:** También llamado glaciar alpino, característico porque tiene múltiples zonas de acumulación, formando valles y permitiendo un flujo constante de hielo aguas abajo (22).



Figura 5. Glaciar Universidad, ejemplo de glaciar de valle. Tomado de «Clasificación de glaciares según formas», por Laboratorio de Glaciología, 2023.

En la figura Nro. 5 se aprecia un ejemplo de glaciar de valle; específicamente, el glaciar Universidad, ubicado en Chile, en la cordillera de los Andes, en la región de O'Higgins, a 55 km al este de San Fernando. La morrena de este glaciar da origen a un corto río afluente del río Tinguiririca (26).

- e. **Glaciares Rocosos:** Los glaciares rocosos son masas conformadas por hielo y roca. Estos glaciares, originados a partir de un glaciar expuesto, experimentan la cobertura progresiva de material rocoso o son afectados por avalanchas hasta que experimentan un cambio en su morfología, caracterizada por la predominancia de material rocoso (22).



Figura 6. Glaciar rocoso en el Valle de Navarro, ejemplo de glaciar rocoso. Tomado de «Clasificación de glaciares según formas», por Laboratorio de Glaciología, 2023.

En la figura Nro. 6 se muestra un ejemplo de glaciar rocoso en el Valle del Navarro, a una altitud de 1.864 m.s.n.m. Hay siete glaciares en esta masa de hielo que descienden hacia la ladera del Fiordo de "Agostini", entre los cuales se destaca el Glaciar "Navarro", ubicado en Chile (27).

2.2.6. Glaciares en Sudamérica

Los glaciares, en general, y especialmente aquellos ubicados en la zona ecuatorial, también conocidos como glaciares tropicales, constituyen excelentes indicadores de cambio climático y ecosistemas con una vulnerabilidad significativa. Estos glaciares representan reservas sólidas de agua dulce utilizadas para el consumo humano y actividades como la minería, agroindustria, hidroelectricidad y agropecuaria. Juegan un papel vital en el desarrollo social, económico y ambiental de los pueblos. La clara reducción y pérdida de estas reservas, a causa del acelerado retroceso glaciar y sus repercusiones, son motivo de creciente alarma en la comunidad científica mundial, estando íntimamente relacionadas con el fenómeno del Cambio Climático Global. En Sudamérica, los glaciares tropicales abarcan un área de 2758 km² aproximadamente, distribuyéndose en los siguientes porcentajes: Perú 71 %, Bolivia 20 %, Ecuador 4 %, Colombia 4 % y Venezuela 1 % (28).

2.2.7. Glaciares Tropicales

Los glaciares son masas espesas de hielo glaciario que se generan mediante el almacenamiento, compresión y recristalización de la nieve. Estas masas de hielo están formadas por cristales de hielo, nieve (0.1 g/cm³), neviza o firn (0.6 g/cm³), agua, aire y detritos de rocas que se acumulan en una masa de nieve durante muchos años. Posteriormente, se compactan y se convierten en glaciares (20).

2.2.8. Glaciares en el Perú

Los glaciares en Perú presentan tres formas distintivas que resultan de la ubicación geográfica, la naturaleza y el clima de la región. Se encuentran en la línea Ecuatorial, y el clima de la región propicia intensos procesos de deshielo, impidiendo la formación de flujos de hielo. Por esta razón, en el territorio peruano se pueden identificar las tres clasificaciones que se describen a continuación para distinguir los glaciares (7).

a. Glaciares reconstituidos: Estos glaciares carecen de una fuente de alimentación directa y se forman por el almacenamiento de bloques de hielo que, al conectarse en la parte inferior del glaciar, se fusionan para crear nuevos flujos glaciares. Un ejemplo significativo ocurre en la parte baja de la Cordillera Blanca (7).

b. Glaciares muertos: En los glaciares comúnmente cubiertos por morrenas ablativas, estos depósitos glaciares se dividen en dos capas. La primera capa consiste en piedras angulares, rocas superficiales y cantos rodados. Cuando se dejan abandonados, se les denomina hielo muerto o fósil (7).

c. Glaciares colgados: Estas son masas de nieve y hielo que se han acumulado durante muchos años y se encuentran comúnmente en la parte superior de los glaciares. Existen riesgos de colapso debido a la dinámica de los glaciares, el incremento de las temperaturas u otros factores (7).

2.2.9. Nieve

Se da origen cuando el vapor de agua, a temperaturas bajas dentro de la nube, se sublima y desciende en forma de cristales pequeños, dando origen a formaciones de copos (29).

La nieve forma parte esencial del ciclo del agua y es una parte representativa de la precipitación total en las regiones montañosas. Además, es de suma importancia en la acumulación de los glaciares y contribuye a disminuir la captación de los glaciares de la radiación emitida por el sol a causa de su elevada reflectividad (30).

2.2.10. El cambio climático y los glaciares

La reducción de la masa glaciaria se percibe como la disminución de la escorrentía de agua, lo que tendrá un impacto significativo en los ecosistemas andinos. En numerosas ciudades y

centros poblados de los Andes, los glaciares son la fuente de agua para los diversos habitantes que los rodean (31).

Uno de los principales impactos del retroceso de los glaciares es la reducción de los recursos hídricos que abastecen las cuencas hidrográficas, afectando su aprovechamiento. Asimismo, esto puede afectar el abastecimiento de recursos hídricos destinados a la agricultura, la ganadería y el consumo de agua potable. Las centrales hidroeléctricas, con impacto económico, también pueden verse afectadas. Por otro lado, el derretimiento de los glaciares representa una amenaza, ya que puede dar lugar a la formación de lagunas, provocando deslizamientos de tierra y avalanchas (32).

La fusión de los glaciares también puede impactar el turismo en el Nevado Ausangate, ya que este glaciar es frecuentemente visitado. Forma parte del Área de Conservación Regional Ausangate, establecida oficialmente mediante el DS N.º 012-2019-MINAM, del 11 de diciembre de 2019. Este lugar es atractivo tanto para turistas nacionales como extranjeros y posee un elevado valor paisajístico, biológico y de regulación hídrica. En su extensión se encuentra el macizo del mismo nombre y las áreas asociadas, contribuyendo a la disminución de la vulnerabilidad de biota y ecosistemas frágiles frente al cambio climático y asegurando los servicios ecosistémicos que impactan positivamente a la población local, regional y nacional (33).

2.2.11. Disminución de glaciares en el Perú

Los glaciares se forman por encima de la línea de nieve, y la temperatura y la precipitación son cruciales en su formación y conservación; los patrones de temperaturas y precipitaciones cambian en los Andes (19).

Los Andes peruanos albergan el mayor número de glaciares tropicales del mundo. Existen zonas con imponentes áreas glaciares ubicadas en veinte cordilleras distintas, desde la parte central del Perú hasta la frontera meridional (19).

La Calota Glaciar Quelccaya del Perú, ubicada a 13,5° de latitud sur, es la mayor calota glaciar tropical del mundo (19).



Figura 7. Glaciar Quelccaya, Departamento del Cusco. Tomado de «Atlas de glaciares y aguas andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos», por Johansen et al., 2023.

Su retroceso ha sido rápido, estas imágenes captadas por el Thematic Mapper del satélite Landsat 5 muestran la diferencia de extensión durante un periodo de 22 años, de 1988 a 2010 (19).



Figura 8. Imagen Landsat-5 del Glaciar Quelccaya, captada en el año 1988. Tomado de «Atlas de glaciares y aguas andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos», por Johansen et al., 2023.

Nota: La figura Nro. 8 es una imagen satelital brindada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, captada el 3 de setiembre de 1988, aquí podemos apreciar el área glaciario en coloración azul claro.



Figura 9. Imagen Landsat-5 del Glaciar Quelccaya, captada en el año 2010. Tomado de «Atlas de glaciares y aguas andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos», por Johansen et al., 2023.

Nota: La figura Nro. 9 es una imagen satelital brindada por el Servicio Geológico de los Estados Unidos, captada el 16 de setiembre de 2010, aquí podemos apreciar el área glaciario en coloración azul claro.

Los estudios sobre el Nivel de Congelación o FSH indican que ha experimentado un aumento en las últimas décadas. El balance de masa de los glaciares tropicales en Perú es altamente sensible a un incremento en el FSH, principalmente debido a una reducción en la acumulación y al aumento de la energía para la ablación causada por la disminución del albedo. El conocimiento de los cambios futuros en el FSH es crucial para estimar las modificaciones en la extensión de los glaciares. Dado que los datos in situ son escasos en las altitudes donde se encuentran los glaciares (por encima de ~4800 metros sobre el nivel del mar (m.s.n.m.)), es necesario derivar estimaciones confiables del FSH a partir de diversos tipos de datos. Bajo el escenario más pesimista, los glaciares solo podrían persistir en las cumbres más elevadas, por encima de aproximadamente 5800 m.s.n.m. (34).

2.2.12. Teledetección

Técnica que permite conseguir información a través de imágenes de la superficie del planeta sin necesidad de un contacto in situ. Para que esto sea posible, es necesario que, aunque sin contacto físico, haya algún tipo de interacción entre los objetos observados, ya sea en la

superficie terrestre, marina o en la atmósfera, y un sensor situado en una plataforma (satélite, avión, etc.). De esta manera, podemos generar mapas (35).

La cubierta de hielo y los glaciares pueden ser monitoreados mediante imágenes satelitales de lentes múltiples, lo que proporciona un enfoque práctico para observar la diversidad de glaciares y nieve en las cadenas montañosas (36).

El mapeo de zonas glaciares es de vital importancia para determinar con precisión las reservas de agua dulce, además de ofrecer un indicador del cambio climático (37).

Google Earth Engine (GEE) es una plataforma que brinda una amplia variedad de datos satelitales y permite a los usuarios visualizar y analizar datos a través de un sistema basado en la web. Además, es una poderosa herramienta para el procesamiento y análisis geoespacial, no solo por su eficiencia computacional, sino también debido a la creciente disponibilidad de muchos recursos de código abierto y conjuntos de datos geoespaciales. Se utiliza ampliamente para cartografiar glaciares y cuerpos de agua, así como para detectar incendios forestales, entre otras aplicaciones. Con el fin de explorar la relación entre la capa de nieve y los cambios en el área glacial, realizamos este estudio utilizando Google Earth Engine (38).

2.2.13. Componentes de un sistema de teledetección

El sistema de teledetección está compuesto por los siguientes componentes: fuente de energía, plataformas, sensores, procesamiento e institucionalización (39).

A continuación, se describe cada uno de los componentes:

- **Fuente de energía:** Sol, irradiancia de los materiales de la Tierra que se utiliza en teledetección pasiva; RADAR, irradiancia generada artificialmente fuentes de energía, que se utiliza en la teledetección activa.
- **Plataformas:** El vehículo que lleva un sensor, es decir, globo, avión, transbordador espacial, satélite, estación espacial internacional, etc.
- **Sensores:** Dispositivo que recibe radiación electromagnética y la convierte en una señal que puede ser registrada y mostrada como datos numéricos o una imagen (cámara, escáner, radar, etc.).
- **Procesamiento:** Manejo de datos de señal teledetectados, es decir, fotográficos, digital, etc.
- **Institucionalización:** Organización para la ejecución en todas las etapas tecnología de teledetección para conectar el espacio con la aldea.

2.2.14. Sensores

Son los aparatos que perciben radiación electromagnética y la transforman en data que es almacenada y transformada a representaciones numéricas, datos o una imagen (cámara, escáner, radar, etc.) (39).

Estos se dividen en los siguientes en los siguientes tipos (40).

- **Sensores pasivos:** Aquellos sensores que captan señales que emiten los objetos de detección, luego las reflejan de forma natural. Estas señales son producidas por la radiación del sol y pueden suministrar información aceptable de los objetos detectados. Dentro de este tipo de sensores, podemos mencionar: ASTER, LandSat, MODIS, SENTINEL.
- **Sensores activos:** Son aquellos sensores donde el sensor radia a los objetos de estudio una radiación en la cual estos revelan información del objeto detectado y estas son valoradas por el sensor activo. Podemos mencionar los siguientes sensores: Radar, Sonar y Lidar.

2.2.15. Resolución de los sensores remotos

Los sensores remotos cuentan con diversas resoluciones: espacial, espectral, radiométrica, angular y temporal (40). A continuación, se detalla cada una:

- **Resolución espacial:** Es la longitud que corresponde a la unidad mínima de información incluida en la imagen (píxel). A menor tamaño del píxel, mayor será la resolución espacial, lo que conllevará que el sensor alcanzara más detalles de los objetos (40).

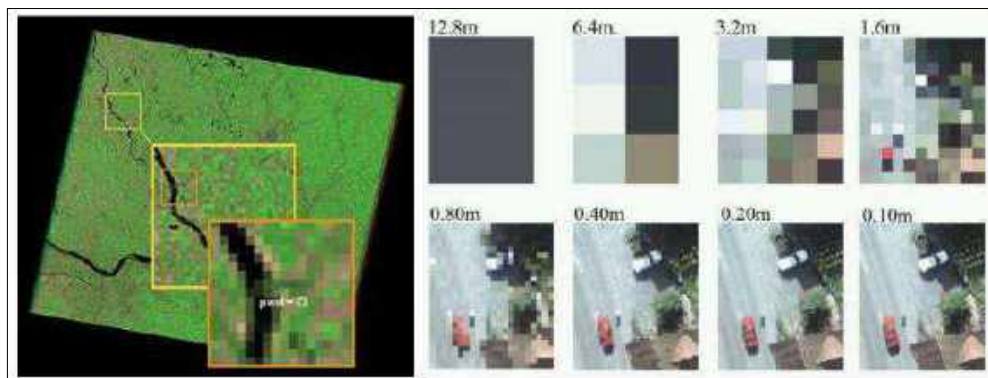


Figura 10. Resolución espacial – Parangonado de tamaño de píxel de una imagen. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2023.

Tabla 2. Escala del mapa mediante la resolución espacial (m)

Resolución espacial (metros)	Escala
1000	1: 1.500,000
30	1: 80,000
20	1: 50000

10	1: 25,000
5	1: 12000
1	1.430555556

Nota: Tomado de Bravo, 2023.

- **Resolución espectral:** Indica el número y la anchura de las bandas espectrales que puede discriminar el sensor. A mayor resolución espectral, se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura en diferentes bandas espectrales (40).

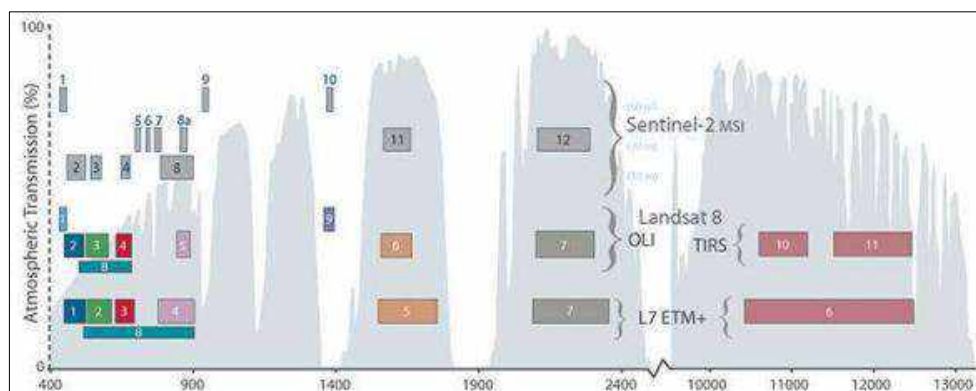


Figura 11. Comparación de bandas SENTINEL 2, LANDSAT 7 y 8. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2023.

- **Resolución radiométrica:** Se mide en bits (dígitos binarios) y representa la gama de valores de brillo disponibles, que en la imagen corresponden al alcance máximo de DN (Digital Numbers). Por ejemplo, una imagen con una resolución de 8 bits tiene 256 niveles de brillo (41).

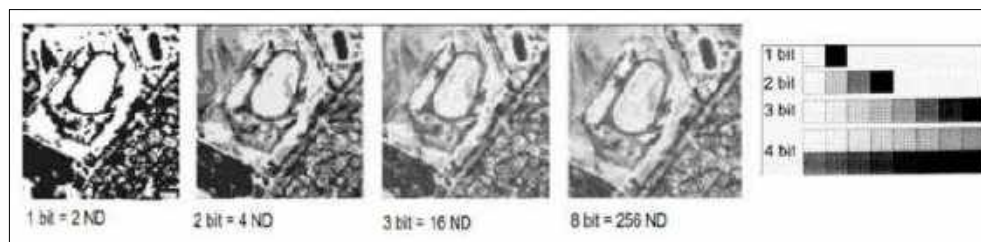


Figura 12. Resolución radiométrica: comparación en los niveles de grises o niveles digital. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2023.

Cada píxel en una imagen puede asumir una cantidad específica de valores, dependiendo de su resolución radiométrica. Por ejemplo, una imagen de 8 bits puede variar entre 0 y 255 tonalidades de gris (40).

$$2^{(\text{número de bits})} = \text{Niveles de Gris}$$

Figura 13. La fórmula para determinar niveles de gris. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2023.

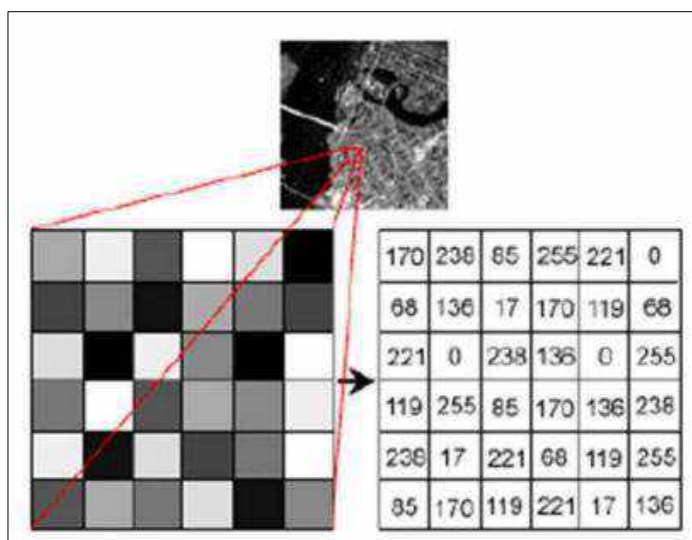


Figura 14. Codificación de los ND de una imagen Landsat 8bits. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2023.

- **Resolución temporal:** Se refiere a la periodicidad con la que el sensor adquiere imágenes de la misma porción de la superficie terrestre. El ciclo de cobertura está vinculado a las características orbitales de la plataforma (altura, velocidad, inclinación) y al diseño del sensor (40).

Tabla 3. Descripción de los tipos de Resolución Temporal

Tipo	Periodicidad
Alta resolución temporal	< 1 día - 3 días
Media resolución temporal	4 días - 16 días
Baja resolución temporal	> 16 días

Nota: En la tabla Nro. 1 se observa la resolución temporal según la periodicidad del sensor. Tomado de Bravo, 2023.

Para los sensores de satélites, también existe la resolución temporal, que representa el tiempo necesario para volver a visitar la misma zona de la Tierra (42).

- **Resolución angular:** Es la capacidad del sensor para realizar observaciones de la misma área desde diferentes ángulos de visión, lo que implica observar la superficie desde distintas direcciones. Además, las observaciones multiangulares son de gran interés para estimar algunas propiedades atmosféricas (40).

2.2.16. Clasificación digital

La clasificación numérica en teledetección se refiere a la asignación de píxeles a clases diferentes según el valor de su ND (Número Digital), permitiendo su interpretación. El resultado de esta clasificación es una nueva imagen en la que cada uno de los píxeles originales se asigna a un número específico de clase (43).

Los valores pueden representar diversos tipos de cobertura en el área de estudio o intervalos del mismo tipo. Las categorías no se identifican con un único número, sino con una serie de números que suelen estar muy cercanos. Las capas resultantes son regiones en un mapa o imagen que aparecen como un mosaico de celdas homogéneas, cada una distinguida por un color diferente para cada una (16).

La clasificación digital se da por dos tipos de clasificación, los cuales son:

- **Clasificación supervisada:** Un intérprete completo guía la clasificación mediante la identificación de áreas de estudio previamente reconocidas en el campo y que pertenecen a sus respectivas categorías. Es decir, la clasificación supervisada incluye la asignación de capas de cobertura con conocimiento previo de topografía (16).

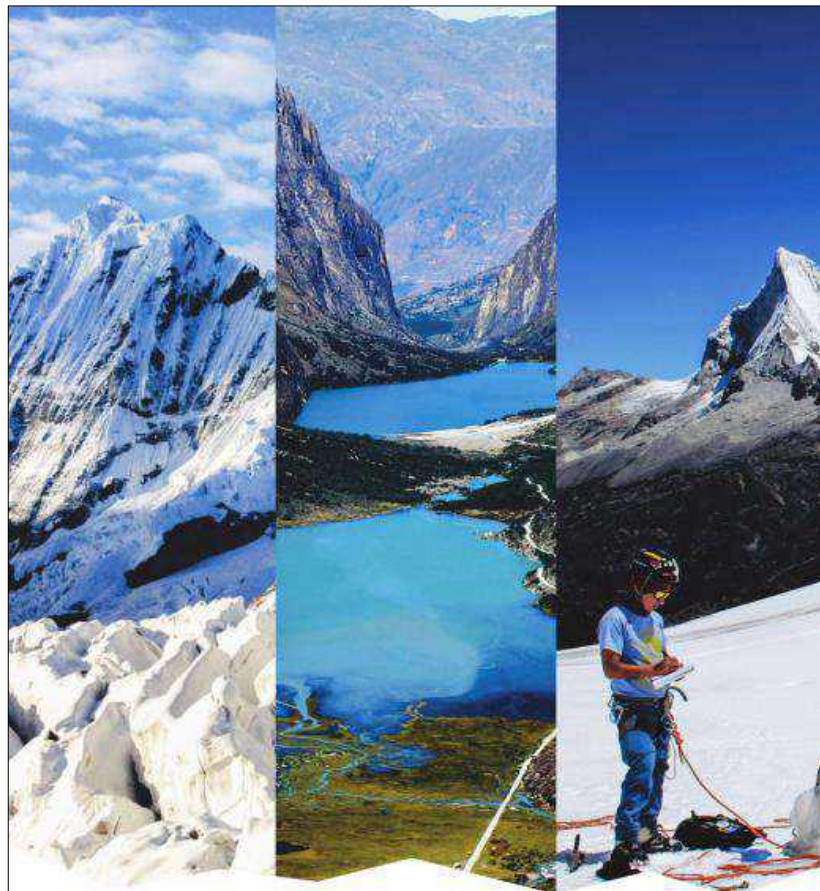


Figura 15. Ejemplo de clasificación supervisada. Tomado de «Inventario Nacional de Glaciares las Cordilleras Glaciares del Perú 2018», por INAIGEM, 2018.

- **Clasificación no supervisada:** Consiste en identificar conjuntos de píxeles mediante el uso de información espectral del sensor de cada banda. Este proceso es llevado a cabo por un clasificador en una serie de pasos, y se pueden obtener varios tipos de clasificadores que varían según las instrucciones del intérprete (16).

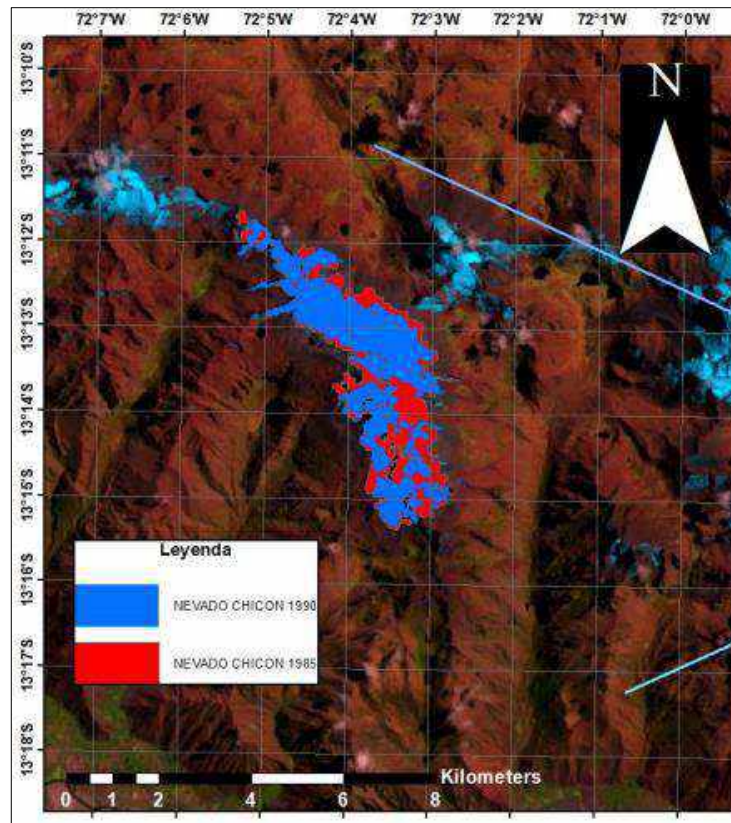


Figura 16. Ejemplo de clasificación no supervisada. Tomado de «Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre los años 1985-2021, Cusco», por Aedo y Quispe, 2022.

Nota: La presente figura Nro. 17 hace referencia al mapa del retroceso glaciar del Nevado Chicón entre los años 1990 y 1995.

2.2.17. Tipos de imágenes de teledetección

- **Imágenes multiespectrales:** Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada píxel, tantos como bandas espectrales sea capaz de detectar el sensor. A priori, es el tipo de producto más útil ya que nos proporciona, en cierto modo, la firma espectral de los distintos elementos presentes en la imagen. Es captada mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas (40).

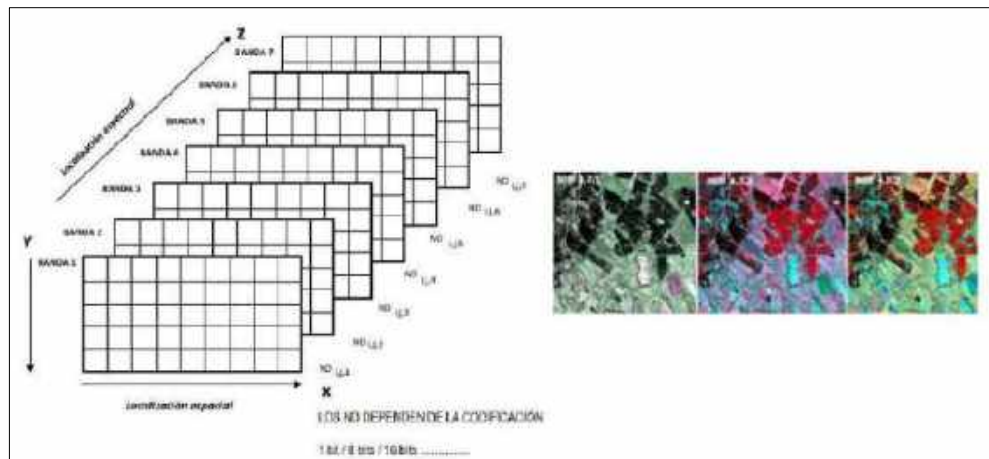


Figura 17. Ejemplo de imagen multispectral. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2017.

- Imagen pancromática:** Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo, obteniendo como resultado una imagen que habitualmente se representa en una escala de grises (imagen en blanco y negro). Como contrapartida, tienen la ventaja de poseer mayor resolución espacial que las multispectrales que proporciona el mismo satélite. Es por ello que son muy interesantes para la detección de pequeños elementos de la superficie terrestre que no son distinguibles en la imagen multispectral (40).

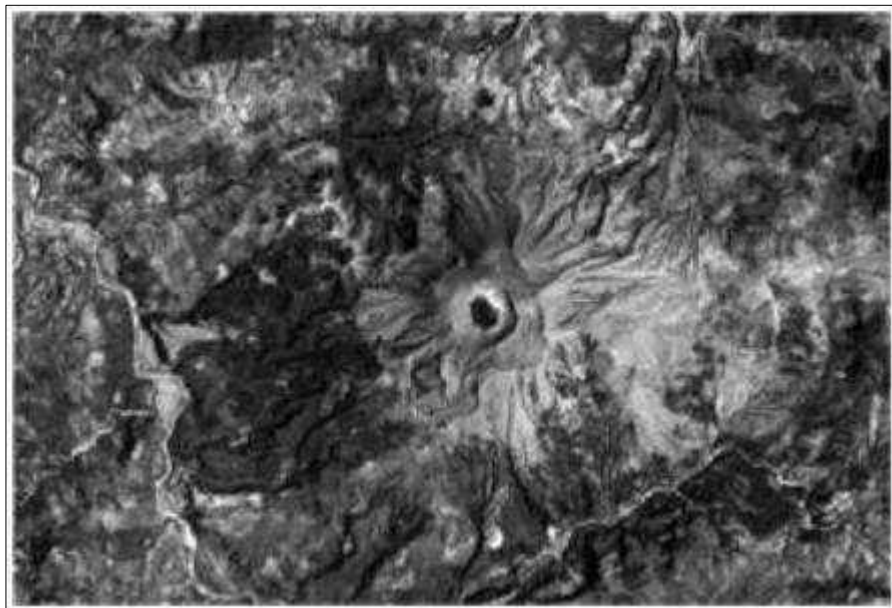


Figura 18. Ejemplo de imagen pancromática. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2017.

- Imagen fusionada:** Este tipo de imagen se obtiene mediante la fusión de una imagen multispectral con una pancromática. Las siglas PS provienen de "pan-sharpened", su denominación en inglés. Básicamente, consiste en asignar a cada píxel de la

imagen pancromática los valores procedentes de un algoritmo que combina la imagen pancromática con la multiespectral (40).



Figura 19. Ejemplo de imagen fusionada. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2017.

- **Imagen estéreo:** En realidad, se refiere a dos imágenes de una misma zona tomadas con ángulos de visión distintos. Muchos satélites tienen la capacidad de reorientar el sensor, lo que les permite tomar, en una o en sucesivas pasadas, este tipo de imágenes (40).

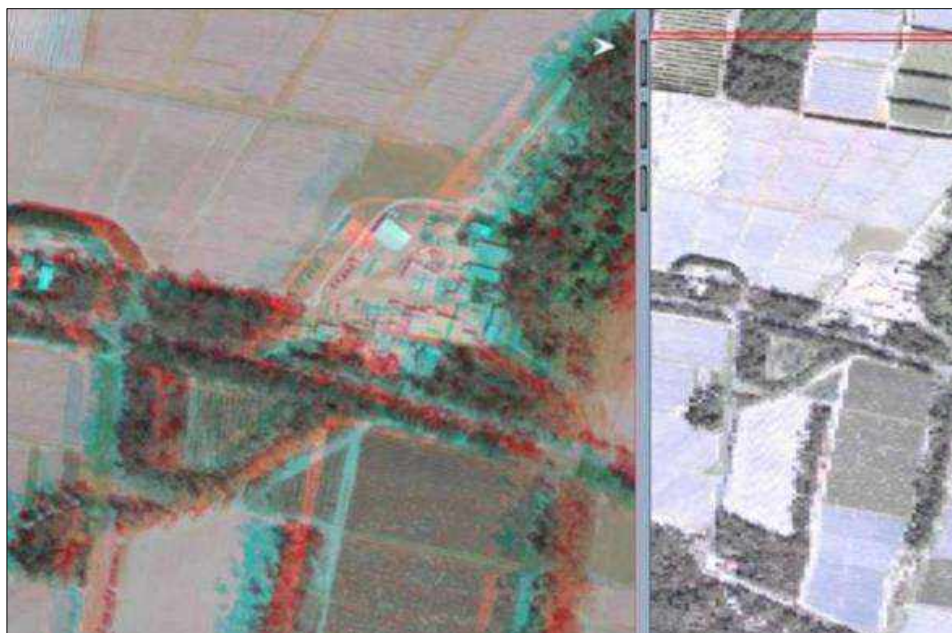


Figura 20. Ejemplo de imagen estéreo. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2017.

2.2.18. Bandas Espectrales

En astronomía, una banda espectral designa una parte del espectro electromagnético que permite el paso de un filtro estándar. Esta está determinada por su perfil de transmisión, es decir, la fracción de intensidad luminosa que se transmite a través de una longitud de onda

específica. Un conjunto de filtros de bandas espectrales diferentes, que generalmente abarcan la parte visible del espectro electromagnético, se conoce como sistema fotométrico (44).

Tabla 4. *Bandas espectrales del satélite Landsat 4 y 5.*

	Banda	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Landsat 4-5 Thematic Mapper (TM)	1 - Azul	0.45 - 0.52	30
	2 - Verde	0.52 - 0.60	30
	3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
	4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.76 - 0.90	30
	5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.55 - 1.75	30
	6 - Thermal	10.40 - 12.50	120 *(30)
	7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	2.08 - 2.35	30

Nota: En la figura Nro. 22, (*) Band TM 6 fue adquirida a una resolución de 120 metros, pero el producto se vuelve a muestrear a los píxeles de 30 metros. Tomado de Bravo, 2017.

Tabla 5. *Bandas espectrales del satélite Landsat 7.*

	Banda	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +)	1 - Azul	0.45-0.52	30
	2 - Verde	0.52 - 0.60	30
	3 - Rojo	0.63 - 0.69	30
	4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.77-0.90	30
	5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.55 - 1.75	30
	6 - Thermal	10.40 - 12.50	60 *(30)
	7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	2.09 - 2.35	30
	8 - Pancromática	0.52 - 0.90	15

Nota: En la figura Nro. 23 (*) ETM + Band 6 se adquiere a una resolución de 60 metros, pero el producto se vuelve a muestrear a los píxeles de 30 metros. Tomado de Bravo, 2017.

Tabla 6. *Bandas espectrales del satélite Landsat 8.*

	Banda	Longitud de onda (micrómetros)	Resolución (metros)
Landsat 8 Operativa Imager Tierra (011) y térmica infrarroja del sensor (SITR)	1 - Ultra azul (costero / aerosol)	0.43-0.45	30
	2 - Azul	0.45-0.51	30
	3 - Verde	0.53-0.59	30
	4 -Rojo	0.64-0.67	30
	5 - Infrarrojo Cercano (NIR)	0.85-0.88	30
	6 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	1.57-1.65	30
	7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	02.11 - 02.29	30
	8 - Pancromática	0.50-0.68	15

9 - Cirrus	1.36 - 1.38	30
10 -infrarrojo térmico (SITR) 1	10.60 - 11.19	100 * (30)
11 -infrarrojo térmico (SITR) 2	11.50 - 12.51	100 * (30)

Nota: En la figura Nro. 24 (*) Bandas TIRS se adquieren a una resolución de 100 metros, pero se vuelven a muestrear a 30 metros de producto entregado datos. Tomado de Bravo, 2017.

2.2.19. Misión LandSat

El programa Landsat es una serie de misiones de observación de la Tierra por satélite administrado conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de EE. UU. En 1972, el lanzamiento de ERTS-1 (Earth Resources Technology Satellite, más tarde renombrado Landsat 1) marcó el inicio de la era de una serie de satélites que han adquirido de manera continua datos de tierras mediante la detección remota basada en el espacio. El último satélite de la serie Landsat, la Misión de Continuidad de Datos de Landsat (LDCM), se puso en marcha el 11 de febrero de 2013. Ahora renombrado Landsat 8, los datos adquiridos por el satélite continúan expandiendo el archivo para los usuarios en todo el mundo (40).

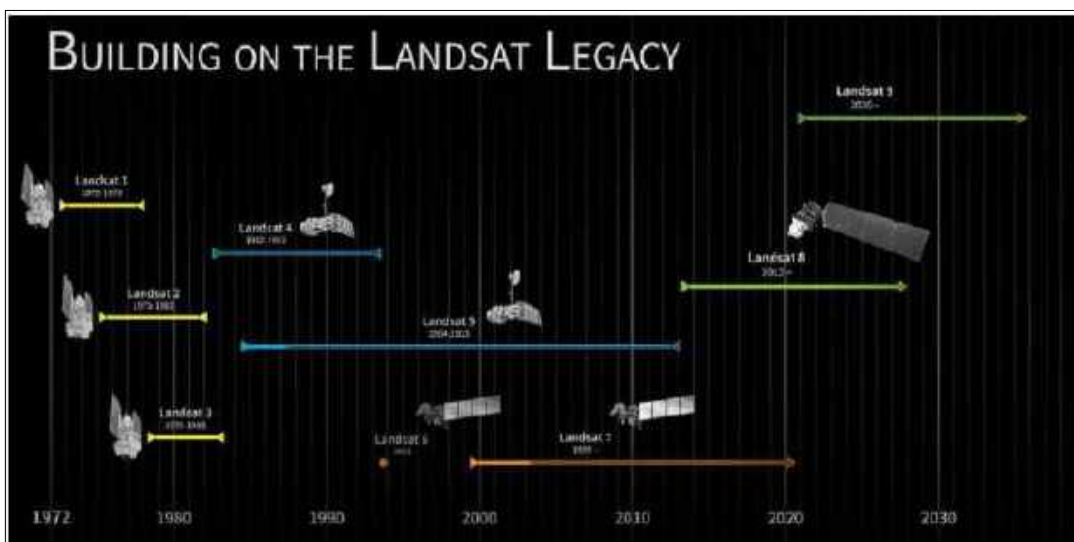


Figura 21. Bandas espectrales del satélite LandSat 8. Tomado de «Teledetección espacial», por Bravo, 2017.

2.2.20. Identificación de los productos

Los productos LANDSAT se nombran a través de la convención adoptada por la NASA(40).

Código: LXSPPPRRRYYYYDDDDGGGVV

Ejemplo: LC80070662014250LGN00

Donde:

- **L:** Nombre de la misión (L: Landsat)
- **X:** Tipo de sensor: (C: Sensor OLI y TIRS; T: Sensor TM; E: sensor ETM+; M: Sensor MSS)
- **S:** Número de misión LandSat (8, 7 o 5).

- **PPP:** Path referencia global WRS-2 (007).
- **RRR:** Row referencia global WRS-2 (066).
- **YYY:** Año de adquisición de la imagen (2014).
- **DDD:** Día juliano de adquisición (250)
- **GGG:** ID de la estación terrena (LGN).
- **VV:** Número de versión archivo (00)

2.2.21. Índice Diferencial Normalizado de Nieve

El NDSI o Índice Diferencial Normalizado de Nieve se utiliza para definir la presencia de nieve o hielo. Es la relación estándar entre la diferencia en la reflectancia en las bandas únicas y la diferencia espectral para identificar la nieve entre el resto de características de la imagen, incluidas las nubes (45).

Un método para medir el área de nieve es utilizar el Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI), capaz de distinguir efectivamente nieve y hielo de otras características de la superficie, incluida la discriminación de nieve y glaciares de nubes y sombras. La nieve y el hielo tienen una alta reflectividad en los rangos visibles y una baja reflectividad en el infrarrojo cercano, razón por la cual los umbrales NDSI se utilizan ampliamente para el mapeo de la capa de nieve (36).

Se emplean técnicas de Índices Espectrales en imágenes satelitales del sensor Landsat 8 OLI TIRS, un método que compara la información espectral de una banda con otra para la distinción de la cobertura de nieve entre otras coberturas (8).

2.2.22. Cálculo del NDSI

El cálculo del NDSI depende del satélite del cual se emplea la imagen. Por ejemplo, podemos mencionar (16).

Tabla 7. *Formulas del NDSI según Misión LandSat*

Satélite	Fórmula NDSI
LandSat 4	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
LandSat 5	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
LandSat 7	$(B2 - B5) / (B2 + B5)$
LandSat 8	$(B3 - B6) / (B3 + B6)$

Nota: Tomado de Aedo y Quispe, 2022.

2.3. Ubicación geográfica

Ausangate (en quechua: Awsanqati)

) es la montaña más alta del Departamento del Cuzco y la quinta más alta del Perú, con una altitud máxima de 6,385 m.s.n.m. Se encuentra en la Provincia de Canchis, Región Cusco, aproximadamente a 100 kilómetros al sureste de la ciudad del Cusco. Situada en la cordillera de los Andes, en un tramo conocido como cordillera de Vilcanota, perteneciente a la región Cusco en el Perú, Ausangate posee lagunas de gran tamaño con un color verde/azul luminoso.



Figura 22. Nevado Ausangate. Tomado de «Cusco: nueva Área de Conservación Regional Ausangate ayudará a conservar glaciares», por SERNANP, 2019.



Figura 23. Ecosistema de glaciares y pajonales andinos del Área de Conservación Regional Ausangate. Tomado de «Cusco: nueva Área de Conservación Regional Ausangate ayudará a conservar glaciares», por SERNANP, 2019.

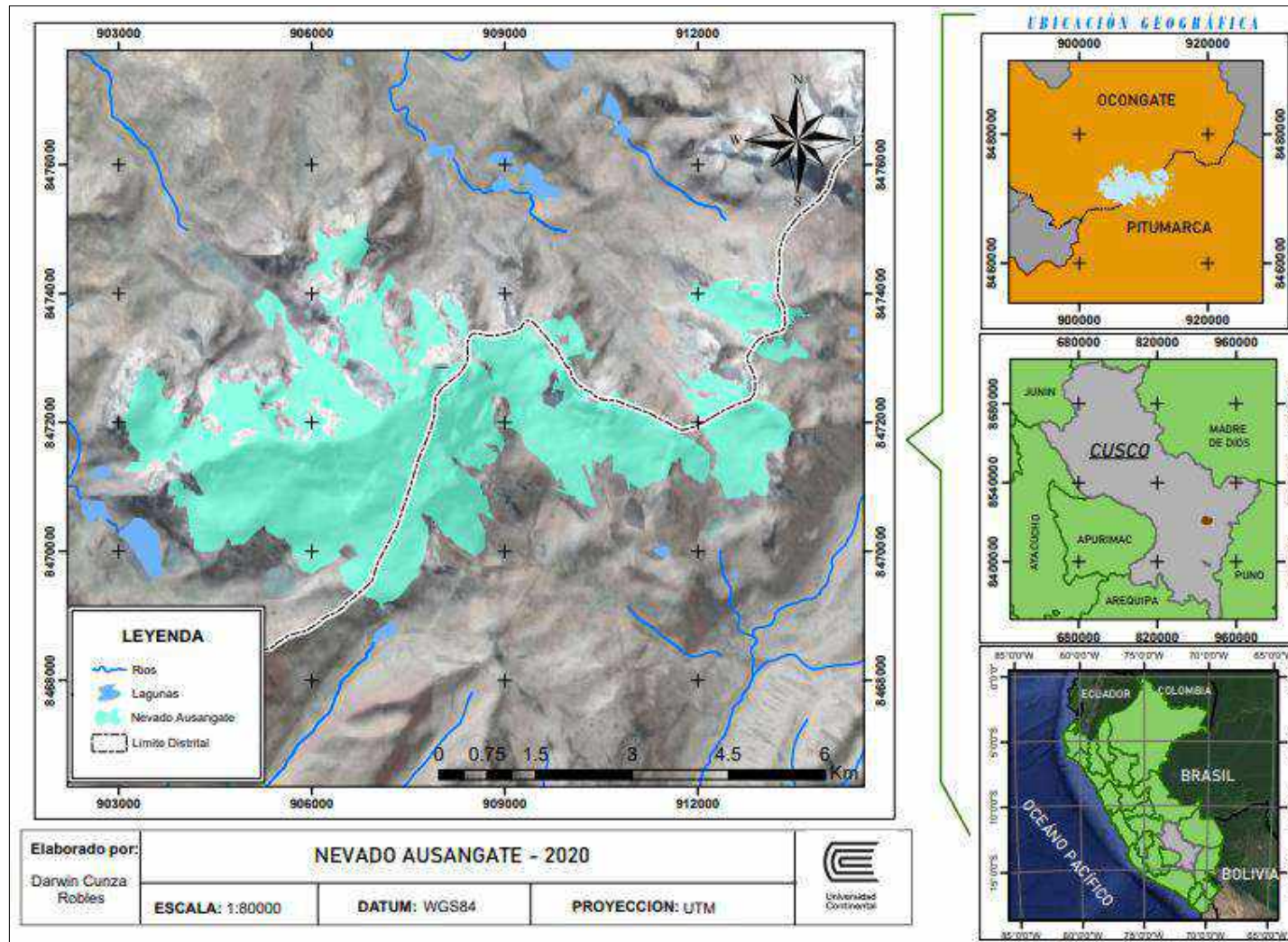


Figura 24. Mapa de Ubicación Geográfica del Nevado Ausangate

Nota: La figura Nro. 29 muestra la macro y micro localización del Nevado Ausangate, ubicado en el Distrito de Ocongate y Pitumarca en el Departamento del Cusco.

2.4. Términos básicos

- **Albedo**

Indica el nivel de radiación reflejada desde la superficie. El albedo es 1 si se refleja toda la radiación y 0 si se refleja ninguna. En la parte superior de la nieve, el albedo suele estar entre 0,8 (hielo cubierto de nieve fresca) y 0,4 (hielo no cubierto de escombros) (47).

- **Cambio Climático**

Según la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, se entiende que el cambio climático está directa o indirectamente relacionado con la actividad humana que cambia y contribuye al cambio climático global (48).

- **Desglaciación**

Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña (7).

- **FLH**

La altura del nivel de congelación o FLH, también llamada altura de congelación o isoterma de 0°C de aire libre, se define como el nivel más bajo en la atmósfera libre donde la temperatura es de 0°C (49).

- **Nieve**

Es un meteoro de notable interés para cultivos y bosques. La blanca cubierta sobre los suelos cambia el aspecto del paisaje. El vapor de agua, a baja temperatura dentro de la nube, se sublima y cae en forma de cristalitos, formando copos. Las nevadas alcanzan mayor persistencia en la umbría de zonas montañosas (1,200 m de altura) y son muy escasas en zonas del litoral mediterráneo (solo cuando hay "olas de frío" de carácter polar o ártico) (29).

- **Glaciar**

Según el tercer informe de Cambio Climático del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático, un glaciar es todo cuerpo de agua en estado sólido natural, con una duración mínima de diez años, con potencial para la nieve y la nieve superficial estacional, con o sin escombros de rocas superficiales o compuestas y que muestren evidencia de flujos pasados o actuales, independientemente de su ubicación, tamaño y geometría (18).

- **Teledetección**

Es una técnica para obtener información sobre un objeto, área terrestre, fenómeno o proceso ecosistémico adquirido por un dispositivo sin que este esté en contacto con el objeto (50).

- **Sistemas de Información Geográfica SIG**

Es un conjunto de herramientas compuesto por hardware, software, datos y usuarios que permite capturar, almacenar, administrar y analizar información digital, así como realizar gráficos y mapas, y representar datos alfanuméricos (51).

- **Servicio Geológico de Estados Unidos USGS**

El Servicio Geológico de Estados Unidos es una agencia de investigación independiente que recopila, estudia, analiza y provee información científica sobre las condiciones, asuntos y problemas concernientes a los recursos naturales, tales como el agua, los minerales, el carbón, el petróleo y el gas (52).

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA

3.1. Método y alcance de la investigación

3.1.1. Método de investigación

El método general fue el método científico bajo un enfoque de investigación cuantitativo (53).

3.1.2. Nivel de investigación

El nivel de investigación fue descriptivo, puesto que permite describir el retroceso glaciar del nevado Ausangate entre los años 1985 – 2020.

3.1.3. Diseño de la investigación

La investigación tuvo un diseño no experimental. Este tipo de investigaciones se centra en medir el comportamiento de las variables en un periodo de tiempo determinado, específicamente observar la dinámica de comportamiento del nevado Ausangate durante los periodos de 1985 a 2020 (54).

3.2. Población y muestra

3.2.1. Población

La población estuvo constituida por imágenes satelitales de las misiones Landsat 4, 5, 7 y 8 del nevado Ausangate, ubicado en la provincia de Quispicanchi, región Cusco (55).

3.2.2. Muestra

La muestra de la presente investigación estuvo compuesta por 35 imágenes satelitales de las misiones LandSat 4, 5, 7 y 8 del nevado Ausangate, situado en la provincia de Quispicanchi, región Cusco. Estas imágenes corresponden al periodo de 1985 a 2020, seleccionándose una imagen representativa para cada año. Las imágenes fueron capturadas durante los meses de mayo a agosto.

3.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

3.3.1. Técnicas de recolección de datos

La técnica de recolección de datos empleada fue la observación directa. Esto significa que a través de la percepción visual de las imágenes satelitales se tomó en cuenta para determinar la regresión glaciar y probar las hipótesis planteadas en el estudio (16). La técnica de recolección de datos empleada fue la observación directa. Esto significa que a través de la percepción visual de las imágenes satelitales se tomó en cuenta para determinar la regresión glaciar y probar las hipótesis planteadas en el estudio.

Zona de estudio

El Nevado Ausangate (en quechua: Awsanqati) es la montaña más alta del departamento del Cusco y la quinta más alta del Perú, con una altitud máxima de 6,385 m.s.n.m. Está ubicada en la provincia de Canchis, región Cusco, aproximadamente a 100 kilómetros al sureste de la ciudad del Cusco. El área de estudio se delimita mediante las siguientes coordenadas:

Tabla 8. *Coordenadas de la zona de estudio*

Puntos	Coordenada UTM	
	Este	Norte
1	248857	8473941
2	254915	8466291
3	267602	8474083
4	260499	8481637

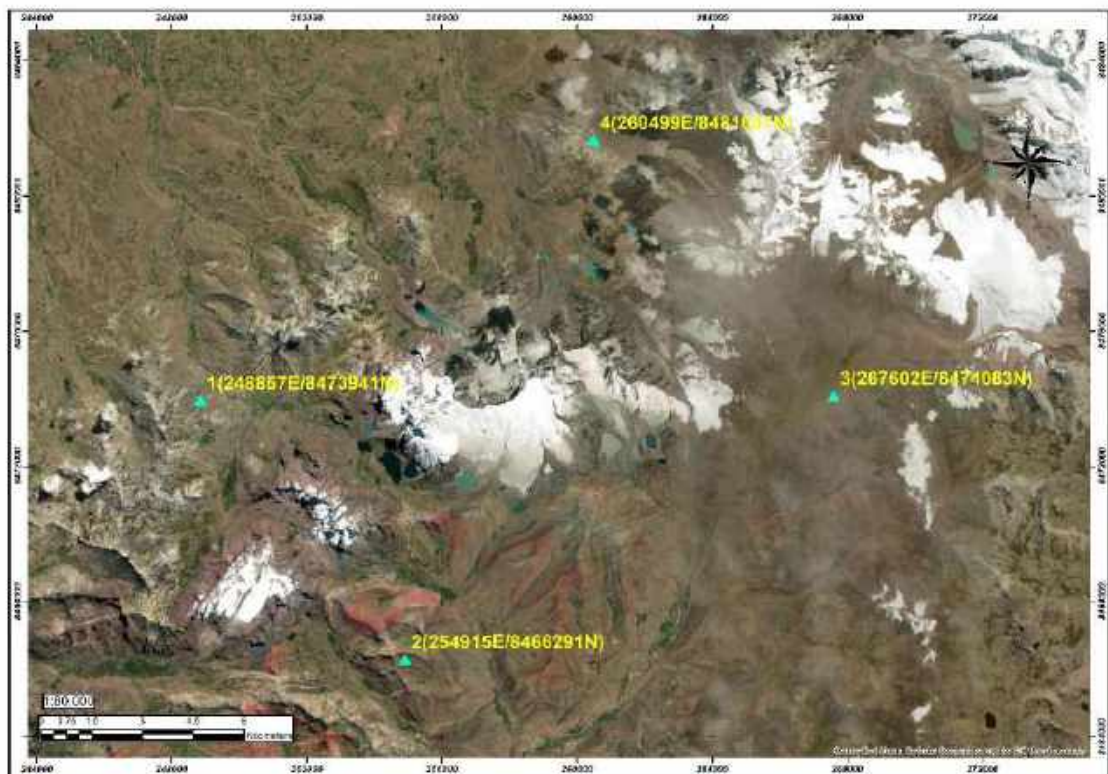


Figura 25. Puntos de las coordenadas UTM de la zona de estudio

Materiales

- Papel Bond
- Lapiceros
- Cuaderno de apuntes
- Corrector
- Resaltador

Equipo

- Laptop HP
- Impresora HP LaserJet P1006
- Escáner Epson Stylus TX210

Procedimiento

OE1: Cuantificar la pérdida del área glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

Delimitar la zona de estudio

En esta etapa, se utilizó el software Google Earth Pro, donde se ubicó el área de estudio y se procedió a delimitar dicha área basándose en 4 puntos de coordenadas geográficas.



Figura 26. Búsqueda del área de estudio en el programa Google Earth Pro

Luego, se delimitó el área de estudio mediante el siguiente procedimiento:

Procedimiento: Se presionó "Añadir" >> "Polígono" >> Se asignó un nombre >> Se ubicaron los puntos para delimitar el área >> Se presionó "Aceptar".

Como se puede observar en la siguiente figura:

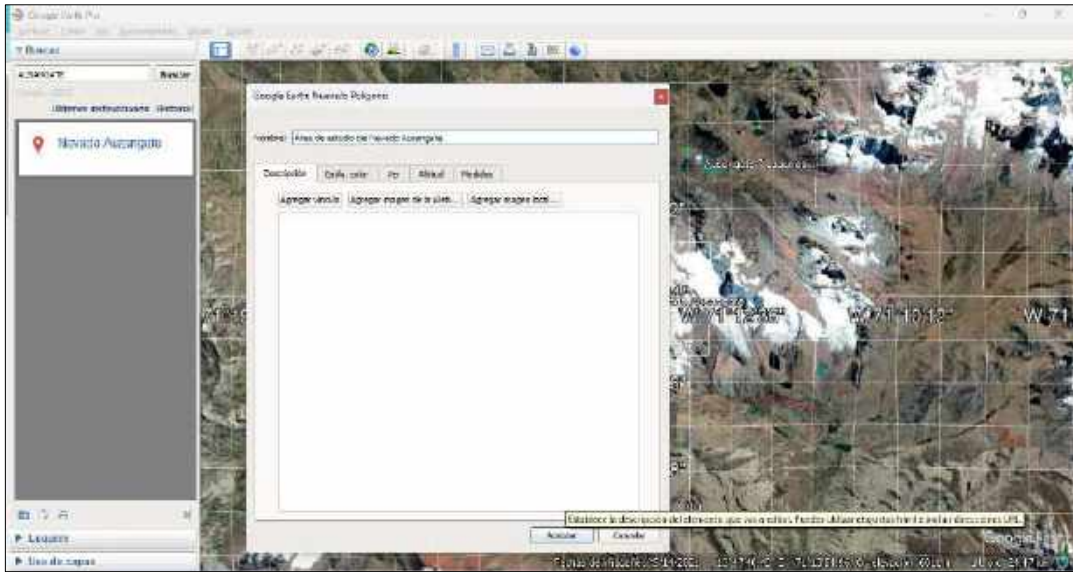


Figura 27. Proceso para la delimitación del área de estudio en el programa Google Earth Pro
Luego, se puede observar en la siguiente figura el área ya delimitada por estos cuatro puntos:

Tabla 9. Coordenadas UTM del área de estudio del nevado Ausangate

Punto	Coordenada UTM	
	Este	Norte
1	248857	8473941
2	254915	8466291
3	267602	8474083
4	260499	8481637



Figura 28. Área de estudio delimita en el programa Google Earth Pro

Luego, se procedió a guardar; para ello, se realizó un clic derecho en el polígono y se seleccionó "Guardar archivo", eligiendo el tipo de archivo "KMZ". Posteriormente, se presionó "Guardar".

Se puede observar el procedimiento en la siguiente figura:

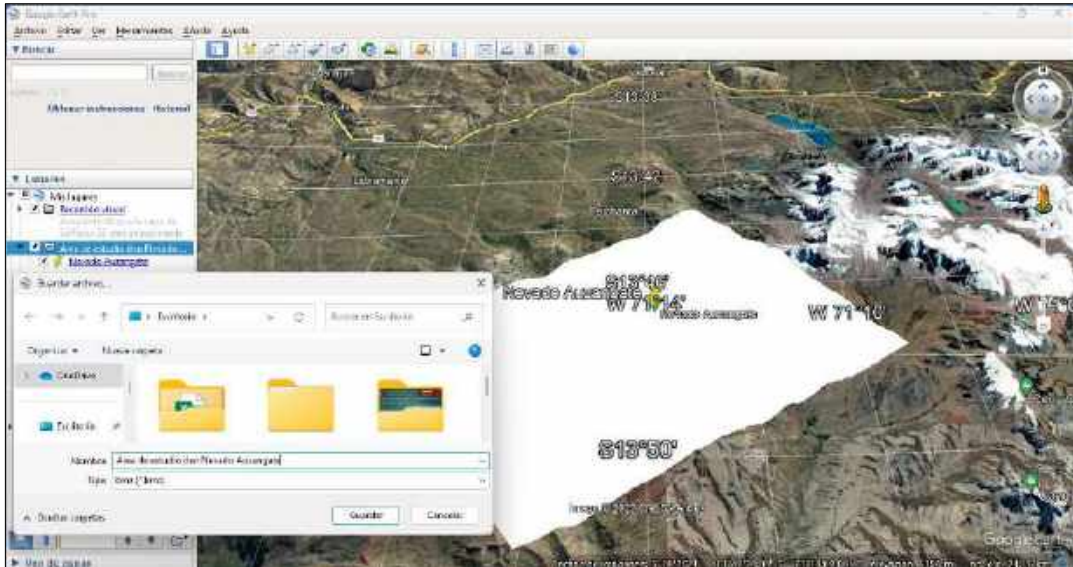


Figura 29. Delimitación del área de estudio en formato KMZ. en el programa Google Earth Pro

Descarga de Imágenes Satelitales

Se recomendó la descarga de imágenes satelitales desde la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS por sus siglas en inglés, United States Geological Survey) (16).

En dicha página, se ofrecieron diversas opciones. Se inició delimitando el área de estudio y seleccionando una fecha específica. Para mayor precisión, se redujo la cobertura de nubes al 50%, garantizando así que el área de estudio estuviera libre de nubes para facilitar un análisis efectivo.

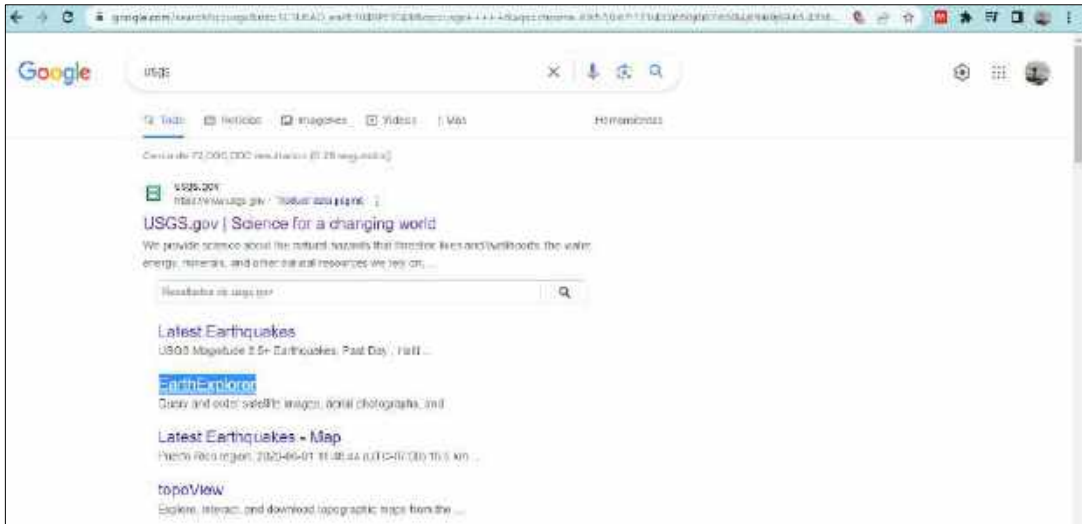


Figura 30. Ingresando en el buscador a la página de la USGS

Después de registrarse en la página de la USGS, se pudo observar que se tenía acceso libre para descargar imágenes satelitales, como se muestra en la siguiente figura:



Figura 31. Tomado de «EarthExplorer», por Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS, 2023.

Nota: La figura Nro. 36 muestra la página del USGS nos permite descargar imágenes satelitales de manera gratuita y libre, el único requisito es registrarse previamente y mencionar en que se empleara dicha información.

Posteriormente, se cargó en la plataforma de la USGS la zona de estudio (Área de estudio del Nevado Ausangate. KMZ) obtenida del programa Google Earth Pro.

Procedimiento: Se presionó “Search Criteria” >> “KML/Shapefile Upload” >> “Select File” >> Se seleccionó “Área de estudio del Nevado Ausangate. KMZ” >> Abrir.

El procedimiento se puede observar en la siguiente figura:

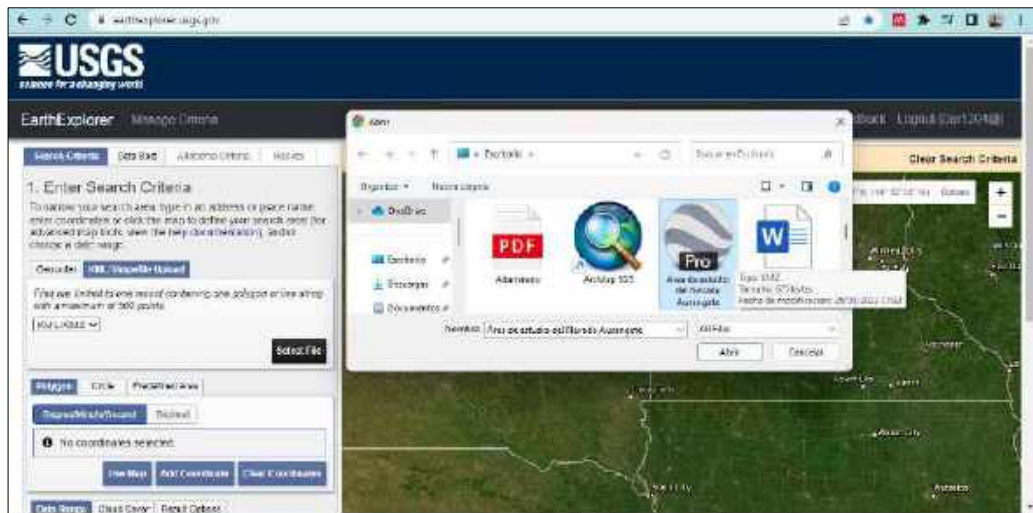


Figura 32. Procedimiento para cargar el área de estudio en la plataforma de la USGS

Para descargar las imágenes de la plataforma de la USGS, en primer lugar, se descargaron las imágenes satelitales en base a las fechas establecidas. Las imágenes satelitales a emplear fueron descargadas en tiempos de estiaje (mayo, junio, julio y agosto), ya que en ese momento el nevado se encontraba en un punto de equilibrio (11).

El Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés) ofreció a través de su plataforma EarthExplorer acceso a una gran base de datos de imágenes satelitales de alta resolución. Esta plataforma es una herramienta libre o gratuita que permite a los usuarios buscar, visualizar y descargar imágenes satelitales y otros datos geoespaciales de USGS y otras fuentes. Algunas de las características principales de EarthExplorer son:

Búsqueda avanzada: EarthExplorer permite buscar imágenes satelitales utilizando diferentes criterios de búsqueda, como la ubicación, la fecha, el tipo de sensor, etc.

Procedimiento para la fecha: Se presionó “Data Range” >> Se colocó el rango de fechas en las cuales se deseaba obtener imágenes satelitales en la siguiente forma (mes/día/año).

El proceso se puede observar en la siguiente figura:

The screenshot shows the USGS Geocoder interface. At the top, the 'Geocoder' tab is set to 'KML/Shapefile Upload'. A note states: 'Files are limited to one record containing one polygon or line string with a maximum of 500 points.' Below this is a dropdown menu for file format set to 'KML/KMZ' and a 'Select File' button.

The 'Polygon' tab is selected, with 'Circle' and 'Predefined Area' also visible. Below the tabs, the coordinate format is set to 'Degree/Minute/Second'. A table lists four coordinates:

1.	Lat: 13° 43' 21" S, Lon: 071° 12' 50" W	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Lat: 13° 47' 36" S, Lon: 071° 19' 22" W	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Lat: 13° 51' 45" S, Lon: 071° 16' 03" W	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
4.	Lat: 13° 47' 33" S, Lon: 071° 08' 57" W	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Below the table are buttons for 'Use Map', 'Add Coordinate', and 'Clear Coordinates'.

The 'Date Range' tab is selected, showing a search range from '05/01/1991' to '08/31/1991' and a 'Search months' dropdown set to '(all)'. There are also buttons for 'Data Sets >', 'Additional Criteria >', and 'Results >'.

Figura 33. Procedimiento para seleccionar la fecha de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS

Procedimiento para la cobertura de nubes: Se presionó “Cloud Cover” >> Se definió “Cloud Cover Range: 0% - 20% “según lo requerido.

El proceso se puede observar en la siguiente figura:

Geocoder **KML/Shapefile Upload**

Files are limited to one record containing one polygon or line string with a maximum of 500 points.

KML/KMZ

Polygon Circle Predefined Area

Degree/Minute/Second Decimal

1. Lat: 13° 43' 21" S, Lon: 071° 12' 50" W	<input type="button" value="X"/>
2. Lat: 13° 47' 35" S, Lon: 071° 19' 22" W	<input type="button" value="X"/>
3. Lat: 13° 51' 45" S, Lon: 071° 16' 03" W	<input type="button" value="X"/>
4. Lat: 13° 47' 33" S, Lon: 071° 08' 57" W	<input type="button" value="X"/>

Date Range **Cloud Cover** Result Options

Cloud Cover Range: 0% - 10%

Unknown Cloud Cover Values

This filter will only be applied to data sets that support cloud cover filtering (☁ in the data set list denotes cloud cover support).

Figura 34. Procedimiento para seleccionar la cobertura de nubes de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS

Procedimiento para seleccionar la data en base a los satélites LandSat: Se presionó "Data Sets" >> Se ubicó "LandSat" según lo requerido en base al año deseado para la imagen satelital, se eligió la Misión LandSat y luego se presionó "Results".

Para esto se basó en la siguiente figura:



Figura 35. Fechas de las Misiones LandSat. tomado de «Landsat Seen as Stunning Return on Public Investment», por Science Landsat, 2023.

Este proceso se puede observar en la siguiente figura:

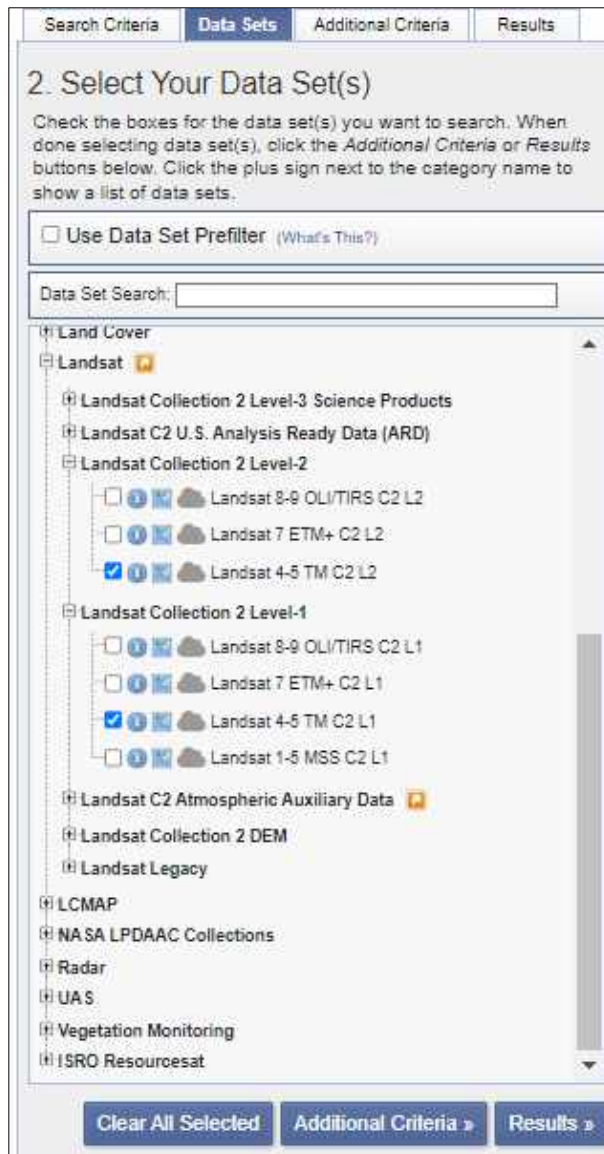


Figura 36. Procedimiento para seleccionar la Misión LandSat de las imágenes satelitales en la plataforma de la USGS

Podemos observar los resultados de la búsqueda de imágenes satelitales bajo los parámetros que ya establecimos en la búsqueda avanzada:

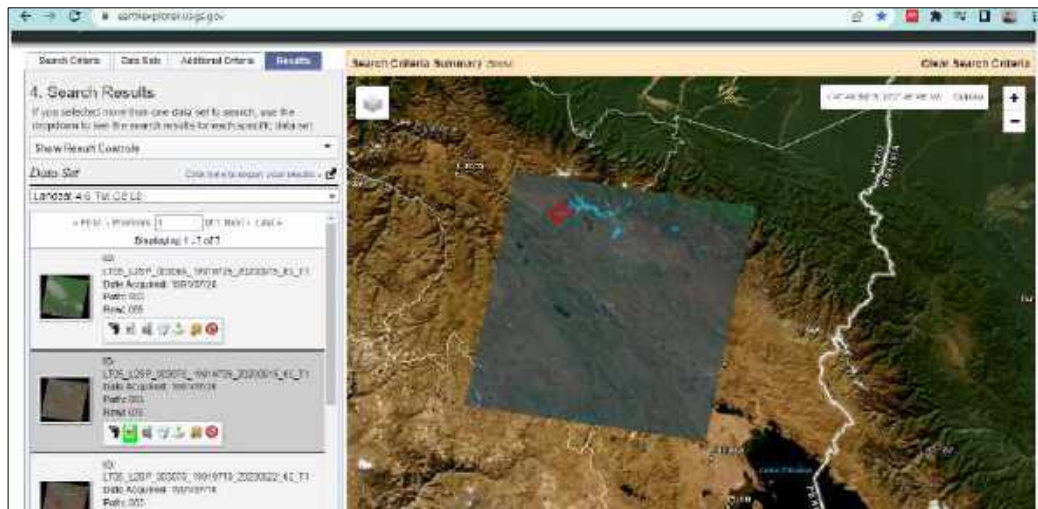


Figura 37. Resultado de la búsqueda avanzada de las imágenes satelitales

Previsualización de imágenes: Antes de descargar una imagen satelital, se pueden previsualizarla para asegurarse de que es la imagen correcta. La previsualización se realizó a través de una vista previa de baja resolución que se muestra en la pantalla.

Procedimiento: Se presiona “Results” >> Se verifica las imágenes satelitales una por una >> Se presiona “Show Browse Overlay”.

En la siguiente figura apreciamos el procedimiento:



Figura 38. Previsualización de la imagen satelital elegida

Descarga de imágenes: Se puede seleccionar y hacer clic en "Descargar" para obtener la imagen. Las imágenes se pueden descargar en diferentes formatos, como GeoTIFF, JPEG, PNG, etc.

Procedimiento: Se presiona “Results” >> Se verifica las imágenes satelitales una por una >> Se presionó “Download Options” >> Se presionó “Product Options” >> Se presionó “Download Product”.

En la siguiente figura apreciamos el procedimiento:



Figura 39. Procedimiento para la descarga de imágenes satelitales de la USGS

Para el estudio realizado, se descargó imágenes satelitales desde 1985 hasta 2020, asegurando una nubosidad inferior al 10%. A continuación, se presenta una descripción de cada imagen satelital descargada.

Tabla 10. Descripción de las Imágenes satelitales

Año	Fecha	Serie	Satelite	Bandas	Datum	Sensor	Zona
1985	25/07/1985	LT05_L2SP_003070_19850725_20200918_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1986	12/07/1986	LT05_L2SP_003070_19860712_20200917_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1987	05/02/1987	LT05_L2SP_003070_19870205_20201014_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1988	15/06/1988	LT05_L2SP_003070_19880615_20200917_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1989	20/07/1989	LT05_L2SP_003070_19890720_20200916_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1990	04/05/1990	LT05_L2SP_003070_19900504_20200916_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1991	31/05/1991	LT04_L2SP_003070_19910531_20200915_02_T1	LANDSAT 4	7	WGS84	TM	19S
1992	10/06/1992	LT05_L2SP_003070_19920610_20200914_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1993	29/06/1993	LT05_L2SP_003070_19930629_20200914_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1994	18/07/1994	LT05_L2SP_003070_19940718_20200913_02_T2	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1995	03/06/1995	LT05_L2SP_003070_19950603_20200912_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1996	21/06/1996	LT05_L2SP_003070_19960621_20200911_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1997	24/06/1997	LT05_L2SP_003070_19970624_20200910_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1998	29/07/1998	LT05_L2SP_003070_19980729_20200909_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
1999	30/06/1999	LT05_L2SP_003070_19990630_20200907_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2000	31/05/2000	LT05_L2SP_003070_20000531_20200907_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2001	21/07/2001	LT05_L2SP_003070_20010721_20230211_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2002	05/01/2002	LE07_L2SP_003070_20020105_20211023_02_T1	LANDSAT 7	8	WGS84	ETM	19S
2003	27/07/2003	LT05_L2SP_003070_20030727_20200904_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2004	11/06/2004	LT05_L2SP_003070_20040611_20230211_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2005	14/06/2005	LT05_L2SP_003070_20050614_20200902_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2006	03/07/2003	LT05_L2SP_003070_20060703_20200831_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2007	20/06/2007	LT05_L2SP_003070_20070620_20200830_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2008	06/06/2008	LT05_L2SP_003070_20080606_20200829_02_T2	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2009	09/06/2009	LT05_L2SP_003070_20090609_20200827_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2010	12/06/2010	LT05_L2SP_003070_20100612_20200823_02_T1	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2011	30/05/2011	LT05_L2SP_003070_20110530_20200822_02_T2	LANDSAT 5	7	WGS84	TM	19S
2012		*					
2013	22/07/2013	LC08_L2SP_003070_20130722_20200912_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2014	07/06/2014	LC08_L2SP_003070_20140607_20200911_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S

2015	26/06/2015	LC08_L2SP_003070_20150626_20200909_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2016	30/07/2016	LC08_L2SP_003070_20160730_20200906_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2017	02/08/2017	LC08_L2SP_003070_20170802_20200903_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2018	04/07/2018	LC08_L2SP_003070_20180704_20200831_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2019	05/06/2019	LC08_L2SP_003070_20190605_20200828_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S
2020	10/08/2020	LC08_L2SP_003070_20200810_20200918_02_T1	LANDSAT 8	11	WGS84	OLI_TIRS	19S

Nota: En la tabla Nro. 3 podemos observar las características principales de las imágenes satelitales a emplear en el estudio, todos fueron obtenidos de la página de la USGS para su posterior procesamiento en el programa ArcGIS 10.5.

() Para el año 2012 no se logró encontrar una imagen satelital viable, puesto que para este año las imágenes que nos brindó la USGS tenían fallas.*

El portal de Servicio Geológico de Estados Unidos brinda 2 niveles de imágenes satélites: Imágenes de nivel 1: Las imágenes de nivel 1 se refieren a las imágenes que han sido corregidas radiométricamente y georreferenciadas, lo que significa que los valores de píxeles de la imagen se han convertido en unidades físicas (como la reflectividad) y se han ajustado para tener una ubicación geográfica precisa. Estas imágenes son de alta calidad y se utilizan comúnmente para la investigación científica, la planificación del uso del suelo y la gestión de recursos naturales.

Las imágenes de nivel 2: Son imágenes de nivel 1 que han sido procesadas adicionalmente para mejorar la calidad de la imagen. Esto puede incluir la eliminación de nubes, la corrección atmosférica y el procesamiento de la imagen para mejorar la resolución espacial o espectral.

Las imágenes de nivel 2 son ideales para aplicaciones que requieren una imagen más clara y detallada, como la monitorización de cultivos y la detección de cambios en el paisaje.

Para este estudio se hizo uso de la imagen de nivel dos, ya que se necesita un estudio detallado y sin errores.

Las imágenes que se empleó en el estudio son de nivel 2, lo que significa que al estar en el nivel 2, “ya fueron procesadas, en lo que es corrección geométrica y radiométrica como paso previo, como nos informa (58)”.

Organizar carpeta de trabajo

Para esta etapa se generó una serie de carpetas, primeramente, una general, dentro de la cual incluirá las carpetas anuales y una data base, como podemos observar en la siguiente figura:

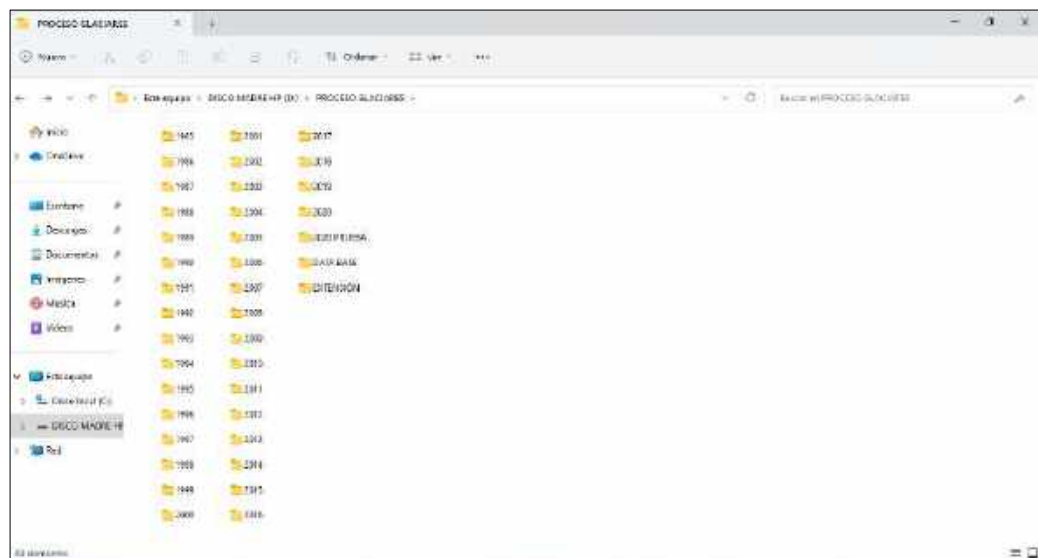


Figura 40. Distribución de carpetas de trabajo dentro del computador

Después, en cada carpeta anual, se crearon las subcarpetas "entrada" y "salida", destinadas para los archivos de las imágenes satelitales descargadas y los archivos generados a partir de estas, respectivamente. Esto se puede observar en la siguiente figura:

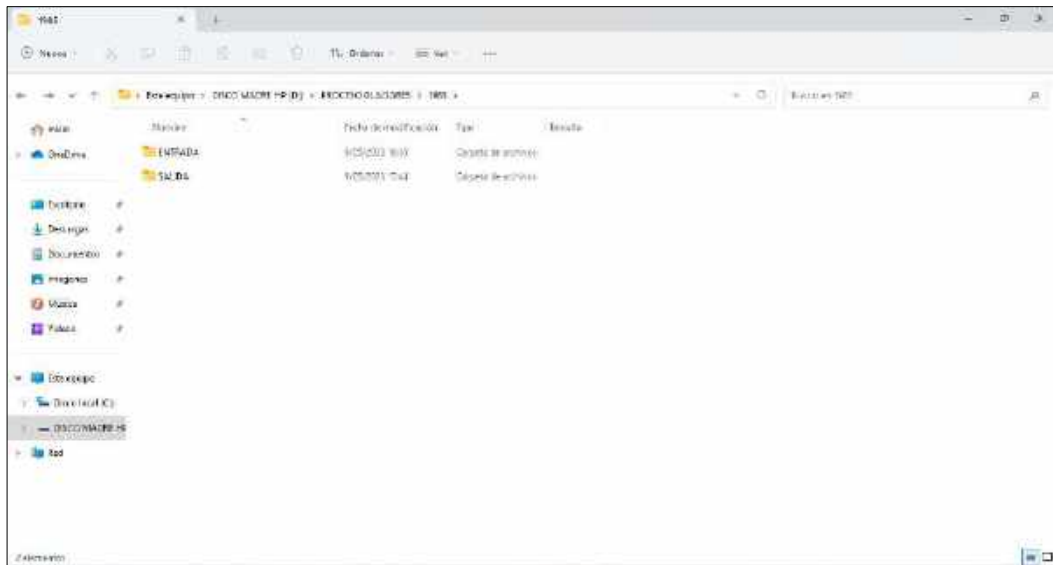


Figura 41. Carpetas de "entrada" y "salida" dentro de cada carpeta anual

Posteriormente, las imágenes satelitales descargadas se ubicaron en la carpeta "entrada", y se procedió a descomprimir todo en el mismo lugar, tal como se muestra en la siguiente figura:

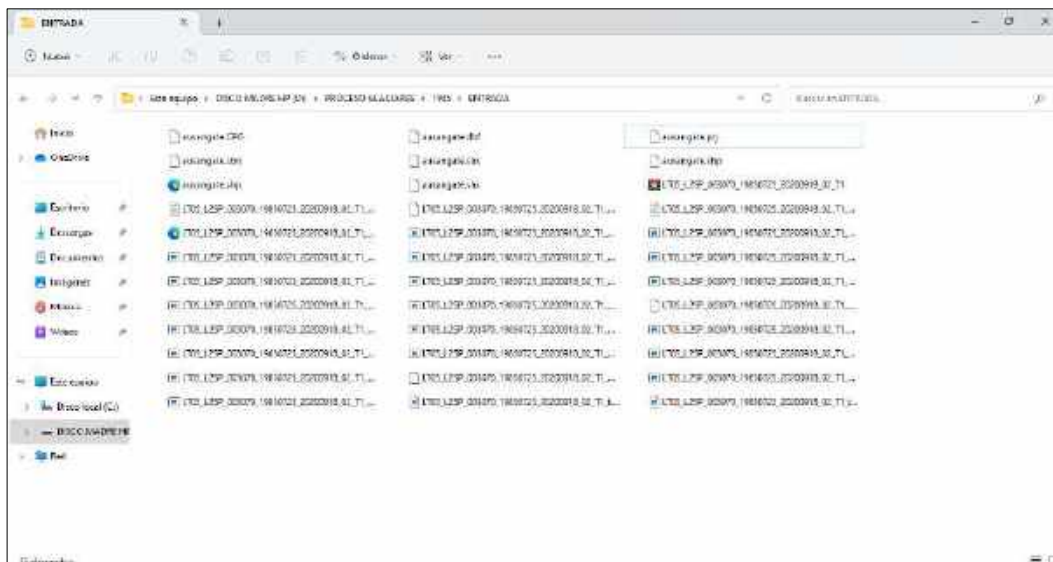


Figura 42. Archivos de la imagen satelital descargada en su respectiva carpeta anual

Apertura de archivos en el Software ArcGIS 10.5

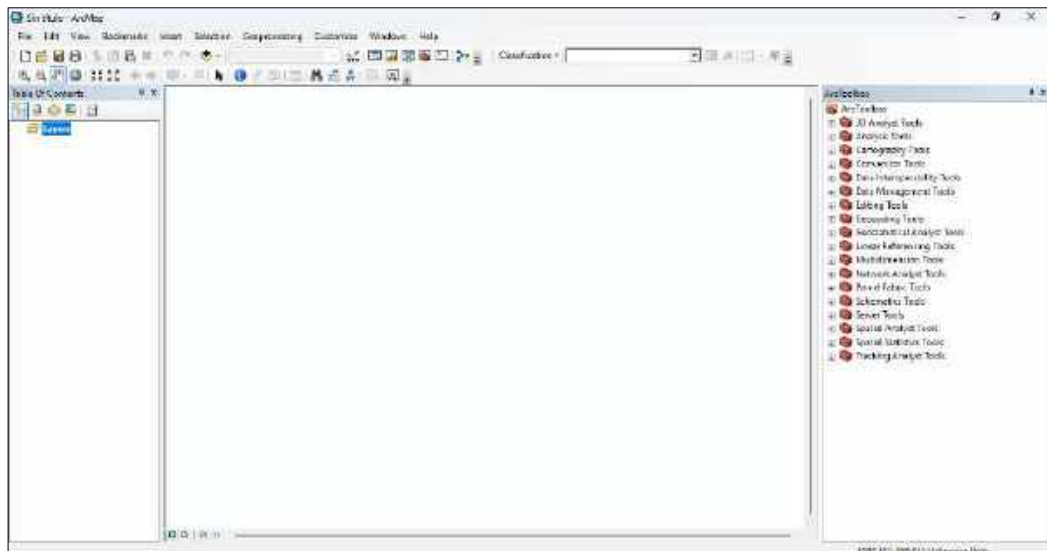


Figura 43. Vista del Programa ArcGIS 10.5 desde el computador

Nota: En la figura Nro. 48 podemos observar la tabla de contenido, la caja de herramientas, barra de herramientas y otras opciones de trabajo dentro del software ArcGIS 10.5.

Después de descargar las imágenes, estas fueron cargadas en el programa. Para realizar este paso, se siguió el procedimiento que se muestra a continuación:

Procedimiento: Se presionó "Catalog" >> Se seleccionó la carpeta correspondiente "Año/Entrada" >> Se extrajeron las bandas necesarias.

El procedimiento detallado se puede apreciar en la siguiente figura:

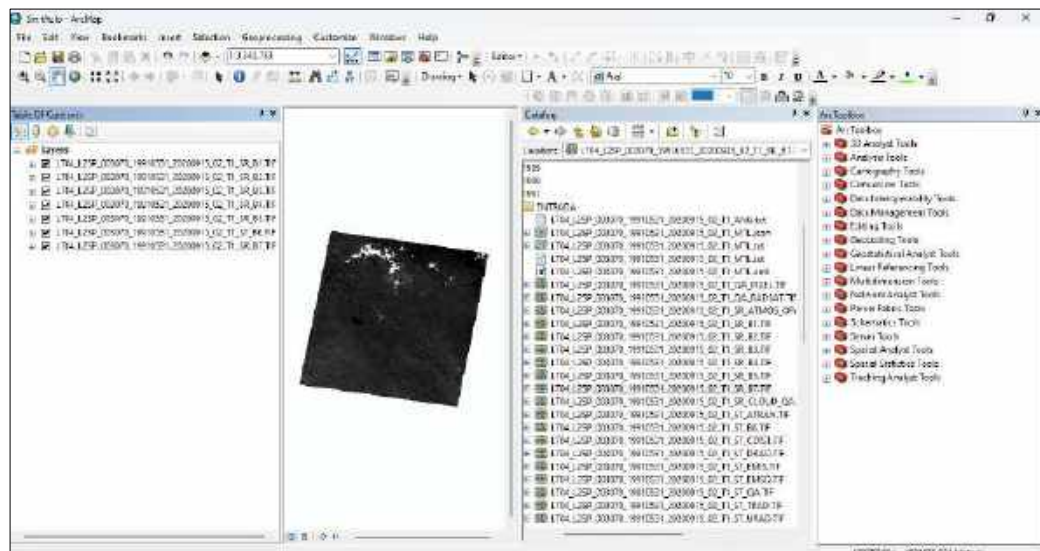


Figura 44. Procedimiento para la composición de bandas espectrales

Luego, se llevó a cabo el proceso de agrupamiento, siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

Procedimiento: Se seleccionaron las bandas en la sección "Layer" >> Se presionó clic derecho >> Se eligió la opción "Group".

El procedimiento completo se puede observar en la siguiente figura:

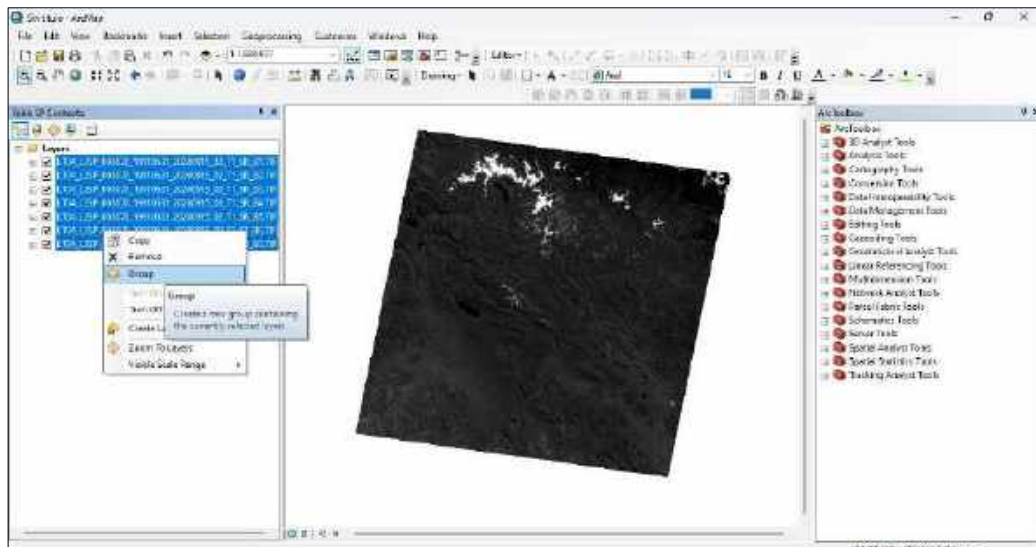


Figura 45. Procedimiento para el agrupamiento de las bandas espectrales

Composición de bandas

Luego, se realizó la composición de bandas para generar el filtro o composición RGB, con el objetivo de combinar las bandas y facilitar la identificación del área de estudio de manera adecuada (16). El procedimiento detallado se llevó a cabo de la siguiente manera:

Procedimiento: Se presionó "Windows" >> Se seleccionó "Image Analysis" >> Se eligieron las bandas espectrales >> Se presionó "Composite Bands" >> Se seleccionó la combinación RGB adecuada para "Color Natural", según la Misión LandSat correspondiente.

Este proceso se puede visualizar en la siguiente imagen:

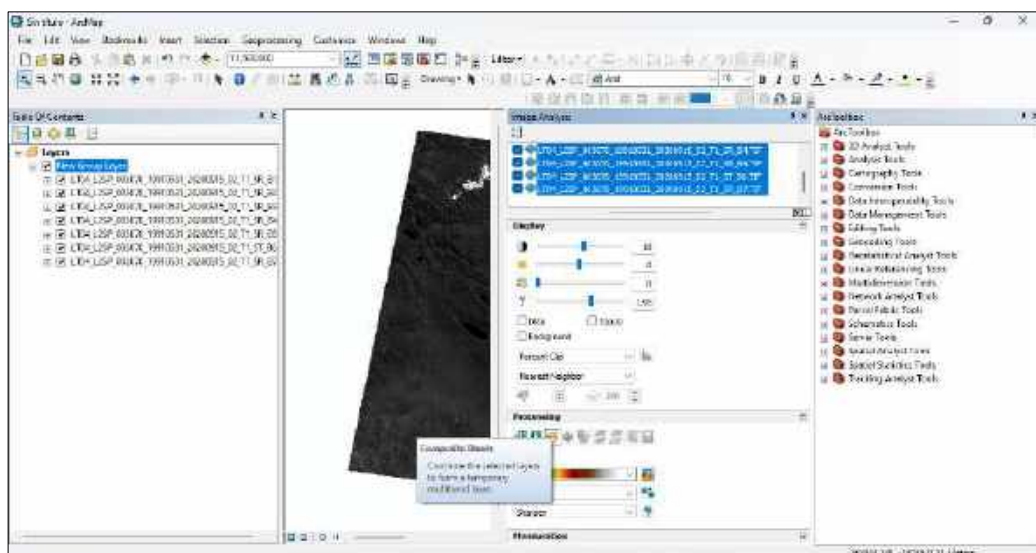


Figura 46. Procedimiento para generar el filtro o composición RGB

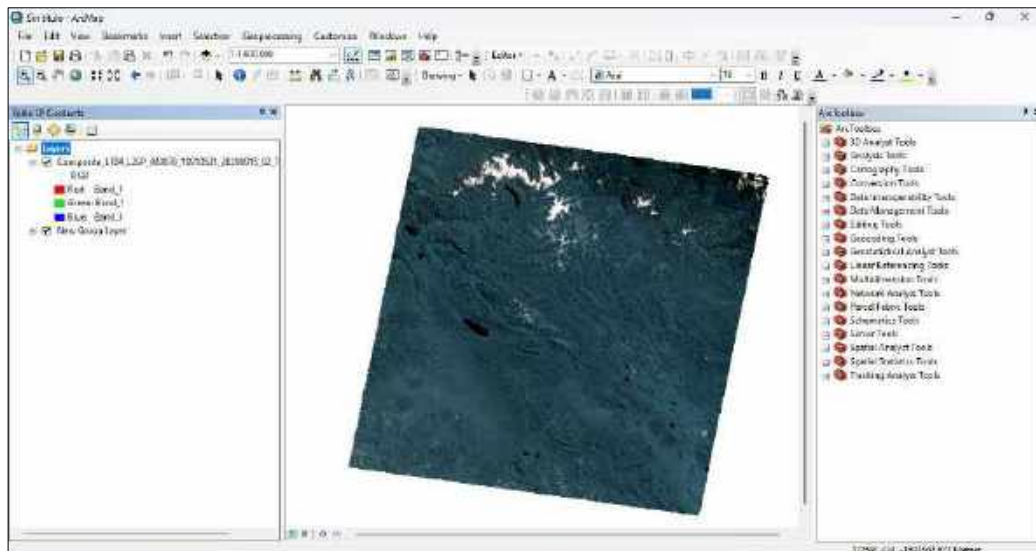


Figura 47. Resultado de la generación del filtro o composición RGB

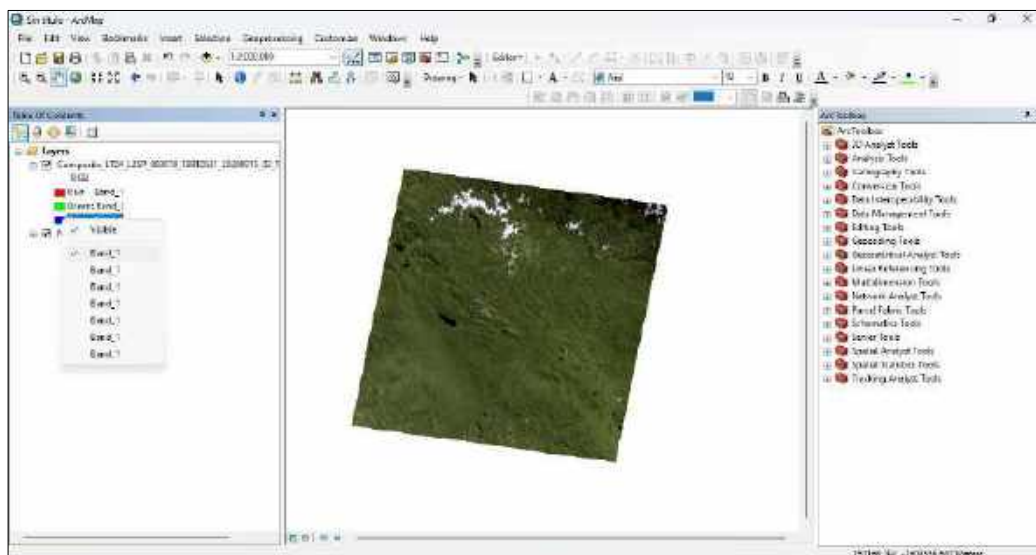


Figura 48. Combinación RGB de color natural para LandSat 4

Carga del Polígono del área de estudio

Con la composición de bandas completada, se procedió a cargar el polígono del área de estudio "Ausangate.shp" utilizando la función para excluir zonas no deseadas en el cálculo de NDSI (16). Durante esta etapa, se introdujo el archivo del polígono siguiendo el procedimiento detallado a continuación:

Procedimiento: Se presionó "Catalog" >> Se buscó la carpeta "Data Base" >> Se seleccionó el polígono "Ausangate.shp".

Este proceso se puede observar en la siguiente figura:

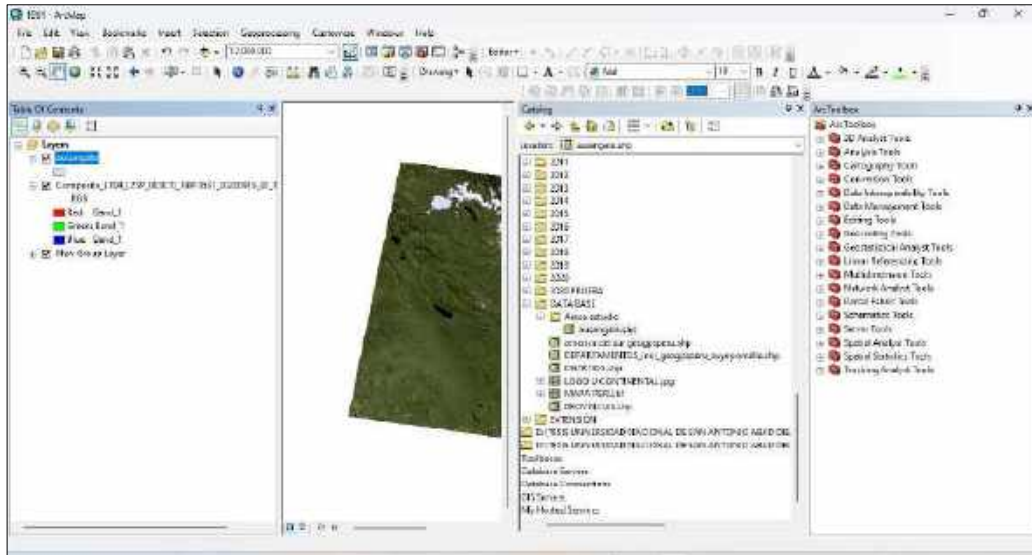


Figura 49. Procedimiento para la carga del polígono del área de estudio

Con el objetivo de mejorar la visibilidad del polígono del área de estudio, se llevaron a cabo modificaciones en su color, como se detalla en el siguiente procedimiento:

Procedimiento: Se realizó doble clic en el color de "Ausangate o Polígono del Área de estudio" >> Se seleccionó "Symbol Selector" >> Se eligió "Hollow" / "Outline Width:1" / "Outline Color: Color deseado" >> Se presionó "Ok".

El proceso descrito se ilustra en la siguiente figura:

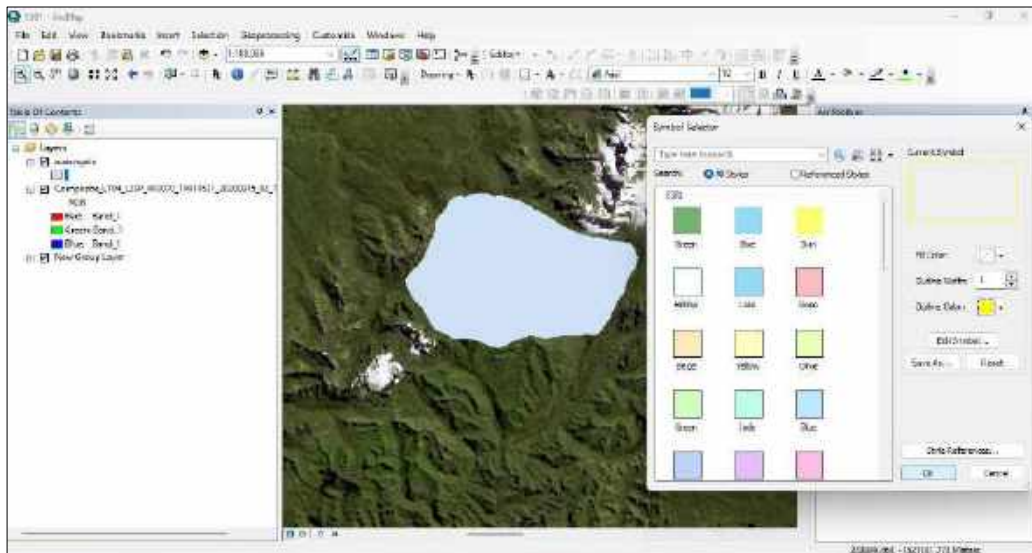


Figura 50. Procedimiento para modificar el color del polígono del área de estudio

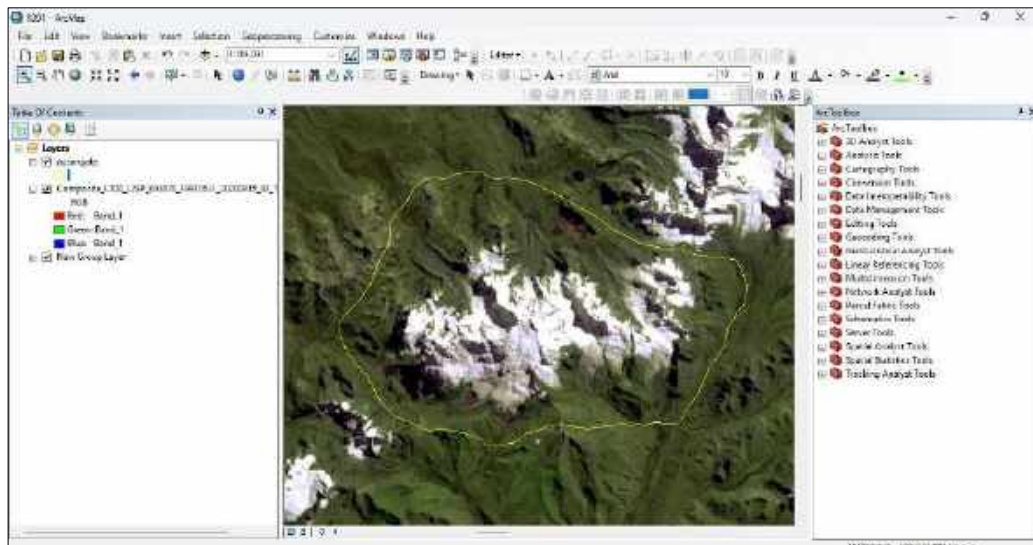


Figura 51. Resultado del cambio de color del polígono del área de estudio

Cálculo de NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve)

En esta etapa, se empleó la herramienta “Ráster Calculator” en el software ArcGIS 10.5 para calcular el NDSI en donde se utilizó dos bandas (una en las partes del espectro visible y otras en el infrarrojo cercano o infrarrojo de onda corta) (16).

La fórmula matemática del cálculo NDSI (Normal Snow Difference Index) emplea las bandas espectrales según sea la misión Landsat de la cual se obtuvo dicha imagen satelital, estas son las siguientes (16).

- $NDSI=LANDSAT\ 4 = (B2 - B5) / (B2 + B5)$
- $NDSI=LANDSAT\ 5 = (B2 - B5) / (B2 + B5)$
- $NDSI=LANDSAT\ 7 = (B2 - B5) / (B2 + B5)$
- $NDSI=LANDSAT\ 8 = (B3 - B6) / (B3 + B6)$

El procedimiento seguido fue el siguiente:

Procedimiento: Se presionó "ArcTollbox" >> Se seleccionó "Spatial Analyst Tools" >> Se seleccionó "Map Algebra" >> Se seleccionó "Raster Calculator" >> Se introdujo la fórmula matemática según la misión Landsat.

El proceso descrito se visualiza en la siguiente figura:

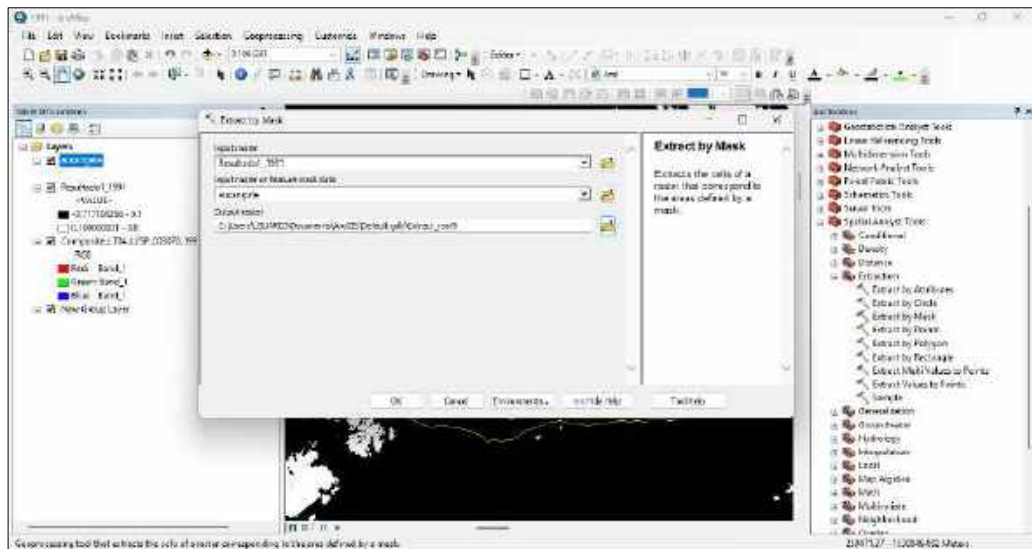


Figura 54. Procedimiento para el recorte del área de estudio

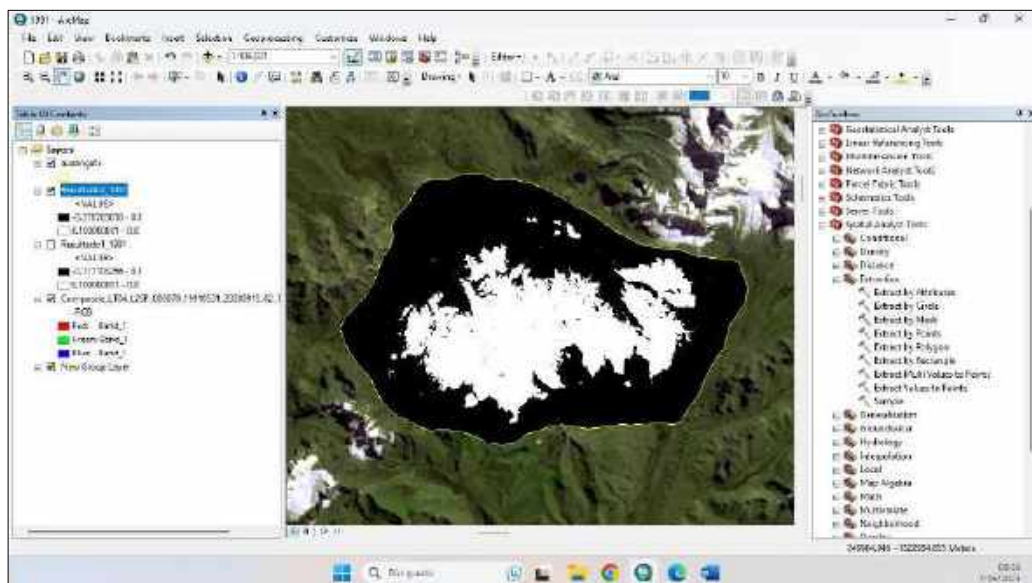


Figura 55. Resultado del proceso de recorte del área de estudio

Reclasificación del Raster NDSI

En esta etapa, se llevó a cabo la reclasificación del raster NDSI. Este proceso se realizó asignando un único valor, ya que se consideraron únicamente las zonas de nieve glaciar utilizando un umbral de rango de 0.1 a 0.8, recomendado para obtener el área glaciar del Nevado Ausangate (59).

El procedimiento seguido fue el siguiente:

Procedimiento: Se presionó "ArcToolbox" >> Se seleccionó "Spatial Analyst Tools" >> Se seleccionó "Reclass" >> Se seleccionó "Reclassify" >> Se asignó un valor con los rangos previamente especificados >> Se presionó "Ok".

El procedimiento descrito se puede visualizar en la siguiente figura:

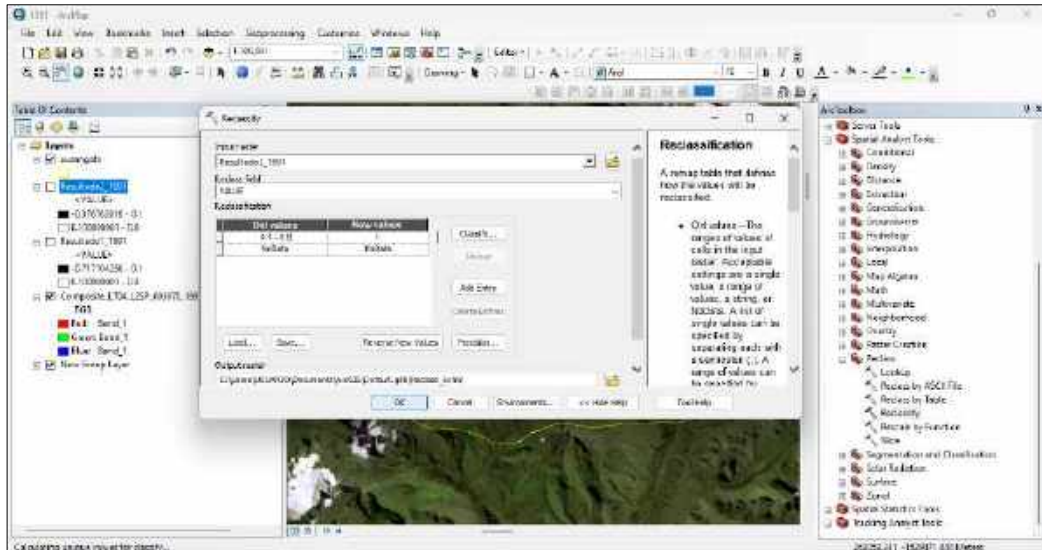


Figura 56. Procedimiento para la reclasificación del Raster del NDSI

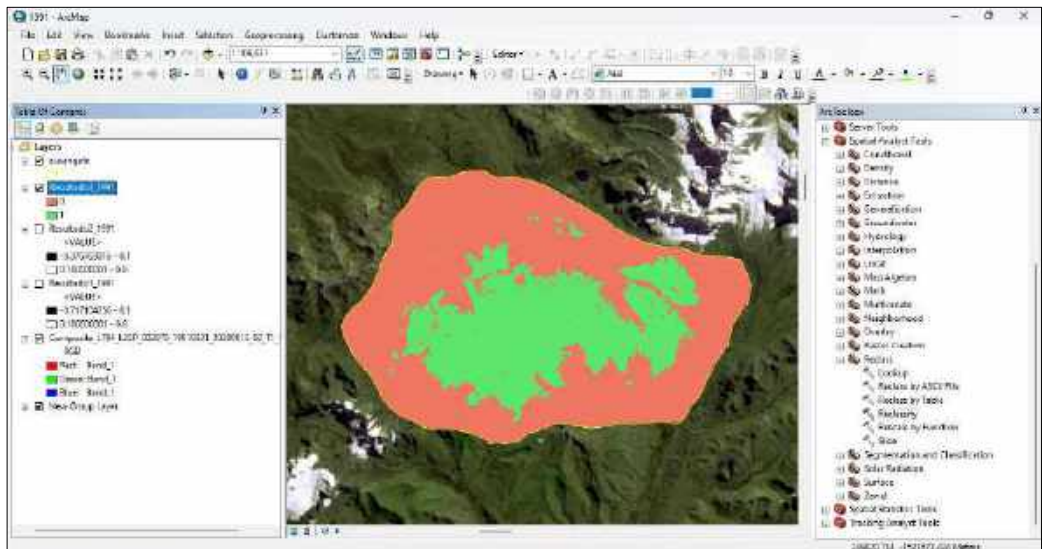


Figura 57. Resultado de la reclasificación del Raster del NDSI

Conversión de Raster a Polígono

En esta fase, tras la reclasificación, se procedió a convertir el raster a polígono. Dicho proceso implica transformar el raster en polígonos, lo cual facilita el cálculo del área y el perímetro en la tabla de atributos (16). El procedimiento seguido fue el siguiente:

Procedimiento: Se presionó "ArcToolbox" >> Se seleccionó "ConversionTools" >> Se seleccionó "From Raster" >> Se seleccionó "Raster to Polygon" >> Se ingresaron los archivos necesarios >> Se presionó "Ok".

El procedimiento detallado se ilustra en la siguiente figura:

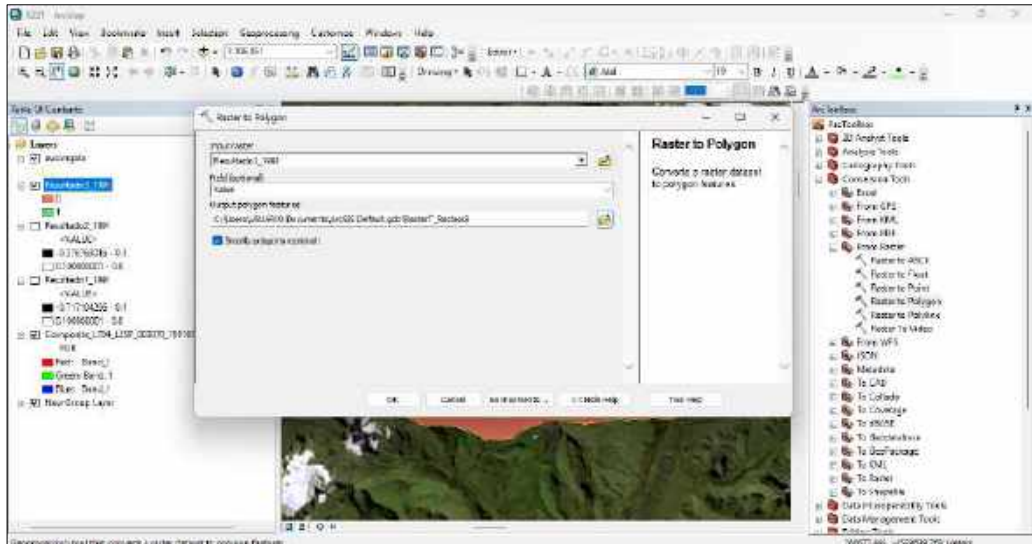


Figura 58. Procedimiento para convertir Raster a Polígono

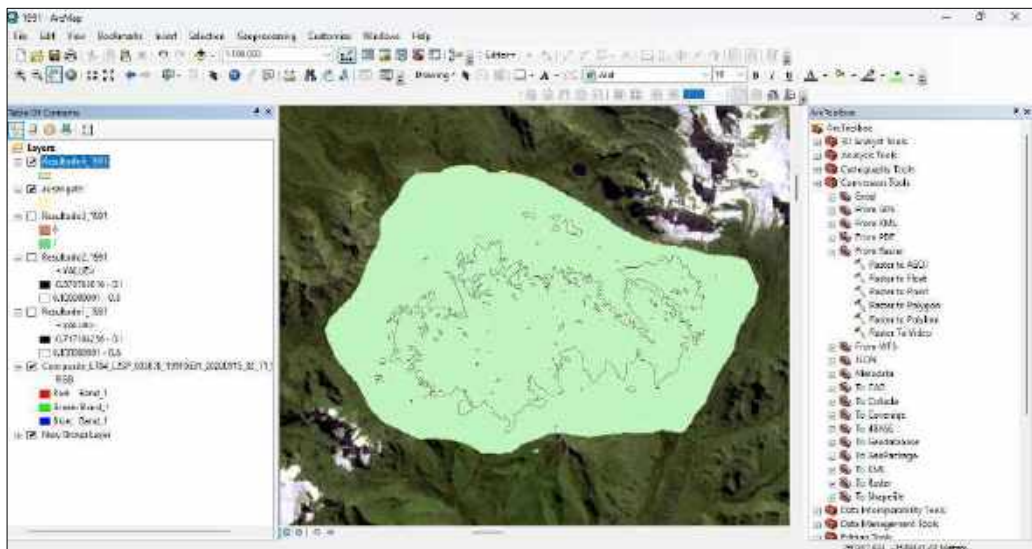


Figura 59. Resultado del procedimiento para convertir Raster a Polígono

Cuantificación del área de nuestra zona de estudio

Inicialmente, se creó una nueva columna que contendría los atributos de medida de área en hectáreas. El procedimiento seguido fue el siguiente:

Procedimiento: Se presionó con clic derecho sobre "Resultado4_año" ubicado en la sección Layers >> Se seleccionó "Open Attributes Table" >> Se hizo clic en "Table Options" >> Se seleccionó "Add Field" >> Se asignó un nombre "Área_ha" y se seleccionó "Type: Double" >> Se presionó "Ok".

El procedimiento detallado se muestra en la siguiente figura:

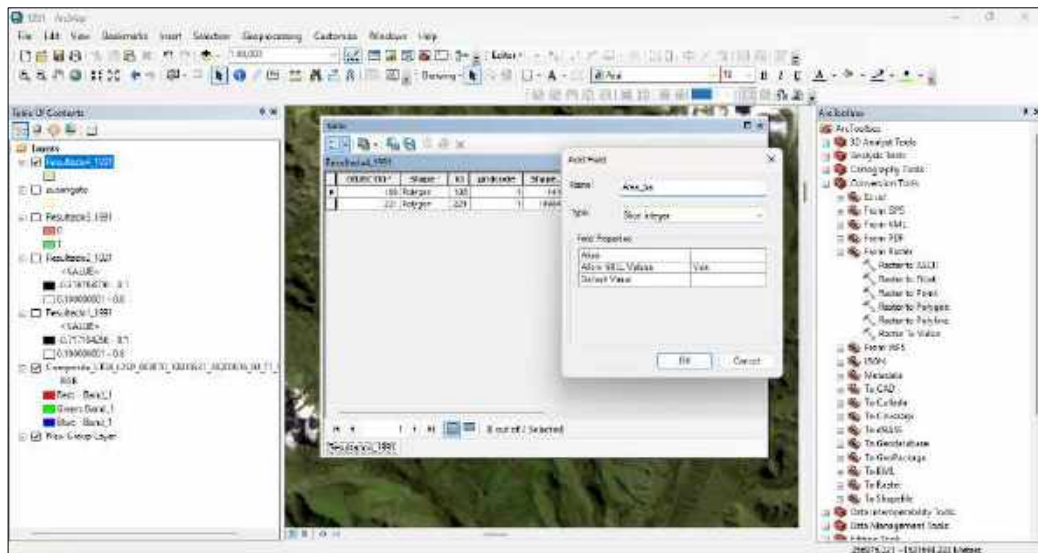


Figura 60. Procedimiento para cuantificar área

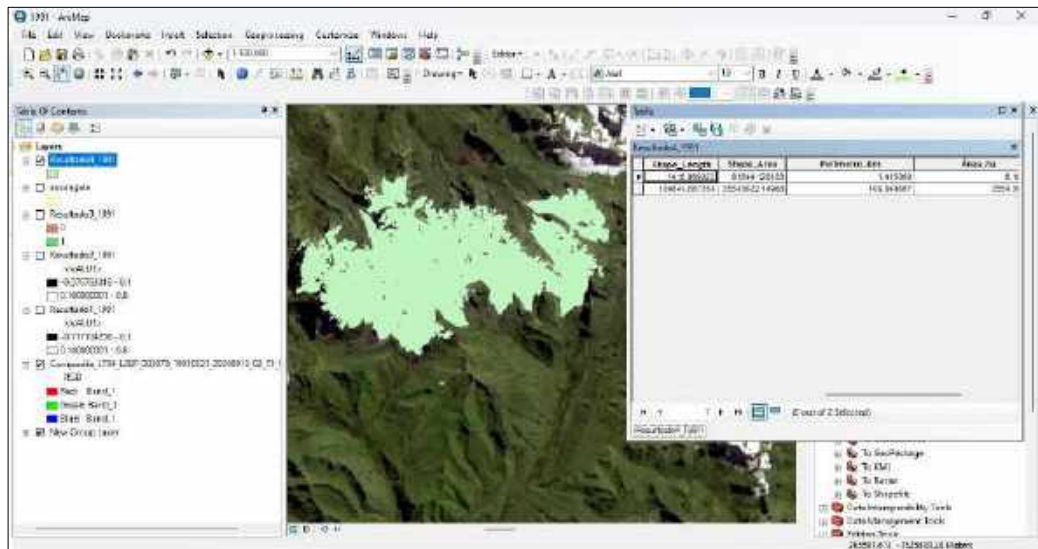


Figura 61. Resultado del procedimiento para cuantificar área

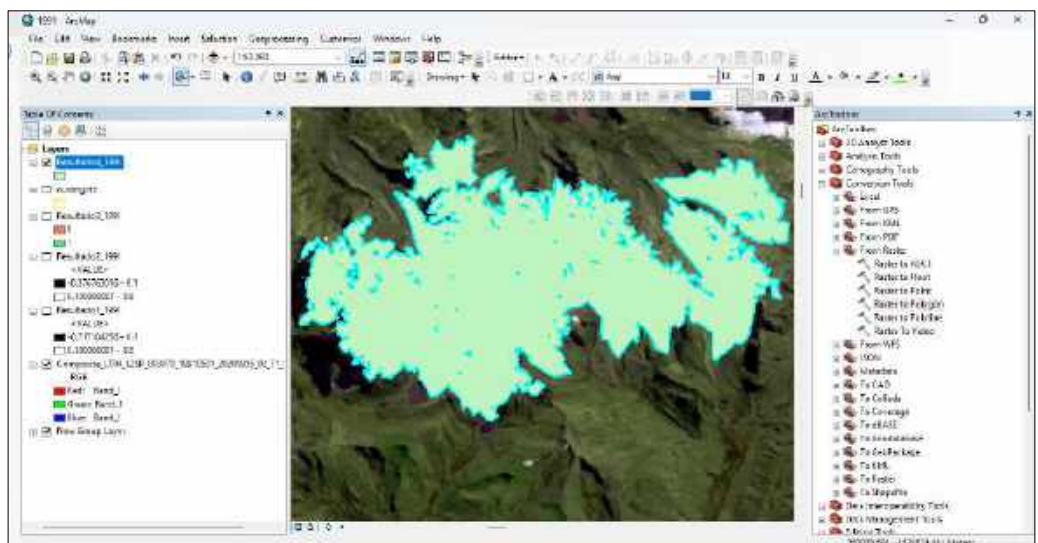


Figura 62. Zona del estudio al finalizar el proceso en el programa ArcGIS 10.5

OE2: Cuantificar la variación del perímetro glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

Luego de la conversión de raster a polígono procedemos con el siguiente proceso:

Cuantificación del perímetro de nuestra zona de estudio

Primero se procedió a aperturar una columna nueva, esta contara con el atributo de medida de perímetro, mediante la unidad Km, para lo cual seguimos el respectivo procedimiento:

Procedimiento: Se presionó con clic derecho sobre "Resultado4_año" ubicado en la sección Layers >> Se seleccionó "Open Attributes Table" >> Se hizo clic en "Table Options" >> Se seleccionó "Add Field" >> Se asignó un nombre "Área_ha" y se seleccionó "Type: Double" >> Se presionó "Ok".

El procedimiento detallado se muestra en la siguiente figura:

Figura 63. Procedimiento para cuantificar perímetro

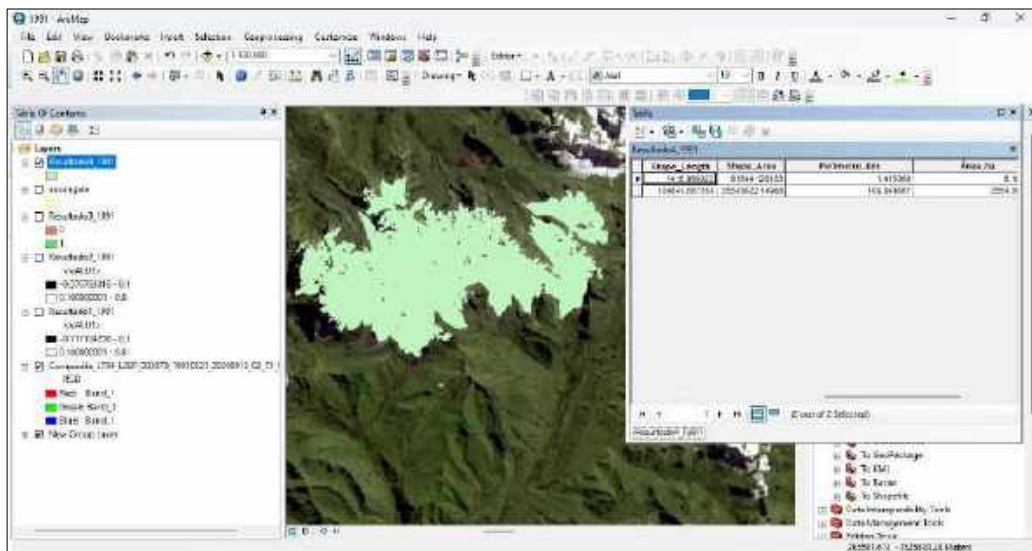


Figura 64. Resultado del procedimiento para cuantificar perímetro

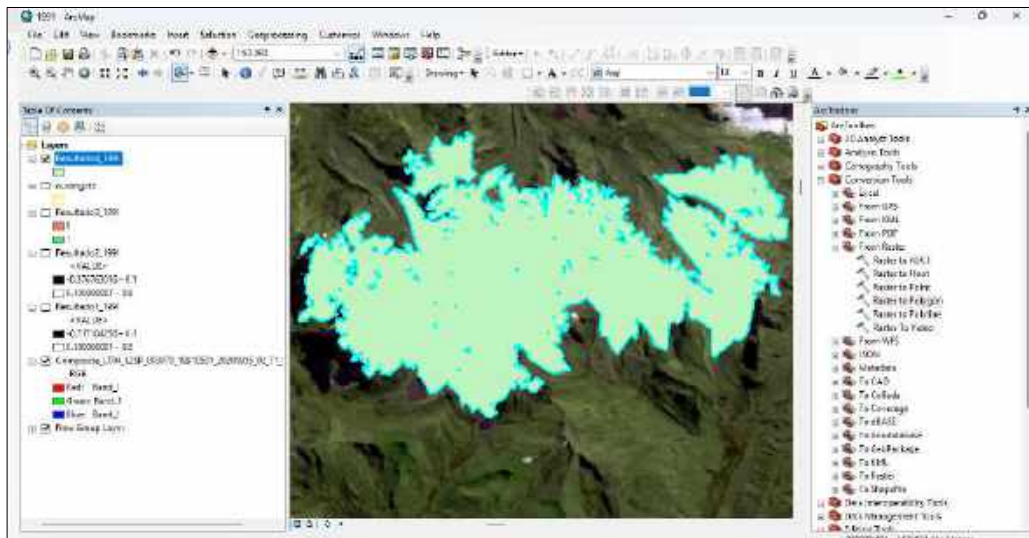


Figura 65. Zona del estudio al finalizar el proceso en el programa ArcGIS 10.5

OE3: Estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciár del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.

Se empleó un modelo de regresión y la prueba de Durbin-Watson en el paquete estadístico Excel 2019 para estimar el tiempo en el que la cobertura glaciár del Nevado Ausangate desaparecerá completamente (16).

Modelo de Regresión

Para llevar a cabo esta tarea, se siguieron los siguientes pasos:

Procedimiento: Se presionó "Datos" >> Se eligió "Análisis de datos" >> Se seleccionó "Regresión" en la tabla "Funciones para análisis" >> Se presionó "Aceptar".

El procedimiento detallado se muestra en la siguiente figura:

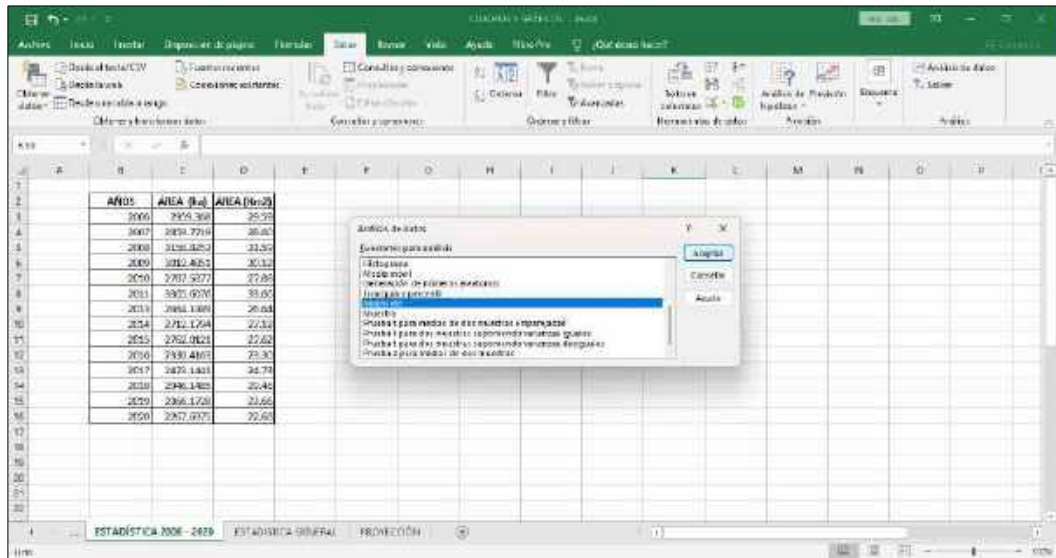


Figura 66. Procedimiento para realizar regresión en el paquete estadístico Excel

Posteriormente, se completaron los datos en la pestaña de regresión de la siguiente forma:

Procedimiento: Se colocaron los datos de años y área en los parámetros de "x" y "Y", respectivamente >> Se seleccionaron "Rótulos" >> Se eligió "Rango de salida" en "Opciones de salida" >> Se seleccionaron "Residuos" en "Residuales" >> Se presionó "Aceptar".

El procedimiento detallado se muestra en la siguiente figura:

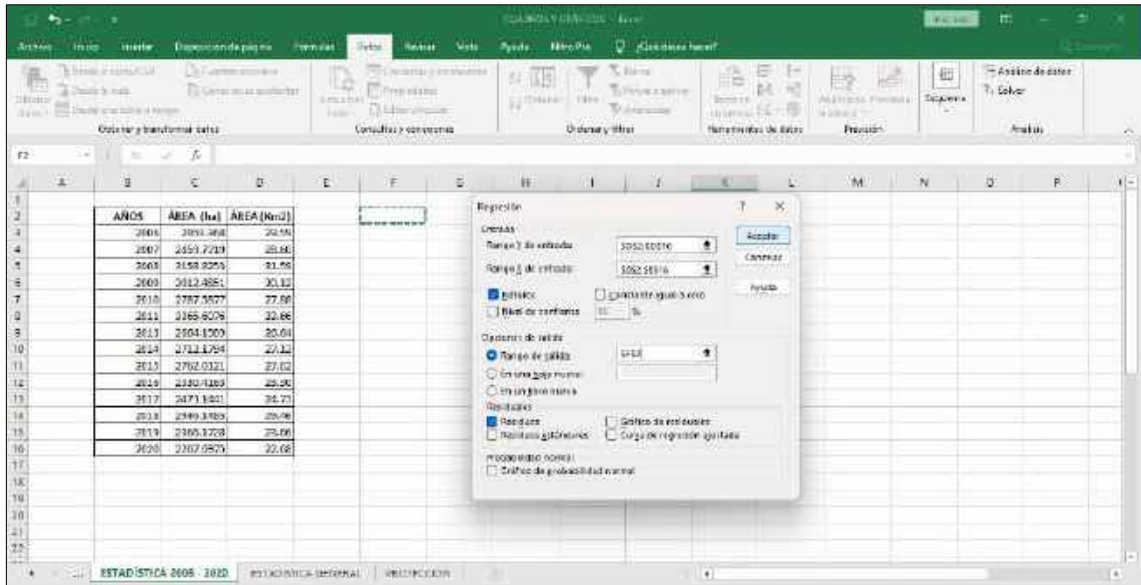


Figura 67. Procedimiento para calcular regresión

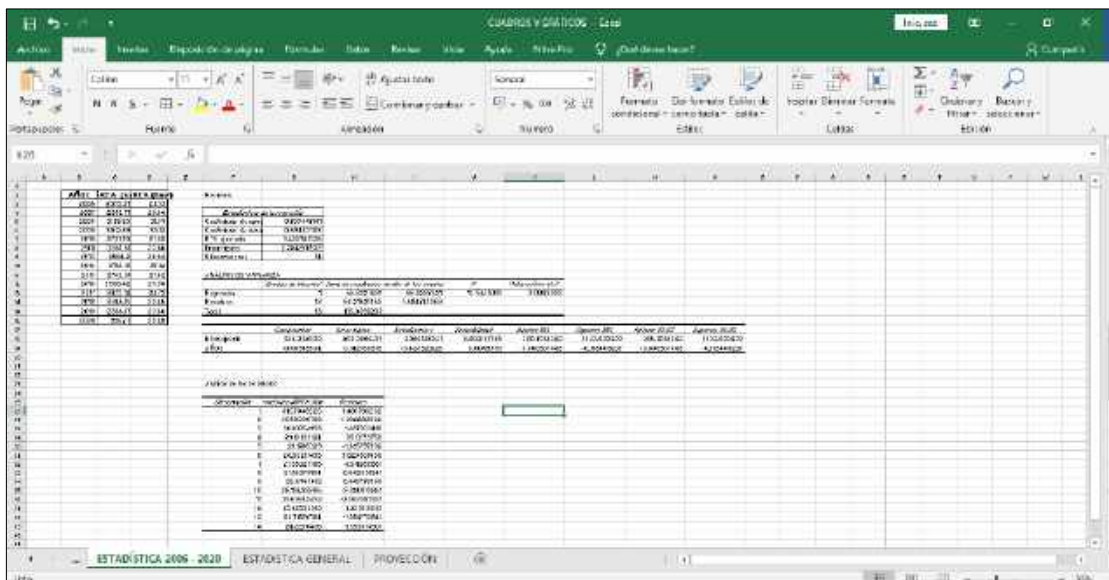


Figura 68. Resultado del cálculo de regresión en el paquete estadístico Excel

Prueba de autocorrelación serial del estadístico de Durbin – Watson

En estadística, el estadístico de Durbin – Watson, es un estadístico de prueba que se utiliza para detectar la presencia de autocorrelación (una relación entre los valores separados el uno del otro por un intervalo de tiempo dado) en los residuos (errores de predicción) de un análisis de la regresión. Lleva el nombre de James Durbin y Geoffrey Watson. Durbin y Watson aplicaron el contraste para los residuales de mínimos cuadrados y desarrollaron pruebas para la hipótesis nula de que los errores no están correlacionados en serie frente a la alternativa de que siguen un proceso de primer orden autorregresivo (60).

H0: No existe Autocorrelación serial

H1: Existe Autocorrelación

Ecuación de Durbin – Watson:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

Figura 69. Ecuación de Durbin – Watson. Tomado de «¿Qué es la autocorrelación? Test de Durbin-Watson», por Gutierrez, 2021.

Donde:

- t = Número de observaciones
- e_t = Residuos predichos
- e_{t-1} = Residuos rezagados un periodo

El estadístico de Durbin–Watson es una prueba utilizada para evaluar la presencia de autocorrelación positiva o negativa. Este estadístico varía entre 0 y 4, con valores inferiores a 2 indicando autocorrelación serial positiva, y valores superiores a 2 indicando autocorrelación serial negativa (16).

El valor de DW siempre oscila entre 0 y 4. Si el estadístico de Durbin–Watson es considerablemente menor que 2, se interpreta como evidencia de correlación serial positiva. Como regla general, un valor de Durbin–Watson inferior a 1 puede ser motivo de preocupación. Valores bajos de "d" indican que los términos de error sucesivos están positivamente correlacionados. Si "d" es mayor que 2, los términos de error sucesivos están negativamente correlacionados. En el contexto de las regresiones, esto podría sugerir una subestimación del nivel de significación estadística (60).

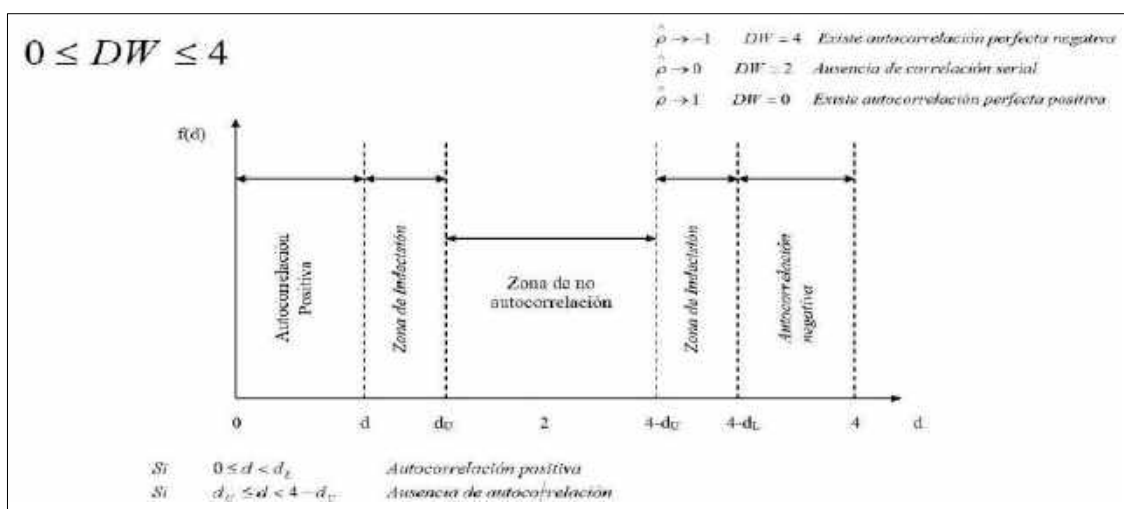


Figura 70. Gráfico de Durbin – Watson. Tomado de «¿Qué es la autocorrelación? Test de Durbin-Watson», por Gutierrez, 2021.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIONES

4.1. Resultados

4.1.1. Resultados para el OE1

Los resultados con respecto al “**OE1**: Cuantificar la pérdida del área glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco” son los siguientes. En primer lugar, se muestra la variabilidad de las áreas por intervalos de tiempo en el nevado Ausangate.

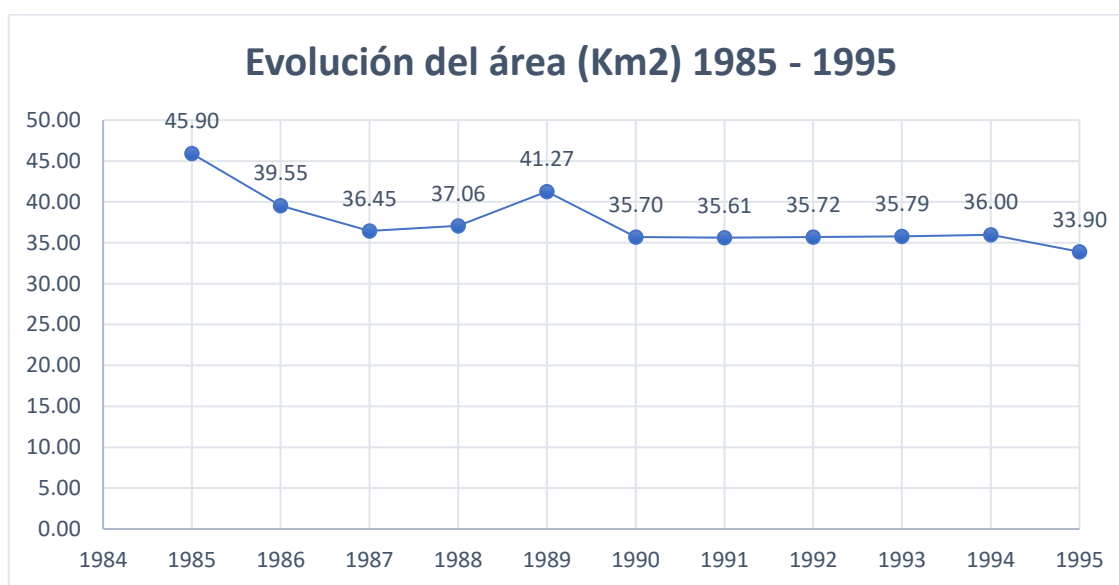


Figura 71. Comportamiento del área glaciar en Km² del nevado Ausangate durante los años 1985 - 1995

En la figura Nro. 71 se observa el comportamiento del área glaciar en km² del nevado Ausangate durante los años 1985 a 1995. Se evidencia una tendencia notable a la baja dentro de estos años, siendo el punto más bajo en el año 1995 con 33.90 km²; sin embargo, se puede visualizar que entre los años 1990 y 1994 se mantiene, así mismo se observa una tendencia a bajar en el último periodo.

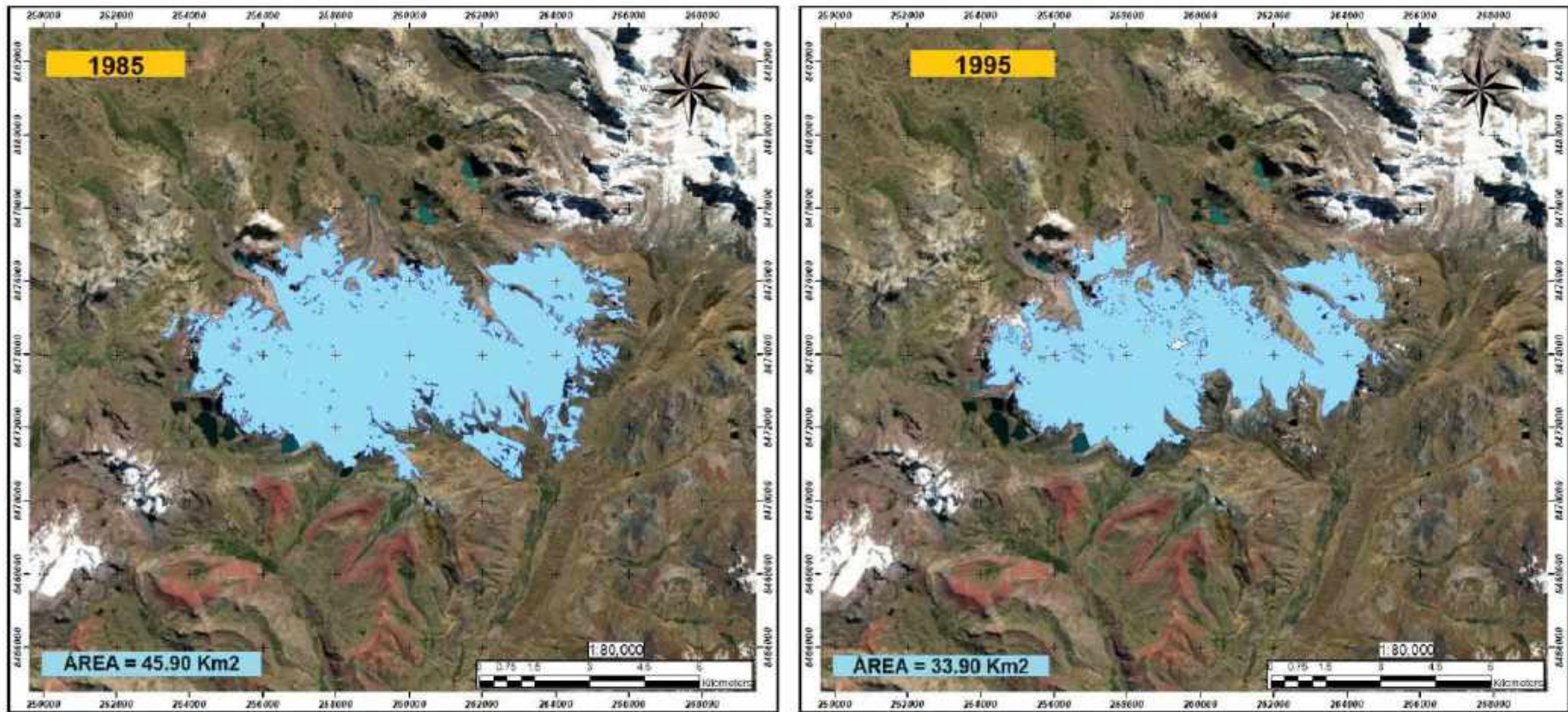


Figura 72. Comparación del área glacial del nevado Ausangate de los años 1985 y 1995

En la figura Nro. 71 se observa que existe variación en las áreas entre los años 1985 y 1995, puesto que cuentan con áreas glaciares de 45.90 y 33.90 Km² respectivamente, esto indica una pérdida significativa de 12 km² del área glacial del nevado Ausangate durante este periodo de tiempo.

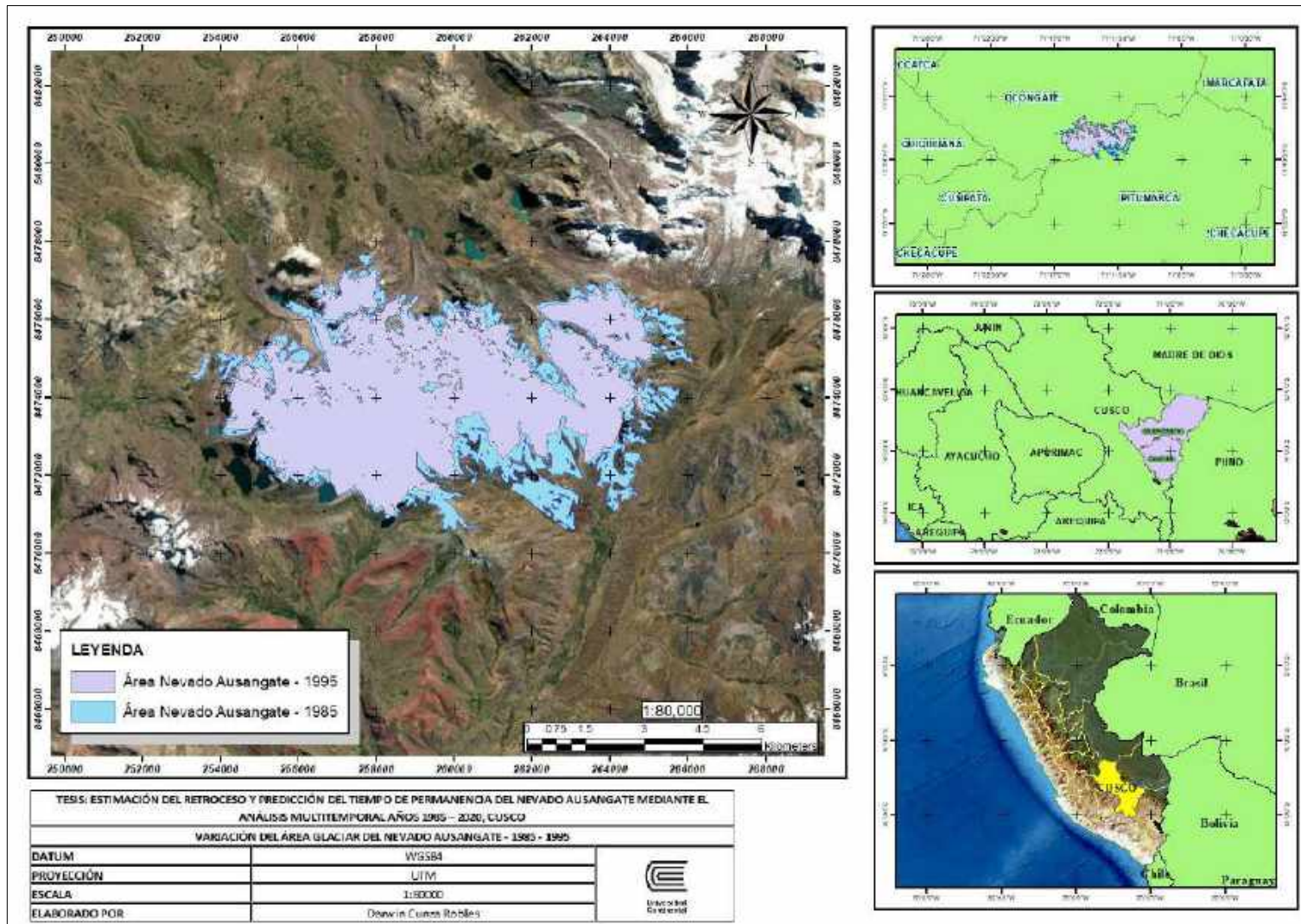


Figura 73. Variación del área glaciaria del nevado Ausangate durante los años 1985 - 1995

En la figura Nro. 72 se observa que existe variación en las áreas entre los años 1985 y 1995, de color celeste podemos observar el área del año 1985, mientras que de color violeta se aprecia el área del año 1995 dando a conocer la variación en dicha representación, esto indica una pérdida significativa del área glaciar del nevado Ausangate durante esta década.

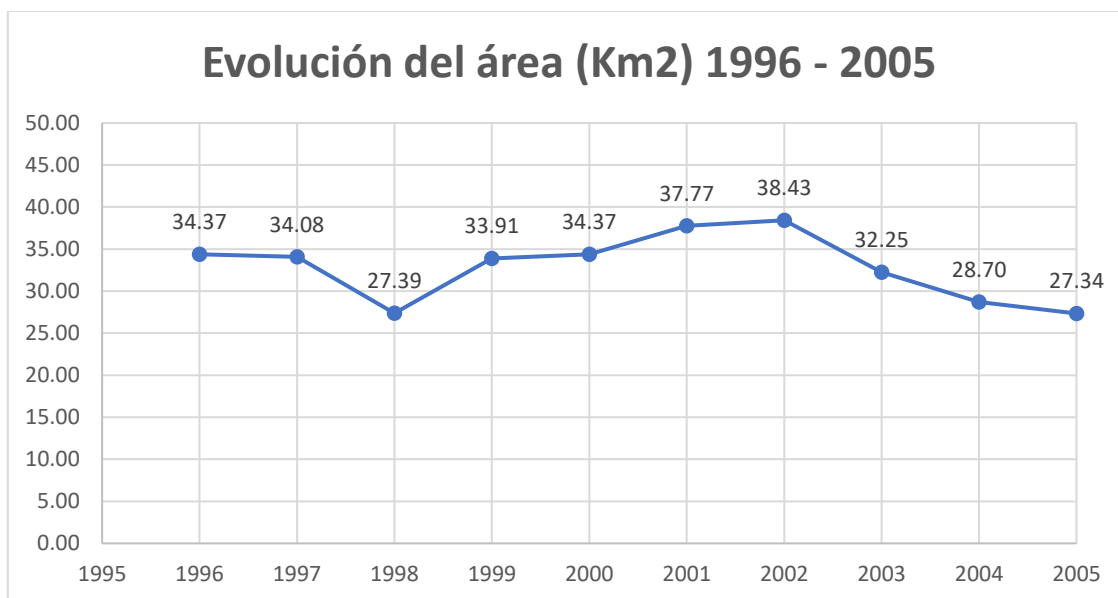


Figura 74. Comportamiento del área glaciar en Km² del nevado Ausangate durante los años 1996 - 2005

En la figura Nro. 72 se observa el comportamiento del área glaciar en km² del nevado Ausangate durante los años 1996 a 2005. Se evidencia una tendencia notable a la baja dentro de estos años, siendo el punto más bajo en el año 2005 con 27.34 km², así mismo se observa una tendencia a bajar durante el año 1998; sin embargo, existe un aumento durante el año 2002, finalmente se da una pérdida en años posteriores durante el último periodo.

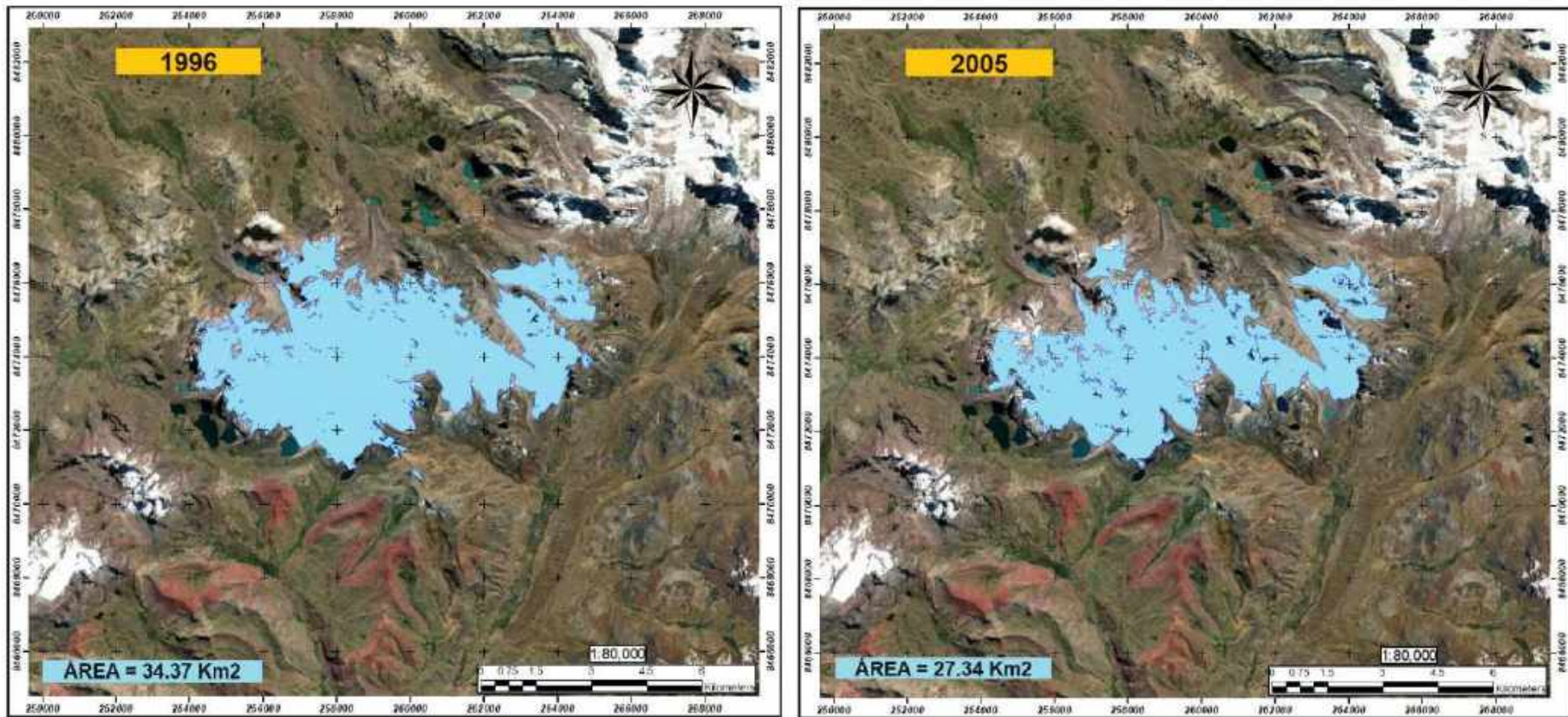


Figura 75. Comparación del área glaciar del nevado Ausangate de los años 1996 y 2005

En la figura Nro. 74 se observa que existe variación en las áreas entre los años 1996 y 2005, puesto que cuentan con áreas glaciares de 34.37 y 27.34 Km^2 respectivamente, esto indica una pérdida significativa del área glaciar.

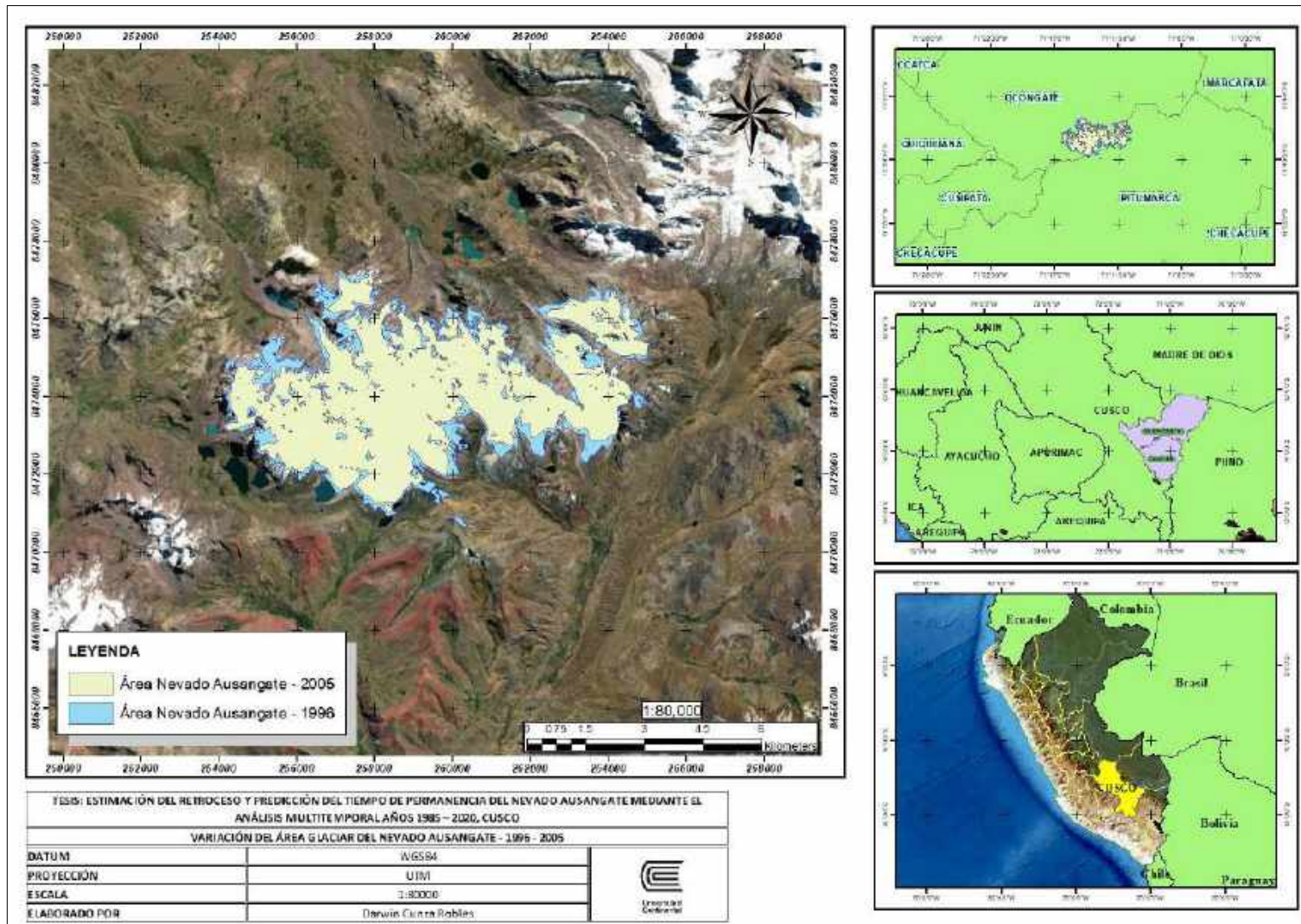


Figura 76. Variación del área glaciaria del nevado Ausangate durante los años 1996 - 2005

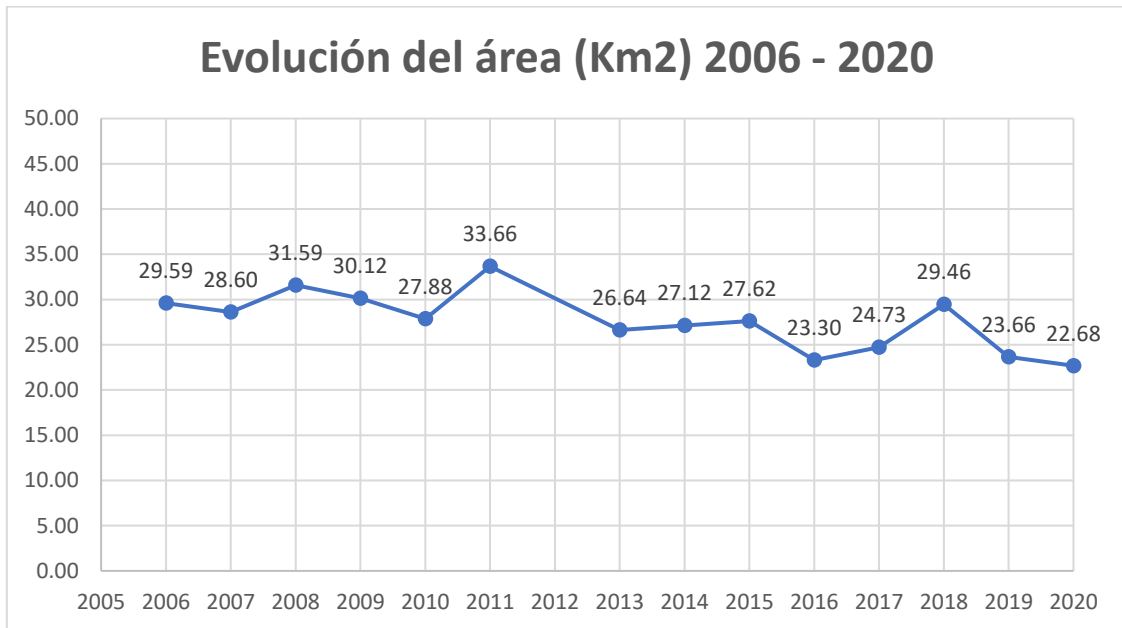


Figura 77. Comportamiento del área en km^2 del nevado Ausangate durante los años 2006 - 2020

En la figura Nro. 76 se observa el comportamiento del área glaciaria en km^2 del nevado Ausangate durante los años 2006 a 2020. Se evidencia una tendencia notable a la baja dentro de estos años, siendo el punto más bajo en el año 2020 con 22.68 Km^2 , así mismo se observa una tendencia a bajar durante el último periodo.

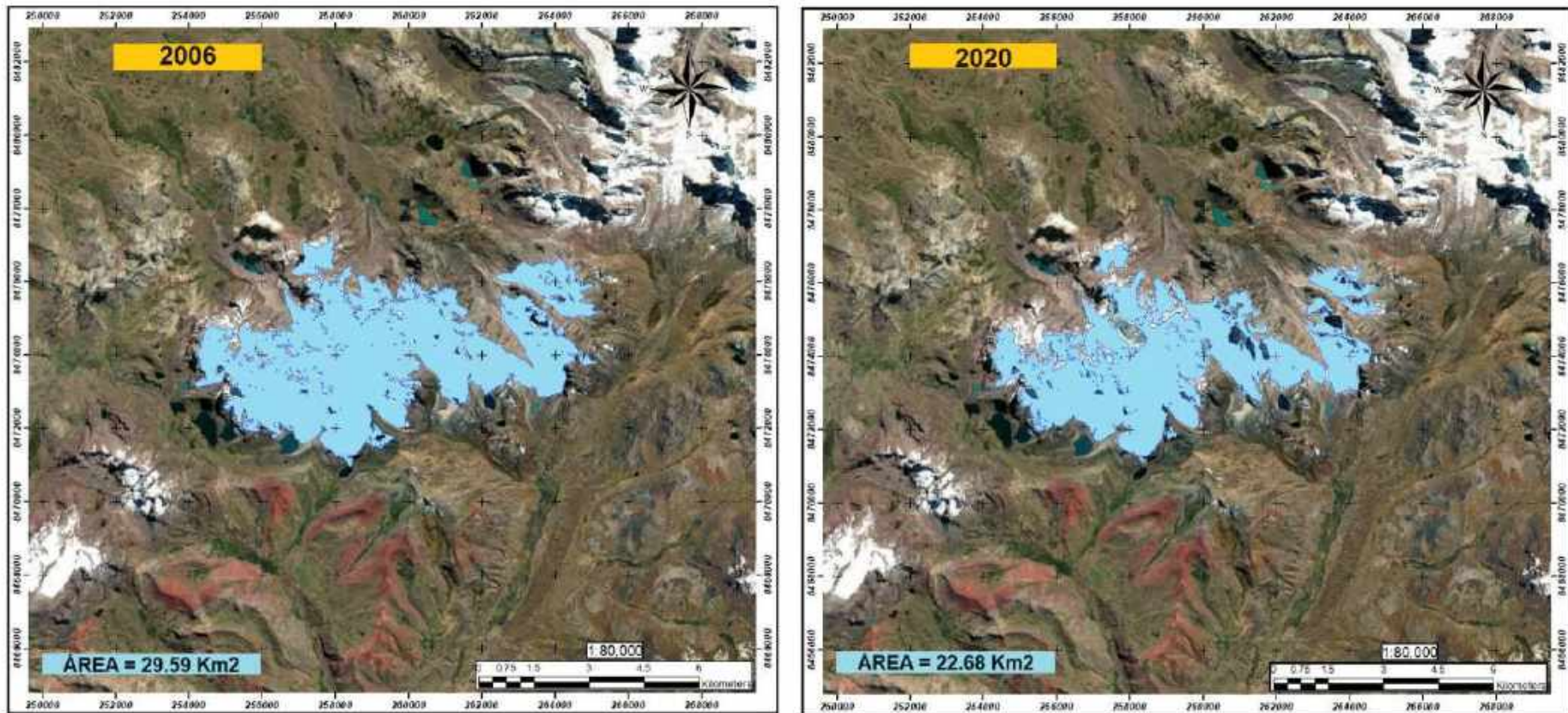


Figura 78. Comparación del área glaciar del nevado Ausangate de los años 2006 y 2020

En la figura Nro. 79 se observa que existe variación en las áreas entre los años 2006 y 2020, puesto que cuentan con áreas glaciares de 29.59 y 22.68 km² respectivamente, esto indica una pérdida significativa del área glaciar.

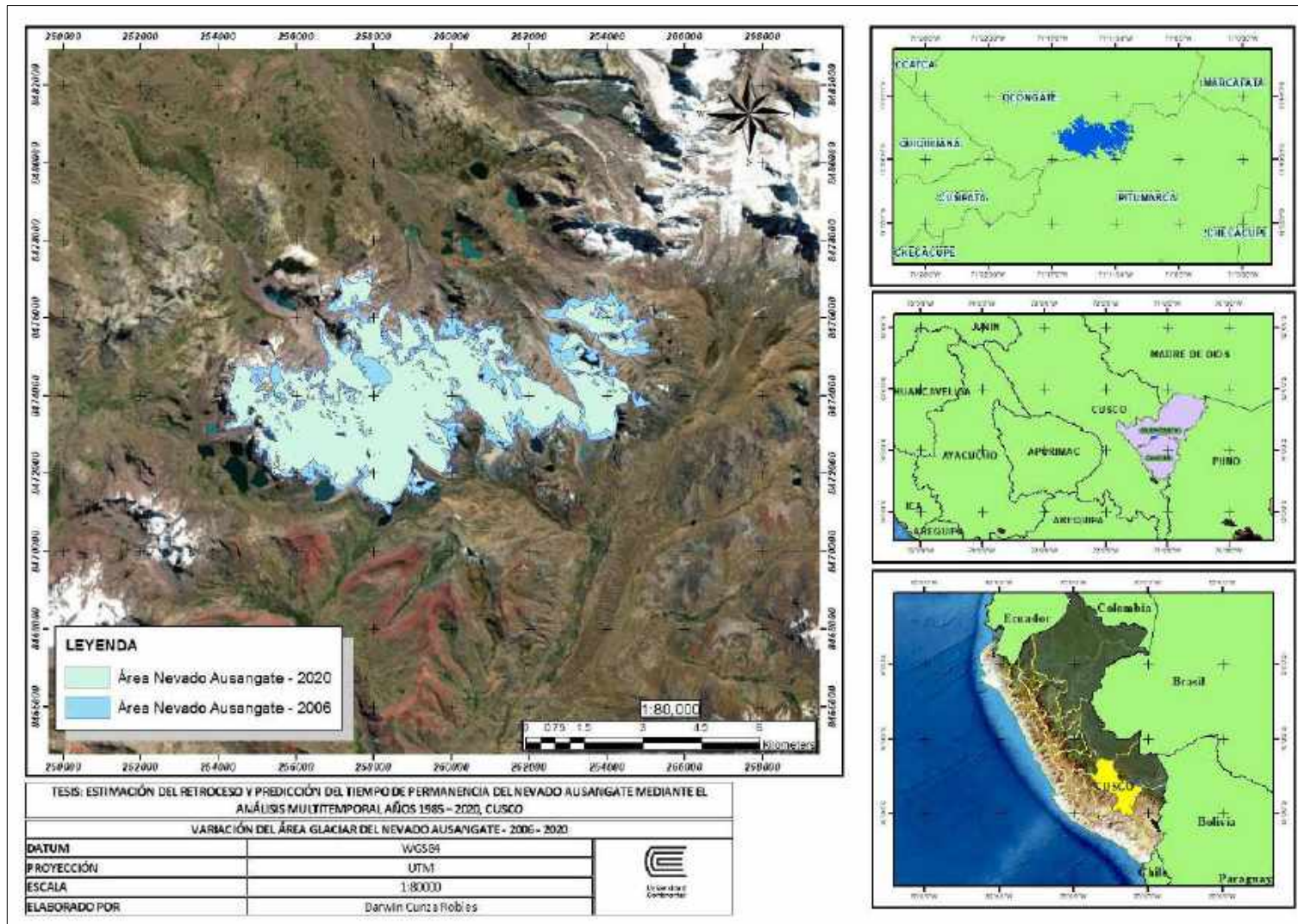


Figura 79. Variación del área glaciara del nevado Ausangate durante los años 2006 - 2020

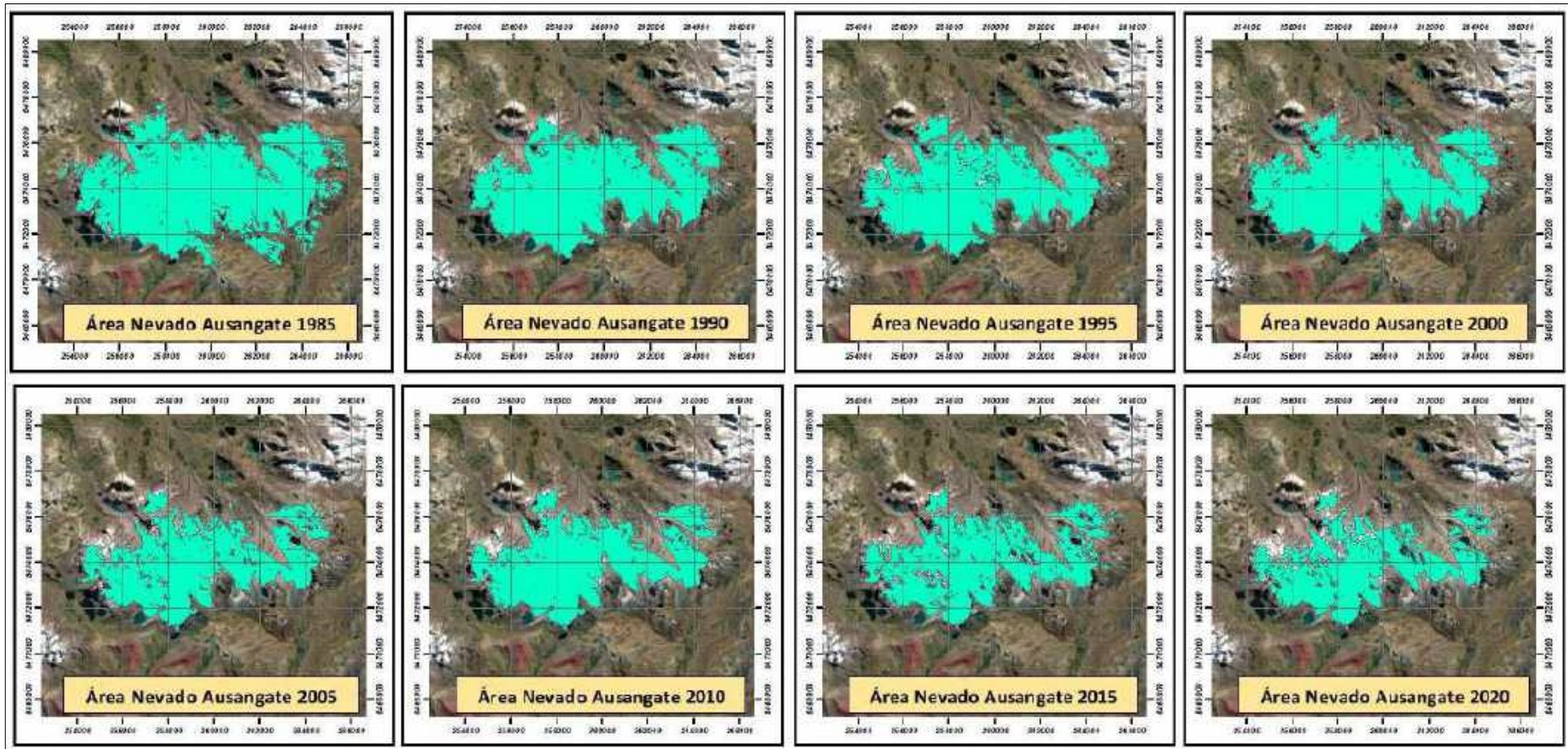


Figura 80. Variación del área glaciár del nevado Ausangate en intervalos de 5 años durante el periodo de 1985 a 2020

En la figura Nro. 80 se observa la variación del área de la cobertura glaciár del nevado Ausangate en intervalos de tiempo de 5 años, pudiendo apreciar que la mayor pérdida se da en el año 2020 con respecto a los años anteriores, por otra parte, la mayor presencia de área de cobertura glaciár se dio en el año 1985.

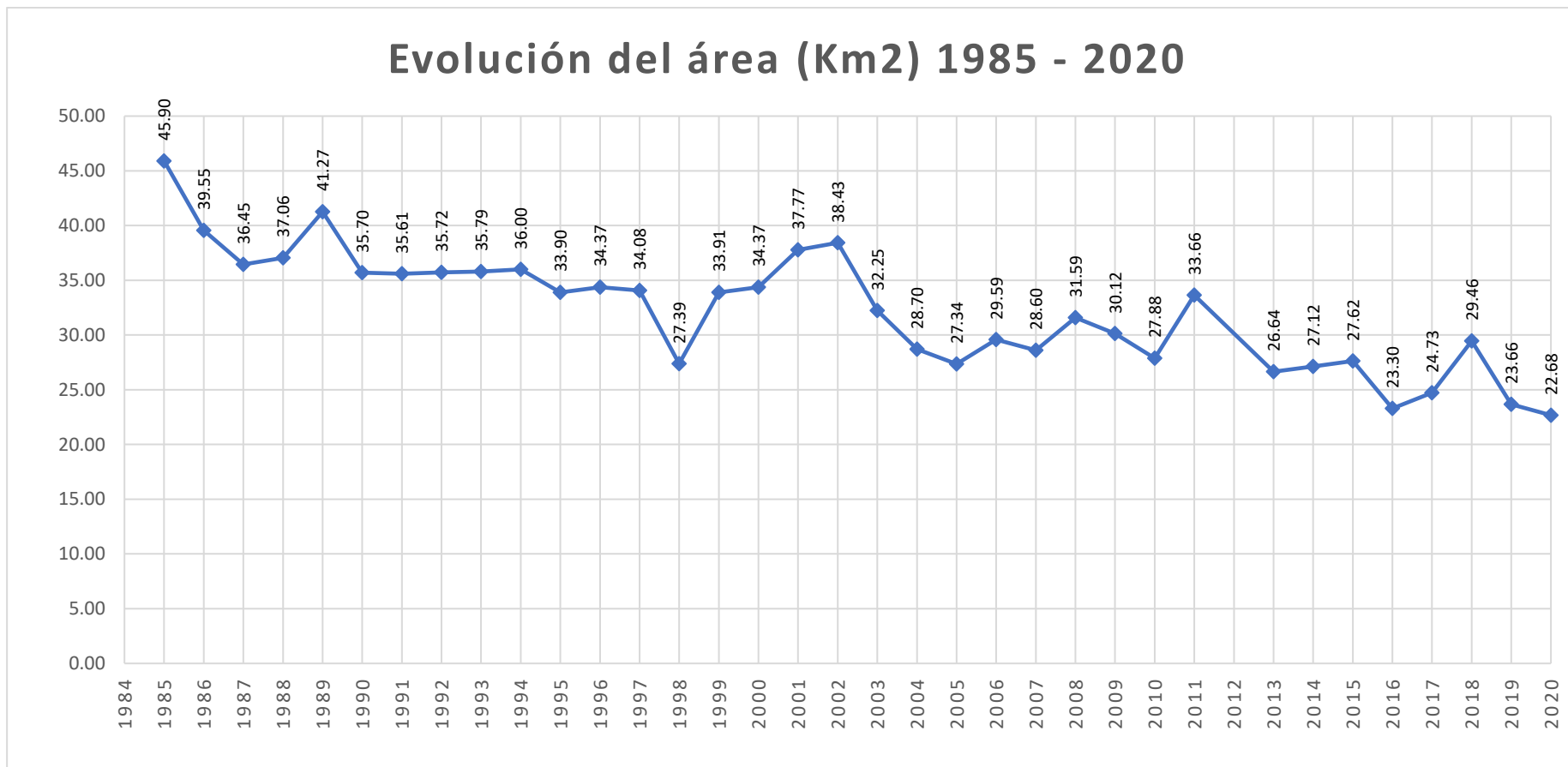


Figura 81. Comportamiento del área en Km² del nevado Ausangate durante los años 1985 - 2020

En la figura Nro. 81 se observa el comportamiento del área en km² de la cobertura glaciar del nevado Ausangate durante los años 1985 a 2020. Se evidencia una tendencia notable a la baja dentro de estos años, siendo el punto más bajo en el año 2020 con 22.68 Km², así mismo se observa una tendencia a bajar durante el último periodo.

Tabla 11. *Tabla de área por años*

Año	Satélite	Sensor	Área (ha)	Área (km²)
1985	LANDSAT 5	TM	4590.2333	45.90
1986	LANDSAT 5	TM	3954.5581	39.55
1987	LANDSAT 5	TM	3645.1222	36.45
1988	LANDSAT 5	TM	3706.0764	37.06
1989	LANDSAT 5	TM	4127.4092	41.27
1990	LANDSAT 5	TM	3569.8598	35.70
1991	LANDSAT 4	TM	3560.5266	35.61
1992	LANDSAT 5	TM	3571.8984	35.72
1993	LANDSAT 5	TM	3578.9005	35.79
1994	LANDSAT 5	TM	3599.5441	36.00
1995	LANDSAT 5	TM	3390.4872	33.90
1996	LANDSAT 5	TM	3437.1327	34.37
1997	LANDSAT 5	TM	3407.5403	34.08
1998	LANDSAT 5	TM	2738.9035	27.39
1999	LANDSAT 5	TM	3390.5402	33.91
2000	LANDSAT 5	TM	3437.1612	34.37
2001	LANDSAT 5	TM	3776.6278	37.77
2002	LANDSAT 7	ETM	3842.8633	38.43
2003	LANDSAT 5	TM	3224.6669	32.25
2004	LANDSAT 5	TM	2870.0037	28.70
2005	LANDSAT 5	TM	2734.4194	27.34
2006	LANDSAT 5	TM	2959.368	29.59
2007	LANDSAT 5	TM	2859.7719	28.60
2008	LANDSAT 5	TM	3158.8253	31.59
2009	LANDSAT 5	TM	3012.4851	30.12
2010	LANDSAT 5	TM	2787.5877	27.88
2011	LANDSAT 5	TM	3365.6076	33.66
2012				*
2013	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2664.1989	26.64
2014	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2712.1794	27.12
2015	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2762.0121	27.62
2016	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2330.4163	23.30
2017	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2473.1441	24.73
2018	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2946.1485	29.46
2019	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2366.1728	23.66
2020	LANDSAT 8	OLI_TIRS	2267.6975	22.68

En la tabla Nro.11 se observa los valores de área de la cobertura glaciar en unidades de hectáreas

Nota: (*) Para el año 2012 no se logró encontrar una imagen satelital viable, puesto que para este año las imágenes que nos brindó la USGS tenían fallas.

(ha) y kilómetros cuadrados (km²), todos fueron obtenidos mediante el procesamiento de imágenes satelitales en el programa ArcGIS 10.5.

Para el año 1985 el área de cobertura glaciar del nevado Ausangate contaba con 45.90 km²; sin embargo, con el paso del tiempo el retroceso glaciar avanzó, disminuyendo el área del nevado, un claro ejemplo es para el año 1995 que fue de 33.90 km², mientras que en el año 2001 tuvo un incremento de 37.77 km²; en el año 2016 el área del nevado tuvo un total de 23.30 km², pero para el 2020 que fue el último año de estudio esta área llegó a 22.68 km², por lo que a pesar de

los incrementos que hubo en determinados años, estos no han llegado al área inicial de 1985, por lo que se observa una pérdida progresiva del glaciar del Nevado Ausangate.

La pérdida del área de cobertura glaciar del nevado Ausangate, este presenta muchas variaciones con el paso de los años, en los que se ha observado disminución como también incremento, pero a pesar de ello, la tendencia es a reducir su área, por lo que hasta el año 2020, ha perdido un total de 23.22 km², este dato representa el 50.59% del área que tenía el nevado para el año 1985.

4.1.2. Resultados para el OE2

Los resultados con respecto al “**OE2:** Cuantificar la variación del perímetro glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco” son los siguientes:

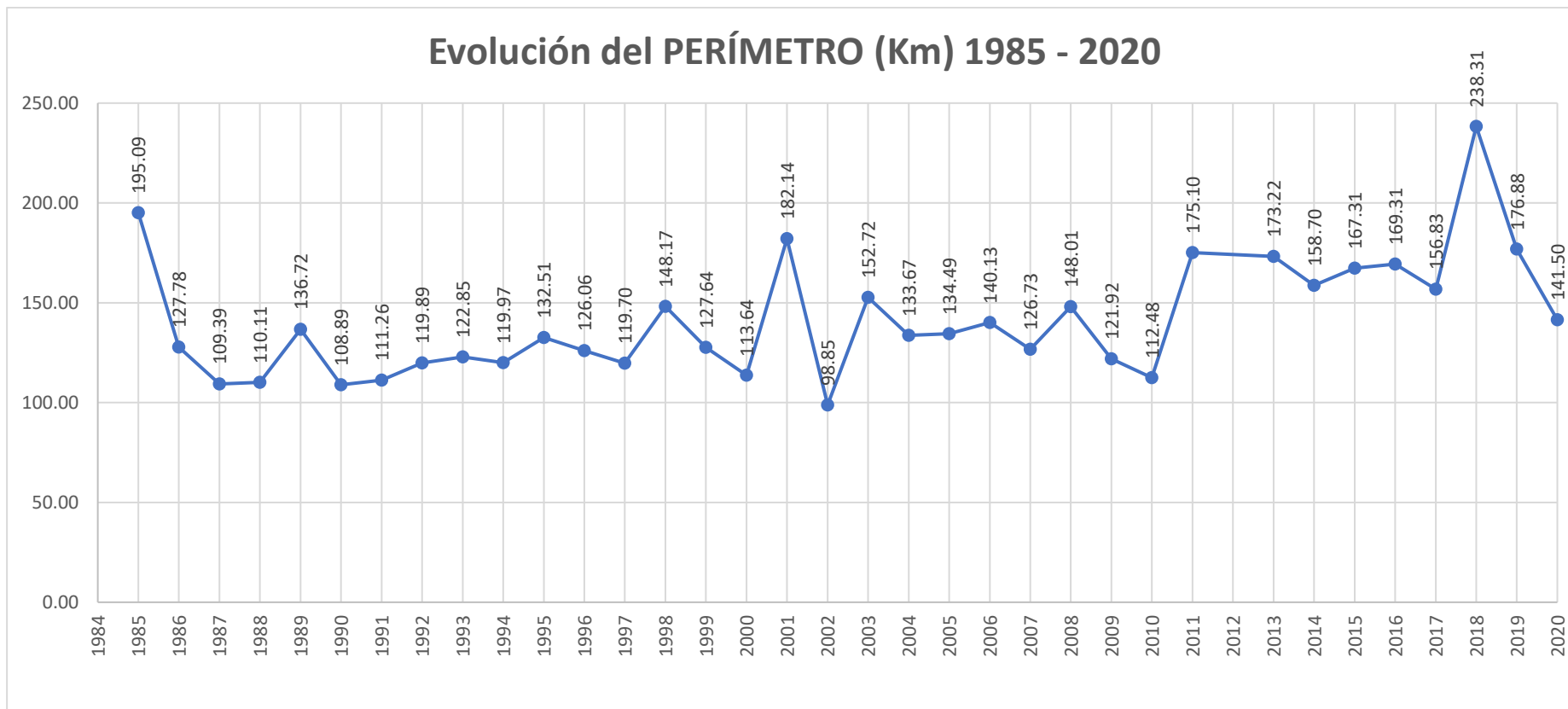


Figura 82. Comportamiento del perímetro en km del nevado Ausangate durante los años 1985 - 2020

En la Figura Nro. 83 se observa el comportamiento del perímetro de nieve del nevado Ausangate, el cual se evidencia una clara tendencia a la disminución, teniendo el punto más alto en el año 2018 con un perímetro de 238.31 km y el punto más bajo en 2002 con perímetro de 98.85 km. Durante estos años el nevado Ausangate presentó retroceso, lo cual generó la partición del área inicial de su cobertura glaciar, dando así origen a subáreas de cobertura glaciar dentro de la misma área inicial, es por ellos que el perímetro aumentó y tiene variaciones durante el intervalo de tiempo estudiado.

Tabla 12. *Tabla de perímetro por años*

Año	Satélite	Sensor	Perímetro (km)
1985	LANDSAT 5	TM	195.0868
1986	LANDSAT 5	TM	127.7836
1987	LANDSAT 5	TM	109.3927
1988	LANDSAT 5	TM	110.1075
1989	LANDSAT 5	TM	136.7209
1990	LANDSAT 5	TM	108.8916
1991	LANDSAT 4	TM	111.2557
1992	LANDSAT 5	TM	119.887
1993	LANDSAT 5	TM	122.8529
1994	LANDSAT 5	TM	119.9706
1995	LANDSAT 5	TM	132.5138
1996	LANDSAT 5	TM	126.0648
1997	LANDSAT 5	TM	119.6961
1998	LANDSAT 5	TM	148.1691
1999	LANDSAT 5	TM	127.6405
2000	LANDSAT 5	TM	113.6393
2001	LANDSAT 5	TM	182.1405
2002	LANDSAT 7	ETM	98.847
2003	LANDSAT 5	TM	152.7223
2004	LANDSAT 5	TM	133.6669
2005	LANDSAT 5	TM	134.4931
2006	LANDSAT 5	TM	140.1305
2007	LANDSAT 5	TM	126.7346
2008	LANDSAT 5	TM	148.0138
2009	LANDSAT 5	TM	121.9227
2010	LANDSAT 5	TM	112.4789
2011	LANDSAT 5	TM	175.0975
2012			*
2013	LANDSAT 8	OLI_TIRS	173.2167
2014	LANDSAT 8	OLI_TIRS	158.7027
2015	LANDSAT 8	OLI_TIRS	167.308
2016	LANDSAT 8	OLI_TIRS	169.3103
2017	LANDSAT 8	OLI_TIRS	156.8315
2018	LANDSAT 8	OLI_TIRS	238.3077
2019	LANDSAT 8	OLI_TIRS	176.8761
2020	LANDSAT 8	OLI_TIRS	141.497

Nota: (*) la ausencia del dato referente al año 2012 se debe a no contar con una imagen satelital en buen estado en la página de la USGS para ese periodo de tiempo.

La tabla Nro. 12 muestra la variación del perímetro en km del área glaciar del nevado Ausangate durante los años 1985 a 2020.

El perímetro del nevado Ausangate evidencia una clara tendencia a la disminución; sin embargo, presenta subidas y bajadas durante los años, por ejemplo, para el año 1985 presenta 195.09 km, mientras que el año 1990 presento una disminución a tan solo 108.89 km, y para el año 2005 un incremento a 134.49 km, teniendo el punto más alto en 2018 con un perímetro de 238.31 km y el punto más bajo en 2002 con perímetro de 98.847 km. Para el año 2020 presenta un perímetro de 141.50 km.

4.1.3. Resultados para el OE3

Los resultados con respecto al “OE3: Estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.” son basados en la ecuación de modelo de regresión lineal brindada por el paquete estadístico Excel.

- **Modelo de Regresión**

Tabla 13. Estadística de la regresión realizada en el paquete estadístico Excel para el retroceso glaciar del Nevado Ausangate durante el periodo de 1985 a 2020

Estadísticas de la regresión	
Coefficiente de correlación múltiple	0.858308288
Coefficiente de determinación R ²	0.736693117
R ² ajustado	0.72871412
Error típico	2.83269569
Observaciones	35

Tabla 14. Análisis de varianza

	Grados de libertad	Suma de cuadrados	Promedio de los cuadrados	F	Valor crítico de F
Regresión	1	740.863472	740.863472	92.3290441	4.3556E-11
Residuos	33	264.797441	8.02416487		
Total	34	1005.66091			

- **Prueba de autocorrelación serial**

H0: No existe autocorrelación serial

H1: Existe autocorrelación

Tabla 15. Cálculo de valores para determinar la prueba de Durbin - Watson

Observación	Pronóstico área (km ²)	Residuos = e _t	e ²	e _{t-1}	(e _t - e _{t-1}) ²
1	39.8493898	6.05294318	36.6381212		
2	39.4073869	0.13819408	0.0190976	6.05294318	34.984257
3	38.965384	-2.514162	6.32101073	0.13819408	7.03499293
4	38.5233811	-1.4626171	2.1392489	-2.514162	1.10574666
5	38.0813783	3.19271375	10.1934211	-1.4626171	21.6721057
6	37.6393754	-1.9407774	3.76661676	3.19271375	26.352731
7	37.1973725	-1.5921065	2.534803	-1.9407774	0.12157139
8	36.7553696	-1.0363856	1.07409506	-1.5921065	0.30882571
9	36.3133667	-0.5243617	0.27495518	-1.0363856	0.26216847
10	35.8713638	0.12407721	0.01539515	-0.5243617	0.420473
11	35.4293609	-1.5244889	2.32406641	0.12407721	2.71777021
12	34.987358	-0.616031	0.37949421	-1.5244889	0.82529574
13	34.5453551	-0.4699521	0.22085499	-0.616031	0.02133904

14	34.1033522	-6.7143172	45.0820558	-0.4699521	38.9920956
15	33.6613493	0.24405266	0.0595617	-6.7143172	48.4189115
16	33.2193464	1.15226556	1.32771591	0.24405266	0.82485066
17	32.7773436	4.98893445	24.8894669	1.15226556	14.7200282
18	32.3353407	6.09329234	37.1282115	4.98893445	1.21960635
19	31.8933378	0.35333123	0.12484296	6.09329234	32.9471535
20	31.4513349	-2.7512979	7.56964001	0.35333123	9.6387219
21	31.009332	-3.665138	13.4332365	-2.7512979	0.83510374
22	30.5673291	-0.9736491	0.94799256	-3.665138	7.24411245
23	30.1253262	-1.5276072	2.33358377	-0.9736491	0.30686959
24	29.6833233	1.90492969	3.62875712	-1.5276072	11.7823095
25	29.2413204	0.88353058	0.78062628	1.90492969	1.04325614
26	28.7993175	-0.9234405	0.85274241	0.88353058	3.26514459
27	28.3573146	5.29876136	28.076872	-0.9234405	38.7157964
28	27.4733089	-0.8313199	0.6910927	5.29876136	37.5778957
29	27.031306	0.09048804	0.00818808	-0.8313199	0.84972979
30	26.5893031	1.03081793	1.0625856	0.09048804	0.8842203
31	26.1473002	-2.8431372	8.08342903	1.03081793	15.0075282
32	25.7052973	-0.9738563	0.94839607	-2.8431372	3.49421105
33	25.2632944	4.1981906	17.6248043	-0.9738563	26.750069
34	24.8212915	-1.1595635	1.34458752	4.1981906	28.7055291
35	24.3792886	-1.7023136	2.89787164	-1.1595635	0.29457768

- **Prueba de validación del modelo de regresión lineal**

Reemplazando en la fórmula:

$$DW = \frac{\sum_{t=2}^n (e_t - e_{t-1})^2}{\sum_{t=1}^n e_t^2}$$

$$DW = \frac{419.344998}{264.797441}$$

$$DW = 1.58364445$$

El resultado del estadístico de Durbin – Watson es igual al valor de 1.58364445, mediante esta prueba evaluamos la existencia de auto correlación. Este estadístico oscila entre 0 y 4, los valores menores a 2 indican autocorrelación serial positiva, y mayores de 2 autocorrelación serial negativa. Se puede asumir que el modelo cumple con el supuesto de independencia entre los residuos cuando este estadístico oscila entre los valores 1.5 y 2.5; en este caso, se afirma que el modelo cumple con el supuesto de independencia.

- **Predicción**

Mediante la regresión se pudo obtener la siguiente ecuación:

$$Y_i = -0.442(X_i) + 917.23$$

Dónde:

- **Y_i**: Área glaciar del nevado Ausangate (Variable Dependiente)
- **X_i**: Tiempo en años (Variable Independiente)

Para lo cual se obtuvo la siguiente figura:

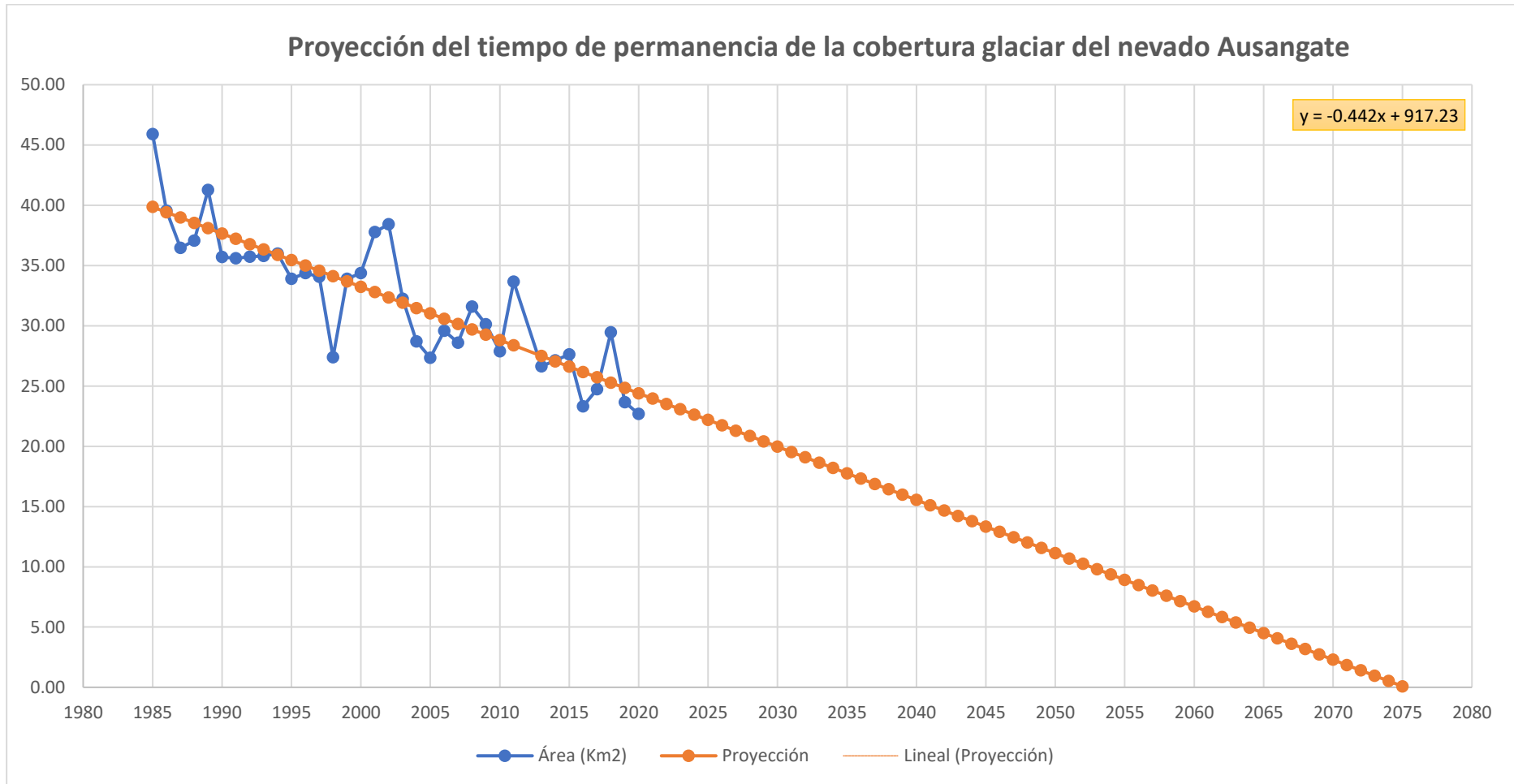


Figura 83. Proyección del tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate

Mediante el modelo de regresión lineal se estimó el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate en el periodo 1985 – 2020. Se determinó que, mediante las mismas condiciones climáticas, el área total se reduciría totalmente en aproximadamente 5 a 6 décadas, estimando que para el año 2076 ya no se podrá apreciar cobertura glaciar en dicho nevado.

4.2. Discusión

En relación con el desarrollo del análisis de la investigación, se observó que el área de la cobertura glaciar del nevado Ausangate muestra una evidente tendencia a la disminución, presentando mayor cobertura en el año 1985 con 45,90 km² y menor área de cobertura glaciar para el año 2020 con 22,68 km². Por otro lado, se evidenció que el periodo inicial como final se sitúan en el punto más alto y más bajo, respectivamente. En base a ello, se puede comparar con el estudio del análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruiz del periodo 1999-2016 (10). Este estudio menciona que los resultados del análisis multitemporal sugieren que hubo un retroceso de hielo desde el año 1999 hasta el año 2016 en su cubierta de hielo de 21%. Dicho estudio fue realizado en base al cambio climático que se ha presentado en nuestro planeta, permitiéndonos observar lo que está ocurriendo en los nevados de Colombia, en el caso del volcán nevado del Ruiz. En el presente estudio, se apreció una disminución según a cada año, y es similar al estudio de investigación de Salas y Duarte (10), que menciona que del año 1999 al año 2016 hubo dicha disminución con áreas de cobertura glaciar de 26,48 km² y 5,72 km², respectivamente.

De igual forma, en el estudio del glaciar del nevado Cotopaxi en Ecuador durante los años 1998 y 2016, Díaz y Cárdenas (11) mencionan que para el año 1998 el área de cobertura glaciar del nevado fue de 28 km², mientras que para el año 2016 presentó un área de cobertura glaciar mucho menor, representada en 13 km². De esta forma, la presente investigación concuerda con el estudio de Díaz y Cárdenas (11).

Como se observa en los resultados, el área glaciar va en disminución con el paso de los años. Esto se evidencia en el estudio realizado en la cobertura glaciar de los nevados Allin Capac y Chichi Capac en Perú, que muestra que en determinadas áreas de glaciares se observa una disminución con el paso del tiempo. En base a ello, se puede citar el estudio de Díaz et al. (12), debido a que esta investigación, al utilizar dimensiones similares, permite comparar los resultados del retroceso glaciar. Este estudio muestra que hubo una fuerte disminución de la cubierta de hielo en las cadenas montañosas entre los años 1975 y 2015. En 1975, el área cubierta por glaciares era de 52,3 km², mientras que en 2015 disminuyó a 16,9 km², perdiendo un total de 35,6 km² durante este periodo de tiempo. De esta forma, los resultados de la presente investigación concuerdan con el retroceso glaciar observado en Perú y en el mundo en general. El cambio climático está incidiendo directamente en los cuerpos de hielo de todo el mundo.

En base al comportamiento de la evolución del área de cobertura glaciar, se observa que el nevado Ausangate presentó una disminución del área de cobertura glaciar de aproximadamente el 50,59

% en el periodo 1985-2020. Mediante el modelo de regresión lineal, se estimó que el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate se reduciría en su totalidad en aproximadamente 53 años. En concordancia con el estudio de Aedo y Quispe (16), se evidencia que, si hay un retroceso de hielo desde 1995 hasta 2021 en su cubierta de hielo de 85 %, siguiendo la tendencia glaciar del nevado Chicón, hasta el año 2030 tendrá una pérdida total de hielo. Como se observa en el presente estudio, se hace una predicción de que para el año 2076 no habrá hielo en el área de cobertura glaciar del nevado Ausangate. De igual forma, el estudio de Aedo y Quispe (16) estima que para el año 2030 no habrá hielo en su área de estudio.

En relación con los resultados del análisis estadístico, el coeficiente de determinación (R^2) fue de 0,7287. Esto indica que las variables independientes, años, explican el 72,87 % de la variabilidad del área total en km^2 del nevado Ausangate. Asimismo, el modelo presenta un coeficiente de determinación ajustado (R^2 ajustado) de 0,6787, el cual está basado en el número de casos y variables independientes utilizados (grados de libertad). En base a ello, se utilizó el software ArcGIS 10.5 para determinar el área y perímetro de la superficie de hielo. En concordancia con lo anterior, se puede comparar el presente estudio con el estudio de Follanos y Sarmientos (15), el cual también utilizó imágenes satelitales del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). De igual forma, el estudio de Aedo y Quispe (16) es similar al presente estudio, ya que ambos utilizaron el mismo software de sistema de información geográfica y lo expresan en un determinado intervalo de tiempo, que en el caso del estudio de Aedo y Quispe es el año actual del estudio, tal como el presente estudio.

CONCLUSIONES

1. Según los resultados obtenidos, se ha evidenciado que, con el paso de los años, el área de la cobertura glaciar del nevado Ausangate no se ha mantenido de forma constante. En algunos años, presenta incrementos, mientras que en otros ha disminuido; sin embargo, exhibe una tendencia a la reducción, ya que en ningún año se ha observado que su recuperación se aproxime a su área inicial.
2. El perímetro de la cobertura glaciar del nevado Ausangate varía, ya que a lo largo de los años estudiados se originaron subáreas en el área inicial analizada en 1985. Esto provoca un aumento en el perímetro debido a la existencia de un mayor número de subáreas.
3. El año estimado para que el área de la cobertura glaciar del nevado Ausangate desaparezca completamente es el 2076.

RECOMENDACIONES

1. El gobierno regional y local, en coordinación con las instituciones pertinentes, deben diseñar y promover los instrumentos de gestión que ayuden a evitar los efectos negativos de las actividades de los pobladores y la actividad turística. Asimismo, deben ser parte del diseño del marco normativo y regulatorio hacia una economía baja en emisiones de GEI (Gases de Efecto Invernadero).
2. Se recomienda a la población tomar medidas de mitigación para evitar el acelerado retroceso glaciar, tales como la implementación de charlas de educación ambiental a los visitantes y la correcta disposición de los residuos sólidos. También se sugiere regular el aforo turístico, así como incentivar la conciencia ambiental en todas las personas.
3. Es recomendable replicar este estudio en otras zonas glaciares y llevar a cabo un monitoreo integrado para obtener información más amplia que permita un mejor manejo de los factores que intervienen en el retroceso glaciar.
4. Se recomienda realizar estudios en las lagunas glaciares de alta montaña de nuestra zona de estudio, dado que representan un peligro para los habitantes de la cuenca baja. El potencial de desborde puede generar la ruptura del dique morrénico debido a su constante crecimiento, lo que conllevaría a desastres naturales.
5. Para la mitigación y adaptación ante la pérdida del recurso hídrico, se recomienda que las autoridades desarrollen proyectos de inversión pública ecológicos y de infraestructuras naturales. Estos proyectos deben ser viables tanto en términos presupuestarios como en su ejecución.
6. Se sugiere llevar a cabo estudios más exhaustivos mediante clasificación supervisada en otros nevados de nuestro país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. MAURICIO, S, CARDENAS, D, CARDENAS, P, SNAIDER, H, ALVARADO, M, GALINDO, F, SANABRIA, F and GÓMEZ-NEITA, S. Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín de Geología*. Online. 2022. Vol. 44, p. 25. [Accessed 25 February 2023]. DOI 10.18273/revbol.
2. FELL, S, CARRIVICK, J, CAUVY-FRAUNIÉ, S, CRESPO-PÉREZ, V, HOOD, E, RANDALL, K, NICHOLASS, K, TIEGS, S, DUMBRELL, A and BROWN, L. Fungal decomposition of river organic matter accelerated by decreasing glacier cover. *Nature Climate Change*. Online. 1 April 2021. Vol. 11, no. 4, p. 349–353. [Accessed 7 March 2023]. DOI 10.1038/S41558-021-01004-X.
3. HUSS, M., BOOKHAGEN, B., HUGGEL, C., JACOBSEN, D., BRADLEY, R. S., CLAGUE, J. J., VUILLE, M., BUYTAERT, W., CAYAN, D. R., GREENWOOD, G., MARK, B. G., MILNER, A. M., WEINGARTNER, R. and WINDER, M. Toward mountains without permanent snow and ice. *Earth's Future*. 1 May 2017. Vol. 5, no. 5, p. 418–435. DOI 10.1002/2016EF000514.
4. MEDINA, G and MEJÍA, A. Análisis multitemporal y multifractal de la deglaciación de la Cordillera Parón en los Andes de Perú. *Ecología Aplicada*. Online. 30 June 2014. Vol. 13, no. 1–2, p. 8. [Accessed 7 March 2023]. DOI 10.21704/REA.V13I1-2.452.
5. INAIGEM. *Inventario Nacional de Glaciares Las Cordilleras Glaciares del Perú 2018*. Online. Huaraz, 2018. [Accessed 11 March 2023]. Available from: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/items/69842963-64e0-4de9-9c24-f886a5c5a40d>
6. CAUVY-FRAUNIÉ, S and DANGLES, O. A global synthesis of biodiversity responses to glacier retreat. *Nature Ecology & Evolution* 2019 3:12. Online. 18 November 2019. Vol. 3, no. 12, p. 1675–1685. [Accessed 7 March 2023]. DOI 10.1038/s41559-019-1042-8.
7. INAIGEM. *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares*. Online. Ministerio. Huaraz, 2017. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <https://repositorio.inaigem.gob.pe/server/api/core/bitstreams/88036211-5ecc-461f-8938-71895a8439e1/content>
8. MONTERROSO, M, SAMSONOV, S and LONDOÑO, J. Estimación del retroceso glaciar en los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa Isabel, Colombia a través de imágenes ópticas y Din-SAR. *DYNA*. Online. 2018. Vol. 85, p. 10. [Accessed 2 June 2023]. DOI 10.15446/dyna.v85n206.66570.
9. RICO, I. *Los glaciares de los Pirineos. Estudio glaciológico y dinámica actual en el contexto del cambio global*. Online. 2019. [Accessed 7 March 2023]. Available from: <http://addi.ehu.es/handle/10810/33085>

10. SALAS, C and DUARTE, K. Análisis del retroceso glaciar del volcán nevado del Ruíz, mediante un estudio multitemporal de imágenes satelitales del periodo 1999-2016. *Revista de Topografía AZIMUT*. Online. 2018. Vol. 9, p. 8. [Accessed 7 March 2023]. Available from: <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/azimut/article/view/13214/13674>
11. DÍAZ, V and CÁRDENAS, E. Análisis multitemporal del retroceso glaciar del volcán nevado Cotopaxi- Ecuador, entre los años 1998, 2007 y 2016. *CONGRESO IGA-2017*. Online. 2017. P. 5. [Accessed 8 March 2023]. Available from: https://repository.udca.edu.co/bitstream/handle/11158/1426/Manuscrito_5.pdf?sequence=1&isAllowed=y
12. DÍAZ, R, SANCHEZ, S, LUJANO, E and LUJANO, A. Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciar en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. *Revista Investigaciones Altoandinas*. Online. 2017. Vol. 19, no. 3, p. 265–274. [Accessed 11 March 2023]. DOI 10.18271/ria.2017.291.
13. PAUCAR, J. *Estudio de retroceso glaciar en el santuario nacional de ampay y determinación de su influencia en la agricultura de la comunidad de huayllabamba, distrito de Abancay, año 2016*. Online. Universidad Tecnológica de los Andes, 2018. [Accessed 11 March 2023]. Available from: <https://repositorio.utea.edu.pe/handle/utea/113>
14. GAITA, M. *Cuantificación e impacto del retroceso glaciar sobre los recursos naturales determinados mediante el SIG y teledetección - Microcuenca Lullán, Ancash - Perú*. Online. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2017. Available from: <https://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/2913>
15. FOLLANOS, A and SARMIENTOS, J. *Evaluación de la regresión glaciar de los nevados Salkantay y Veronica mediante el análisis multi-temporal entre los años 1990-2020, Cusco*. Online. Universidad César Vallejo, 2020. [Accessed 7 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/60800>
16. AEDO, J and QUISPE, W. *Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre los años 1985-2021, Cusco*. Online. Universidad Cesar Vallejo, 2022. [Accessed 11 March 2023]. Available from: <https://repositorio.ucv.edu.pe/handle/20.500.12692/91586?locale-attribute=es>
17. NACIONES UNIDAS. Convenio Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático. In : Online. 2012. p. 27. [Accessed 19 May 2023]. Available from: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
18. IPCC. *Tercer Informe de Evaluación del Cambio Climático 2001*. Online. 2021. [Accessed 11 April 2023]. Available from: https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/TAR_syrfull_es.pdf

19. JOHANSEN, K, ALFTHAN, B, BAKER, E, HESPING, M, SCHOOLMEESTER, T and VERBIST, K. *Atlas de glaciares y aguas andinos. El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. Online. Ediciones. PARIS, 2018. [Accessed 19 May 2023]. ISBN 978-92-3-300103-9. Available from: <https://app.ingemmet.gob.pe/biblioteca/pdf/Lib-107.pdf>
20. TARBUCK, E and LUTGENS, F. *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. Online. Madrid, 2005. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <http://www.xeologosdelmundu.org/wp-content/uploads/2016/03/TARBUCK-y-LUTGENS-Ciencias-de-la-Tierra-8va-ed.-1.pdf>
21. BÓRQUEZ, R. *Universidad de Chile facultad de ciencias agrónomas escuela de agronomía análisis del escenario actual de los glaciares de montaña en Chile desde la mirada de la seguridad ecológica*. Online. 2007. [Accessed 19 May 2023]. Available from: https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/101863/borquez_r.pdf?sequence=4&isAllowed=y
22. LABORATORIO DE GLACIOLOGÍA. Clasificación de glaciares según formas. *Laboratorio de Glaciología*. Online. 2023. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <https://glaciologia.cl/glosario/glosario-pag-1/clasificacion-de-glaciares-segun-formas/>
23. FIGUEROA, A. Cerro El Brujo - Andeshandbook. *Andeshandbook*. Online. 2019. [Accessed 28 August 2023]. Available from: https://www.andeshandbook.org/montanismo/cerro/1035/El_Brujo
24. +8000. Trekking al Volcán Sollipulli. +8000. Online. 2021. [Accessed 28 August 2023]. Available from: <https://mas8000.cl/trekking-al-volcan-sollipulli/>
25. CORONATO, A, BUJALESKY, G, RABASSA, J and ACEVEDO, R. El Canal Beagle: Un paisaje marino esculpido por el hielo. *Sitios de Interés Geológicos de la República Argentina*. Online. 2008. P. 18. [Accessed 28 August 2023]. Available from: <https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/156011>
26. ACEVEDO, E and HERNANDEZ, R. Volcán Palomo - Glaciar Universidad -. *Andeshandbook*. Online. 2015. [Accessed 28 August 2023]. Available from: https://www.andeshandbook.org/montanismo/ruta/513/Glaciar_Universidad
27. MARTINEZ, F. Glaciar Navarro, un glaciar del Fiordo De Agostini. *Fundación glaciares Chilenos*. Online. 2020. [Accessed 28 August 2023]. Available from: <https://www.glaciareschilenos.org/lugares/glaciar-navarro-un-glaciar-del-fiordo-de-agostini/>
28. ALVA, M and MELÉNDEZ, J. Aplicación de la Teledetección para el análisis multitemporal de la regresión glaciar en la Cordillera Blanca. *Investigaciones Socviales*. 2009. Vol. 13, p. 71–83.

29. GARCÍA, L. Nieve y granizo: conceptos básicos . *Revista del Aficionado a la Meteorología (RAM)*. Online. January 2010. Vol. 25, no. 3, p. 5. [Accessed 11 April 2023]. Available from: <https://www.divulgameteo.es/uploads/Nieve-granizo-LGP.pdf>
30. RYU, H and HONG, S. Sea fog detection based on normalized difference snow index using advanced himawari imager observations. *Remote Sensing*. Online. 1 May 2020. Vol. 12, no. 9, p. 18. [Accessed 11 April 2023]. DOI 10.3390/RS12091521.
31. CUADROS, S. *Estimación de la pérdida del área glaciar en la cuenca de la laguna Parón - Parque Nacional Huascarán (Cordillera Blanca)*. Online. Universidad Nacional Agraria La Molina, 2018. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/20.500.12996/3835>
32. PAZOS, A. *Impacto del material particulado PM 2.5 en la fusión del glaciar Incachiriasca, distrito de Machupicchu, provincia de Urubamba, región Cusco 2021*. Online. Universidad Continental, 2021. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <https://repositorio.continental.edu.pe/handle/20.500.12394/10538>
33. MINISTERIO DEL AMBIENTE. Cusco: Área de conservación regional Ausangate contribuye a reducir la vulnerabilidad de especies y ecosistemas frente al cambio climático. *Plataforma del estado Peruano estado Peruano*. Online. 2020. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <https://www.gob.pe/institucion/minam/noticias/320060-cusco-area-de-conservacion-regional-ausangate-contribuye-a-reducir-la-vulnerabilidad-de-especies-y-ecosistemas-frente-al-cambio-climatico>
34. SCHAUWECKER, S, ROHRER, M, HUGGEL, C, ENDRIES, J, MONTOYA, N, NEUKOM, R, PERRY, B, SALZMANN, N, SCHWARB, M and SUAREZ, W. The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Online. 2017. Vol. 122, no. 10, p. 5172–5189. [Accessed 27 May 2023]. DOI 10.1002/2016JD025943.
35. CHUVIECO, E. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Online. 2. Madrid, 1995. [Accessed 11 April 2023]. Available from: <http://cursosihlla.bdh.org.ar/Sist. Cart. y Teledet./Bibliografia/FUNDAMENTOS-DE-TELEDETECCION-EMILIO-CHUVIECO.pdf>
36. ZHANG, J, JIA, L, MENENTI, M, ZHOU, J and REN, S. Glacier area and snow cover changes in the range system surrounding tarim from 2000 to 2020 using google earth engine. *Remote Sensing*. Online. 1 December 2021. Vol. 13, no. 24, p. 5117. [Accessed 11 April 2023]. DOI 10.3390/RS13245117/S1.
37. SILVERIO, W and JAQUET, J. Glacial cover mapping (1987-1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*. Online. 15 April

2005. Vol. 95, no. 3, p. 342–350. [Accessed 11 April 2023]. DOI 10.1016/J.RSE.2004.12.012.
38. GORELICK, N, HANCHER, M, DIXON, M, ILYUSHCHENKO, S, THAU, D and MOORE, R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*. Online. 1 December 2017. Vol. 202, p. 18–27. [Accessed 11 April 2023]. DOI 10.1016/J.RSE.2017.06.031.
 39. THAPA, R. Remote Sensing Concepts and Applications. Online. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <https://www.icimod.org/team/rajesh-bahadur-thapa/>
 40. BRAVO, F. *Teledetección espacial*. Online. Huanuco, 2017. [Accessed 2 June 2023]. Available from: https://issuu.com/ninoobravomorales/docs/libro_teledeteccion_espacial_2017
 41. RICHARDS, J. Remote sensing digital image analysis. *Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction*. Online. 1 October 2013. Vol. 9783642300, p. 1–494. [Accessed 2 June 2023]. DOI 10.1007/978-3-642-30062-2/COVER.
 42. NASA. *Landsat 7 Science Data Users Handbook*. Online. Goddard Space Flight Center in Greenbelt, 2011. [Accessed 2 June 2023]. Available from: https://landsat.gsfc.nasa.gov/wp-content/uploads/2016/08/Landsat7_Handbook.pdf
 43. CHUVIECO, E. *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio*. Online. 1a. ed. Barcelona, 2010. [Accessed 2 June 2023]. Available from: https://bibliotecadigital.uchile.cl/discovery/fulldisplay?vid=56UDC_INST:56UDC_INST&tab=Everything&docid=alma991001205769703936&lang=es&context=L&adaptor=Local Search Engine&query=any,contains,the new nature of maps&facet=library,include,56UDC_INSTAQ06&of
 44. CENTREO VIRTUAL CERVANTES. Atlas ambiental del Mediterráneo. *Institut Català de la Mediterrània, Institut Cartogràfic de Catalunya*. Online. [Accessed 2 June 2023]. Available from: https://cvc.cervantes.es/obref/atlas/esp/interpretacion/interpretacion_02.htm
 45. ANALYTICS, EOS DATA. El Apilamiento De Índices De La Imagen (NDVI, NDWI, NDSI). Online. [Accessed 2 June 2023]. Available from: <https://eos.com/es/make-an-analysis/index-stack/>
 46. SERNANP. Cusco: nueva Área de Conservación Regional Ausangate ayudará a conservar glaciares. *Andina Agencia Peruana de Noticias*. Online. 2019. [Accessed 27 May 2023]. Available from: <https://andina.pe/agencia/noticia-cusco-nueva-area-conservacion-regional-ausangate-ayudara-a-conservar-glaciares-778119.aspx>
 47. ROJAS, D. *Relación de las variables meteorológicas y la fusión glaciaria de la zona de ablación y acumulación del glaciar Artesonraju y la estimación del volumen de agua aportado a la microcuenca, para los años hidrológicos 2004 al 2016*. Online. Universidad

- Nacional Santiago Antúnez de Mayolo, 2018. [Accessed 27 May 2023]. Available from: <http://repositorio.unasam.edu.pe/handle/UNASAM/2224>
48. NACIONES UNIDAS. *Convención marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático* Online. Nueva York, 1992. [Accessed 27 May 2023]. Available from: <https://unfccc.int/resource/docs/convkp/convsp.pdf>
 49. SCHAUWECKER, S, ROHRER, M, HUGGEL, Ch, ENDRIES, J, MONTOYA, N, NEUKOM, R, SALZMANN, N, SCHWARB, M and SUAREZ, W. The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*. Online. 2017. Vol. 122, no. 10, p. 18. [Accessed 27 May 2023]. DOI 10.1002/2016JD025943.
 50. ILLESAND, T, KIEFER, R and CHIPMAN, J. *Remote Sensing and Image Interpretation*. Online. 7. 2015. [Accessed 11 April 2023]. ISBN 978-1-119-12846-5. Available from: [https://www.wiley.com/en-
ie/Remote+Sensing+and+Image+Interpretation%2C+7th+Edition-p-9781119128465](https://www.wiley.com/en-ie/Remote+Sensing+and+Image+Interpretation%2C+7th+Edition-p-9781119128465)
 51. PUCHA-COFREP, F, A, Fries, F, Cánovas-García, F, Oñate-Valdivieso, V, González and D, Pucha-Cofrep. *Fundamentos de SIG Aplicaciones con ArcGIS*. Online. 2017. [Accessed 29 April 2023]. ISBN 978-9942-28-901-8. Available from: <https://www.researchgate.net/publication/318447525>
 52. USGS. Servicio Geológico de Estados Unidos. *Servicio Geológico de Estados Unidos*. Online. [Accessed 26 May 2023]. Available from: <https://www.usa.gov/es/agencias/servicio-geologico-de-estados-unidos>
 53. CONCYTEC. *Reclamo de ciencia, tecnología e innovación tecnológica* Online. 2018. [Accessed 12 April 2023]. Available from: https://portal.concytec.gob.pe/images/renacyt/reglamento_renacyt_version_final.pdf
 54. HERNÁNDEZ, R and MENDOZA, C. *Metodología de la investigación: las rutas: cuantitativa, cualitativa y mixta*. Online. Mc Graw Hill educación, 2018. [Accessed 7 March 2023]. Available from: <http://repositorio.uasb.edu.bo/handle/54000/1292>
 55. AGUILAR, M and PAZ, J. *Juegos tradicionales para fortalecer el desarrollo de la dimensión emocional en niños y niñas de 5 a 6 años en situación de vulnerabilidad en la institución educativa ciudad córdoba ubicado en la ciudad de Santiago de Cali*. Online. Universidad Santiago de Cali, 2019. [Accessed 8 March 2023]. Available from: <https://docplayer.es/189833870-Maria-janeth-aguilar-banguero-jennifer-paz-vivas.html>
 56. SERVICIO GEOLÓGICO DE ESTADOS UNIDOS USGS. EarthExplorer. Online. [Accessed 29 April 2023]. Available from: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
 57. SCIENCE LANDSAT. Landsat Seen as Stunning Return on Public Investment. NASA. Online. 2015. [Accessed 5 June 2023]. Available from:


- <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/landsat-seen-as-stunning-return-on-public-investment/>
58. ARIZA, A. *Productos LDCM-Landsat 8*. Online. 2013. [Accessed 29 August 2023]. Available from: <https://www.un-spider.org/sites/default/files/LDCM-L8.R1.pdf>
 59. HALL, D and MARTINEC, J. *Remote Sensing of Ice and Snow*. Online. Cambridge University Press, 1986. [Accessed 7 June 2023].
 60. SARGAN, J and BHARGAVA, A. Testing Residuals from Least Squares Regression for Being Generated by the Gaussian Random Walk. *Econometrica*. Online. 1983. Vol. 51, no. 1, p. 153–74. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://econpapers.repec.org/RePEc:ecm:emetrp:v:51:y:1983:i:1:p:153-74>
 61. GUTIERREZ, M. ¿Qué es la autocorrelación? Test de Durbin-Watson. *Todo Econometria y ciencia de datos - Consultora en analisis de datos y ciencia de datos*. Online. 2021. [Accessed 9 June 2023]. Available from: <https://todoeconometria.com/autocorrelacion-dw/>

ANEXOS

Tabla 16. *Presupuesto de la investigación*

Tipo	Recurso	Descripción	Fuente	Monto (S/.)
Recursos Disponibles	Equipo	Laptop	Personal	-
	Equipo	Cámara	Personal	-
Recursos Necesarios	Impresión	Impresión	Personal	200.00
	Impresión	Empastado	Personal	50.00
	Traslado	Pasajes	Personal	300.00
	Papel	Hojas bond	Personal	30.00
	Útiles de oficina	Lapicero y tablero	Personal	50.00
	Varios	Imprevistos	Personal	300.00
			Total	S/. 930.00

Tabla 17. *Formato para la recolección de imágenes satelitales del Nevado Ausangate*

							
FORMATO PARA LA RECOLECCIÓN DE IMÁGENES SATELITALES							
Tesis: “Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco.”							
Tesista			Darwin Cunza Robles				
Zona de estudio			Nevado Ausangate				
N°	AÑO	FECHA DE IMAGEN	SATÉLITE	SENSOR	ÁREA (ha)	ÁREA (km²)	PERÍMETRO (km)
1	1985						
2	1986						
3	1987						
4	1988						
5	1989						
6	1990						
7	1991						
8	1992						
9	1993						
10	1994						
11	1995						
12	1996						
13	1997						
14	1998						
15	1999						
16	2000						
17	2001						
18	2002						
19	2003						
20	2004						
21	2005						
22	2006						
23	2007						
24	2008						

25	2009						
26	2010						
27	2011						
28	2012						
29	2013						
30	2014						
31	2015						
32	2016						
33	2017						
34	2018						
35	2019						
36	2020						

Figura 84. Evidencia de recolección de datos del estudio

1	1985	25/07/1985	LANDSAT-5	TM	4590,2333	195,0868
2	1986	12/07/1986	LANDSAT-5	TM	3954,3582	127,7836
3	1987	05/02/1987	LANDSAT-5	TM	3645,1722	109,3927
4	1988	15/06/1988	LANDSAT-5	TM	3706,0784	110,1075
5	1989	20/07/1989	LANDSAT-5	TM	4127,1092	136,7209
6	1990	04/05/1990	LANDSAT-5	TM	3569,7598	108,8916
7	1991	31/05/1991	LANDSAT-4	TM	3560,5266	111,2557
8	1992	10/06/1992	LANDSAT-5	TM	3571,8984	119,8870
9	1993	29/06/1993	LANDSAT-5	TM	3578,9005	122,8529
10	1994	18/07/1994	LANDSAT-5	TM	3599,5141	119,9706
11	1995	03/06/1995	LANDSAT-5	TM	3390,4872	132,5138
12	1996	21/06/1996	LANDSAT-5	TM	3437,1327	126,0648
13	1997	24/06/1997	LANDSAT-5	TM	3407,5403	119,696106
14	1998	29/07/1998	LANDSAT-5	TM	2738,9035	148,1191
15	1999	30/06/1999	LANDSAT-5	TM	3390,5402	127,6405
16	2000	31/05/2000	LANDSAT-5	TM	3437,1612	113,6393
17	2001	21/07/2001	LANDSAT-5	TM	3776,6278	182,1105
18	2002	05/01/2002	LANDSAT-7	ETM	3842,8633	98,8470
19	2003	27/07/2003	LANDSAT-5	TM	3224,6669	152,7223
20	2004	11/06/2004	LANDSAT-5	TM	2870,0039	133,6669
21	2005	14/06/2005	LANDSAT-5	TM	2734,4144	134,4931
22	2006	03/07/2006	LANDSAT-5	TM	2459,3680	140,1325
23	2007	20/06/2007	LANDSAT-5	TM	2886,7119	126,7346
24	2008	06/06/2008	LANDSAT-5	TM	3158,8253	148,0138
25	2009	09/06/2009	LANDSAT-5	TM	3012,4881	121,9227
26	2010	12/06/2010	LANDSAT-5	TM	2787,5577	112,4789
27	2011	30/05/2011	LANDSAT-5	TM	3315,6076	175,0725
28	2012	1/2012				
29	2013	22/07/2013	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2864,1989	173,2167
30	2014	07/06/2014	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2712,1794	158,7027
31	2015	26/06/2015	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2762,0121	167,3080
32	2016	30/07/2016	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2330,4163	169,3103
33	2017	02/08/2017	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2473,1441	156,8315
34	2018	04/07/2018	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2746,1485	238,3077
35	2019	05/06/2019	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2366,1728	176,8762
36	2020	10/08/2020	LANDSAT-8	OLI-TIRS	2267,6975	141,4970

Tabla 18. *Matriz de consistencia*

Título		Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco		
VARIABLES	PREGUNTA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	
V1: Retroceso de la cobertura glaciar	PG: ¿Cómo retrocedió el glaciar del nevado Ausangate mediante un análisis multitemporal, en la provincia de Quispicanchi, región Cusco?	OEG: Estimar el retroceso glaciar del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal entre los años 1985 - 2020, Cusco.	HG: El análisis multitemporal estima el retroceso glaciar del nevado Ausangate entre los años 1985 – 2020.	
	PE1: PE1: ¿Cuánto de área glaciar se perdió en el nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, en la provincia de Quispicanchi, región Cusco?	OE1: Cuantificar la pérdida del área glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.	HE1: El análisis multitemporal permite cuantificar el área de pérdida del nevado Ausangate desde 1985 a 2020.	
	PE2: ¿Cuánto del perímetro glaciar vario en el nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, de la provincia de Quispicanchi, región Cusco?	OE2: Cuantificar la variación del perímetro glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.	HE2: El análisis multitemporal permite cuantificar la variación del perímetro del nevado Ausangate desde 1985 a 2020.	
V2: Tiempo de permanencia de cobertura glaciar	PE3: ¿Cuánto tiempo permanecerá la cobertura glaciar del nevado Ausangate de acuerdo a un análisis multitemporal, de la provincia de Quispicanchi, región Cusco?	OE3: Estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate, provincia de Quispicanchi, región Cusco.	HE3: El análisis multitemporal permite estimar el tiempo de permanencia de la cobertura glaciar del nevado Ausangate de la provincia de Quispicanchi, región Cusco.	

Tabla 19. Matriz de operacionalización de variables

TITULO					
Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985 – 2020, Cusco					
VARIABLES DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
V1: Retroceso de la cobertura glaciar	Retroceso o disminución de la cobertura de hielo del glaciar de una montaña(7).	El retroceso de la cobertura glaciar se medirá a través de la tendencia de retroceso glaciar a partir del área y perímetro del mismo que se medirán a través del software ArcGIS 10.5 en el campo de los Sistemas de Información Geográfica.	Espacial	Perímetro	km
				Área	km ²
V2: Tiempo de permanencia de cobertura glaciar	Es la estimación del retroceso de la cobertura glaciar expresado como el tiempo máximo en el cual desaparecerá por completo la cobertura glaciar(8).	La predicción de la cobertura glaciar se medirá a través del análisis multitemporal del 1985 al 2020, el cual a partir de la obtención de información geográfica se estimará el tiempo máximo en el cual desaparecerá por completo la cobertura glaciar del Nevado Ausangate.	Temporal	Años (Permanencia en años de la cobertura glaciar)	años

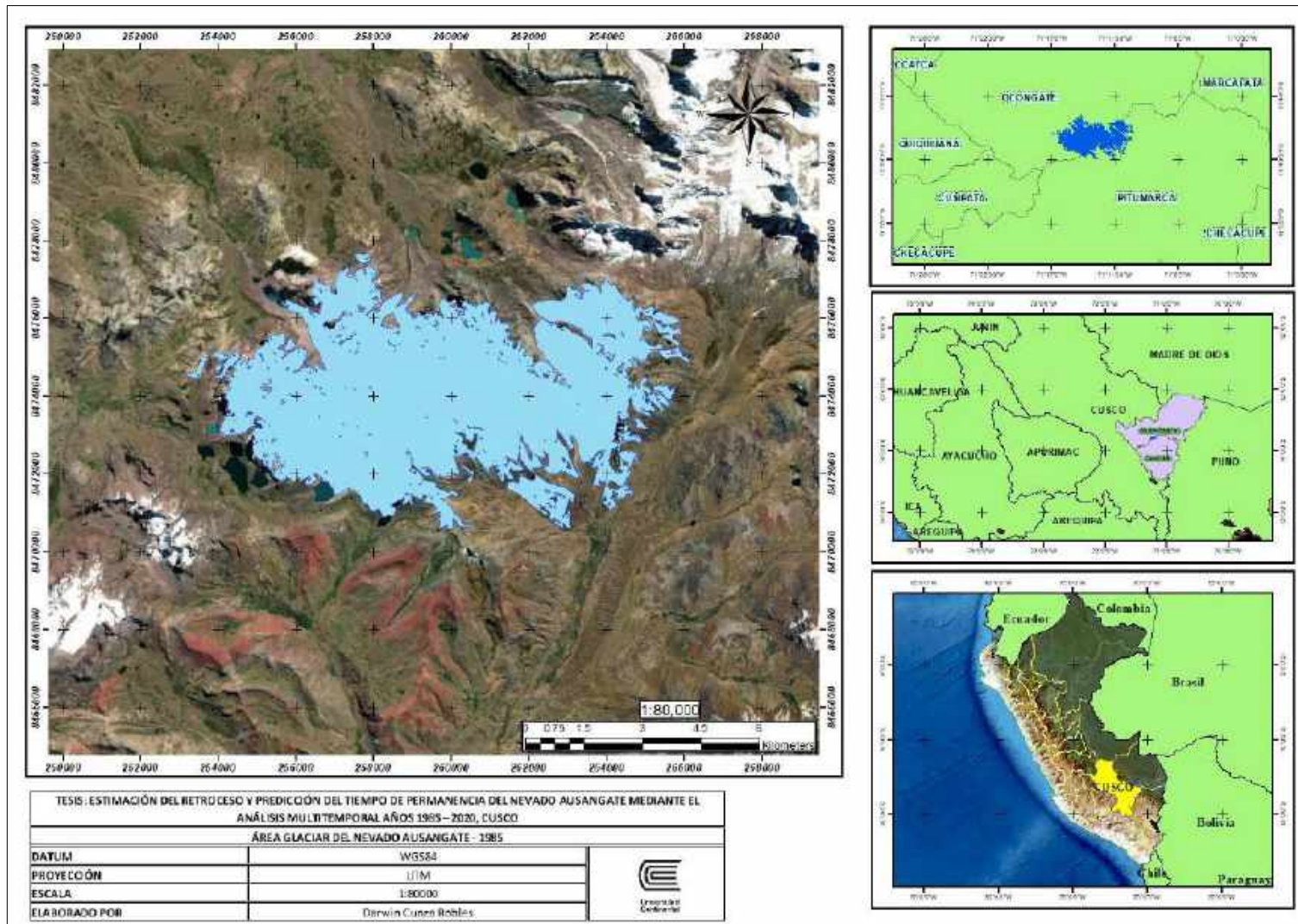


Figura 85. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 1985

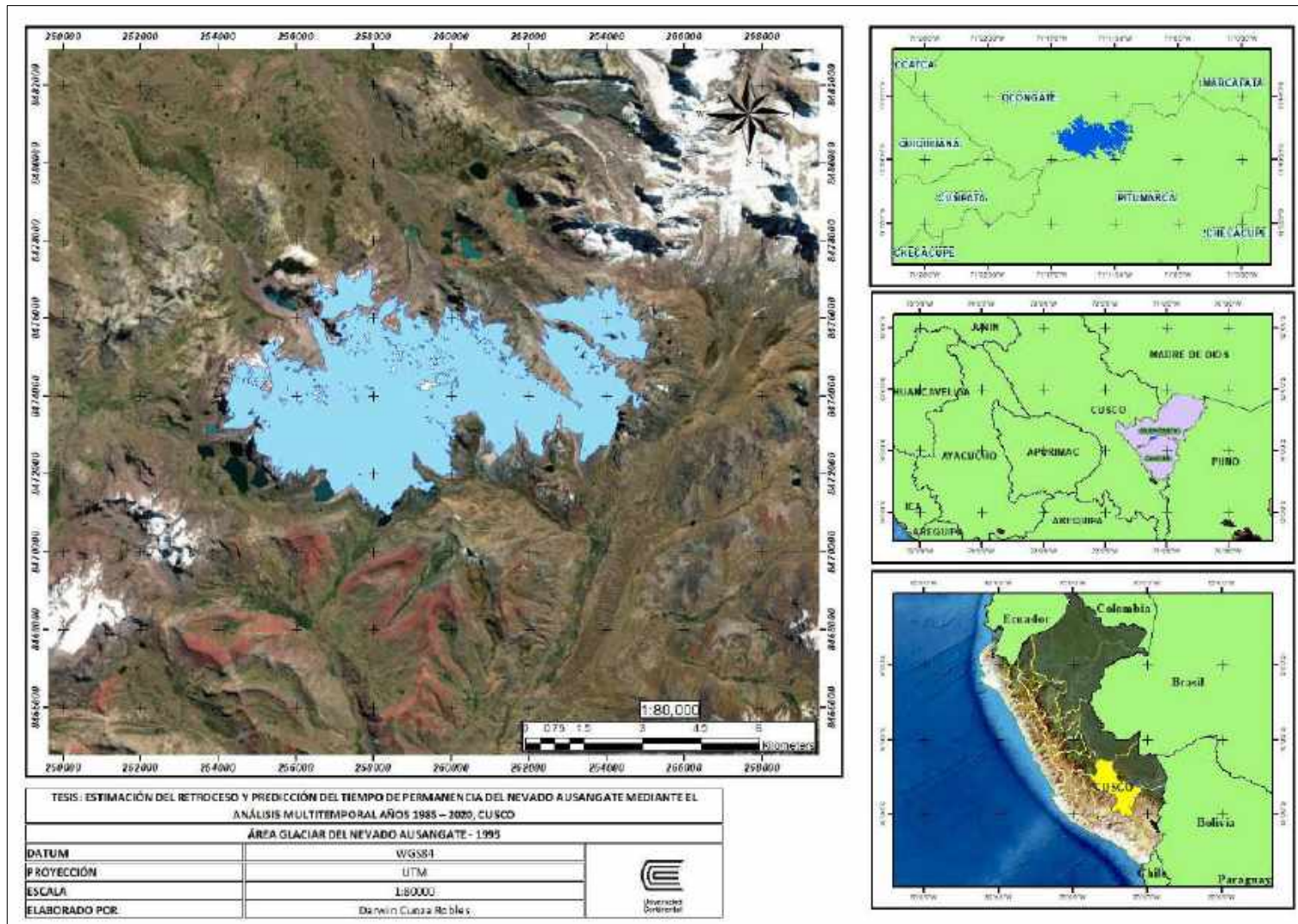


Figura 86. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 1995

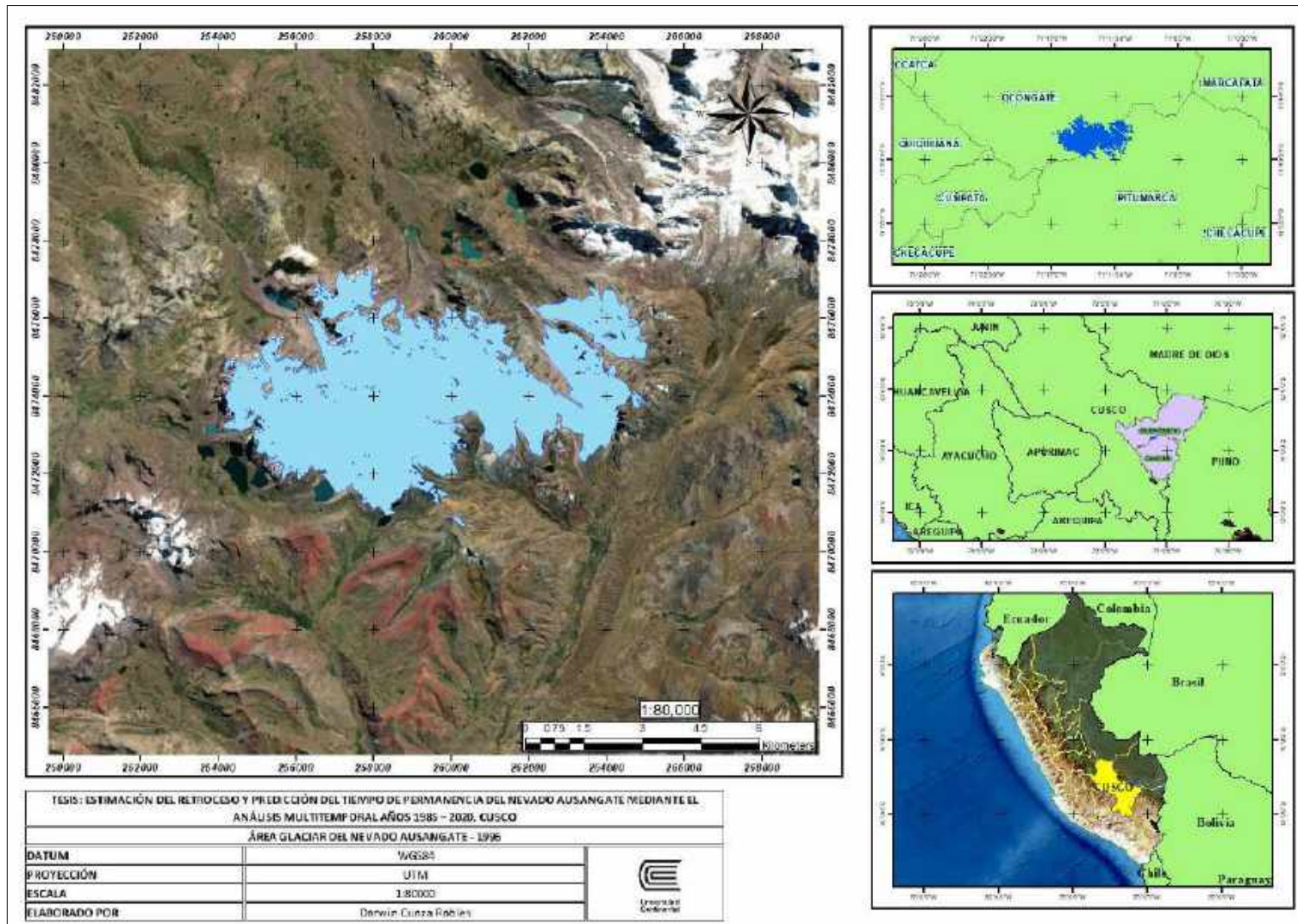


Figura 87. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 1996

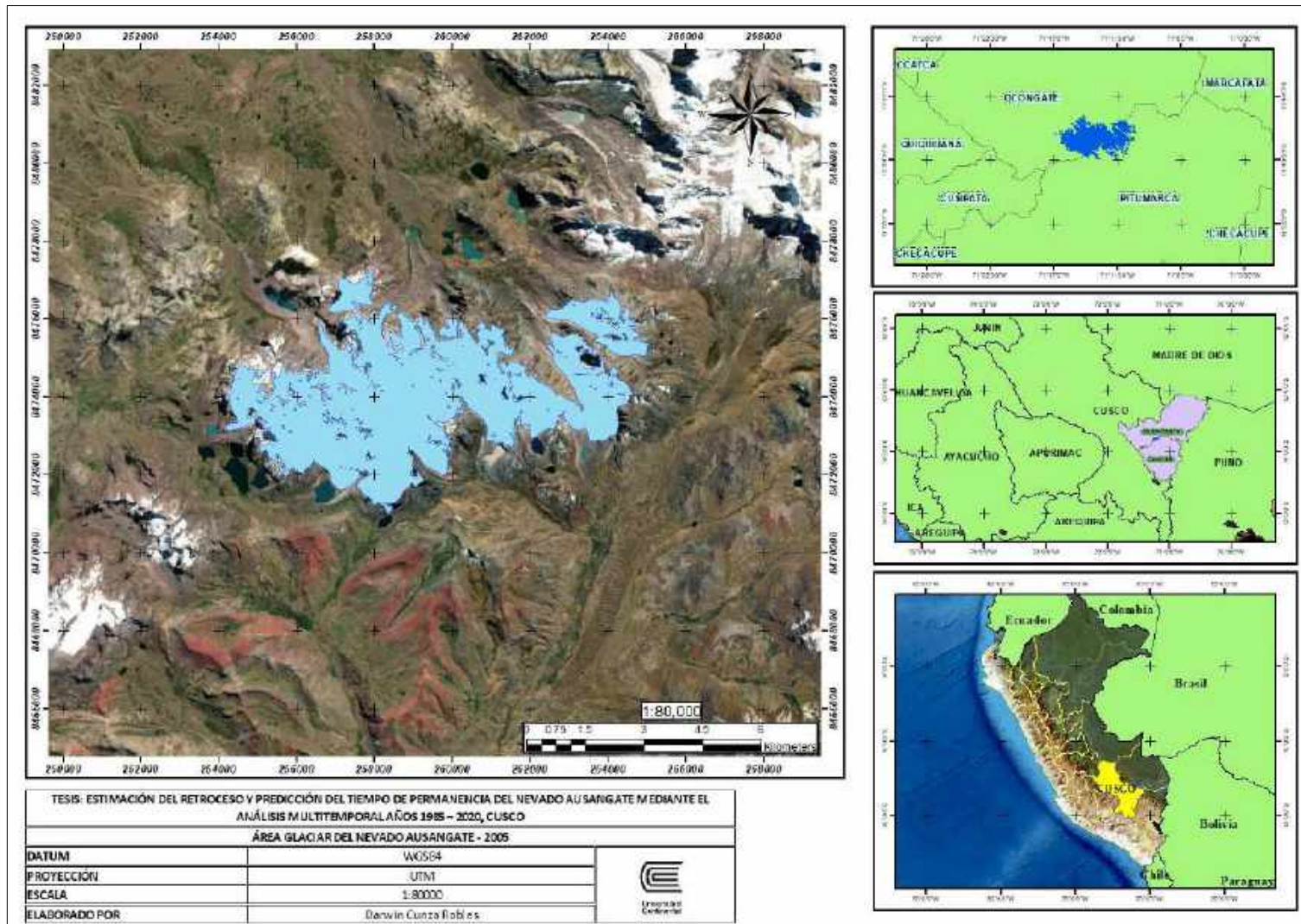


Figura 88. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 2005

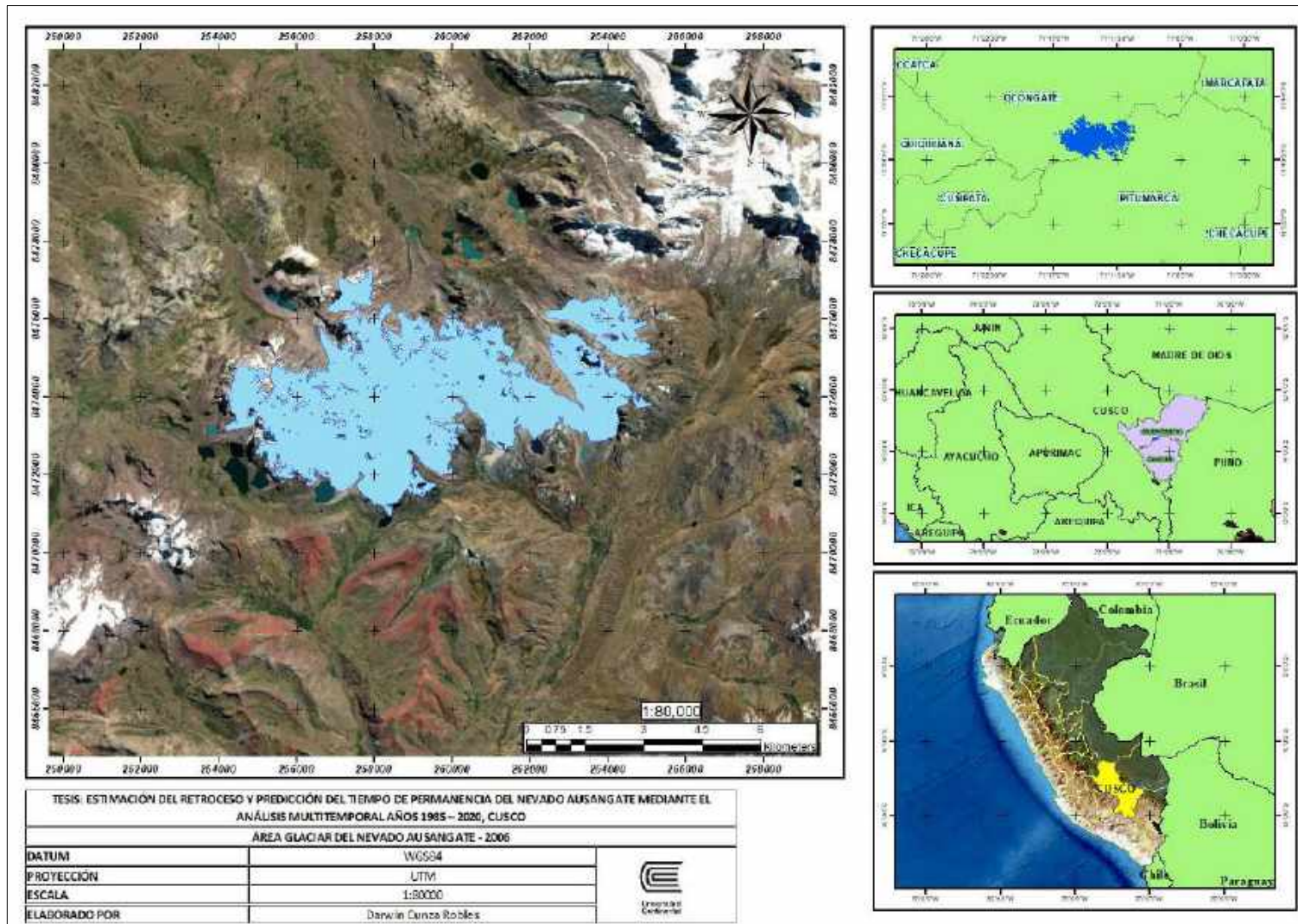


Figura 89. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 1985

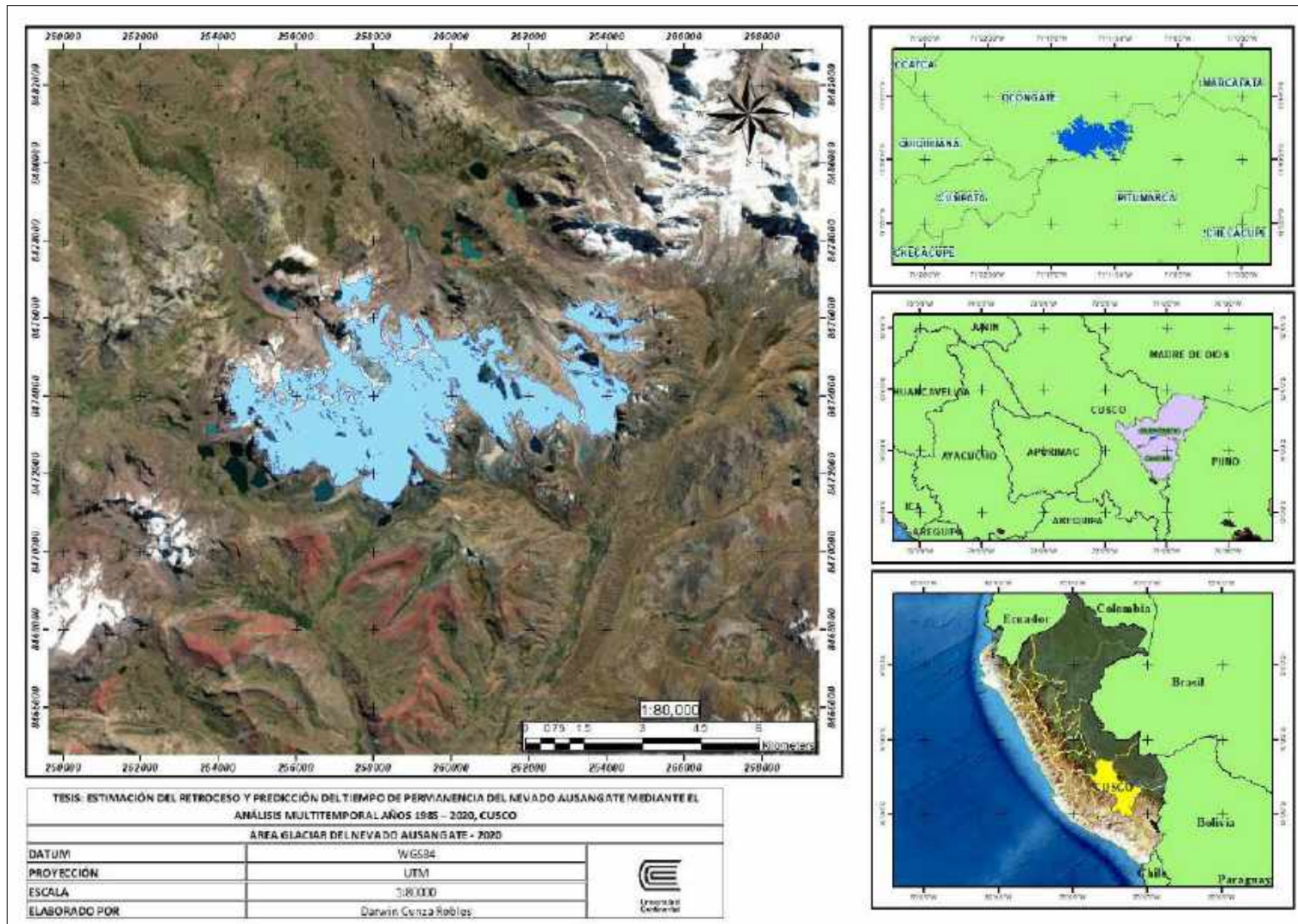


Figura 90. Área glaciaria del Nevado Ausangate para el año 1985

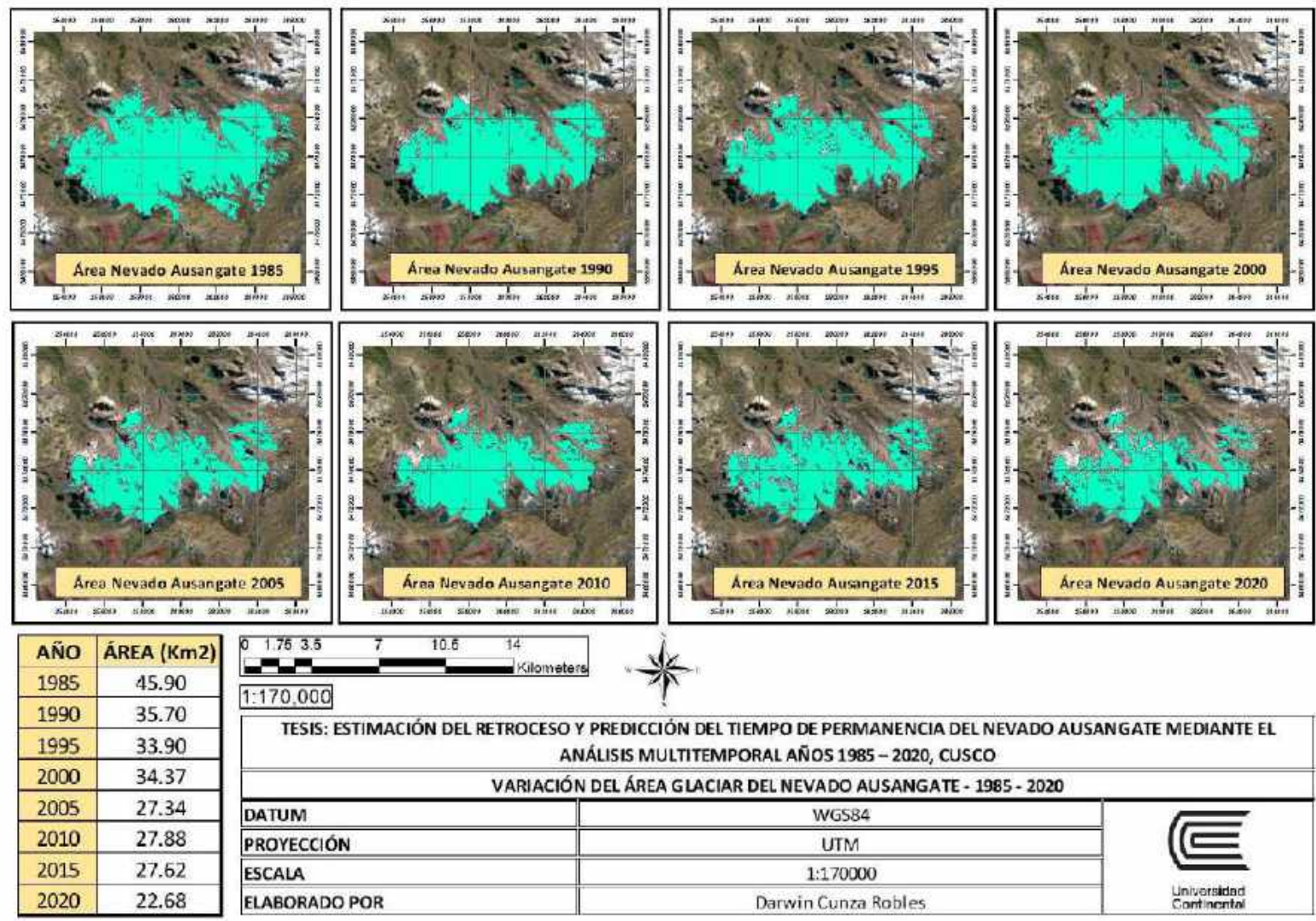


Figura 91. Mapa de la variación del área glaciár del Nevado Ausangate en intervalos de 5 años durante el periodo de 1985 a 2020

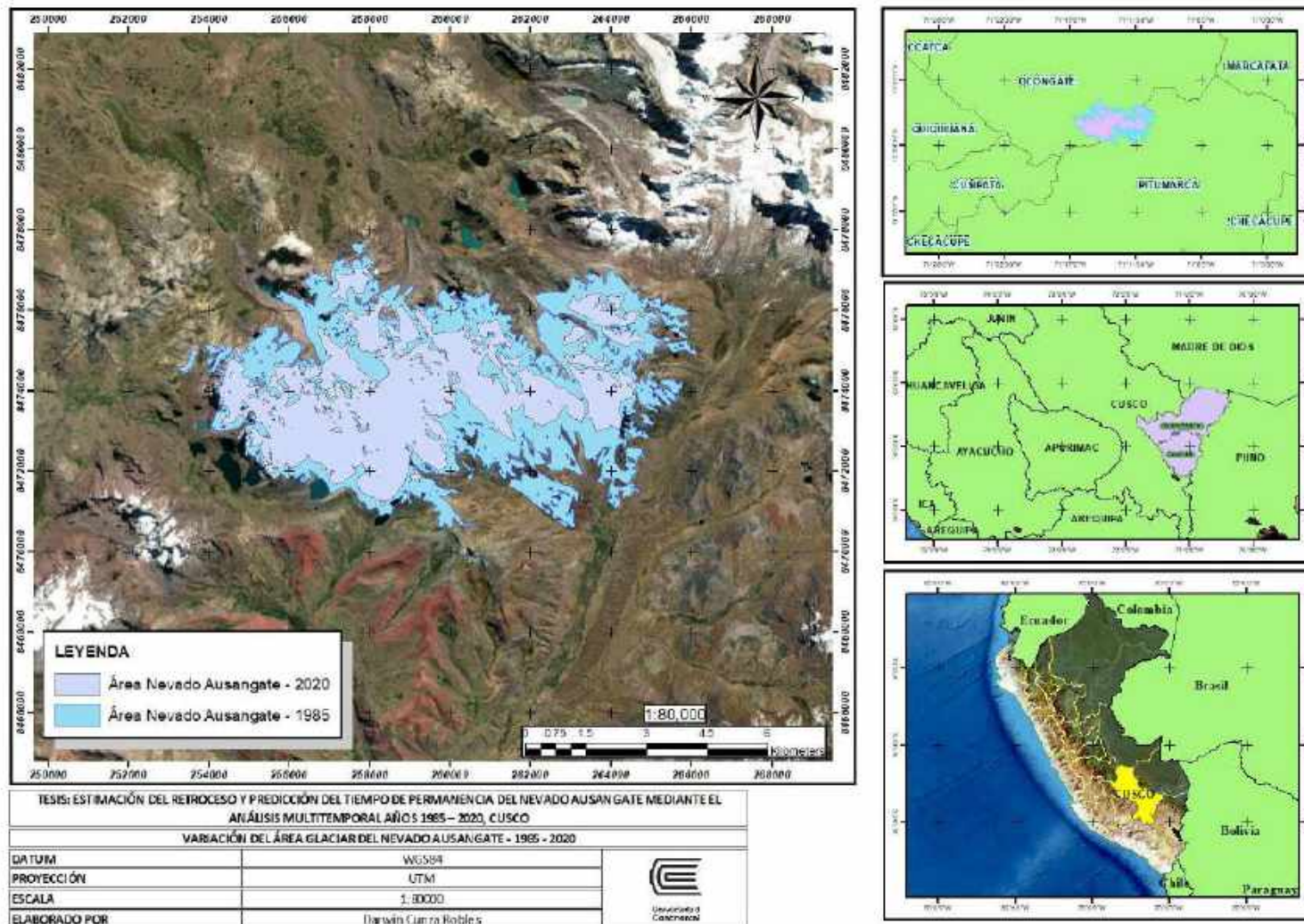


Figura 92. Variación del área glaciaria del Nevado Ausangate durante el periodo de 1985 a 2020